

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Júlio César de Alvarenga Pires

**CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO INCONEL® 625 EM
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO**

Belo Horizonte
2024

Júlio César de Alvarenga Pires

**CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO INCONEL® 625 EM
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO**

Dissertação a ser apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro

Área de concentração: Materiais e Processo de Fabricação

Belo Horizonte
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

P667c Pires, Júlio César de Alvarenga
Caracterização e propriedades mecânicas do Inconel® 625 em manufatura aditiva por deposição a arco / Júlio César de Alvarenga Pires. Belo Horizonte, 2024.
72 f. : il.

Orientador: José Rubens Gonçalves Carneiro
Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1. Impressão Tridimensional. 2. Projeto de produto. 3. Materiais - Propriedades mecânicas. 4. Testes de dureza. 5. Microscopia eletrônica de varredura. 6. Microestrutura. 7. Processos de fabricação - Peças. I. Carneiro, José Rubens Gonçalves. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB. PUC. MINAS

CDU: 621.7

Júlio César de Alvarenga Pires

**CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO INCONEL® 625 EM
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO**

Dissertação a ser apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processo de Fabricação.

Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro - Orientador (PUC Minas)

Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense - UFMG (Banca examinadora)

Profa. Dra. Hellen Cristine Prata de Oliveira - IEC PUC (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Pedro Paiva Brito - PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Witor Wolf - UFMG (Banca examinadora)

Belo Horizonte, 5 de abril de 2024.

O inventor é um homem que olha ao redor do mundo e não está feliz com as coisas como elas são. Ele quer melhorar tudo o que vê, quer beneficiar o mundo; ele é obcecado por uma ideia. O espírito de invenção o possui, buscando materialização (Bell, 20169).

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus que nos deu saúde e força para seguirmos com a realização e desenvolvimento do trabalho.

À minha família, que sempre me apoiou e incentivou durante toda a minha carreira profissional e acadêmica.

À PUC Minas, por ser parte integrante de minha formação profissional.

À Villares Metals, que nos proporcionou o apoio com materiais e tecnologias para desenvolvimento do resultado deste trabalho e ao CIT SENAI por proporcionar a infraestrutura para a pesquisa e desenvolvimento além do nos incentivar na busca de soluções tecnológicas para o desenvolvimento da indústria e da qualidade de vida.

Ao Professor Orientador Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro, professor e amigo a mais de 35 anos, pelo apoio técnico, orientação e transferência de conhecimentos. À toda a equipe e parceiros do CDT MADA, especialmente ao Wemerson que aceitou o desafio de iniciar este trabalho e a todos os colaboradores do CIT SENAI, que compartilharam e nos deram apoio com seu conhecimento técnico.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

A todos o meu muito obrigado.

RESUMO

A manufatura aditiva é uma tecnologia que possibilita a criação de uma peça tridimensional por adição de material, camada por camada, com redução do desperdício de matéria prima. Neste trabalho, foi utilizado a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), para construção de pré-formas de Inconel® 625 em substrato de aço carbono e Inconel® 625 com o objetivo de estudar as propriedades mecânicas e a caracterização microestrutural do material depositado visando a validação da tecnologia MADA. Para realização dos estudos foram construídas paredes de Inconel® 625 sobre substrato de aço carbono e de Inconel® 625. Após a construção por deposição a arco foram realizados ensaios não destrutivos e pós processamento por usinagem, foram realizados testes de dureza e tração nas direções longitudinal e transversal à direção de deposição para determinação das propriedades mecânicas. Foram realizados ensaios de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e análise EDS (Espectroscopia por energia dispersiva) para a caracterização metalográfica do material depositado. Os ensaios mecânicos demonstraram resultados promissores quando comparado com os requisitos das normas ASME II para o Inconel® 625, porém sem atender a 100% das exigências. Foi constatado redução do limite de resistência, que pode ter sido prejudicado pela presença de microsegregação de nióbio interdendrítica, microporosidades e variações nas orientações das dendritas. As orientações das dendritas são afetadas pelo processo de deposição em multicamadas, provocado pela refusão e reaquecimento de parte da camada anterior, alterando a orientação do crescimento das colunas de solidificação, podendo ter alterado as propriedades mecânicas analisadas. Os valores do alongamento e resistência também foram diferentes em função do sentido de deposição. As análises de fratura em cada sentido de deposição mostram alinhamento das descontinuidades entre camadas depositadas, alinhadas na direção da deposição, formadas por microporosidades na interface entre camadas. Este alinhamento de descontinuidades levou a redução do alongamento e resistência mecânica na direção transversal ao sentido da deposição.

Palavras-chave: manufatura aditiva; inconel® 625; manufatura aditiva por deposição a arco; MADA; GMAW;

ABSTRACT

Additive manufacturing is a technology that makes it possible to create a three-dimensional part by adding material, layer by layer, reducing the waste of raw materials. In this work, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) - was used to build Inconel® 625 preforms on carbon steel and Inconel® 625 substrates with the aim of studying the parameters for deposition, mechanical and microstructural characterization of the deposited material in order to validate the WAAM technology. To carry out the studies, Inconel® 625 walls were built on carbon steel and Inconel® 625 substrates. After construction by arc deposition, non-destructive tests were carried out and after processing by machining, hardness and tensile tests were carried out in the longitudinal and transverse directions to determine the mechanical properties. Optical microscopy, scanning electron microscopy and EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analysis were carried out for the metallographic characterization of the deposited material. The mechanical tests showed promising results when compared to the requirements of the ASME II standards for Inconel® 625, although they did not meet 100% of the requirements. There was a reduction in the strength limit, which may have been affected by the presence of interdendritic niobium microsegregation, microporosity and variations in the orientation of the dendrites. The orientations of the dendrites are affected by the multilayer deposition process, caused by the remelting and reheating of part of the previous layer, altering the orientation of the growth of the solidification columns, which may have altered the mechanical properties analyzed. The elongation and strength values were also different depending on the direction of deposition. The fracture analyses in each direction of deposition show the alignment of discontinuities between deposited layers, aligned in the direction of deposition, formed by microporosities at the interface between layers. This alignment of discontinuities led to a reduction in elongation and mechanical strength in the direction transverse to the deposition direction.

Keywords: additive manufacturing; inconel® 625; wire arc additive manufacturing; WAAM; GMAW.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do arame conforme AWS ERNiCrMo-3 - INCONEL® 625 em porcentagem em peso.....	19
Tabela 2 - Propriedades mecânicas a temperatura ambiente do INCONEL® 625 (UNS N06625) conforme ASME Seção II Parte B - 2023.....	19
Tabela 3 - Composição química do substrato de INCONEL® 625 – UNS N06625 em porcentagem em peso	36
Tabela 4 - Monitoramento da geometria dos cordões depositados	48
Tabela 5 - Resultados dos ensaios mecânicos realizados	51
Tabela 6 - Valores médios do limite de escoamento, resistência e alongamento obtidos nos ensaios mecânicos de tração	52
Tabela 7 - Impressões de dureza Vickers no centro da pré-forma do Inconel® 625.	54
Tabela 8 - Impressões de dureza Vickers na face pré-forma do Inconel® 625, amostras conforme Figura 7	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemático representativo do processo MADA, usando GMAW	23
Figura 2 - Esquema do processo Lincoln Electric STT®	25
Figura 3 - Esquema do processo de soldagem GMAW (MIG/MAG).....	26
Figura 4 - Relação entre velocidade de alimentação do arame e intensidade de corrente.....	29
Figura 5 - Comprimento do bico de contato até a peça (DBCP), <i>stick-out</i> (S) e altura do arco (<i>la</i>).....	31
Figura 6 - Dimensões da barra de aço carbono e Inconel e dimensões planejadas da pré-forma depositada por MADA.....	35
Figura 7 - Layout para retirada dos corpos de prova para ensaios mecânicos e metalográficos.....	36
Figura 8 - Ajuste do comprimento do arco para Trim (a) e da frequência do arco elétrico (b) e (c)	38
Figura 9 - Célula robotizada Yaskawa® - CIT SENAI.....	39
Figura 10 - Imagem da parede de Inconel® 625	40
Figura 11 - Componente constituído da barra usinada de aço carbono e parede Inconel® 625manufaturado através do processo MADA	41
Figura 12 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração	44
Figura 13 - Demonstrativo da direção utilizada nas análises micrográficas.	45
Figura 14 - Imagem do bloco retangular com parede de espessura média vertical de 8,5 mm em Inconel® 625 antes da usinagem	49
Figura 15 - Imagem da parede de Inconel® 625 depositada após aplicação da solução penetrante (a) e do revelador D-70 (b)	49
Figura 16 - Macrografia da seção transversal	55
Figura 17 - Imagem da macroestrutura com evidência da disposição dos cordões depositados e da interface da barra com a pré-forma	57
Figura 18 - Macrografia da seção longitudinal da pré-forma com múltiplas camadas de deposição de Inconel 625. MO: 50x	58
Figura 19 - Microestrutura da pré-forma construída predominando a fase austenita com morfologias dendríticas. Seção: (a, c, e, g) amostras 2 e 11 e (b, d, f, h) da amostra 8.....	59

Figura 20 - Microestrutura da pré-forma construída usando o arame Inconel® 625 sobre o substrato Inconel® 625, amostra 8. (a, c, e, g) região de interface substrato-camada depositada e (b, d, f, h) camada depositada próxima ao substrato 61

Figura 21 - Fratura após ensaio de tração, referente à seção transversal do metal de solda 62

Figura 22 - Fratura após ensaio de tração, referente à seção longitudinal do metal de solda 63

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Ataques químicos utilizados nas amostras para identificação das fases 44

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1 - Comparativo dos resultados de propriedades mecânicas (LE (limite de escoamento (MPa), LR (Limite de resistência (MPa)) e alongamento (%) nas direções transversal e longitudinal da pré-forma e barra laminada obtidas no ensaio de tração53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
BJ	Binder Jetting
CMT	Cold Metal Transfer
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DED	Directed Energy Deposition
DoE	Design of Experiments
EBM	Electron Beam Melting
GMAAM	Gas Metal Arc Additive Manufacturing
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
ISO	International Organization for Standardization
LCF	Fadiga de baixo ciclo
LMD	Laser Metal Deposition
L-PBF	Laser Powderbed Fusion
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva Deposição de Arco
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
PAW	Plasma Arc Welding
PBF	Powder Bed Fusion
PDP	Processo de desenvolvimento de produtos
SL	Sheet Lamination
SLM	Selective Laser Melting
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing

LISTA DE SÍMBOLOS

CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
CO ₂	Dióxido de Carbono
Cr	Cromo
e	Alongamento em %
E	Energia de Soldagem em J
Ev	Deformação Verdadeira em %
F	Carga em kgf
H ₂ O	Água
HV	Dureza Vickers
I	Corrente em A
K	Coefficiente de Resistência
l ₀	Comprimento Inicial em mm
LE	Limite de escoamento em MPa
l _{ff}	Comprimento Final do Corpo de Prova em mm
LR	Limite de Resistência em MPa
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
Mo	Molibdênio
η	Fator Adimensional
N ₂	Nitrogênio
Ni	Níquel
NiCrMo-3	Inconel® 625
O ₂	Oxigênio
P _m	Carga Máxima em kgf
S ₀	Área Inicial do Corpo de Prova em mm ²
V	Tensão em V
Δl	Variação do Comprimento em mm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo geral.....	18
1.2	Objetivos específicos.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Inconel® 625	19
2.2	Processo de manufatura aditiva.....	22
2.3	Processo da soldagem GMAW	26
2.4	Parâmetros de processo da soldagem	27
2.4.1	<i>Velocidade de soldagem</i>	28
2.4.2	<i>Velocidade de alimentação do arame</i>	28
2.4.3	<i>Vazão de gás de proteção</i>	29
2.4.4	<i>Energia de soldagem</i>	30
2.4.5	<i>Stick-out</i>	31
2.4.6	<i>Intensidade da corrente</i>	32
2.4.7	<i>Tensão</i>	32
2.5	Experimento fatorial	33
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	34
3.1	Estruturação da experimentação	34
3.2	Pré-processamento experimental	34
3.2.1	<i>Planejamento do experimento</i>	34
3.3	Análise química e metalográfica do Inconel® 625	36
3.4	Etapas da deposição	37
3.4.1	<i>Parâmetro e condições de contorno</i>	37
3.4.2	<i>Técnicas de deposição</i>	39
3.5	Pós processamento.....	41
3.5.1	<i>Análise por Ensaio Não Destrutivo - END</i>	41
3.5.2	<i>Usinagem dos corpos de prova</i>	42
3.6	Ensaio mecânico	42
3.6.1	<i>Ensaio de dureza Vickers (HV10)</i>	42
3.6.2	<i>Ensaio de microdureza dureza vickers</i>	43
3.6.3	<i>Ensaio de tração</i>	43
3.7	Análise microestrutural.....	44
3.7.1	<i>Microscopia ótica</i>	45
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	47
4.1	Confecção da pré-forma.....	47
4.1.1	<i>Ensaio por Líquido penetrante</i>	49
4.2	Propriedades mecânicas.....	50
4.3	Ensaio de dureza	53
4.4	Análise estrutural	56
4.4.1	<i>Macrografia</i>	56
4.4.2	<i>Micrografia</i>	59
4.4.3	<i>Análise de fratura</i>	62

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
5.1	Trabalhos futuros	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Durante o desenvolvimento da tecnologia de manufatura aditiva, houve inúmeros termos e definições diferentes em uso. A ABNT NBR ISO/ASTM 52900 define Manufatura Aditiva como processo de união de materiais para obtenção de peças a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada por camada, diferentemente das metodologias de manufatura subtrativa e formativa (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018).

A produção de itens customizáveis torna os processos de manufatura aditiva atrativos em termos de custos e tempo produtivo quando comparados aos processos tradicionais de manufatura, visto que não são necessários a construção de moldes e ferramentais auxiliares para a fabricação de peças. Adicionalmente, oferecem a vantagem de projetar formas e superfícies livres, a partir de matérias-primas diversas, reduzindo custos e resíduos associados à fabricação.

A American Society for Testing and Materials (ASTM) define as técnicas de MA como PBF (“*Powder Bed Fusion*”); DED (“*Directed Energy Deposition*”); BJ (“*Binder Jetting*” e SL (“*Sheet Lamination*”). Entre eles, os métodos MA baseado em pó (isto é, Fusão Seletiva a Laser (Selective Laser Melting - SLM e Fusão por Feixe de Elétrons (Electron Beam Melting - EBM) são amplamente utilizados (Fayazfar *et al.*, 2018; Tanvir *et al.*, 2019). Esses métodos ainda estão sendo avaliados quanto aos seus respectivos potenciais e reconhecimento pela ASTM na classificação MADA (Maleki *et al.*, 2021).

Contudo, problemas com dificuldades de procedimento de controle de sistema, necessidade de pós-processamento, elevada tensão residual, porosidade indesejada, elevada energia de soldagem, e, por último, custos de *set up* de sistemas e potência têm feito este processo difícil para pequenas e médias empresas.

Os sistemas de soldagem a arco com alimentação de arame são menos complexos e disponíveis no mercado. Fornecem menor custo para *set up* inicial, maior taxa de deposição, capacidade de produção em larga escala e integridade estrutural das peças manufaturadas e melhor eficiência de energia que o método de pó baseado em deposição por feixe de elétron / laser (Debroy *et al.*, 2018; Priarone *et al.*, 2019). Com esses atrativos, os processos de soldagem por alimentação por arame estão tornando atrativo aos pesquisadores de MA e fabricantes, especialmente nas empresas de pequenas e médias (Tanvir *et al.*, 2019). A tecnologia Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) apresenta menor exatidão com relação à técnica baseada

em pó ($\pm 0,2$ mm contra $\pm 0,04$ mm), e não pode produzir peças complexas (tais como moldes com resfriamento interno). Contudo, é conveniente para produção de peças de alguns metros e de média complexidade (como exemplo painéis aeronáuticos rígidos) (Venturini *et al.*, 2016).

Os processos que utilizam matéria prima metálica na forma de arames se baseiam em conhecimentos pré-existentes dos processos de soldagem como Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Gas Metal Arc Welding (GMAW) e Plasma Arc Welding (PAW) e conhecidos como MADA (Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)). Diferentemente de outros processos de manufatura aditiva (MA), o processo MADA oferece matéria prima prontamente disponível, alto rendimento, e componentes de hardware comerciais prontos para uso, resultando em economia favorável. Estes processos GMAW, GTAW ou PAW se aplicam em manufatura aditiva inclusive em fabricação de matrizes de ferramenta (Taberero *et al.*, 2018).

Para que este método seja bem estabelecido em MA, alguns problemas devem ser resolvidos incluindo a determinação das técnicas de medição *in situ*, o aumento da eficiência energética, redução do impacto ambiental e o estabelecimento de uma base de dados para correlação definida entre o processo MADA, matérias primas, pós-processamento, características metalúrgicas, e propriedades mecânicas.

