

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

ANELISE LANDO

**AVALIAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS CONSTRUÍDAS PELO PROCESSO DE
MANUFATURA ADITIVA POR ARCO ELÉTRICO**

FLORIANÓPOLIS, 2024.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

ANELISE LANDO

**AVALIAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS CONSTRUÍDAS PELO PROCESSO DE
MANUFATURA ADITIVA POR ARCO ELÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Mecatrônica.

Orientador:
Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr.Eng.

Coorientador:
Prof. Erwin Werner Teichmann, Dr.Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2024.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Lando, Anelise

AVALIAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS CONSTRUÍDAS PELO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR ARCO ELÉTRICO / Anelise Lando; orientação de Nelso Bonacorso; coorientação de Erwin Teichmann. - Florianópolis, SC, 2024.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. Inclui Referências.

1. GMAW. 2. Ensaio de tração. 3. Descontinuidades em WAAM. 4. Trajetória de soldagem. 5. Manufatura robotizada. I. Bonacorso, Nelso. II. Teichmann, Erwin. III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. AVALIAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS CONSTRUÍDAS PELO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR ARCO ELÉTRICO.

AVALIAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS CONSTRUÍDAS PELO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR ARCO ELÉTRICO

ANELISE LANDO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 18 de setembro, 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ERWIN WERNER TEICHMANN**
Data: 19/09/2024 04:02:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Nelso Gauze Bonacorso, Prof.Dr.Eng.

Documento assinado digitalmente
 **NELSO GAUZE BONACORSO**
Data: 18/09/2024 12:32:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Erwin Werner Teichmann, Prof.Dr.Eng

Documento assinado digitalmente
 **HENRIQUE CEZAR PAVANATI**
Data: 19/09/2024 18:48:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Henrique Cezar Pavanati, Prof.Dr.Eng.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ernesto Antônio Lando e Izidora Justina Bizotto Lando, e aos meus irmãos, Gabriel Lando e Felipe Lando, que estiveram sempre ao meu lado, me ajudando, incentivando a continuar, acreditando em mim e dando todo o suporte necessário desde que saí de casa para realizar o sonho de me tornar engenheira. Vocês são meu alicerce. Muito obrigada.

Ao meu grande amor e parceiro de vida, Davi Grazziotin, que esteve ao meu lado durante todo o desenvolvimento deste trabalho, me motivando, dando apoio, conselhos, segurando as pontas em casa e escutando minhas lamentações. Muito obrigada, Davi, por toda a paciência que você tem comigo diariamente, por deixar meus dias mais leves e por ser meu porto seguro. Sou muito grata por compartilhar a vida contigo.

Ao meu amigo, Gustavo Aguiar, por todos os cafés da manhã e jantares que preparou para mim, quando a rotina corrida não permitia que eu cuidasse da minha alimentação. Se tive força para realizar este trabalho, é graças a você. Muito obrigada.

Aos meus amigos: Bárbara, Cássio, Felipe, Fernanda Adami, Fernanda Landim, Henrique, Iasmin, João Marcos, Leila Sayuri, Luiz, Matheus, Paula, Shamara e William. Por todos esses anos de amizade, por todos os momentos bons e ruins que passamos juntos, por todo apoio que me deram, de longe ou de perto. Muito obrigada. É uma honra crescer ao lado de vocês.

Ao meu orientador, Nelso G. Bonacorso e ao meu coorientador, Erwin W. Teichmann. Por toda a ajuda, paciência, sugestões e orientação. Suas contribuições foram essenciais não apenas para o desenvolvimento deste trabalho, mas também para meu crescimento pessoal e acadêmico. Muito obrigada, vocês são verdadeiras inspirações para mim, por toda a dedicação, conhecimento e excelência profissional.

A todos que ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, em especial ao Guillen Etchemendy e Téo Boutillier, pelo trabalho incrível e toda a contribuição que forneceram ao projeto. Ao Charles, técnico do laboratório do IFSC, que me ajudou e instruiu a utilizar as máquinas. Ao Eduardo Linck, por todo o auxílio com o torno CNC. Ao Henrique Pavanati, pela paciência ao me ensinar a utilizar os equipamentos do laboratório de materiais e por estar sempre disposto a tirar minhas dúvidas. À Jordana Aguiar, pela ajuda nas análises, pelo bom humor, positividade e sorriso contagiante de sempre. Muito obrigada.

À Luiza Bacchi, minha psicóloga, por todos esses anos de acompanhamento. Sua orientação foi fundamental para manter meu equilíbrio emocional durante todo esse período. Obrigada.

Por fim, a todo o corpo docente do IFSC, por colaborarem para um ensino gratuito e de qualidade. Obrigada.

"E eu que me atirava do abismo num pulo,
comecei a considerar o chão."
- Bola.

RESUMO

O processo de fabricação Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), conhecido como Manufatura Aditiva por Arco Elétrico, tem evoluído e ganhado mais visibilidade nos últimos anos devido às respectivas pesquisas que aumentam o potencial de produção de peças simples e complexas de diferentes metais e dimensões. Apesar da maior poça de fusão, que produz calor excessivo e também desvios geométricos das peças metálicas manufaturada, o processo de soldagem Gas Metal Arc Welding (GMAW) é muito usado tanto para a fabricação de peças por união de seus componentes, quanto para a recuperação de peças via o revestimento metálico de suas superfícies. Além disso, o GMAW tem sido cada vez mais aplicado na WAAM pela simplicidade operacional dos seus equipamentos e também pelo menor custo de aquisição. As peças metálicas produzidas pelo processo de fabricação WAAM são inicialmente concebidas em 3D, usando software CAD (Computer Aided Design). Na sequência as peças são fatiadas em camadas horizontais e transmitidas ao programa de controle para a geração das trajetórias da tocha de solda. Posteriormente as peças são construídas por deposição de metal em camadas de solda robotizada ou com tochas adaptadas em máquinas CNC (Computer Numeric Control). Com o aumento das pesquisas aplicadas em WAAM, nota-se que uma etapa importante após o processo de fabricação, é o de garantir a qualidade da peça fabricada antes da sua utilização. Tendo isso em vista, este trabalho consistiu em avaliar a qualidade de peças produzidas por WAAM em célula robotizada de soldagem GMAW. Para isso, foi usado parâmetros de soldagem e de movimento de uma peça fabricada anteriormente. Foram produzidas peças em aço carbono com o arame de solda ER-70S6 de bitola 1,0 mm, medindo: 25 mm de altura, 65 mm de largura e 110 mm de comprimento. Na sequência, as peças foram cortadas e polidas para fins da análise estrutural das descontinuidades e das microestruturas geradas. Dessas peças, foram também extraídos corpos de prova por usinagem para ensaios de tração. As análises metalográficas mostraram inclusões de silicatos e diferença no tamanho dos grãos em diferentes partes da peça, o que pode interferir na qualidade da mesma. Os ensaios de tração realizados nos corpos de prova indicaram que as peças produzidas pelo processo WAAM apresentaram uma resistência à tração de $(481,7 \pm 18,7)$ MPa, valor compatível com aços 1020. Com a avaliação das peças metálicas construídas pelo processo de WAAM, conclui-se que é possível fabricar peças com qualidade competitiva e com potencial para aplicações industriais, mesmo em uma célula de soldagem convencional. Apesar dos desafios estruturais encontrados, existe a possibilidade de tentar minimizar as inclusões e uniformizar o tamanho dos grãos com técnicas resfriamento.

Palavras-chave: GMAW. Análise metalográfica. Descontinuidades em WAAM. Ensaio de tração. Manufatura robotizada. Trajetória de soldagem.

ABSTRACT

The Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process, also known as Additive Manufacturing by Electric Arc, has evolved and gained more visibility in recent years due to respective research that increases the potential for producing simple and complex parts made of different metals and dimensions. Despite the larger weld pool, which produces excessive heat and also geometric deviations in the manufactured metal parts, the Gas Metal Arc Welding (GMAW) process is widely used both for manufacturing parts by joining their components and for repairing parts by metal coating their surfaces. Furthermore, GMAW has been increasingly applied in WAAM due to the operational simplicity of its equipment and its lower acquisition cost. Metal parts produced by the WAAM manufacturing process are initially designed in 3D using CAD (Computer Aided Design) software. The parts are then sliced into horizontal layers and transferred to the control program for generating the welding torch trajectories. Subsequently, the parts are built by depositing metal in layers through robotic welding or with torches adapted to CNC (Computer Numeric Control) machines. With the increase in applied research in WAAM, it is noted that an important step after the manufacturing process is to ensure the quality of the fabricated part before its use. With this in mind, this work aimed to evaluate the quality of parts produced by WAAM in a GMAW robotic welding cell. For this purpose, welding and motion parameters of a previously manufactured part were used. Carbon steel parts were produced with ER-70S6 welding wire of 1.0 mm diameter, measuring 25 mm in height, 65 mm in width, and 110 mm in length. Subsequently, the parts were cut and polished for structural analysis of discontinuities and the generated microstructures. From these parts, specimens were also extracted by machining for tensile testing. Metallographic analysis showed silicate inclusions and differences in grain size in different parts of the piece, which may affect its quality. Tensile tests performed on the specimens indicated that the parts produced by the WAAM process exhibited a tensile strength of (481.7 ± 18.7) MPa, a value compatible with 1020 steels. With the evaluation of metal parts built by the WAAM process, it is concluded that it is possible to manufacture parts with competitive quality and potential for industrial applications, even in a conventional welding cell. Despite the structural challenges encountered, there is the possibility of attempting to minimize inclusions and standardize grain size with cooling techniques.

Keywords: GMAW. Metallographic analysis. Discontinuities in WAAM. Tensile testing. Robotic manufacturing. Welding path.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de peças produzidas pelo processo WAAM.	15
Figura 2 – Diagrama simplificado de uma estação de WAAM.	17
Figura 3 – Diagrama simplificado do processo WAAM.	19
Figura 4 – Equipe multidisciplinar.	20
Figura 5 – Fluxograma do processo WAAM.	22
Figura 6 – Projeto e execução de uma peça em CAD.	23
Figura 7 – Transferência de metal por curto circuito.	24
Figura 8 – DBCP e TCP da tocha.	25
Figura 9 – Estratégias de Deposição dos cordões de solda.	25
Figura 10 – Processo Completo de Fabricação de uma Peça por WAAM.	26
Figura 11 – Curva de tensão versus deformação.	27
Figura 12 – Micrografias Comparativas.	29
Figura 13 – Limite de resistência à tração das pré-formas fabricadas.	30
Figura 14 – Dimensões do corpo de prova em milímetro.	31
Figura 15 – Corpos de prova e modelo CAD da peça.	32
Figura 16 – Interface do software WeldPro.	33
Figura 17 – Diagrama da estratégia de deposição híbrida, onde IC é o início do cordão e FC o final.	34
Figura 18 – Configuração da área de trabalho.	35
Figura 19 – Peça fabricada por alunos do IFSC.	36
Figura 20 – Comparação de blocos produzidos com diferentes parâmetros e soldagem.	37
Figura 21 – Processo WAAM.	38
Figura 22 – Posicionamento da peça finalizada no substrato.	38
Figura 23 – Processo de eletroerosão.	39
Figura 24 – Serra fita.	39
Figura 25 – Resultado da fabricação da segunda peça.	40
Figura 26 – Corte na serra fita.	40
Figura 27 – Torno mecânico.	41
Figura 28 – Resultado da usinagem mecânica.	41
Figura 29 – Interface do SprutCam.	42
Figura 30 – Peças finalizadas.	42
Figura 31 – Seção escolhida para análise metalográfica.	43
Figura 32 – Lixadeira rotativa Struers DP9a.	43
Figura 33 – Processo de lixamento com a respectiva granulação da lixa.	44
Figura 34 – Politriz rotativa Struers AP 10.	44
Figura 35 – Peça polida.	45

Figura 36 – Peça após a fase de ataque químico.	45
Figura 37 – Microscópio DM4000 M LED.	46
Figura 38 – Amostras.	47
Figura 39 – Resultados observados nas macrografias.	48
Figura 40 – Regiões analisadas - micrografia.	49
Figura 41 – Transição entre cordões.	50
Figura 42 – Regiões analisadas - tamanho de grão.	51
Figura 43 – Aplicação da intersecção de Abrams em uma das seções analisadas.	51
Figura 44 – Tamanho de grão ASTM.	52
Figura 45 – Exemplo de histograma gerado para uma das seções analisadas.	52
Figura 46 – Resultado da análise de tamanho de grão.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das propriedades mecânicas para a Liga AWS ER5356.	30
Tabela 2 – Resultados do Ensaio de Tração dos Corpos de Prova.	54
Tabela 3 – Resistência Máxima e Tensão de Escoamento - Média e Desvio Padrão.	54
Tabela 4 – Comparação das propriedades mecânicas entre os aços AISI 1010, 1020, 1030 e 1045 e o arame de solda AWS ER70-S6.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Desenho Assistido por Computador
CNC	Computer Numeric Control
DBCP	Distância Bico de Contato Peça
GMAW	Soldagem a Arco Metálico com Gás
IES	Instituições de Ensino
J/mm	Joule por milímetro
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
TCP	Tool Center Point
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Definição do Problema	16
1.3	Objetivo Geral	17
1.4	Objetivos Específicos	17
1.5	Estrutura do Trabalho	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Processo de Manufatura	19
2.1.1	Planejamento e Design CAD	20
2.1.2	Preparação e Manufatura	20
2.1.3	Pós-Fabricação	21
2.1.4	Inspeção Final	21
2.2	Descrição das Tecnologias Utilizadas	22
2.2.1	Design CAD	22
2.2.2	Soldagem GMAW por Curto Circuito	23
2.2.3	Soldagem Robotizada e Parametrização da Trajetória da Tocha	24
2.2.4	Usinagem CNC	26
2.2.5	Qualidade da Peça	26
2.2.5.1	<i>Ensaio de Tração</i>	27
2.2.5.2	<i>Análise Metalográfica</i>	27
2.2.5.3	<i>Resultados Obtidos por Outros Pesquisadores</i>	28
3	METODOLOGIA	31
3.1	Definição das Dimensões da Peça e Modelo CAD	31
3.2	Método de Deposição	33
3.3	Equipamentos Utilizados	34
3.4	Parâmetros de Soldagem	35
3.5	Fabricação da Peça por WAAM	37
3.6	Corte e Usinagem dos Corpos de Prova	40
3.7	Análise Metalográfica	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	Análise Metalográfica	47
4.1.1	Macrografia	47
4.1.2	Micrografia	48
4.1.2.1	<i>Micrografia Entre Cordões</i>	49
4.1.3	Contagem de Grãos	50
4.2	Ensaio de Tração	53
4.2.1	Comparação com Outros Aços Carbono e Arame de Solda	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	56
	REFERÊNCIAS	58
	ANEXOS	61
	ANEXO A – ANÁLISE MICROGRÁFICA COM AUMENTO 200X E 500X	62

ANEXO B – RESULTADOS ENSAIO DE TRAÇÃO	64
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

A soldagem, definida pela união de materiais metálicos com a continuidade das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas, é uma prática comum desde os tempos antigos, atestada pelos artefatos de mais de 4000 anos descobertos, o que mostra que naquela época já eram usadas técnicas como a brasagem e a forja para esse objetivo (NERIS, 2012). Com o passar dos séculos, as técnicas foram avançando e o desenvolvimento da soldagem que conhecemos hoje se deu pela invenção do arco elétrico e a síntese do gás acetileno, o que motivou novos métodos de fabricação durante o século passado. Neris (2012) também destaca que as duas grandes guerras mundiais foram períodos de intensa inovação nesse setor por conta da alta adoção de técnicas de soldagem para a produção em massa de armamento e veículos. Essa alta demanda resultou em muito estudo e inovação, que refletiu na atualidade, onde já existem mais de 70 processos de soldagem empregados mundialmente, o que mostra a constante evolução e adaptação da técnica para atender às necessidades de produção industrial.

Outra invenção que revolucionou a soldagem foram os robôs, mais especificamente os braços robóticos. A história e a evolução dos braços robóticos na indústria de soldagem mostram uma trajetória significativa de avanço tecnológico e inovação, como mostra (WALLÉN, 2008). De acordo com seu relatório, *The history of the industrial robot*, os robôs industriais eram inicialmente utilizados para tarefas simples que não requeriam sensores externos, como tarefas de *pick and place*. No entanto, com a incorporação de sensores externos e a capacidade de realizar movimentos mais complexos, começaram a ser usados em aplicações mais desafiadoras. A introdução de robôs marcou uma mudança significativa, particularmente no setor de soldagem, substituindo o trabalho repetitivo, cansativo e insalubre dos soldadores. Os robôs começaram a ser usados para realizar soldagens consistentes e precisas, o que era particularmente útil em ambientes de produção que exigiam repetibilidade, produção e qualidade superiores. A eficiência da produção e a qualidade do produto melhoraram significativamente como resultado dessa capacidade dos robôs de executar soldas complicadas e repetitivas.

Na década de 1980, surgiu a manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D. Ela começou com prototipagem rápida e agora se aplica a componentes funcionais em setores como aeroespacial, automotivo e médico. Esta tecnologia permite a criação de objetos complexos camada por camada a partir de modelos digitais, o que significa mais liberdade de design, menos tempo de produção e menos custos. A manufatura aditiva tem evoluído para utilizar uma variedade de materiais e melhores técnicas de produção, a fim de atender às demandas de qualidade e eficiência do mercado contemporâneo (ARAÚJO, 2021).

