



MANUFATURA ADITIVA POR FUSÃO LOCALIZADA MAFL DE ARAME ER70S-6: ESTUDO COMPARATIVO DE DUREZA E MICROESTRUTURA ENTRE AS DIFERENTES CAMADAS

Diogo Matos Schneider¹

Matheus Furlanetto dos Santos²

Célia de Fraga Malfati³

Henrique Cechinel Casagrande⁴

Anderson Daleffe⁵

Jovani Castelan⁶

Resumo: Este estudo investiga a microestrutura e a dureza de camadas depositadas por manufatura aditiva via fusão localizada (MAFL). Utilizando o arame ER70S-6, foi impressa uma parede única com 41 camadas sobrepostas, empregando uma máquina de solda MAG-CNC. A metodologia combinou análise termográfica durante a fabricação, ensaios de microdureza Vickers e análise metalográfica para correlacionar temperatura, microestrutura e dureza ao longo da peça. Os resultados principais revelam que a Zona Termicamente Afetada (ZTA) afeta significativamente a dureza do material, com as camadas inferiores, submetidas a múltiplos ciclos térmicos, exibindo as maiores variações de dureza (145,20 HV a 181,75 HV). A análise microestrutural demonstrou a heterogeneidade da microestrutura, com grãos finos na base devido ao rápido resfriamento e grãos mais grosseiros nas camadas superiores. Ao fornecer novas percepções sobre a heterogeneidade microestrutural e de dureza, este estudo aprofunda a compreensão dos desafios da MAFL-GMAW na fabricação de peças metálicas. Tais informações são essenciais para otimizar processos, garantir o controle de qualidade e impulsionar a busca por inovação.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. MAFL. Ensaio de dureza. Microestrutura. ZTA.

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva por fusão localizada (MAFL), utilizando a soldagem a arco metálico com gás (GMAW), vem transformando a indústria metalúrgica, permitindo a fabricação de peças com geometrias complexas e personalizadas. No

¹ Mestrado em Engenharia Metalúrgica, 2025. E-mail: eng.diogo.schneider@gmail.com

² Mestrado em Engenharia Metalúrgica, 2025. E-mail: matheus.furlanetto.ds@gmail.com

³ Doutora em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais, 2025. E-mail: materiaisxenergia@gmail.com

⁴ Doutorando em Ciência e Eng. de Materiais, 2025. E-mail: henrique_cechinel@hotmail.com

⁵ Doutor em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais, 2025. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

⁶ Doutor em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais, 2025. E-mail: jovani.castelan@satc.edu.br



entanto, a natureza cíclica de aquecimento e resfriamento inerente ao processo GMAW introduz desafios específicos relacionados à microestrutura e propriedades mecânicas do material depositado.

Este artigo explora a relação intrincada entre os parâmetros do processo MAFL-GMAW, a microestrutura resultante e as propriedades de dureza em peças de aço SAE 1020. A pesquisa examina a influência da ZTA nas propriedades mecânicas do corpo de prova, analisando a variação da microestrutura e da dureza Vickers ao longo da altura da peça, abrangendo desde a base até o topo.

Através de ensaios de microdureza Vickers e análises metalográficas, este estudo busca correlacionar as características microestruturais, como tamanho de grão, fases presentes e defeitos, com os valores de dureza obtidos. O objetivo é fornecer uma compreensão aprofundada do impacto dos parâmetros do processo MAFL-GMAW nas propriedades finais da peça, contribuindo para a otimização do processo e a garantia da qualidade em aplicações de manufatura aditiva.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A manufatura aditiva de metais, utilizando técnicas como a soldagem por deposição a arco com fio (WAAM) ou MAFL, está revolucionando a fabricação de componentes metálicos complexos. A capacidade de controlar a microestrutura do metal durante o processo de fabricação é crucial para alcançar as propriedades mecânicas, térmicas e químicas desejadas na peça final.

2.1 MICROESTRUTURA DE MATERIAIS METÁLICOS

A microestrutura refere-se à estrutura interna de um material em escala microscópica. É composta por diferentes fases, grãos e constituintes que influenciam diretamente as propriedades do material como um todo [1]. A análise da microestrutura, conhecida como metalografia, é uma ferramenta essencial nesse processo. A metalografia envolve a preparação da amostra, que inclui etapas como corte, embutimento, lixamento e polimento, seguida pelo ataque químico para revelar os detalhes da microestrutura [2]. A análise microscópica, utilizando microscópios



ópticos ou eletrônicos, permite a visualização e caracterização das diferentes fases, contornos de grão e defeitos presentes no material [1;3].