O Inconel® 625 é uma superliga de NiCrMo-3 de alta resistência à corrosão e oxidação utilizada geralmente nas indústrias aeroespacial, petroquímica e químicas. Esta liga apresenta propriedades mecânicas interessantes mesmo em ambiente agressivo tanto em alta quanto baixa temperatura, por exemplo em peças de turbinas a gás e motores a jato (Musfirah; Ghani; Haron, 2017; Osmond; Curtis; Slatter, 2021). Dentre as diversas ligas Inconel®, o Inconel® 625 é popular em MA devido à sua soldabilidade e oportunidade de atingir a peça final reduzindo a quantidade de matéria prima necessária e os custos de fabricação (Tanvir *et al.*, 2019). Os custos de produção de componentes à base de Inconel® 625, quando fabricados utilizando técnicas tradicionais, são bem elevados devido às dificuldades de modelagem e usinagem (Chen *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022).

Dentro deste contexto, o presente trabalho descreve o processo de fabricação de paredes de teste em Inconel® 625 visando avaliar as características construtivas e as propriedades mecânicas alcançadas pelo material depositado por MADA, comparando os resultados com o processo de fabricação por laminação. Neste trabalho, objetivou-se identificar e avaliar os aspectos relevantes na produção das peças de

teste por MADA, determinação de suas propriedades mecânicas e a caracterização da microestrutura produzida, visando identificação das características relevantes para o processo. Esta etapa é fundamental na viabilidade de aplicação da tecnologia MADA na fabricação de peças e componentes industriais.

1.1 Objetivo geral

As normas internacionais estão a discutir a inserção dos processos de manufatura aditiva, incluindo o MADA, como tecnologia de produção de partes e seus requisitos técnicos de fabricação. Busca-se neste trabalho a utilização da tecnologia MADA, pelo processo GMAW caracterizar a microestrutura e propriedades mecânicas da parede produzida utilizando o consumível Inconel® 625 sobre um substrato de aço baixo carbono e Inconel® 625, aplicando a MADA.

1.2 Objetivos específicos

- a) executar a construção de placa de teste (parede) de Inconel® 625 por meio de tecnologia MADA, utilizando processamento GMAW;
- b) caracterizar a microestrutura e obter as propriedades mecânicas da parede, produzida por MADA; comparar estes resultados obtidos na caracterização com os requisitos das principais normas internacionais de qualidade do Inconel® 625, avaliando a aplicabilidade do processo MADA como alternativa aos métodos convencionais de produção;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Inconel® 625

O Inconel® 625 é uma superliga especial com o Níquel (Ni) como elemento preponderante, apresentando Cromo (Cr), Molibdênio (Mo) e Nióbio (Nb) como principais elementos de liga, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1- Composição química do arame conforme AWS ERNiCrMo-3 - INCONEL® 625 em porcentagem em peso

Ni	Cr	Mo	Nb	C	Si	Mn	Fe	Ti	P	S	Cu	Al
(Min)				(Max)	(Max)	(Max)	(Max)	(Max)	(Max)	(Max)	(Max)	(Max)
58,0	20,0 - 23,0	8,0 - 10,0	3,15 - 4,15	0,10	0,50	0,50	0,50	0,40	0,02	0,015	0,50	0,40

Fonte: (The American Society of Mechanical Engineers, 2023b).

As propriedades mecânicas médias desta liga se apresentam, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas a temperatura ambiente do INCONEL® 625 (UNS N06625) conforme ASME Seção II Parte B - 2023

Propriedades Mecânicas - Inconel® 625 (UNS 06625)					
Conformação	Estado de Tratamento Térmico	Resistência à Tração (Min)	Limite de Escoamento (Min)	Alongamento (Min)	Referência
		MPa	MPa	%	
Tiras laminada a frio	Recozido	827	414	30	ASME SB-443
Chapa laminada a quente. Espessura até 70 mm		758	379	30	
Chapas laminadas a frio. Espessura até 9,5 mm		758	379	30	
Tiras e chapas laminadas a frio, laminadas a quente.	Solubilizado	690	276	30	ASME SB-446
Barras ≤ 102 mm de diâmetro	Recozido	827	414	30	
Barras > 102 mm de diâmetro		758	345	25	
Barras (todas as dimensões)	Solubilizado	690	276	30	

Fonte: (The American Society of Mechanical Engineers, 2023a).

O desenvolvimento do Inconel® 625 (UNS N06625) foi iniciado na década de 1950 para atender à demanda percebida na época por um material de alta resistência para a tubulação principal da linha de vapor. Após vários anos descobrindo como vários elementos afetavam as propriedades e a capacidade de fabricação do sistema de liga, um pedido de patente foi enviado em 24 de janeiro de 1962. A patente nº 3.160.500 foi emitida para H. L. Eiselstein e J. Gadbut em 8 de dezembro de 1964 (Eiselstein; Tillack, 2012).

O objetivo foi desenvolver um produto com boa soldabilidade, alta resistência à fluência, fabricável em tubos, sem endurecimento por envelhecimento e com propriedades atraentes ao código ASME para vasos de pressão. Estas propriedades foram alcançadas com a liga Inconel® 625 servindo de base para desenvolvimento de outras derivações (Eiselstein; Tillack, 2012).

O Inconel® 625 tem várias aplicações, especialmente para o setor de óleo & gás e é usualmente fornecido em bruto de fundição ou processado por forjamento, laminação ou laminação seguido por trefilação. Este último caso é o processo adotado para obtenção do arame usado para soldagem e para MADA.

O Inconel® 625 é uma superliga de níquel com propriedades que incluem resistência à corrosão, boa resistência à tração, à fluência e excelente trabalhabilidade. As aplicações do Inconel® 625 em ambientes severos se justificam devido às suas propriedades de alta resistência à tração (552 MPa (80 ksi)), à fluência, à fadiga, à corrosão e oxidação, além da boa soldabilidade e brasagem (Eiselstein; Tillack, 2012; Yeni; Koçak, 2008). O Inconel® 625 pode manter boas propriedades a temperaturas elevadas e criogênicas. Estas propriedades são principalmente devido ao efeito de endurecimento por solução sólida dos constituintes de metais refratários Nb e Mo em uma matriz de Ni-Cr que é conhecida como fase γ para o Inconel® 625 (Shankar; Bhanu Sankara Rao; Mannan, 2001). O nióbio (Nb) é adicionado ao Inconel® 625 como formador de carboneto que, por sua vez, endurece a matriz γ presente. Estas propriedades fazem do Inconel® 625 adequado para aplicação em ambiente corrosivo em faixa extensa de temperatura e diversos setores de engenharia (Puppala *et al.*, 2014).

Murr *et al.* (2011) investigaram a microestrutura de peças de Inconel® 625 com EBM nas condições de como depositado e tratado termicamente. Eles encontraram que as peças tinham uma única arquitetura microestrutural e resistência mecânica aprimorada comparada aos produtos Inconel® 625 forjados e fundidos.

Li *et al.* (2015) examinaram as características microestruturais do Inconel® 625 utilizando Selective Laser Melting (SLM) e encontraram contornos de grão zigzag que é importante em melhorar as propriedades mecânicas da liga. Eles, também, encontraram fase MC (M-metal, C-carbono) no contorno de grão responsável pela forma zigzag.

Wang *et al.* (2016) examinaram o efeito na microestrutura e propriedades mecânicas de peças de Inconel® 625 fabricadas através do MADA (GTAW) e não encontraram porosidade ou trinca na estrutura na condição como depositada, mas indesejáveis fases Laves e carbonetos tipo MC.

Xu *et al.* (2013) investigaram a microestrutura e propriedades mecânicas de peças de Inconel® 625 fabricadas por deposição a arco em plasma pulsado com soldagem TIG e encontraram fases Laves na microestrutura como depositada. As fases Laves dissolveram quando aquecidas em 1080 °C

A fase Laves é uma fase formada devido à segregação do Nb na matriz austenítica. É indesejável devido a sua ação em decrescer a resistência mecânica e aumentar a fragilidade pela queda do Nb na matriz da liga (Dupont; Lippold; Kiser, 2009). Outra fase deletéria presente no Inconel® 625 é a fase ortogonal δNi_3Nb . Esta fase reduz a ductilidade e tenacidade à fratura, aumenta a resistência mecânica e à corrosão do Inconel® 625 (Lass *et al.*, 2017; Mu *et al.*, 2018). A formação desta fase δNi_3Nb retira da matriz Ni-Cr que pode afetar a resistência mecânica e à corrosão do Inconel® 625. Contudo, a fase delta δNi_3Nb não usualmente forma no Inconel® 625 na condição de depositado a menos que após tratamento térmico por pelo menos 1 h para o Inconel® soldado (Floreen; Fuchs; Yang, 1994). O desempenho mecânico satisfatório do Inconel® em MADA necessita do conhecimento da cinética de formação destas fases nas condições de como depositada e pós processamento.

São esperadas diferentes propriedades mecânicas para diferentes partes produzidas por MADA em razão das diferentes geometrias, das taxas de resfriamento e do aspecto construtivo específico. É importante para o progresso futuro da Manufatura Aditiva em larga escala o entendimento de como aspectos geométricos e demais fatores afetam as propriedades.

2.2 Processo de manufatura aditiva

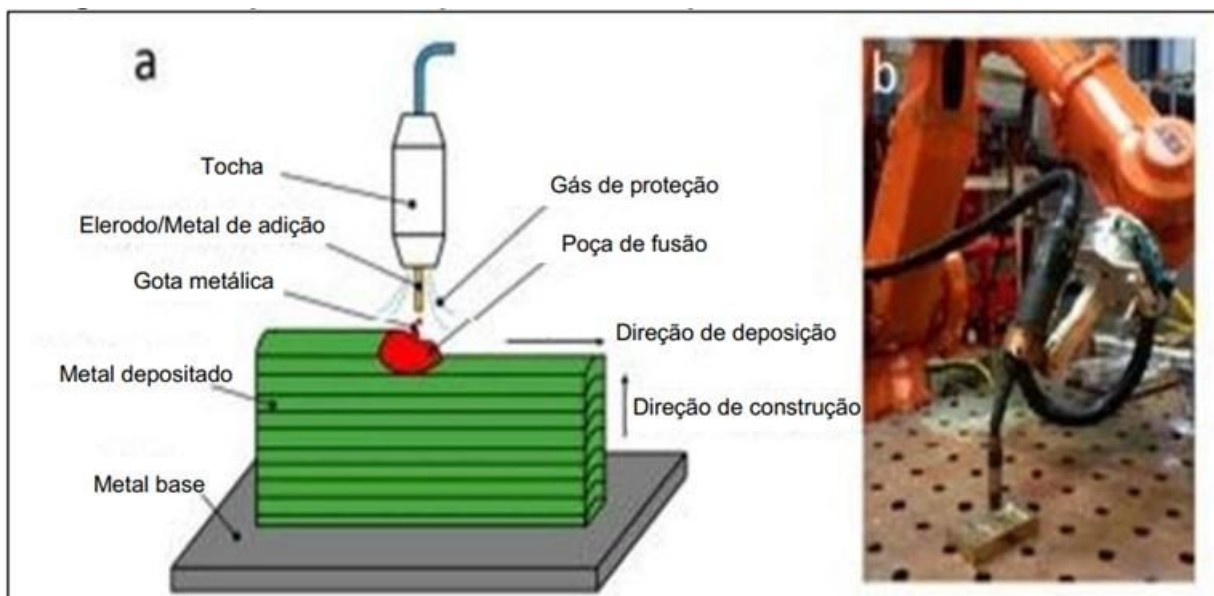
A MADA é uma técnica de fabricação, capaz de unir atributos da manufatura aditiva e da soldagem tradicional. As pesquisas ainda estão no estágio inicial, mas, com o tempo e o esforço, está se aproximando do mercado (Zinkle; Was, 2013). Uma das características mais marcantes da MADA é uma tecnologia de baixo custo e eficiência energética que usa matéria-prima em forma de arame e um arco elétrico como fonte de energia. Em comparação com os sistemas de MA baseados em pó, a MADA oferece uma taxa de deposição mais alta, cerca de 6,5 kg/h (Dahat *et al.*, 2020). O tempo de fabricação pode ser reduzido em 40-60% e o tempo de pós-usinagem em 15-20% usando a tecnologia MADA. Recentemente, um trem de pouso de uma aeronave foi fabricado usando a MADA com uma economia de aproximadamente 78% de matéria-prima em comparação com o processo tradicional de usinagem subtrativa (Wu *et al.*, 2018). Além disso, a MADA tem a capacidade de trabalhar com uma ampla gama de materiais, como ligas à base de Ni, Ti, aços, ligas de alumínio e outros materiais intermetálicos, respectivamente (Mishra *et al.*, 2023).

O MADA é uma técnica promissora, no entanto, para tornar o MADA adequado para aplicações industriais, vários desafios devem ser resolvidos (Rajput *et al.*, 2022).

Uma das partes fundamentais do processo MADA é a tecnologia da fonte de energia utilizada e tecnologias de controle do arco elétrico. O processo mais utilizado é o GMAW com uma fonte que permita o uso do arco pulsado e curto-circuito controlado. Esta técnica permite o maior controle da deposição com menor aporte térmico, condição que permite o maior controle da geometria do cordão depositado, menores distorções e maior controle do ciclo térmico, permitindo um maior controle da microestrutura.

Na Figura 1 (a) e (b), apresenta-se o processo MADA, semelhante ao GMAW, O MADA geralmente (nem sempre) é uma extensão do processo GMAW no campo da Manufatura Aditiva (MA). O processo MADA baseado em GMAW, também conhecido como 'Gas Metal Arc Additive Manufacturing' (GMAAM), usa a mesma configuração de soldagem usada para GMAW. A única diferença está na aplicação do processo. O GMAW é usado para unir, enquanto o MADA é usado para a deposição de camada por camada para criar uma peça funcional (Dahat *et al.*, 2020).

Figura 1 - Esquemático representativo do processo MADA, usando GMAW



Fonte: (Pan *et al.*, 2018).

(a)

(b)

No processo MADA, a poça de fusão e altura da camada de deposição dependem de vários fatores tais como, composição e diâmetro do arame, velocidade de alimentação, velocidade de soldagem, temperatura, gás de proteção, condições do bico de proteção, fluxo de gás, potência, tipo de deposição/modo de soldagem, geometria da peça, caminho de deposição, estratégia de fatiamento e temperatura entre passes etc.

A transferência do metal ocorre com baixa transferência de energia e maior controle em relação aos processos de soldagem a arco elétrico convencionais o que leva a uma menor imposição de aporte térmico na peça, poucos respingos e um arco elétrico suavizado. Isto implica em menos distorção da peça fabricada, melhor controle da microestrutura, melhor controle da geometria do cordão nas peças depositadas por MADA (Ding *et al.*, 2015; Pickin; Williams; Lunt, 2011; Pickin; Young, 2006).

A deposição em camadas leva a números contínuos e variáveis de ciclos térmicos, e, conseqüentemente, a heterogeneidade microestrutural e dispersão de propriedades mecânicas. Estes ciclos térmicos repetitivos com diferentes taxas de aquecimento, temperaturas de pico, e taxas de resfriamento causam uma microestrutura composta. Shassere *et al.* (2019) levantaram a hipótese que o controle do processo e estratégia de deposição, pode reduzir substancialmente a frequência de interrupção do arco, resultando em condições térmicas previsíveis e consistentes em grandes

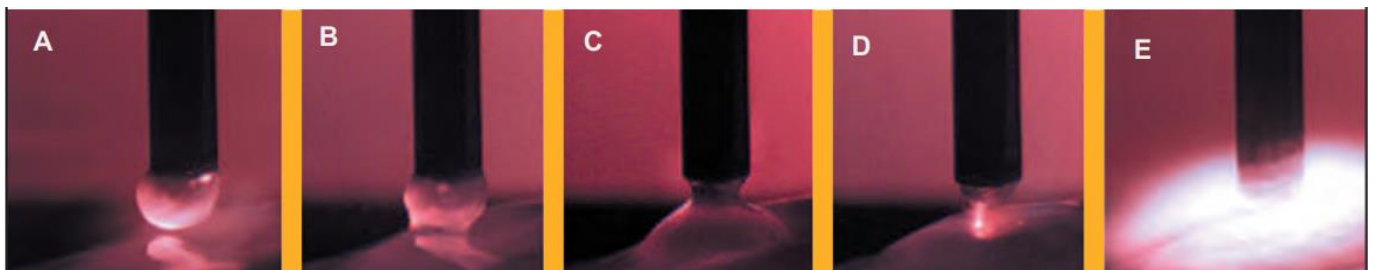
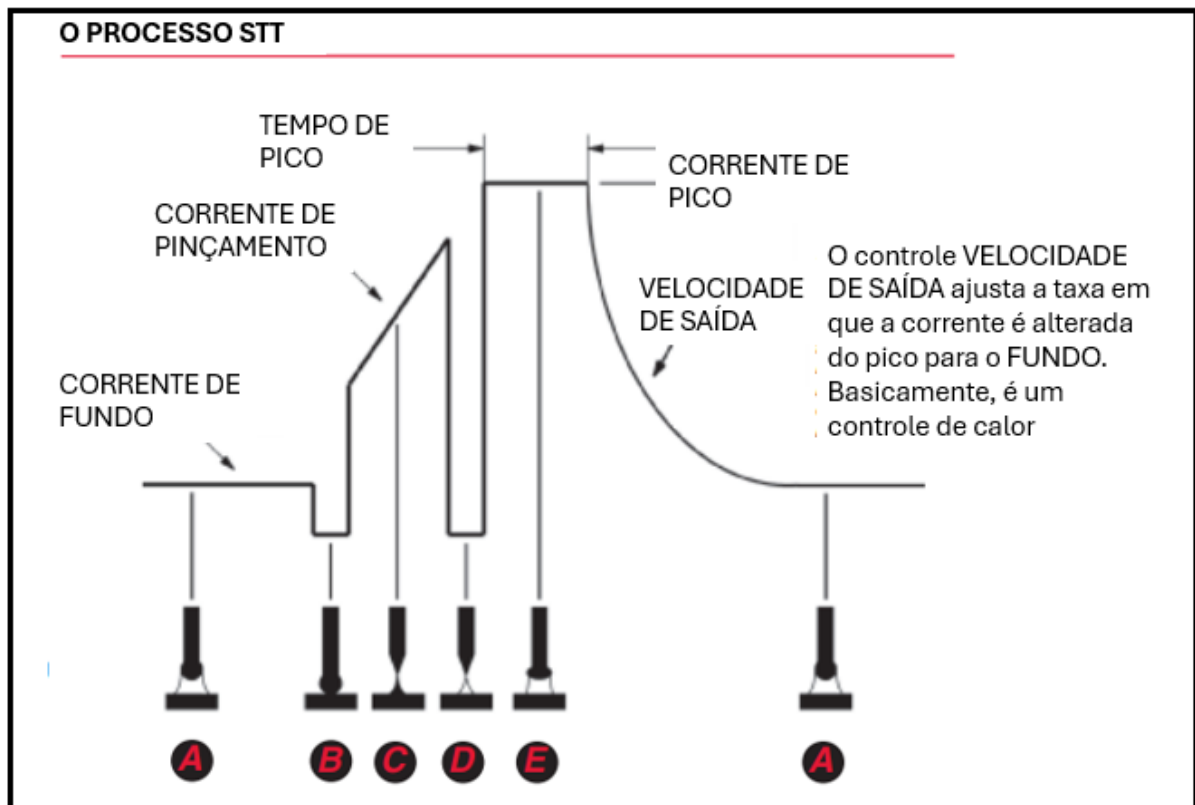
áreas construídas.

