

DAVID ALEXANDER URBINA LEAL

Caracterização microestrutural e avaliação da resistência à corrosão na manufatura aditiva do ER308L pelo processo TIG.

Versão original

São Paulo

2022

DAVID ALEXANDER URBINA LEAL  
(Engenheiro Metalurgista pela Universidade Industrial de Santander-Colômbia em  
2016)

Caracterização microestrutural e avaliação da resistência à corrosão na manufatura  
aditiva do ER308L pelo processo TIG.

Versão original

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Mestre em  
Ciências.

São Paulo  
2022

DAVID ALEXANDER URBINA LEAL

(Engenheiro Metalurgista pela Universidade Industrial de Santander-Colômbia em  
2016)

Caracterização microestrutural e avaliação da resistência à corrosão na manufatura  
aditiva do ER308L pelo processo TIG.

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Mestre em  
Ciências.

Área de Concentração:  
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Franco de  
Monlevade

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

#### Catálogo-na-publicação

, David Alexander Urbina Leal

Caracterização microestructural e avaliação da resistência à corrosão na manufatura aditiva do ER308L pelo processo TIG. / D. A. U. L. -- São Paulo, 2022.

102 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Manufatura Aditiva. TIG. Aço Inoxidável. I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

“Si supiese qué es lo que estoy haciendo, no lo llamaría investigación, ¿verdad?”

Albert Einstein

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho para meus pais, minha esposa, meu filho e meus irmãos.

## AGRADECIMENTOS.

Agradeço a Deus por me dar a vida e saúde para conseguir continuar na minha formação profissional e pessoal.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr Eduardo Franco de Monlevade, por me acolher, o apoio, a paciência e orientação para alcançar a finalização deste trabalho.

Agradeço a meus pais Juan de Dios y Mavelia por serem os forjadores desta etapa, também meus irmãos Juan Fernando e Oscar Javier por me apoiam e acompanham ao longo da minha vida.

Agradeço a meu grande filho Thomas David e minha companheira de vida Diana Sofia por me dar fortaleza, compreensão e carinho para levar mais fácil a conclusão deste ciclo.

Agradeço à CAPES pelo auxílio financeiro na forma de bolsa de mestrado.

Agradeço aos meus colegas do PMT que fizeram minha estância mais fácil com a companhia, conselhos e a torcida nesta etapa.

Agradeço aos professores e funcionários do PMT por me orientar e ajudar em diversos processos, especialmente ao Antônio Livio da Silva Nunes, Danilo Augusto de Almeida Filho, Dr Daniel Rodriguez Jr, Suellen Alves Nappi, Regina Aparecida Soares e Joana Francisca de Sousa.

Agradeço aos meus amigos- irmãos de luta, que foram extremamente importantes para me dar fortaleza, ajuda, conhecimento e orientação: Antonio do Nascimento Silva Alves. Cleber do Prado Ferreira Junior, Jaime Casanova Soeiro Jr, Jeferson José de Carvalho, Jhoan Sebastian Guzmán Hernández, José Gustavo de Oliveira, Oscar Mauricio Prada Ramirez e Saul Hissaci de Souza.

Agradeço a meus colegas da especialização em engenharia de soldagem PECE-USP.

Agradeço ao professor Sérgio Duarte Brandi por mostrar-me o caminho para iniciar o mestrado no PMT, também os ensinamentos com relação ao mundo da soldagem.

Agradeço a todos meus amigos brasileiros que fui conhecendo ao longo da minha estadia em São Paulo e Brasil: Jefferson Mendes, Lucas Prestes, Henricco Santos, Simone Gomes, Rafael Machado Motta, Railton Castro, Leandro Tanure, Ana Carolina Paiva, Thomas Meneses, Diego Sansalone, Dona Raquel Pereira, Edipo Sousa e as demais pessoas que me tem oferecido o carinho pra me sentir como em casa.



## RESUMO

**Palavras chave:** Manufatura Aditiva. TIG. Aço Inoxidável.

O interesse pela Manufatura Aditiva tem crescido rapidamente nos últimos anos em diversas áreas desenvolvendo distintos métodos, tecnologias e materiais na fabricação peças de geometrias relativamente complexas e de grandes proporções com alta integridade estrutural e operacional, utilizando o princípio deposição camada por camada. Destacando-se assim a Manufatura Aditiva por Arco Elétrico uma preferência para as indústrias automotiva e aeroespacial, devido a sua alta taxa de deposição e qualidade. Neste estudo, utilizou-se o processo de soldagem TIG mecanizado para a fabricação dos protótipos, tendo o arco elétrico como fonte de calor e ao ER 308L como consumível. Com o propósito a caracterização microestrutural e avaliação a resistência à corrosão por pite segundo a norma ASTM G 48 método A, nas condições de deposição de material estipuladas tais como: deposição unidirecional e deposição bidirecional. Obtendo microestruturas do tipo ferrita-austenita e morfologias de ferrita tanto acicular como vermicular. Também apresentaram resistência a corrosão ao longo da microestrutura toda nas duas condições de temperatura estabelecidas na norma.

## ABSTRACT

**Keywords:** Additive Manufacturing. TIG. Stainless Steel.

The interest in Additive Manufacturing has grown rapidly in recent years in several areas developing different methods, technologies, and materials in the manufacture of parts of relatively complex geometries and large proportions with high structural and operational integrity, using the deposition principle layer by layer. Electric Arc Additive Manufacturing stands out as a preference for the automotive and aerospace industries, due to its high deposition rate and quality. In this study, the mechanized TIG welding process was used to manufacture the prototypes, with the electric arc as heat source and the ER 308L as consumable. With the purpose of microstructural characterization and evaluation of the pitting corrosion resistance according to ASTM G 48 method A, in the stipulated material deposition conditions such as: unidirectional deposition and bidirectional deposition. Obtaining ferrite-austenite microstructures and both acicular and vermicular ferrite morphologies. They also showed corrosion resistance along the entire microstructure in the two temperature conditions established in the standard.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Carcaça de teste cilíndrica de 79 toneladas fabricada por meio soldagem de formas com o processo soldagem arco submerso[5].	19
Figura 2-1. Processo genérico da manufatura aditiva, constituído em 8 etapas [2].	22
Figura 2-2. Situação qualitativa da manufatura aditiva na produção relativa de componentes metálicos em comparação a outros processos (Moldagem por injeção de metal, Sinterização – Metalurgia do pó) [12].	25
Figura 2-3. Exemplos de componentes baseados em soldagem 3D criados manualmente por deposição de camadas utilizando processo de soldagem a arco eléctrico e eletrodo revestido [1,17].	29
Figura 2-4. Diagrama esquemático de a) GMAW b) TIG e c) PAW [21].	30
Figura 2-5. Fabricação de meio toróide mediante o método de rotação vertical [21].	31
2-6 Processo TIG [16].	34
Figura 2-7 . Efeito das três diferentes polaridades no TIG adaptado [16].	38
Figura 2-8. Ação de limpeza da superfície no TIG com corrente contínua eletrodo positivo, adaptado [16].	39
Figura 2-9. O diagrama WRC 1992 para prever o teor de ferrita e modo de solidificação dos aços inoxidáveis austeníticos e duplex [19].	46
Figura 2-10 Mecanismo de crescimento profundo durante a corrosão por pite [46].	51
Figura 4-1 Estrutura do desenvolvimento da pesquisa.	54
Figura 4-2. Configuração experimental do ajuste de parâmetros da soldagem realizada para manufatura aditiva do ER308L a) condição 1 e b) condição 2.	56
Figura 4-3 Figura ilustrativa do ensaio de corrosão ASTM G48 prática A para manufatura aditiva do ER308L realizado a $22 \pm 2^\circ\text{C}$ .	60
Figura 4-4 Configuração dos equipamentos utilizados na técnica LEIS para manufatura aditiva do ER308L.	61
Figura 5-1 Diagrama WRC 1992 utilizado para calcular FN do AISI304L e do ER308L.	64
Figura 5-2 Fração volumétrica de ferrita medida a través de microscopia ótica para o metal de adição ER308L, nos CPexp.	65
Figura 5-3 Fração volumétrica de ferrita medido a través de microscopia ótica para o metal base AISI 304L, medidos em três diferentes regiões.	65

Figura 5-4 Fração volumétrica de ferrita medida a través de microscopia ótica para o metal de adição ER308L, nos CP1 e CP2. ....	66
Figura 5-5 Morfologia da ferrita em função da fração volumétrica da mesma [35,50] .....	66
Figura 5-6 Macrografia da manufatura aditiva do ER308L com o processo TIG , CPexp. ....	68
Figura 5-7 . Macrografia da manufatura aditiva do ER308L com o processo TIG, CP1.. ....	68
Figura 5-8 Macrografia da manufatura aditiva do ER308L com o processo TIG , CP2. ....	69
Figura 5-9 Micrografias da manufatura aditiva do ER308L, CPexp a) região superior, b) região intermediaria e c) região inferior. Aumento 200x.....	71
Figura 5-10 Micrografias da manufatura aditiva do ER308L, CPexp a) região superior, b) região intermediaria e c) região inferior. Aumento 500x.....	72
Figura 5-11 Micrografias da manufatura aditiva do ER308L, CP1 a) região superior, b) região intermediaria e c) região inferior. Aumento 200x.....	73
Figura 5-12 Micrografias da manufatura aditiva do ER308L, CP1 a) região superior, b) região intermediaria e c) região inferior. Aumento 500x.....	74
Figura 5-13 Micrografias da manufatura aditiva do ER308L, CP2 a) região superior, b) região intermediaria e c) região inferior. Aumento 200x.....	75
Figura 5-14 Micrografias da manufatura aditiva do ER308L, CP1 a) região superior, b) região intermediaria e c) região inferior. Aumento 500x.....	76
Figura 5-15 Posição relativa dos quatro modelos de solidificação dos aços inoxidáveis austeníticos no diagrama pseudobinario. Adaptado [52-53]. ....	77
Figura 5-16 Micrografias por microscopia eletrônico de varredura (MEV) a) Região de transição substrato e primeiro cordão CP1, b) Transição de uma cada e outra do CP1, c) microestrutura de uma camada n do CP1 1000x e d) Microestrutura de uma camada n do CP1 2500x.....	78
Figura 5-17 Análise de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da manufatura aditiva do ER308L. ....	79
Figura 5-18 Mapa de microdureza vickers CPexp.....	80
Figura 5-19 Mapa de microdureza vickers CP1 .....	81
Figura 5-20 Mapa de microdureza vickers CP2. ....	82

Figura 5-21 Ensaio da ASTM G48 prática A para o CPexp nas temperaturas $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ com substrato. ....	84
Figura 5-22 Ensaio da ASTM G48 prática A para o CPexp nas temperaturas $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sem substrato. ....	85
Figura 5-23 Ensaio da ASTM G48 prática A para o CP1 nas temperaturas $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ com substrato. ....	86
Figura 5-24 Ensaio da ASTM G48 prática A para o CP1 nas temperaturas $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sem substrato. ....	87
Figura 5-25 Ensaio da ASTM G48 prática A para o CP2 nas temperaturas $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ com substrato. ....	88
Figura 5-26 Ensaio da ASTM G48 prática A para o CP2 nas temperaturas $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sem substrato. ....	89
Figura 5-27 Mapas de LEIS para CPexp para tempos de imersão até 18h em 0,1M $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . ....	90
Figura 5-28 Mapas de LEIS para o CP1 para tempos de imersão até 24h em 0,1M $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . ....	91
Figura 5-29 Mapas de LEIS para o CP2 para tempos de imersão até 24h em 0,1M $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . ....	91
Figura 5-30 Mapas de LEIS para as amostras: (a)1D e (b) 2D (na mesma escala) para tempos de imersão até 24h em 0,1M $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . ....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Classificação da manufatura aditiva para componentes metálicos [21].	28
Tabela 2-2. Classificação AWS e a análise química dos eletrodos para soldagem TIG (AWS A5.12-69) [13].	36
Tabela 2-3. Características dos gases de proteção utilizados no processo TIG [13].	37
Tabela 2-4. Propriedades mecânicas na mínima faixa de temperatura dos aços inoxidáveis austeníticos forjados[31].	43
Tabela 2-5. Tipos de corrosão [41].	48
Tabela 4-1. Parâmetros de soldagem.	56
Tabela 5-1. Composição química do AISI 304L mediante espectrômetro de emissão ótica.	62
Tabela 5-2. Composição química do ER308L mediante espectrômetro de emissão ótica.	62
Tabela 5-3. Cálculo de Creq e Nieq para cada material.	63

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

AISI: American Iron and Steel Institute

CFC: Cúbica de Face Centrada

CCC: Cúbica de Corpo Centrada

ZAC: Zona Afetada pelo Calor

CAD: Computer Aided Design

ASTM: American Society for Testing and Materials

AWS: American Welding Society

TIG: Tungsten Inert Gas

AM: Additive Manufacturing

CP: Corpo de prova

MB: Metal base

LEIS: Espectroscopia de impedância eletroquímica local.

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	Manufatura Aditiva. ....	21
2.1.1	Vantagens e desvantagens da MA. ....	23
2.1.2	Manufatura de arco elétrico por alimentação de arame - Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).....	27
2.2	Processo de Soldagem. ....	32
2.2.1	Processo de Soldagem TIG.....	33
2.3	Aços Inoxidáveis. ....	39
2.3.1	Aços Inoxidáveis Austeníticos. ....	41
2.3.2	Propriedades mecânicas. ....	42
2.3.3	Solidificação de aços inoxidáveis austeníticos. ....	43
2.3.4	Soldagem de aços inoxidáveis. ....	44
2.3.5	Diagrama WRC- 1992 ....	45
2.4	Corrosão. ....	46
2.4.1	Ensaio da ASTM G48.....	51
2.4.2	Espectroscopia de impedância eletroquímica local – Local Electrochemical Impedence Spectroscopy (LEIS). ....	51
3	OBJETIVOS.....	53
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	54
4.1	Execução de Soldagem. ....	54
4.1.1	Parâmetros de soldagem.....	55
4.2	Composição química.....	57
4.3	Caracterização microestructural.....	57
4.3.1	Preparação metalográfica.....	57
4.3.2	Macrografia.....	58



4.3.3	Microscopia ótica.....	58
4.4	Ensaio de corrosão.....	59
4.4.1	Ensaio de corrosão testes de Pite. ....	59
4.4.2	Espectroscopia de impedância eletroquímica local (LEIS). ....	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	62
5.1	Análise Química. ....	62
5.2	Caracterização Metalográfica.....	63
5.2.1	Quantificação da fração volumétrica de ferrita. ....	63
5.2.2	Macrografia.....	67
5.2.3	Caracterização microestructural por microscopia ótica. ....	69
5.2.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	77
5.2.5	Espectroscopia de dispersão de energia (EDS).....	79
5.3	Ensaio de microdureza Vickers.....	79
5.4	Ensaio de corrosão.....	83
5.4.1	ASTM G48 prática A.....	83
5.4.2	LEIS.....	90
6	CONCLUSÕES .....	93
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A manufatura aditiva vem sendo considerada uma relevante componente da “quarta revolução industrial”, indústria 4.0, devido à sua integração de sistemas de produção inteligente e novas tecnologias computacionais[1]. O processo de manufatura aditiva é utilizado para a fabricação de componentes sólidos com o princípio de deposição contínua de camadas. Esses componentes sólidos se denominam com o termo de protótipos, pelo quais podem ser feitos com materiais poliméricos, cerâmicos, metálicos e também compósitos; sendo os materiais poliméricos de maior aplicação [2,3].

Os processos de manufatura aditiva são substancialmente diferentes aos processos de fabricação tradicionais tais como, metalurgia do pó, extrusão, corte, fundição, usinagem e soldagem. A diferença particular reside no fato de que nos processos de fabricação tradicionais, a modelagem dos materiais é focada em todo o domínio físico da peça desejada, ao contrário dos processos de manufatura aditiva em que ocorre principalmente na formação dos elementos (filamentos e camadas) como um todo obtendo um protótipo desejado[4].

Os grandes avanços da manufatura aditiva vêm acontecendo desde muito tempo atrás. Citando-se assim, na década dos anos 70s na Alemanha Ocidental, nas quais empresas como Thyssen, Krupp ou Sulzer e o Ministério Federal Alemão de Pesquisa e Desenvolvimento (*BMBF siglas em alemão*) investiram na criação de tecnologias de fabricação mais eficientes e com uma alta taxa de deposição de material metálico. Estas tecnologias foram direcionadas aos processos de soldagem a arco elétrico tais como: SAW, PAW, GMAW e TIG; concebendo assim a manufatura aditiva por arco elétrico com técnicas como soldagem de formas (*Shape Welding-SW*), tecnologia de fusão de formas (*Shape Melting Technology- SMT*), deposição de metais (*Shape Metals Deposition- SMD*), a soldagem 3D entre outros[5].

De outra maneira, a manufatura aditiva por arco elétrico se define como aquela combinação de tecnologias de soldagem de arco elétrico e alimentação de material especificamente através de arame cumprindo os propósitos e princípios da Manufatura Aditiva para construção de peças de médio e grande porte com altos requerimentos mecânicos e estruturais principalmente na indústria aeronáutica. No

entanto, a manufatura aditiva por arco elétrico ainda não tem o potencial comercial desejável sendo comparada com outras técnicas da manufatura aditiva (por causa dos desafios e aperfeiçoamento do processo, tais como: distorção e tensões residuais causado pelo excessivo aporte de calor, geometrias do cordão de solda e acabamento superficial[6,7].

Na literatura encontram-se numerosas pesquisas da manufatura aditiva por arco elétrico relacionadas com a produção de componentes de alto valor agregado como ligas de titânio, alumínio, níquel e aços inoxidáveis; sendo as duas primeiras as mais empregadas[8]. Encontra-se como um grande exemplo a fabricação de um cilindro oco de 79 toneladas de uma liga MnMoNi por meio de deposição de múltiplas camadas de soldagem pelo processo de Soldagem arco submerso, ilustrado na Figura 1-1 [5].

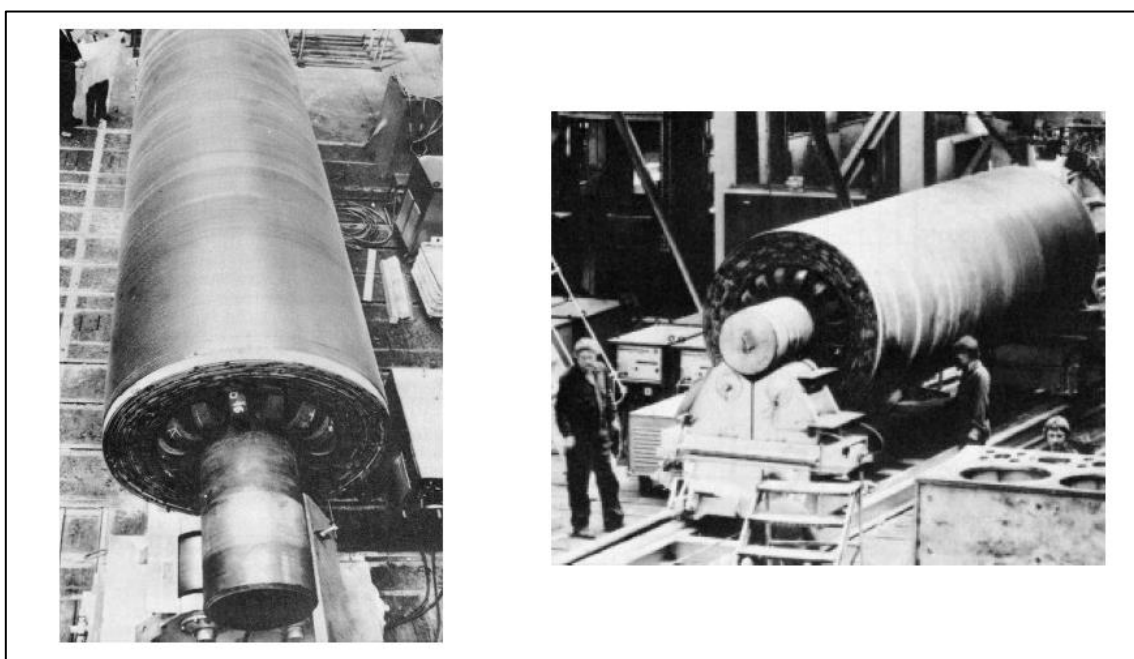


Figura 1-1 Carcaça de teste cilíndrica de 79 toneladas fabricada por meio soldagem de formas com o processo soldagem arco submerso[5].

Esta pesquisa, tem como intuito a análise de características microestruturais e da resistência à corrosão da manufatura aditiva por arco elétrico por meio do processo de soldagem TIG mecanizado nas condições de deposição unidirecional e bidirecional dos protótipos construídos com uma geometria de parede. O material depositado corresponde a um aço inoxidável austenítico 308L, caracterizando-se por sua composição química 18%Cr – 8%Ni, boa conformação mecânica, resistência

mecânica e principalmente resistência à corrosão[9]. Foram feitos dois protótipos, com uma altura de 15 camadas, tendo controle da temperatura interpassa em cada um dos cordões utilizados bem como a realização de um preaquecimento inicial do substrato (aço inoxidável austenítico 304L). Empregaram-se técnicas de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de dispersão de energia (EDS) para realizar a caracterização microestrutural. Com relação da resistência à corrosão utilizou-se a norma ASTM G48 prática A, para avaliação da corrosão a pite nas temperaturas  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 2^\circ\text{C}$ , indicadas respectivamente na norma.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Manufatura Aditiva.

Na última década, a tecnologia da manufatura aditiva tem vivenciado um crescimento e integração rápida dentro da indústria. Essa técnica é caracterizada pela deposição sucessiva de camadas livres construídas em um plano; produzindo-se assim protótipos ou peças de diversos materiais, designs, de alta complexidade geométrica e qualidade com ajuda de modelos computacionais estruturais [10].

Previamente, as tecnologias nas quais se criavam rapidamente protótipos físicos por meio de desenhos computacionais (computer aided design, CAD) e deposição de camadas de material eram denominadas com o termo de *Rapid Prototyping*. Com o progresso desta técnica de fabricação surgiram outros nomes para poder expressar melhor o que representa esta tecnologia, como: *3D printing*, *Solid Free Form (SFF)*, *Layer Fabrication*, *Manufacturing by layers*, *Electron Beam Melting (EBMD)*, e entre outras [3,11,12].

A indústria adotou estes termos com o objetivo de designar e representar em um modelo base ou protótipo de um objeto desde a etapa inicial até a versão final da fabricação; ajudando assim a validar a parte do desenho e obter um produto no mercado o mais rápido possível com as características e propriedades específicas e confiáveis. Considerando as limitações dos termos utilizados, o comitê técnico da ASTM (American Society for Testing Materials) abrangeu a Manufatura Aditiva como o nome para este tipo de fabricação. O intuito desta nova nomenclatura é conveniente já que algumas máquinas com esta tecnologia podem construir objetos finais a partir de modelos das partes gerados em CAD sem necessidade de um planejamento adicional[3,11].

Além da definição da manufatura aditiva de fabricação de modelos tridimensionais, tem-se uma filosofia conhecida como as “3Fs” *Form, Fit and Function*, que em conjunto com outras tecnologias criam cadeias de processos de desenvolvimento de produtos com menores tempos e custos. Na Figura 2-1 se exemplifica o processo da manufatura aditiva de uma forma genérica, contendo várias

etapas como planejamento no CAD, iterações e simulações, configurações de equipamento, construção, remoção de material, fase pós processo (acabamento superficial e pintura) e aplicação. Enfatiza-se que só é um processo genérico, ou seja, que as diversas tecnologias de manufatura aditiva podem ter menos ou mais estágios na produção dos protótipos, de acordo com a fonte de energia, o material a depositar, o design e outros parâmetros a utilizar. [2,3,12].

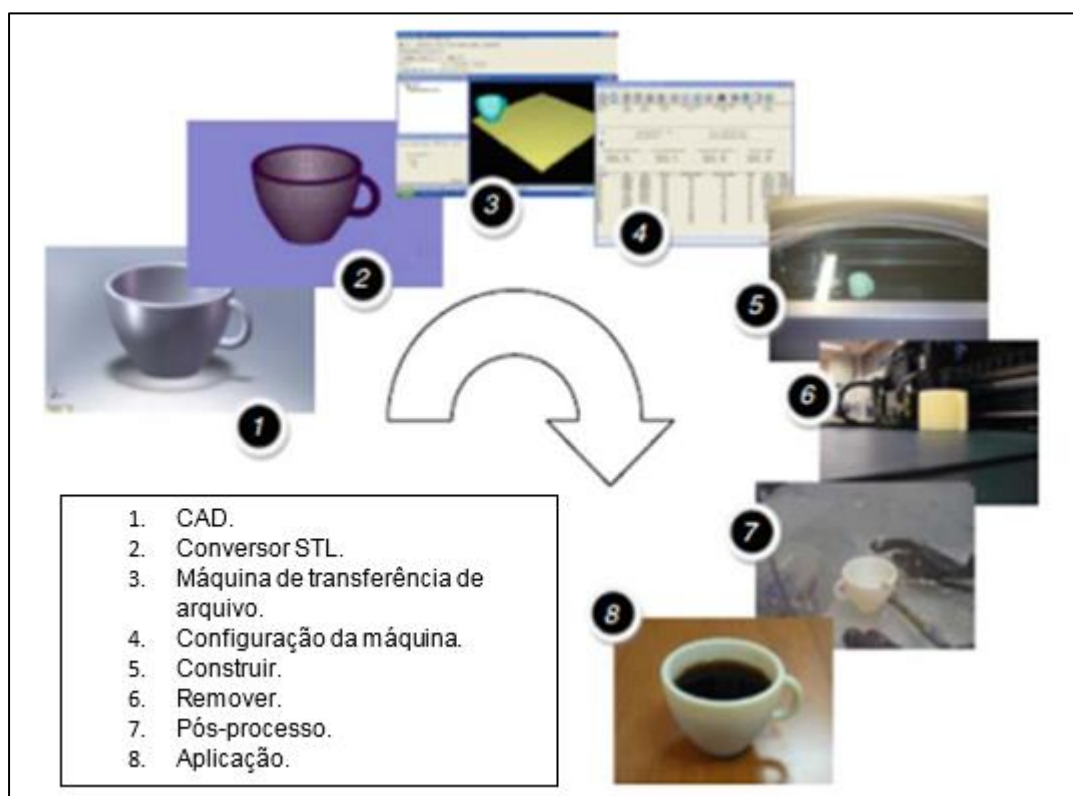


Figura 2-1. Processo genérico da manufatura aditiva, constituído em 8 etapas [2].

A tecnologia da manufatura aditiva veio de uma série de resultados e desenvolvimentos de outros diversos setores tecnológicos; como no caso anterior se citava do CAD. Assim mesmo, a manufatura aditiva aproveita ao máximo as principais características da tecnologia computacional envolvendo capacidade gráfica e de processamento, controle da máquina, networking e integração. À parte das tecnologias computacionais, a manufatura aditiva estimulou o desenvolvimento de outras tecnologias ao longo da sua trajetória como é no caso dos sistemas a lasers. As razões do laser abranger no campo da manufatura aditiva são porque possui alta intensidade e alto feixe colimado de energia a uma grande velocidade de movimentação de uma forma controlada pelo uso de espelhos direcionais.

Conjuntamente, o laser é um candidato ideal para o requerimento da fusão de diversos tipos de matérias levando em conta seus mecanismos de transformações[3,4].

Portanto, o princípio chave estabelecido na manufatura aditiva é o uso de camadas como seções transversais finitas 2D de modelos 3D. A maioria dos processos de manufatura aditiva utiliza este método da deposição de camadas na construção das partes pela simplicidade na produção de objetos 3D. Se pode citar um exemplo clássico sobre este princípio é utilizado pelos cartógrafos; eles empregam linhas de alturas constantes para representar montanhas e demais relevos geográficos; como também, os arquitetos se ajudam deste método para representar áreas planejadas[2,3,13].

A tecnologia da manufatura aditiva originalmente se destacou pelo desenvolvimento entorno de materiais poliméricos, ceras e laminados de papel; bem como em materiais que se encontravam disponíveis e utilizados em outros processos de fabricação, no caso dos metais, cerâmicas e compósitos. A seleção do material para realizar a manufatura aditiva está fortemente ligado com o tipo de processo a utilizar, fonte de energia e aplicação final do produto. Quando se faz referência a processos como feixe de elétrons e Laser são comumente empregados os pós de ligas como material depositado, devido a facilidade da alimentação e da fusão controlada[14].

### 2.1.1 Vantagens e desvantagens da MA.

Embora dita diferença entre a manufatura aditiva com os processos tradicionais de fabricação; aponta-se que a tecnologia da manufatura aditiva se tornou possível pela constante integração desses sistemas tradicionais de fabricação com as diversas tecnologias tais como laser, feixe de elétrons e arco elétrico[3,13].

A peculiar genética da manufatura aditiva permite ser atraída e implementada para uso industrial, em virtude de uma série de vantagens sobre os métodos tradicionais de fabricação. As vantagens decorrem da faculdade das máquinas de

criar geometrias complexas, versatilidade, otimização e emprego de diferentes materiais usando um sistema de produção camada por camada [4,12].

A primeira vantagem, a fabricação de peças com geometrias complexas é devida que em alguns tipos de manufatura aditiva não existem restrições de desenho. Em outras palavras, com ajuda da manufatura aditiva encontra-se a capacidade de fabricar aquelas peças que não se podiam ser fabricadas antes. Embora algumas peças precisem passar por etapas de acabamento de superfície(usinagem), a manufatura aditiva é um processo de criação de peças de princípio ao fim sem requerimento de uma grande quantidade de processos e ferramentas. Posto isso, reflexa-se uma grande redução de custo de produção.

Ding et al [15] apresentam essa posição competitiva da manufatura aditiva na fabricação de peças com geometrias complexas em função do volume de produção com relação com outros métodos de fabricação; apreciando-se uma alta superioridade na dita complexidade geométrica das peças. Não obstante, a manufatura aditiva ainda não tem essa grande produção em massa nas diversas aplicações industriais, como se ilustra na Figura 2-2 [14,15].

Dependendo da tecnologia a de manufatura aditiva a utilizar, se espera uma diminuição no desperdício do material e o uso eficiente de energia. Já que em outros processos de fabricação o material gasto para construir um componente equivale aproximadamente ao volume de material da peça. Pelo contrário, a manufatura aditiva, o material é adicionado até que o produto seja fabricado. Portanto, pouco ou nenhum material é perdido, então há uma redução de até 75% no uso de material e pode reduzir o tempo e o custo de produção em 50% Um caso comprovado de desperdício de material nos métodos de fabricação tradicionais é quando uma peça precisa de uma etapa de fresagem, onde o produto começa como um bloco com dimensões maiores que o produto final[15].