Com a introdução da soldagem na manufatura aditiva, surgiu a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), também conhecida como WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). É um processo que permite ao usuário definir a composição metalúrgica dos materiais, tornando-a altamente adaptável às necessidades específicas de cada aplicação. Como citado por (SINGH, 2020), o WAAM tem se destacado na comunidade científica e industrial, visto que oferece benefícios como altas taxas de deposição, eficiência de material, menor tempo de produção e redução de custos. Diferente de outros processos de Manufatura Aditiva, como a Impressão 3D e a Sinterização Seletiva a Laser, o WAAM segue um princípio semelhante ao da soldagem por arco, depositando camada por camada e utilizando um arco elétrico como fonte de calor. De acordo com (CHANDRASEKARAN, 2021), a inovação na manufatura aditiva reside no controle da alimentação de material e do caminho de impressão, onde o processo de fabricação é guiado por um modelo digital. O que permite a fabricação de componentes de tamanhos maiores e de qualquer forma geométrica, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Exemplos de peças produzidas pelo processo WAAM.



Fonte: (FRONIUS, 2024)

Diante do exposto, o presente trabalho descreve a produção de peças com geometria definida por WAAM, utilizando uma célula de soldagem convencional, com o propósito de na sequência analisá-las sobre dois pontos de vista. O primeiro é do ponto de vista estrutural considerando as microestruturas, enquanto que o segundo é do ponto de vista da resistência mecânica via ensaios de tração.

1.1 Justificativa

Na indústria, os métodos convencionais de fabricação de peças metálicas, como extrusão, fundição e usinagem, apesar de serem amplamente utilizados, como citado por (HIGH SOLUTIONS, 2018), apresentam desvantagens que podem impactar a eficiência, custos e flexibilidade na produção. Conforme descrito por (ALBUQUER-

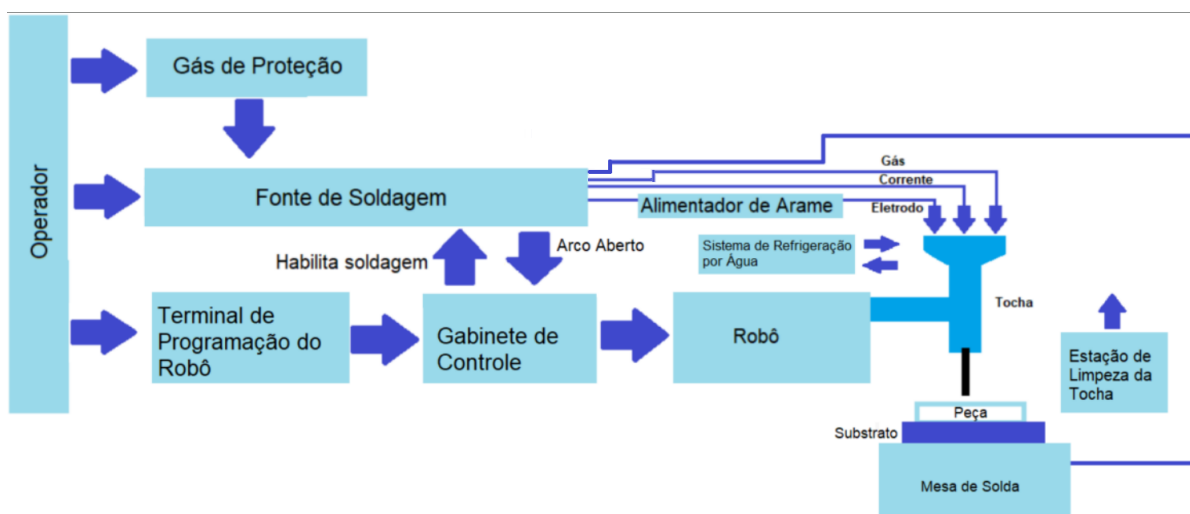
QUE, 2017), algumas das principais desvantagens desses métodos é o custo elevado, muitas vezes relacionada ao desperdício de material. Como acontece no método de usinagem, durante o processo de remoção do material ou no método de fundição, onde é necessário criar moldes específicos, há uma quantidade significativa de material que pode ser perdida.

Além disso, existem limitações na complexidade geométrica das peças que conseguem produzir, formas mais intrincadas podem ser desafiadoras ou impossíveis de serem alcançadas com métodos tradicionais, levando a um tempo de produção prolongado. Tendo isso em vista, a WAAM mostra-se promissora para a indústria, substituindo as abordagens tradicionais a fim de minimizar o consumo de material, com suas taxas de deposição elevadas, eficiência de material, redução do tempo de produção, aprimoramento do desempenho de componentes e diminuição dos custos (YU, 2022).

Assim, a avaliação de componentes metálicos produzidos por processos de manufatura aditiva por arco elétrico é essencial devido ao crescente interesse e adoção dessa tecnologia no setor. Este estudo é de grande importância para as Instituições de Ensino Superior (IES) em tecnologia, pois contribuem para o desenvolvimento acadêmico e científico em uma área tecnológica inovadora e fornece informações essenciais para orientar futuros projetos de pesquisa, auxiliando na integração da WAAM nos processos produtivos industriais de fabricação e de manutenção.

1.2 Definição do Problema

O ponto central do problema reside nos desafios que comprometem a integridade e precisão das peças produzidas por WAMM em uma estação de soldagem convencional, apresentada na Figura 2. Apesar da técnica ser vantajosa por sua simplicidade operacional e custo reduzido, gera uma grande poça de fusão resultando em excesso de calor e consequentes desvios geométricos nas peças. Estes problemas manifestam-se como distorções e imprecisões que podem afetar a qualidade e a funcionalidade das peças fabricadas (LIMA, 2023).

Figura 2 – Diagrama simplificado de uma estação de WAAM.

Fonte: Da Autora (2024)

Por conta disso, é necessário melhorar a estabilidade do processo de soldagem WAAM para minimizar problemas como descontinuidades, respingos e salpicos, além da importância da limpeza constante do bocal da tocha. O objetivo dessas melhorias é garantir a qualidade das peças produzidas, possibilitando sua aprovação para uso.

Dessa forma, avaliar a qualidade das peças após a fabricação através de testes de tração e análises estruturais é muito importante para resolver esse desafio e garantir que as peças atendam aos padrões necessários para sua utilização prática. Este trabalho concentra-se em avaliar a qualidade das peças de aço carbono produzidas via WAAM em uma célula robotizada de soldagem GMAW, utilizando parâmetros de soldagem preestabelecidos.

1.3 Objetivo Geral

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo geral avaliar se o WAAM é viável, sem a necessidade de possuir sistemas e equipamentos caros e especializados, através da análise de peças metálicas construídas pelo processo de manufatura aditiva por arco elétrico, por meio de ensaios normatizados de tração e de análise estrutural.

1.4 Objetivos Específicos

Para cumprir o objetivo geral, as seguintes metas devem ser alcançadas:

- Projetar corpos de prova para os ensaios de tração em CAD e verificar as dimensões necessárias da peça para fabricação por WAAM;
- Transformar o desenho da peça em trajetória e código para o robô;

- c) Programar a fonte de soldagem e fabricar as peças;
- d) Cortar e usinar as peças para transformar em corpos de prova;
- e) Programar o torno CNC para o acabamento das peças;
- f) Enviar corpos para ensaio de tração;
- g) Realizar análise metalográfica de uma das peças fabricadas;
- h) Analisar os resultados obtidos.

1.5 Estrutura do Trabalho

Para alcançar os objetivos propostos, o presente trabalho de conclusão de curso está estruturado em cinco capítulos, sendo o primeiro a própria introdução que apresenta o tema do trabalho, os objetivos gerais e específicos e a justificativa da pesquisa.

No segundo capítulo, sobre a fundamentação teórica, aborda-se o referencial teórico sobre o tema pesquisado, incluindo conceitos, teorias e estudos relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

A seguir, o terceiro capítulo referente à metodologia, descreve os métodos e técnicas utilizados na pesquisa, incluindo os materiais utilizados, a descrição do processo, os procedimentos de análise e as limitações do estudo.

Os resultados obtidos pelas análises e as relações com os objetivos específicos do trabalho são apresentados no quarto capítulo, bem como a discussão destes resultados.

Por fim, no quinto capítulo referente às considerações finais, compara-se os resultados da pesquisa com a literatura existente, discutindo as implicações teóricas e práticas e sugerindo possíveis caminhos para futuras pesquisas derivadas desta.

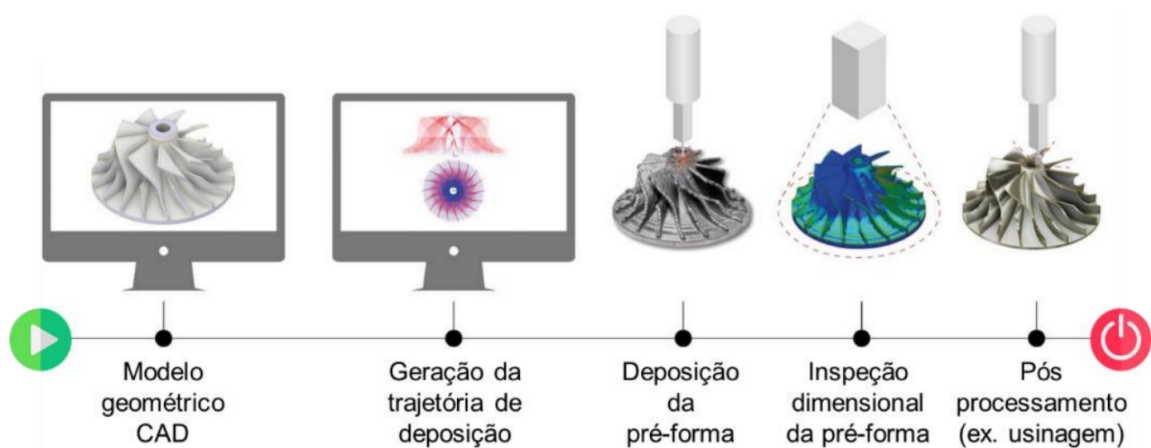
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conceitos essenciais sobre WAAM para entender o trabalho realizado são apresentados e discutidos neste capítulo, bem como alguns resultados produzidos por outros pesquisadores.

2.1 Processo de Manufatura

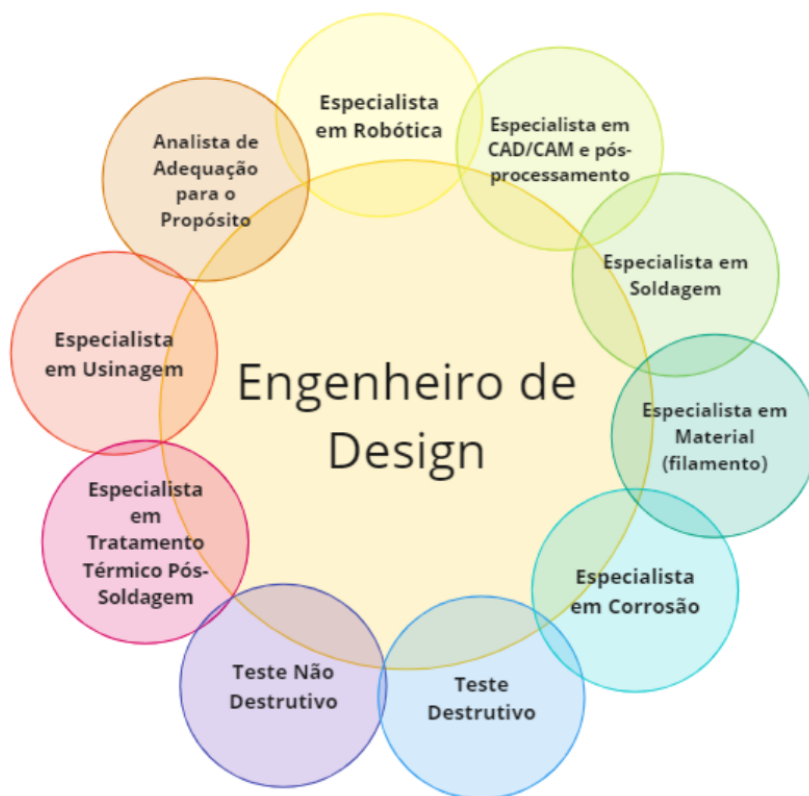
O processo de manufatura de uma peça por WAAM pode ser descrito em uma sequência de passos que vão desde o planejamento inicial até o processo de usinagem da pós-fabricação. A Figura 3 apresenta um diagrama simplificado do processo, onde o primeiro estágio é a criação do modelo CAD, seguido da impressão da peça por meio de WAAM, o escaneamento e medição da geometria da peça e a usinagem.

Figura 3 – Diagrama simplificado do processo WAAM.



Fonte: Adaptado de (MENDES, 2021)

De acordo com (VERLINDE *et al.*, 2021), o processo WAAM necessita da contribuição de vários especialistas em diferentes disciplinas, dependendo da complexidade do material e da geometria. É crucial que, desde o início, as pessoas necessárias estejam envolvidas para introduzir e produzir de forma eficiente. Na Figura 4, podemos visualizar a estrutura de um time multidisciplinar.

Figura 4 – Equipe multidisciplinar.

Fonte: Adaptado de (VERLINDE *et al.*, 2021)

2.1.1 Planejamento e Design CAD

O primeiro passo do processo é a definição do projeto, onde são estabelecidos os requisitos da peça, incluindo dimensões, tolerâncias e materiais. Também nessa etapa são identificadas as funções e aplicações da peça.

A segunda etapa é utilizar um software de CAD (Computer-Aided Design) para criar um modelo 3D detalhado da peça. Nesse momento são incorporadas todas as especificações e requisitos do projeto no modelo.

A partir disso, o modelo CAD deve ser convertido em um código G utilizando software de fatiamento (*slicer*) que divide o modelo em camadas e gera o caminho de impressão. Caso não seja possível realizar esse fatiamento via software, deve-se buscar outras formas de fatiar a peça, como programar cada camada diretamente pelo Teach Pendant ou utilizando software específico que se comunique com o Robô.

2.1.2 Preparação e Manufatura

Neste momento, é escolhido o fio metálico adequado para o processo WAAM e para a peça desejada, considerando as propriedades mecânicas e a compatibilidade com o equipamento de soldagem. Então, deve-se configurar a estação WAAM, incluindo a configuração da tocha de soldagem, alimentação do fio metálico e os parâmetros de

soldagem (corrente, tensão, velocidade de deposição e de alimentação do fio metálico).

Com os parâmetros definidos, deve-se posicionar o substrato ou base na plataforma de construção e calibrar o robô para garantir a precisão da deposição. Após isso, é iniciado o processo de deposição camada por camada, seguindo o código G gerado. É importante monitorar a construção para garantir a qualidade da deposição, ajustando parâmetros conforme necessário.

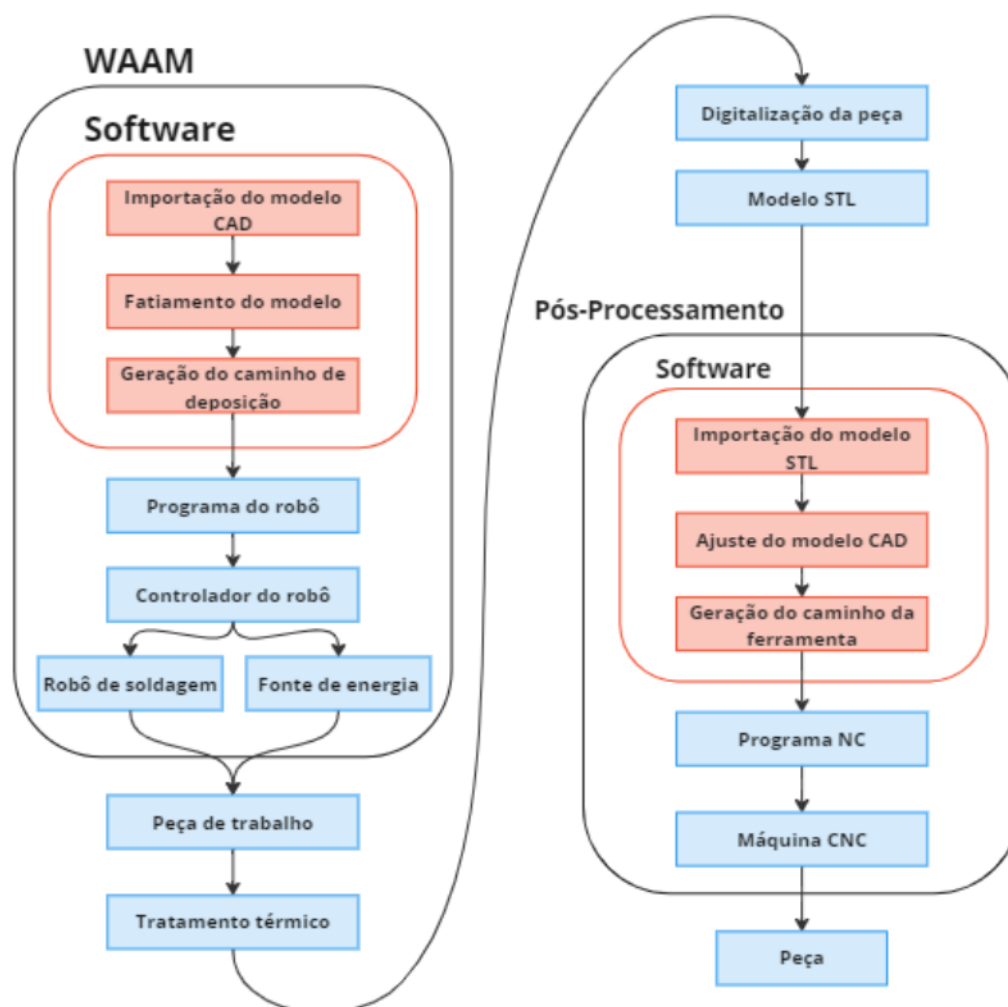
2.1.3 Pós-Fabricação

Ao finalizar a manufatura, deve-se permitir que a peça resfrie gradualmente para minimizar a formação de tensões residuais e deformações e então preparar a peça para a usinagem. Nesta etapa, a programação da usinagem já deve estar finalizada e testada, apenas aguardando o componente, o qual deve ser fixado na máquina de usinagem onde serão realizadas as operações, que podem incluir fresamento, torneamento, furação e retificação, a fim de atingir as tolerâncias dimensionais e o acabamento superficial desejado.