Em técnicas de MA, estudos têm sido conduzidos na correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas e seus desafios situam na presença de defeitos locais, tais como porosidades de gás, falta de fusão, dispersão em macro e microestrutura, e, conseqüentemente, dispersão em propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas (Lin et al., 2017; Nilsiam; Sanders; Pearce, 2018; Xiong *et al.*, 2017; Yilmaz; Uglá, 2017).

O Cold Metal Transfer (CMT) é um dos processos GMAW que se caracteriza por baixa energia de soldagem, baixo respingo e alta taxa de deposição (Cong; Ding; Williams, 2015). Este processo coloca o MADA uma etapa a frente no mercado MA devido às estas suas diversas vantagens. Para que este método seja bem estabelecido em MA, deve-se formar uma base de dados para correlação definida entre o processo MADA, materiais, pós-processamento, características metalúrgicas e propriedades mecânicas (Cong; Ding; Williams, 2015).

A Lincoln Electric desenvolveu a fonte com curto circuito controlado, chamada Power Wave R450 equipada com o módulo de controle STT® (Surface Tension Transfer), que utiliza o controle eletrônico da formação e transferência da gota metálica para o melhor controle da deposição. Esta fonte de controle sinérgico, possui recursos avançados para o controle de deposição com baixa entrada de energia, permitindo o controle do ciclo de deposição sem respingos, com baixo aporte térmico e bom controle da poça de fusão, prevenindo a falta de fusão entre camadas. Na Figura 2, apresenta-se o ciclo de deposição pelo processo STT®.

Figura 2 - Esquema do processo Lincoln Electric STT®



Fonte: (Lincoln Electric, 2023).

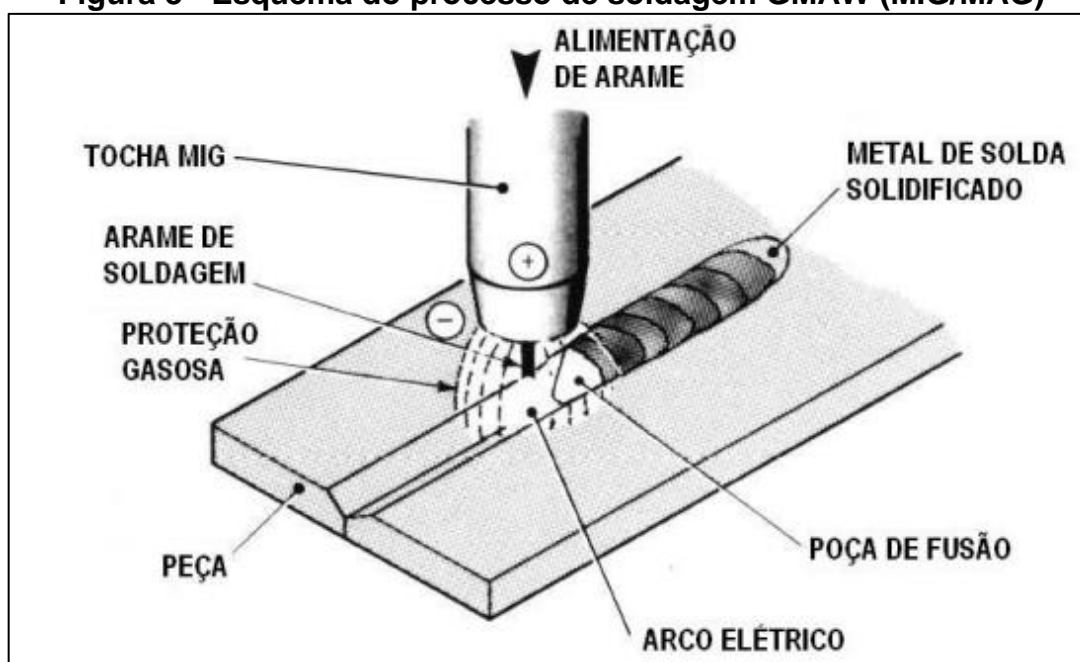
- A: O STT produz uma gota uniforme e a mantém até que a gota toque a poça de fusão;
- B: Quando a gota toca a poça de fusão, a corrente é reduzida a um nível baixo permitindo que a gota metálica mergulhe na poça;
- C: Automaticamente, uma forma de onda *pinch current* é aplicada ao curto-circuito. Durante esse tempo, um circuito especial determina que o curto está prestes a se romper e reduz a corrente para evitar que os respingos;
- D: O circuito STT restabelece o arco de soldagem em um baixo nível de corrente;
- E: O circuito STT detecta que o arco foi restabelecido, e aplica automaticamente a corrente de pico, que define o comprimento adequado do arco. Após

a corrente de pico, o circuito interno muda automaticamente para a corrente de fundo, que serve como um controle fino de calor (Lincoln Electric, 2023).

2.3 Processo da soldagem GMAW

A soldagem GMAW, mais conhecida como MIG/MAG, consiste em um processo de alimentação constante de um arame consumível, direcionado a uma peça metálica, sob uma atmosfera de proteção gasosa. Quando o arame consumível entra em contato com o metal de base, tem-se o fechamento do circuito e a circulação de corrente elétrica entre o polo positivo e o negativo, formando o arco elétrico. Os metais são aquecidos acima da temperatura de fusão e o resultado é a chamada "poça de fusão". Essa poça de fusão é composta pelo arame consumível ou metal de adição e, também, pela parcela fundida do metal de base. Após o resfriamento desta poça de fusão, tem-se a união entre as partes envolvidas, conforme Figura 3.

Figura 3 - Esquema do processo de soldagem GMAW (MIG/MAG)



Fonte: (Soldagem [...], 2017, p. 1).

Os gases de proteção têm como função primordial a proteção da poça de fusão e a formação de atmosfera favorável, a estabilidade do arco elétrico, influenciando a geometria, penetração e características mecânicas e metalúrgicas do cordão. Os principais gases de proteção são o Argônio e CO₂ (dióxido de carbono). Pode-se ter a

adição de um tipo de gás ou na forma de mistura.

Um conjunto de soldagem é composto por fonte de energia (fornece a corrente de soldagem), alimentador de arame (alimenta o consumível através das guias e conduítes em velocidade constante). O alimentador de arame pode ser utilizado tanto para aplicações semiautomáticas, automáticas e para soldagem robotizada.

A tocha de soldagem direciona a alimentação de arame e os fluxos de corrente elétrica e gás de proteção para a poça de fusão. A tocha é composta basicamente por um cabo de cobre para a passagem da corrente elétrica, um conduíte (direciona o arame) e uma mangueira (direciona o fluxo de gás). Diversos recursos tecnológicos, materiais e modelos de tochas estão sendo desenvolvidos para cada aplicação específica, incluindo sistemas de refrigeração, movimentação do arame (*push-pull*) para alteração no modo de transferência, novos materiais para o corpo e bico de contato, visando melhorar as características elétricas e condução térmica, bem como ganho de vida útil e redução de custo operacional.

Sempre que possível, o MIG é o processo escolhido. O arame é o eletrodo consumível, e sua coaxialidade com a tocha de soldagem resulta em um caminho mais fácil para a ferramenta. Em particular, o processo Cold Metal Transfer (CMT) desenvolvido pela empresa Fronius é uma variante modificada do MIG que se baseia em um mecanismo de modo de transferência por curto-circuito controlado. Supõe-se que isso forneça cordões com qualidade, menor aporte térmico e quase sem respingos (Williams *et al.*, 2016).

2.4 Parâmetros de processo da soldagem

A alta taxa de deposição potencial do MADA pode ser usada de forma eficaz para fabricar e reparar componentes funcionais. Para fabricá-los a partir do MADA, o primeiro requisito é chegar perto da geometria e da forma final da peça a ser construída, considerando os custos de pós processamento da peça construída. As peças conforme produzidas pelo MADA têm uma rugosidade de superfície lateral inerente (superfície ondulada), portanto, o pós-processamento é frequentemente necessário para eliminar essa ondulação ou seja, remover o material extra de forma que as superfícies onde são requeridos precisão dimensional ou de rugosidade, fiquem adequadamente ajustadas conforme requisito. A quantidade desse material extra, que leva à ondulação lateral da superfície, varia de um conjunto de parâmetros para outro

e pode ser reduzida selecionando-se um conjunto de parâmetros que produza o mínimo de material residual.

Embora a taxa de deposição seja mais alta, o MADA tem uso limitado na indústria devido à parametrização complexa, à imprecisão geométrica (em comparação com os processos PBF) e à necessidade de pós-processamento para obter superfícies planas do componente, o que representa um custo adicional necessário para a produção. Com o aumento da taxa de deposição, a rugosidade da superfície aumenta, portanto, de alguma forma diferente das operações de soldagem, a parametrização do MADA é fundamental para as tolerâncias de forma e dimensões. Na soldagem, a poça de fusão é em parte moldada pelo chanfro. Além disso, a parametrização do MADA não é um assunto popular na literatura atual para iniciar uma parametrização do zero. A parametrização do MADA é uma tarefa difícil, pois há vários parâmetros envolvidos e os parâmetros são interdependentes uns dos outros, o que torna o processo geral complexo (Dahat, *et al.*, 2020).

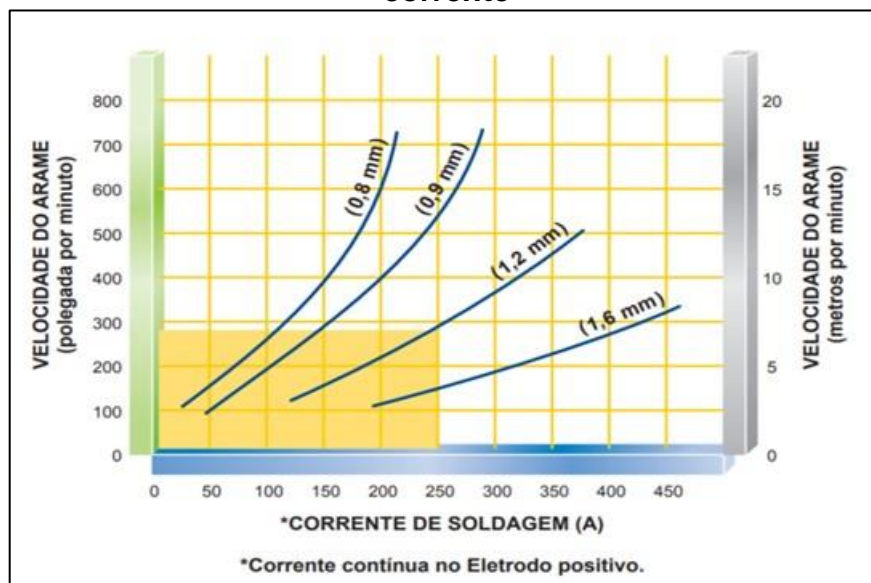
2.4.1 Velocidade de soldagem

A relação entre a distância percorrida pelo arco elétrico na superfície soldada e o tempo gasto é intitulada de “velocidade de soldagem”. Essa relação influencia diretamente na quantidade de energia depositada da superfície soldada. Quanto maior é a velocidade de soldagem, menor é a quantidade de energia depositada na peça por unidade de comprimento. Velocidades de soldagem excessivamente altas podem contribuir para falhas associadas a pouca e/ou falta de penetração do material de adição, menor largura do cordão de solda, mordeduras e fusões deficientes. Entretanto, deposições mais lentas, além de ceder muita energia por unidade de comprimento, contribui para uma elevação de temperatura e uma possível alteração microestrutural no material soldado (Ziedas; Tatini, 1997).

2.4.2 Velocidade de alimentação do arame

A velocidade de alimentação do arame exerce papel importante para o controle da corrente durante o procedimento de soldagem. Quanto maior a velocidade de alimentação do arame, maior é a corrente indicada, conforme Figura 4.

Figura 4 - Relação entre velocidade de alimentação do arame e intensidade de corrente



Fonte: (Welding [...], 1991).

A velocidade de alimentação do arame é um fator essencial para a qualidade da solda. Quando executado incorretamente, pode gerar descontinuidades na poça de fusão e/ou no arco elétrico (Brites; Silva; Brito, 2018) Na manufatura aditiva, exerce importante papel de controle do perfil do cordão depositado e possui relação direta com a taxa de deposição de material.

O efeito mais significativo do aumento da corrente é sobre a rugosidade do cordão, pois ela diminui com o aumento do valor da corrente. Outras respostas como largura do cordão, ângulo de molhabilidade e profundidade de fusão (aporte térmico) aumentam à medida que a corrente do arco é aumentada. Nenhuma variação é observada na altura do cordão (Singh; Khanna, 2021).

2.4.3 Vazão de gás de proteção

O gás de proteção, assim como na soldagem convencional, tem importância fundamental. A vazão de gás e o controle das condições ambientais são importantes para garantir a boa proteção da poça de fusão. A falta de fluxo de gás pode provocar proteção insuficiente ou o excesso pode causar turbulências e porosidades no metal depositado. Singh; Khanna, (2021), não observou qualquer efeito do fluxo de argônio sobre altura e largura do cordão, ângulo de molhabilidade, profundidade de fusão e rugosidade na deposição. Este parâmetro não é considerado uma variável de entrada

crítica. No entanto, é necessário manter o fluxo de argônio para controlar a oxidação da superfície depositada (Singh; Khanna, 2021).

A contaminação da poça de fusão é capaz de gerar porosidades e comprometer a tenacidade e ductilidade da junta soldada com o aparecimento de fissuras. Os gases presentes na atmosfera, também, são capazes de combinar com elementos presentes no material soldado, proporcionando inclusões não metálicas que deterioram as propriedades mecânicas (Scotti; Ponomarev, 2014).

2.4.4 Energia de soldagem

A energia absorvida pelo metal base por unidade de comprimento do cordão de solda é definida como energia de soldagem. Ajustes sobre a energia depositada no metal base podem ser executados controlando a tensão (V), velocidade de soldagem (v) e, principalmente, a intensidade de corrente da soldagem (I) e a eficiência térmica da soldagem (Equação 1).

$$E = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{v} \quad (1)$$

O método tradicional de calcular a energia de soldagem envolve a medição da tensão e corrente médias. Embora esse método produza resultados relativamente consistentes com processos de alta energia, como o arco de spray tradicional, os resultados se tornam menos consistentes e precisos com os modos de arco curto-circuito e pulso devido à rápida mudança na saída da máquina.