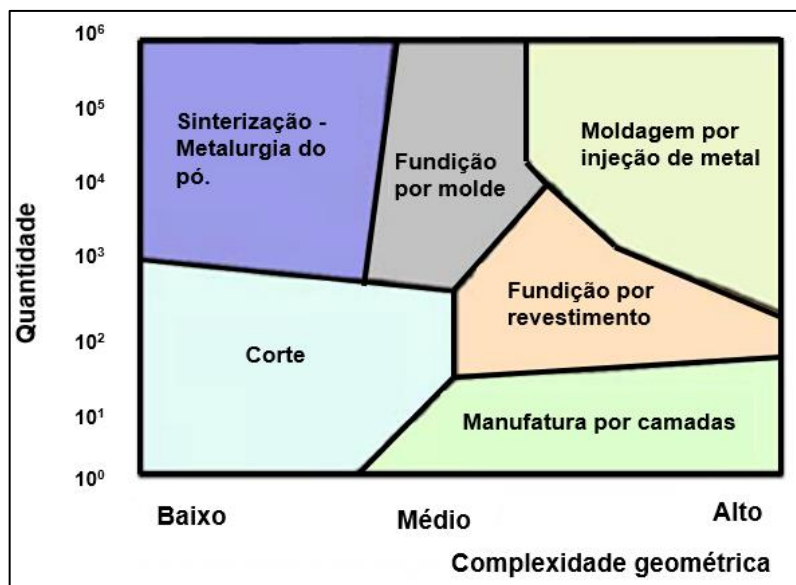


Figura 2-2. Situação qualitativa da manufatura aditiva na produção relativa de componentes metálicos em comparação a outros processos (Moldagem por injeção de metal, Sinterização – Metalurgia do pó) [12].

Outra vantagem é que a manufatura aditiva possui versatilidade na construção das suas peças. Dado caso se constate um defeito ou imprecisão no design do protótipo, isto pode ser alterado instantaneamente evitando assim uma perda maior numa produção em ampla escala. A versatilidade deste processo também está relacionada na construção de peças sob demanda de uma maneira mais fácil, rápida e de menor custo. Neste cenário, quando um designer deseja experimentar algo novo ou um cliente deseja uma peça personalizada, ela pode ser construída simplesmente, sem interromper a produção normal[4].

Continuando com as vantagens da manufatura aditiva, refere-se ao uso de diversos materiais, como vários polímeros, cerâmicas, metais e compósitos. O tipo de material depende da classificação do processo de manufatura aditiva a empregar, fortemente relacionado com a fonte de energia a ser utilizada. Continuamente os pesquisadores encontram-se estudando interações entre deposição de diferentes materiais como por exemplo na deposição de um revestimento cerâmico em um substrato de metal para aumentar as propriedades térmicas e resistência ao desgaste do material[13,16].

Este método tem muitas vantagens como foram detalhadas anteriormente. No entanto, também tem muitas desvantagens, limitações ou desafios por resolver. Uma dessas desvantagem que sobressai na manufatura aditiva é que as propriedades dos materiais do produto não são as mesmas dos materiais processados de forma tradicional. Isto acontece em razão da deposição sucessiva de camadas, no qual o protótipo terá propriedades anisotrópicas o que delimita a aplicação das peças em alguns sistemas ou processos[4,15]. Além disso, processos que envolvam fusão de metais podem levar a microestruturas brutas de solidificação, com problemas de homogeneidade de composição química, por exemplo.

Continuando com as limitações deste tipo de fabricação, diz-se que a precisão de acabamento superficial das peças é inferior ao ser comparados com os processos convencionais. Isto também acontece pelo princípio da manufatura aditiva, a deposição de camadas. Gerando degraus de escada nas superfícies de regiões inclinadas e curvas. Relacionando o acabamento e a deposição, encontra-se também o desvio dimensional que se dá na direção de construção, que em termos quantitativos pode chegar em até uma espessura de camada[11].

Enquanto se sabe sobre a escolha dos tipos de materiais a utilizar para manufatura aditiva, pode se ver como uma limitação; já que vai depender de qual processo de manufatura aditiva se empregará ( Laser, Jateamento de aglutinante, entre outros), as propriedades mecânicas desejadas e sobre todo a disponibilidade e compatibilidade com a tecnologia a usar e na aplicação a realizar[17].

Outra das limitações que apresenta esta tecnologia e que ajuda no seu continuo avanço de melhoria é com respeito aos problemas de distorções e empenamento do material que são caraterísticos em alguns processos; tendo totalmente sob controle da natureza térmica – química do princípio de adesão empregado[14].

### 2.1.2 Manufatura de arco elétrico por alimentação de arame - Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).

Antes de tudo, é importante destacar que as técnicas de manufatura aditiva para metais mais populares empregam fontes tradicionais de energia de soldagem (arco a plasma, lasers e feixes de elétrons) para fundir localmente materiais em pó ou arame em peças 3D, sem a necessidade de uma matriz. Embora as tecnologias usadas na soldagem e na manufatura aditiva sejam muito próximas ou semelhantes, a manufatura aditiva tem-se beneficiado do avanço dos controladores computacionais, permitindo assim a fabricação de componentes com maior resolução como nunca antes[14].

A manufatura aditiva para componentes metálicos são principalmente classificados segundo a norma ASTM F2792-10 *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies* como powder bed fusion (Fusão de leito de pó), direct energy deposition (Deposição de energia direcionada), binder jetting (Jateamento de aglutinante) and sheet lamination (Adição de lâminas) como se encontra especificado Tabela A, tendo como materiais de adição pó metálico e arame metálico. No entanto, Kruth[18] classifica a manufatura aditiva em metais, em duas relevantes categoriais em base ao estado físico (ou forma) da matéria prima empregada no processo: Laser em camadas de pó e técnicas fundamentadas em arame[14,15,18].

No presente trabalho de pesquisa, se pode observar na Tabela A que a manufatura aditiva por arco elétrico e alimentação de arame está classificada pelo tipo de material e particularmente sua deposição de energia direta como neste caso é utilizado o processo de soldagem tungsten inert gas (TIG) [15].

Tabela A. Classificação da manufatura aditiva para componentes metálicos [21].

<b>Classificação</b>	<b>Terminologia</b>	<b>Material</b>
<b>Fusão de leito de pó.</b>	Direct Metal laser sintering (DMLS) Electron beam melting (EBM) Selective laser sintering (SLS) Selective laser melting (SLM)	Pó metálico
<b>Deposição de energia direccionada.</b>	Electron beam freeform fabrication (EBF) Laser engineered net shaping (LENS) Laser consolidation (LC) Direct light fabrication (DLF) Wire and arc additive manufacturing (WAAM)	Pó metálico, arame metálico
<b>Jateamento de aglutinante.</b>	Powder bed and inkjet 3D printing (3DP)	Pó metálico
<b>Adição de lâminas.</b>	Laminated object manufacturing (LOM) Ultrasonic consolidation (UC)	Laminado de metal, folha de metal

Quando se fala sobre a tecnologia de manufatura aditiva por alimentação de arame se pode relacionar com um tipo de avanço na pesquisa dos últimos anos, mas na realidade este tipo de tecnologia foi patenteada por Baker[19] em 1925 e atribuída a *Westinghouse Electric & Manufacturing Company*; declarando-se um novo método de fabricação de objetos metálicos 3D mediante deposição camada por camada usando o processo de soldagem de eletrodo revestido. Na Figura 2-3 apresenta-se um exemplo da criação desses protótipos. Logo, no mesmo ano de 1925 apareceu Eschholz [20] também patenteando e utilizando o mesmo processo de soldagem por

eletrodo revestido para formar diferentes tipos de ornamentos não aderentes e estruturais [2].

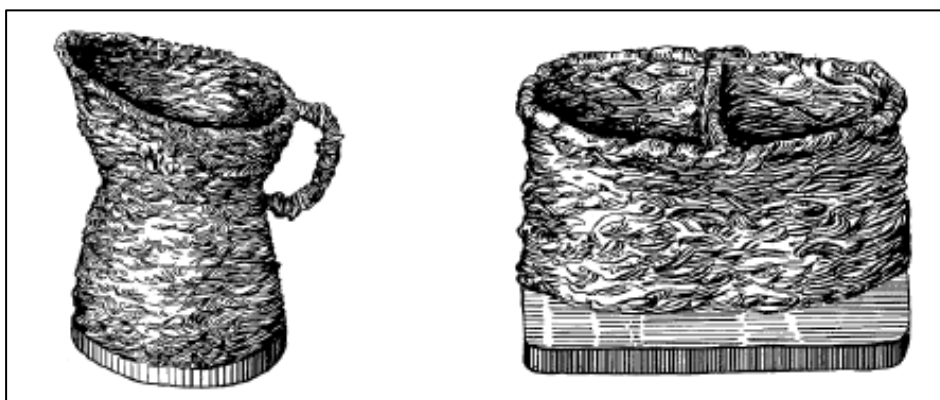


Figura 2-3. Exemplos de componentes baseados em soldagem 3D criados manualmente por deposição de camadas utilizando processo de soldagem a arco eléctrico e eletrodo revestido [1,17].

Tanto Baker como Schloz contribuíram com aportes nos parâmetros de soldagem na manufatura aditiva (corrente, velocidade de deslocamento, oscilação do eletrodo para controlar a geometria da poça de fusão, penetração). Do mesmo modo se determinou que o tamanho do dissipador de calor do substrato como fator importante nesta tecnologia, já que ela é chave para determinar as ligações metalúrgicas e características da fusão. “Substratos de cobre metálico foram bastantes empregados nas aplicações aonde a poça de fusão era requerida devido a sua grande condutividade térmica e alta capacidade de calor estes materiais”[2].

A manufatura aditiva de arco eléctrico por alimentação de arame tem sido de grande interesse por vários grupos de pesquisa, tendo assim na literatura diversos estudos desta tecnologia utilizando processos de soldagem tais como : gas tungsten arc welding (GMAW), tungsten inert gas (TIG) ou plasma arc welding (PAW) como fonte de calor, conforme apreciase na figura 9 [15].

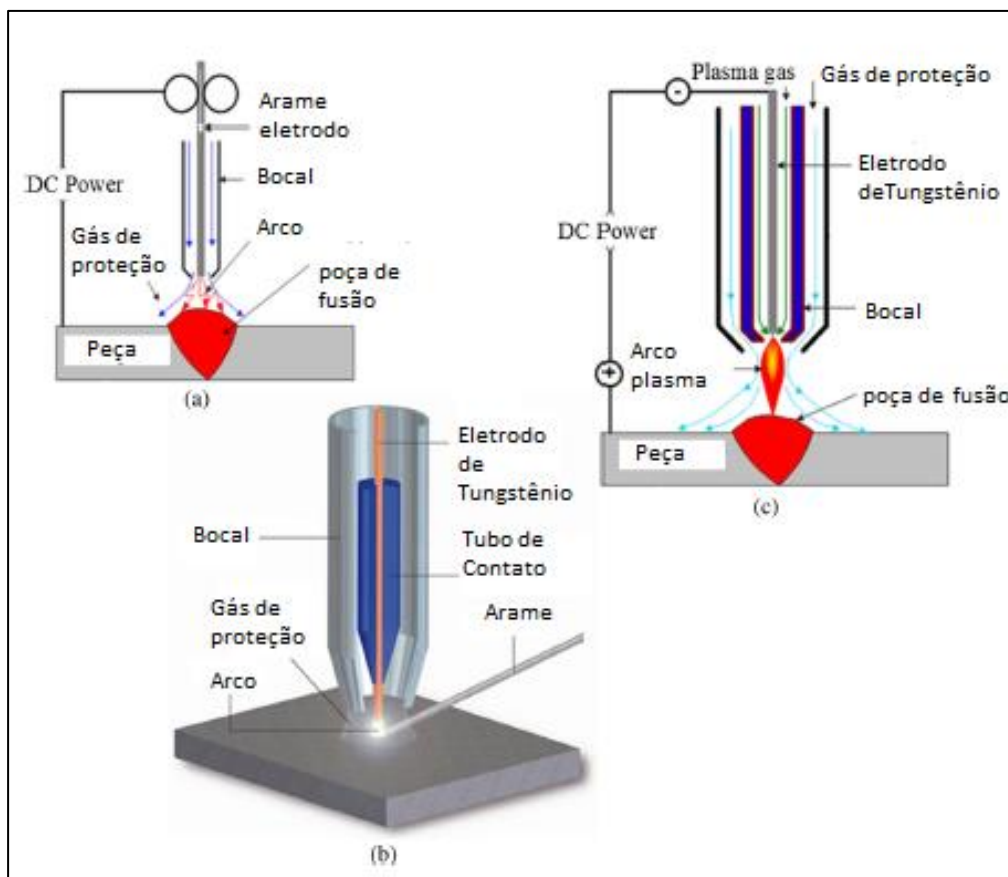


Figura 2-4. Diagrama esquemático de a) GMAW b) TIG e c) PAW [21].

Referente a Figura 2-4, o processo GMAW é um dos mais utilizados para WAAM, devido a sua alta taxa de deposição e baixa aporte de calor. A alimentação de arame é normalmente posicionada perpendicularmente ao substrato para este processo. Por outro lado, os processos TIG e PAW empregam eléctrodos não consumíveis e a orientação de alimentação de arame é uma variável na qual afeta a qualidade de deposição, porém os processos tornam-se mais complicados comparados com o anterior.

Recopilando a definição de manufatura aditiva de arco elétrico por alimentação de arame, é aquele método de fabricação de peças metálicas principalmente de grande complexidade geométrica, alta densidade e excelente integridade estrutural e operacional; graças a ligação direta das tecnologias de soldagem a arco com as de alimentação de arame. Destacando-se processos de soldagem convencionais de

baixo custo e de alta taxa de deposição tais como GMAW e TIG, utilizados como fontes de energia neste tipo de manufatura aditiva.

O Schmidt et al[21], expõem ao processo de soldagem de formas (SW, shape Welding) como um grande exemplo de aplicação na manufatura aditiva de arco elétrico por alimentação de arame, mostrando-se sua capacidade na construção de grandes componentes de refrigeração de reatores com até 10,5m de comprimento e 5,8m de diâmetro[21,22].

Na Figura 2-5 pode se observar a construção de meio toróide feito pela soldagem em formas, está soldagem foi realizada mediante o método de rotação vertical por tandem com dois eletrodos de fio alinhados uns com os outros com energia corrente contínua e corrente alternada respetivamente. O arame utilizado (metal de deposição) foi uma liga do tipo 10MnMoNi55, com uma taxa de deposição aproximadamente 40kg/h e uma corrente de 1100A por solda. Também foi importante o preaquecimento a uma temperatura de 100°C mediante uma manta de aquecimento elétrico. O processo inteiro de manufatura aditiva desta peça foi realizado sem interrupções significantes levando assim uma duração de aproximadamente 5 semanas[21].



Figura 2-5. Fabricação de meio toróide mediante o método de rotação vertical [21].

## 2.2 Processo de Soldagem.

Hoje em dia, quando se discute sobre soldagem pensa-se como um assunto extremamente recente, desconhecendo-se sua importante origem e cada uma das suas fases do desenvolvimento ao longo da história humana. Indica-se que nas eras pré-históricas (3000 ou 4000 a.c) como na Idade do Bronze e na Idade do Ferro se empregava a soldagem como processo de união de peças metálicas. Encontrando-se um claro exemplo na brasagem de ligas de ouro-cobre e ligas de chumbo-estanho, tendo como fontes de energia a lenha e o carvão, sendo isto uma limitante para o avanço do processo[23] .

Depois do descobrimento da energia elétrica; a soldagem teve sua época áurea no fim do século XIX com o desenvolvimento dos processos de soldagem modernos por arco elétrico. Em 1885, cita-se a patente UK12984 do primeiro uso prático do arco elétrico na soldagem concretizados por Nikolas Bernardos e Stanislav Olszewskli, gerando o arco mediante um eletrodo de grafita e o metal base[23,24].

Atualmente, a soldagem é o processo de união de peças metálicas mais relevante, já que permite a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material. Também a soldagem se caracteriza por ser um processo versátil colocando em função de vários tipos de ligas metálicas e espessuras que podem ser unidas [25].

A soldagem se destaca por ser um processo que integra diversas áreas da ciência tais como a física e as engenharias: metalúrgica, elétrica, mecânica e química. Devido a seu denso fundamento nas ditas áreas de conhecimento , a soldagem abrange um amplo campo de aplicação, sendo assim utilizada na construção naval, estruturas civis, vasos de pressão, tubulação, usinas hidroelétricas, materiais ferroviários, reatores nucleares, utilidades domésticas, componentes eletrônicos, em serviços de reparo e manutenção mecânica e outros inúmeros usos ou aplicações[23,26].



Na literatura existem várias definições quase equivalentes para conceitualizar a soldagem, dependendo do tipo de formação ou linha acadêmica de cada um dos autores. Principalmente refere-se soldagem como o processo metalúrgico de união de duas ou mais peças (neste caso metálicas) utilizando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão; conservando a continuidade das propriedades físicas e químicas da junta.[23,25,26] .

No caso da Associação Americana de Soldagem (American Welding Society,AWS) define a soldagem como: “Processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”. [25]

A fundição de materiais metálicos por meio de energia elétrica ou química sem aplicação de pressão é denominado como soldagem por fusão. O processo de soldagem a arco elétrico é o mais utilizado dentro da família dos processos de soldagem por fusão, devido a sua versatilidade e importância industrial geralmente na fabricação de componentes e estruturas metálicas assim como na recuperação o restauração de peças deterioradas e/o danificadas[25] .

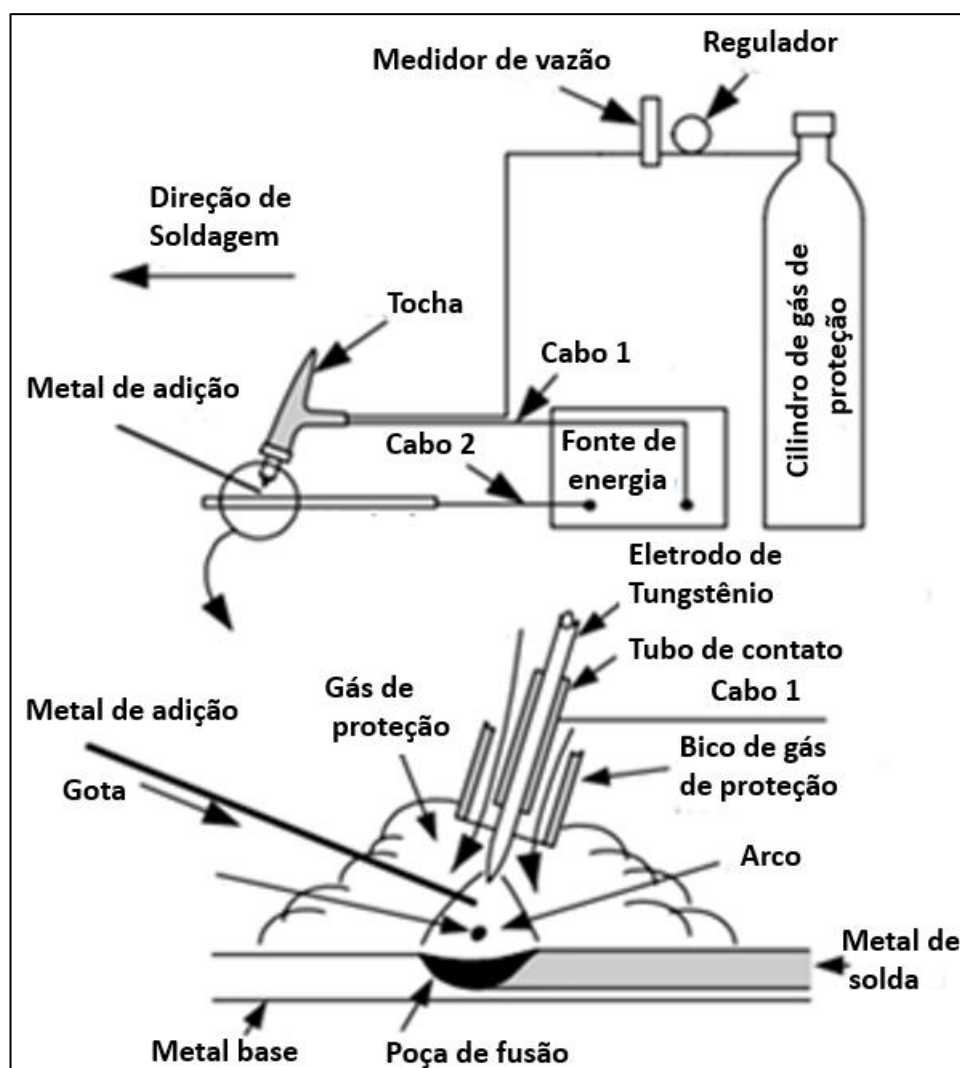
Na soldagem se descreve o arco elétrico como aquela descarga elétrica, sustentada mediante uma atmosfera gasosa (gás ionizado), a alta temperatura, chamada de plasma, gerando uma energia térmica suficiente para efetuar a fusão localizada dos respectivos materiais; essa descarga elétrica caracteriza-se por possuir uma baixa tensão e alta intensidade de corrente (com limites superiores na faixa de  $10^1$  a  $10^2$  A)[26].

### 2.2.1 Processo de Soldagem TIG.

A soldagem TIG (Tungsten Inert Gas), também denominada GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) foi comercialmente utilizada nos Estados Unidos em 1942, com aplicação na soldagem de assentos dos aviões (ligas de magnésio). O TIG é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas por meio de um arco elétrico gerado entre um eletrodo não consumível de

tungstênio e as peças a unir; realizando uma proteção do arco elétrico e a poça de fusão através de um fluxo de gás inerte ou mistura de gases inertes. Pode se observar esquematicamente este processo na Figura 2-6 Processo TIG [16].2-62-6 [23,25–27].

O processo TIG pode se realizar com ou sem metal de adição e pode ser manual (em qualquer posição), semi ou totalmente automatizada, em que o arame de enchimento é introduzido na poça de fusão por meio de um alimentador mecanizado. Quando este processo de união acontece sem metal de adição, tem um comportamento interessante na soldagem de chapas finas porque executa um bom enchimento[25,27].



2-6 Processo TIG [16].

Outra particular característica da soldagem TIG é a possibilidade de se usar o próprio metal de base como metal de adição dado o caso este não estiver disponível

no momento, embora não houve restrições rigorosas, salvo das propriedades mecânicas e compatibilidade metalúrgica que devem ser respeitadas[23,25].

Uma das variáveis significativas no equipamento básico desse processo é a tocha, já que está deve cumprir uns respectivos parâmetros para ser apropriada numa aplicação específica. A funcionalidade grosso modo é de fixar ou suportar o eletrodo de tungstênio, como também de conduzir a corrente elétrica e fornecer a proteção gasosa necessária tanto do arco elétrico como da poça de fusão. O bocal da tocha pode ser de cerâmica (correntes de soldagem menores de 250 A) ou metálico e fornecidos em diversos diâmetros; já que o diâmetro assegura ao gás de proteção um escoamento mais laminar possível, para uma determinada vazão. Além, dependendo da corrente empregada a tocha pode ser refrigerada por água ou ar[25,26].

Este processo de soldagem aludindo a seu nome TIG (Tungsten Inert Gas) utiliza eletrodos de tungstênio, caracterizado por ter um ponto de fusão elevado (3410°C) e ser não consumível, aliás quando se faz referência a não consumível não quer dizer que este não sofra desgaste ao longo de seu uso, por tanto devem ser substituídos com certa frequência. Os principais eletrodos utilizados no mercado são varetas sinterizadas com tungstênio puro ou com adição de óxido cério, lantânio, tório ou zircônio, com objetivo de conduzir a corrente elétrica até o arco. Na Tabela B pode se apreciar ditos eletrodos e com a respectiva classificação AWS[25,26].

Tabela B. Classificação AWS e a análise química dos eletrodos para soldagem TIG (AWS A5.12-69) [13].

Classificação AWS	Composição			
	Tungstênio(mín.)	Tória	Zircônio	Outros(máx.)
EWP	99,5	-	-	0,5
EWTh-1	98,5	0,8-1,2	-	0,5
EWTh-2	97,5	1,7-2,2	-	0,5
EWTh-3	98,95	0,35-0,55	-	0,5
EWZr	99,2	-	0,15-0,40	0,5

Cabe ressaltar a importância do ângulo de afiação do eletrodo de tungstênio especificamente na soldagem TIG automática ou mecanizada. Já que este ângulo garante um controle da poça de fusão. Geralmente afiação da ponta do eletrodo pode ser feito por meios mecânicos e deve ser realizado antes de cada soldagem a ser executada [25].

Conforme a proteção gasosa durante a soldagem, os gases utilizados são o argônio o hélio ou suas misturas. Qualquer que seja o gás de proteção, sua pureza deve ser 99,99%, pois a presença de gases oxidantes, como O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, por exemplo causa a deterioração do eletrodo não consumível. A preferência de gás no TIG é de argônio puro, aliás o gás a utilizar vai depender do tipo de liga que se está soldando e dos respectivos parâmetros de soldagem. A continuação na Tabela C pode se detalhar as características dos gases argônio e hélio [26,28].

Tabela C. Características dos gases de proteção utilizados no processo TIG [13].

<b>Argônio</b>	<b>Hélio</b>
Baixa tensão de arco Menor penetração Adequado à soldagem de chapas finas  Soldagem manual devido ao pequeno gradiente de tensão na coluna do arco (6V/cm) Maior ação de limpeza Arco mais estável Fácil abertura de arco Utilizada em CC e CA  Custo reduzido Vazão para proteção pequena  Maior resistência à corrente de ar lateral	Elevada tensão de arco Maior penetração Adequado à soldagem de grandes espessuras e materiais de condutibilidade térmica elevada Soldagem automática.  Menor ação de limpeza Arco menos estável Dificuldade na abertura de arco Geralmente CCPD com eletrodo de tungstênio toriado Custo elevado Vazão para proteção de 2 a 3 vezes maior que a de argônio  Menor resistência à corrente de vento

As fontes de energia a ser utilizadas na soldagem TIG são fundamentais já que existe um efeito de polaridade no processo (perfil de cordão, penetração, aplicações). São três tipos de polaridades do TIG utilizados que são as seguintes e podem ser mostradas na Figura 2-7.

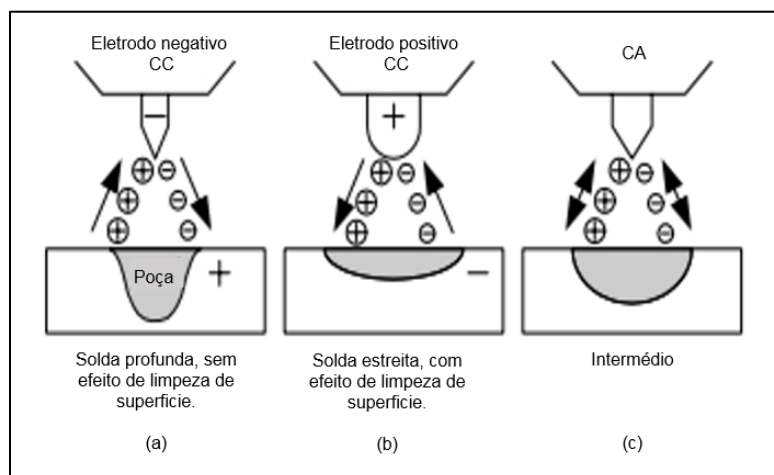


Figura 2-7 . Efeito das três diferentes polaridades no TIG adaptado [16].

- Soldagem em corrente contínua polaridade direta (eletrodo negativo) é a polaridade mais empregada no TIG; obtém-se uma grande penetração profunda e estreita, já que o metal base recebe uma quantidade de energia considerável tornando-se mais aquecido, devido ao fluxo de elétrons desde o eletrodo de tungstênio ao metal base. Algumas das aplicações características por meio desta polaridade estão nos aços carbono, aços inoxidáveis, Au, Ag e ligas de níquel[23,26,27].
- Soldagem em corrente contínua polaridade reversa (eletrodo positivo), a penetração neste caso é pequena e larga já que os elétrons vão em direção ao eletrodo, provando seu aquecimento excessivo, portanto ele deve ter um diâmetro maior do que um eletrodo na polaridade direta. Usando-se argônio tem efeito de limpeza, causado pelo bombardeamento dos íons de gás inerte sobre o metal base, que tem como consequência a dispersão da camada de óxidos. Cujas principais aplicações em ligas de alumínio, magnésio, e baixas espessuras e correntes. Na Figura 2-8 pode se detalhar esse efeito de limpeza [23,25–27].
- Soldagem em corrente alternada, tem penetração razoavelmente boa, produzida pela alternância na intensidade e na tensão de forma cíclica, gerando uma ligeira instabilidade do arco elétrico. Geralmente, para estabilizar o arco nesta corrente alternada se acostuma superpor à corrente normal uma outra

de alta frequência e baixa intensidade. Particularmente esta corrente se desempenha em materiais onde contém óxidos refratários e necessitam de limpeza catódica, no caso das ligas de alumínio e magnésio [23,28].

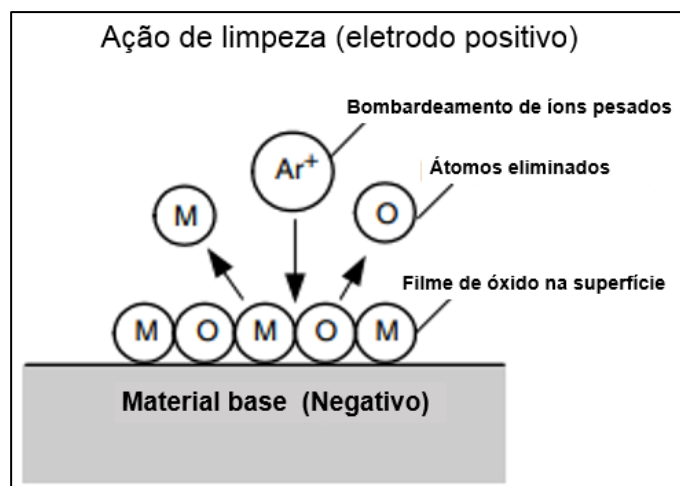


Figura 2-8. Ação de limpeza da superfície no TIG com corrente contínua eletrodo positivo, adaptado [16].