2.1.4 Inspeção Final

Por fim, deve-se inspecionar a peça usinada para garantir que atende todas as especificações de design e qualidade e verificar a conformidade com todos os requisitos do projeto. Em alguns casos, é realizado o scan 3D da peça finalizada e comparado com o arquivo CAD gerado no início do processo, para verificar a precisão do resultado. Na Figura 5, é possível visualizar um fluxograma de todo o processo.

Figura 5 – Fluxograma do processo WAAM.



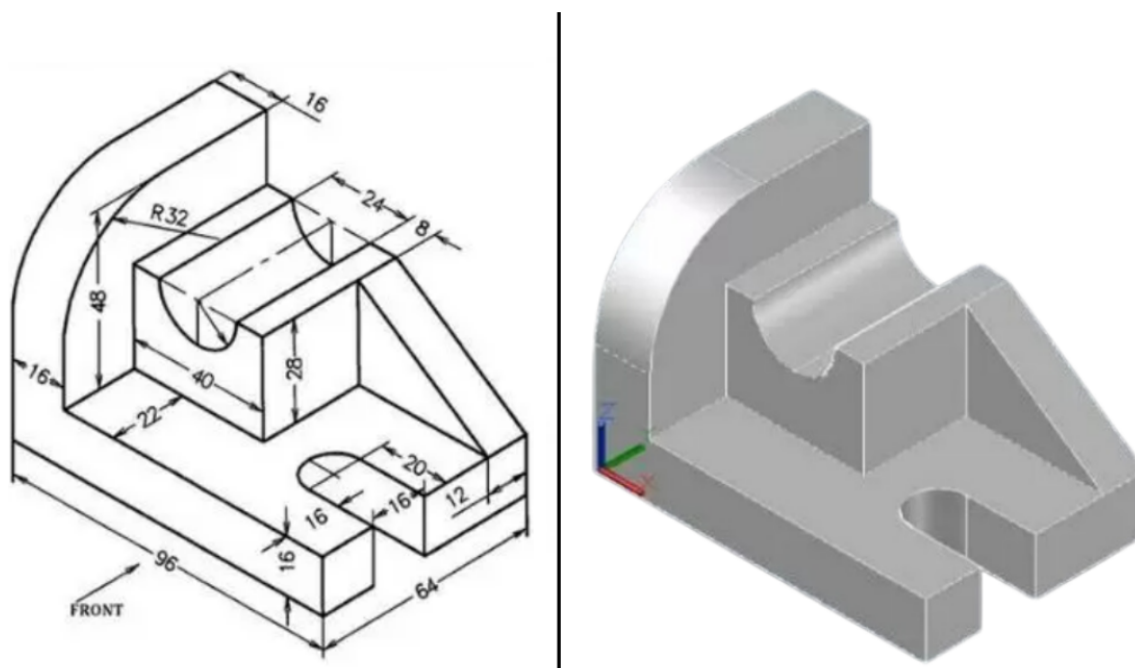
Fonte: Adaptado de (VERLINDE *et al.*, 2021)

2.2 Descrição das Tecnologias Utilizadas

Conforme mencionado anteriormente, a manufatura de uma peça envolve várias etapas, portanto, esta seção tem como objetivo detalhar as tecnologias empregadas em cada uma delas.

2.2.1 Design CAD

Conforme discutido por (TOVEY, 1989), o design CAD possui grande importância no processo de design industrial, sendo utilizado na engenharia como uma ferramenta que permite a criação, modificação, análise e otimização de modelos digitais em 2D e 3D. Alguns softwares como AutoCAD, SolidWorks, Energy3D e CATIA são utilizados para desenvolver projetos com alta precisão e detalhe, que facilitam a visualização e a verificação dos componentes antes da fabricação. A Figura 6 mostra um exemplo do processo de design CAD.

Figura 6 – Projeto e execução de uma peça em CAD.

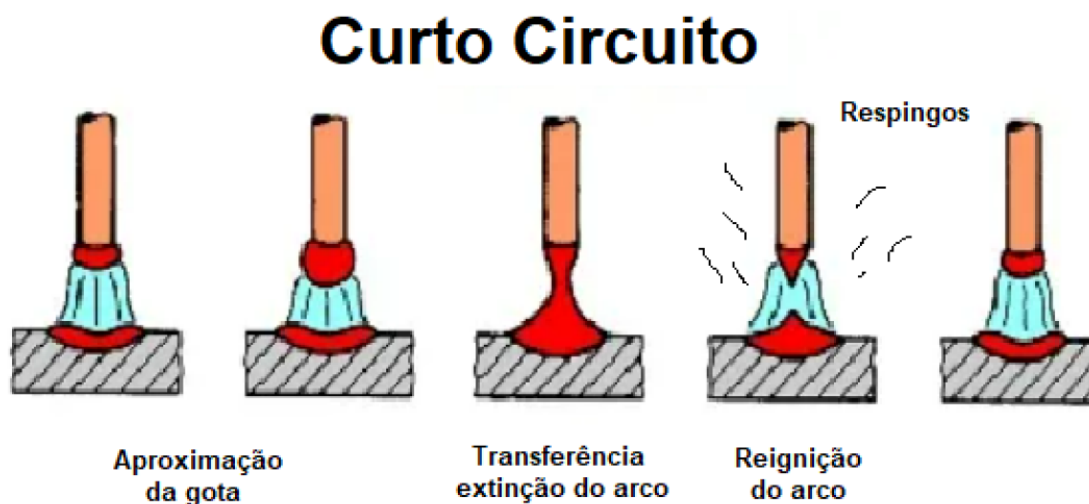
Fonte: (GCAD CAM, 2024)

2.2.2 Soldagem GMAW por Curto Circuito

Durante a soldagem GMAW (Soldagem a Arco Metálico com Gás), o eletrodo é aquecido até a sua fusão e destacamento em forma de gotas de metal líquido, atingindo, no caso de arames de aço, temperaturas superiores a 2000°C. O arco elétrico e o efeito Joule são as duas formas mais comuns de aquecer um eletrodo. Na soldagem com transferência por curto-circuito, o comprimento do arco é progressivamente reduzido até se tornar nulo no momento do curto-circuito (MODENESI *et al.*, 2011).

Para obter a soldagem GMAW, é necessário primeiramente regular os parâmetros de tensão da fonte, velocidade do arame, vazão do gás de proteção e a distância do bico de contato da peça (DBCP). Conforme discutido por (HERMANS; OUDEN, 1999), a soldagem por curto-circuito é caracterizada pelo contato regular entre o eletrodo e a poça de fusão. Durante o período de arco, ocorre o crescimento da gota e no período de contato o metal é transferido do eletrodo para a peça de trabalho, é um processo cíclico e que apresenta estabilidade. Na Figura 7, é possível visualizar a transferência de metal por curto circuito.

Figura 7 – Transferência de metal por curto circuito.

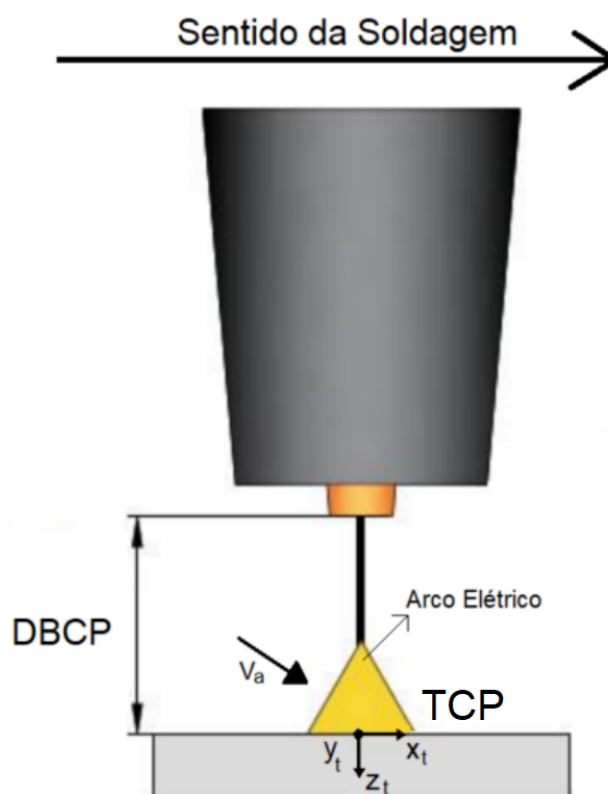


Fonte: Adaptado de (INFOSOLDA, 2013)

2.2.3 Soldagem Robotizada e Parametrização da Trajetória da Tocha

Para que a soldagem ocorra conforme esperado, inicialmente é necessário realizar a parametrização da trajetória da tocha. Este processo inicia com a determinação do TCP (*Tool Center Point*) da tocha, para isso, é determinado distâncias e os ângulos nas três dimensões, ou seja, nos eixos X, Y e Z. Com o TCP determinado, configura-se a distância bico de contato peça, o DBCP, como apresentado na Figura 8. Essa distância deve ser mantida durante todo o processo, pois impacta nos parâmetros de soldagem e, caso seja muito longa, pode resultar em baixa proteção de gás e porosidades (VERLINDE *et al.*, 2021).

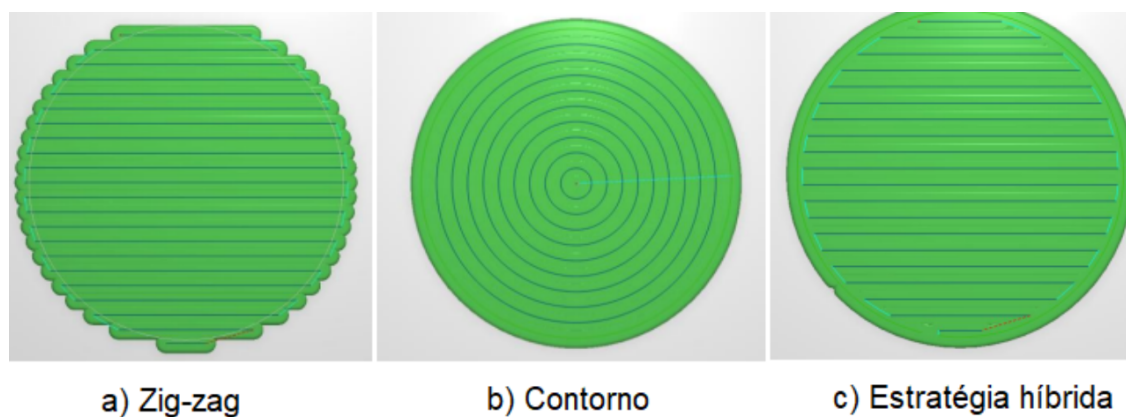
Figura 8 – DBCP e TCP da tocha.



Fonte: Adaptado de (VERLINDE *et al.*, 2021)

Após o fatiamento da peça, determina-se a localização dos cordões de solda em cada camada, baseado nos pontos (*targets*) configurados no software. Durante o processo de solda, o TCP da tocha coincide com os *targets* determinados na trajetória de cada camada, que é formada por cordões de solda e comandos de liga e desliga do arco elétrico. Para definir as trajetórias, podem ser utilizadas diferentes estratégias, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Estratégias de Deposição dos cordões de solda.



a) Zig-zag

b) Contorno

c) Estratégia híbrida

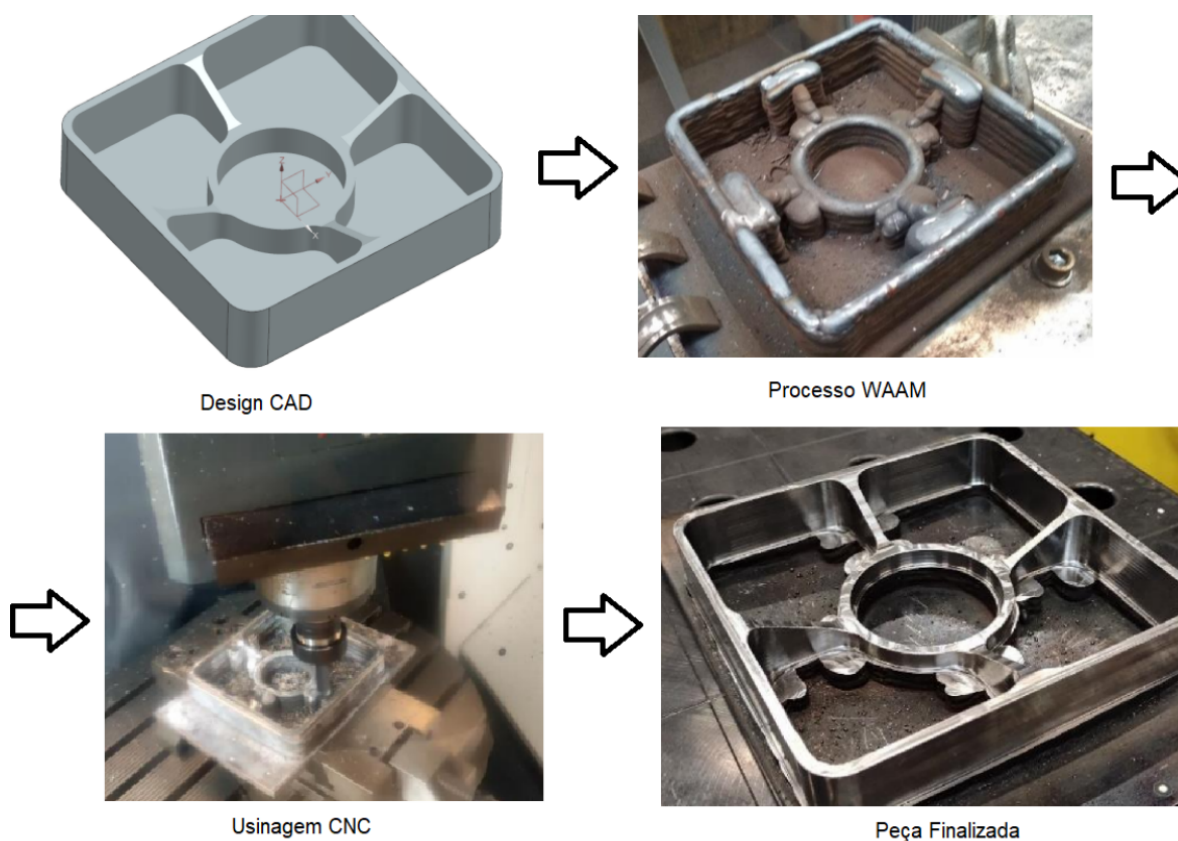
Fonte: Adaptado de (VERLINDE *et al.*, 2021)

2.2.4 Usinagem CNC

A usinagem CNC é um processo de fabricação que usa computadores para automatizar máquinas e ferramentas em várias etapas de produção. Esta abordagem pode ser usada para dar ao metal o acabamento e a forma desejada, devido a sua alta precisão (GFM, 2022).

Para realizar esse processo, é necessário programar a trajetória da máquina em softwares como SprutCAM, SolidWorks CAM, Autodesk PowerMill, entre outros. Como resultado, é gerado um código G que é interpretado pelas máquinas CNC para executar as operações de usinagem especificadas no software. A Figura 10 mostra um exemplo de todo o processo de uma peça, desde seu design CAD, sua fabricação pelo processo WAAM e usinagem via programa em código G.

Figura 10 – Processo Completo de Fabricação de uma Peça por WAAM.



Fonte: Adaptado de (VERLINDE *et al.*, 2021)

2.2.5 Qualidade da Peça

A análise da qualidade de uma peça pode incluir a verificação de parâmetros como microestrutura, propriedades mecânicas e presença de defeitos. A seguir, será abordado mais sobre ensaios de tração e análise metalográfica como ferramentas essenciais para avaliar a qualidade das partes fabricadas e o uso dessas estratégias por outros pesquisadores.

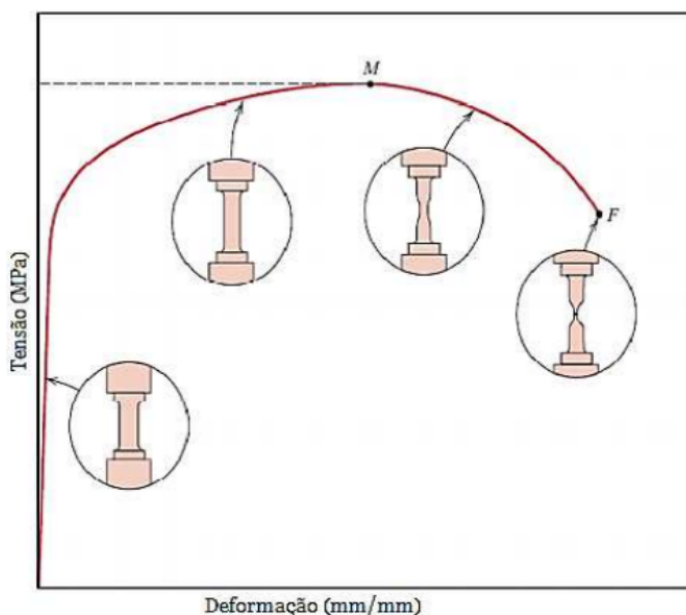
2.2.5.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um método fundamental para caracterizar os materiais metálicos, pois avalia propriedades mecânicas como módulo de elasticidade, tensão de escoamento, limite de resistência, tensão de ruptura, tenacidade, resiliência e ductilidade.

Após a usinagem da peça fabricada por WAAM, os corpos de prova são extraídos por corte e na sequência fabricados por usinagem segundo normas específicas para o ensaio de tração. A seguir, as extremidades de cada corpo de prova são fixadas nas garras de fixação da máquina universal de ensaio, um extensômetro é usado para medir as deformações correspondentes quando cargas crescentes são aplicadas na direção axial. A carga é calculada na própria máquina e o ensaio geralmente ocorre até que o material seja quebrado ou até que a máquina esteja em seu limite (ZARUR, 2022).