Uma fase é uma porção homogênea de um material com composição química e estrutura cristalina uniformes. Um material pode ser composto por uma única fase (monofásico) ou múltiplas fases (polifásico). Por exemplo, a água pura é um sistema monofásico, enquanto uma mistura de água e óleo é um sistema bifásico [4]. Em ligas metálicas, as fases são formadas pela combinação de diferentes elementos químicos. As diferentes fases presentes em uma liga metálica influenciam suas propriedades mecânicas, como resistência, dureza e ductilidade.

Os constituintes da microestrutura são arranjos específicos de fases que conferem características únicas ao material. Alguns exemplos importantes de constituintes da microestrutura incluem:

Ferrita: Solução sólida de carbono em ferro alfa (α), presente em aços. A ferrita é uma fase relativamente macia e dúctil [4;5].

Perlita: Constituinte lamelar formado por camadas alternadas de ferrita e cementita (Fe_3C). A perlita apresenta uma combinação de resistência e ductilidade [4;5].

Cementita: Carboneto de ferro (Fe_3C), um constituinte duro e frágil que aumenta a resistência do aço [4].

Martensita: Fase metaestável formada pelo rápido resfriamento do aço austenítico. A martensita é uma fase extremamente dura e resistente, mas também frágil [1;4].

Bainita: Microestrutura formada em aços, com características intermediárias entre a perlita e a martensita. Como característica, a bainita apresenta boa combinação de resistência e tenacidade [1].

A aparência real das microestruturas pode variar conforme o tipo de aço, processamento e magnificação utilizada. Para uma análise precisa, a observação de imagens reais de metalografia e a consulta à literatura especializada são fundamentais. Veja, a seguir, na Fig. 1, uma descrição simplificada das representações dos aspectos das cinco constituintes mencionadas.

Figura 1: Constituintes da microestrutura.



Fonte: Baseado de [1;2;6].

Os processos de fabricação, como laminação, forjamento, soldagem e tratamentos térmicos, influenciam significativamente a microestrutura dos materiais. A microestrutura resultante de cada processo depende de diversos fatores, como composição química do material, parâmetros do processo (temperatura, tempo, velocidade de resfriamento) e presença de elementos de liga.

Processamento Termomecânico: Processos como a laminação a quente e o forjamento a quente modificam a microestrutura dos aços, levando à formação de grãos alongados e orientados na direção da deformação [1;5].

Tratamentos Térmicos: Os tratamentos térmicos, como têmpera, revenimento e normalização, alteram a microestrutura dos aços, controlando a formação de diferentes fases e constituintes, como a martensita, a bainita e a perlita [1;6].

Soldagem: A soldagem por deposição a arco com fio (WAAM), utilizada na manufatura aditiva, gera um ciclo térmico localizado que afeta a microestrutura do material na região da junta soldada [1;2;5].

2.1.1 Zona Termicamente Afetada (ZTA)

A região da junta soldada, conhecida como zona termicamente afetada (ZTA), sofre alterações microestruturais devido ao ciclo térmico da soldagem [1]. Essa região, adjacente ao cordão de solda, apresenta características distintas do metal base, como grãos maiores ou menores, diferentes fases e precipitados, impactando suas propriedades mecânicas [1;5]. A ZTA é um fator crítico em processos de fabricação como a manufatura aditiva, onde a deposição de múltiplas camadas gera



uma ZTA em cada camada subjacente, demandando atenção especial ao controle do processo para garantir a qualidade final da peça [1].

A manufatura aditiva, embora se baseie em princípios de deposição de material similares à soldagem, apresenta uma diferença crucial em relação à ZTA. Na soldagem tradicional, a ZTA está concentrada ao redor da junta soldada. Na manufatura aditiva, cada camada depositada cria uma nova ZTA na camada imediatamente abaixo. Isso significa que a peça final terá uma microestrutura heterogênea, com múltiplas ZTAs distribuídas ao longo de sua altura. Essa característica exige um controle rigoroso dos parâmetros do processo para garantir a uniformidade das propriedades mecânicas da peça. A formação da ZTA em cada camada depositada influencia diretamente as propriedades finais da peça produzida por manufatura aditiva.

Mudanças Microestruturais: O calor da deposição causa o crescimento dos grãos na ZTA, afetando a resistência e a tenacidade do material [1].

Tensões Residuais: As diferentes taxas de resfriamento entre as camadas podem gerar tensões residuais significativas na ZTA. Essas tensões podem resultar em distorção da peça, reduzir a resistência à fadiga e até mesmo causar a nucleação e propagação de trinca [1;2].