### 2.3 Aços Inoxidáveis.

Os aços inoxidáveis podem ser definidos como aços ligados contendo no mínimo 11% de cromo, o que permite a formação de uma fina película ou capa protetora de óxido de cromo para proteger ao aço contra muitos meios corrosivos. Além do que os aços inoxidáveis são desenvolvidos primordialmente para resistir à corrosão, tem outras características como excelente conformidade, alta tenacidade a temperatura ambiente e as temperaturas criogênicas, a boa resistência a oxidação e a fluência em temperaturas elevadas [29,30].

Além do que o cromo tem como sua principal função de formar o óxido passivador necessário para a proteção da liga, também é um elemento estabilizador da ferrita. Encontram-se comumente outros elementos formadores de ferrita como o molibdênio, silício, nióbio e alumínio; aumentando assim o tamanho da região da ferrita. Por outro lado, existem os promotores de formação de austenita como níquel (adicionado em grande quantidade), carbono, nitrogênio e Cu. Destacando a adição

de nitrogênio em algumas ligas para melhorar a resistente, principalmente nas temperaturas ambiente e criogênica [30–32].

Os aços inoxidáveis geralmente se podem classificar em função das suas propriedades em cinco tipos: a) Martensíticos, b) Ferríticos c) Austeníticos, d) Endurecíveis por precipitação e e) Dúplex.

a) Aços Inoxidáveis martensíticos.

São aqueles que podem ser tratados termicamente, no qual seu microconstituente principal é a martensita e com teor de cromo entre 11,5% até 18%. Entre outras características destaca-se o magnetismo, boa tenacidade, maleável, grande resistência à corrosão atmosférica e a alguns agentes químicos. Alguns exemplos destes aços são: AISI 403, 410,414,416,420,431,501 e entre outros [9,33] .

b) Aços Inoxidáveis ferríticos.

Estes aços contêm somente Cromo como elemento principal da liga dentro das faixas de 14% até 27%Cr e um teor de carbono baixo. Por sua estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), tem boa resistência mecânica, resistência a corrosão, magnéticos em temperatura ambiente até a temperatura de Curie (750°C) e ductilidade moderada, provenientes dos endurecimentos de solução sólida e de deformação. (Na condição no estado de recozido). Aqui encontra-se os graus (AISI) 405,430,430F,446,502[33,34].

c) Aços Inoxidáveis Austeníticos.

Neste grupo de aços inoxidáveis se encontram os aços ao cromo-níquel e ao cromo-níquel-manganês; frequentemente conhecidos como 18-8 já que o teor médio de cromo é 18% e o do níquel de 8%. Se caracterizam por sua estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e suas propriedades como excelente ductilidade, resistentes ao impacto a baixas temperaturas (possuem temperaturas de transição), boa conformação mecânica, resistência à corrosão, resistência a altas temperaturas e resistência mecânica (endurecimento por solução sólida)[29].



d) Aços Inoxidáveis Dúplex.

Esses aços são combinações de duas fases comumente de 50% de ferrita e 50% de austenita, mediante um adequado controle na composição e tratamento térmico; para uma aplicação específica de resistência a corrosão, conformação mecânica e soldabilidade, que não se obtém em nenhum dos outros tipos de aços inoxidáveis[28,29].

e) Aços Inoxidáveis endurecidos por precipitação (envelhecidos).

Se definem aqueles aços que contem Al, Nb,Ta e por meio de tratamento térmico de precipitação adquire suas propriedades, tal como alta resistência mecânica, incluso com baixos teores de carbono [29].

### 2.3.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos.

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem uma estrutura cristalina FCC; cuja estrutura foi obtida por meio da adição de elementos austenizadores, como, níquel, manganês e nitrogênio.[35]. Caracterizam-se principalmente por sua boa resistência a corrosão, elevada tenacidade, boa soldabilidade e excelentes propriedades criogênicas.

Em particular, os aços inoxidáveis austeníticos são os mais empregados em comparação com os outros aços inoxidáveis, portanto sua produção é realizada em quantidades maiores. Principalmente para aplicações que usem rangos de temperaturas desde criogênicas (aonde exibem alta tenacidade, não sofre transição dúctil frágil) até temperaturas elevadas próximas ou acima de 600°C (aonde tem boa resistência a oxidação), dependente da resistência ao amolecimento e a deformação a quente[33,35,36].

Geralmente a composição química dos aços inoxidáveis austeníticos está determinada por um teor de 18% de cromo, 8% de níquel e pode conter teores de manganês até 2%. Entre as ligas mais comuns nestes aços estão as ligas da série AISI 200 e 300, amplamente empregadas na indústria energética, petroquímica e nuclear para fabricação de componentes como vasos de pressão, tubos de caldeiras e tubulações de vapor[35,37].

No caso dos aços inoxidáveis austeníticos da série AISI 300 são os mais empregados dentro desse grupo, estão tipicamente compostos por teores de 16-25%Cr e 8-20% Ni. Podem ter adição de elementos de liga como: 1% Si máx., (utilizado para desoxidar ) ; 0,02 – 0,08%C ( estabilizador de austenita); e 1,5%Mn aproximadamente ( estabilizador de austenita e como formador de compostos de enxofre e sílica)[36]. Com adição do molibdênio ou molibdênio mais nitrogênio se obtém um aumento na resistência a corrosão por pite e corrosão por frestas[32].

O aço inoxidável de tipo AISI 304 é amplamente utilizado nas aplicações com exigências e boa combinação de resistência a corrosão e a deformação. Por outro lado, o aço inoxidável tipo AISI 304L se caracteriza pela modificação em seu baixo teor de carbono e é utilizado para requisitos de soldagem. Visto que o baixo teor de carbono minimiza a precipitação de carbonetos nas proximidades zona afetada pelo calor (ZAC) das soldas, o que conduz a corrosão intergranular acontecer em certos ambientes [38].

### 2.3.2 Propriedades mecânicas.

Lancaster [32] menciona que o metal de solda de aços inoxidáveis austeníticos é intrinsecamente resistente e dúctil, cujas propriedades na temperatura ambiente são relativamente indiferentes à mudanças em um processo de soldagem. Aliás, ligas austeníticas são amplamente empregadas em aplicações de baixas temperaturas de operação, igualmente nas faixas de temperatura de fluência, por tanto nesses casos as propriedades do metal de solda podem sofrer alterações significativas com as mudanças de composição e microestrutura[9,32]. Na Tabela D encontram-se as propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis forjados.

De uma forma geral, os aços inoxidáveis austeníticos não podem ser substancialmente endurecidos nem por precipitação ou deformação. Porém, algumas ligas especiais com altos teores de níquel e adições de titânio conseguem ser endurecidas por precipitação do precipitado gama prima,  $Ni_3(Al,Ti)$ , que é considerado um agente endurecedor. Nas superligas a base níquel. Na tabela podem se observar as propriedades mecânicas na mínima faixa de temperatura de alguns aços inoxidáveis austeníticos[31].

Tabela D Propriedades mecânicas na mínima faixa de temperatura dos aços inoxidáveis austeníticos forjados[31].

Liga	Limite de resistência a tração		Limite de escoamento		Alongamento %	Redução de área %
	MPa	ksi	MPa	ksi		
302	515	75	205	30	40	50
304	515	75	205	30	40	50
304L	480	70	170	25	40	50
308	515	75	205	30	40	50
309	515	75	205	30	40	50
310	515	75	205	30	40	50
316	515	75	205	30	40	50
316L	480	70	170	25	40	50
317	515	75	205	30	40	50
321	515	75	205	30	40	50
330	480	70	205	30	30	-
347	515	75	205	30	40	50

### 2.3.3 Solidificação de aços inoxidáveis austeníticos.

Todos os aços inoxidáveis e resistentes ao calor do sistema Fe-Cr-Ni solidificam tanto como fase primária de ferrita ou como de austenita, dependendo, principalmente, da sua composição química ou, mais propriamente, do balanceamento entre os elementos de liga que promovem a formação de ferrita e de austenita [9].

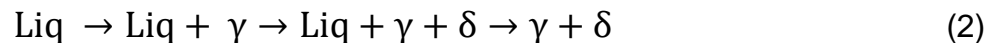
A faixa de composição de muitos aços inoxidáveis austeníticos é ampla o suficiente para que ambos os modos de solidificação sejam possíveis. Após a solidificação, transformações adicionais podem ocorrer no estado sólido após o resfriamento até a temperatura ambiente. Essas transformações são mais importantes em ligas submetidas à solidificação primária de ferrita, já que a maior parte da ferrita se transformará em austenita [31].

Existem 4 possibilidades de solidificação e transformação de estado sólido para metal de solda de aços inoxidáveis austeníticos.

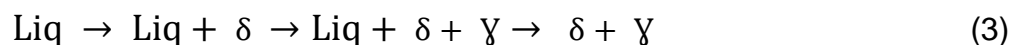
Tipo A: O processo de solidificação inicia-se com a formação de dendritas de austenita, completando-se com a formação apenas desta fase. Em outras palavras, este é característico de solidificação da austenita primária devido a segregação dos elementos de liga e impurezas que ocorrem durante a solidificação e a relativa baixa difusividade destes elementos em temperaturas elevadas, no qual preserva o perfil de segregação desenvolvido durante a solidificação[9,31].



Tipo AF: acontece a formação de ferrita no fim do processo de solidificação de austenita primária e se existem suficientes elementos promotores de ferrita. A ferrita que se forma ao longo dos contornos é relativamente estável e resiste a transformação de austenita durante resfriamento da soldagem desde que este já é enriquecido nos elementos promotores de ferrita[9].



Tipo FA: A ferrita é a primeira fase a se solidificar, na forma de dendritas. A austenita forma-se posteriormente na interface ferrita/líquido, por intermédio de uma reação peritética ou, dependendo das condições de solidificação, reação eutética envolvendo três fases ( $\text{Liq} + \gamma + \delta$ ). Após a nucleação, a austenita cresce para a ferrita e para o líquido, com a consequente segregação de elementos que promovem a ferrita[31].



Tipo F: a solidificação ocorre completamente como ferrita, tendo-se formação posterior de austenita somente no estado sólido [9].



#### 2.3.4 Soldagem de aços inoxidáveis.

Destaca-se os processos SMAW, TIG e GMAW como os processos mais empregados para a soldagem de aços inoxidáveis. O processo SMAW se caracteriza por seu uso em serviços geral e nas diversas posições. Por outro lado, para especialmente soldagem de chapas de menores espessuras se usa o processo TIG.

E para a soldagem de juntas mais espessas se realiza mediante o processo GMAW, sobressaindo por ser um processo de maior produtividade[39].

Todos os aços austeníticos são aparentemente fáceis de soldar. Apresentando coeficiente de expansão térmica maior (próximo de 45%), maior resistência elétrica e menor condutividade térmica ao ser comparados com os aços doces. Deve ter-se cuidado com a precipitação de carbonetos nos contornos de grão da zona afetada pelo calor (ZAC) nos aços com teor de carbono superior a 0,06%; afetando tanto a resistência a corrosão como gerando distorção no material. Para contra restar estes impasses, sugere-se soldar este tipo de aços em uma velocidade de deslocamento maior[35,39].

Segundo Modenesi [39], o metal de adição de aço inoxidável (principalmente austenítico) é comumente utilizado na soldagem de outros tipos de aços e na fabricação de revestimentos protetores a corrosão. Por tanto, muitos pesquisadores ao longo do desenvolvimento dos processos de soldagem criaram alguns diagramas constitucionais empíricos, para prever os efeitos de composição na microestrutura da solda destes ligas. Entre os diagramas mais utilizados encontram-se o diagrama DeLong, de Schaeffler e WRC1992[31,39].

#### 2.3.5 Diagrama WRC- 1992

O diagrama WRC-1992 pode ser usado tanto para estimar o teor de ferrita (em termos de FN) como também o comportamento de solidificação no metal de solda de aços inoxidáveis austeníticos e aços inoxidáveis duplex. Cabe ressaltar que para determinar o Ferrite Number (FN) foram utilizadas as análises de centos de soldas junto com o modo de solidificação como função da composição. Geralmente os aços inoxidáveis austeníticos mais comerciais entram na faixa de 0 a 20FN; com respeito ao comportamento de solidificação de uma dada liga se encontra dentro do rango A até FA ou em poucos dos casos no rango F. Assim, a susceptibilidade da trinca por solidificação de um metal de solda pode ser predita plotando os resultados de Nieq e o Creq no diagrama WRC1992, como se pode ver na Figura 2-9 [31,32].

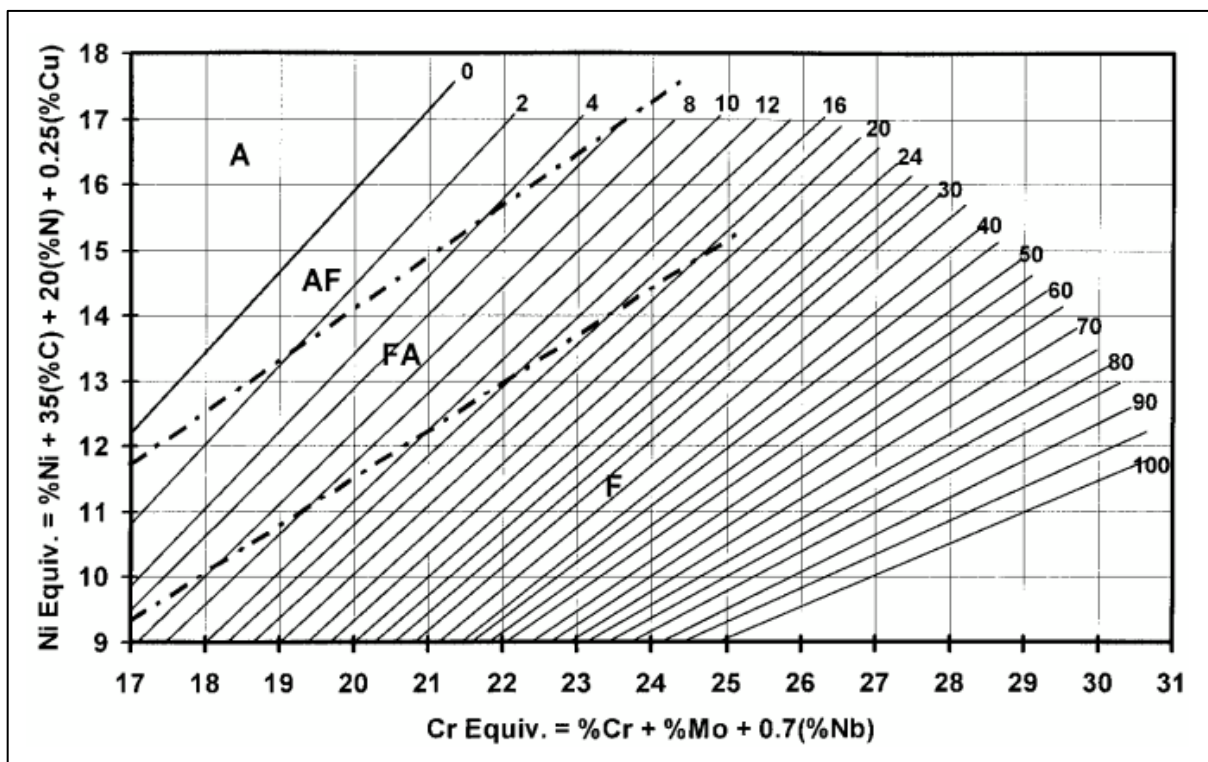


Figura 2-9. O diagrama WRC 1992 para prever o teor de ferrita e modo de solidificação dos aços inoxidáveis austeníticos e duplex [19].

## 2.4 Corrosão.

Uma definição geral de corrosão refere-se àquela deterioração dos materiais devido a reações químicas com a interação dos seus ambientes [40].

Também, encontra-se o termo corrosão referindo-se à deterioração de materiais não metálicos devido a causas químicas. No entanto, outros autores consideram que no termo de corrosão metálica é aquela que abrange todas as reações químicas de um metal ou liga (sólido ou líquido) com seu ambiente, independentemente de ser deliberado e benéfico ou acidental e prejudicial[41].

Em contrapartida, neste caso se adota a definição de corrosão como a deterioração ou desgaste indesejado de um metal ou liga durante um período, aplicação específica e a extremamente dependência do seu entorno. Estes ambientes principalmente são líquidos ou gases, porém baixas circunstâncias específicas algumas reações sólido – sólido pode ser incluída como corrosão[40,41].

A necessidade de controlar o fenômeno de corrosão quase sempre se reduz as considerações de segurança e economia. Máquinas, equipos, produtos e estruturas funcionais podem falhar devido a corrosão em tal maneira como um resultado gerar lesões pessoais. Isto se pode prever desde a seleção dos materiais em uma aplicação específica minimizando assim mesmo os riscos de falhas por corrosão e por tanto envolvendo aspetos econômicos e implementando medidas de segurança. No enfoque das decisões econômicas, uma ação básica e fundamental é o forte compromisso entre os benefícios gerados por um certo nível de controle de corrosão versus o custo que poderia resultar se este nível de controle não fosse mantido[41].

Encontram-se citado na literatura diversas classificações das formas de corrosão, tendo variáveis dependentes como a natureza e as condições de ambiente prevalentes. Seguinte, se mostra na Tabela E uma classificação com os cinco grandes tipos de corrosão[41].

Menciona-se que o fenômeno de corrosão nos aços inoxidáveis e ligas com cromo são em grande parte uma função do fenômeno da passividade. Denomina-se passividade como o resultado de uma camada de oxido invisível. A espessura dessa película protetora varia desde um mínimo natural até uma levemente mais espessa desenvolvida pelo aprimoramento químico ou eletroquímico; sem existência nenhuma de graus de passivação[38,40].

A espessura da camada de passivação pode aumentar pela exposição em soluções ou pela passivação anódica por meio de técnica eletroquímica. Um processo eletroquímico pode fazer analogia com qualquer pilha, existe uma reação anódica, uma reação catódica, uma migração de íons por meio de um eletrólito, e o fluxo de corrente através de um circuito externo[38,42].

Tabela E. Tipos de corrosão [41].

<b>Tipo</b>	<b>Característica</b>	<b>Exemplos</b>
<b>Uniforme ou quase uniforme</b>	Todas as áreas do metal corroem na mesma velocidade (ou similar).	Oxidação e manchado; Dissolução ativa em ácidos; Oxidação anódica e passiva; Polimento químico e eletroquímico; Corrosão atmosférica e imersa em certos casos.
<b>Localizada</b>	Corroem certas áreas da superfície do metal em velocidades maiores por causa das heterogeneidades no material, o ambiente, ou na geometria da estrutura como um tudo.	Corrosão por frestas, corrosão filiforme, ataque depositado, corrosão bimetálica, corrosão intergranular.
<b>Pite</b>	Ataque altamente localizado em áreas específicas resultado em pequenos pits que penetram dentro do metal e podem levar até perfuração.	Pite de metais passivos tais como aços inoxidáveis, ligas de alumínio, etc., na presença de íons específicos tais como íons cloreto $Cl^-$
<b>Dissolução seletiva</b>	Um componente de uma liga (usualmente a mais ativa) é seletivamente removida de outra mesma.	Dezincificação; Dealuminificação; Gratificação.
<b>Ação conjunta de corrosão e um fator mecânico</b>	Ataque localizado ou fratura devido à ação sinérgica de um fator mecânico e corrosão.	Corrosão – erosão; Corrosão sob tensão fraturante; Cavitação; Trinca por hidrogênio; Corrosão por fadiga



A soldagem consegue gerar modificações metalúrgicas que podem incrementar a susceptibilidade ao ataque de corrosão. Em conjunto com as tensões residuais que se apresentam após soldagem, ditas modificações conduzem a um ataque acelerado da região da solda. Assim, nos aços inoxidáveis austeníticos manifestam as seguintes formas de corrosão: pite, intergranular, corrosão sob tensão, galvânica, cratera e corrosão induzida micro biologicamente[31,32].

Corrosão Intergranular: associasse aquele ataque na zona afetada pelo calor (ZAC), que na maioria das vezes é devido pela precipitação de carbonetos de cromo ( $M_{23}C_6$ ) preferencialmente ao longo dos contornos de grão. Na seção transversal, ataques severos podem ser revelados através da zona sensitizada na ZAC. Isto acontece porque os carbonetos de cromo permitem que a sensitização aconteça nas faixas de temperatura de 600 a 850°C. Assim mesmo, define-se sensitização como a susceptibilidade a corrosão intergranular, devido a exposição de um aço ou liga à uma faixa temperatura crítica[42].

Corrosão sob tensão: é aquela que acontece nos materiais com atuação simultânea de meios corrosivos e tensões de tração. No caso dos aços inoxidáveis, na maioria deles são inerentemente susceptíveis a este tipo de corrosão principalmente em ambientes com presença de cloro (água do mar) e a temperaturas acima de 60°C. Apresentando-se em três tipos de fratura: intergranular, transgranular ou mista. A importância na seleção das ligas apropriadas para um meio agressivo em presença de íons Cl e OH é a melhor forma de evitar a corrosão sob tensão. Na soldagem deve se ter o controle nos desenhos ou nas condições que geram alta tensão residual ou nos concentradores de tensões residuais, já que estes refletem também na promoção de corrosão sob tensão [9,31].

Corrosão por pites: está associada com as ligas de tipo ativas-passivas e ocorrem sob condições específicas para cada liga e ambiente. Também se denomina como um ataque localizado de grande importância comercial desde consigam limitar extremamente o comportamento em circunstâncias onde, caso contrário, as taxas de corrosão são extremamente baixas[40].

Os aços inoxidáveis, especificamente os aços inoxidáveis austeníticos são amplamente utilizados em diversos campos da indústria, graças a excelente resistência à corrosão. Esta alta resistência à corrosão é devido à película passiva que contém ferro, óxidos de cromo, hidróxidos e compostos que contenham água. A película se desprende efetivamente na matriz dos aços inoxidáveis austeníticos desde meios corrosivos e podem ser inibidos de reações eletroquímicas[43].

A corrosão por pite é uma das formas de corrosão mais indesejadas nos aços inoxidáveis principalmente da série AISI 300. Seu início ocorre pela quebra da película passiva (película de óxido formada na superfície dos aços inoxidáveis) em regiões onde está apresenta defeitos tais como: inclusões, contornos de grão, discordâncias, interface. Também o pite pode acontecer apenas pela presença de íons cloretos, que substituem moléculas de água da película passiva e levam a formação de íons metálicos complexos, removendo assim a película[44].

Zheng S. et al, falam que a corrosão por pite acontece em lugares de heterogeneidades locais devido à quebra da película passiva. Também fazem alusão que o ataque por pite tem três etapas tais como: iniciação, propagação metaestável e propagação estável. Na etapa inicial é a dissolução local da película de oxido passivo e ocorre nos defeitos de superfície e inclusões. Porém, a fase de ionização é instável nos estágios iniciais da propagação do pite. No entanto, a etapa do crescimento metaestável do pite é o colapso abrupto do filme de óxido protetor, permitindo a troca do eletrólito mais diluído fora do filme com o eletrólito de pite ácido, pode retornar o pH ao seu valor original. Após tudo isso o aço pode ser espontaneamente repassivado. Finalmente, uma propagação de pite estável pode ser obtida quando a repassivação espontânea não acontece mais[43,45].

A Figura 2-10 descreve um crescimento profundo de corrosão por pites exposta em um ambiente de cloreto. Consiste em duas regiões (ânodo e cátodo) como mostrado. A estrutura profunda do material onde o pite é formado é conhecida como região do ânodo. Essas regiões anódicas são muito pequenas em comparação com a zona catódica produzida na interface difusa, que é adequada à perda de elétrons e forma a direção de pite. Observou-se que o filme passivo torna-se de natureza mais crítica quando exposto à solução de cloreto férrico[46].

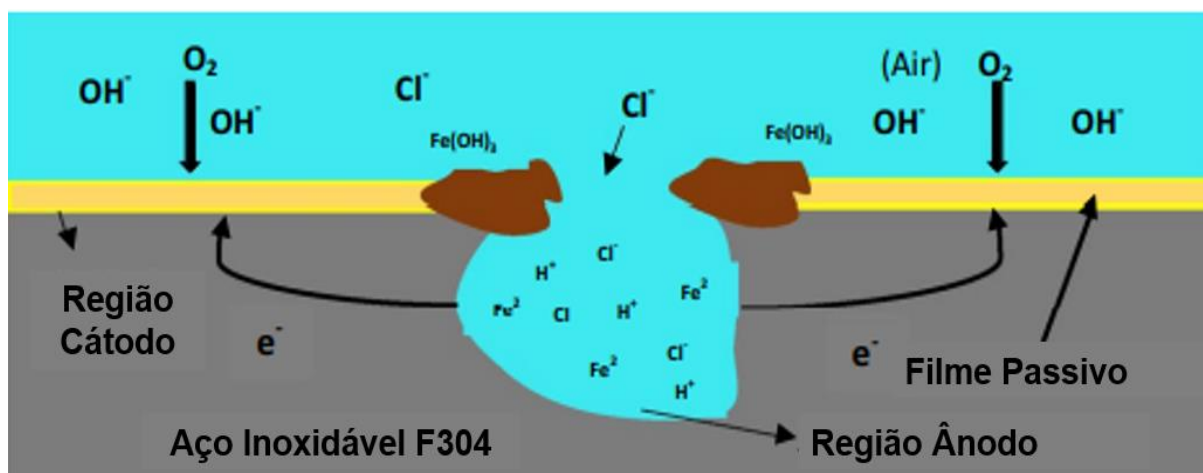


Figura 2-10 Mecanismo de crescimento profundo durante a corrosão por pite [46].

#### 2.4.1 Ensaio da ASTM G48

Existem técnicas para medida da tendência de pite, uma delas é com ajuda de técnicas eletroquímicas conhecidas, onde se procura tanto o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) como o potencial de pite ( $E_{pite}$ ) de um sistema.

Por outro lado, como é o caso deste trabalho se utilizou testes de cloreto férrico para conhecer o comportamento e a susceptibilidade à corrosão de pite do aço inoxidável AISI 304L e do ER308L. Estes testes se encontram estandardizados na ASTM G48 *Standard Test for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution* prática A e com ajuda da ASTM G46 *Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion* pode-se avaliar e detalhar, por meio de reprodução fotográfica dos pites, as medições de densidade, tamanho, e profundidade do pite como também as diversas morfologias estabelecidas nesta norma. Nas **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** e **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** podem ser observados.

#### 2.4.2 Espectroscopia de impedância eletroquímica local – Local Electrochemical Impedence Spectroscopy (LEIS).

Nos aços inoxidáveis austeníticos soldados podem precipitar carbonetos nos contornos de grão, criando assim uma região denominada zona sensibilizada na zona

afetada pelo calor (ZAC). Ocasionalmente ao aço suscetibilidade a corrosão intergranular; outros fatores influentes nesse fenômeno estão relacionados com o teor de carbono no material de base e no material depositado, o processo de soldagem a utilizar, energia de soldagem e o tempo de exposição do material à temperaturas nas quais acontecem a segregação e o origem dos carbonetos[47].

Na literatura encontra-se metodologias para determinar as regiões sensitizadas num aço inoxidável; entre elas cita-se a ASTM A262-15 *Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels*. Porém, esta norma não quantifica o grau de sensitização, os ensaios são de difícil preparação e são de forma destrutiva. Por outro lado, encontra-se a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica local (LEIS) para a avaliação da zona sensitizada em um aço inoxidável soldado, sendo assim uma metodologia não destrutiva tornando-se com um grande interesse no estudo da corrosão localizada para este tipo de material [47]

### 3 OBJETIVOS.

O intuito da presente pesquisa é aprimorar o controle, comportamento, entendimento e influência dos princípios da manufatura aditiva por arco elétrico com o processo de soldagem TIG mecanizado do aço inoxidável austenítico ER308L, por meio da deposição de camadas em um único sentido e em duplo sentido.

- Estabelecer parâmetros de soldagem tais como: corrente, velocidade de deslocamento, velocidade alimentação de arame, entre outros.

- Analisar o comportamento microestrutural nas duas condições de depósito, no protótipo de manufatura aditiva construído.

- Determinar a susceptibilidade ou resistência a corrosão por pite em meios agressivos mediante a norma ASTM G48-11 prática A.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A realização do presente trabalho seguiu uma estrutura específica, descrita na Figura 4-1.

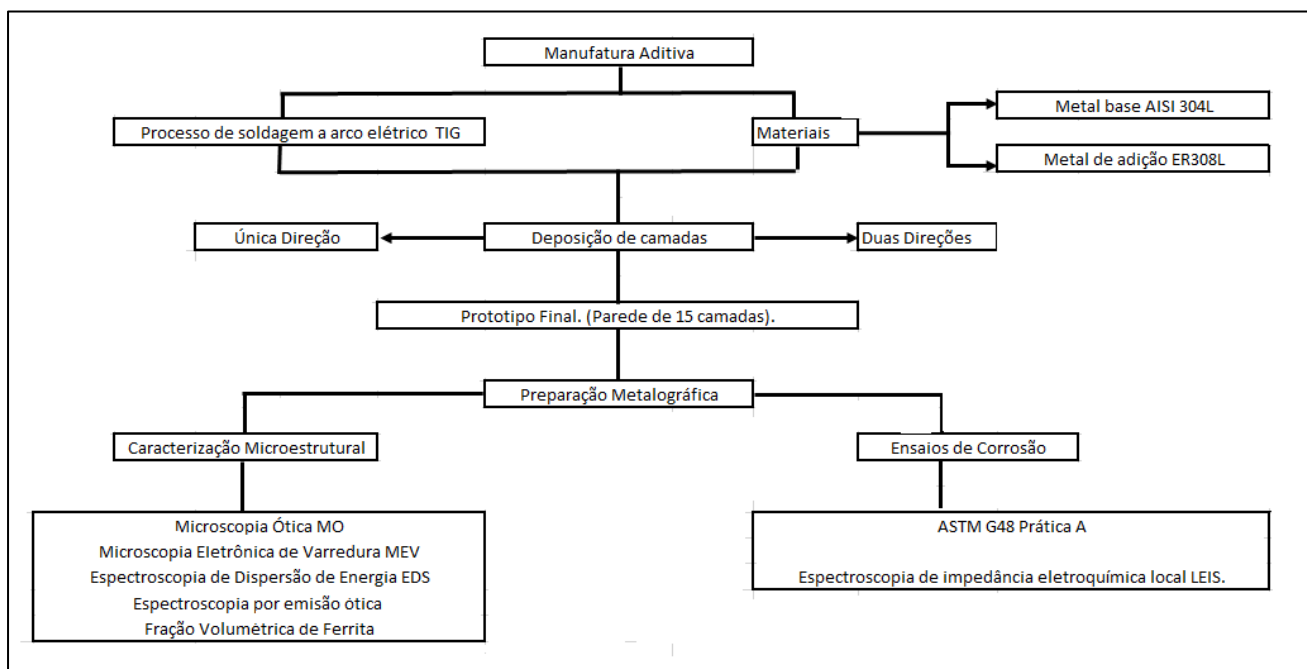


Figura 4-1 Estrutura do desenvolvimento da pesquisa.