É possível visualizar na Figura 11 a curva de tensão versus deformação, onde M é o ponto máximo na curva, ou seja, o ponto de ruptura da peça.

Figura 11 – Curva de tensão versus deformação.



Fonte: (ZARUR, 2022)

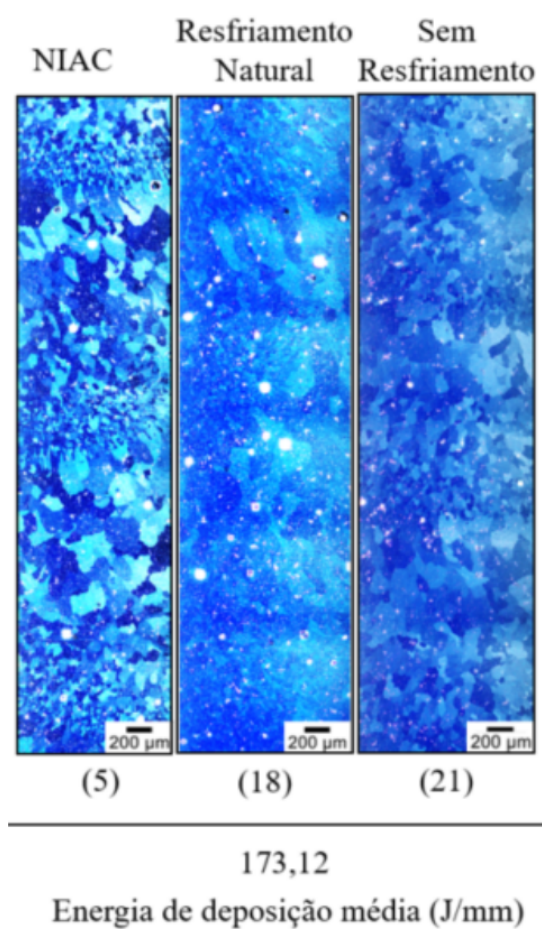
2.2.5.2 Análise Metalográfica

O ensaio metalográfico é considerado destrutivo porque é examinada apenas uma parte da peça. Esta seção geralmente é retirada por corte e levada para lixamento e polimento. Os principais métodos de coleta de informações para a análise são a microscopia óptica (MO) ou a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Dependendo dos objetivos da análise, um ataque químico à superfície pode ser necessário para

obter contraste na coloração de fases ou inclusões. As principais informações que podem ser obtidas através dessa análise são o tamanho, morfologia e composição dos grãos, além da porosidade, segregações e inclusões na microestrutura, a formação de carbonetos em superfícies e contornos de grãos e também a avaliação de pontos de soldagem (RIJEZA, 2024).

2.2.5.3 Resultados Obtidos por Outros Pesquisadores

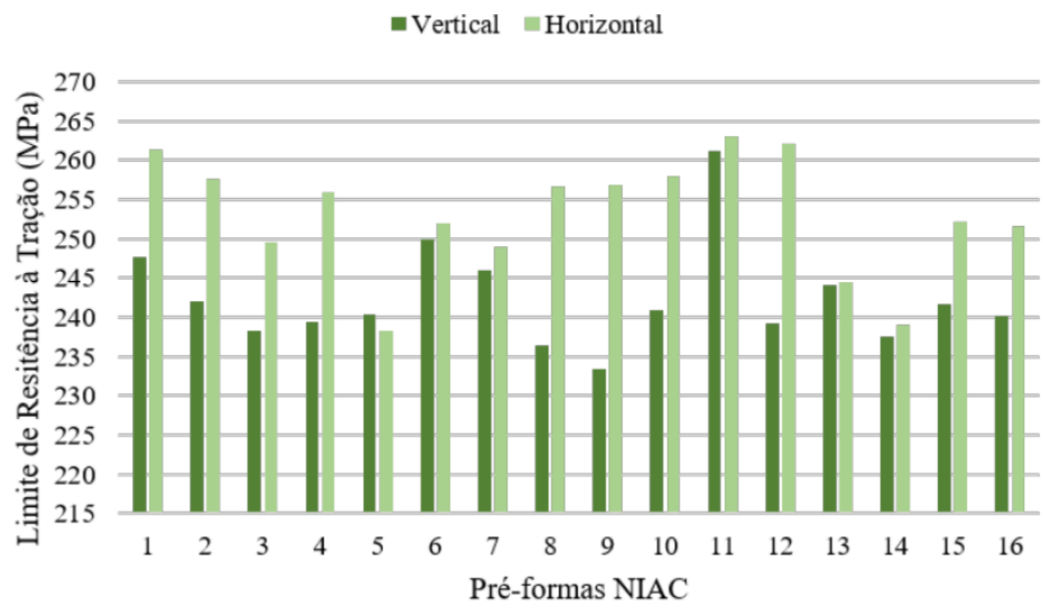
De acordo com (SOUZA, 2021), a análise metalográfica é importante para identificar os fenômenos durante a solidificação do material depositado, principalmente no que diz respeito à granulação (natureza, forma e quantidade de grãos), além de descontinuidades como poros, trincas, falta de fusão e inclusões de escória. Essas características são determinantes na avaliação da qualidade das peças, pois influenciam diretamente suas propriedades mecânicas e desempenho em serviço. A pesquisadora também destaca que as micrografias revelam tanto regiões de grãos refinados quanto áreas com grãos maiores, que podem estar associadas a variações nas condições de resfriamento e deposição, a Figura 12 apresenta a diferença da estrutura dos grãos em peças com tipos diferentes de resfriamentos na mesma energia de soldagem de 173,12 J/mm. Sendo que a peça da esquerda (5) passou por um resfriamento ativo por quase-imersão, a do meio (18) por um processo de resfriamento natural e a da direita (21) não passou por processo de resfriamento.

Figura 12 – Micrografias Comparativas.

Fonte: (SOUZA, 2021)

Além da micrografia, (SOUZA, 2021) descreve a metodologia utilizada para realizar ensaios de tração, incluindo a preparação de corpos de prova em miniatura e a medição de deformação por imagem. Esses ensaios permitem avaliar a influência de diferentes parâmetros de processamento sobre a qualidade das peças. Seus resultados, apresentados na Figura 13, mostram que a grande maioria dos resultados obtidos ficaram dentro das especificações, comparados com as propriedades mecânicas da mesma liga AWS ER5356 quando fabricada por forjamento e deposição, como apresentado na Tabela 1.

Figura 13 – Limite de resistência à tração das pré-formas fabricadas.



Fonte: (SOUZA, 2021)

Liga	Processo de Fabricação	LRT (MPa)	Deformação (%)
AA5356	Forjado	285	-
ER5356	Depositado	200 - 310	10 - 18

Tabela 1 – Comparação das propriedades mecânicas para a Liga AWS ER5356.

Fonte: Adaptado de (SOUZA, 2021)

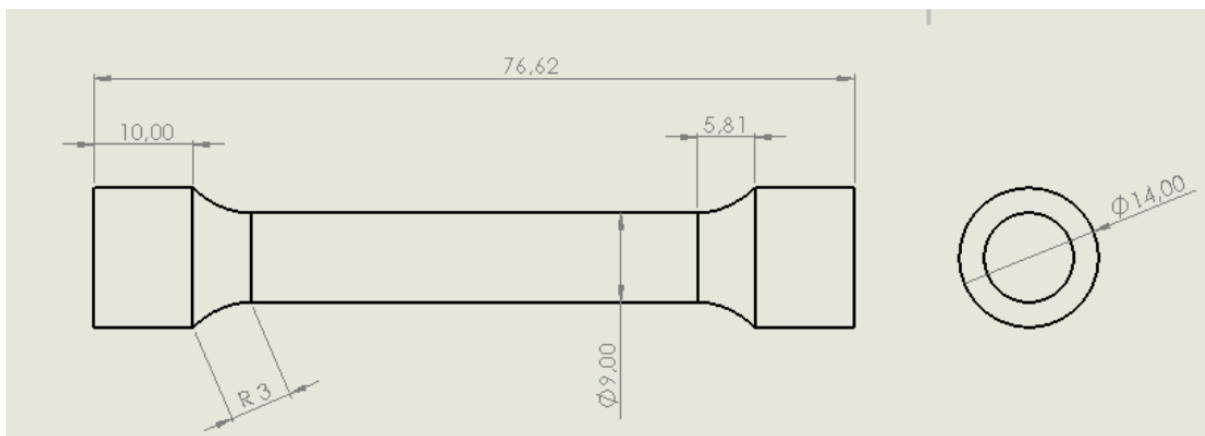
3 METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é descrever os métodos usados para o desenvolvimento do trabalho, seguindo a ordem estabelecida nos objetivos específicos. Começando pela definição da geometria da peça, modelagem 3D, transformação do modelo em trajetória e código para o robô, fabricação das peças, processos de usinagem e análises realizadas.

3.1 Definição das Dimensões da Peça e Modelo CAD

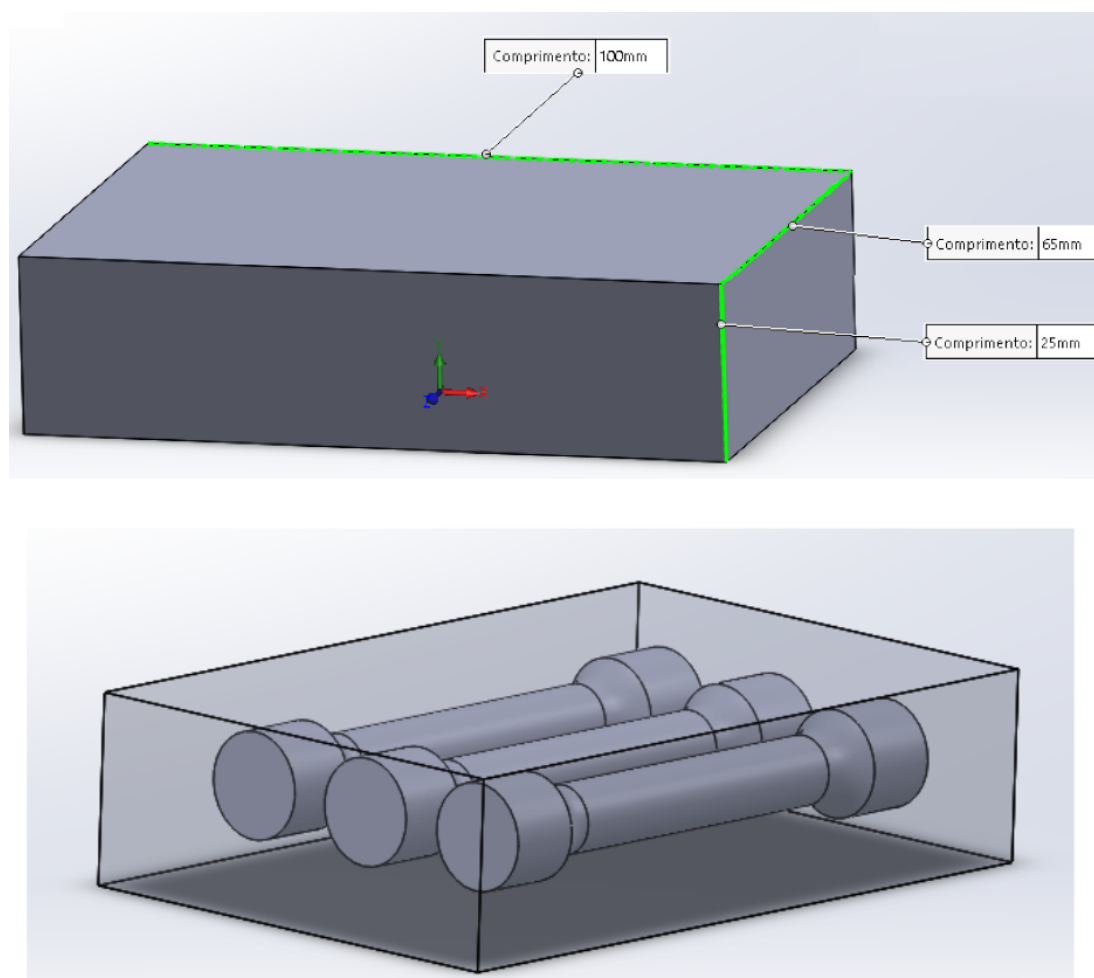
Tendo em vista que o objetivo do trabalho é a avaliação de peças metálicas construídas pelo processo de manufatura aditiva por arco elétrico, a geometria da peça foi definida de forma a ser possível extrair três corpos de prova para ensaio de tração. A Figura 14 apresenta o desenho técnico do corpo de prova, bem como suas dimensões, conforme a norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2016).

Figura 14 – Dimensões do corpo de prova em milímetro.



Fonte: Da Autora (2024)

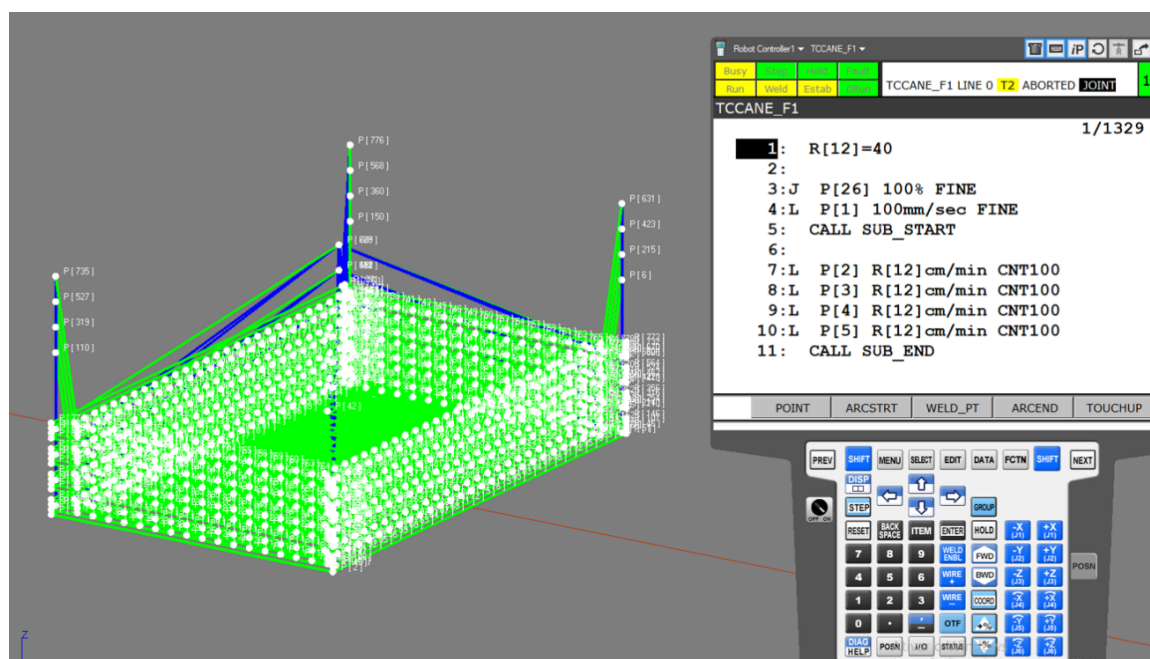
Com base nas dimensões apresentadas, foi definido que a geometria da peça seria um paralelepípedo com dimensões 100 mm x 65 mm x 25 mm. Em seguida, utilizando o software SolidWorks, foi desenhado o modelo CAD da peça, que pode ser visualizado na Figura 15, onde também é possível observar uma simulação do local da retirada dos corpos de prova.

Figura 15 – Corpos de prova e modelo CAD da peça.

Fonte: Da Autora (2024)

Por ser um paralelepípedo de geometria simples, não houve a necessidade de utilizar softwares de fatiamento da peça. Assim, na etapa seguinte, foi utilizado o WeldPro, um módulo do Roboguide (software oficialmente licenciado pela FANUC), que simula a trajetória a ser percorrida pelo robô, sendo possível programar e editar os *targets* através do Teach Pendant virtual que replica todos os botões e funcionalidades do seu equivalente físico. A Figura 16 mostra a interface do software WeldPro.

Figura 16 – Interface do software WeldPro.