Heterogeneidade da Microestrutura: A presença da ZTA em cada camada resulta em uma microestrutura heterogênea ao longo da seção transversal da peça. Essa heterogeneidade pode levar à variação das propriedades mecânicas e comprometer o desempenho da peça em serviço [2].

Na soldagem, a região do material adjacente ao cordão de solda sofre alterações microestruturais significativas devido ao rápido aquecimento e resfriamento [1;5]. A microestrutura da ZTA é crucial para a resistência da junta soldada, e o controle dos parâmetros de soldagem é essencial para garantir a formação de uma microestrutura adequada [1]. Aços com microestrutura martensítica ou bainítica refinada na ZTA apresentam alta dureza, o que pode ser desejável em algumas aplicações [1;5]. No entanto, a alta dureza também pode estar associada à fragilidade, um tratamento térmico posterior, como o alívio de tensões, pode ser necessário para melhorar a tenacidade da junta soldada [1].



2.1.1 Metalografia

A metalografia é um campo crucial na ciência e engenharia de materiais que examina a microestrutura de materiais, principalmente metais, para entender suas propriedades e comportamento. Esse estudo revela padrões intrincados dentro dos materiais, invisíveis a olho nu, que ditam suas características e desempenho. As informações obtidas por meio da metalografia são usadas em uma variedade de aplicações, incluindo controle de qualidade, análise de falhas e desenvolvimento de novos materiais [1;5;7].

Para investigar a microestrutura, a metalografia emprega uma variedade de técnicas, com a microscopia sendo a mais importante. Amostras de material passam por um processo meticuloso de preparação, que geralmente envolve corte, montagem, lixamento, polimento e ataque químico. O objetivo é obter uma superfície lisa e espelhada que possa ser observada sob um microscópio [5].

O ataque químico é uma etapa particularmente importante, que envolve o tratamento da superfície polida com um reagente químico. Este reagente ataca seletivamente diferentes fases ou constituintes presentes no material, revelando-os como áreas de contraste variável sob o microscópio [5].

Após a preparação, as amostras são examinadas usando microscópios ópticos ou eletrônicos, dependendo da ampliação e resolução necessárias. Os microscópios ópticos usam luz visível para iluminar a amostra, enquanto os microscópios eletrônicos usam um feixe de elétrons, permitindo ampliações muito maiores e revelando detalhes mais finos da microestrutura [7]. Por meio da análise metalográfica, é possível obter diversas informações sobre o material, tais como:

Tamanho de grão: refere-se ao tamanho dos grãos individuais dentro de um material, uma característica crucial que afeta propriedades como resistência e tenacidade [4].

Fases presentes: descreve os vários constituintes distintos dentro de um material, cada um com sua própria estrutura e propriedades únicas, como ferrita, perlita, cementita e martensita [4].



Distribuição de precipitados e inclusões: descreve a presença e arranjo de precipitados (partículas finas formadas dentro do material) e inclusões (impurezas ou elementos estranhos), impactando propriedades como resistência e ductilidade [4;7].

Defeitos: abrange quaisquer imperfeições ou irregularidades dentro da estrutura do material, como porosidade, microtrincas ou falhas de fabricação, que podem comprometer sua resistência e levar à falha [4;7].

Processamento: refere-se ao histórico de fabricação de um material, incluindo tratamentos térmicos ou processos mecânicos, que influenciam significativamente sua microestrutura e propriedades resultantes [4;7].

2.1.2 Ensaio de dureza

O ensaio de Dureza mede a resistência de um material a riscos, arranhões ou penetração por um objeto mais duro. Este ensaio é amplamente utilizado para controle de qualidade, análise de falhas e desenvolvimento de novos materiais. O ensaio envolve a aplicação de uma força conhecida a um penetrador, geralmente feito de um material muito duro como diamante ou aço temperado, na superfície do material a ser testado. A profundidade ou o tamanho da impressão resultante é então medido, correlacionando-se com um valor de dureza [5;8]. A seguir, apresenta-se exemplos de alguns métodos de ensaio de dureza.

Dureza Rockwell: Mede a profundidade da impressão causada por um penetrador sob uma carga aplicada em dois estágios (pré-carga e carga principal). É um método rápido e simples, ideal para aplicações industriais [5].

Dureza Brinell: Determina a dureza medindo o diâmetro da impressão deixada por uma esfera de aço endurecido sob uma carga específica. É frequentemente usado para materiais com dureza relativamente baixa [5].

Dureza Vickers: Utiliza um penetrador piramidal de diamante e é adequado para medir a dureza de uma ampla gama de materiais, desde metais muito macios até cerâmicas extremamente duras [8;9].