Para realização da manufatura aditiva por arco elétrico foram empregados os aços inoxidáveis austeníticos 304L como metal de base e o 308L como metal de adição respectivamente com o processo TIG. Concerne mencionar que o material base é necessário na construção da manufatura aditiva e deve apresentar afinidade metalúrgica, porém não é o foco de estudo nessa pesquisa. Na literatura encontram-se diversos estudos do tema, especificamente em materiais e ligas metálicas como: alumínio, titânio e aço inoxidável 316L, ressaltando assim a importância do desenvolvimento de esta pesquisa com o uso do aço inoxidável 308L.

### 4.1 Execução de Soldagem.

Os materiais e equipamentos utilizados na execução da soldagem do trabalho foram fornecidos pelo Laboratório de Soldagem (Grupo de pesquisa de Soldagem e Junção GPSJ) do departamento de engenharia metalurgia PMT- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

#### 4.1.1 Parâmetros de soldagem.

Antes de começar a soldagem deve se realizar uns procedimentos necessários, tais como:

- Retificação do material base pelas duas faces, para cada uma das chapas a utilizar.
- Afiar a ponta do eletrodo de tungstênio 2% Tória empregado com um ângulo de 30°, realizar-se sempre ao início do depósito de cada uns dos passes.
- Testificar o gás de proteção e sua vazão estejam corretos, neste caso é o argônio puro com o consumo de 15L/min.
- Posicionar os equipamentos, o deslocador linear Jet Line e o alimentador de arame com as respectivas velocidades, os valores estão indicados na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**
- Instalar o equipamento de pré-aquecimento da chapa junto com a manta térmica, a temperatura de pré-aquecimento é de 120°C.
- Posicionar a tocha TIG a 90° numa distância de 7mm com respeito ao material base, realizar-se em cada uns dos passes.

Depois de tudo dito anteriormente, se procedeu a executar uma soldagem teste com parâmetros de soldagem encontrados, os valores estão apresentados como condição 1 na Tabela F. Nessa primeira soldagem se construiu um corpo de prova denominado experimental (CPexp) em forma de parede, composto de 15 camadas, sendo depositadas em uma direção única. Esta primeira soldagem foi realizada como teste piloto para observar o comportamento desses parâmetros iniciais (condição 1) na deposição sucessiva de camadas e por conseguinte não entrará na discussão do trabalho.

Por outro lado, na condição 2 se realizaram duas soldagens variando-se e ajustando-se alguns parâmetros com respeito a condição 1 (velocidade de deslocamento, velocidade de alimentação de arame e corrente) refletindo um melhor comportamento na construção e levantamento dos corpos de prova. Para esta condição se fez o depósito de material tanto em uma direção única (CP1) como em duas direções (CP2). Também os parâmetros empregados se detalham na Tabela F. Outra diferença entre as condições de soldagem aplicadas, foi que para este se incluiu

a utilização do pré-aquecimento da chapa. Na Figura 4-2 aprecia-se o esquema para as duas condições de soldagem.

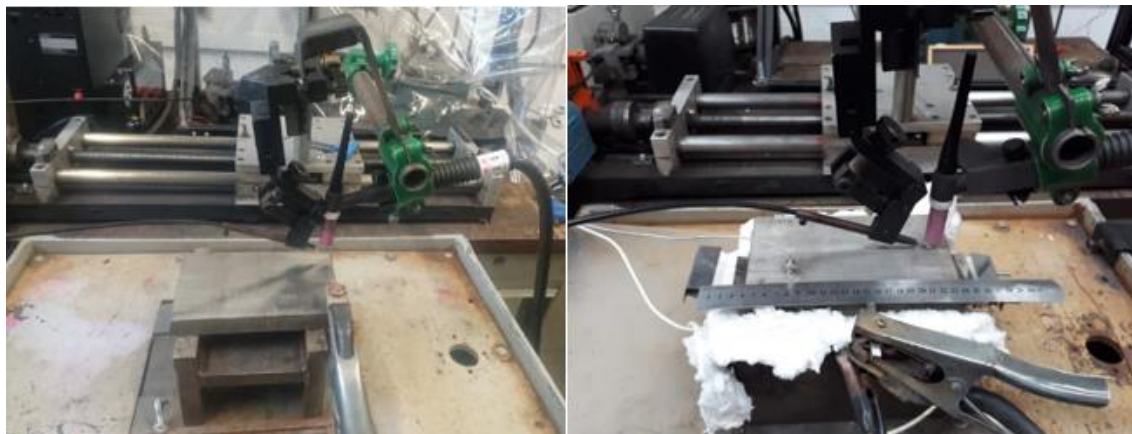


Figura 4-2. Configuração experimental do ajuste de parâmetros da soldagem realizada para manufatura aditiva do ER308L a) condição 1 e b) condição 2.

Tabela F Parâmetros de soldagem.

Parâmetros	Condição 1	Condição 2
Velocidade Deslocamento	2,5mm/s 150mm/min	2,0mm/s 120mm/min
Velocidade Alimentação Arame	110mm/min	100mm/min
Afiação eletrodo	30°	30°
Distância eletrodo-peça	7mm	7mm
Diâmetro do arame	1,2mm	1,2mm
Vazão de Gás	15L/min	15L/min
Gás de Proteção	Ar Puro	Ar Puro
Corrente	200 A	210 A



## 4.2 Composição química.

A determinação da composição química para os materiais como recebidos, metal base 304L e o metal de adição 308L, foi por meio de espectrometria de emissão óptica realizado na PROAQT Empreendimentos tecnológicos Ltda. O ensaio foi executado na temperatura ambiente de 23°C e com umidade relativa do ar de 68%. As medições foram feitas em 3 regiões diferentes para ambos os materiais.

## 4.3 Caracterização microestructural.

### 4.3.1 Preparação metalográfica.

A preparação das amostras para análises de microestrutura foi realizada em várias etapas: Corte, embutimento lixamento, polimento e ataque químico.

A primeira etapa é a do corte do material para obter os corpos de prova. O respetivo processo de corte se realizou nos equipamentos isomet e cut-off utilizando discos de corte diamantado e abrasivos, este foi feito na direção transversal aos cordões de solda. Nesta etapa deve se ter um cuidado no momento do corte para evitar aquecimento local na peça para não afetar a microestrutura e assim mesmo evitar deformações, por isso mesmo o corte foi feito com resfriamento a água e a baixas rotações.

Depois, a etapa de preparação da superfície do corpo de prova começa com o embutimento das duas amostras. Deve se constatar a importância do embutimento, pois além de facilitar o manuseio de peças pequenas, evita que amostras com arestas rasguem a lixa ou pano de polimento. Então para estas amostras foram embutidas a quente com material particulado denominado baquelite (tempo de aquecimento 6 minutos e 4 minutos tempo de resfriamento a água).

Tendo as amostras embutidas em baquelita passa ao processo de lixamento. Para o lixamento se realizou de forma manual húmida, usando lixas de granulometria cada vez menor (100,220, 320,400,600 e 1200 mesh); girando em direção 90° em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior.

Enquanto ao polimento, esta fase se visa um acabamento superficial polido isento de marcas, utiliza-se para este fim pasta de diamante ou alumina. Para o polimento destas amostras passaram por panos 9  $\mu\text{m}$ , 3 $\mu\text{m}$  e 1 $\mu\text{m}$ ; numa média de 5 minutos em cada pano.

Para identificação da microestrutura foi utilizado o reagente marble (20 ml de HCl, 20 ml de água e 4 g de  $\text{CuSO}_4$ ), realizando-se o ataque pelo método de imersão em um tempo de 5 segundos.

#### 4.3.2 Macrografia

Foram realizadas macrografias em cada um dos corpos de prova (CPexp, CP1 e CP2) com a finalidade de medir altura e espessura dos protótipos, com ajuda do equipamento lupa estereoscópica da marca Carl Zeiss® e o software Axio Vision® disponível no laboratório de Soldagem Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da escola Politécnica (PMT) da Universidade de São Paulo (USP).

#### 4.3.3 Microscopia ótica

Para identificar a microestrutura foi utilizado o microscópio ótico Olympus modelo BX60 que está na sala de metalografia do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da escola Politécnica (PMT) da Universidade de São Paulo (USP). As micrografias foram tomadas com aumentos de 100x, 200x e 500x para cada uma das amostras.

As análises microestruturais foram realizadas mediante microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de dispersão de energia (EDS). Destacando-se a região de transição metal base – cordão de solda, região das primeiras camadas, na parte intermedia do CP e na região superior dos últimos cordões de solda. Para microscopia ótica os aumentos de 50x, 100x, 200x e 500x foram os empregados para poder identificar a microestrutura.

Para a medição de fração volumétrica do microconstituente ferrita- austenita foi realizada mediante a técnica de metalografia colorida usando o reagente marble. Este

reagente destaca e revela a ferrita numa cor escura enquanto a austenita fica clara para a respetiva identificação. Com ajuda o software Axion Vision 4.0 do microscópio ótico Zeiss, estabelecendo-se uma quantidade de 20 micrografias em distintas áreas de cada uma das regiões dos CPs, anteriormente classificados.

#### 4.4 Ensaio de corrosão.

##### 4.4.1 Ensaio de corrosão testes de Pite.

Para a realização do ensaio de corrosão sobre o material ER308L utilizado na manufatura aditiva se consultou a norma ASTM G48-11. Esta norma possui seis métodos de testes sob procedimentos para determinação de pites e corrosão por crateras quando estão expostas a agressivos ambientes de cloreto. O interesse para este estudo foi o método A que está denominado como o teste de pite por cloreto férrico.

O método A está designado para determinar a resistência relativa à formação de pites dos aços inoxidáveis e base níquel, ligas com cromo. A solução utilizada foi dissolvida 100 g de reagente cloreto férrico  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  em 900 mL de tipo IV reagente água, misturado dentro de um béquer até ter uma dissolução total. Tendo em conta a recomendação de temperaturas para o teste  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Antes de realizar o ensaio, é necessária uma etapa de preparação das amostras onde passa por lixamento e polimento das superfícies até conseguir ver sem riscos e livre de alguma sujeira e grassas.

Ao ter prontas as amostras passam-se a etapa de registro do peso de cada uma delas antes de começar o ensaio de corrosão. Esta medida vai ser comparada ao final do ensaio para assim obter os valores de perda de massa das amostras.

Depois, as amostras se colocam de tal forma que as superfícies se encontrem livres dentro do recipiente a ser depositadas, logo se adiciona a solução preparada de cloreto férrico até cobrir as peças. Deixa-se submergidas as amostras por um tempo de 72h como expõe a norma, durante este tempo se faz um acompanhamento visual para ver que está acontecendo a medida de passar o tempo, sem necessidade de retirar as amostras.

Finalmente passadas as 72h se retiram as peças e passam por um processo de limpeza, toma de registros e pesagem para poder assim comparar e analisar as mudanças do material frente a este meio corrosivo.

Para este estudo foram realizados os testes nas duas temperaturas recomendadas pela norma (temperatura ambiente e 50°C. Como também se realizaram nas condições: 1) CPs com metal base e o 2) CPS só com o metal depositado. Na figura se observa um esquema representativo desta prática.



Figura 4-3 Figura ilustrativa do ensaio de corrosão ASTM G48 prática A para manufatura aditiva do ER308L realizado a 22± 2°C.

#### 4.4.2 Espectroscopia de impedância eletroquímica local (LEIS).

O ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica (LEIS) foi feito para as amostras CPexp, CP1 e CP2, usando um sistema comercial Ametek® VS-LEIS, controlado com o software VerScan®, do Laboratório de Processos Eletroquímicos do PMT. A área escaneada foi de 60 mm<sup>2</sup> e os mapas foram obtidos em uma única frequência de 0,5 Hz, com uma amplitude de perturbação de 30 mV (rms) e um tamanho de passo de 200 µm. Usando um eletrodo Ag/AgCl como referência e um anel Pt como contra. Os diagramas foram obtidos numa solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1mM depois de 24h de imersão. Os parâmetros para os mapas foram escolhidos de acordo com a literatura [47]. Na Figura 4-4 detalha-se o esquema utilizado para realizar esta técnica. Cabe ressaltar que somente será realizado a discussão do ensaio para o CP1 e CP2.

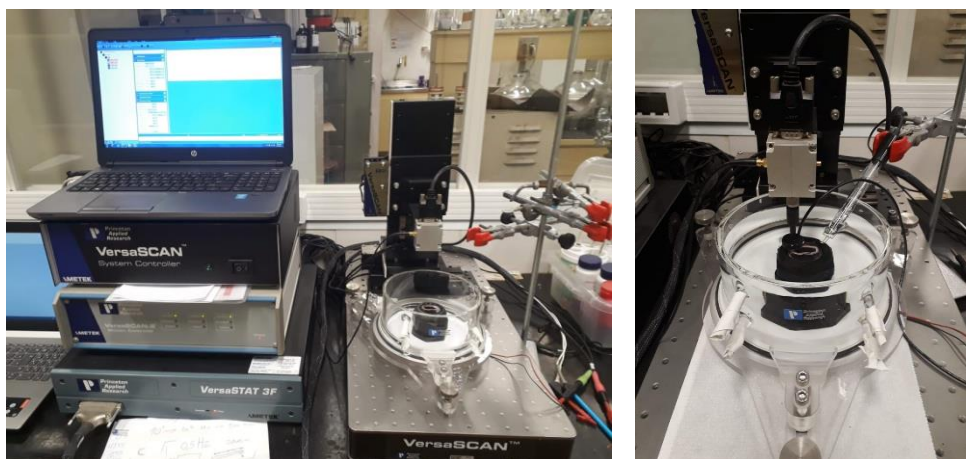


Figura 4-4 Configuração dos equipamentos utilizados na técnica LEIS para manufatura aditiva do ER308L.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise Química.

Os resultados da análise química obtida por espectrometria de emissão óptica podem ser detalhados nas Tabela G e

Tabela H. Aprecia-se que o ER308L apresenta composição química maior em elementos principais dos aços inoxidáveis austeníticos (cromo e níquel) ao ser comparado com o metal base AISI 304L. Os dos materiais utilizados neste estudo pertencem aos aços inoxidáveis austeníticos da série 300, representando assim mesmo modificações composicional do clássico aço inoxidável 18%Cr-8%Ni. Entre essas modificações referem-se : 1) adição de Mo, Mo+ N para melhorar a resistência a corrosão por pite e por cratera, 2) baixando o teor de carbono ou estabilizando com Ti ou Nb+Ti para reduzir a corrosão intergranular em materiais soldados, 3) o acrescento do Cr e Ni para melhorar a resistência à oxidação em alta temperatura e por último 4) a adição do Ni para melhorar a resistência corrosão sob tensão[38].

As composições químicas obtidas mediante espectrômetro de emissão ótica, estão dentro dos valores nominais conforme as normas AWS A5.9-93 e ASTM A240-97.

Tabela G. Composição química do AISI 304L mediante espectrômetro de emissão ótica.

	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>
<b>AISI 304L</b>	0.022	1.324	0.378	0.033	0.0114	18.15
<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Ti</b>	<b>N</b>	<b>Fe</b>
8.768	0.085	0.0073	0.104	0.008	0.01618	71.08

Tabela H. Composição química do ER308L mediante espectrômetro de emissão ótica.

	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>
<b>ER308L</b>	0.033	1.593	0.0475	0.040	0.0211	22.931
<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Ti</b>	<b>N</b>	<b>Fe</b>
13.385	0.099	0.0226	0.1278	0.022	0.03815	61.19

## 5.2 Caracterização Metalográfica.

### 5.2.1 Quantificação da fração volumétrica de ferrita.

A quantificação da ferrita nos aços inoxidáveis tem uma importante função para determinar a fabricação e execução do serviço das estruturas soldadas na indústria moderna. A capacidade e veracidade para estimar o teor de ferrita tem sido de grande ajuda na predição de várias propriedades das soldas dos aços inoxidáveis austeníticos. Além, o teor da ferrita nas soldas dos aços inoxidáveis austeníticos é controlado por vários fatores e o resultado de diversas mudanças microestruturais que acontecem durante os processos de soldagem[48,49].

Com ajuda das Tabela G e

Tabela H de composição química dos materiais utilizados e por meio do modelo semiempírico do diagrama WRC1992 estima-se o número de ferrita (FN, Ferrite Number) com o cálculo do  $C_{req}$  e  $N_{ieq}$ , ver Tabela I.

Tabela I .Cálculo de  $C_{req}$  e  $N_{ieq}$  para cada material.

<b>Material</b>	<b><math>C_{req}</math></b>	<b><math>N_{ieq}</math></b>	<b><math>C_{req}/N_{ieq}</math></b>
<b>AISI304L</b>	18,54	12,2	1,52
<b>ER308L</b>	23,04	15,34	1,51

Na Figura 5-1 se detalha que o FN para o substrato ou metal base AISI304L é próximo a 2% (linha azul) e o FN para o ER308L (linha vermelha) foi aproximadamente de 10%. Os dois materiais compartilham a mesma região dentro do diagrama, a região ferrita austenita (FA) o que significa que o comportamento de solidificação nas duas estruturas seja que a fase primária é de ferrita, solidificada na forma de dendritas e depois na interface ferrita-liquido se forma a austenita [9].

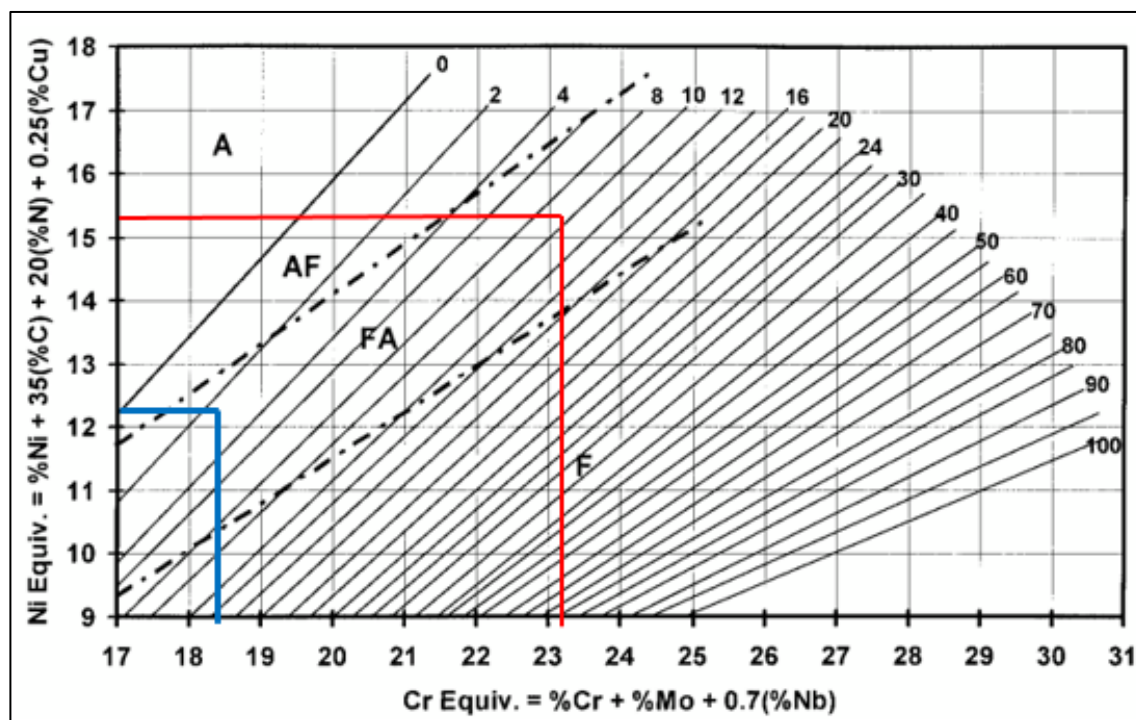


Figura 5-1 Diagrama WRC 1992 utilizado para calcular FN do AISI304L e do ER308L.

A quantificação da fração volumétrica da ferrita para cada um dos corpos de prova (CP1, CP2 e CPexp) foi realizado por meio da técnica de metalografia colorida como já descrito na seção de materiais e métodos. Para o metal base ou substrato 304L usado na manufatura aditiva do trabalho apresentou valores de fração volumétrica de ferrita baixos como se descreve na Figura 5-3.

Continuando com a quantificação da fração volumétrica da ferrita em cada um dos corpos de prova, se obtiveram os resultados mostrados nas Figura 5-2 e Figura 5-4, percebendo um comportamento parecido com os valores calculados mediante o diagrama WRC1992. Para a certeza desses dados da fração volumétrica por microscopia ótica, se aplicou o método de análise de variância (ANOVA) para medir o nível de confiabilidade dos dados. Se assumiu igualdade de variância para esta análise dando resultado que todas as médias são iguais e o nível de significância foi de  $\alpha=0,05$ .

Takalo et al, determinam que a morfologia da ferrita varia em função da fração volumétrica da mesma, de acordo as “figuras 5-5 e 5-6”. Desta forma, a manufatura aditiva do ER308L se supõe que ao longo da microestrutura apareçam tanto ferrita vermicular quanto acicular[35,50].



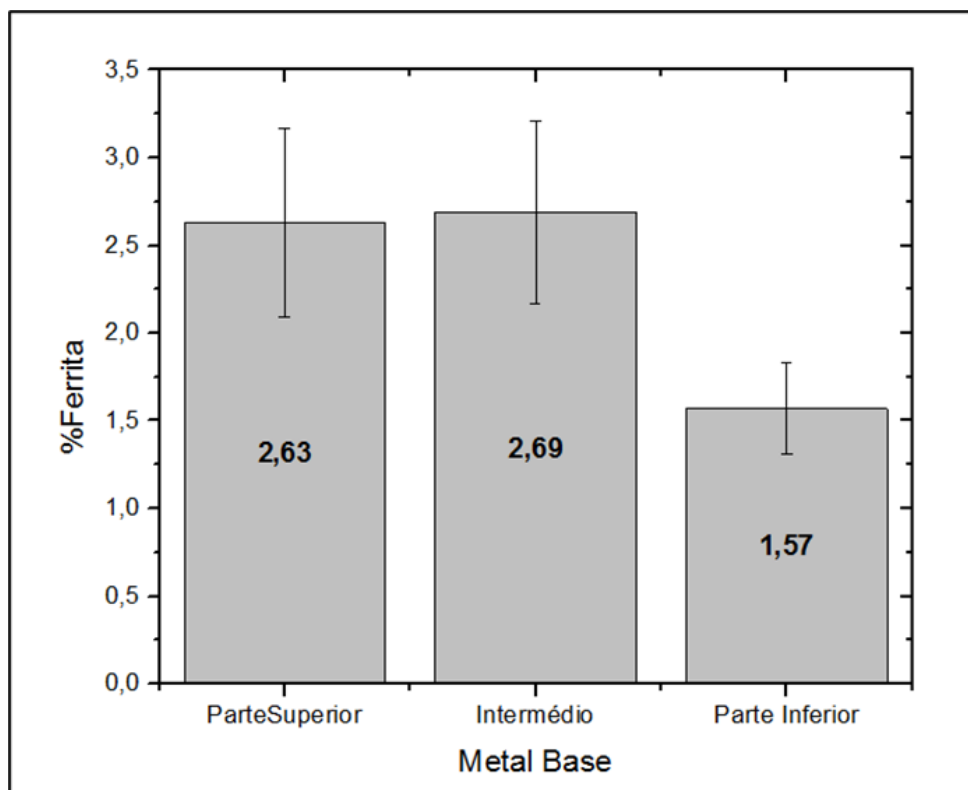


Figura 5-3 Fração volumétrica de ferrita medido a través de microscopia ótica para o metal base AISI 304L, medidos em três diferentes regiões.

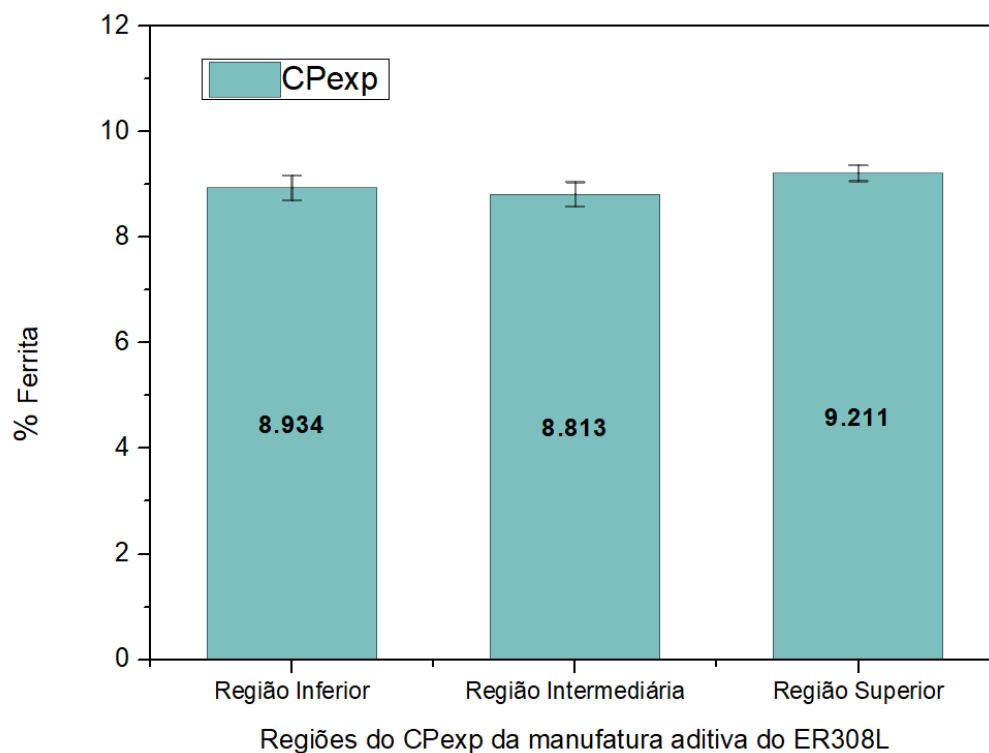


Figura 5-2 Fração volumétrica de ferrita medida a través de microscopia ótica para o metal de adição ER308L, nos CPexp.

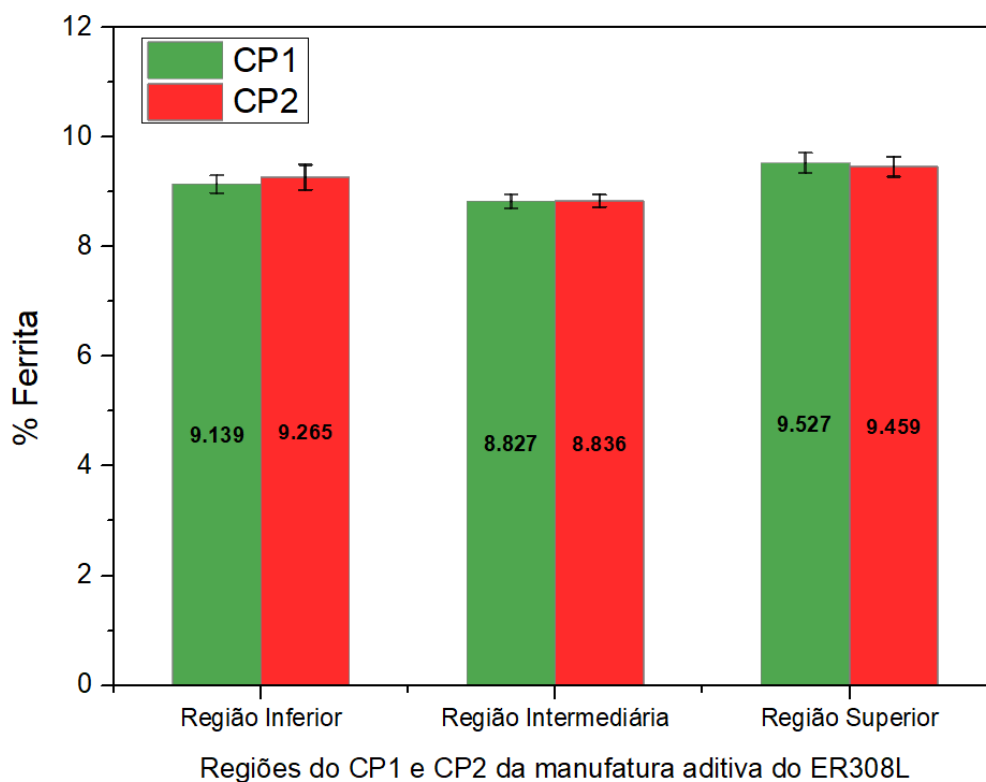


Figura 5-4 Fração volumétrica de ferrita medida a través de microscopia ótica para o metal de adição ER308L, nos CP1 e CP2.