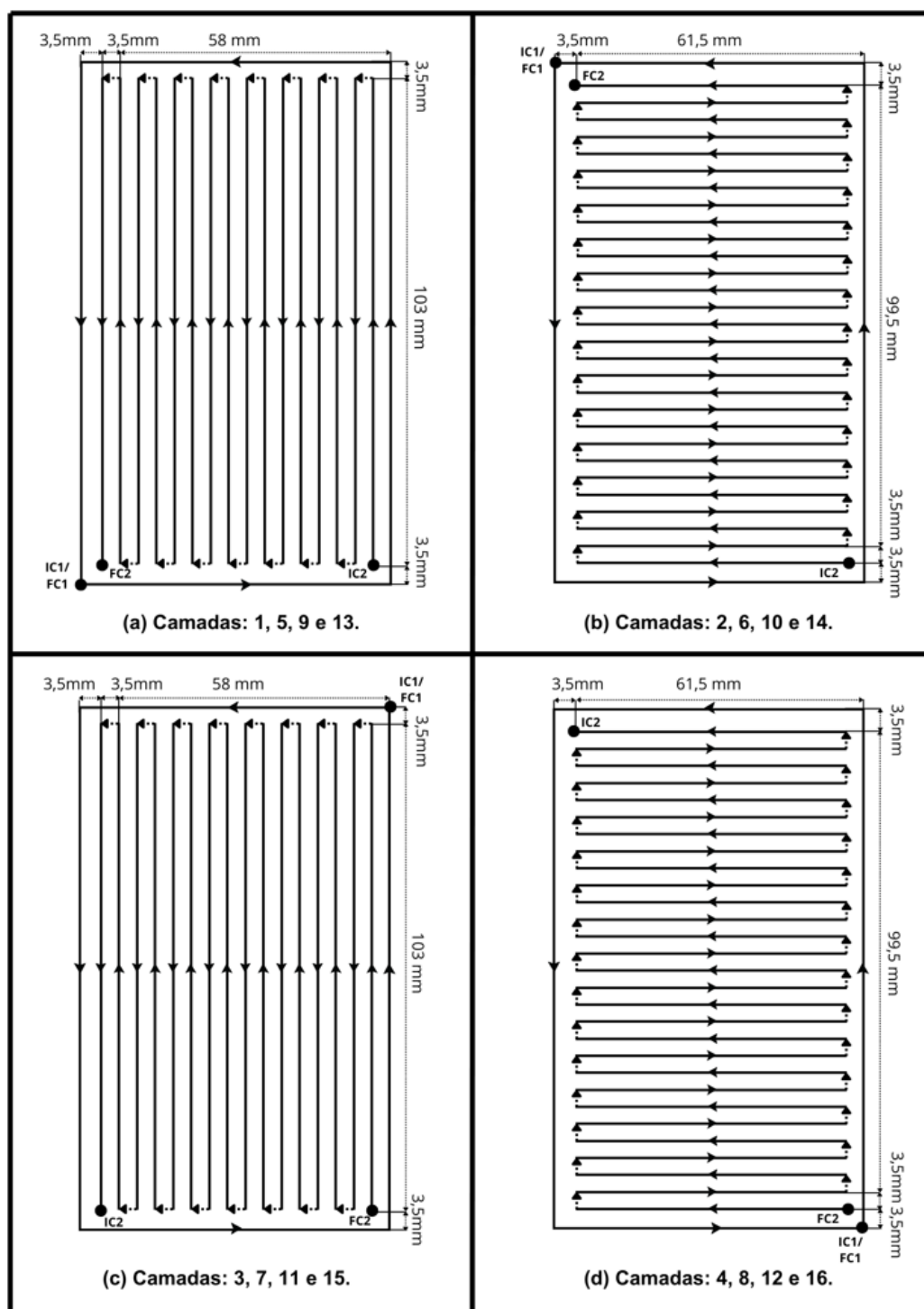
Fonte: Da Autora (2024)

A programação das camadas e seus comandos de movimentação linear foram configuradas manualmente através do software, inserindo as coordenadas dos pontos com 3,5 mm de distância entre o centro dos cordões de solda nos eixos X e Y e deslocamento de 2 mm no eixo Z para os níveis das camadas subsequentes.

3.2 Método de Deposição

O método de produção escolhido constituiu na aplicação da estratégia de deposição híbrida, onde primeiro cordão de solda depositado fez o contorno da peça e então utilizado o método zigue-zague para o segundo cordão de solda, alternando verticalmente e horizontalmente nas camadas. Por não ter sido aplicado métodos de resfriamento, a deposição de material foi pensada para que cada nova camada tivesse início no ponto mais distante do ponto final da camada anterior, sendo essa a região mais fria da peça. A Figura 17 exemplifica a estratégia de deposição utilizada.

Figura 17 – Diagrama da estratégia de deposição híbrida, onde IC é o início do cordão e FC o final.



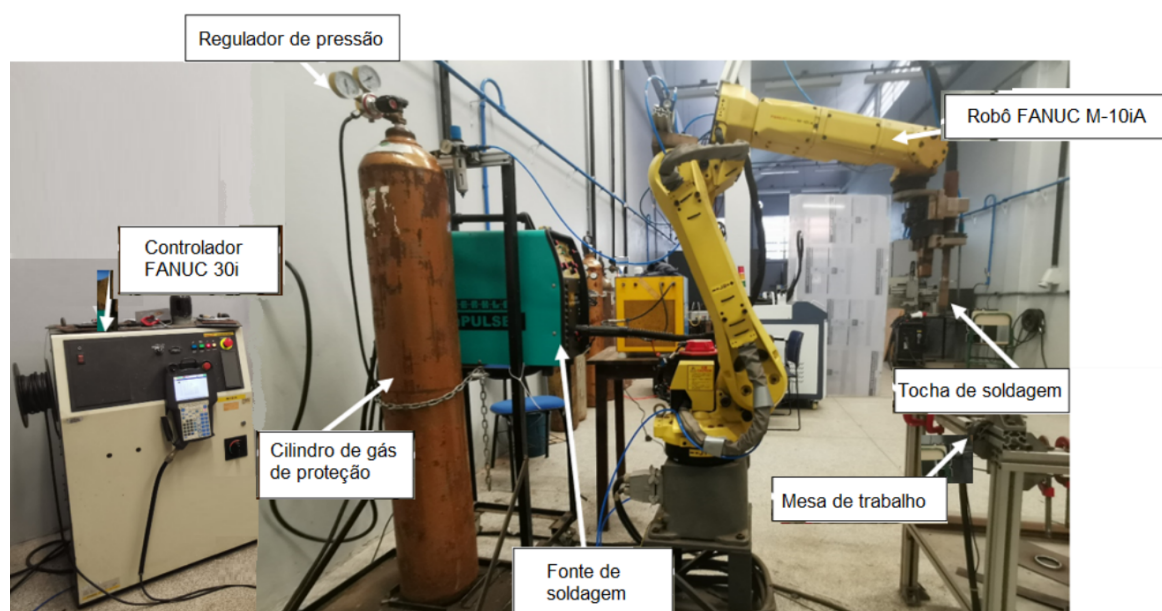
Fonte: Da Autora (2024)

3.3 Equipamentos Utilizados

A célula WAAM utilizada foi montada, Figura 18, a partir de máquinas anteriormente independentes, sendo elas:

- Robô FANUC M-10iA: robô de 6 eixos responsável por manobrar a tocha de soldagem para fabricar a peça;
- Fonte de Soldagem Merkle High Pulse 350K: servindo como a máquina central do processo, pois oferece controle avançado do arco e a capacidade de gerenciar os parâmetros de soldagem de forma eficaz;
- Refrigerador líquido IMC UPR-7500: utilizado para dissipar o calor gerado dentro da tocha de soldagem;
- Controlador FANUC 30i: onde todos os programas são criados e executados, incluindo comandos de movimento, gerenciamento da saída de ar comprimido e a ativação do alimentador de solda;
- Gás de proteção composto por 75% de gás Argônio e 25% de gás carbônico;
- Arame de aço coberto de cobre ER70S6, com diâmetro de 1 mm.
- Mesa de trabalho, onde foi posicionado o substrato;
- Substrato de aço 1020 com dimensões de 150 x 150 x 5 mm.

Figura 18 – Configuração da área de trabalho.



Fonte: Da Autora (2024)

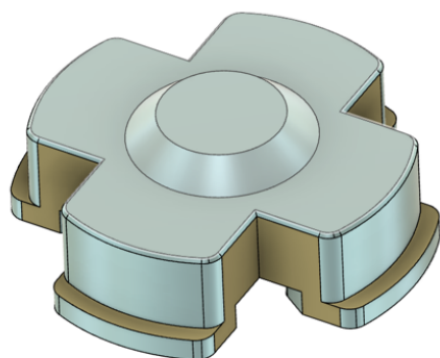
3.4 Parâmetros de Soldagem

Com a área de trabalho completa e após definida a estratégia de deposição, foi preciso determinar os parâmetros de soldagem, pois são eles que estabelecem o tamanho e a forma do cordão de solda, que é a unidade principal do WAAM. Além

disso, antes de iniciar o processo de manufatura , foi necessário especificar o TCP da tocha, o DBCP e a velocidade de alimentação do arame, que determina a quantidade de material depositado por unidade de comprimento.

Para este trabalho, foram utilizados os mesmos parâmetros de soldagem de peça previamente fabricada (Figura 19) pelos alunos da unidade curricular de Automação dos Processos de Soldagem 2023.1 do IFSC - Campus Florianópolis.

Figura 19 – Peça fabricada por alunos do IFSC.



Design CAD



Impressão 3D Polimérica



Processo WAAM



Peça Usinada

Fonte: Da Autora (2024)

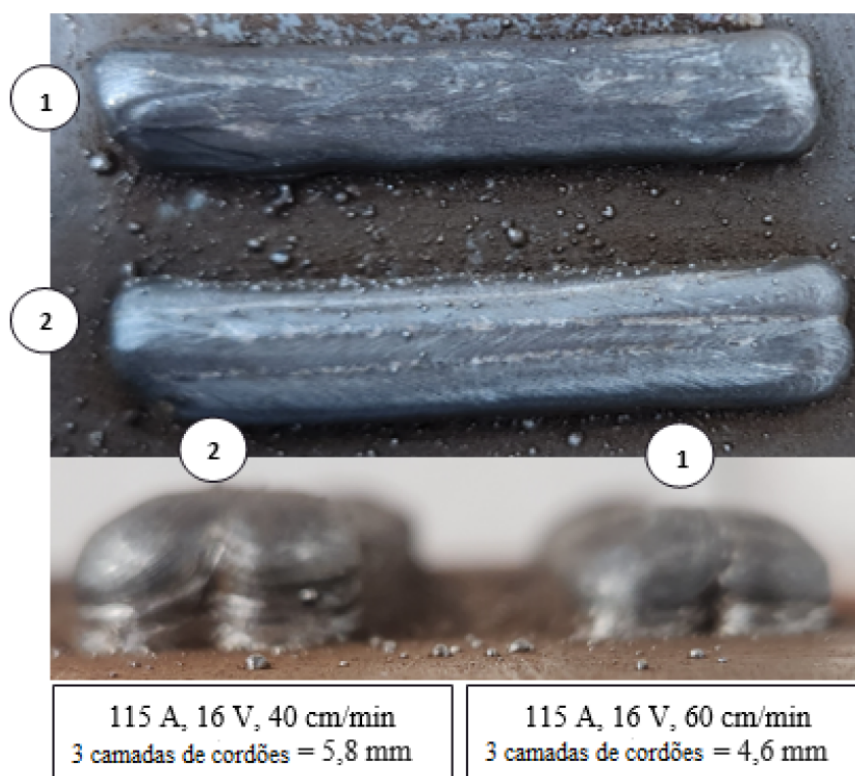
Para a peça acima, os parâmetros de soldagem utilizados pelos alunos foram:

- Corrente = 115 A
- Tensão = 16 V
- Velocidade de soldagem = 40 cm/min
- Ângulo da tocha com relação ao substrato: 0°
- DBCP: 16 mm
- Velocidade de alimentação do arame: 3,8 m/min

Esses parâmetros foram escolhidos pelos alunos a partir de uma fase de testes de cordões de solda com diferentes parâmetros de soldagem. Os dois cordões que apresentaram uma aparência mais otimizada e exibiram valores aceitáveis de largura e altura de acordo com os critérios em *“Practical Guideline on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) for Gas Metal Arc Welding (GMAW)”*; fornecido por (VERLINDE *et al.*, 2021), foram utilizados para a produção de dois pequenos blocos.

Com isso, verificaram que o segundo bloco fabricado teve resultados mais favoráveis, visto que as camadas estavam perfeitamente fundidas, a altura do cordão de solda estava de acordo com o esperado e com um tempo de produção razoável, como apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Comparação de blocos produzidos com diferentes parâmetros e soldagem.



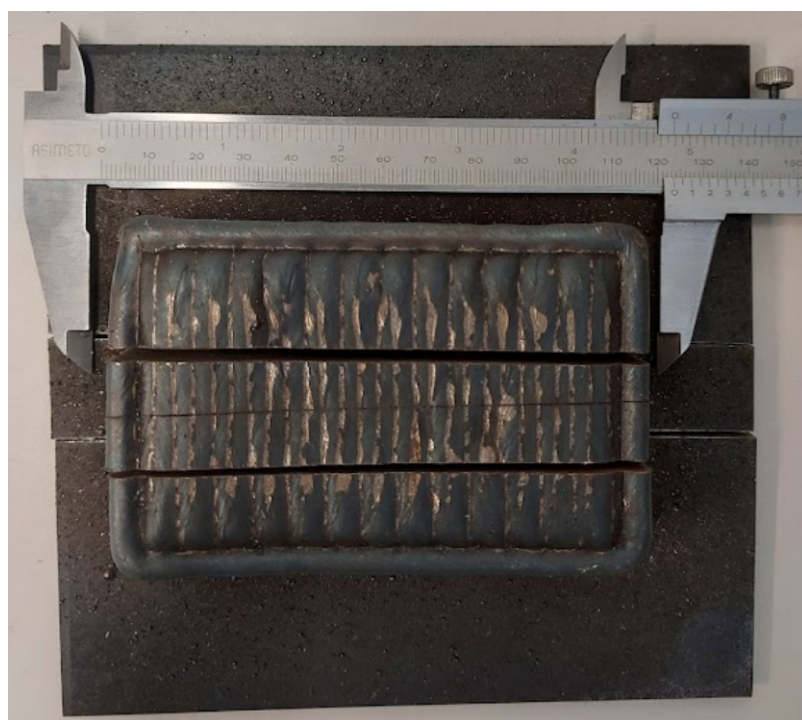
Fonte: Da Autora (2024)

3.5 Fabricação da Peça por WAAM

Seguindo as etapas de fabricação utilizando WAAM, com o Design CAD, a trajetória definida e os parâmetros de soldagem estabelecidos, foi realizado o processo de soldagem da peça, conforme ilustrado na Figura 21. No entanto, durante o processo, um respingo atingiu o bico de contato, soldando-o ao arame e interrompendo o processo até a troca ser realizada. Além disso, ao ver a peça pronta, notou-se que o substrato foi mal posicionado, resultando em um desalinhamento, como é possível visualizar na Figura 22.

Figura 21 – Processo WAAM.

Fonte: Da Autora (2023)

Figura 22 – Posicionamento da peça finalizada no substrato.

Fonte: Da Autora (2023)

O objetivo inicial era retirar da peça os cilindros, que posteriormente se tornariam os corpos de prova, por meio do método de eletroerosão, como mostra a Figura 23. No entanto, durante o processo o arame rompeu diversas vezes e foi informado pelo técnico do laboratório que seria necessário interromper o processo. Por

conta disso, a estratégia de corte foi alterada e foi utilizada a serra fita da marca Acra (Figura 24) para dividir a peça.

Figura 23 – Processo de eletroerosão.



Fonte: Da Autora (2023)

Figura 24 – Serra fita.



Fonte: Da Autora (2024)

Por conta do problema no processo de fabricação, da falta de alinhamento da peça no substrato e da falha no processo de eletroerosão, não era mais possível extrair os 3 corpos de prova da peça. Tendo isso em vista, uma nova peça foi fabricada (Figura 25) e, dessa vez, o resultado foi muito satisfatório, pois o processo ocorreu normalmente do início ao fim, a peça ficou alinhada com o substrato, não houveram muitos respingos e as medidas ficaram dentro do esperado (105 x 67 x 29 mm).

Figura 25 – Resultado da fabricação da segunda peça.

Fonte: Da Autora (2023)

3.6 Corte e Usinagem dos Corpos de Prova

Finalizado o processo WAAM, iniciou-se o processo de corte e usinagem da peça. A primeira etapa foi o corte na serra fita, onde foi dividida em três partes de aproximadamente 20 mm de largura cada, como apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Corte na serra fita.

Fonte: Da Autora (2023)

A seguir, as partes foram usinadas em um torno mecânico da marca Nardini,

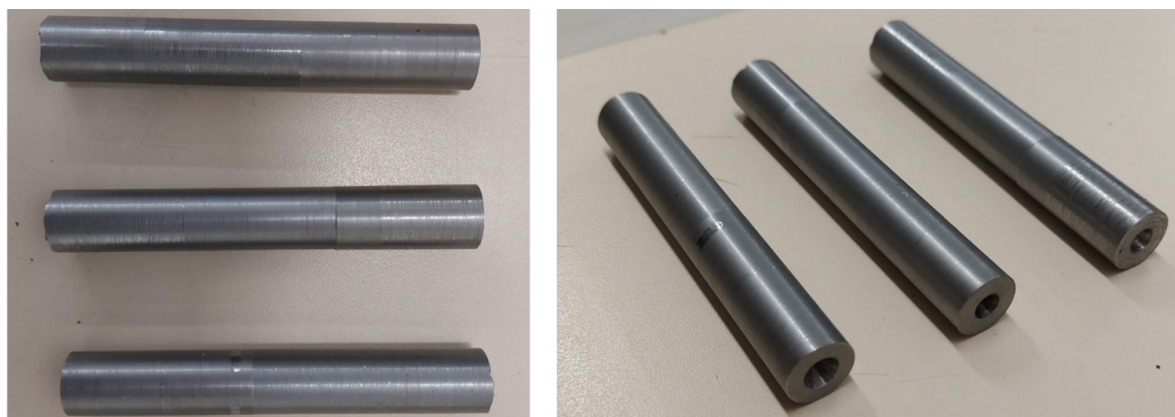
modelo Mascote (Figura 27), onde foram transformadas em cilindros, como pode ser visualizado na Figura 28.

Figura 27 – Torno mecânico.



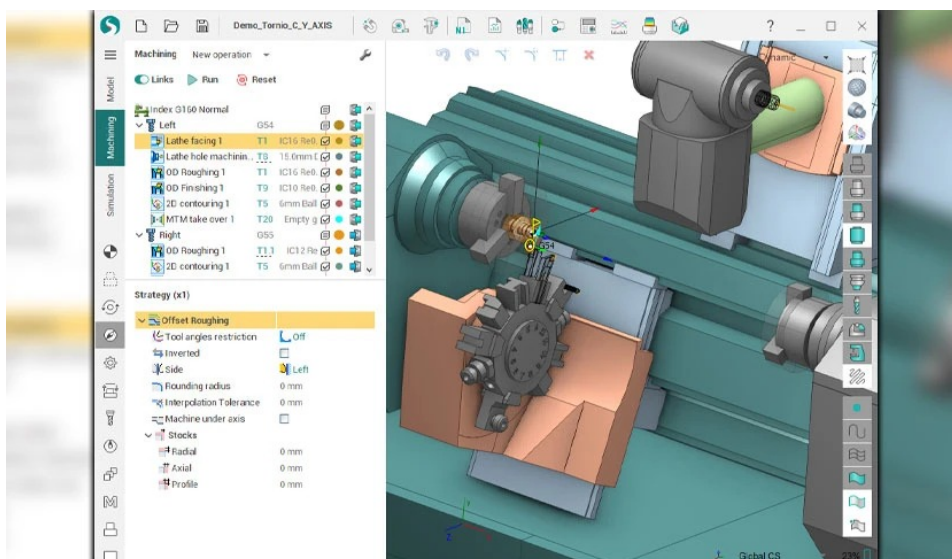
Fonte: Da Autora (2023)

Figura 28 – Resultado da usinagem mecânica.