A escolha do método de dureza depende de fatores como o tipo de material, a espessura da amostra, a faixa de dureza esperada e os requisitos de precisão. O ensaio de dureza está correlacionado a outras propriedades mecânicas importantes, como resistência à tração e resistência ao desgaste. Materiais mais duros geralmente exibem maior resistência à tração e ao desgaste. No entanto, é importante notar que a dureza é uma medida de uma propriedade específica e não fornece uma imagem completa do comportamento mecânico de um material.

2.2 MANUFATURA ADITIVA

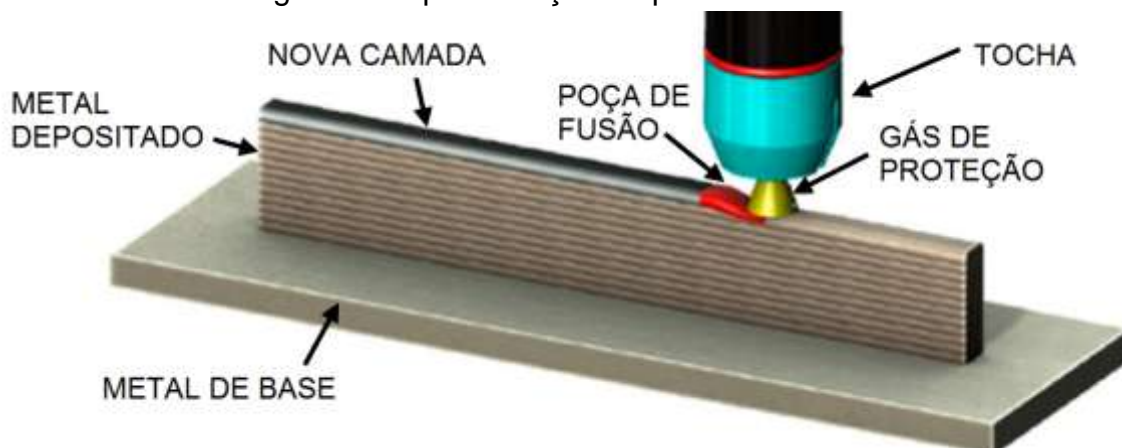
As pesquisas sobre fabricação de objetos por meio da adição de materiais camada por camada tem registro a partir da década de 1980. A técnica era inicialmente conhecida como prototipagem rápida (*Rapid Prototyping* - RP), por ser capaz de produzir protótipos tridimensionais de maneira rápida e de forma generalizada. A norma ASTM F2792 (2012), da Sociedade Americana de Teste e Materiais, redefiniu essa tecnologia como Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing* - AM), caracterizando-a como um processo de junção de materiais para criar objetos a partir de um modelo 3D, geralmente camada por camada, diferenciando-se dos processos de fabricação subtrativa [10].

Atualmente, a manufatura aditiva tem se destacado como uma tecnologia revolucionária na indústria. Inicialmente aplicada principalmente a polímeros, à manufatura aditiva também tem avançado significativamente no campo da metalurgia, oferecendo novos processos para a produção de peças metálicas com geometrias complexas, propriedades mecânicas e composições específicas. Nas próximas sessões, será abordado o processo de manufatura aditiva em metais.

2.2.1 Manufatura Aditiva por fusão localizada (MAFL)

O processo de manufatura aditiva por arco de arame, *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM), consiste na deposição de material camada por camada. É uma combinação de material de soldagem a arco e de matéria-prima para manufatura aditiva (MA) [11]. A Fig. 2 ilustra com detalhes o processo.

Figura 2: Representação do processo MAFL.



Fonte: Adaptado de [12].

Existem outros processos de manufatura aditiva de metais como, por exemplo: A Fusão Seletiva a Laser (*Selective Laser Melting* - SLM), Deposição a Laser de Metal (*Laser Metal Deposition* - LDM), Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering* - SLS). A técnica WAAM traz vantagens como menor custo de equipamento de soldagem, ampla disponibilidade de arames, tamanho de peça virtualmente ilimitado e maiores taxas de deposição. Neste quesito, enquanto que SLM alcança uma taxa de 0,1kg/h ou LMD sendo capaz de 1kg/h, a técnica WAAM é capaz de depositar até 6kg/h [13;14].

Taberner [14] cita que, comparado com SLM ou LDM, a entrada de calor é alta no WAAM, o que induz a altas tensões residuais e distorção, o que diminui a precisão da peça em relação a outros métodos de MA e, consequentemente, sempre necessita uma etapa de usinagem para acabamento. Portanto o processo WAAM é adequado para a fabricação de pré-formas de peças de grande porte que são fabricadas em materiais de alto custo e exigem alto volume de usinagem.