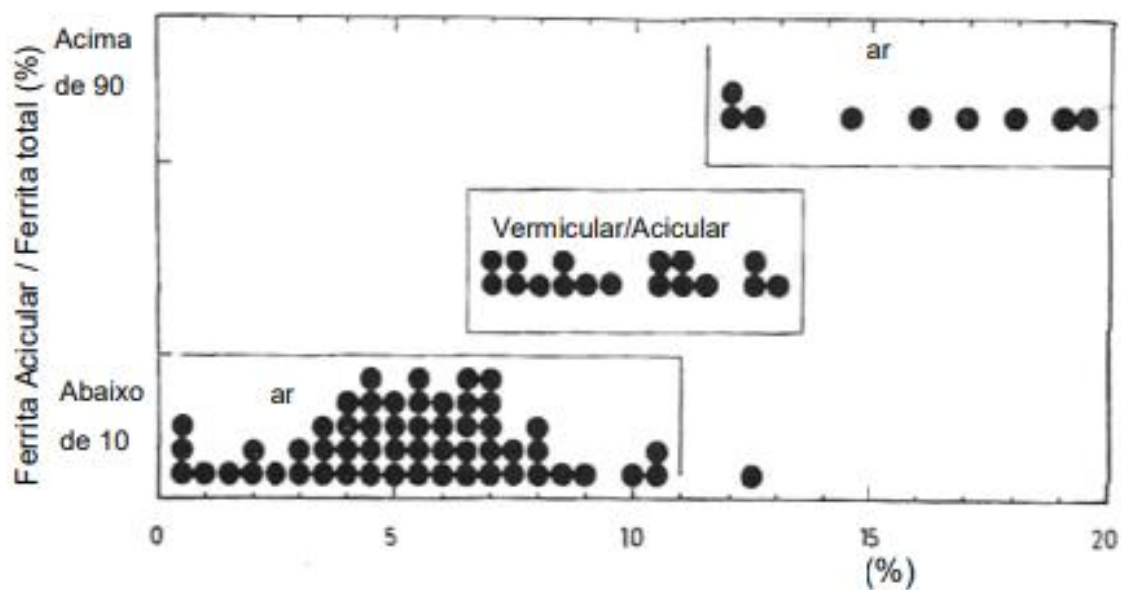


Figura 5-5 Morfologia da ferrita em função da fração volumétrica da mesma [35,50]

### 5.2.2 Macrografia

As figuras Figura 5-6, Figura 5-7 e Figura 5-8 mostram a seção transversal do depósito produto da manufatura aditiva do ER308L nas duas condições determinadas nos materiais e métodos. Na figura 5-6 pode se observar o depósito de 15 camadas com uma altura total de 22,7mm revelando alguns contornos entre camadas. Para o CP1 e CP2 conseguiram-se depósitos de 15 camadas para cada um, com alturas de 29,6mm e 284mm respectivamente. Além, as macrografias mostram que não possuem defeitos superficiais (descontinuidade, falta de fusão, pites, entre outros) na construção dos protótipos.

Quando a deposição na manufatura aditiva começa, o calor fornecido é conduzido para o substrato (metal base 304L) e dissipando-se rapidamente. Quanto maior a camada depositada maior é o calor acumulado, e a redução na taxa de dissipação de calor é maior. No CP2 consegue uma maior largura comparada com o CP1, devido a diferença de deposição em duas direções e relacionada com a viscosidade do metal fundido durante a deposição. Na literatura, destacam a dependência da viscosidade com a temperatura; a medida a temperatura ambiente da soldagem aumente a viscosidade do metal fundido durante a deposição diminui. Isto quer dizer, a deposição do CP2 possui mais calor acumulado do que CP1, a temperatura de preaquecimento é alta, quando a camada é depositada. Por conseguinte, a viscosidade é menor, o fluxo na direção da largura pode aumentar[51].

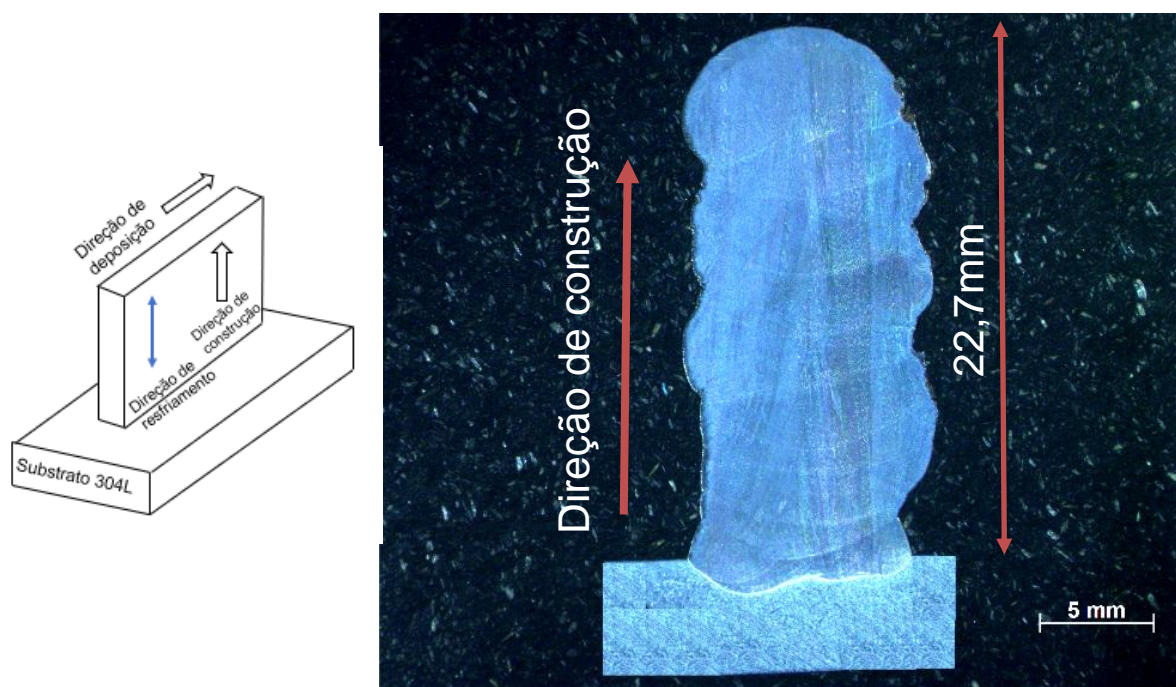


Figura 5-6 Macrografia da manufatura aditiva do ER308L com o processo TIG , CPexp.

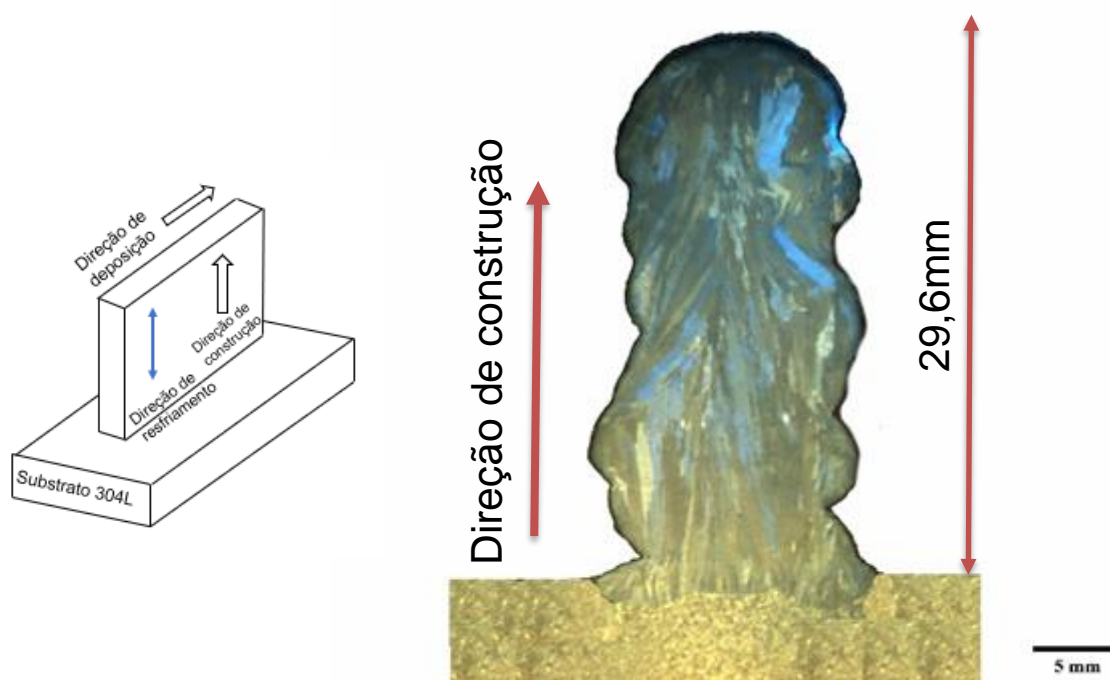


Figura 5-7 . Macrografia da manufatura aditiva do ER308L com o processo TIG, CP1..

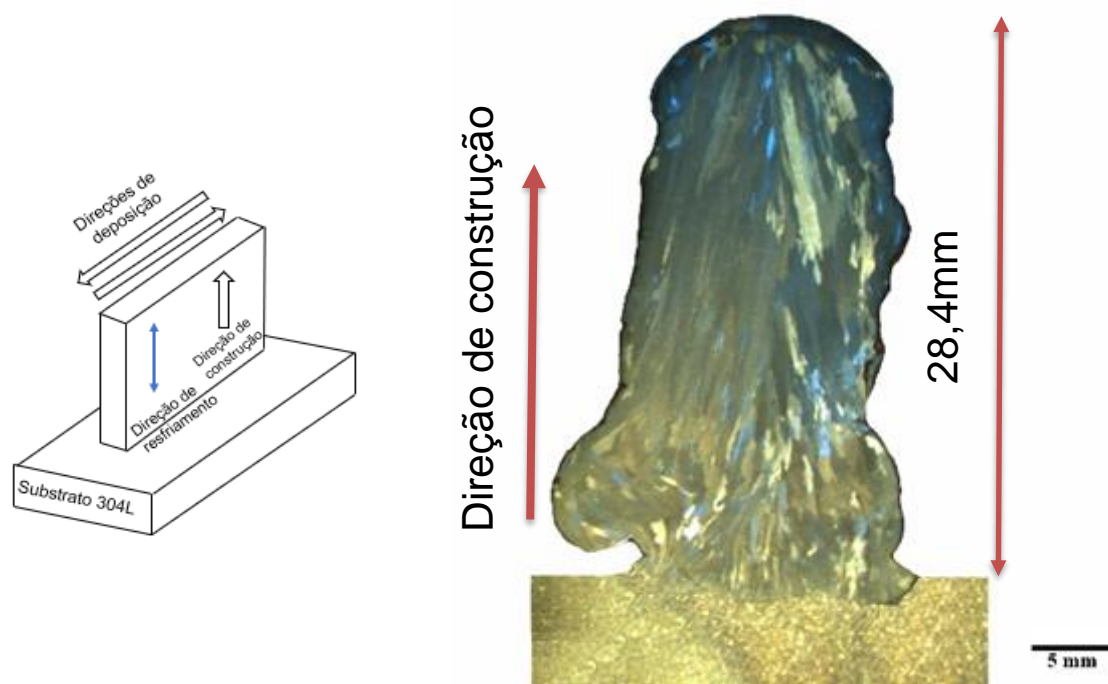


Figura 5-8 Macrografia da manufatura aditiva do ER308L com o processo TIG , CP2.

### 5.2.3 Caracterização microestrutural por microscopia ótica.

As microestruturas de solidificação dos aços inoxidáveis austeníticos são um pouco complexos e podem solidificar como ferrita primária ou austenita primária devido a diferentes condições de solidificação. Estas estruturas não dependem só do comportamento da solidificação, senão também da transformação do estado sólido subsequente controladas pela composição química e taxas de resfriamento. Como já mencionado na seção 2.3.3 desta pesquisa, os aços inoxidáveis austeníticos tem quatro tipos de modos de solidificação produzindo diferentes morfologias de ferrita na microestrutura[52].

Por tanto, o modo de solidificação para a manufatura aditiva do ER308L nas duas condições de soldagem foi ferrita austenita (FA) determinado com ajuda do cálculo de  $C_{req}$  e  $N_{ieq}$ , diagrama WRC1992 e fração volumétrica de ferrita, indicado na seção 5.2.1.

Desde a Figura 5-9 até Figura 5-14 se observa o comportamento de solidificação da manufatura aditiva do ER308L destacando o modo FA ao longo da microestrutura de cada um dos corpos de prova (CPexp, CP1 e CP2). As micrografias correspondem a seção transversal de cada componente da manufatura aditiva realizada, a ferrita ( $\delta$ ) está identificada em preto, arranjada dentro de uma fase matriz de austenita ( $\gamma$ ), mostrada como a fase mais clara (cinza). Também se observa as duas morfologias existentes da ferrita para esta microestrutura, a ferrita vermicular e acicular.

O modo de solidificação FA do ER308L, a ferrita precipita do líquido quando a temperatura é menor que a temperatura de nucleação de ferrita na condição de equilíbrio. Quando a temperatura de fusão cai para a região trifásica, as três fases ( $\delta + \gamma + L$ ) ocorrerá O mecanismo de reação de três fases nas ligas ternárias de Fe-Cr-Ni ainda não está claro para os pesquisadores, já que as vezes é referida como uma reação peritética/ eutética. Sob este modo de solidificação, a microestrutura de ferrita vermicular geralmente é devido à baixa velocidade de solidificação e subsequente transformação de estado sólido, como mostrado na Figura 5-15 [52,53].

Portanto, o Rajasekhar et al[54], afirmam que o modo FA oferece a melhor resistência a trincas, enquanto as ligas do modo AF que são altamente suscetíveis a rachaduras semelhantes às das estruturas solidificadas em modo A. Dentro do modo FA de solidificação, a evolução estrutural desempenha um papel importante.

O comportamento das primeiras camadas (região inferior) dos CPexp, CP1 e CP2 é de uma microestrutura mais refinada e crescimento de dendritas colunares em diferentes direções, com relação as demais regiões; devido a que o calor é diretamente conduzido ao substrato na temperatura ambiente, assim a taxa de resfriamento é maior. Por outro lado, é claro que a taxa de resfriamento da última camada é significativamente reduzida à medida que as camadas subsequentes são construídas. Ao depositar camadas subsequentes longe do substrato, o substrato como caminho de dissipação pode ser ignorado. Também, o acúmulo e a dissipação de calor das camadas anteriores atingem um estado estacionário [55,56].

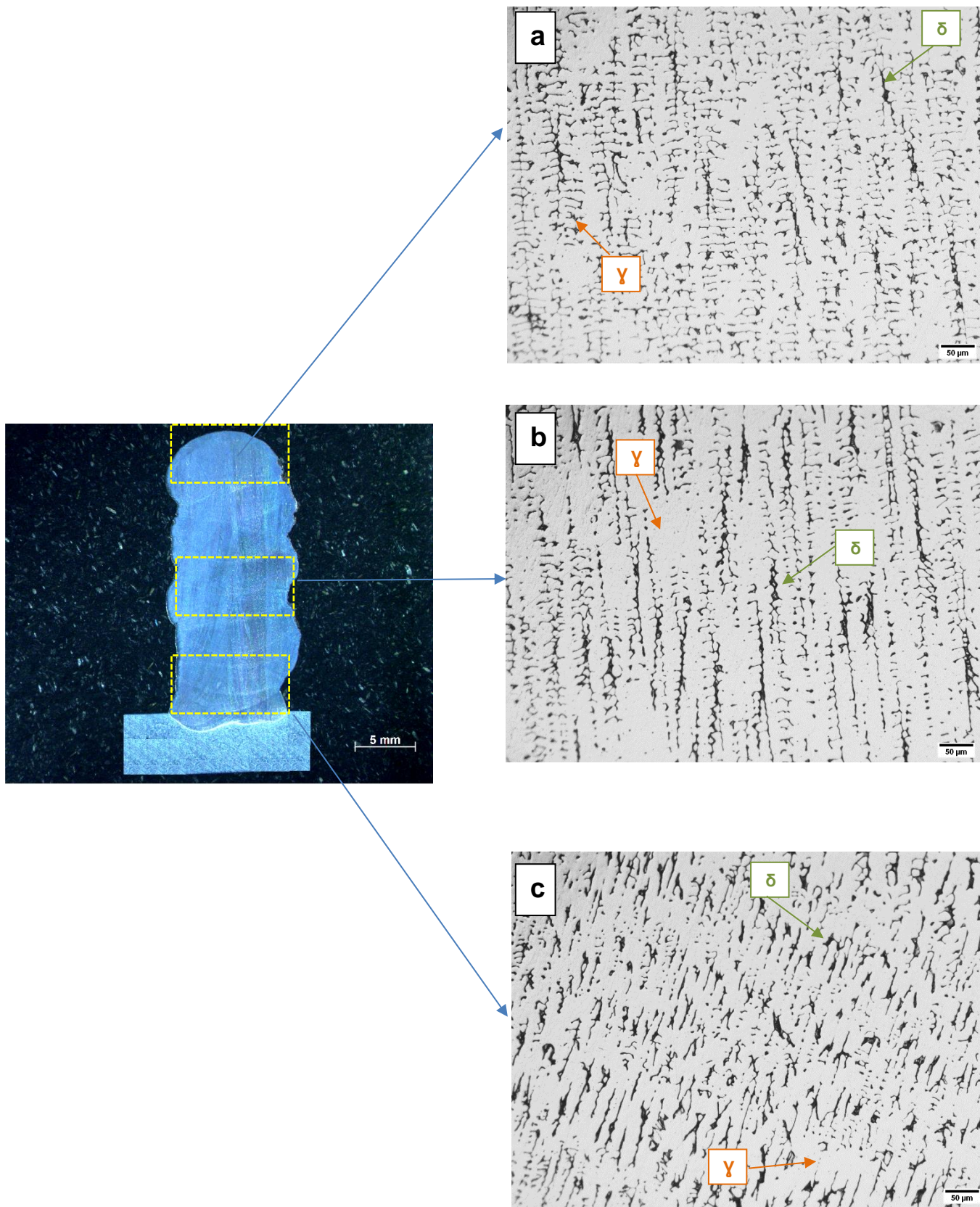


Figura 5-9 Micrografias da manufatura aditiva do ER308L, CPex a) região superior, b) região intermediária e c) região inferior. Aumento 200x.

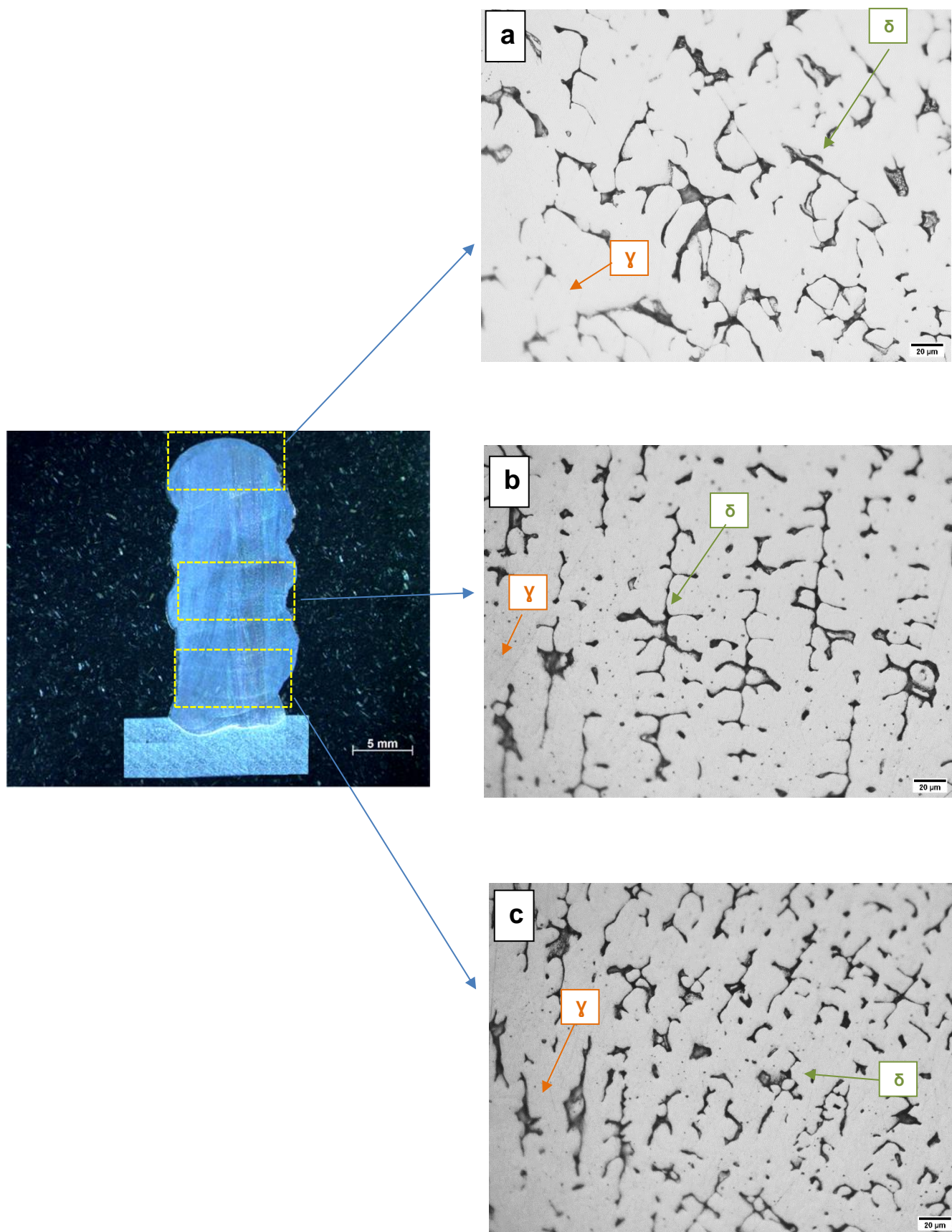


Figura 5-10 Micrografias da manufatura aditiva do ER308L, CPexp a) região superior, b) região intermediaria e c) região inferior. Aumento 500x.



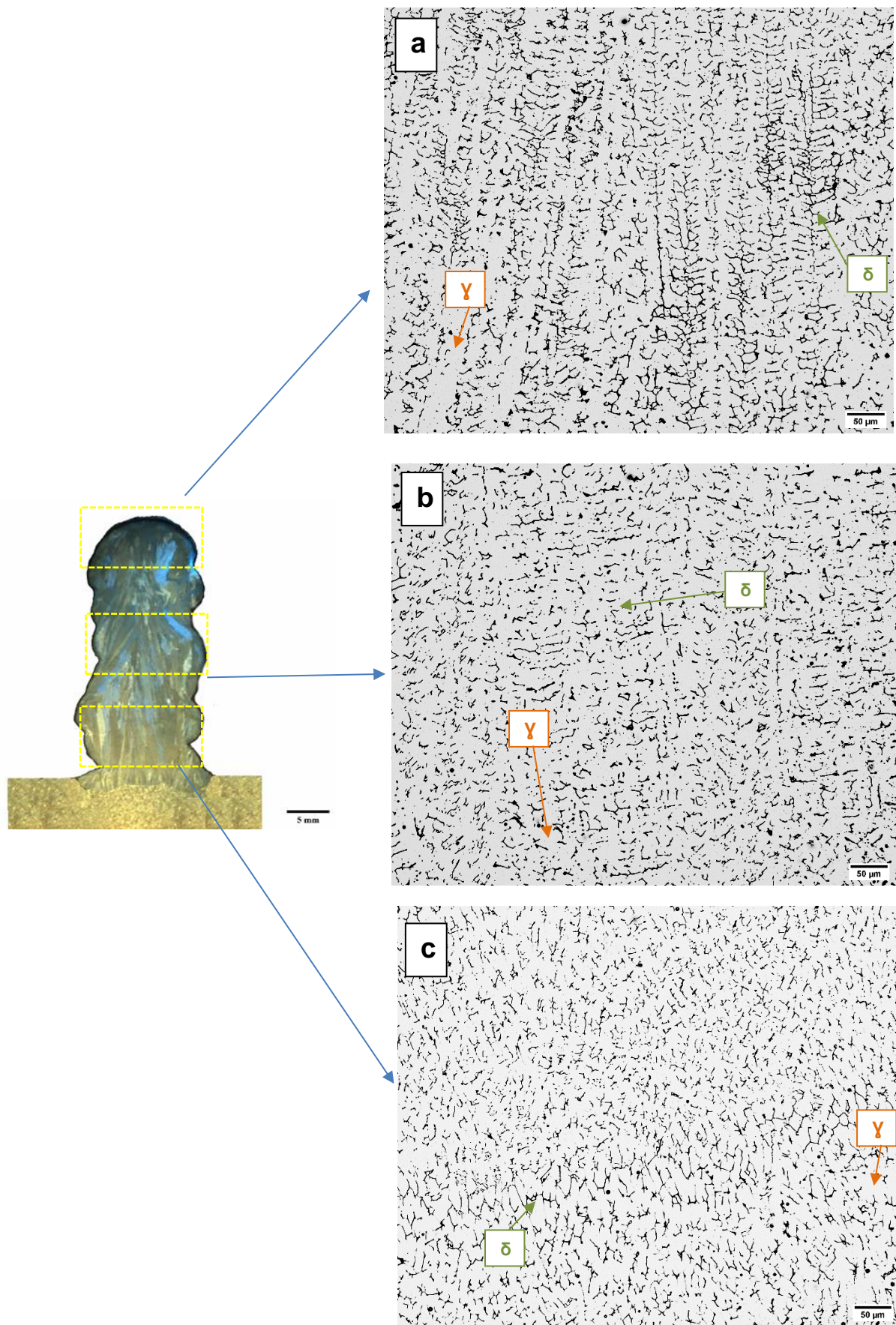


Figura 5-11 Micrografias da manufatura aditiva do ER308L, CP1 a) região superior, b) região intermediária e c) região inferior. Aumento 200x.

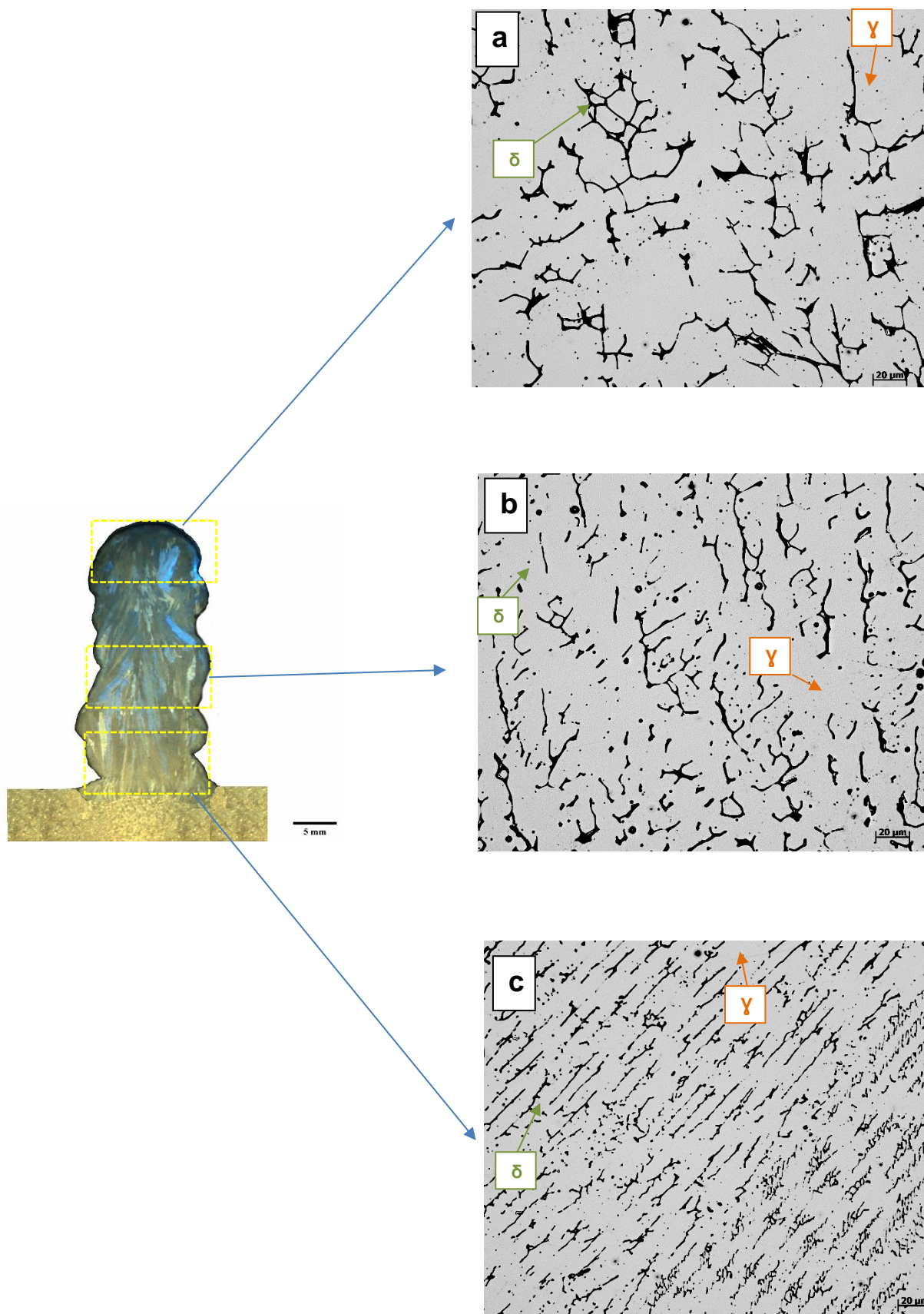


Figura 5-12 Micrografias da manufatura aditiva do ER308L, CP1 a) região superior, b) região intermediaria e c) região inferior. Aumento 500x.