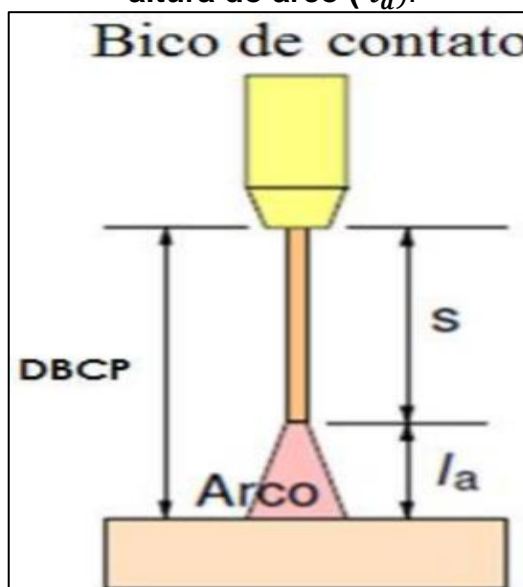
O *True Energy*TM usa os valores instantâneos da saída de soldagem, amostrados a uma taxa de 10 kHz, para calcular a quantidade total de energia (W ou KW) produzida durante toda a soldagem. Esse valor é então multiplicado pela duração da solda, para calcular a *True Energy*TM (J ou kJ) da solda. Usando o valor da *True Energy*TM e o comprimento da solda, é possível calcular o aporte térmico para a solda. (The Lincoln Electric Company, 2023).

A energia de soldagem exerce influência no que diz respeito ao resultado final do processo. Para a MADA, o baixo aporte térmico permite maior controle da geometria do cordão e melhor controle da temperatura da pré-forma, permitindo maior tempo de deposição e melhor controle das propriedades mecânicas e metalúrgicas.

2.4.5 *Stick-out*

Segundo a American Welding Society (AWS), *stick out* é o comprimento de arame definido entre o final do bico de contato da tocha até o ponto onde o mesmo funde e se forma o arco elétrico aberto. Na Figura 5, a seguir, apresenta-se a diferenciação entre o Comprimento do Bico de Contato à Peça (DBCP), o *stick-out* (S) e a altura do arco (l_a). (American Welding Society *apud* Marques; Mondenesi; Bracarense, 2007).

Figura 5 - Comprimento do bico de contato até a peça (DBCP), *stick-out* (S) e altura do arco (l_a).



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2007).

Os acréscimos no comprimento do arame amplificam a resistência elétrica durante o processo de soldagem, conseqüentemente reduzindo a taxa de fusão do material depositado, devido ao acréscimo de temperatura no arame.

O aumento do comprimento do eletrodo resulta no aumento da resistência elétrica, da temperatura do eletrodo e da taxa de fusão do arame. É possível elevar a taxa de fusão durante o processo aumentando exclusivamente o parâmetro *stick-out* mantendo os demais parâmetros (energia de soldagem, velocidade de soldagem, diâmetro do arame, entre outros) inalterados (Marques; Mondenesi; Bracarense, 2007).

2.4.6 Intensidade da corrente

No processo MIG-MAG, a corrente de soldagem está diretamente relacionada à taxa de alimentação do metal de adição. A intensidade da corrente correlaciona com a velocidade de alimentação do arame. Segundo (Resende *et al.*, 2011) , através de validações experimentais o aumento da corrente MIG/MAG apresenta aumento na penetração do material-base no substrato. Além disso, gotas com maiores velocidades são obtidas com o aumento da corrente, o que contribui para a maior penetração.

Em fontes com transferência pulsada e curto-circuito controlado, os parâmetros variam em alta frequência de acordo com a formação da gota e o estágio da transferência. Neste caso, não se define um valor fixo e sim um valor médio para a corrente. Este valor médio deve ser considerado para cálculo da energia de soldagem (aporte térmico).

2.4.7 Tensão

No processo MIG-MAG, a tensão do arco depende de fatores como:

- a) comprimento;
- b) tipo;
- c) diâmetro do arame;
- d) gás de proteção; e
- e) modo de transferência.

Quando tais variáveis se mantêm constantes, o aumento da tensão do arco é capaz de manipular as características finais da solda, podendo influenciar diretamente na largura e altura do cordão, distribuição do metal depositado e na redução da penetração da junta. Tensões excessivas podem provocar porosidade, descontinuidades e mordeduras; por outro lado, tensões baixas resultam em porosidade e cordões convexos. (Marques; Modenesi; Bracarense, 2007).

2.5 Experimento fatorial

Um experimento fatorial é um tipo de avaliação programada que permite compreender as diferentes respostas, dentre diversos fatores (Bowerman, 1991; Montgomery & Runger, 2016). Ao iniciar esse experimento, deve-se selecionar fatores e os seus níveis de variação no mesmo período. Com isso, é possível investigar respostas com um menor número de experimentos ou maior facilidade de seleção de experimentos. O Design of Experiments (DOE) ou Experimento Fatorial é uma técnica utilizada na estatística, particularmente na área de planejamento e análise de experimentos. Essa abordagem é uma maneira sistemática de realizar testes e experimentos para determinar como diferentes variáveis independentes influenciam uma variável dependente (Murray *et al.*, 1990).

Em um experimento fatorial, são consideradas múltiplas variáveis independentes, permitindo a análise de como elas interagem entre si e como afetam a variável de interesse. Essas variáveis podem ser de diferentes tipos e níveis. O experimento fatorial permite analisar como cada variável afeta a variável resposta e as interações entre elas de maneira mais eficiente o que reduz a necessidade de experimentos individuais para cada combinação de variáveis.

Os experimentos fatoriais geralmente envolvem a criação de matrizes de tratamentos, onde cada combinação de níveis de variáveis é testada. Isso ajuda a entender não apenas o efeito de cada variável, mas, também, como elas interagem umas com as outras.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O presente trabalho é uma continuidade do estudo iniciado por Raposo *et al.* (2023), e faz parte da pesquisa desenvolvida pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia MADA, do CIT SENAI, sendo esta pesquisa a base para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado em MADA.

O trabalho visa a construção de pré-formas em Inconel® 625 pelo processo GMAW e posterior caracterização microestrutural e avaliação das propriedades mecânicas do metal depositado, com o objetivo de validar o método MADA como alternativa para fabricação de peças e partes em Inconel® 625.

Para efeito de estudos, foi comparado as propriedades das pré-formas produzidas por MADA com os requisitos definidos pelo ASME Seção II, parte B, para os materiais em Inconel® 625 fornecidos em forma de tiras ou chapas, ASME SB 443, tubos ASME SB 444 e barras ASME SB 446. As propriedades requeridas são similares, portanto, destaca-se somente as propriedades do ASME SB 446 na Tabela 2.

3.1 Estruturação da experimentação

A metodologia seguiu uma sequência experimental representada pelas etapas de pré-processamento, deposição, pós-processamento e ensaios para caracterização microestrutural e mecânica. Para a produção das pré-formas foi adotado os parâmetros de deposição estudados (Raposo *et al.*, 2023).

3.2 Pré-processamento experimental

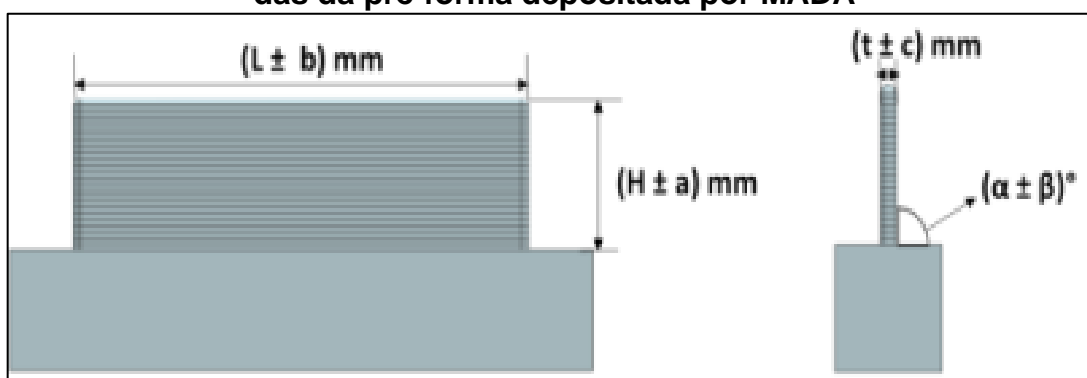
Esta etapa inclui a fase de planejamento do experimento, adequação à infraestrutura existente, aquisição dos materiais para o substrato na forma de barras e chapas, consumível (Inconel® 625) na forma de arame com diâmetro de 1,2 mm, gases e materiais diversos para a realização da deposição.

3.2.1 Planejamento do experimento

Visando a obtenção de pré-formas em dimensões adequadas para a realização dos ensaios mecânicos e metalográficos, conforme Figura 6 para preparação dos

corpos de prova, definiu-se a utilização de substrato nas dimensões 50 x 50 x 250 mm, visando a obtenção de pré-formas de 12 x 50 x 200 mm, conforme figura 6, tanto de aço carbono como de Inconel® 625. O substrato foi fixado sobre a mesa do posicionador, possibilitando o acesso livre para a deposição com utilização do robô de soldagem.

Figura 6 - Dimensões da barra de aço carbono e Inconel e dimensões planejadas da pré-forma depositada por MADA



Fonte: Elaborada pelo autor.

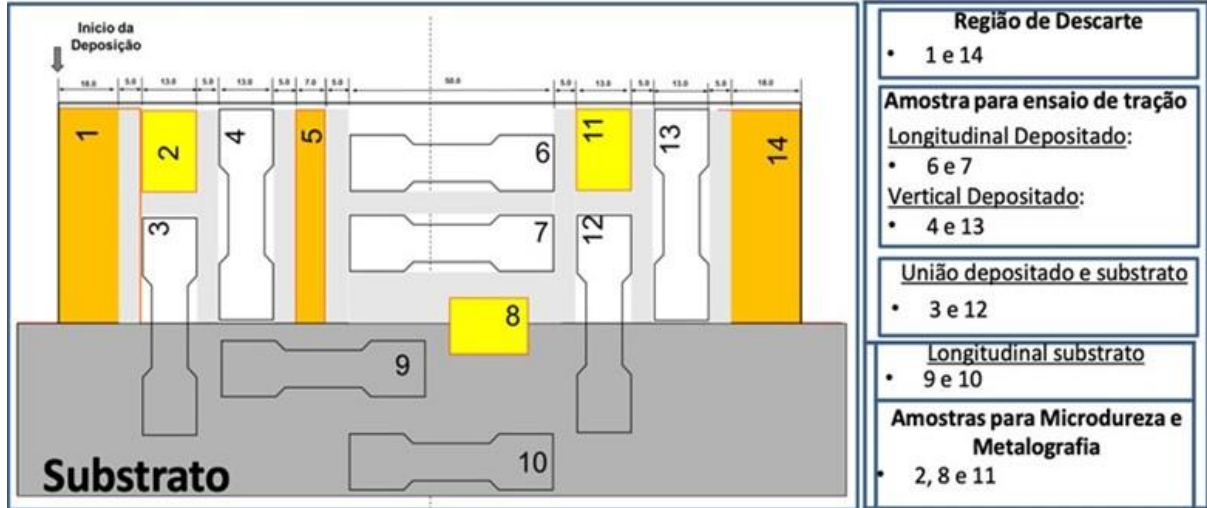
Neste planejamento experimental, incluiu-se, também, as faixas de variação para análise inicial e definição das dimensões finais da pré-forma e dos corpos de prova para a realização dos ensaios e testes programados.

Foi programado a produção de corpos de prova com os seguintes objetivos, conforme identificação da Figura 7:

- a) amostras 1 e 14: Região de descarte;
- b) amostras 2 e 11: Ensaios de dureza e metalografia na região do metal depositado;
- c) amostras 3 e 12: Ensaio de tração na região de interface entre o substrato e metal depositado, transversal à direção de deposição;
- d) amostras 4 e 13: Ensaio de tração na região do metal depositado, transversal à direção de deposição;
- e) amostra 5: reserva;
- f) amostras 6 e 7: Ensaio de tração na região do metal depositado, longitudinal à direção de deposição;
- g) amostra 8: Ensaios de dureza e metalografia na região de interface entre o substrato e o metal depositado;

h) amostras 9 e 10: Ensaio de tração na região do substrato;

Figura 7 - Layout para retirada dos corpos de prova para ensaios mecânicos e metalográficos



Fonte: Adaptado de Raposo et al. (2023).

3.3 Análise química e metalográfica do Inconel® 625

A composição química do arame conforme AWS ERNiCrMo-3 utilizado como material de adição na construção das pré-formas de Inconel® 625 está mostrada na Tabela 1.

A composição química do substrato, fornecida pela Villares Metals é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do substrato de INCONEL® 625 – UNS N06625 em porcentagem em peso

Ni	Cr	Mo	Nb	C	Si	Mn	Fe	Ti	P	S	Cu	Al
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
64,7	20,45	8,07	3,32	0,01	0,23	0,06	2,40	0,264	0,010	<0,0010	0,14	0,14

Fonte: Certificado Villares Metals

Ainda, segundo o Certificado de Qualidade da barra forjada e recozida UNS N06625, foi conduzida a um ciclo de tratamento térmico de recozimento a 890 °C durante 2 h seguido por resfriamento em água. A barra apresentou tamanho de grão 6 ASTM (Norma ASTM E112) (American Society for Testing and Materials, 2021) com dureza Brinell, 226HBW. Através do ensaio de tração na seção longitudinal foi obtido

o limite de resistência (LR) com valor de 940MPa e limite de escoamento a 0,2% (LE0,2%) de 500MPa, estrição de 62,3% e alongamento (Al) de 46,1%.

3.4 Etapas da deposição

Uma característica do processo GMAW é o grande número de variáveis que influenciam no processo tais como:

- a) Parâmetros elétricos da soldagem;
- b) desgaste do bico de contato;
- c) temperatura de interpasse e fluxo térmico;
- d) alinhamento do substrato;
- e) alimentabilidade do arame entre outros, porém de difícil controle.

No processo MADA, acrescenta-se importantes variáveis que são desafios para o controle do processo produtivo e que dependem de desenvolvimentos tecnológicos para a sua implementação, sendo estas variáveis importantes barreiras para a aplicação industrial do processo MADA de fabricação.

Como principais barreiras, podem ser citadas o controle da geometria do cordão a ser depositado sobre o cordão previamente depositado, aplicação de sistemas de correção em tempo real para compensar as variações indesejadas e a simulação e controle do fluxo térmico para permitir o planejamento da rota e estratégia de deposição.

Para definição dos parâmetros iniciais de deposição, Raposo *et al.* (2023), considerou as principais variáveis sob controle no processo GMAW, considerando a deposição de cordão sobre chapa plana, *bead on plate*. Na construção da pré-forma outros parâmetros poderão ser ajustados em função das alterações das condições de contorno, principalmente as variações de fluxo térmico e variações geométricas do cordão em função da deposição sobre cordão anterior em parede fina.

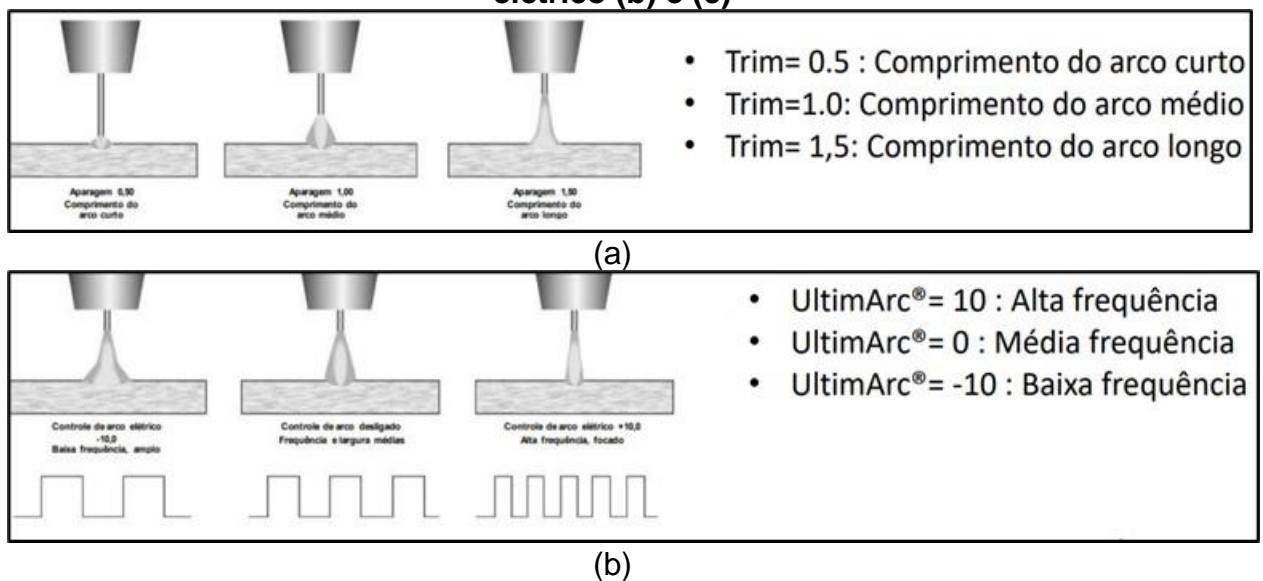
3.4.1 Parâmetro e condições de contorno

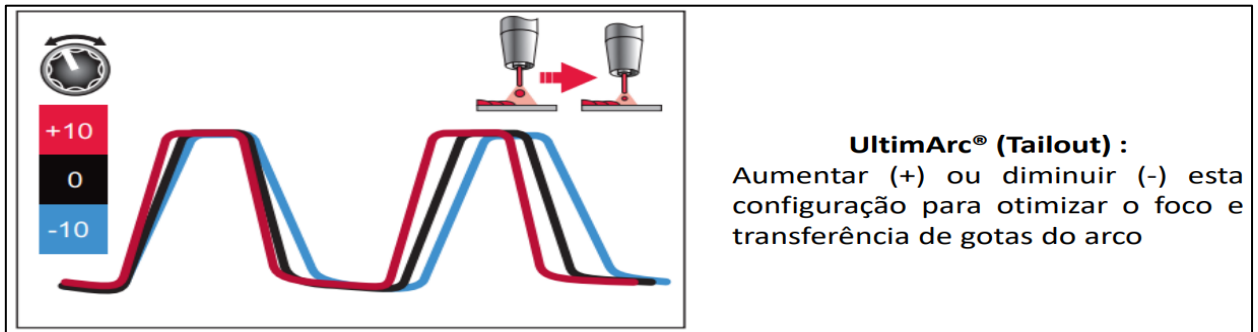
Neste trabalho, avaliou-se os parâmetros de influência no processo GMAW tais como:

- a) distância bico peça (*Stick-out*),
- b) tensão;
- c) corrente;
- d) velocidade de alimentação do arame;
- e) velocidade de soldagem;
- f) vazão de gás;
- g) geometria do arame;
- h) qualidade do arame; e
- i) método de transferência utilizado e ângulo da tocha em relação a peça.