Fonte: Da Autora (2023)

Após finalizada a usinagem mecânica, foi iniciada a configuração e programação do torno CNC. Para isso, foi inserido o modelo CAD do corpo de prova no software SprutCam, especificadas as dimensões do cilindro (matéria prima) e programada cada etapa da usinagem. A Figura 29 apresenta um exemplo da interface do software.

Figura 29 – Interface do SprutCam.

Fonte: (SprutCAM X, s.d.)

Por fim, após a usinagem, as peças finalizadas (Figura 30) foram enviadas ao Instituto Senai de Inovação, em Joinville, para realização dos ensaios de tração.

Figura 30 – Peças finalizadas.

Fonte: Da Autora (2023)

3.7 Análise Metalográfica

Para a análise metalográfica, foram utilizadas partes da primeira peça manufaturada (Figura 22). A preparação para a análise metalográfica consistiu em primeiro escolher uma seção a ser analisada (Figura 31), a qual foi dividida em 4 partes.

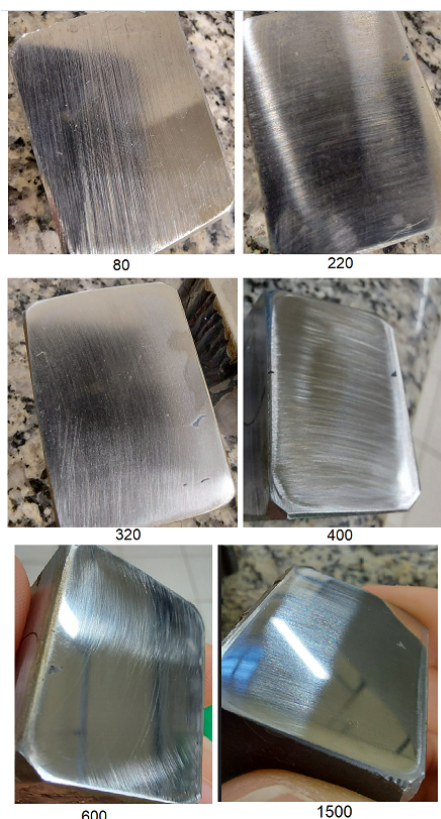
Figura 31 – Seção escolhida para análise metalográfica.

Fonte: Da Autora (2023)

Com as partes cortadas, foi utilizada a lixadeira rotativa Struers DP9a, da marca Struers (Figura 32), para lixar as amostras metálicas e prepará-las para análise microscópica, uma vez que a máquina possibilita obter superfícies lisas, permitindo a observação das microestruturas dos materiais. A Figura 33 mostra o processo de lixamento de uma das partes, onde foram utilizadas as lixas 220, 320, 400, 600 e 1500.

Figura 32 – Lixadeira rotativa Struers DP9a.

Fonte: Da Autora (2023)

Figura 33 – Processo de lixamento com a respectiva granulação da lixa.

Fonte: Da Autora (2023)

Na próxima etapa, foi realizado o polimento das partes, preparando-as para o ataque químico e, para isso, foi utilizada a politriz rotativa Struers AP 10, também da marca PStruers (Figura 34). A Figura 35 mostra a peça após o polimento, utilizando os abrasivos Alumina ($1\ \mu\text{m}$) + Diamante ($1\ \mu\text{m}$).

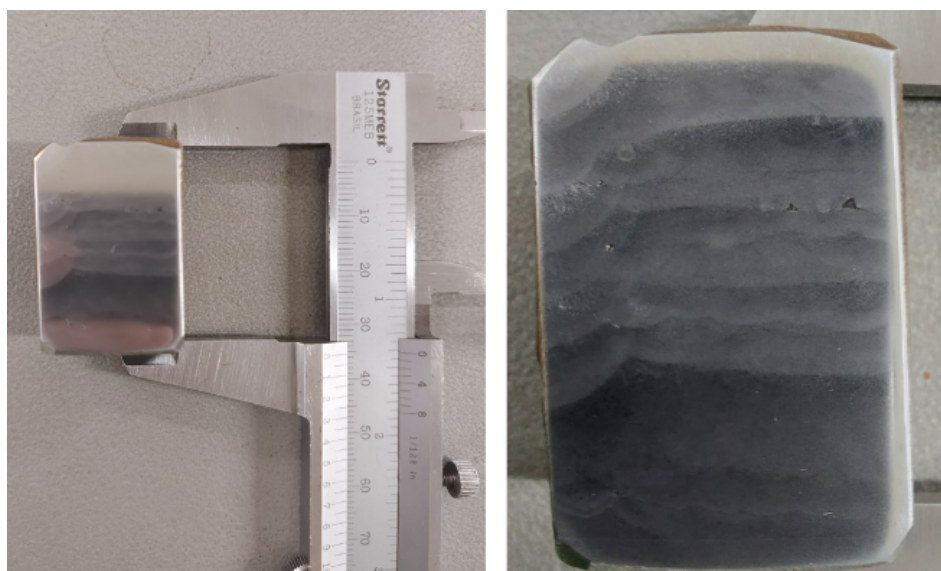
Figura 34 – Politriz rotativa Struers AP 10.

Fonte: Da Autora (2023)

Figura 35 – Peça polida.

Fonte: Da Autora (2023)

Com o polimento finalizado, foi realizado o ataque químico por imersão da peça no reagente ácido Nital 2% (2 ml HNO_3 em 98 ml de Álcool P.A.), com o objetivo de facilitar a identificação dos grãos da amostra e diferenciar as fases da microestrutura. Na Figura 36 é possível verificar o resultado macroscópico do ataque em uma das peças: os cordões de solda das camadas e descontinuidades. Para realizar a macrografia, foi utilizada a câmera Canon EOS T5i Lente EFS 18-55mm.

Figura 36 – Peça após a fase de ataque químico.

Fonte: Da Autora (2023)

Por fim, para realizar a análise micrográfica e para determinação do tamanho de grão, foi utilizado o microscópio da marca Leica, modelo DM4000 M LED (Figura 37).

Figura 37 – Microscópio DM4000 M LED.



Fonte: Da Autora (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados da análise metalográfica da peça, onde são mostradas sua macrografia e micrografia, bem como os resultados dos ensaios de tração realizados com os corpos de prova extraídos das peças metálicas produzidas pelo processo de WAAM.

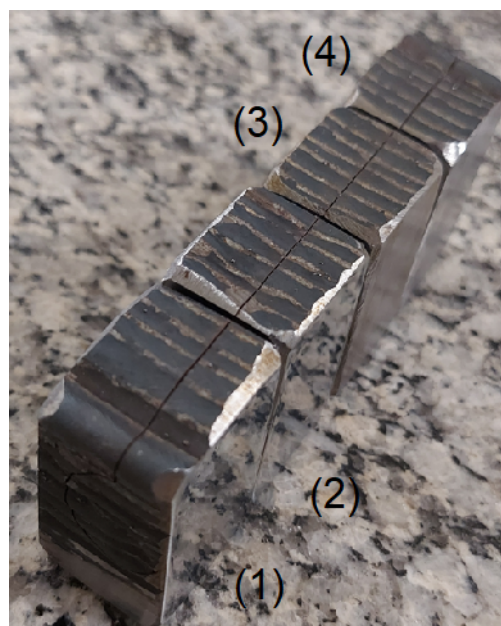
4.1 Análise Metalográfica

Nesta seção serão apresentados os resultados observados nas análises macrográfica, micrográfica e tamanho de grãos.

4.1.1 Macrografia

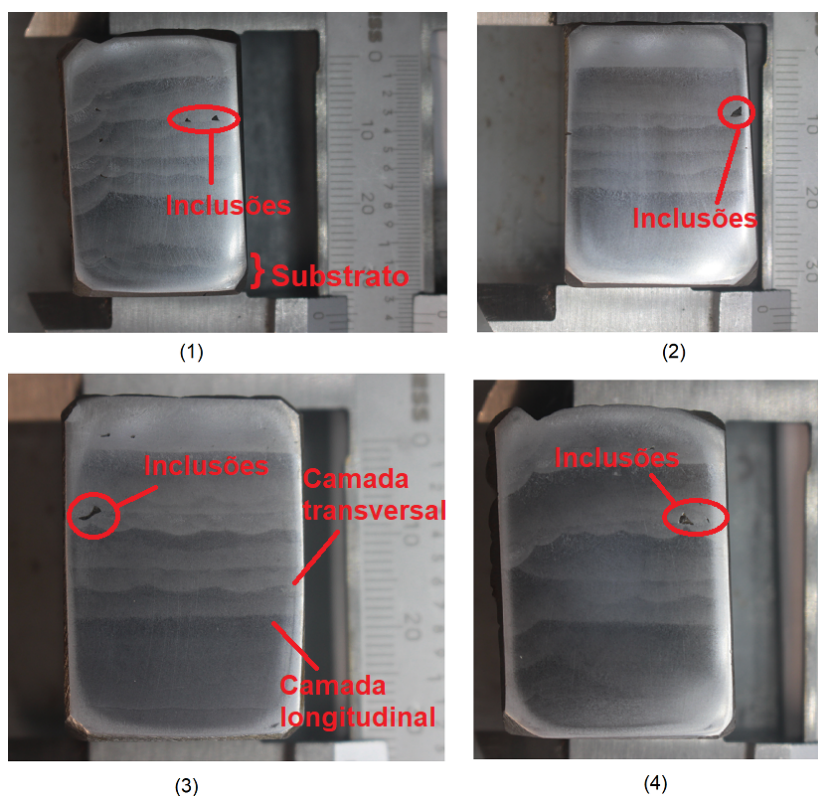
Para a Macrografia, foram analisadas quatro amostras da primeira peça fabricada. Como é possível visualizar na Figura 38.

Figura 38 – Amostras.



Fonte: Da Autora (2024)

Nas amostras (1) e (2), foi analisada a face direita e nas amostras (3) e (4) a face esquerda. A Figura 39 apresenta os resultados observados nas macrografias.

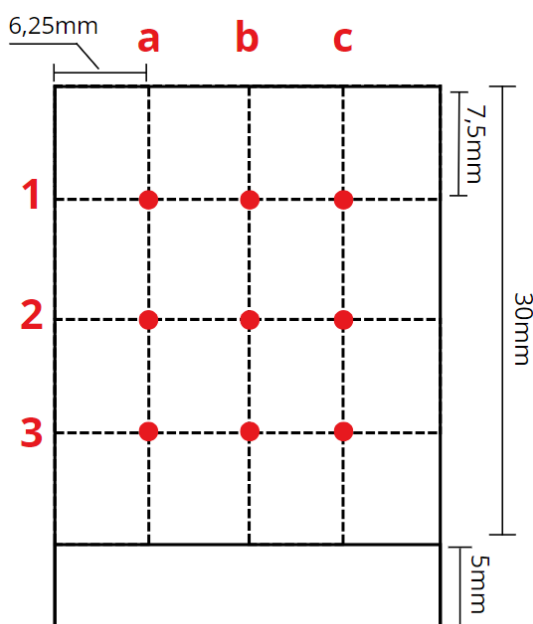
Figura 39 – Resultados observados nas macrografias.

Fonte: Da Autora (2024)

Com os resultados da macrografia, é possível observar com clareza as camadas de solda da peça e diferenciar os cordões transversais e longitudinais em todas as amostras. Na imagem, também é possível identificar inclusões de silicatos, que podem ter ocorrido devido ao método de deposição utilizado, onde não houve limpeza da peça entre as camadas. Essas inclusões podem deixar a peça mais suscetível à corrosão e fraturas, além de reduzir sua resistência à fadiga.

4.1.2 Micrografia

Para a micrografia, foram realizadas análises em nove regiões de cada amostra (Figura 40).

Figura 40 – Regiões analisadas - micrografia.

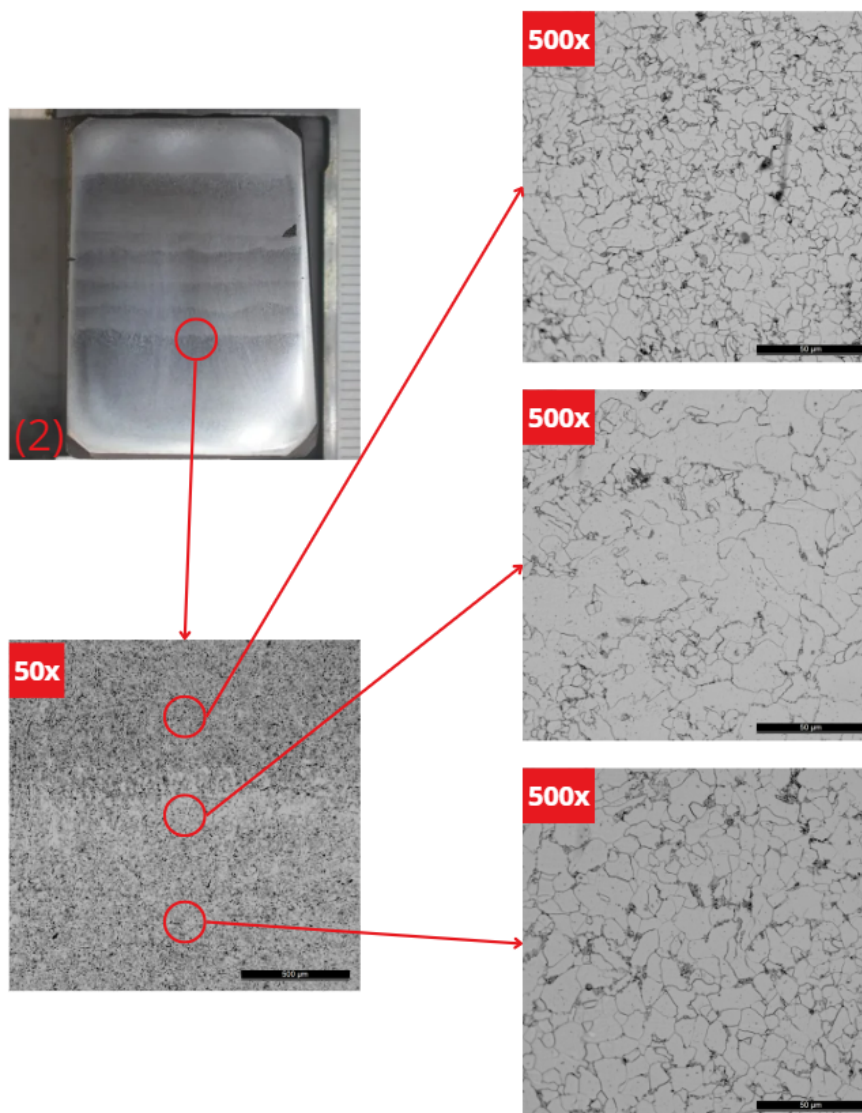
Fonte: Da Autora (2024)

O resultado das micrografias de cada peça com aumento de 200x e 500x podem ser visualizados no Anexo A.

4.1.2.1 Micrografia Entre Cordões

Devido a similaridade dos resultados entre as amostras, as análises seguintes foram realizadas apenas na amostra (2).

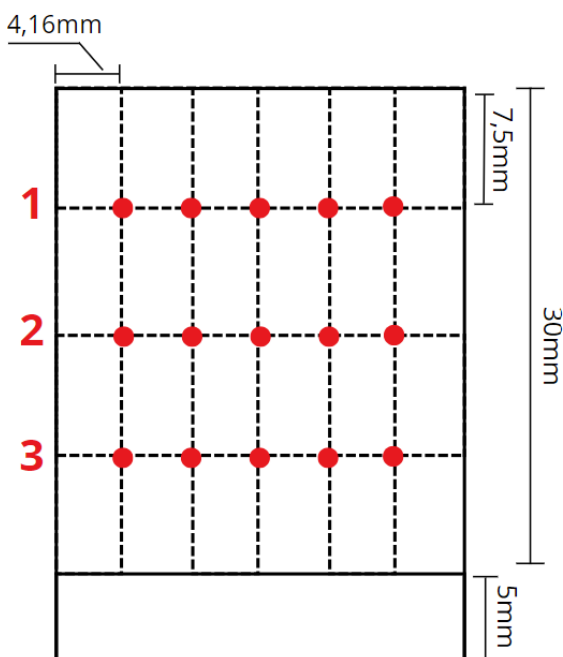
O resultado da análise micrográfica entre cordões de solda pode ser visualizado na Figura 41.

Figura 41 – Transição entre cordões.

Fonte: Da Autora (2024)

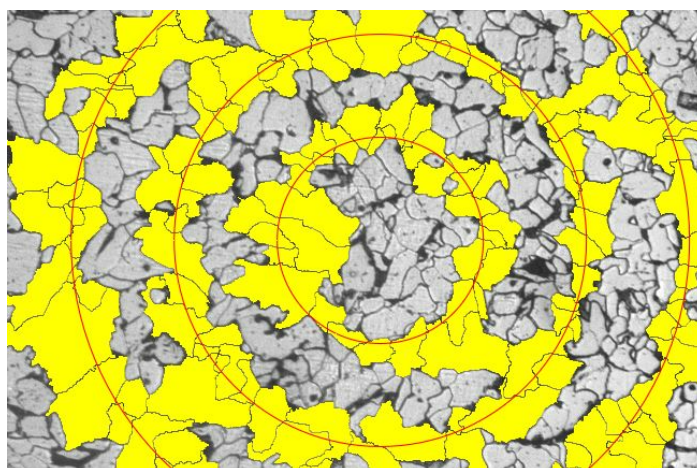
4.1.3 Contagem de Grãos

Para a contagem de grãos, foram analisadas cinco seções em três alturas diferentes da amostra, com aumento de 200x. Como apresentado na Figura 42.