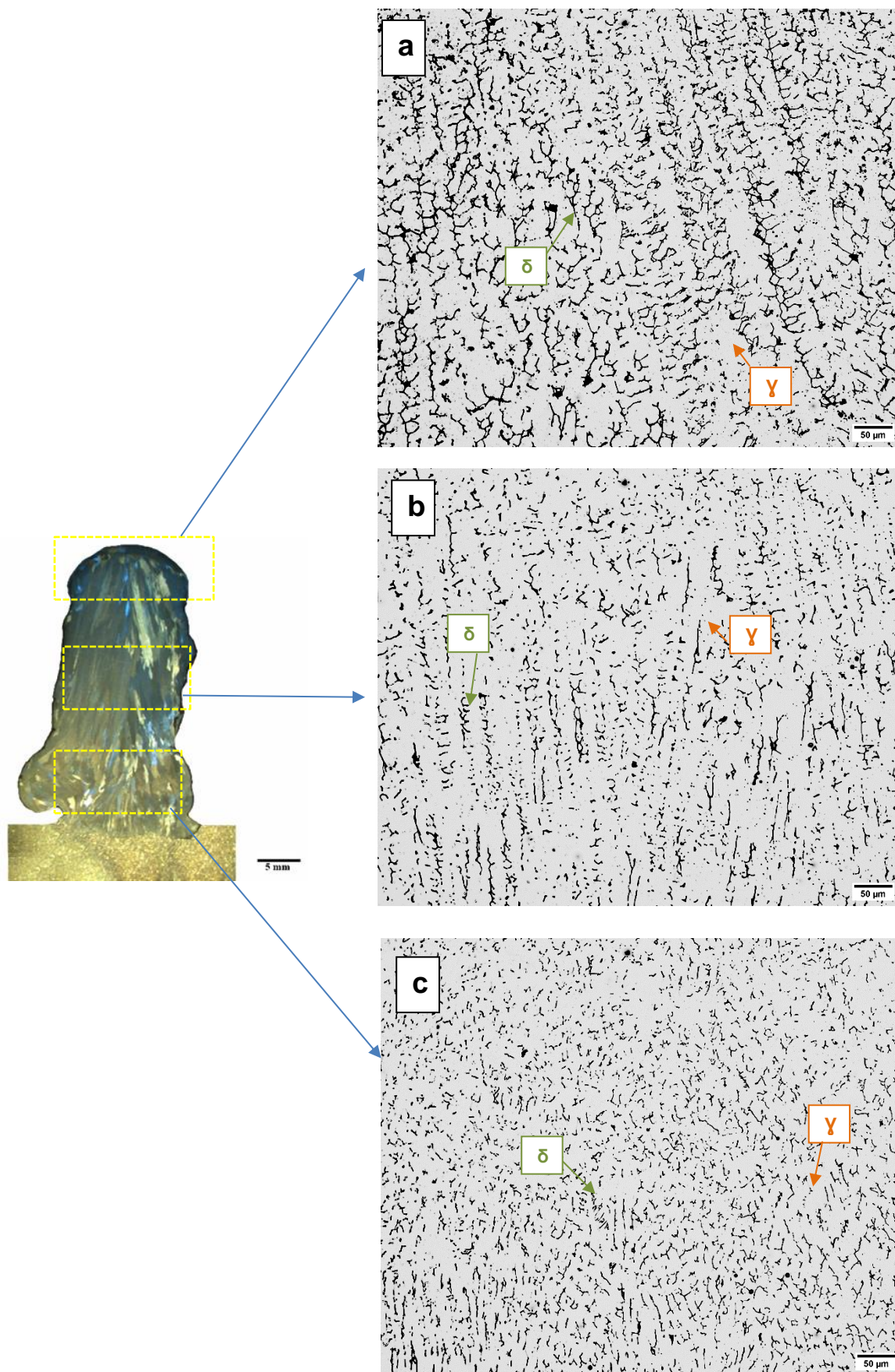


Figura 5-13 Micrografias da manufatura aditiva do ER308L, CP2 a) região superior, b) região intermediária e c) região inferior. Aumento 200x.

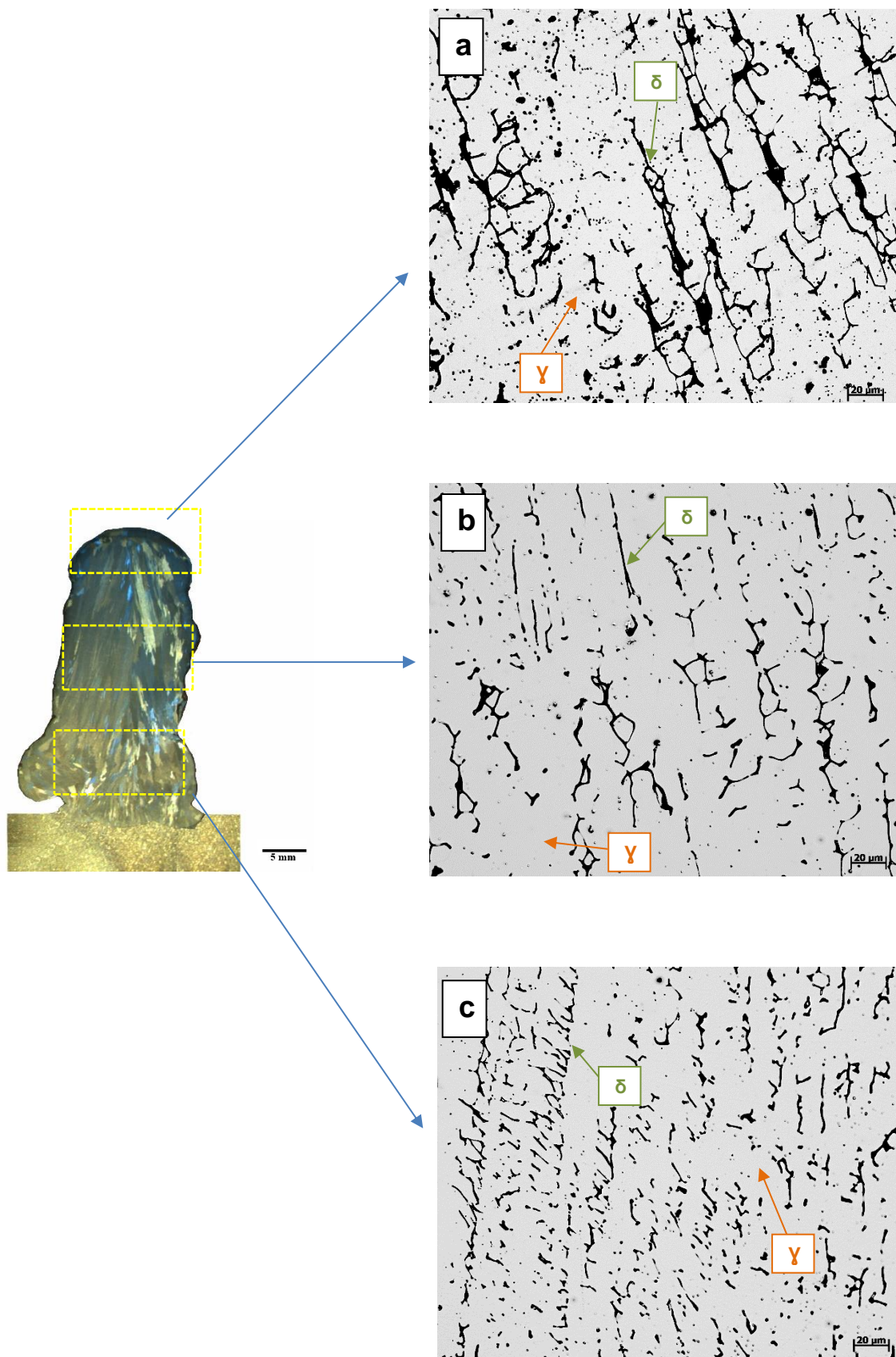


Figura 5-14 Micrografias da manufatura aditiva do ER308L, CP1 a) região superior, b) região intermediária e c) região inferior. Aumento 500x.

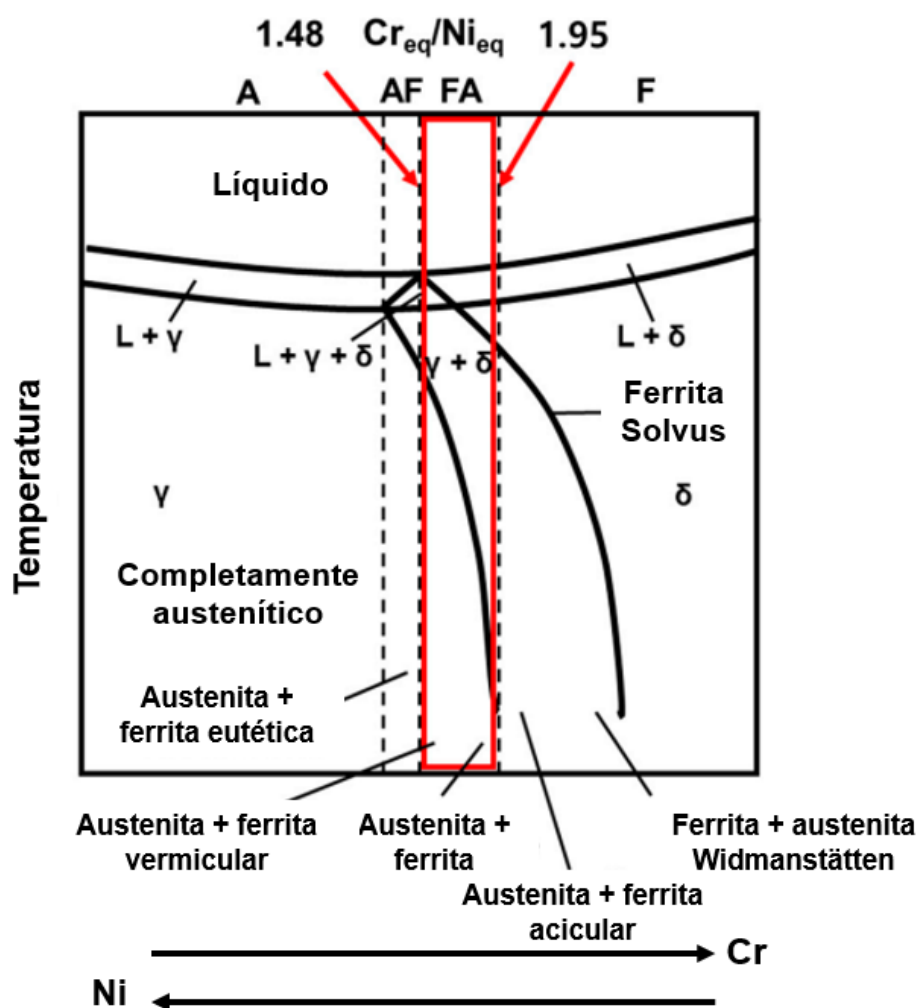


Figura 5-15 Posição relativa dos quatro modelos de solidificação dos aços inoxidáveis austeníticos no diagrama pseudobinário. Adaptado [52-53].

#### 5.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As micrografias da Figura 5-16 foram realizadas mediante imagens de elétrons secundários e retro espalhados no microscópio eletrônico de varredura. Conferindo-se a microestrutura revelada nas micrografias do microscópio ótico, uma microestrutura com matriz austenítica e dendritas de ferrita, e o tipo FA de solidificação do ER308L, explicado na seção anterior.

Se cita na literatura que o modo de solidificação FA é o preferido nos aços inoxidáveis austeníticos, já que envolve a formação de ferrita a partir do líquido e assim evita a ocorrência de trinca a quente. Nesse método de solidificação

caracteriza-se por apresentar duas morfologias de ferrita, a vermicular e acicular[35,57].

Na Figura 5-16 a), se observa que a ZAC apresenta uma microestrutura grosseira e com diferentes orientações, conseguindo destacar a região da primeira camada (cordão) do substrato (AISI 304L).

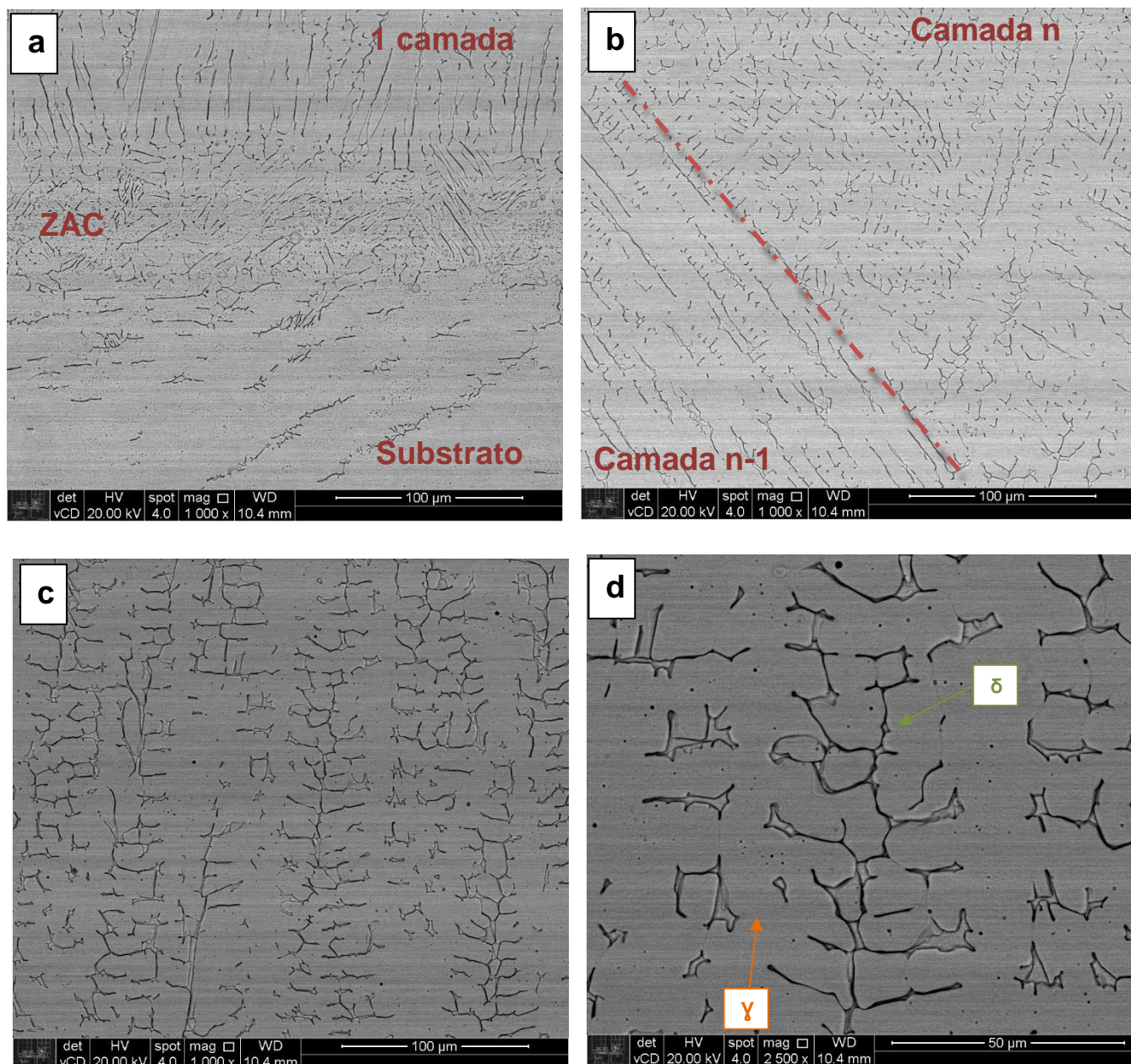


Figura 5-16 Micrografias por microscopia eletrônico de varredura (MEV) a) Região de transição substrato e primeiro cordão CP1, b) Transição de uma camada e outra do CP1, c) microestrutura de uma camada n do CP1 1000x e d) Microestrutura de uma camada n do CP1 2500x.

Na Figura 5-16 b), destaca-se o contorno que existe entre uma camada e outra, isto acontece ao longo de cada depósito dos CPs fabricados. Essa diferença de orientação entre uma cada e outra ajuda identificar uma nova região da microestrutura. Por último nas Figura 5-16 c) e d) se observa a orientação da microestrutura e a morfologia da ferrita na manufatura aditiva do ER308L.

### 5.2.5 Espectroscopia de dispersão de energia (EDS).

Mediante análise de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) nas diferentes regiões de cada um dos CPS, se certifica a composição química obtida não experimenta variação significativa ao longo das camadas depositadas sendo comparadas com a medição do ensaio de emissão ótica (Tabela H) e está dentro dos parâmetros especificados na norma AWS A5.9-93., vide Figura 5-17.

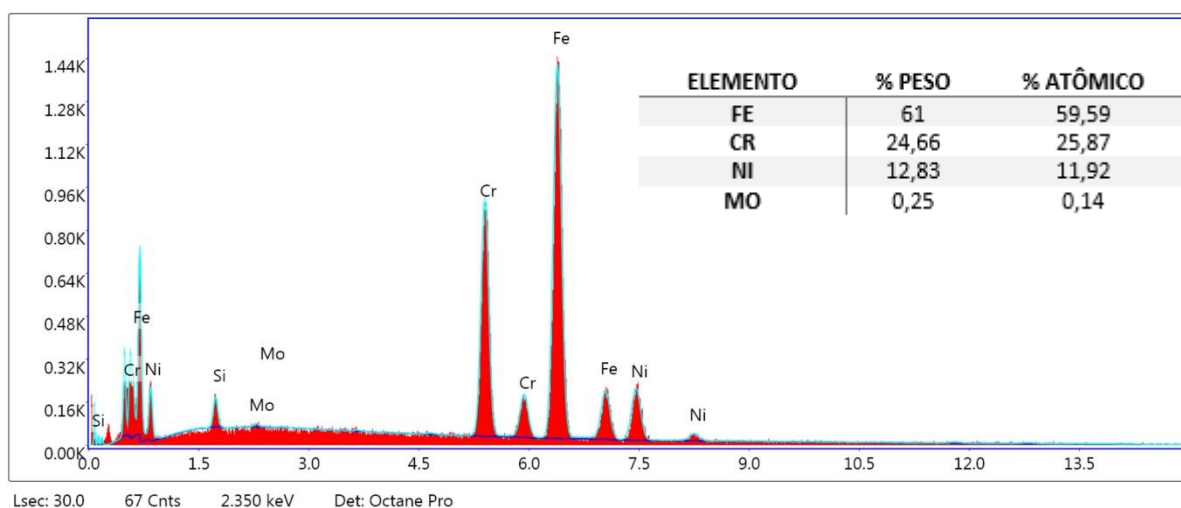


Figura 5-17 Análise de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da manufatura aditiva do ER308L.

### 5.3 Ensaio de microdureza Vickers

As Figura 5-18, Figura 5-19 e Figura 5-20 apresentam os mapas de microdureza vickers realizado ao longo da microestrutura em todos os CPs , mostrando maior dureza nas região inferior de cada CP, devido a microestrutura mais fina que as demais relacionado a maior taxa de resfriamento que existe já que o calor se dissipa pelo substrato.

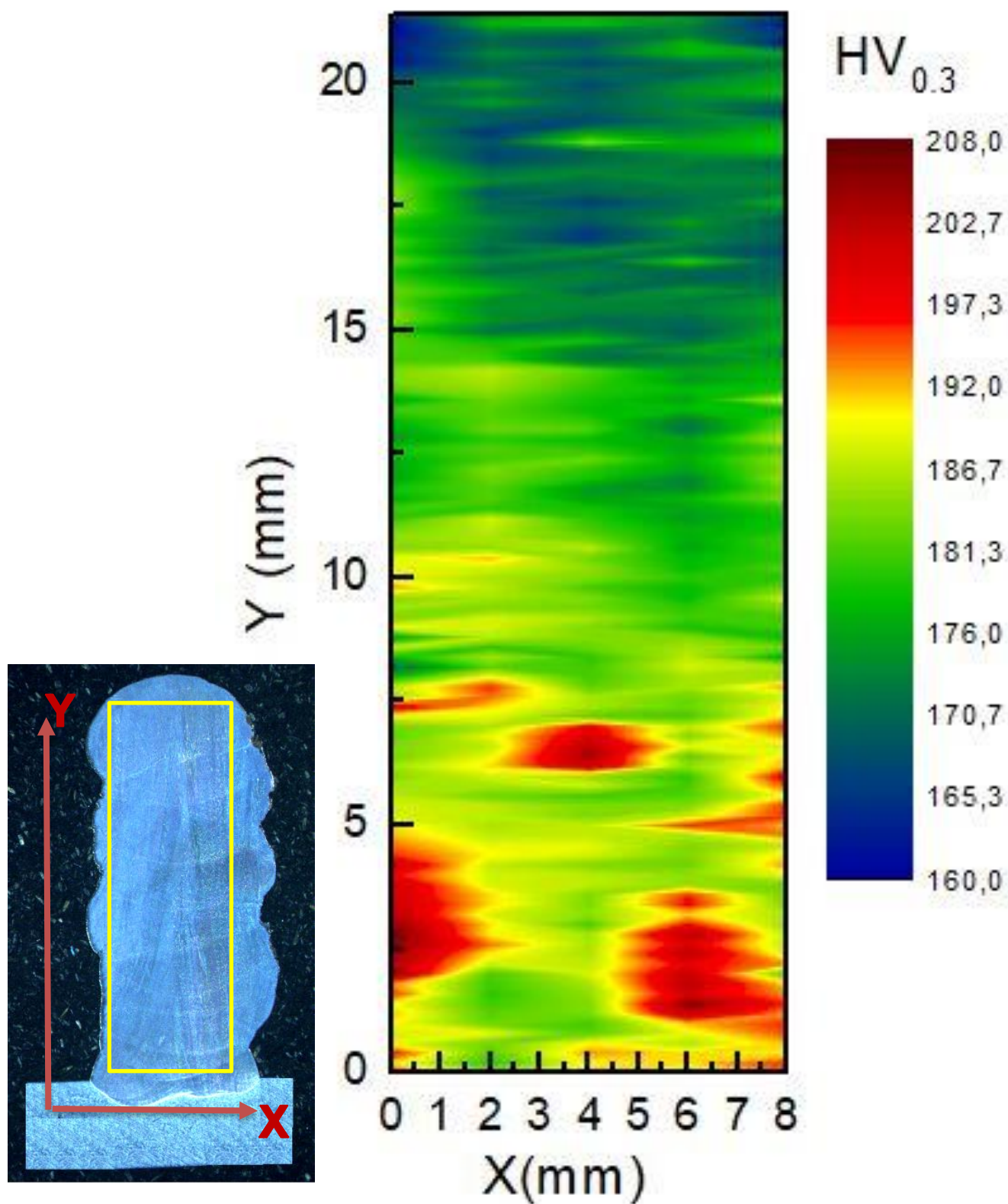


Figura 5-18 Mapa de microdureza vickers CPexp



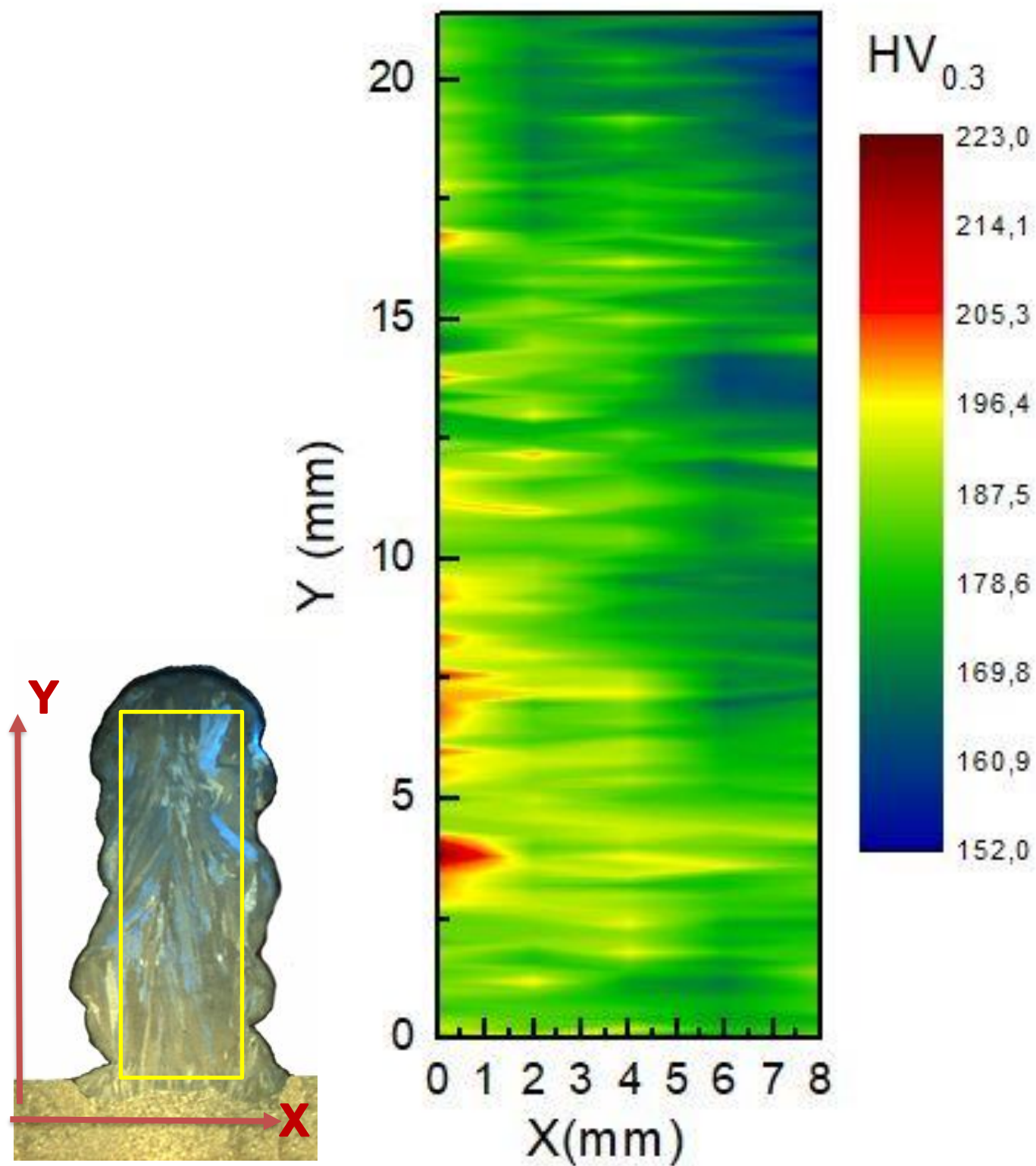


Figura 5-19 Mapa de microdureza vickers CP1

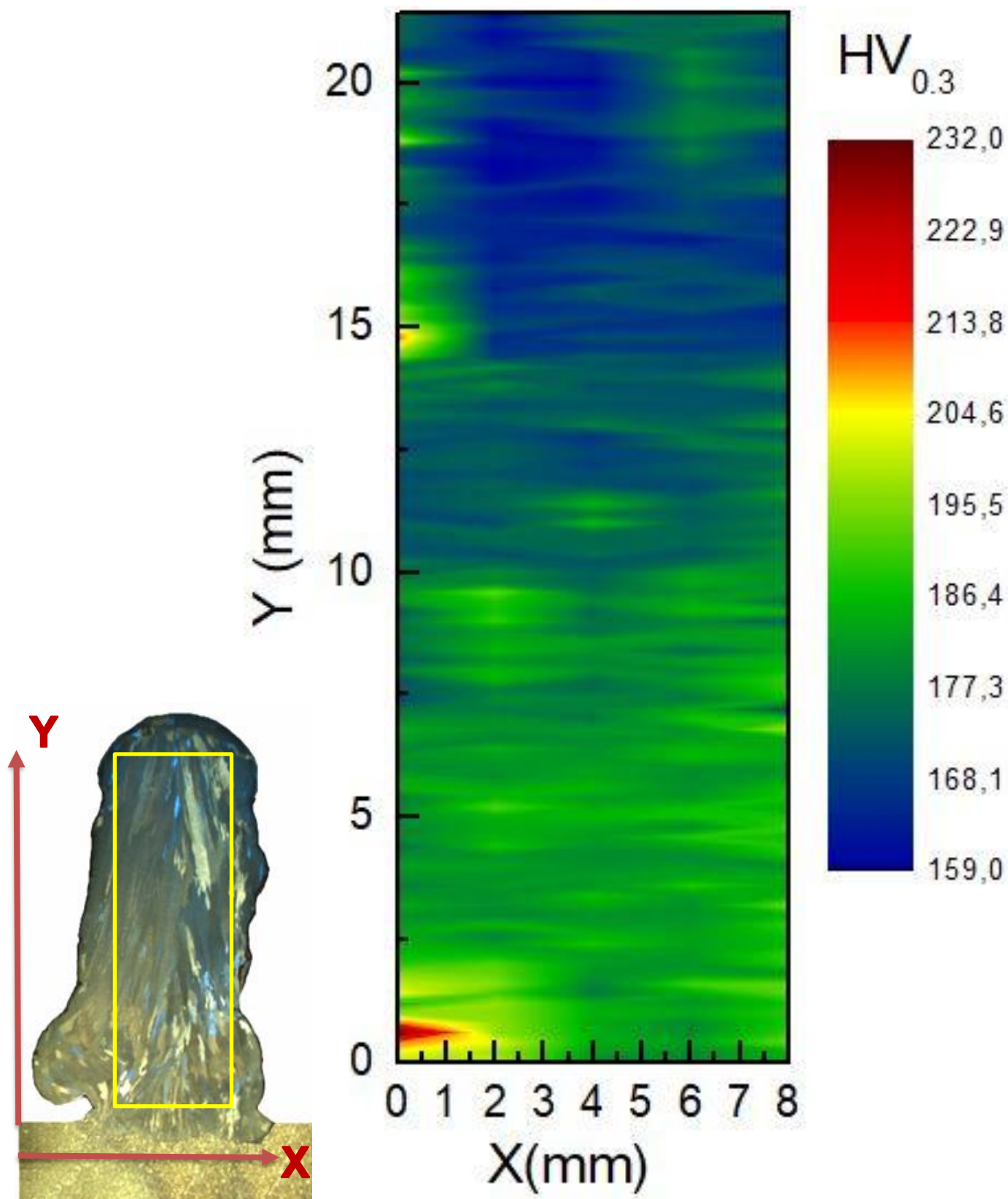


Figura 5-20 Mapa de microdureza vickers CP2.

## 5.4 Ensaio de corrosão

### 5.4.1 ASTM G48 prática A

Realizou-se o ensaio de corrosão ASTM G48 para avaliar a resistência a corrosão por pite tanto metal base AISI 304L como também o material de adição ER308L nos três corpos de prova, usando três amostras para cada CP. Destacando-se maior resistência à corrosão por pite foi por parte do ER308L, não sofrendo nenhum pite na sua superfície para cada uma condição de soldagem. Porém, no ensaio numa temperatura de 50 C os corpos de prova (sem metal base) apresentaram deterioração na superfície do metal depositado. Aprecia-se as imagens do ensaio nas diferentes temperaturas nas

Por outro lado, o substrato do CP2 foi o único em apresentar pite ao ser exposto a este meio agressivo, solução de cloreto férrico, durante as 72h do ensaio numa temperatura de 50°C. Tomando como referência as **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** e **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de composição química dos matérias, se percebe que o ER308L apresenta maior porcentagem de Cr, Ni ,Mo e N; os quais são elementos principais que brindam maior resistência à corrosão por pites. Também, outros elementos de liga como Vanádio, silício e tungstênio, melhoram a resistência a corrosão por pites. No caso do vanádio, tem sido utilizado nos aços inoxidáveis comerciais japoneses SCR-3 até um teor de 1,5%V e no desenvolvimento de novos aços inoxidáveis. Enquanto o silício, tem-se registros que movimenta o potencial de pite na direção nobre, comumente empregados em usos de meios altamente oxidantes. Por último se destaca o tungstênio, mostrando um aumento no potencial de pite e uma redução na densidade de corrente passiva [31,38].

Nesta prática de corrosão também se mediu a perda de massa de cada uns dos corpos utilizados para as duas condições de soldagem. No apêndice A se encontram as tabelas de perda de massa para cada um dos CPs nas temperaturas do ensaio, tendo como destaque uma perda pouco significativa. Se atribui a perda de massa ao produto de pites do metal base AISI304L durante a exposição com a solução cloreto férrico, para aqueles CPs com metal base.