A fonte de soldagem que foi utilizada no processamento (Lincoln® Power Wave 450) permite que sejam acessados parâmetros exclusivos em curvas de soldagem patenteadas. Destes parâmetros, destacam-se o ajuste de comprimento do arco (parâmetro Trim) que permite ajustar a intensidade da energia gerada no instante do processo de soldagem (ajustável entre 0,5 e 1,5) e a frequência do arco elétrico com as defasagens entre as curvas (Figura 8(a), (b) e (c)). (ajustável entre frequências baixas, altas e nominal).

Figura 8 - Ajuste do comprimento do arco para Trim (a) e da frequência do arco elétrico (b) e (c)





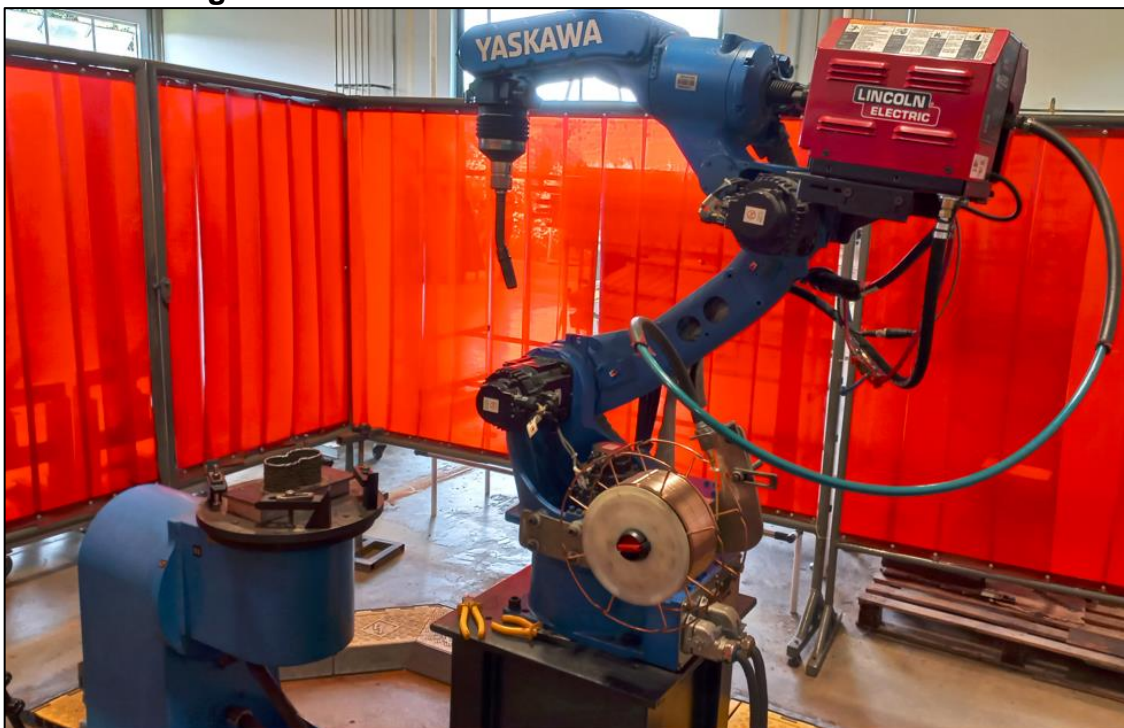
(c)

Fonte: (The Lincoln Electric Company, 2023).

3.4.2 Técnicas de deposição

Existem diversas técnicas disponíveis no mercado para o controle do modo de deposição. Neste estudo, foi utilizado o processo GMAW, executado por um robô antropomórfico de 6 eixos, da fabricante *Yaskawa®* Motoman, equipado com mesa posicionadora de 2 eixos também *Yaskawa®*, fonte de soldagem Lincoln Electric Power Wave 450 com módulo de curto-circuito controlado STT® (Surface Tension Transfer), alimentador de arame Lincoln Electric e tocha de soldagem refrigerada a água da fabricante TBI, representado na Figura 9.

Figura 9 - Célula robotizada Yaskawa® - CIT SENAI



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos parâmetros de deposição definidos por Raposo *et al.* (2023), foi realizado a programação do robô para deposição da pré-forma, composta por um passe de deposição por camada, de forma a construir uma parede com dimensões adequadas para preparação dos corpos de prova necessários para a caracterização mecânica e metalúrgica da pré-forma. Foi utilizado o processo GMAW com transferência por circuito controlado STT, sobre um substrato de aço carbono e outro de Inconel® 625.

Os parâmetros adotados para a deposição foram:

- a) gás de proteção: Argônio 4.8 (pureza mínima de 99.998%)
- b) vazão de gás: 20 l/min;
- c) Tailout:0;
- d) velocidade de alimentação do arame: 8,55 m/min;
- e) velocidade de soldagem: 11,7 mm/s;
- f) distância bico peça ("*stick out*"); 16 mm;
- g) Trim: 1.
- h) Deposição em sentidos alternados a cada camada;
- i) Tempo de interpasse: 120 s.

O incremento vertical a cada camada realizado pelo robô, foi baseado na média aritmética dos valores experimentais de incremento da altura observados no experimento.

Figura 10 - Imagem da parede de Inconel® 625



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram monitoradas a largura e a altura de cada cordão depositado ao longo de formação da pré-forma, visando acompanhar a formação da parede e garantir as dimensões e geometria desejada (Tabela 4).

Para prevenção do decaimento de altura típico do processo MADA, foi adotado a deposição com sentido invertido a cada camada depositada e tempo de espera entre final de deposição de uma camada e início da próxima de 120 s para permitir a homogeneização da distribuição do calor e redução da temperatura de interpasse. Neste estudo não foi realizada a medição das temperaturas durante o processo.

3.5 Pós processamento

O pós-processamento inclui a limpeza inicial da pré-forma, exame visual, dimensional, exame por Líquidos Penetrantes (LP), usinagem de desbaste para regularização da placa de testes e usinagem para remoção dos corpos de prova para análise mecânica e metalográfica. Na Figura 11, apresenta-se imagem da parede e da barra usinada constituindo o componente com as dimensões das espessuras antes e após usinagem.

Figura 11 - Componente constituído da barra usinada de aço carbono e parede Inconel® 625manufaturado através do processo MADA



Fonte: Adaptado de Raposo *et al.* (2023).

3.5.1 Análise por Ensaios Não Destrutivos - END

Após a limpeza por escovamento, foi realizada a análise visual da pré-forma, não sendo evidenciado trincas ou outras discontinuidades significativas.

O ensaio de líquido penetrante foi realizado com a pulverização de solução penetrante VP-30, da Metal Chek. Após tempo de penetração foi realizada a lavagem com água e secagem do componente, com posterior pulverização do fluido revelador Metal Chek, não sendo evidenciado trincas na região de metal depositado.

O exame dimensional foi realizado utilizando o braço articulado Faro® equipado com scanner a laser e ponta esférica para medição por contato, permitindo tanto a medição das dimensões principais como a digitalização da superfície depositada para verificação das variações superficiais das paredes, possibilitando o correto posicionamento e definição das cotas de referência para a usinagem.

3.5.2 Usinagem dos corpos de prova

Com base na digitalização das paredes, foi realizado o posicionamento e usinagem de faceamento tanto do bloco de substrato quanto da parede depositado, visando obter uma superfície plana e paralela com espessura de 4,5mm. A usinagem foi realizada usando o centro de usinagem CNC 5 eixos Romi DCM 620-5F.

A usinagem dos corpos de prova foi realizada usando eletroerosão a fio, conforme *layout* apresentado na Figura 7.

3.6 Ensaios mecânicos

Após a usinagem dos corpos de prova, foram realizados os ensaios mecânicos e caracterizações metalúrgicas, conforme planejamento (Svetlizky *et al.*, 2021).

3.6.1 Ensaio de dureza Vickers (HV10)

Para o ensaio dureza, foi usado uma pré-forma adicional com substrato em Inconel® 625. Foram realizados cortes em fatias com espessura de 10 mm no sentido transversal ao sentido de deposição. As fatias foram usinadas e, posteriormente, desbastadas em lixas com granulação 120, 240, 320, 400, 600 e 1200 # *mesh* para ataque macrográfico.

Após o ataque para revelação das camadas de deposição, foi realizado o ensaio de dureza Vickers utilizando um equipamento semiautomático, marca Shimadzu, carga de 98,07 N (HV_{10kgf}). Foram realizadas 13 medidas de dureza (HV_{10kgf}) no

sentido da altura da amostra, no centro da parede, e, também, 13 medidas de dureza (HV_{10kgf}) na borda da parede. Com as dimensões das diagonais da impressão, o software disponível no equipamento calcula os valores da dureza de acordo com a Equação 2.

$$HV = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

onde F é a carga em kgf e d é o valor médio da diagonal da impressão em mm.

Foram realizadas impressões distantes de 5 mm, entre si, no metal base, zona termicamente afetada e zona fundida, conforme norma ASTM E92-2017 (American Society for Testing and Materials, 2017).

3.6.2 Ensaio de microdureza dureza vickers

As amostras foram preparadas metalograficamente e realizado o ensaio utilizando o microdurômetro Vickers, marca *FutureTech*®, modelo FM-700, aplicando uma carga de 1N (0,1kgf) por 15 s. Os ensaios foram executados, conforme Norma ASTM E92-2017 (American Society for Testing and Materials, 2017).

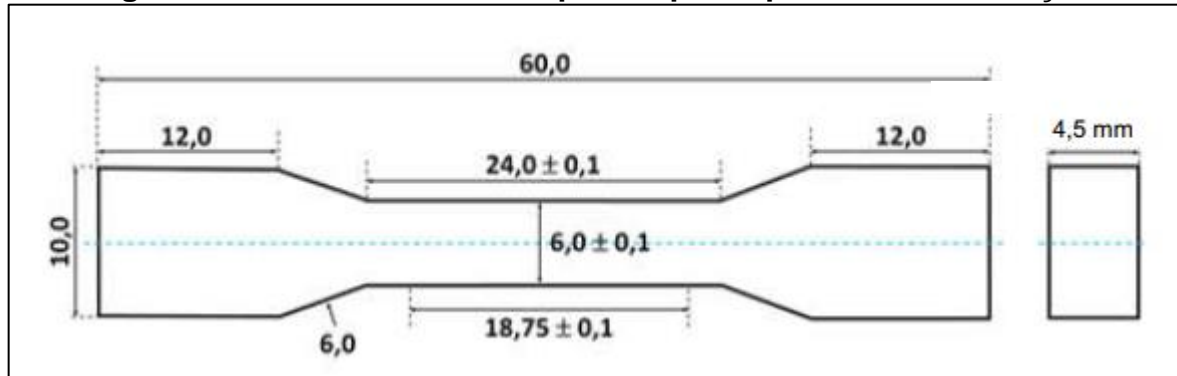
Foi medido a microdureza Vickers $HV_{0,1kgf}$ do arame de Inconel® 625 e nas amostras nos sentidos transversal e longitudinal (nº 2, 11 e 8), retiradas das pré-formas (Figura 7), abrangendo o MS e o MB.

3.6.3 Ensaio de tração

Os corpos de prova para ensaio de tração foram retirados do substrato e na pré-forma de Inconel®625, nas direções longitudinal e transversal ao sentido da deposição, conforme *layout* definido na Figura 7.

As dimensões dos corpos de prova e os ensaios de tração foram realizados em temperatura ambiente, com velocidade de 2,00 mm/min, seguindo as orientações da norma ASTM A370 (American Society for Testing and Materials, 2023). Foi utilizado as dimensões definidas para o corpo de prova *subsize* conforme Figura 12.

Figura 12 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7 Análise microestrutural

As amostras 2, 8 e 11 da Figura 7 e do arame Inconel® 625 foram embutidas com resina condutora de ferro, lixadas e polidas convencionalmente.

Para as análises por microscopia ótica (MO), com o intuito de observar as morfologias dos constituintes presentes nas amostras retiradas das pré-formas e do arame Inconel® 625, considerou-se ataque químico diferenciado devido à dificuldade em revelar a microestrutura. Após o procedimento, o ataque químico foi interrompido com água corrente, seguido de álcool etílico e secagem com jato de ar frio.

No Quadro 1, a seguir, apresenta-se o procedimento do ataque químico e os reativos usados de acordo com a composição química do material e com o objetivo da análise, a saber:

Quadro 1 - Ataques químicos utilizados nas amostras para identificação das fases

	<i>Objetivo</i>	<i>Ataque Químico</i>
Arame Inconel 625 (ER NiCrMo-3)	Identificação das fases	Polimento eletrolítico com 60% de ácido nítrico, 10s e 2V.
Pré-forma Inconel 625	Identificação das fases	Polimento eletrolítico com 60% de ácido nítrico, 10s e 2V.
		Polimento eletrolítico com 10% de ácido oxálico, 10s e 2V.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7.1 Microscopia ótica

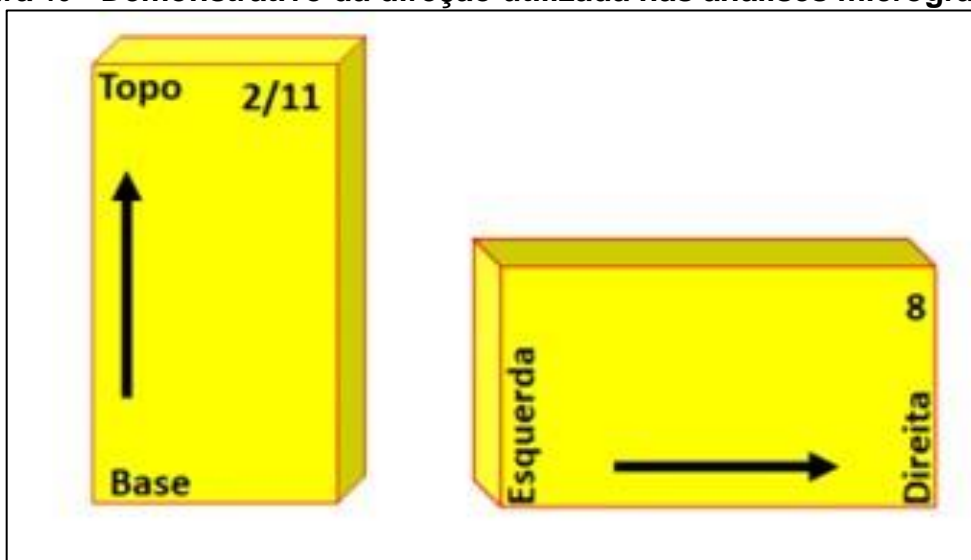
As imagens foram realizadas em microscópio ótico (MO), marca Olympus, modelo BX51M, no modo campo claro (CC).

As amostras foram avaliadas microestruturalmente para verificar as fases presentes após polimento eletrolítico, sendo que, nas pré-formas, observou-se a seção transversal e longitudinal, enquanto o arame foi considerado a seção longitudinal à meia espessura.

A análise na direção transversal das amostras da pré-forma considera o sentido de crescimento da parede (eixo Z) fabricado com o arame Inconel[®] 625, sendo o início da análise a base do corpo de prova e seu fim, o topo.

A análise na direção longitudinal avalia a união do material depositado Inconel[®] 625 (Metal de Solda - MS) com o substrato Inconel[®] 625 (Metal Base - MB) no sentido de deposição do cordão de solda (eixo X), sendo o início da análise o lado esquerdo do corpo de prova e seu fim, o lado direito. Foi utilizado os corpos de prova n^o 2, 8 e 11 conforme *layout* da Figura 7. O sentido da seta indica o início e fim das análises no MO (Figura 13).

Figura 13 - Demonstrativo da direção utilizada nas análises micrográficas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os corpos de prova n^o 2, 11 e 8, o sentido da seta indica o início e fim das análises no MO.