Figura 42 – Regiões analisadas - tamanho de grão.

Fonte: Da Autora (2024)

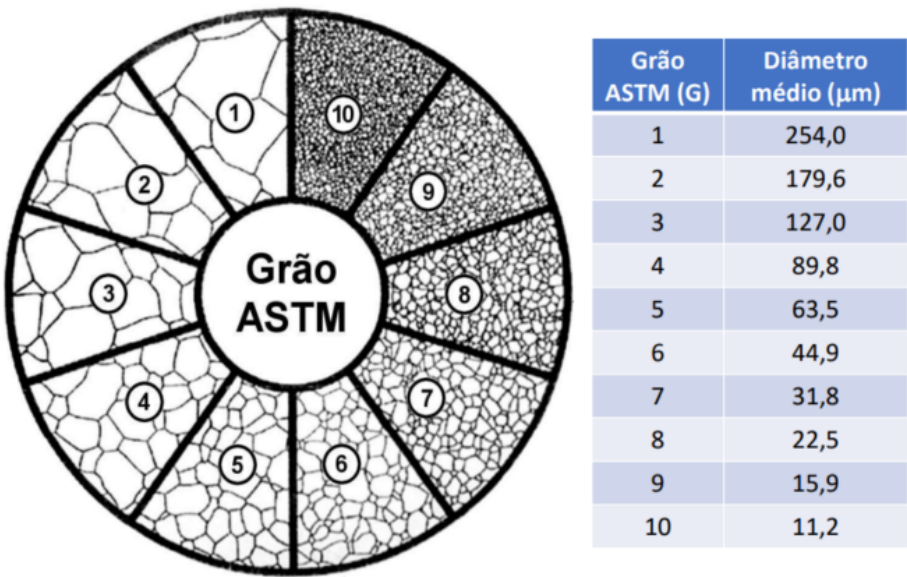
O método utilizado foi o da intersecção de Abrams, que utiliza de 3 círculos concêntricos de comprimento conhecido para o cálculo, como apresentado na Figura 43.

Figura 43 – Aplicação da intersecção de Abrams em uma das seções analisadas.

Fonte: Da Autora (2024)

O tamanho do grão é definido pelo método de grão ASTM, que pode ser visualizado na Figura 44.

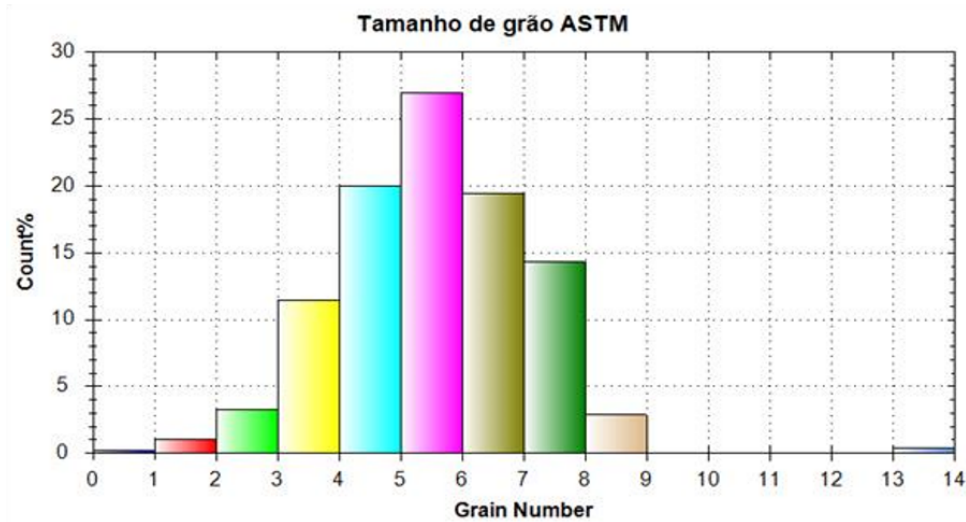
Figura 44 – Tamanho de grão ASTM.



Fonte: (PAVANATI; AGUIAR, 2024)

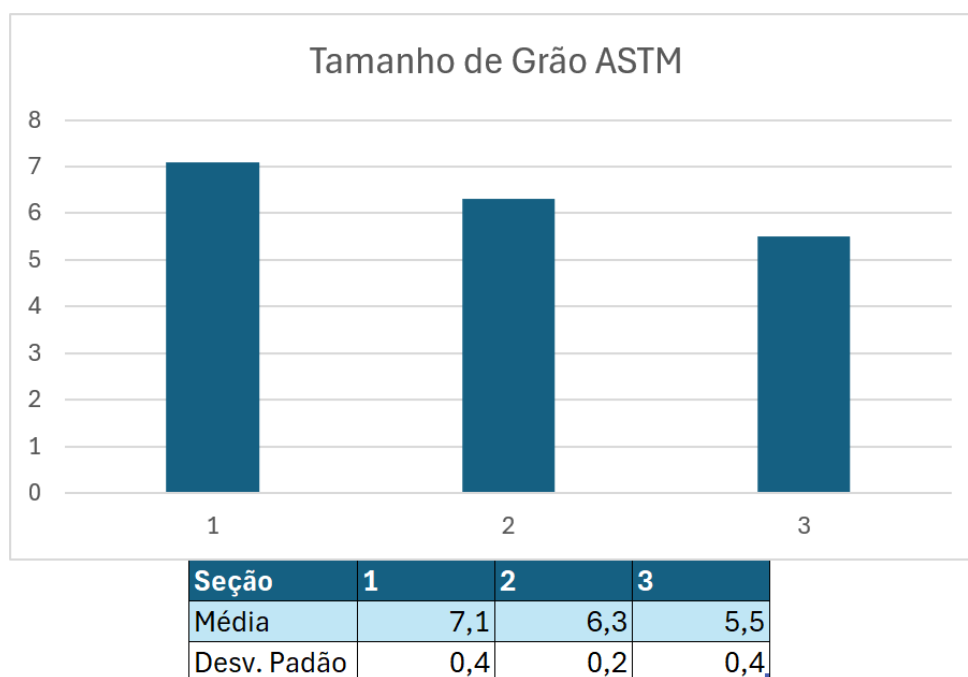
A partir disso, o software LAS Grain Expert calcula a quantidade e tamanho dos grãos em cada imagem (Figura 45).

Figura 45 – Exemplo de histograma gerado para uma das seções analisadas.



Fonte: Da Autora (2024)

Por fim, como resultado, foi calculada a média de tamanho de grão em cada altura, como pode ser visualizada na Figura 46.

Figura 46 – Resultado da análise de tamanho de grão.

Fonte: Da Autora (2024)

Na análise micrográfica, é possível observar que todas as partes apresentam o mesmo comportamento, sendo uma variação do tamanho dos grãos ao longo das amostras. Isso ocorreu devido a variação de temperatura durante o processo de manufatura aditiva e ao tempo em que cada parte da peça ficou exposta ao calor. Com a análise de tamanho de grão, foi possível confirmar esse comportamento. Na análise micrográfica entre os cordões, também é notável uma diferença no tamanho do grão entre as camadas, possivelmente pelo aumento da temperatura no momento da junção dos cordões.

4.2 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados pelo Instituto Senai de Inovação (Anexo B), onde os corpos de prova foram posicionados entre as garras da máquina de ensaio, que aplicou uma carga crescente até a ruptura. Os dados coletados incluíram a resistência máxima, a tensão de escoamento e o alongamento, os quais estão apresentados na Tabela 2. A Tabela 3 apresenta os valores da média e desvio padrão da resistência máxima e tensão de escoamento.

4.2.1 Comparação com Outros Aços Carbono e Arame de Solda

Para contextualizar os resultados obtidos, foi realizada uma comparação das propriedades de resistência mecânica das peças fabricadas com as propriedades mecânicas do arame AWS ER70-S6, utilizado para a fabricação das peças, e dos aços

Corpo de Prova	Resistência Máxima [MPa]	Tensão de Escoamento [MPa]	Alongamento [%]
01	470	346	33
02	508	378	33
03	467	333	36

Tabela 2 – Resultados do Ensaio de Tração dos Corpos de Prova.
Fonte: Adaptado de Anexo B

	Resistência Máxima [MPa]	Tensão de Escoamento [MPa]
Média	481,7	352,3
Desvio Padrão	18,7	18,9

Tabela 3 – Resistência Máxima e Tensão de Escoamento - Média e Desvio Padrão.
Fonte: Da Autora (2024)

AISI 1010, 1020, 1030 e 1045, aços de baixo e médio carbono, que são amplamente empregados na indústria para a fabricação de peças metálicas, incluindo componentes estruturais, automotivos, maquinários, manivelas, engrenagens e eixos, de acordo com (SACCHELLI, 2024). A Tabela 4 apresenta as propriedades típicas de resistência desses aços e do arame de solda.

Material	Resistência Máxima [MPa]	Tensão de Escoamento [MPa]	Alongamento [%]
Aço 1010	370 - 440	180 - 220	22 - 28
Aço 1020	410 - 490	210 - 250	18 - 24
Aço 1030	440 - 570	250 - 310	16 - 22
Aço 1045	570 - 700	310 - 400	12 - 18
ER70S-6	500	420	22

Tabela 4 – Comparação das propriedades mecânicas entre os aços AISI 1010, 1020, 1030 e 1045 e o arame de solda AWS ER70-S6.
Fonte: Adaptado de (AZO Materials, 2012) e (Wurth, s.d.)

Os resultados dos ensaios de tração indicam que os corpos de prova produzidos pelo processo WAAM apresentaram uma resistência máxima de (481,7 ±18,7 MPa), valores que se aproximam ou até superam os obtidos para aços como 1020 e 1030, e estão em linha com a resistência mecânica do arame de solda utilizado (500 MPa). A tensão de escoamento dos corpos de prova, (352,3 ±18,9 MPa), também se encontra dentro dos valores esperados para aços de maior resistência, como o 1030 e 1045, e é levemente inferior à tensão de escoamento do arame ER70S-6 (420 MPa).

O alongamento dos corpos de prova, com valores entre 33% e 36%, foi significativamente superior ao encontrado nos aços 1020, 1030 e 1045, e também é

superior ao alongamento típico do arame de solda (22%), o que indica uma ductilidade favorável.

Dessa forma, a comparação com os aços carbono e o arame de solda demonstrou que as peças fabricadas por WAAM têm propriedades mecânicas competitivas, especialmente quando comparadas ao aço 1020 e 1030, com a vantagem adicional de oferecer maior ductilidade, além dos benefícios inerentes ao processo WAAM, como a liberdade geométrica e o melhor aproveitamento de material.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Manufatura Aditiva por Arco Elétrico (WAAM) tem se destacado como uma das tecnologia promissora na produção de peças metálicas, combinando os princípios da soldagem a arco com a flexibilidade do design assistido por computador (CAD). Possui grande importância na indústria moderna, uma vez que permite a fabricação de componentes complexos com alta eficiência de material e menores custos em comparação com métodos tradicionais. E, este trabalho, ao avaliar a qualidade das peças fabricadas por WAAM, contribui significativamente para o entendimento e aprimoramento dessa tecnologia.

Este estudo proporcionou a análise dos parâmetros de soldagem e das características microestruturais das peças produzidas, permitindo uma compreensão aprofundada das variáveis que afetam a sua integridade. Através dos ensaios de tração e da análise metalográfica, foi possível identificar os desafios e as potencialidades do processo WAAM na fabricação de peças de aço carbono. A investigação revelou que, apesar das dificuldades inerentes ao controle do processo, as peças fabricadas apresentam propriedades mecânicas comparáveis às dos aços tradicionalmente utilizados na indústria, como o AISI 1020 e 1045.

Outro aspecto relevante deste trabalho foi a demonstração de que a WAAM pode ser implementada com sucesso utilizando equipamentos convencionais de soldagem, sem a necessidade de investimentos significativos em infraestrutura especializada. Esse fato torna a tecnologia ainda mais acessível, permitindo sua adoção por um número maior de indústrias, e centros de ensino, especialmente onde buscam inovação em processos de fabricação com foco na redução de custos e no aumento da eficiência produtiva.

Em conclusão, com o cumprimento de todos os objetivos inicialmente definidos, este estudo edossa a viabilidade do WAAM para a produção de peças metálicas de boa qualidade em estações de trabalho convencionais e as contribuições são relevantes tanto para a academia quanto para a indústria.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Uma das principais sugestões para pesquisas futuras é a realização de experimentos semelhantes aos realizados neste trabalho, mas incorporando métodos de resfriamento durante a fabricação das peças por WAAM. Especificamente, sugere-se investigar o efeito do resfriamento por ar comprimido e do resfriamento por imersão em água na geometria, propriedades mecânicas e na qualidade microestrutural das peças fabricadas. Esses métodos de resfriamento podem facilitar a obtenção de uma geometria mais precisas das peças, no entanto, podem impactar negativamente na

microestrutura e nas propriedades mecânicas, quando comparados com os resultados obtidos neste trabalho.

Além disso, dependendo da aplicação, é necessário garantir uma alta qualidade da peça. Para isso, uma sugestão relevante é investigar formas de minimizar a formação de inclusões de silicatos nas peças fabricadas por WAAM, a fim de melhorar características como tenacidade, usinabilidade e resistência à corrosão. Também é recomendado o estudo da aplicação de métodos para uniformizar os tamanhos dos grãos, como o monitoramento e controle da temperatura ao longo da peça durante o processo de manufatura, a normalização pós-fabricação e tratamentos de alívio de tensões. O que poderia melhorar a consistência das propriedades mecânicas e a qualidade geral das peças fabricadas.

Outra linha de pesquisa promissora seria a análise do efeito de diferentes tipos de arame de solda e gases de proteção na qualidade das peças fabricadas por WAAM. Embora este trabalho tenha utilizado o arame ER70S-6, a exploração de outros tipos de arames, bem como a variação na composição dos gases de proteção, poderia fornecer dados relevantes sobre como otimizar o processo para diferentes aplicações industriais.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, B. S. *Estudo da fabricação de ferramental de fundição por manufatura aditiva*. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/15205>. Acesso em: 10 abril 2023. 16
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E8/E8M*. [S.l.], 2016. 31
- ARAÚJO, V. C. *Manufatura aditiva e suas aplicações na indústria: uma revisão de literatura*. 2021. Russas: Universidade Federal do Ceará. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/57827/1/2021_tcc_vcaraujo.pdf. Acesso em: 10 mai 2023. 14
- AZO Materials. *AISI 1045 Medium Carbon Steel*. 2012. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6130>. Acesso em: 23 junho 2024. 54
- CHANDRASEKARAN, S. *Functionally graded materials for marine risers*. 2021. [S.l.]: Design of Marine Risers with Functionally Graded Materials. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356860892_Functionally_graded_materials_for_marine_risers_by_additive_manufacturing_for_high-temperature_applications_Experimental_investigations. Acesso em: 10 abril 2023. 15
- FRONIUS. *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): fabricação econômica de componentes metálicos*. 2024. Disponível em: <https://www.fronius.com/pt-br/brasil/tecnologia-de-soldagem/centro-de-informacoes/revista/2019/waam>. Acesso em: 15 maio 2024. 15
- GCAD CAM. *Como o AutoCAD transformou o desenho técnico*. 2024. Disponível em: <https://www.gcadcam.com.br/como-o-autocad-transformou-o-desenho-tecnico/>. Acesso em: 10 jun 2024. 23
- GFM. *Usinagem mecânica CNC*. 2022. Disponível em: <https://www.gfm.ind.br/usinagem-mecanica-cnc#:~:text=ENTENDA%20SOBRE%20USINAGEM%20MEC%C3%82NICA%20CNC,em%20diversas%20etapas%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o>. 26
- HERMANS, M.; OUDEN, D. *Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding*. 1999. Disponível em: <http://files.aws.org/wj/supplement/Hermans/ARTICLE4.pdf>. Acesso em: 14 maio 2024. 23
- HIGH SOLUTIONS. *Como é o processo de fabricação de peças metálicas?* 2018. Disponível em: <https://www.highsolutions.com.br/fabricacao-de-pecas-metalicas/>. 15
- INFOSOLDA. *Processo MIG/MAG: modos de transferências*. 2013. Disponível em: <https://infosolda.com.br/175-processo-mig-mag-modos-de-tranferencias/>. Acesso em: 10 jun 2024. 24
- LIMA, J. R. da S. *Manufatura aditiva por soldagem: uma revisão na literatura*. 2023. Russas: Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, 2023. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) –

Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/ri/handle/riufc/75096>. Acesso em: 12 abril 2023. 16

MENDES, L. P. *Manufatura aditiva: estudo sobre a técnica de deposição de energia direcionada (DED) na fabricação de componentes metálicos*. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/34086/1/ManufaturaAditivaDeposi%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 15 junho 2024. 19

MODENESI, P. J. *et al. Estudo de alguns parâmetros básicos da soldagem GMAW com transferência por curto-circuito*. 2011. Soldagem & Inspeção, v. 16, n. 1, p. 12-21, jan./mar. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/65MWH4xT5Wdq8cFKHS5RdBK/>. Acesso em: 12 maio 2024. 23

NERIS, M. M. *Apostila de Soldagem*. 2012. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Disponível em: http://www.cpscetec.com.br/cpscetec/arquivos/apostila_soldagem.pdf. Acesso em: 10 mai 2023. 14

PAVANATI, H. C.; AGUIAR, J. B. de. *Caracterização Microestrutural Amostra MA-MIG - Sorvete*. 2024. 52

RIJEZA. *Metalografia: o que é e para que é utilizada essa análise*. 2024. Disponível em: <https://rijeza.com.br/blog/metalografia-o-que-e-e-para-que-e-utilizada-essa-analise/>. 28