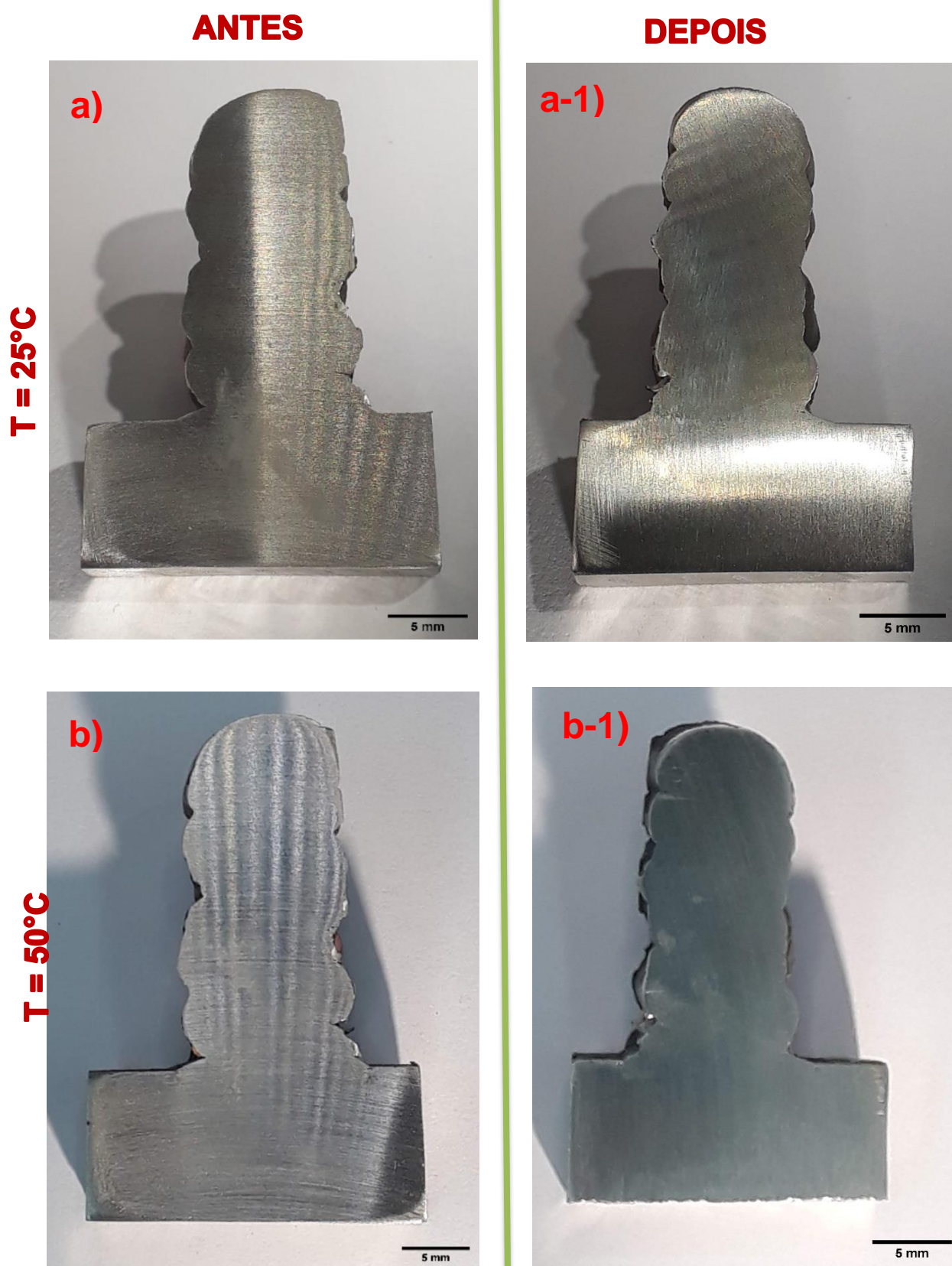


Figura 5-21 Ensaio da ASTM G48 prática A para o CPexp nas temperaturas  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 2^\circ\text{C}$  com substrato.

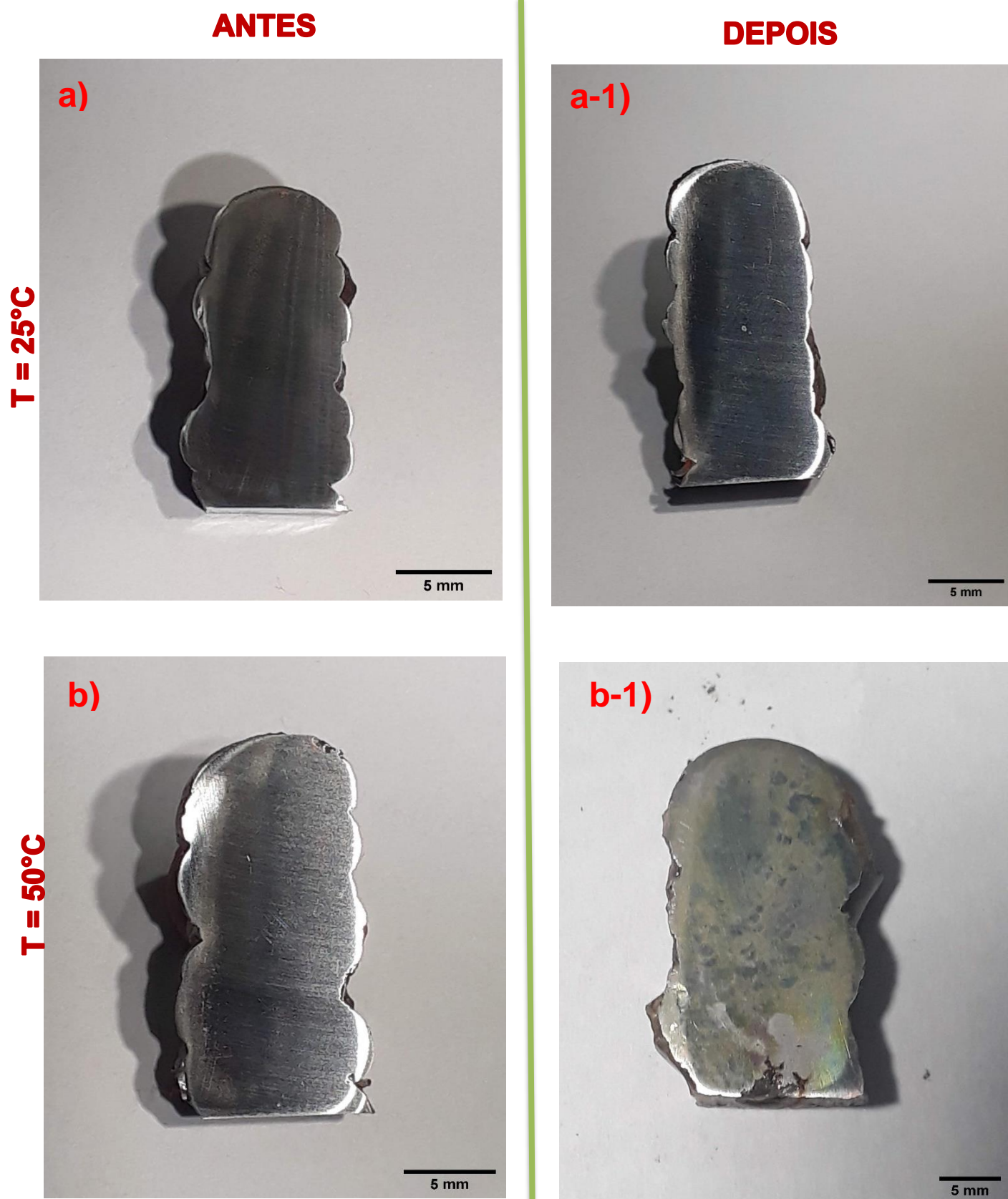


Figura 5-22 Ensaio da ASTM G48 prática A para o CPexp nas temperaturas  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 2^\circ\text{C}$  sem substrato.

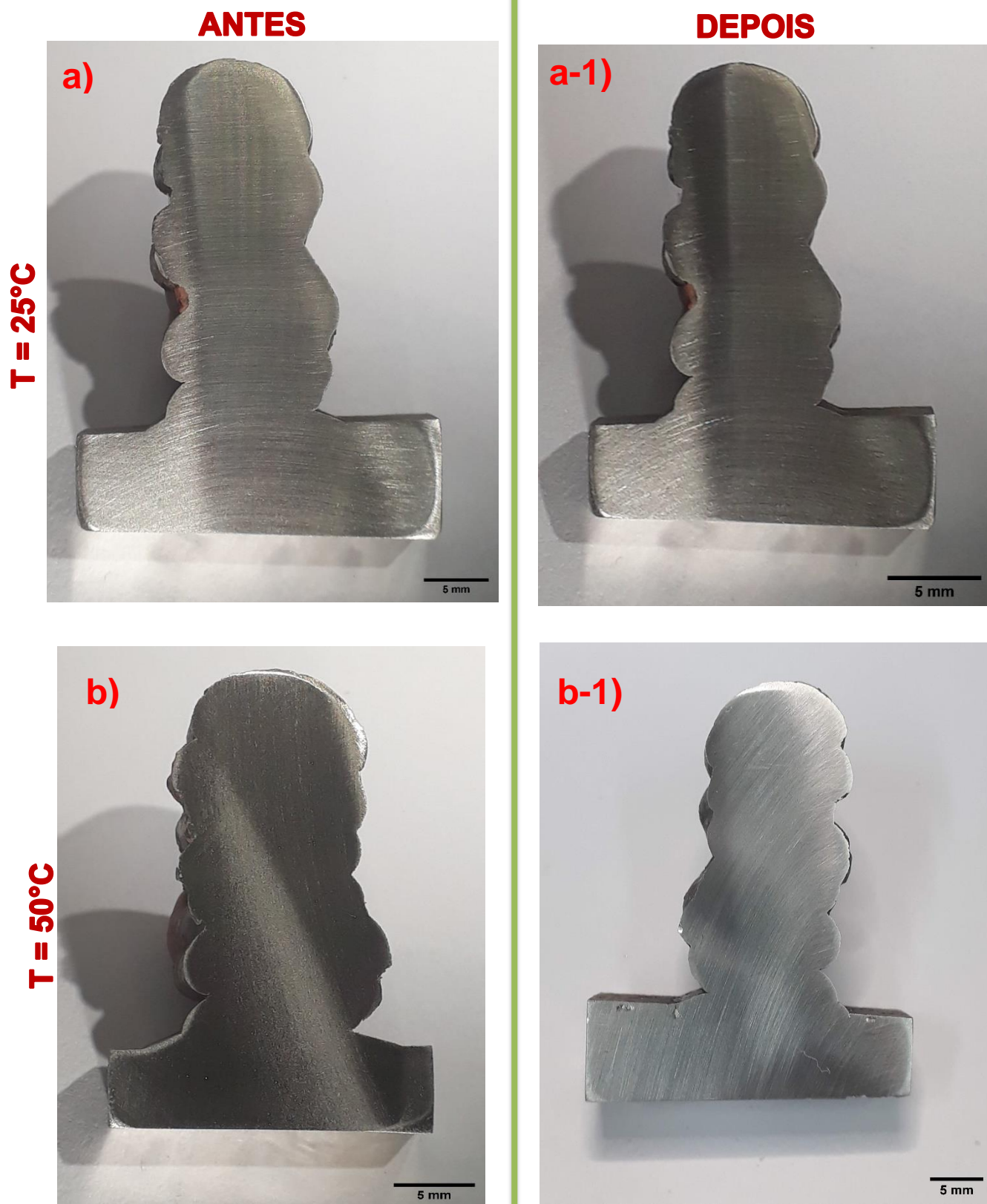


Figura 5-23 Ensaio da ASTM G48 prática A para o CP1 nas temperaturas  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 2^\circ\text{C}$  com substrato.

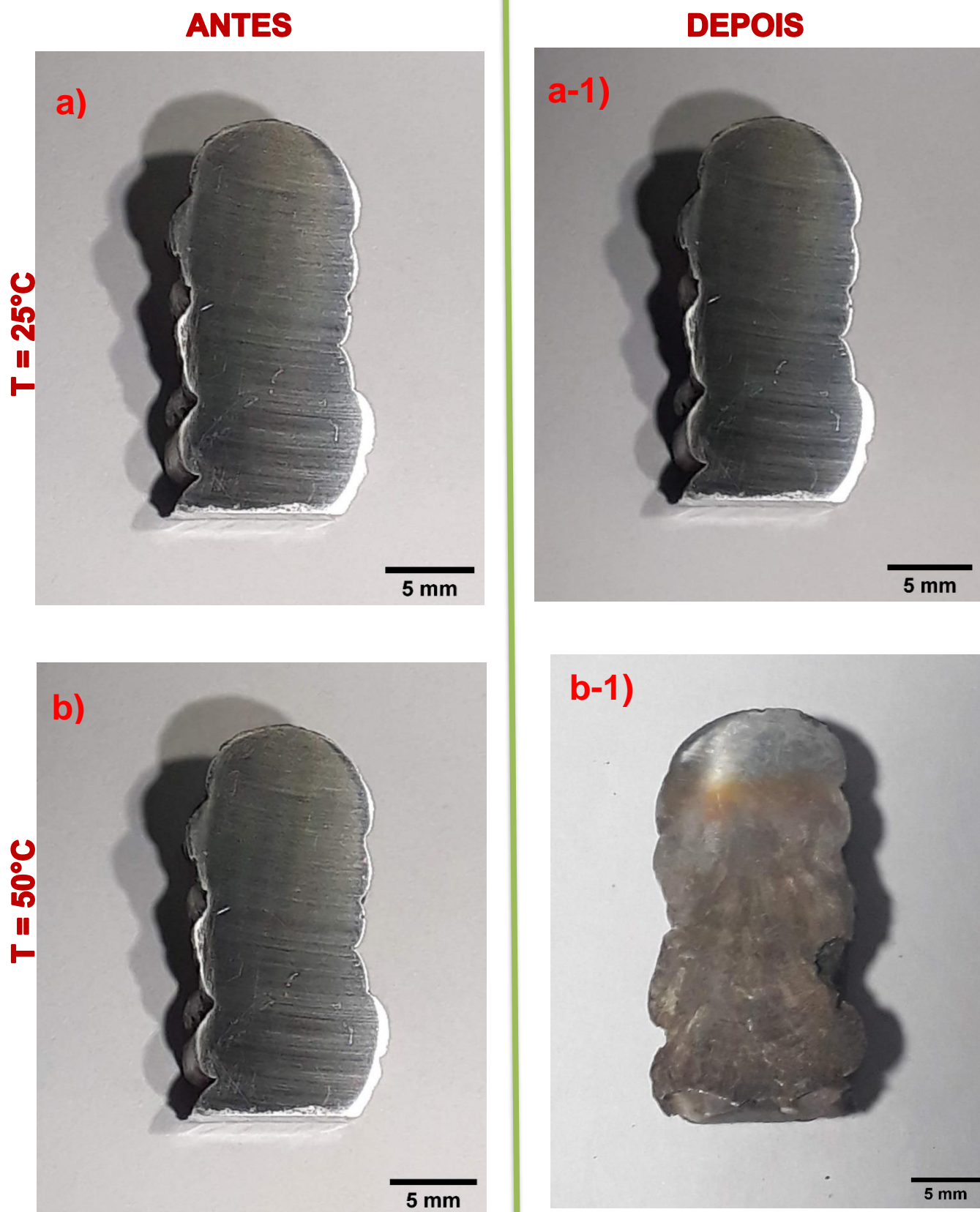


Figura 5-24 Ensaio da ASTM G48 prática A para o CP1 nas temperaturas  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 2^\circ\text{C}$  sem substrato.

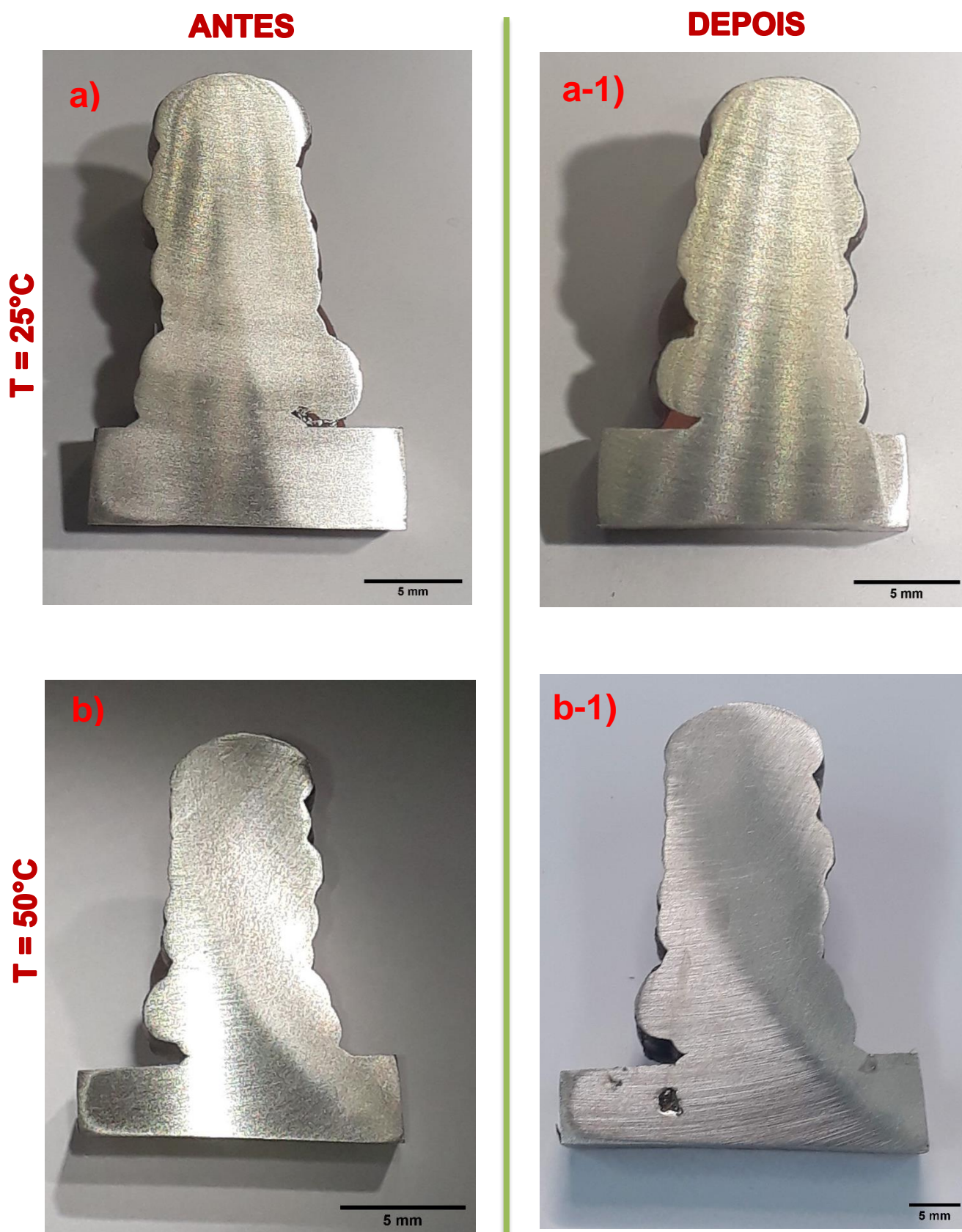


Figura 5-25 Ensaio da ASTM G48 prática A para o CP2 nas temperaturas  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 2^\circ\text{C}$  com substrato.



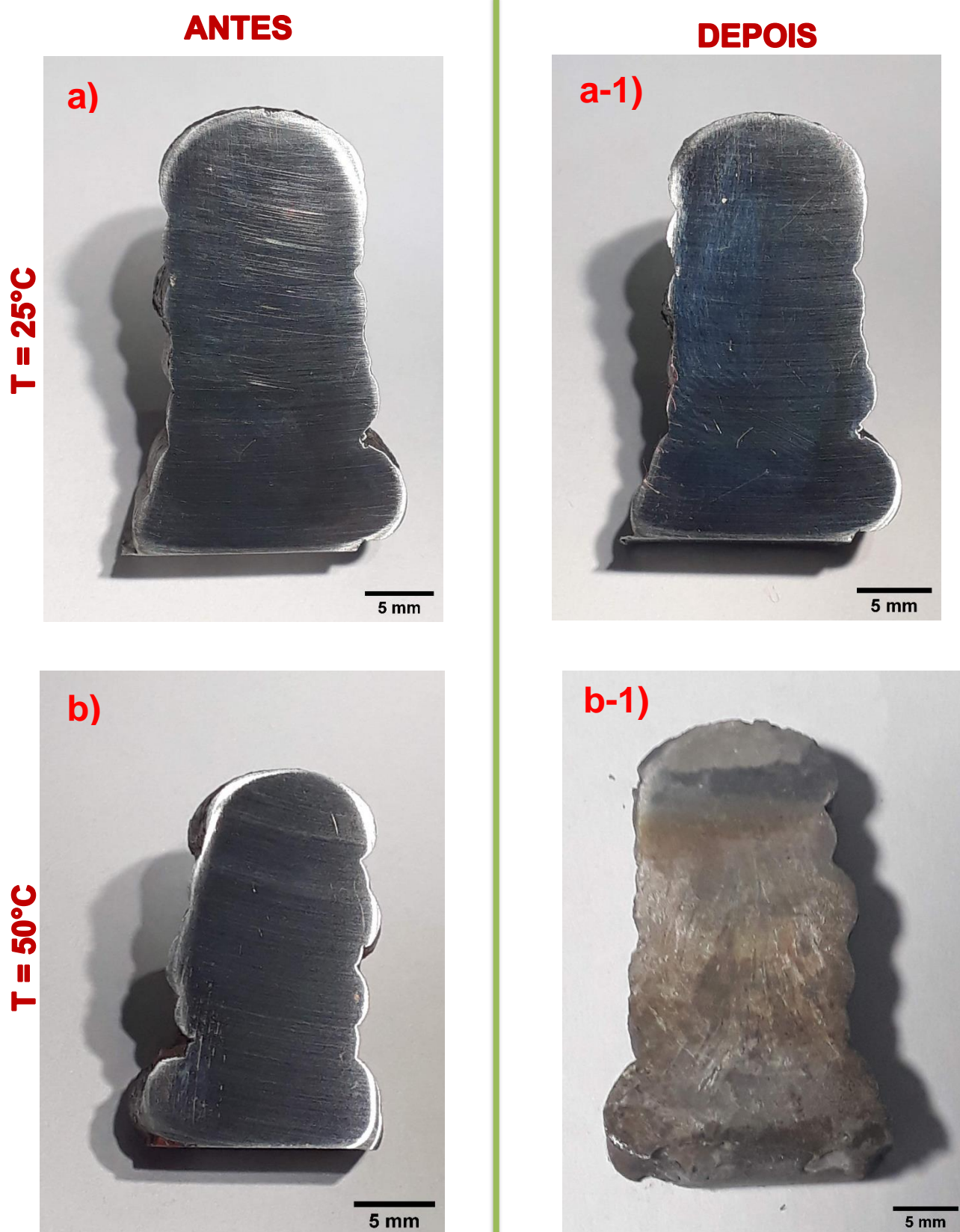


Figura 5-26 Ensaio da ASTM G48 prática A para o CP2 nas temperaturas  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 2^\circ\text{C}$  sem substrato.

#### 5.4.2 LEIS.

O ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica (LEIS) para as amostras CPexp, CP1 e CP2 foram feitas numa área  $60\text{mm}^2$  ( $3\text{mm}\times 20\text{mm}$ ) sobre o metal depositado da manufatura aditiva. Nas condições estabelecidas para esta técnica, observou-se que na região intermediária do metal depositado do CPexp apresenta áreas de maior admitância nos extremos. Sendo assim, esta respetiva área evidenciou-se a maior fração volumétrica de ferrita. Este fenómeno encontra-se detalhado na Figura 5-27.

Para o CP1 e o CP2, a admitância para o tempo de 24hs e a concentração de  $0,1\text{M Na}_2\text{SO}_4$ . Mostrou maiores valores nas ultimas camadas de deposito, relacionando com a maior fração volumétrica de ferrita e a menor dureza calculada, isto pode ser devido ao comportamento da taxa de resfriamento menor nas últimas camadas da manufatura aditiva do ER308L nas duas formas de depósito, vide nas Figura 5-28 e Figura 5-29.

Na Figura 5-30 amostra a comparação do comportamento da admitância na mesma escala para os CP1 e CP2, obtendo-se que o CP1 tem maior admitância na região superior com relação ao CP2, isto quer dizer que nessa região é mais susceptível acontecer algum tipo de corrosão

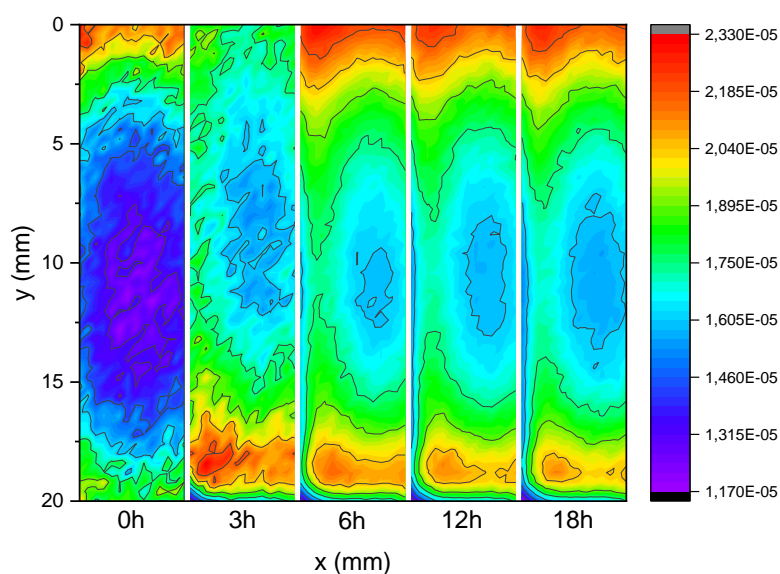


Figura 5-27 Mapas de LEIS para CPexp para tempos de imersão até 18h em  $0,1\text{M Na}_2\text{SO}_4$ .