É importante salientar que a direção da análise deve ser cuidadosamente selecionada, para que se possa construir a relação entre os efeitos térmicos e construção das pré-formas nas formações de fases e suas alterações morfológicas.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Confeção da pré-forma

Para a deposição da pré-forma foi utilizado substratos de aço carbono e de Inconel® 625, usinados nas dimensões 50 x 50 x 250 mm, previamente usinado e fixado na mesa do robô.

A deposição foi realizada em 42 passes, utilizando os parâmetros previamente definidos:

- a) gás de proteção: Argônio 4,8 (pureza mínima de 99,998%);
- b) vazão de gás: 20 l/min;
- c) tailout: 0;
- d) velocidade de alimentação do arame: 8,55 m/min;
- e) Velocidade de soldagem: 11,7 mm/s;
- f) distância bico peça (*stick-out*): 16 mm;
- g) trim: 1;
- h) deposição em sentidos alternados a cada camada;
- i) tempo de interpasse: 120 s.

Foram produzidas duas pré-formas para cada tipo de substrato.

A geometria manufaturada foi uma parede retangular com dimensões úteis aproximadas de 200 x 50 x 8,5 mm, usinado para as dimensões finais (Figura 14)

Tabela 4 - Monitoramento da geometria dos cordões depositados

Coluna1	Coluna2	Coluna3	Coluna4
Nr Passe	Altura	Largura	Incremento na Altura
1	2,40	7,40	-
2	4,00	7,50	1,60
3	5,70	7,50	1,70
4	7,40	7,80	1,70
5	8,80	8,20	1,40
6	10,00	9,50	1,20
7	11,00	10,40	1,00
8	11,50	10,80	0,50
9	13,20	10,80	1,70
10	14,20	10,80	1,00
11	15,90	10,90	1,70
12	17,00	10,90	1,10
13	17,80	10,90	0,80
14	19,30	10,90	1,50
15	20,40	10,90	1,10
16	21,50	10,90	1,10
17	22,30	11,80	0,80
18	23,30	11,80	1,00
19	25,00	11,80	1,70
20	25,60	11,80	0,60
21	26,70	11,80	1,10
22	27,30	11,80	0,60
23	29,30	11,80	2,00
24	30,10	11,80	0,80
25	31,00	11,80	0,90
26	31,60	11,80	0,60
27	32,90	11,80	1,30
28	33,80	11,80	0,90
29	35,40	11,80	1,60
30	37,10	11,80	1,70
31	38,00	11,80	0,90
32	40,20	11,80	2,20
33	42,00	11,80	1,80
34	42,70	11,80	0,70
35	43,70	11,80	1,00
36	45,80	11,80	2,10
37	46,90	11,80	1,10
38	47,90	11,80	1,00
39	49,40	11,80	1,50
40	50,10	11,80	0,70
41	51,70	11,80	1,60
42	52,70	11,80	1,00
43			

Fonte: Adaptado de Raposo et al. (2023).

Figura 14 - Imagem do bloco retangular com parede de espessura média vertical de 8,5 mm em Inconel® 625 antes da usinagem

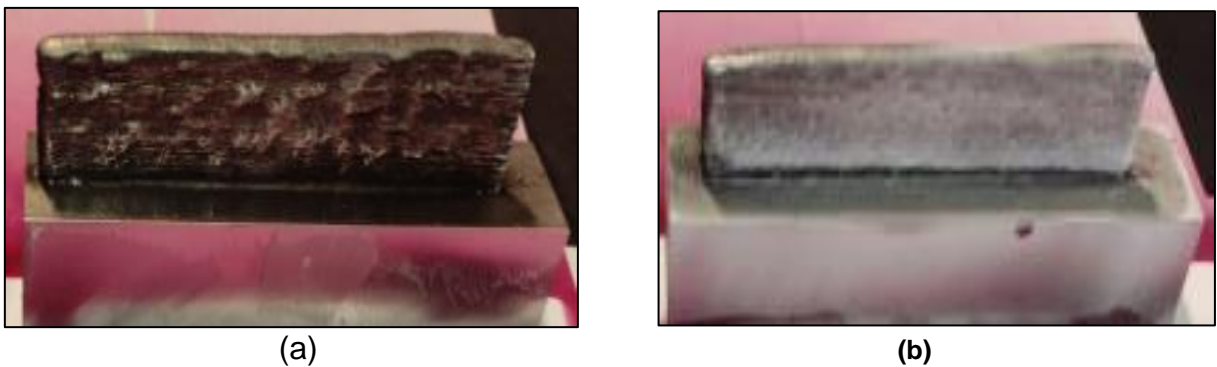


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1 Ensaio por líquido penetrante

Na Figura 15 (a) e (b), apresenta-se as imagens da parede de Inconel® 625 depositada, após a pulverização da solução VP-30 e do revelador D-70.

Figura 15 - Imagem da parede de Inconel® 625 depositada após aplicação da solução penetrante (a) e do revelador D-70 (b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Não se observou trinca superficial ao longo da parede e, também, na interface entre a parede e barra de substrato.

4.2 Propriedades mecânicas

Os valores dos resultados dos ensaios de tração encontram-se descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios mecânicos realizados

Resultados dos ensaios mecânicos												
Nr. da Pré-forma	Nr da Amostra (Fig 7)	Direção	Limite de escoamento			Limite de Resistência			Alongamento			Obs.
			Valores (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Valores (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	(%)	Média (MPa)	Desvio Padrão	
1	4	Transversal	406	409	13,8	656	656	29,2	74,5	71	3,5	Metal depositado - Seção Transversal
2	4		390			614			73,6			
1	13		418			676			67,7			
2	13		420			676			68,3			
1	6	Longitudinal	412	419	5,4	723	710	14,6	66,8	58	6,4	Metal depositado - Seção Longitudinal
2	6		418			692			56,8			
1	7		420			721			53,1			
2	7		425			705			53,6			
1	3	Transversal		NA	NA	691	694	2,9		NA	NA	Seção Transversal - interface entre substrato e metal depositado
2	3					695						
1	12					697						
2	12					692						
1	9	Longitudinal	708	707	93,5	1005	992	32,0	38,8	44	7,9	Substrato - Seção Longitudinal
2	9		685			977			46,0			
1	10		830			1030			35,8			
2	10		604			957			53,6			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores médios dos resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores médios do limite de escoamento, resistência e alongamento obtidos nos ensaios mecânicos de tração

Propriedades Mecânicas obtidas nos ensaios (Valores Médios)				
Localização do corpo de prova	Nr do corpo de Prova (Figura 7)	Resistência à Tração	Limite de Escoamento	Alongamento
		MPa	MPa	%
Metal depositado - Seção Transversal	CPs 4 e 13	655,50	408,50	60,42
Metal depositado - Seção Longitudinal	CPs 6 e 7	710,25	418,75	69,25
Seção Transversal - interface entre substrato e metal depositado	CPs 3 e 12	693,64	NA	NA
Substrato - Seção Longitudinal	CPs 9 e 10	992,25	706,75	41,78

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores obtidos para os corpos de prova retirados do MS das respectivas seções transversais e longitudinais apresentaram pequenas variações, sendo consideradas típicas para o processo e deposição por soldagem.

Comparando os valores de resistência encontrados com os valores mínimos definidos pelo ASME II parte B, na condição recozido, verifica-se que a média do limite de escoamento para a seção transversal ficou abaixo do requerido pelo ASME, as demais amostras atenderam ao requisitado, porém os valores médios do limite de resistência à tração apresentaram resultados abaixo do mínimo requerido para todas as seções, conforme demonstrado no Gráfico 1.

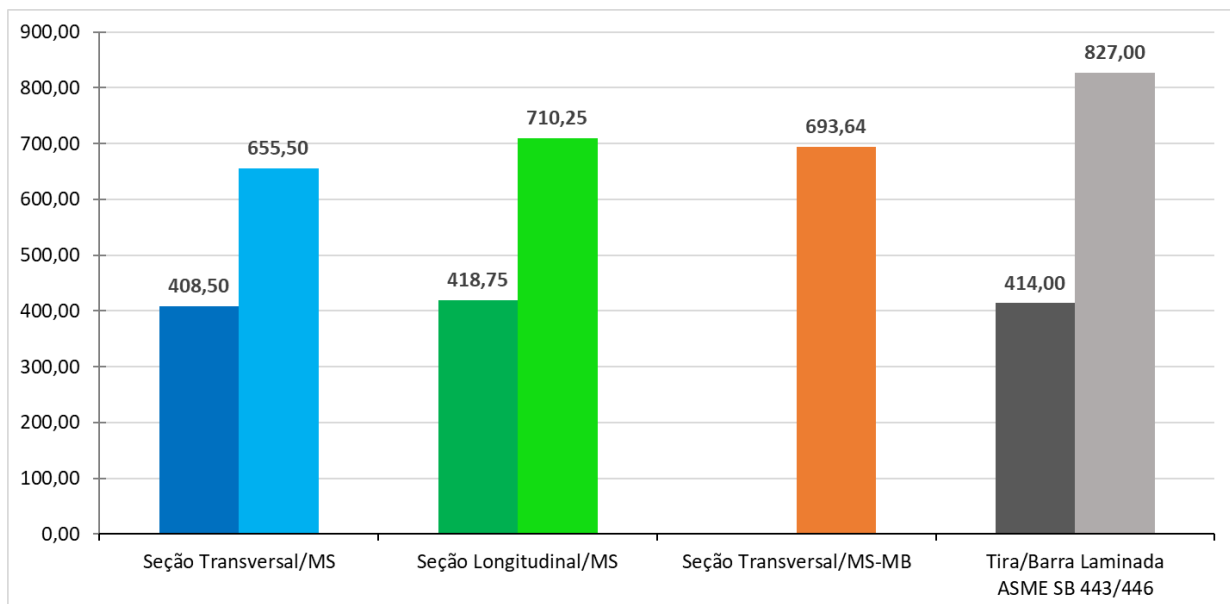
Os valores de alongamento apresentaram resultados superiores ao mínimo requerido por norma para todas as condições. A diferença demonstrada entre as direções transversais, longitudinais e interface podem ter sido comprometido pela presença de precipitados nos contornos de grãos austeníticos no MB.

Os valores do alongamento e resistência também foram diferentes em função do sentido de deposição. As análises de fratura em cada sentido de deposição mostram alinhamento das descontinuidades entre camadas depositadas, alinhadas na direção da deposição, formadas por microposidades na interface entre camadas. Este

alinhamento de descontinuidades levou a redução do alongamento e resistência mecânica na direção transversal ao sentido da deposição.

A comparação com os valores requeridos para o ASME II parte B, se aplicam quando considerado a possível aplicação de partes e peças produzidas por MADA em substituição aos processos convencionais de produção tendo como base matéria prima produzida por conformação mecânica, laminação ou forjamento, e posterior usinagem para obtenção da forma final. Para estes casos as propriedades definidas no ASME II parte B podem ser utilizadas para o dimensionamento mecânico dos componentes (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Comparativo dos resultados de propriedades mecânicas (LE (limite de escoamento (MPa), LR (Limite de resistência (MPa)) e alongamento (%) nas direções transversal e longitudinal da pré-forma e barra laminada obtidas no ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Ensaio de dureza

Na Tabela 7, é apresentado os valores de dureza Vickers HV₁₀ no centro e na borda da parede em pontos equidistantes de 5 mm.

Tabela 7 - Impressões de dureza Vickers no centro da pré-forma do Inconel® 625

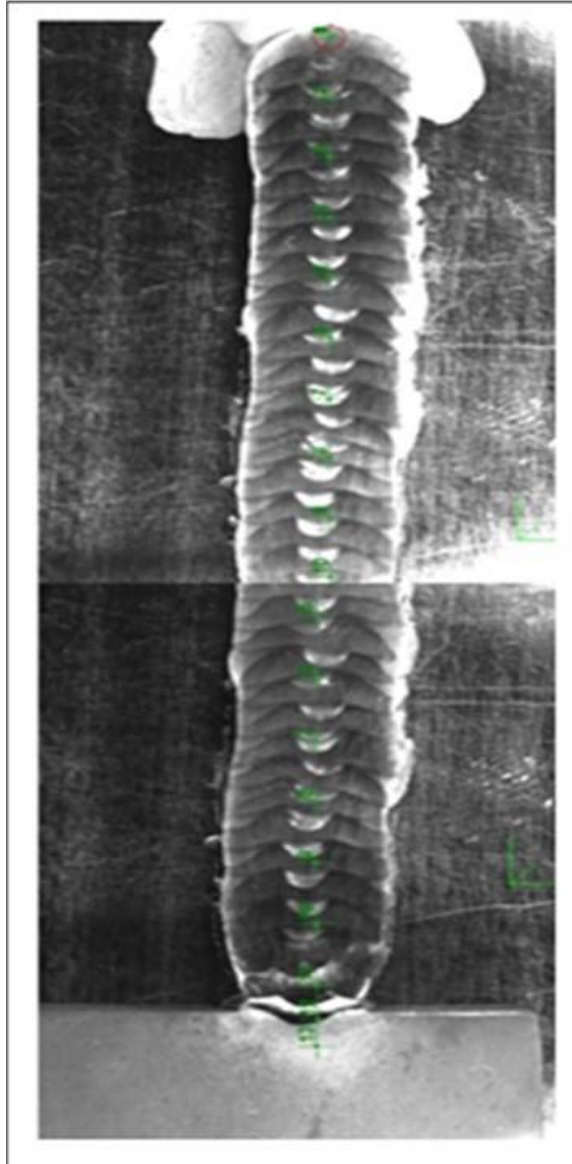
Valores de Dureza Vickers (HV10)													
Localização	Pré-forma (Inconel® 625)												Substrato
Indentações	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Dureza (Centro)	249	226	234	267	263	296	292	294	317	270	283	260	168
Dureza (Borda)	225	211	232	241	247	260	271	277	316	298	283	262	172

Fonte: Adaptado de Raposo *et al.* (2023).

Os valores de dureza da região de metal depositado, tanto centro quanto borda da pré-forma, apresentaram boa homogeneidade, demonstrando uniformidade do processo de deposição e baixa influência do processo de reaquecimento em multicamadas na dureza final.

Na Figura 16, apresenta-se a macrografia da seção transversal da pré-forma e localização das indentações realizadas para medição da dureza pelo método Vickers com carga de 10 kgf.

Figura 16 - Macrografia da seção transversal



Fonte: Raposo *et al.* (2023).

Realizado também ensaios de dureza nas amostras 2, 8 e 11 conforme Figura 7, utilizando as amostras preparadas para análises microestruturais. Nestas amostras foi realizada a medição de dureza pelo método Vickers com carga de 1 kgf. Os resultados foram compatíveis com os resultados das medições realizadas na seção transversal. Valores mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Impressões de dureza Vickers na face pré-forma do Inconel® 625, amostras conforme Figura 7

Valores de Dureza Vickers (HV1)			
Amostra	2	8	11
Dureza (HV 1)	220,1	235,9	227,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Análise estrutural

4.4.1 Macrografia

Apresentado a macrografia da seção transversal, evidenciando a sequência de deposição por soldagem a arco GMAW. Na macrografia da Figura 17, observa-se a uniformidade do processo de deposição, com ausência de trincas e descontinuidades visíveis em ampliação de 5X.

Figura 17 - Imagem da macroestrutura com evidência da disposição dos cordões depositados e da interface da barra com a pré-forma



Fonte: Adaptado de Raposo *et al.* (2023).

Na Figura 18, tem-se a macroestrutura da pré-forma de Inconel[®] 625 obtida após a deposição em camadas, referente a seção longitudinal (amostra nº 2 da Figura 7).

Figura 18 - Macrografia da seção longitudinal da pré-forma com múltiplas camadas de deposição de Inconel 625. MO: 50x



Fonte: Elaborado pelo autor.