SACCHELLI. *Tipos de aço – conheça os principais e suas utilizações*. 2024. Disponível em: <https://sacchelli.com.br/tipos-de-aco-conheca-os-principais-e-suas-utilizacoes/#:~:text=Principais%20utiliza%C3%A7%C3%B5es,%2C%20pe%C3%A7as%20ferrovi%C3%A1rias%2C%20entre%20outros>. Acesso em: 23 junho 2024. 54

SINGH, S. R. *Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials*. 2020. [S.l.]: International Conference on Materials, Processing Characterization (pp. 118-128. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.030>. Acesso em: 10 mai 2023. 15

SOUZA, D. M. *Efeito do Resfriamento Ativo por Quase-Imersão nas Propriedades Mecânicas de Pré-Formas de Alumínio Fabricadas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco*. 2021. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.5523>. Acesso em: 15 maio 2024. 28, 29, 30

SprutCAM X. *Interface*. s.d. Disponível em: <https://kb.sprutcam.com/docs/SprutCAM/16/en/10003.html>. Acesso em: 15 maio 2024. 42

TOVEY, M. *Drawing and CAD in industrial design. Design Studies*. 1989. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0142-694X\(89\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0142-694X(89)90022-7). Acesso em: 10 maio 2024. 22

VERLINDE, W. *et al. Practical Guideline on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) for Gas Metal Arc Welding (GMAW)*. 2021. Disponível em: <https://www.bil-ibs.be/project/3d-printen-standaard-lasrobot-wire-and-arc-additive-manufacturing-waam>. Acesso em: 10 maio 2024. 19, 20, 22, 24, 25, 26, 37

WALLÉN, J. *The history of the industrial robot*. 2008. Linköping: Linköpings Universitet, Department of Electrical Engineering. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:316930/fulltext01.pdf>. Acesso em: 10 mai 2023. 14

Wurth. *ER70S-6 ARAME MIG*. s.d. Disponível em: https://s3.sa-east-1.amazonaws.com/bd-sp.canaldapeco.com.br/Wurth/13102020/PDFS_L7/0982705006.pdf. Acesso em: 23 junho 2024. 54

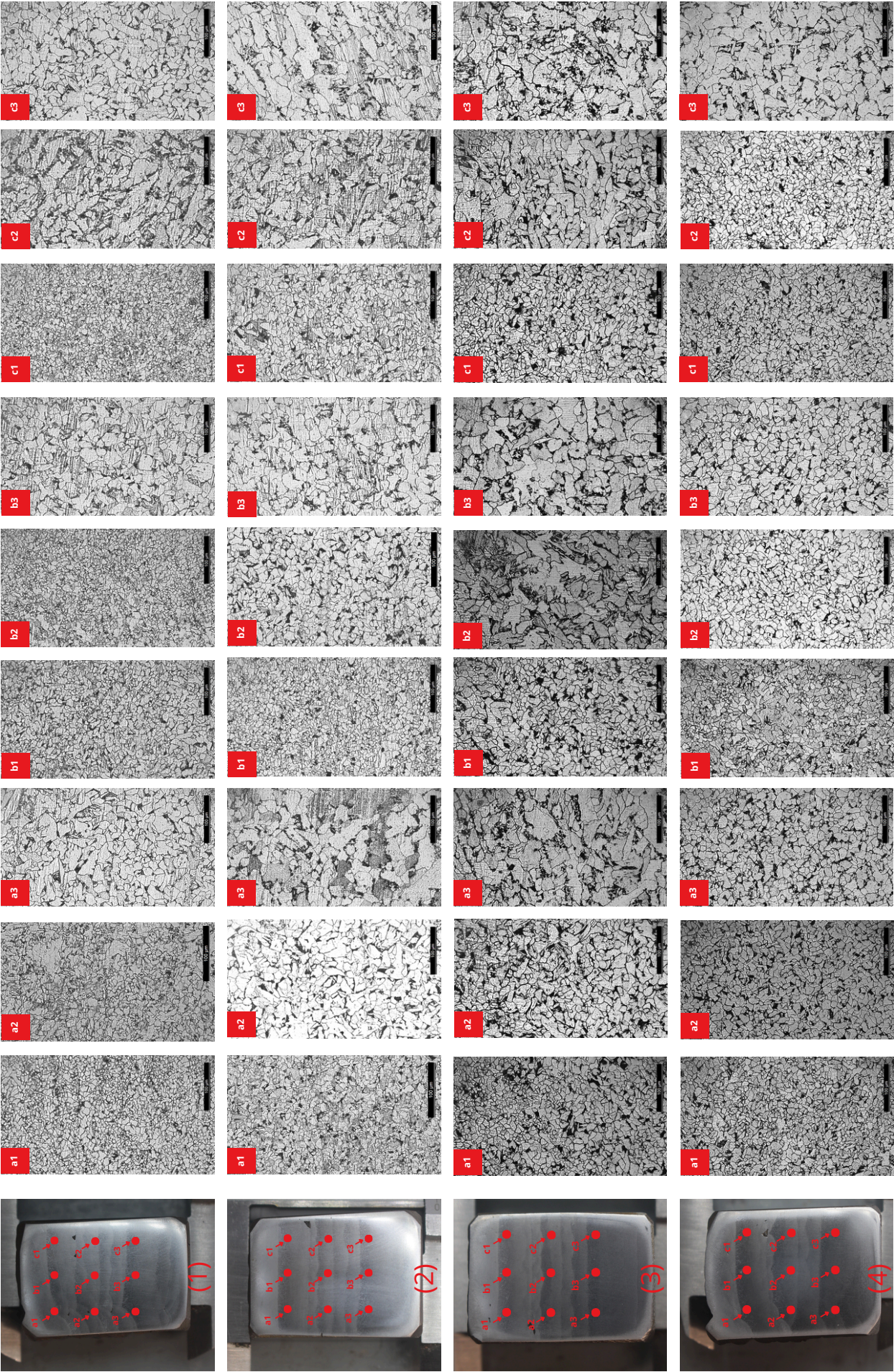
YU, H. Z. *Additive friction stir deposition: a deformation processing route to metal additive manufacturin*. 2022. [S.l.]: Additive Manufacturing Materials and Technologies. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21663831.2020.1847211>. Acesso em: 12 abril 2023. 16

ZARUR, G. D. *Análise de ensaios de tração de diversos corpos de prova metálicos em diversos estados*. 2022. Disponível em: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=pt-BR&user=Sk__rGgAAAAJ&citation_for_view=Sk__rGgAAAAJ:u-x6o8ySG0sC. Acesso em: 14 maio 2024. 27

ANEXOS

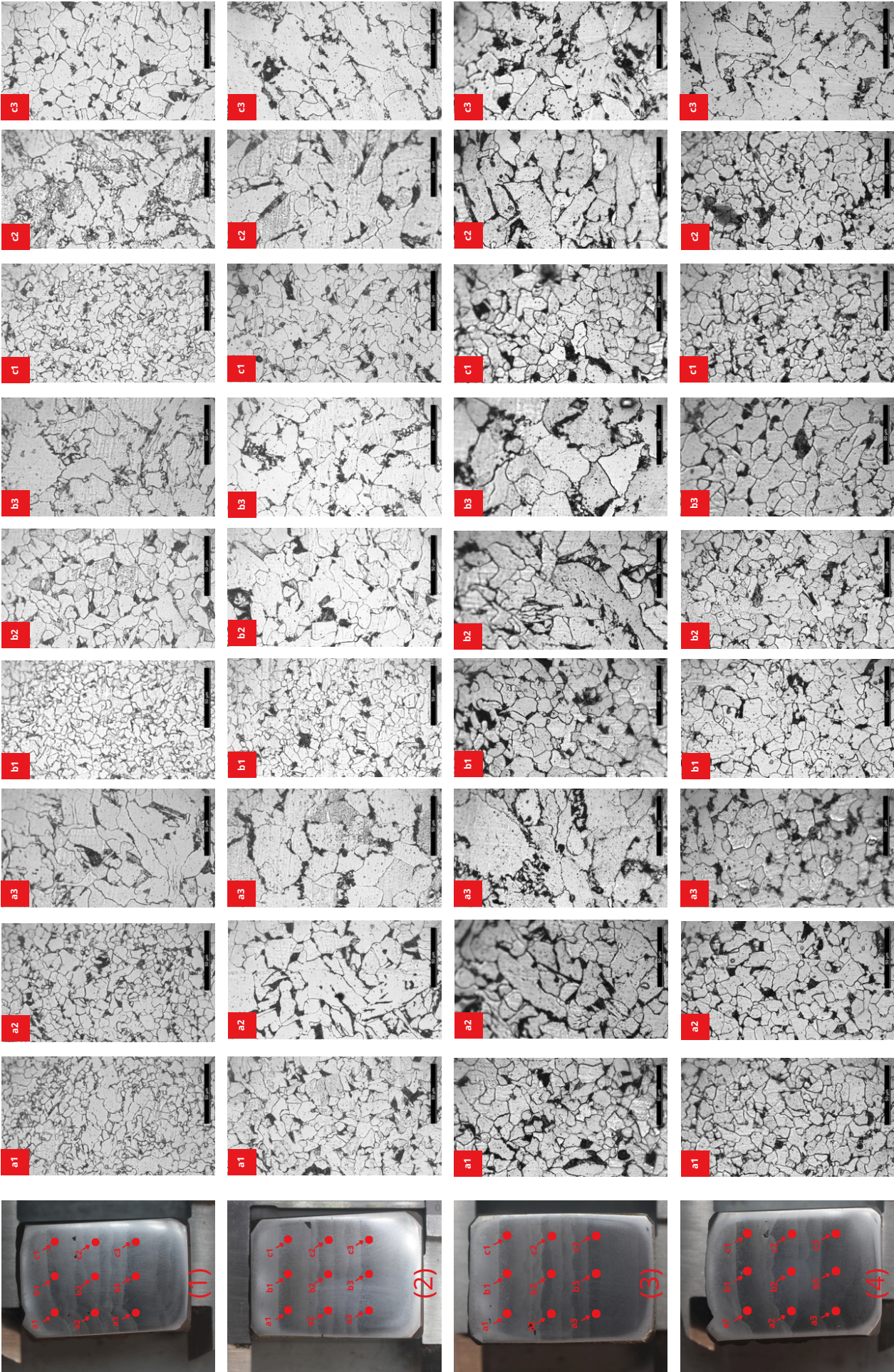
ANEXO A – ANÁLISE MICROGRÁFICA COM AUMENTO 200X E 500X

Aumento 200x



Fonte: Da Autora (2024)

Aumento 500x



Fonte: Da Autora (2024)

ANEXO B – RESULTADOS ENSAIO DE TRAÇÃO**RESULTADO DE ENSAIO**

Data do último ensaios: segunda-feira, 16 de outubro de 2023

Descrição da amostra

OS_2754.23_(15560.001)

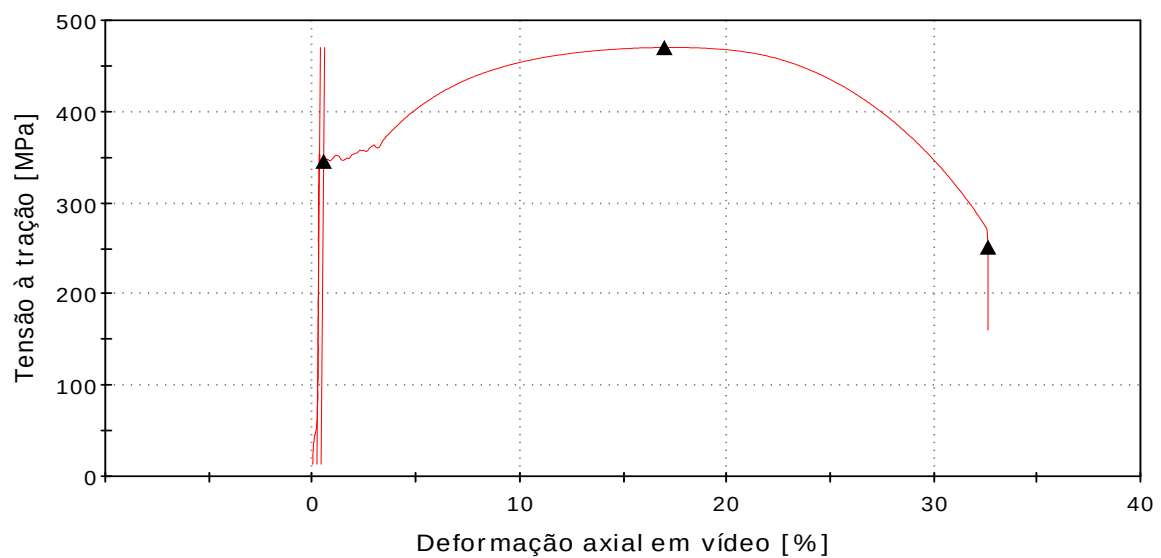
Instrumento: MEC-028 / MEC-022

Equipamento: MEC-001

Técnico Executor: Leandro da Silva

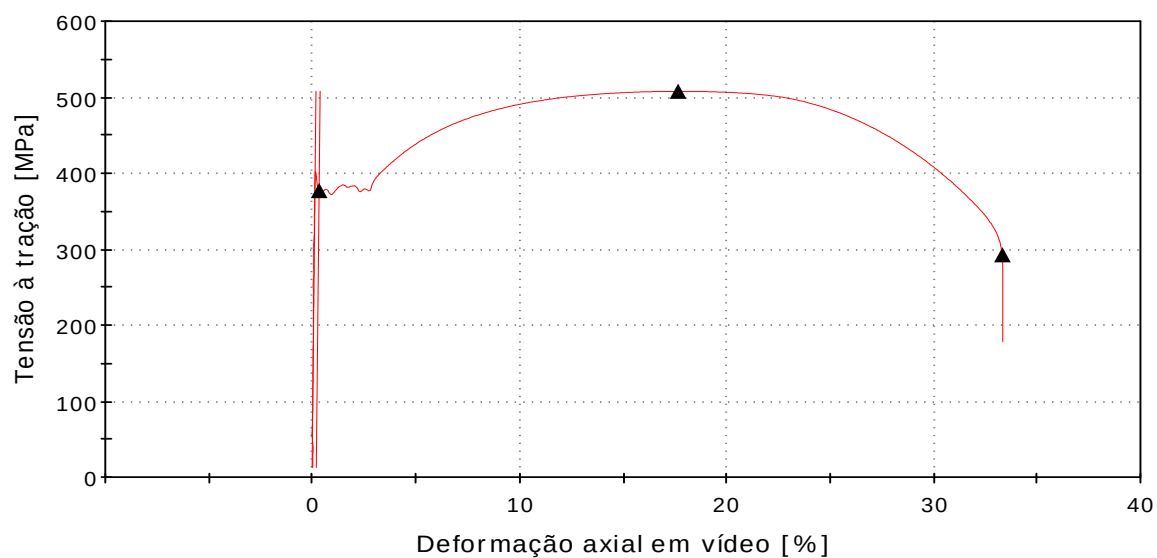
Temp: 22°C Umidade: 67%

Tipo de Corpo de Prova: Ø 12,5mm

Corpo de prova 1 a 1

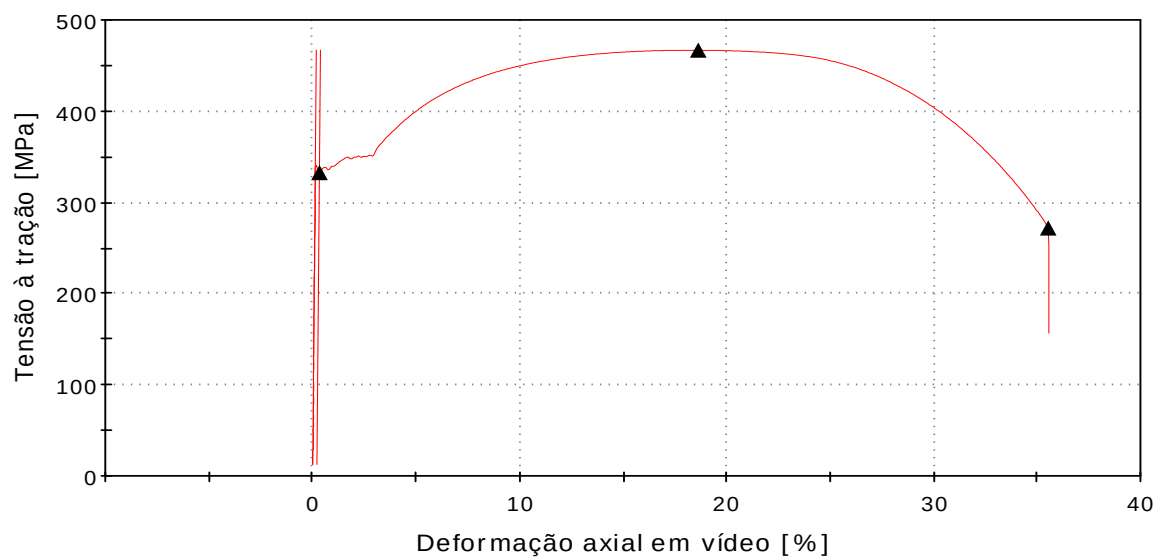
Nº do corpo de prova
1

Corpo de prova 2 a 2



Nº do corpo de prova
— 2

Corpo de prova 3 a 3



Nº do corpo de prova
— 3

Corpo de Prova	Diâmetro [mm]	L0 [mm]	Resistência Máxima [MPa]	Carga Máxima [kN]	Tensão de Escoamento (Rp0,2) [MPa]	Carga Escoamento (Offset 0.2 %) [kN]	Alongamento [%]	Redução de Área [%]	T.Esc/T.Ma x
01	8,91	36	470	29	346	22	33	79	0,74
02	9,00	36	508	32	378	24	33	74	0,74
03	8,91	36	467	29	333	21	36	79	0,71