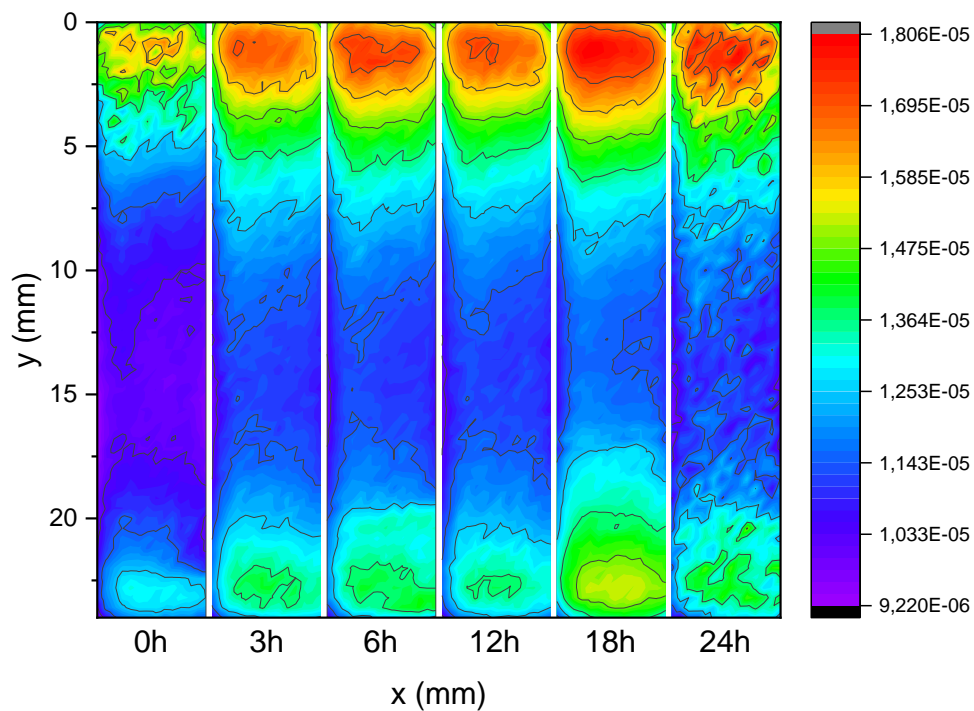


Figura 5-28 Mapas de LEIS para o CP1 para tempos de imersão até 24h em 0,1M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

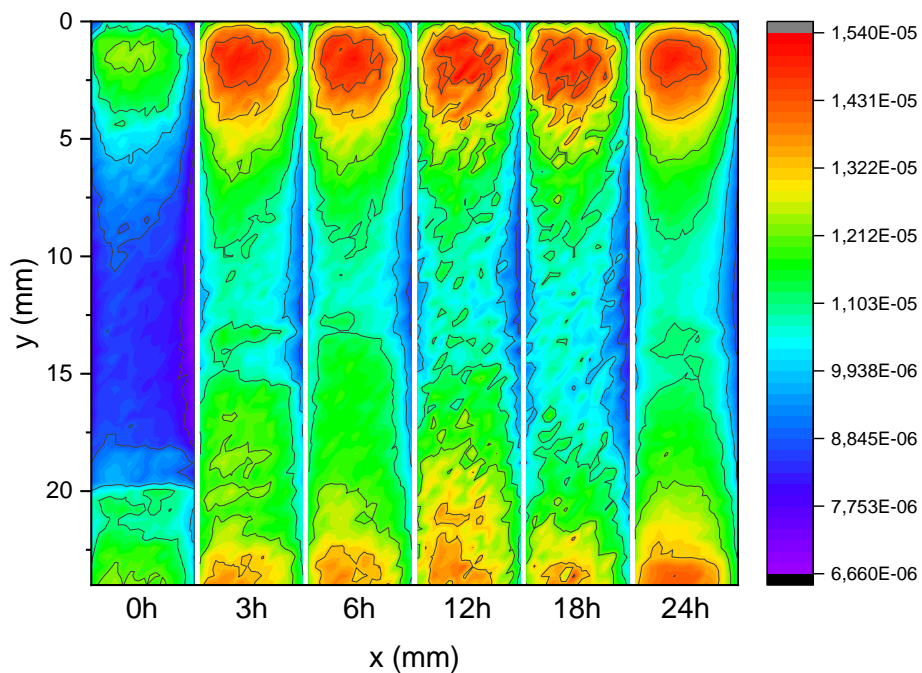


Figura 5-29 Mapas de LEIS para o CP2 para tempos de imersão até 24h em 0,1M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

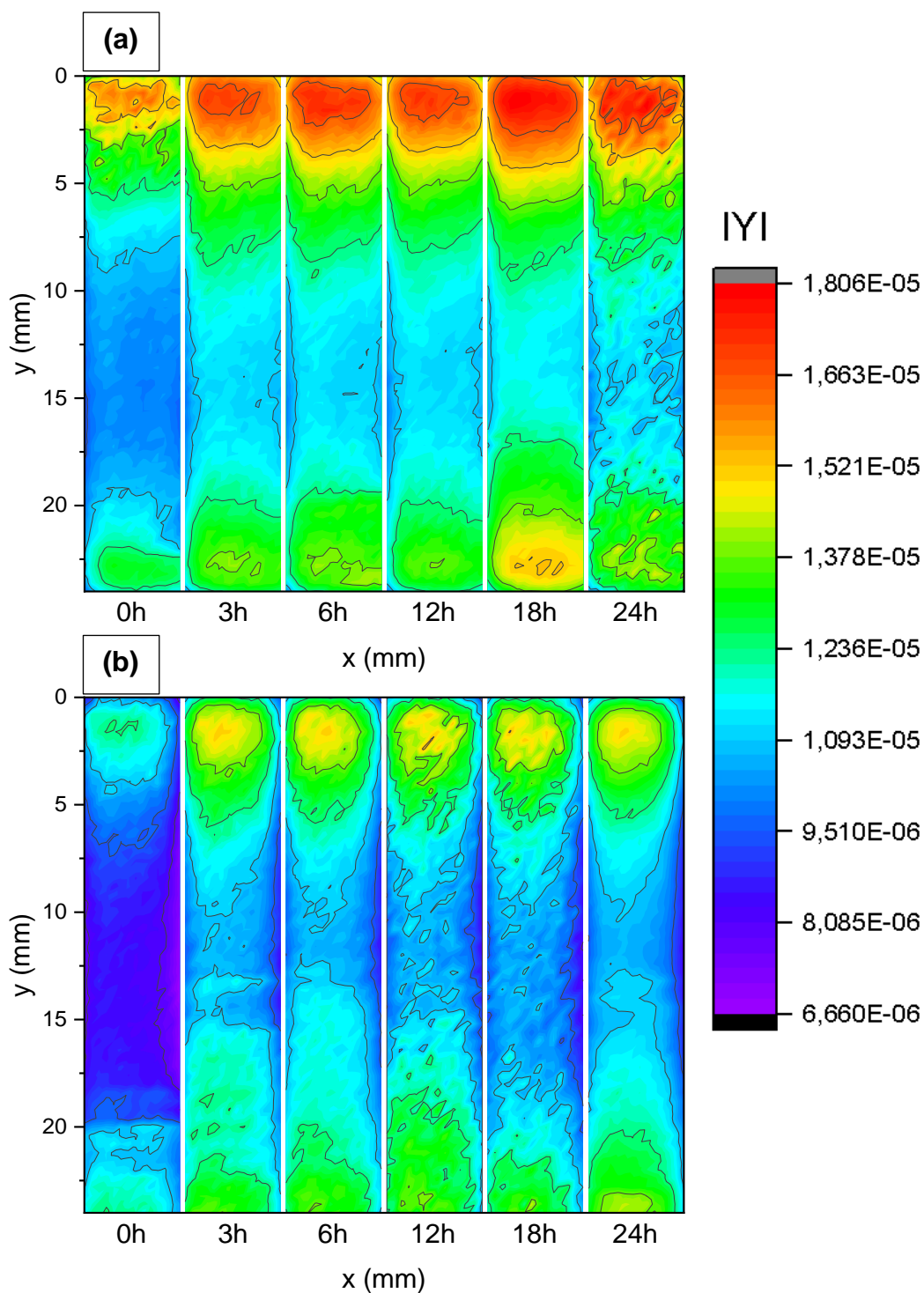


Figura 5-30 Mapas de LEIS para as amostras: (a)CP1 e (b) CP2 (na mesma escala) para tempos de imersão até 24h em 0,1M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

## 6 CONCLUSÕES

Com os parâmetros de soldagem estabelecidos conseguiu-se realizar manufatura aditiva do ER308L pelo processo de soldagem TIG, obtendo-se protótipos em forma de parede cada um com 15 cordões de solda depositados.

Os valores encontrados de número de ferrita através do diagrama WRC1992 para todos os corpos de prova, se encontram correlacionados com os valores realizados por meio de microscopia ótica. Cujos valores de porcentagem de ferrita foram 8,62% para CP1, 9,29% para CP2 e 8,82% para CPexp. Observando-se que na região intermedia de cada CP apresentaram a menor fração volumétrica de ferrita. Por outro lado, a porcentagem de ferrita para o metal base AISI 304L foi aproximadamente de 2,29%.

Com base a relação da composição química Creq/Nieq se determinou que o modo de solidificação é FA para o aço inoxidável 308L utilizado na manufatura aditiva. Como também a existência das morfologias da ferrita acicular e vermicular na presente microestrutura deste material.

O metal de adição 308L não foi susceptível a resistência à corrosão por pites em um meio de cloreto férrico em temperatura de  $22\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $50\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Por outro lado, o metal base AIS304L utilizado para a manufatura aditiva apresentou uma grande densidade de pite (da ordem de  $7,09 \times 10^5/\text{m}^2$ ) a ser exposto com a técnica ASTM G48 prática A.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] U.M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, M. Dolen, The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0, *Procedia Manuf.* 11 (2017) 545–554. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>.
- [2] P.M.S. Almeida, *Process Control And Development In Wire And Arc Additive Manufacturing.*, Cranfield University, 2012.
- [3] B.S. Ian Gibson, David W. Rosen, *Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing.*, New York, 2010.
- [4] L. Yang, K. Hsu, B. Baughman, D. Godfrey, F. Medina, *Additive Manufacturing of Metals : The Technology , Materials , Design and Production*, 2017.
- [5] K. Kußmaul, F.-W. Schoch, H. Luckow, High quality large components “Shape Welded” by a SAW process., *Weld. J.* (1983) 17–24.
- [6] D.-H. Ding, Z.-X. Pan, C. Dominic, and Hui-Jun Li, Process Planning Strategy for Wire and Arc Additive Manufacturing, *Adv. Intell. Syst. Comput.* (2015) 437–450. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18997-0>.
- [7] Iván Tabernero, A. Paskual, P. Álvarez, A. Suárez, Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing, Elsevier. (n.d.) 358–362. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.095>.
- [8] E.A. Alberti, L.J. da Silva, S.C.M. D`Oliveira, Additive manufacturing: the role of welding in this window of opportunity., *Soldag. Inspeção.* 19 (2014) 190–198. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.11>.
- [9] A.F. Padilha, L.C. Guedes, *Aços inoxidáveis austeníticos - microestrutura e propriedades.*, hemus editora limitada, São Paulo, 1994.
- [10] A. Bandyopadhyay, S. Bose, *Additive manufacturing*, 2015.
- [11] R.J. Barbosa, G.F. Carvalho, Additive Manufacturing of Metal Parts by Welding, *Sci. Direct.* 48 (2015) 2318–2322. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.433>.
- [12] M. Kathryn, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R.I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, F. Martina, Design for Additive Manufacturing : Trends , opportunities , considerations , and constraints, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 65 (2016) 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.
- [13] M. Meboldt, C. Klahn, *Industrializing Additive Manufacturing — Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications —*, Springer International

- Publishing, Zurich, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66866-6>.
- [14] T. Debroy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-heid, A. De, W. Zhang, Additive manufacturing of metallic components – Process , structure and properties., Elsevier. 92 (2018) 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.
- [15] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, Wire-feed additive manufacturing of metal components : technologies , developments and future interests, (2015) 465–481. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>.
- [16] J.W.B. D.L Bourell, J. J Beaman, H.L. Marcus, Solid Freeform Fabrication An Advanced Manufacturing Approach., Cent. Mater. Sci. Eng. (1990) 1–7.
- [17] A.L.J. Munhoz, C.A. Costa, C.H. Ahrens, J. de Carvalho, J.R.L. dos Santos, J.V.L. da Silva, J.A.F.M.S.F. de L.N. Volpato, MANUFATURA ADITIVA. Tecnologias e aplicações da impressão 3D., Blucher, São Paulo, 2017.
- [18] J.P. Kruth, M.C. Leu, T. Nakagawa, Progress in additive manufacturing and rapid prototyping., CIRP Ann. - Manuf. Technol. (1998) 525–540.
- [19] R. Baker, Westinghouse Electric & Manufacturing Company, Method of making decorative articles., 1,533,300, 1925.
- [20] Eschholz O. H., W.E.& M. Company, Ornamental arc welding, 1,533,239, 1925.
- [21] J. Schmidt, H. Dorner, E. Tenckhoff, Manufacture of complex parts by shape welding, J. Nucl. Mater. 171 (1990) 120–127.
- [22] J. Mehnen, J. Ding, H. Lockett, P. Kazanas, Design study for wire and arc additive manufacture, Int. J. Prod. Dev. 19 (2014). <https://doi.org/10.1504/IJPD.2014.060028>.
- [23] C.T. Toshie Okumura, Engenharia de soldagem e aplicações, Rio de Janeiro, 1982.
- [24] P. Houldcroft, R. Jhon, Welding-and-Cutting-Processes., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 1988.
- [25] A.Q.B. Paulo Villani Marques, Paulo José Modenesi, SOLDAGEM FUNDAMENTOS E TECNOLOGIA, Belo Horizonte, 2005.
- [26] F.D.H. de M. Emilio Wainer, Sérgio Duarte Brandi, SOLDAGEM Processos e metalurgia., 10th ed., São Paulo, 2015.
- [27] S. Kou, WELDING METALLURGY, Second Edi, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, 2003.
- [28] Marcos Dorigão Manfrinato, Caracterização microestrutural e propriedades

- mecânicas de juntas similares do aço AISI321H soldada pelo processo GTAW automático., São Paulo USP, 2016.
- [29] J. William D. Callister, *Ciência e engenharia de materiais uma introdução.*, Sétima, 2007.
- [30] W.J.W. Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, *The Science and Engineering of Materials.*, 6th ed., Stamford, 2010.
- [31] J.C. Lippold, D.J. Kotecki, *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels.*, Hoboken, New Jersey, 2005.
- [32] J.F. Lancaster, *Metallurgy of Welding.*, Fifth edit, 1993.
- [33] A.L.V. da C. e P.R.M. Silva, *Aços e ligas especiais*, Terceira E, São Paulo, 2010.
- [34] J.G. Parr, A. Hanson, c, First Edit, ASM International, 1986.
- [35] R.E. Toma, *Comparação de juntas soldadas de aço inoxidável AISI 304 para aplicação em baixa temperatura utilizando-se a soldagem por arco submerso*  
*Comparação de juntas soldadas de aço inoxidável AISI 304 para aplicação em baixa temperatura utilizando-se a soldagem p*, Universidade de São Paulo, 2012.
- [36] J.. Brooks, J.C. Lippold, *Selection of Wrought Austenitic Stainless Steels*, ASM Metals HandBook Volume 6 - Welding, Brazing, and Soldering, 1992.
- [37] N.A. Mcpherson, T.N. Baker, K. Chi, McLean, *Single sided single pass submerged arc welding in austenitic stainless steel*, Mater. Sci. Technology. (2014). <https://doi.org/10.1179/174328407X161277>.
- [38] A. Jhon Sedriks, *CORROSION OF STAINLESS STEELS, SECOND EDI*, Jhon Wiley & Sons INC, 1996.
- [39] P.. D.P.J. Modenesi, *Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas*, 2011. <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf>.
- [40] E.E. Stransbury, R.A. Buchanan, *Fundamentals of Electrochemical Corrosion*, ASM International, 2000.
- [41] L.. Shreir, R.A. Jarman, G.T. Burstein, *Corrosion. Metal/ Environment Reactions.*, Third, 1994.
- [42] C.P. Dillon, *Corrosion Resistance of Stainless Steels*, New York, 1995.
- [43] S. Zheng, C. Li, Y. Qi, L. Chen, C. Chen, *Mechanism of (Mg,Al,Ca)-oxide inclusion-induced pitting corrosion in 316L stainless steel exposed to sulphur environments containing chloride ion*, Corros. Sci. 67 (2013) 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.corosci.2012.09.044>.



- [44] Izabela Ferreira Magnabosco, CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA A CORROSÃO POR PITE DO AÇO UNS S31803 APÓS SOLDAGEM, Fundação Educacional Inaciana., 2008.
- [45] N. Sato, Anodic Breakdown of Passive Films on Metals, *J. Electrochem. Soc.* 129 (1998) 255–260. <https://doi.org/10.3323/jcorr1991.47.78>.
- [46] S. Pal, S.S. Bhaduria, P. Kumar, Pitting Corrosion Behavior of F304 Stainless Steel Under the Exposure of Ferric Chloride Solution, *J. Bio- Tribo-Corrosion.* 5 (2019) 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40735-019-0283-z>.
- [47] P. de Lima-Neto, J.P. Farias, L.F.G. Herculano, H.C. de Miranda, W.S. Araújo, J.B. Jorcin, N. Pébère, Determination of the sensitized zone extension in welded AISI 304 stainless steel using non-destructive electrochemical techniques, *Corros. Sci.* 50 (2008) 1149–1155. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.07.014>.
- [48] T.A. Siewert, C.N. McCowan, D.L. Olson, Ferrite number prediction to 100 FN in stainless steel weld metal, *Weld. J. (Miami, Fla.)*. 67 (1988).
- [49] M. Vasudevan, M. Muruganath, A.K. Bhaduri, B. Raj, K.P. Rao, Bayesian neural network analysis of ferrite number in stainless steel welds, *Sci. Technol. Weld. Join.* 9 (2004) 109–120. <https://doi.org/10.1179/136217104225017026>.
- [50] T. Takalo, N. Suutala, T. Moision, Influence of ferrite content on its morphology in some austenitic weld metals, *Metall. Trans. A.* 7 (1976) 1591–1592. <https://doi.org/10.1007/BF02656405>.
- [51] S.H. Lee, Cmt-based wire arc additive manufacturing using 316l stainless steel (2): Solidification map of the multilayer deposit, *Metals (Basel)*. 11 (2021). <https://doi.org/10.3390/met11111725>.
- [52] J.W. Fu, Y.S. Yang, J.J. Guo, J.C. Ma, W.H. Tong, Microstructure evolution in AISI 304 stainless steel during near rapid directional solidification, *Mater. Sci. Technol.* 25 (2009) 1013–1016. <https://doi.org/10.1179/174328408X317093>.
- [53] O. Yilmaz, A.A. Uгла, Microstructure characterization of SS308LSi components manufactured by GTAW-based additive manufacturing: shaped metal deposition using pulsed current arc, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 89 (2017) 13–25. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9053-y>.
- [54] K. Rajasekhar, C.S. Harendranath, R. Raman, S.D. Kulkarni, Microstructural Evolution during Solidification of Austenitic Stainless Steel Weld Metals: A Color Metallographic and Electron Microprobe Analysis Study, *Mater. Charact.* 38 (1997) 53–65. [https://doi.org/10.1016/s1044-5803\(97\)80024-1](https://doi.org/10.1016/s1044-5803(97)80024-1).

- [55] X. Chen, J. Li, X. Cheng, B. He, H. Wang, Z. Huang, Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing, *Mater. Sci. Eng. A.* 703 (2017) 567–577. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.024>.
- [56] V.T. Le, D.S. Mai, Microstructural and mechanical characteristics of 308L stainless steel manufactured by gas metal arc welding-based additive manufacturing, *Mater. Lett.* 271 (2020) 127791. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127791>.
- [57] H. Colpaert, *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.*, Quarta Edi, São Paulo, 2008.

## APÊNDICE A

Tabela A 1 Requisitos de composição química.

UNS Designation <sup>B</sup>	Type <sup>C</sup>	Carbon <sup>D</sup>	Manganese	Phos-phorus	Sulfur	Silicon	Chromium	Nickel	Molybdenum	Nitrogen	Copper	Other Elements <sup>E, F</sup>
N08367	...	0.030	2.00	0.040	0.030	1.00	20.00-22.00	23.50-25.50	6.00-7.00	0.18-0.25	0.75	Al 0.15-0.60
N08800	...	0.10	1.50	0.045	0.015	1.00	19.0-23.0	30.0-35.0	...	...	0.75	Ti 0.15-0.60
N08810	...	0.05-0.10	1.50	0.045	0.015	1.00	19.0-23.0	30.0-35.0	...	...	0.75	Al 0.15-0.60 Ti 0.15-0.60
N08904	904L <sup>G</sup>	0.020	2.00	0.045	0.035	1.00	19.00-23.00	23.00-28.00	4.0-5.0	0.10	1.0-2.0	...
N08926	...	0.020	2.00	0.030	0.010	0.50	19.00-21.00	24.00-26.00	6.0-7.0	0.15-0.25	0.5-1.5	...
S20100	201	0.15	5.50-7.50	0.060	0.030	1.00	16.00-18.00	3.50-5.50	...	0.25	...	...
S20103	...	0.03	5.50-7.50	0.045	0.030	0.75	16.00-18.00	3.50-5.50	...	0.25	...	...
S20153	...	0.03	6.40-7.50	0.045	0.015	0.75	16.00-17.50	4.00-5.00	...	0.10-0.25	1.00	...
S20161	...	0.15	4.00-6.00	0.040	0.040	3.00-4.00	15.00-18.00	4.00-6.00	...	0.08-0.20	...	...
S20200	202	0.15	7.50-10.0	0.060	0.030	1.00	17.00-19.00	4.00-6.00	...	0.25	...	...
S20400	...	0.030	7.00-9.00	0.040	0.030	1.00	15.00-17.00	1.50-3.00	...	0.15-0.30	...	...
S20910	XM-19 <sup>H</sup>	0.06	4.00-6.00	0.040	0.030	0.75	20.50-23.50	11.50-13.50	1.50-3.00	0.20-0.40	...	Cb 0.10-0.30 V 0.10-0.30
S21400	XM-31 <sup>H</sup>	0.12	14.00-16.00	0.045	0.030	0.30-1.00	17.00-18.50	1.00	...	0.35 min	...	...
S21600	XM-17 <sup>H</sup>	0.08	7.50-9.00	0.045	0.030	0.75	17.50-22.00	5.00-7.00	2.00-3.00	0.25-0.50	...	...
S21603	XM-18 <sup>H</sup>	0.03	7.50-9.00	0.045	0.030	0.75	17.50-22.00	5.00-7.00	2.00-3.00	0.25-0.50	...	...
S21800	...	0.10	7.00-9.00	0.060	0.030	3.50-4.50	16.00-18.00	8.00-9.00	...	0.08-0.18	...	...
S24000	XM-29 <sup>H</sup>	0.08	11.50-14.50	0.060	0.030	0.75	17.00-19.00	2.25-3.75	...	0.20-0.40	...	...
S30100	301	0.15	2.00	0.045	0.030	1.00	16.00-18.00	6.00-8.00	...	0.10	...	...
S30200	302	0.15	2.00	0.045	0.030	0.75	17.00-19.00	8.00-10.00	...	0.10	...	...
S30400	304	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-10.50	...	0.10	...	...
S30403	304L	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-12.00	...	0.10	...	...
S30409	304H	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-10.50	...	...	...	...
S30415	...	0.04-0.06	0.80	0.045	0.030	1.00-2.00	18.00-19.00	9.00-10.00	...	0.12-0.18	...	Ce 0.03-0.08
S30451	304N	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-10.50	...	0.10-0.16	...	...
S30452	XM-21	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-10.50	...	0.16-0.30	...	...
S30453	304LN	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-12.00	...	0.10-0.16	...	...
S30500	305	0.12	2.00	0.045	0.030	0.75	17.00-19.00	10.50-13.00	...	...	...	...
S30600	...	0.018	2.00	0.020	0.020	3.7-4.3	17.0-18.5	14.0-15.5	0.20	...	0.50	...
S30601	...	0.015	0.50-0.80	0.030	0.013	5.00-5.60	17.00-18.00	17.00-18.00	0.20	0.050	0.35	...
S30615	...	0.16-0.24	2.00	0.030	0.030	3.2-4.0	17.0-19.5	13.5-16.0	...	...	...	Al 0.8-1.5
S30815	...	0.05-0.10	0.80	0.040	0.030	1.40-2.00	20.00-22.00	10.00-12.00	...	0.14-0.20	...	Ce 0.03-0.08
S30908	309S	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	22.00-24.00	12.00-15.00	...	...	...	...
S30909	309H <sup>G</sup>	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	22.00-24.00	12.00-15.00	...	...	...	...
S30940	309Cb <sup>G</sup>	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	22.00-24.00	12.00-16.00	...	...	...	Cb 10 x C min, 1.10 max
S30941	309HCb <sup>G</sup>	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	22.00-24.00	12.00-16.00	...	...	...	Cb 10 x C min, 1.10 max
S31008	310S	0.08	2.00	0.045	0.030	1.50	24.00-26.00	19.00-22.00	...	...	...	...
S31009	310H <sup>G</sup>	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	24.00-26.00	19.00-22.00	...	...	...	...
S31040	310Cb <sup>G</sup>	0.08	2.00	0.045	0.030	1.50	24.00-26.00	19.00-22.00	...	...	...	Cb 10 x C min, 1.10 max
S31041	310HCb <sup>G</sup>	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	24.00-26.00	19.00-22.00	...	...	...	Cb 10 x C min, 1.10 max

Tabela A 2 Requisitos de composição química.

**TABLE 1**  
**CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS**

AWS Classification <sup>c,d</sup>	UNS Number <sup>e</sup>	Composition, Wt % <sup>a,b</sup>											Other Elements	
		C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Cu	Element	Amount	
ER209	S20980	0.05	20.5-24.0	9.5-12.0	1.5-3.0	4.0-7.0	0.90	0.03	0.03	0.10-0.30	0.75	V	0.10-0.30	
ER218	S21880	0.10	16.0-18.0	8.0-9.0	0.75	7.0-9.0	3.4-4.5	0.03	0.03	0.08-0.18	0.75			
ER219	S21980	0.05	19.0-21.5	5.5-7.0	0.75	8.0-10.0	1.00	0.03	0.03	0.10-0.30	0.75			
ER240	S24080	0.05	17.0-19.0	4.0-6.0	0.75	10.5-13.5	1.00	0.03	0.03	0.10-0.30	0.75			
ER307	S30780	0.04-0.14	19.5-22.0	8.0-10.7	0.5-1.5	3.3-4.75	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER308	S30880	0.08	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER308H	S30880	0.04-0.08	19.5-22.0	9.0-11.0	0.50	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER308L	S30883	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			
ER308Mo	S30882	0.08	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER30L Mo	S30886	0.04	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER308Si	S30881	0.08	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75	1.0-2.5	0.65-1.00	0.03	0.03		0.75			
ER308LSi	S30888	0.03	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75	1.0-2.5	0.65-1.00	0.03	0.03		0.75			
ER309	S30980	0.12	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER309L	S30983	0.03	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER309Mo	S30982	0.12	23.0-25.0	12.0-14.0	2.0-3.0	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER309LMo	S30986	0.03	23.0-25.0	12.0-14.0	2.0-3.0	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER309Si	S30981	0.12	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75	1.0-2.5	0.65-1.00	0.03	0.03		0.75			
ER309LSi	S30988	0.03	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75	1.0-2.5	0.65-1.00	0.03	0.03		0.75			
ER310	S31080	0.08-0.15	25.0-28.0	20.0-22.5	0.75	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER312	S31380	0.15	28.0-32.0	8.0-10.5	0.75	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER316	S31680	0.08	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			
ER316H	S31680	0.04-0.08	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			
ER316L	S31683	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			
ER316Si	S31681	0.08	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	1.0-2.5	0.65-1.00	0.03	0.03		0.75			
ER316LSi	S31688	0.03	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	1.0-2.5	0.65-1.00	0.03	0.03		0.75			
ER317	S31780	0.08	18.5-20.5	13.0-15.0	3.0-4.0	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER317L	S31783	0.03	18.5-20.5	13.0-15.0	3.0-4.0	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER318	S31980	0.08	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			
ER320	N08021	0.07	19.0-21.0	32.0-36.0	2.0-3.0	2.5	0.60	0.03	0.03		0.75			
E 320LR	N08022	0.025	19.0-21.0	32.0-36.0	2.0-3.0	1.5-2.0	0.15	0.015	0.02		0.75			
ER321	S32180	0.08	18.5-20.5	9.0-10.5	0.75	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER330	N08331	0.18-0.25	15.0-17.0	34.0-37.0	0.75	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER347	S34780	0.08	19.0-21.5	9.0-11.0	0.75	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03		0.75			
ER347Si	S34788	0.08	19.0-21.5	9.0-11.0	0.75	1.0-2.5	0.65-1.00	0.03	0.03		0.75			
ER383	N08028	0.025	26.5-28.5	30.0-33.0	3.2-4.2	1.0-2.5	0.50	0.02	0.03		0.75			
ER385	N08904	0.025	19.5-21.5	24.0-26.0	4.2-5.2	1.0-2.5	0.50	0.02	0.03		0.75			
ER409	S40900	0.08	10.5-13.5	0.6	0.50	0.8	0.8	0.03	0.03		0.75			
ER409Cb	S40940	0.08	10.5-13.5	0.6	0.50	0.8	1.0	0.04	0.03		0.75			
ER410	S41080	0.12	11.5-13.5	0.6	0.75	0.6	0.5	0.03	0.03		0.75			
ER410NiMo	S41086	0.06	11.0-12.5	4.0-5.0	0.4-0.7	0.6	0.5	0.03	0.03		0.75			

(Continued)

8 + C min/1.0 max  
8 + C min/1.0 max  
8 + C min/0.40 max  
9 + C min/1.0 max  
10 + C min/1.0 max  
10 + C min/1.0 max  
1.2-2.0  
1.2-2.0  
10 + C min/1.5 max  
10 + C min/0.75 max

Tabela A3 Resultados de perda de massa no ensaio de corrosão ASTM G48 prática A na temperatura  $22 \pm 2^\circ\text{C}$ , CP com metal base.

	CP	Média antes do ensaio (g).	Média depois do ensaio (g).	Perdida de massa (g).	Desv Padrão.
CPexp	CPexp1	40,839	38,651	2,188	$3,46 \times 10^{-3}$
	CPexp2	44,857	42,462	2,395	$1,15 \times 10^{-3}$
	CPexp3	37,543	35,723	1,82	$1,15 \times 10^{-3}$
CP1	CP1.1	32,485	31,871	0,614	$3,07 \times 10^{-3}$
	CP1.2	39,416	38,707	0,709	$3,545 \times 10^{-3}$
	CP1.3	39,328	38,544	0,784	$3,92 \times 10^{-3}$
CP2	CP2.1	33,661	33,117	0,544	$2,72 \times 10^{-3}$
	CP2.2	39,014	38,350	0,664	$3,32 \times 10^{-3}$
	CP2.3	32,374	31,768	0,606	$3,03 \times 10^{-3}$

Tabela A 4 Resultados de perda de massa no ensaio de corrosão ASTM G48 prática A na temperatura  $50 \pm 2^\circ\text{C}$ , CP com metal base.

	CP	Média antes do ensaio (g).	Média depois do ensaio (g).	Perdida de massa (g).	Desv Padrão.
CPexp	CPexp1	38,539	35,651	2,888	$1,44 \times 10^{-2}$
	CPexp2	42,453	40,462	1,991	$9,955 \times 10^{-2}$
	CPexp3	35,628	34,235	1,393	$6,965 \times 10^{-2}$
CP1	CP1.1	31,768	31,457	0,311	$1,555 \times 10^{-2}$
	CP1.2	38,659	38,172	0,487	$2,435 \times 10^{-2}$
	CP1.3	38,524	37,474	1,05	$5,25 \times 10^{-2}$
CP2	CP2.1	33,073	32,468	0,605	$3,025 \times 10^{-2}$
	CP2.2	38,174	37,725	0,449	$2,245 \times 10^{-2}$
	CP2.3	31,586	31,038	0,548	$2,74 \times 10^{-3}$

Tabela A5 Resultados de perda de massa no ensaio de corrosão ASTM G48 prática A na temperatura  $22 \pm 2^\circ\text{C}$ , CP sem metal base.

	<b>CP</b>	<b>Média antes do ensaio (g).</b>	<b>Média depois do ensaio (g).</b>	<b>Perdida de massa (g).</b>	<b>Desv Padrão.</b>
CPexp	CPexp1	9,284	8,856	0,428	$2,14 \times 10^{-3}$
	CPexp2	8,051	7,556	0,495	$2,475 \times 10^{-2}$
	CPexp3	9,308	8,842	0,466	$2,33 \times 10^{-3}$
CP1	CP1.1	21,084	20,689	0,395	$1,975 \times 10^{-2}$
	CP1.2	17,793	17,324	0,469	$2,345 \times 10^{-2}$
	CP1.3	19,042	18,628	0,414	$2,07 \times 10^{-3}$
CP2	CP2.1	21,854	21,337	0,517	$2,585 \times 10^{-2}$
	CP2.2	25,387	24,861	0,526	$2,63 \times 10^{-3}$
	CP2.3	24,529	23,953	0,576	$2,88 \times 10^{-3}$

Tabela A6 Resultados de perda de massa no ensaio de corrosão ASTM G48 prática A na temperatura  $50 \pm 2^\circ\text{C}$ , CP sem metal base.

	<b>CP</b>	<b>Média antes do ensaio (g).</b>	<b>Média depois do ensaio (g).</b>	<b>Perdida de massa (g).</b>	<b>Desv Padrão.</b>
CPexp	CPexp1	8,689	8,574	0,115	$5,75 \times 10^{-3}$
	CPexp2	7,438	7,270	0,168	$8,4 \times 10^{-4}$
	CPexp3	8,650	8,526	0,124	$6,2 \times 10^{-4}$
CP1	CP1.1	20,611	20,321	0,29	$1,45 \times 10^{-3}$
	CP1.2	17,035	16,763	0,272	$1,6 \times 10^{-4}$
	CP1.3	18,568	17,963	0,605	$3,025 \times 10^{-2}$
CP2	CP2.1	21,177	20,678	0,499	$2,495 \times 10^{-2}$
	CP2.2	24,572	24,068	0,504	$2,52 \times 10^{-3}$
	CP2.3	23,754	23,158	0,596	$2,98 \times 10^{-3}$