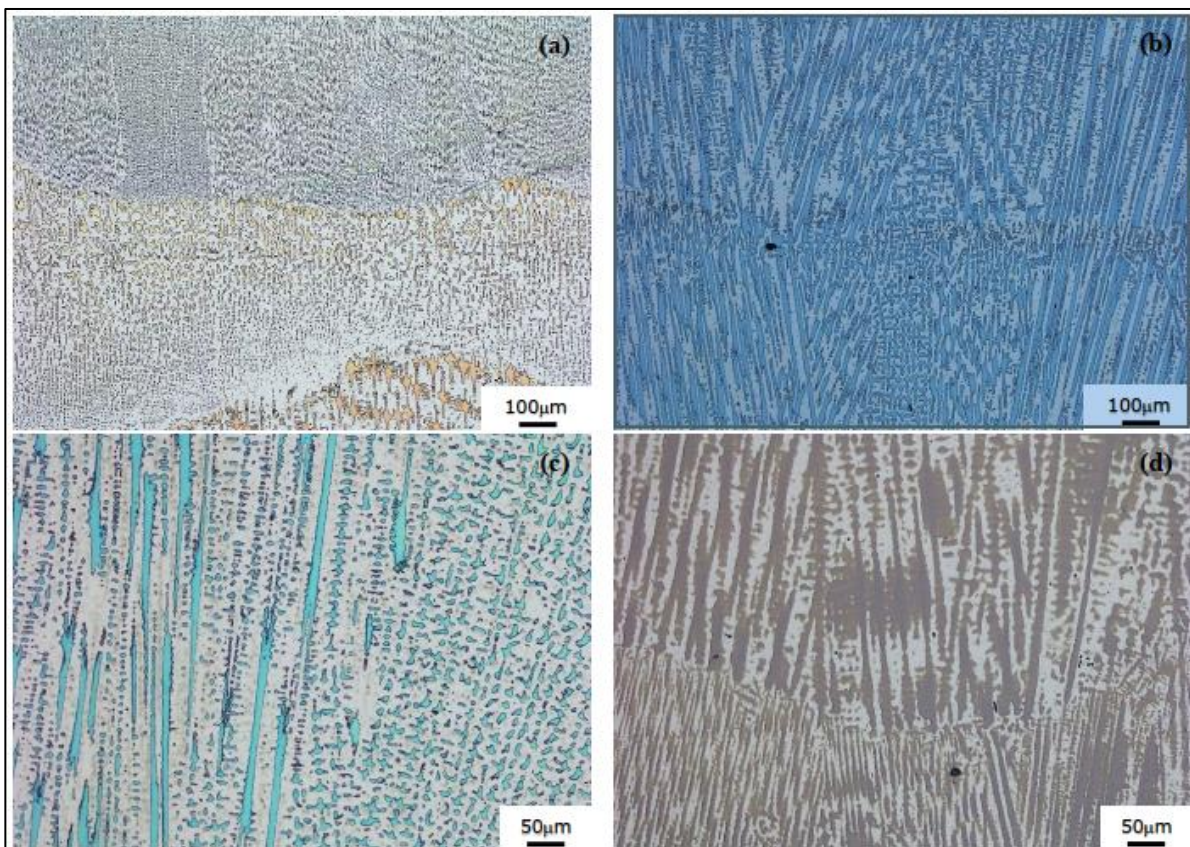
4.4.2 Micrografia

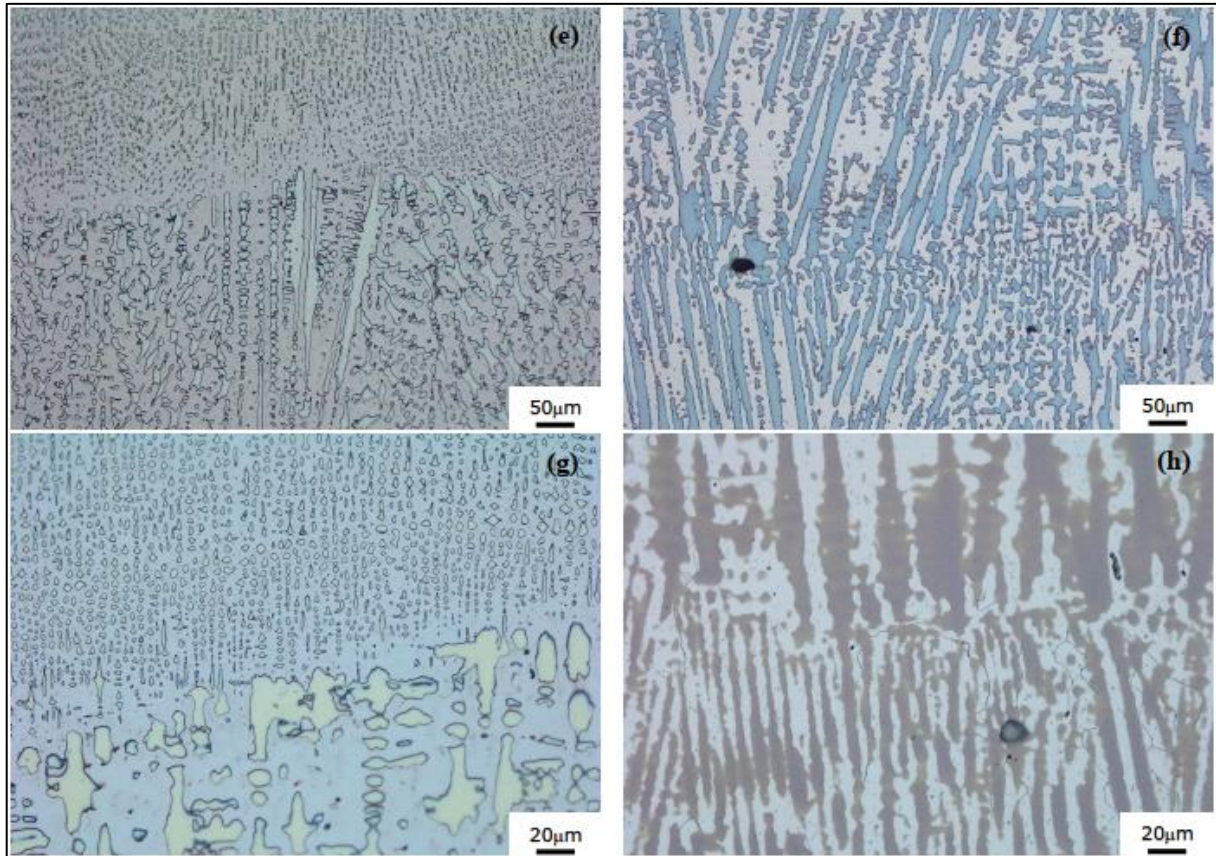
Para avaliação microestrutural do metal depositado foi avaliada as micrografias das amostras 2, 8 e 11 da Figura 7, citadas anteriormente.

O comportamento típico da deposição do metal por soldagem a arco foi observado nas seções transversal e longitudinal. Importante observar que as camadas de deposição apresentam estruturas similares entre si, regiões com morfologias refinadas indicando a refusão pela camada subsequente e regiões com morfologias alongadas possivelmente referente a Zona Termicamente Afetada pelo Calor (ZTA).

A Figura 19 revela detalhes microestruturais das fases presentes nas amostras nº 2, 11 e 8 da Figura 7, sendo observadas as seções longitudinais na região do MS. Ressalta-se que a posição das amostras 2 e 11 foram retiradas das últimas camadas depositadas enquanto a amostra 8 está em contato com o substrato.

Figura 19 - Microestrutura da pré-forma construída predominando a fase austenita com morfologias dendríticas. Seção: (a, c, e, g) amostras 2 e 11 e (b, d, f, h) da amostra 8





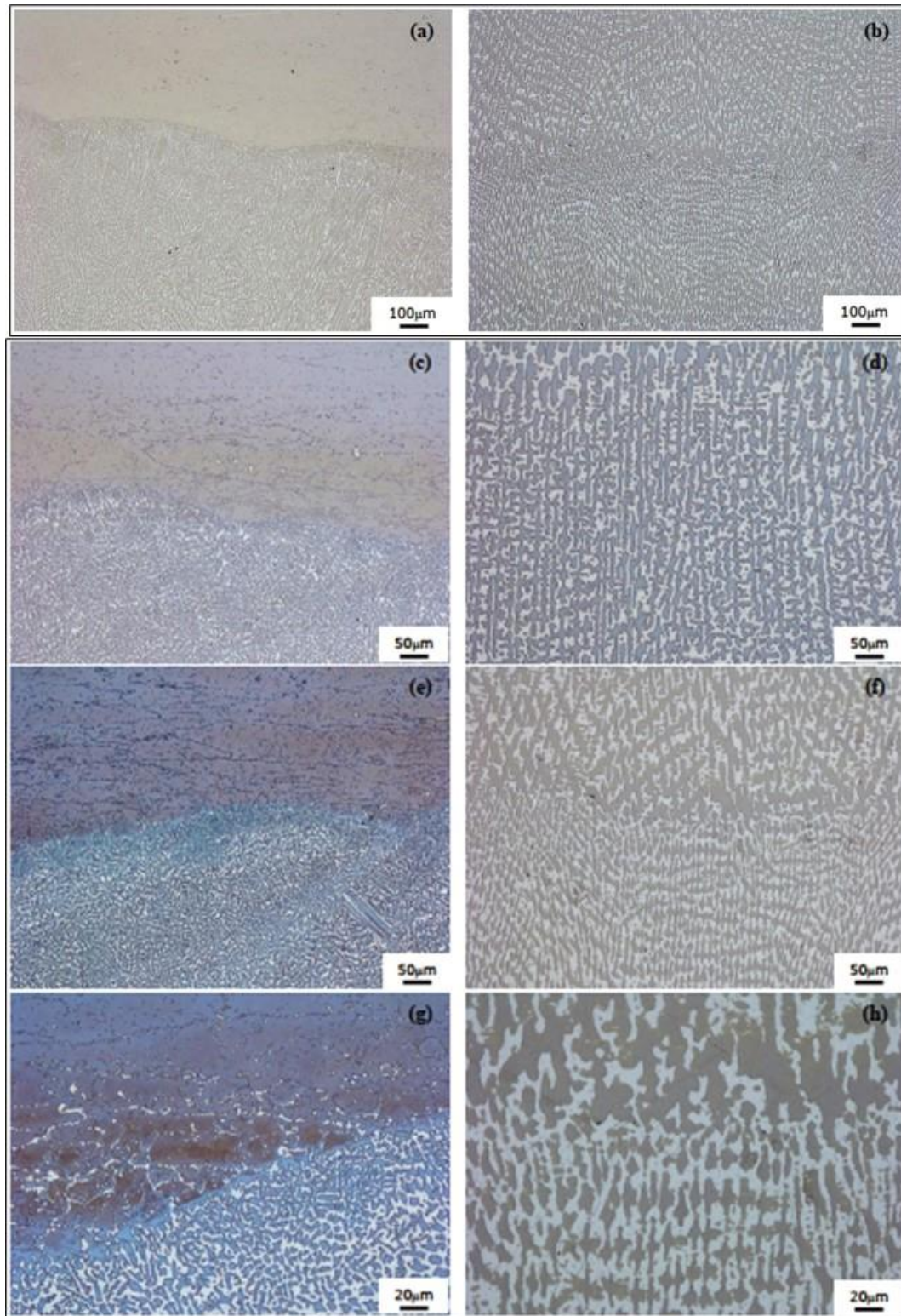
Fonte: Elaborado pelo autor.

A fase predominante é a austenita com grãos quase equiaxiais possuindo morfologia dendrítica, característica do Inconel® 625 em sua estrutura bruta de fusão, típico da soldagem. Pode-se observar ainda, morfologias alternando entre dendrítica-colunar e dendrítica-celular. As dendritas apresentam-se com cor mais clara ou colorida enquanto as regiões interdendríticas aparecem mais escurecidas.

A presença de óxidos complexos devido ao processo de soldagem é encontrada por toda a extensão das amostras analisadas e distribuídas uniformemente. Microporosidades também foram observadas nas amostras analisadas.

Na região entre o metal base (MB - substrato) e o metal de solda (MS - camadas depositadas) presente na amostra 8, ambos referentes à liga Inconel® 625, foi observado a ausência da Zona Parcialmente Difundida (ZPD) conforme mostra a Figura 20 (a, c, e, g).

Figura 20 - Microestrutura da pré-forma construída usando o arame Inconel® 625 sobre o substrato Inconel® 625, amostra 8. (a, c, e, g) região de interface substrato- camada depositada e (b, d, f, h) camada depositada próxima ao substrato



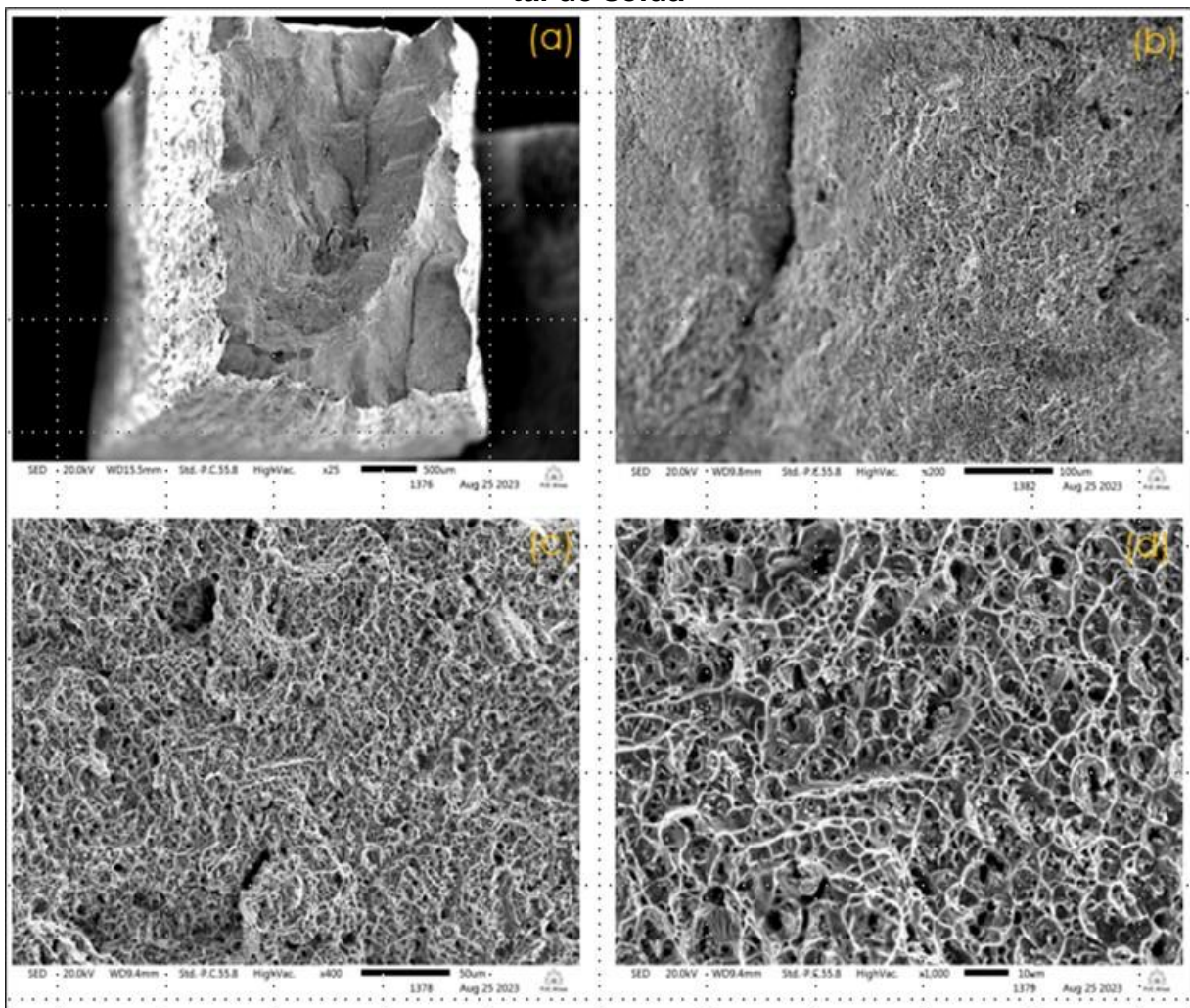
Fonte: Elaborado pelo autor.

É perceptível que a interação entre o metal de solda e o substrato ocorreu de forma difusional, não promovendo a ZPD, comumente encontrada em soldas onde a composição do substrato se difere do metal de solda (materiais dissimilares).

4.4.3 Análise de fratura

Na Figura 21, apresenta-se a macrofratura obtida por MEV do corpo de prova rompido após ensaio de tração, referente à seção transversal do metal de solda, amostra 4 (**Seção Transversal/MS**): (a) vista geral, (b) borda, (c, d) centro.

Figura 21 - Fratura após ensaio de tração, referente à seção transversal do metal de solda



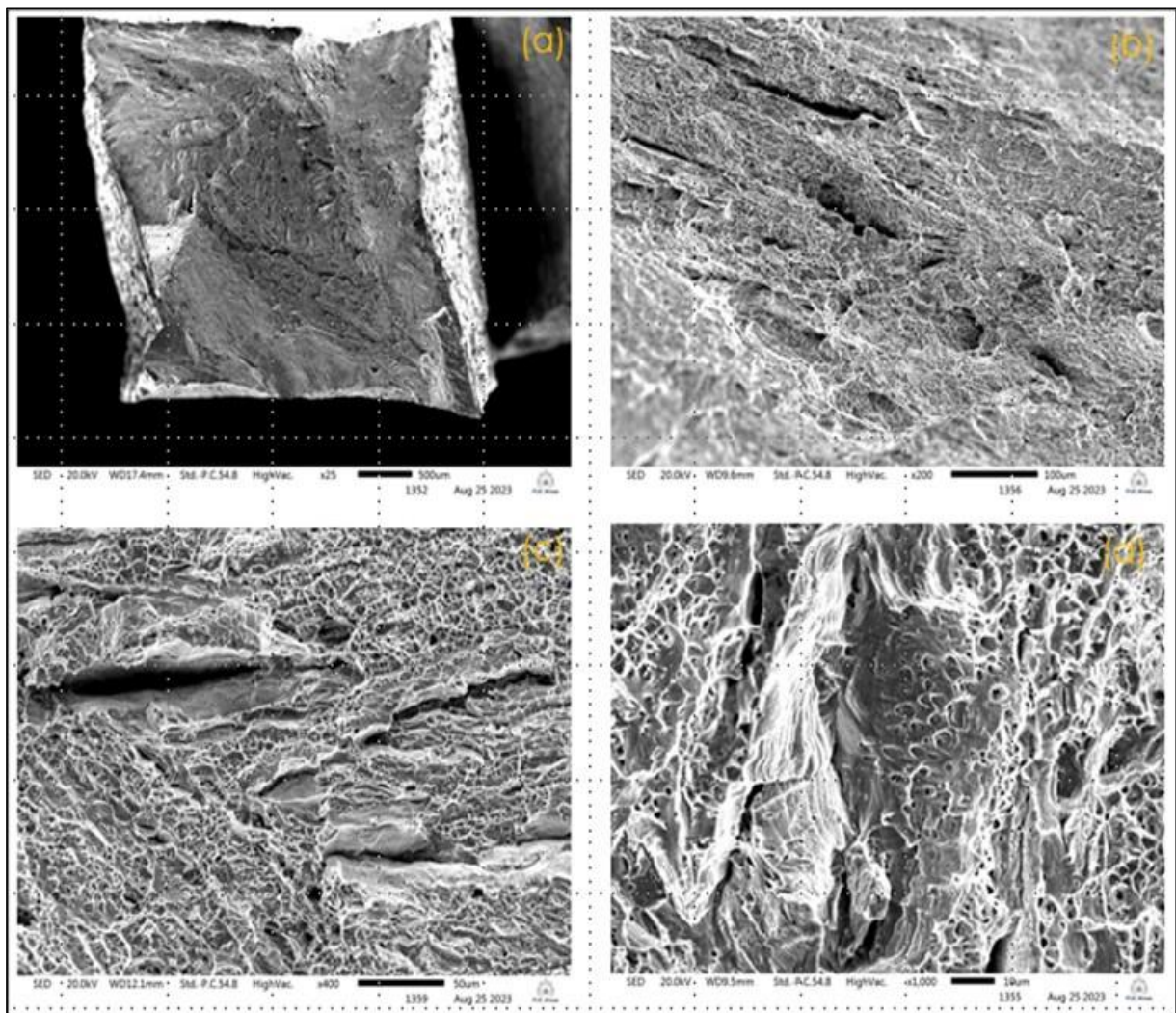
Fonte: Elaborado pelo autor.

Evidencia-se a nucleação de diferentes trincas junto à superfície que propagam em direção ao centro do corpo de prova. Pode ser que a nucleação tenha ocorrida

entre camadas de deposição. Provavelmente, nesta propagação, as trincas se juntam contribuindo para a fratura por clivagem (frágil) do corpo de prova. Na região central, tem-se a presença de “*dimples*”, típico de fratura dúctil.

Na Figura 22, apresenta-se imagem obtida por MEV do corpo de prova rompido após ensaio de tração, referente à seção longitudinal do metal de solda, amostra 7 (**Seção Longitudinal/MS**): (a) vista geral, (b) borda, (c, d) centro. Na Figura 22 (a), observa-se trinca nucleada na superfície, e, também, na região mais interna do corpo de prova. Na Figura 22 (b), pode ser observado trincas paralelas nucleadas entre as camadas depositadas que se orientaram segundo carga aplicada. Na Figura 22 (c), apresenta-se detalhe da região de trinca onde os “*dimples*” estão em menor número e cisalhados. Após esta região cisalhada, os “*dimples*” denotam fratura dúctil.

Figura 22 - Fratura após ensaio de tração, referente à seção longitudinal do metal de solda



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se concluir destas fraturas, a existência de descontinuidades alinhadas com o sentido da deposição, provocadas por porosidades e falta de fusão entre camadas que prejudicaram a ductilidade da parede.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados no estudo são promissores, porém para uma aplicação comercial da tecnologia MADA, todos os requisitos normativos devem ser atendidos, principalmente os requisitos de resistência mecânica, base para o dimensionamento de partes e peças de aplicação industrial.

Para atender integralmente os valores requeridos nas normas aplicáveis para os produtos em Inconel® 625 novos parâmetros de processo deverão ser aperfeiçoados, possibilitando desta forma o uso da tecnologia MADA como alternativa ao processo de produção e manufatura.

Os parâmetros estudados permitiram o desenvolvimento da base tecnológica e servirão como referência para o desenvolvimento da tecnologia de manufatura por MADA e serão a base para o desenvolvimento do CDT MADA, usando a estrutura do CIT SENAI.

A tecnologia MADA vem se mostrando uma alternativa viável de manufatura, principalmente para produção de peças de médio porte, condição com ampla aplicação na indústria de base, que é forte na indústria mineira, como mineração, siderurgia, óleo & gás e energia.

5.1 Trabalhos futuros

A tecnologia MADA, conforme demonstrado neste trabalho, ainda é uma tecnologia em desenvolvimento e necessita de estudos para aprofundar o domínio sobre todas as variáveis do processo. Somente após o conhecimento e controle destas variáveis será possível o uso comercial amplo da tecnologia. Por enquanto seu uso está restrito aos centros de pesquisa e instituições acadêmicas que vem se dedicando ao entendimento das potencialidades e limitações do processo.

O CIT SENAI, por meio do CDT MADA está iniciando novos estudos que visam aprofundar o domínio sobre a tecnologia MADA.

Principais áreas a ser estudadas:

- a) desenvolvimento de rede neural artificial para prever e monitorar o comportamento do cordão depositado em função das variáveis dos processos de MADA

(em andamento);

- b) investigação da suscetibilidade a trincas e monitoramento “on-line” do processo WAAM por métodos digitais (em andamento, em parceria com o Fraunhofer - Alemanha);
- c) desenvolvimento de técnicas de modelagem, fatiamento e definição de trajetórias para MADA (em andamento);
- d) desenvolvimento de metodologia e controle de processo para uso dos processos GTAW e PAW na produção MADA;
- e) desenvolvimento de aplicações industriais com a tecnologia MADA.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112-13(2021)**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. [Pensilvânia]: ASTM, 2021. Disponível em: <https://www.astm.org/e0112-13r21.html>. Acesso em: 7 fev. 2024.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Designation**: E92-17: standard test methods for vickers hardness and knoop hardness of metallic materials. [Pensilvânia]: ASTM, 2017. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/97184/2e9210f925ac4a208204d568be9f0a4a/ASTM-E92-17.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2024.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Designation**: A370-23: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. [Pensilvânia]: ASTM, 2023. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/116153/796b253d93e0490c9aacae6121197ce7/ASTM-A370-23.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto ABNT NBR ISO/ASTM 52900**: manufatura aditiva - princípios gerais - terminologia. São Paulo: ABNT, 2018.
- BELL, Alexander Graham. **Pensando bem**. [S. l.]: Portal Foco, 2019. Disponível em: <https://portalemfoco.com.br/pensando-bem-alexander-graham-bell/>. Acesso em: 7 fev. 2024.
- BRITES, Lucas; SILVA, E. M.; BRITO, T.G. Influência dos parâmetros de soldagem nas características geométricas e económicas de uma solda com arame tubular auto-protegido. *In*: CONGRESSO DE ENGENHARIAS DA UFSJ, 7., 2018, São João del Rei, **Anais** [...].São João del Rei: COEN, 2018. p. 1-12
- BOWERMAN, B. L. Statistical design and analysis of experiments with applications to engineering and science, **Technometrics**, v. 33, n. 1, p. 105-106, 1991. DOI: 10.1080/00401706.1991.10484774
- CHEN, Yuhua *et al.* Grain refinement and mechanical properties improvement of Inconel 625 alloy fabricated by ultrasonic-assisted wire and arc additive manufacturing. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 910, n. 6, p. 164-957, 2022. DOI:10.1016/j.jallcom.2022.164957
- CONG, Baoqiang; DING, Jialuo; WILLIAMS, Stewart. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 9–12, p.1593-1606, 2015.
- DAHAT, Shubham *et al.* A methodology to parameterize wire + arc additive manufacturing: a case study for wall quality analysis. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 4, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp4010014>

DEBROY, Tarasankar *et al.* Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, v. 92, n. 5, p. 112-224, March, 2018. DOI:10.1016/j.pmatsci.2017.10.001

DING, Donghong *et al.* Process planning strategy for wire and ARC additive manufacturing. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v. 363, p. 437-450, 2015.

DUPONT, John N.; LIPPOLD, John C.; KISER, Samuel D. **Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

EISELSTEIN, H. L.; TILLACK, D. J. **The Invention and definition of alloy 625**. Huntington: Edited by Edward A. Lmia, 2012.

FAYAZFAR, Haniyeh *et al.* A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties. **Materials & Design**, v. 144, p. 98-128, 15 abr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.018>

FLOREEN, Stephen; FUCHS, Gerhard E.; YANG, Walter J. **The metallurgy of alloy 625**. New York: Edited by E.A. 1994,

LASS, Eric A. *et al.* Formation of the Ni₃Nb δ -Phase in Stress-Relieved Inconel 625 Produced via Laser Powder-Bed Fusion Additive Manufacturing. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 48, n. 11, 2017. DOI:10.1007/s11661-017-4304-6

LI, Shuai *et al.* Microstructure Characteristics of Inconel 625 Superalloy Manufactured by Selective Laser Melting. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 31, n. 9, p. 946-952, Sep. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.09.020>.

LIN, Jianjun *et al.* Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 69, p. 19-29, May, 2017.

LINCOLN ELECTRIC. [S. l.]: Do Autor, 19 set. 2021. Disponível em: Downloads/STT%20-%20Catálogo.pdf. Acesso em: 14 fev. 2024.

LINCOLN ELECTRIC. **Process: Surface Tension Transfer (STT) 4/Surface Tension Transfer® (STT®)**. [S. l.]: Do Autor, 2023. Disponível em: Downloads/STT%20-%20Lincoln%20Electric%20(1).pdf. Acesso em: 14 fev. 2024.

MALEKI, Erfan *et al.* Surface post-treatments for metal additive manufacturing: progress, challenges, and opportunities. **Additive Manufacturing**, v. 37, p. 101619, Jan. 2021.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 2. ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2007.

MISHRA, Rajnish *et al.* Thermo-mechanical modelling of the wire arc based additively manufactured Inconel 625 superalloy. **Materials Today: Proceedings**, Aug. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.08.142

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2016.

MU, Yiqiang *et al.* Effect of Nb on δ phase precipitation and the tensile properties in cast alloy IN625. **Metals**, v. 8, n. 2, P. 86, 2018. DOI:10.3390/met8020086

MURR, Lawrence *et al.* Microstructural architecture, microstructures, and mechanical properties for a nickel-base superalloy fabricated by electron beam melting. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 42, n. 11, p. 3491-3508, 2011. DOI:10.1007/s11661-011-0748-2

MURRAY, L. *et al.* Statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and science. **Journal of the American Statistical Association**, v. 85, n. 412, 1990.

MUSFIRAH, A. H.; GHANI, J. A.; HARON, C. H. C. Tool wear and surface integrity of inconel 718 in dry and cryogenic coolant at high cutting speed. **Wear**, v. 376-377, Part A, p. 125-133, April. 2017.

NILSIAM, Yuenyong; SANDERS, Paul G.; PEARCE, Joshua M. Applications of open source gmaw-based metal 3-d printing. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 2, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp2010018>

OSMOND, Luke; CURTIS, David; SLATTER, Tom. Chip formation and wear mechanisms of SiAlON and whisker-reinforced ceramics when turning Inconel 718. **Wear**, v. 486-487, p. 204128, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204128>.

PAN, Z. *et al.* Transactions on Intelligent Welding Manufacturing. *In*: CHEN, Shanben; ZHANG, Yuming; FENG, Zhili (ed.). **Transactions on Intelligent Welding Manufacturing**. New York: Springer, 2018, v. 1.

PICKIN, Craig G.; WILLIAMS, S. W.; LUNT, M. Characterization of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. **J Mater Process Technol**, v. 211, p. 496-502, 2011.

PICKIN, Craig; YOUNG, K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 11, n. 5, p. 583-585, Sep. 2006. DOI:10.1179/174329306X120886

PRIARONE, Paolo Claudio *et al.* A modelling framework for comparing the environmental and economic performance of WAAM-based integrated manufacturing and machining. **CIRP Annals**, v. 68, n. 1, 2019. DOI:10.1016/j.cirp.2019.04.005.

PUPPALA, Ganesh *et al.* Evaluation of fracture toughness and impact toughness of laser rapid manufactured Inconel-625 structures and their co-relation. **Materials and Design**, v. 59, p. 509-515, July 2014.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.013>

RAJPUT, Gautam Singh *et al.* Effect of deposition strategies on mechanical strength of wire arc additively manufactured Inconel 625. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, n. P13, p. 7324–7328, Jan. 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.164>.

RAPOSO, Filipe Dias *et al.* Estudo da caracterização com avaliação de propriedades mecânicas do INCONEL® 625 em manufatura aditiva por deposição a Arco. *In: CONGRESSO DO INSTITUTO POLITÉCNICO DA PUC MINAS*, 5., 2022, Belo Horizonte; ANDRADE, Laura Hamdan de (coord.). **Anais [..]**. Belo Horizonte, MG: PUC Minas, 2023. *E-book*. Disponível em: <http://bib.pucminas.br:8080/pergamumweb/vinculos/00001c/00001cb0.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2023.

RESENDE, André Alves de *et al.* Influence of welding current in plasma-MIG weld process on the bead weld geometry and wire fusion rate. **Welding International**, v. 25, n. 12, p. 910-916, 2011. DOI:10.1080/09507116.2010.527481

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo: Artliber Editora, 2014. Disponível em: https://www.artliber.com.br/amostra/soldagem_mig_mag.pdf. Acesso em: 27 abr. 2023.

SHANKAR, Vani; BHANU SANKARA RAO, K.; MANNAN, S. L. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. **Journal of Nuclear Materials**, v. 288, n. 2-3, 2001. DOI:10.1016/S0022-3115(00)00723-6.

SHASSERE, Benjamin *et al.* Correlation of microstructure and mechanical properties of Metal Big Area Additive Manufacturing. **Applied Sciences**, v. 9, n. 4, p. 787, Fev. 2019. DOI:10.3390/app9040787

SINGH, Sudhanshu Ranjan; KHANNA, Pradeep. Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, n. 5-8, Sep. 2021. DOI:10.1016/j.matpr.2020.08.030

SILVA, Wemerson Felipe da *et al.* **Evaluation of the properties of Inconel® 625 preforms manufactured using WAAM technology**. [2024]. No prelo.

SOLDAGEM mig mag. Tradução de Cleber Fortes. [Juiz de Fora.]: UFJF, 2005. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/profab/files/2016/09/ESAB-Apostila-MIG-MAG.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2023.

SVETLIZKY, David *et al.* Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. **Materials Today**, v. 49, p. 271-295, 2021.

TABERNERO, Ivánt *et al.* Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 68, p. 358-362, 2018.

TANVIR, A. *et al.* Heat treatment effects on Inconel 625 components fabricated by wire + arc additive manufacturing (WAAM)-part 1: microstructural characterization. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2019.
DOI:10.1007/S00170-019-03828-6

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Part B**: Nonferrous Material Specifications. [S. l.]: ASME, 2023a.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Part C**: Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals. [S. l.]: ASME, 2023b. [Specification for nickel and nickel-alloy bare welding electrodes and rods - sfa-5.14/sfa-5.14m]

THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY. **True energy™**: Instantaneous energy values for the weld. [S. l.]: Do Autor, 2023. Disponível em: Downloads/Instantaneous%20Energy%20-%20Lincoln%20Electric%20(1).pdf. Acesso em: 27 abr. 2023.

VENTURINI, Giuseppe *et al.* Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features. *Procedia CIRP*, v. 55, p. 95-100, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.043>

WANG, J. F. *et al.* Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding. **Materials Science and Engineering: A**, v. 676, P. 395-405, Oct. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.015>

WELDING Handbook. Welding processes. Washington: American Welding Society, 1991. v. 2.

WILLIAMS, S. W. *et al.* Wire + Arc Additive Manufacturing Wire þ Arc additive manufacturing. **Materials Science and Technology**, v. 32, n. 7, 2016.

WU, Bintao *et al.* A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 35, p. 127-139, Oct. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>

XIONG, Jun *et al.* Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 240, n. 12, 2017. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2016.10.019

XU, Fujia *et al.* Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of inconel 625 alloy fabricated by pulsed plasma arc deposition. **Physics Procedia**, v. 50, P. 48-54, 2013. DOI:10.1016/j.phpro.2013.11.010

YENI, C.; KOÇAK, M. Fracture analysis of laser beam welded superalloys Inconel 718 and 625 using the FITNET procedure. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 85, n. 8, p. 532-539, 2008.

YILMAZ, Oguzhan; UGLA, Adnan A. Microstructure characterization of SS308LSi components manufactured by GTAW-based additive manufacturing: shaped metal deposition using pulsed current arc. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, n. 1-4, p. 13-25, 2017.

ZHANG, Chengxun *et al.* On the effect of heat input and interpass temperature on the performance of inconel 625 alloy deposited using wire arc additive manufacturing–cold metal transfer process. **Metals**, v. 12, n. 1, 1 jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12010046>

ZIEDAS, Selma; TATINI, Ivanisa. **Soldagem**: coleção tecnologia. São Paulo: SENAI, 1997.

ZINKLE, S. J.; WAS, G. S. Materials challenges in nuclear energy. **Acta Materialia**, v. 61, n. 3, p. 735-758, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.004>.