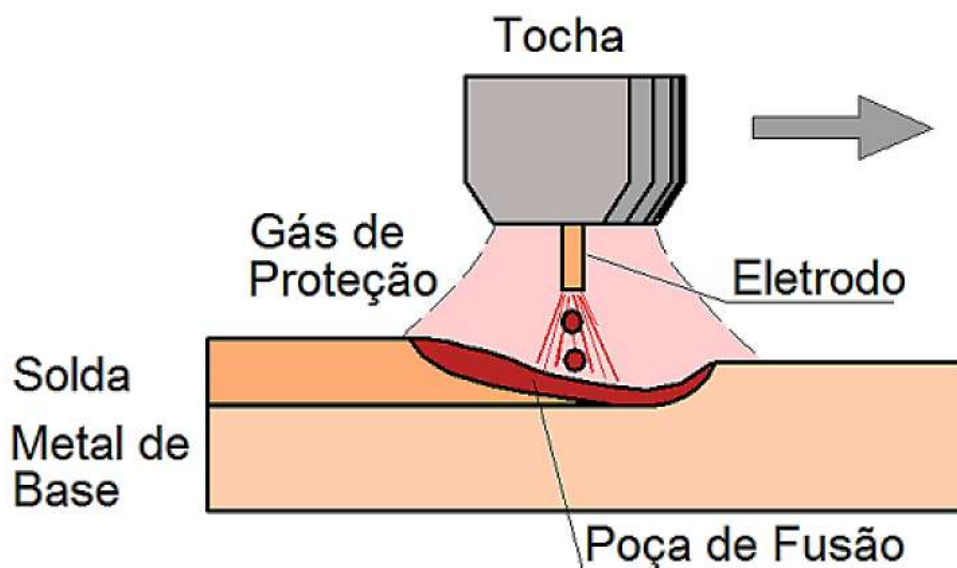
O processo de Manufatura Aditiva por Arco Elétrico (MA-WAAM) tem se destacado como uma tecnologia promissora para a fabricação de componentes metálicos de médio e grande porte, especialmente quando aplicada a aços de baixo carbono [28-31], aços de baixa liga [32] e aços inoxidáveis como o 310 [33-34]. Essa técnica utiliza a deposição camada a camada de material metálico fundido por arco elétrico, possibilitando alta taxa de deposição e excelente aproveitamento de material. Nos aços de baixo carbono e baixa liga, o MA-WAAM permite a obtenção de peças com boa soldabilidade e ductilidade, enquanto no aço inoxidável 310, voltado para aplicações em altas temperaturas, garante boa resistência à oxidação e estabilidade

térmica. Além disso, a combinação do processo MA com etapas subsequentes de forjamento tem mostrado resultados expressivos na refinagem microestrutural, redução de porosidades e melhoria das propriedades mecânicas, aproximando as peças fabricadas por WAAM das características de componentes forjados convencionais [35-38]. O avanço contínuo dessa tecnologia está transformando o cenário da manufatura metálica, tornando possível produzir geometrias complexas, reduzir custos de produção e tempo de fabricação, e ampliar as aplicações industriais em setores como o aeroespacial, automotivo e de energia.

2.2.2 Soldagem GMAW

A soldagem a arco elétrico com proteção gasosa (*Gas Metal Arc Welding - GMAW*) usa um fio de eletrodo sólido que é continuamente alimentado por um carretel. A solda é produzida quando o arco elétrico derrete a extremidade do fio e a superfície do metal base. A proteção de gás flui para fora do bico da pistola de soldagem para proteger da contaminação atmosférica. A soldagem GMAW é extremamente rápida e econômica porque pode produzir soldas longas rapidamente que exigem muito pouca limpeza pós-soldagem [15]. A Fig. 3 mostra o esquemático deste processo.

Figura 3: Representação da soldagem GMAW.



Fonte: Adaptado de [15].

A soldagem GMAW é um dos processos de soldagem mais comumente usados para MAFL e tem sido usado por muitas décadas em superfícies,



revestimentos e manufatura aditiva. Nos últimos anos, o desenvolvimento de novos sistemas de controle para fontes de energia de soldagem a arco elétrico permitiu o desenvolvimento de novas variantes de processo de soldagem, como processos de arco curto controlado e arco de pulverização controlado. Os processos modernos de soldagem a arco curto controlado, em particular, são usados para manufatura aditiva devido à entrada de energia reduzida que eles fornecem em comparação com processos convencionais [16;17]. Essa característica é particularmente importante na manufatura aditiva, pois ajuda a controlar a geometria do cordão e minimizar a distorção da peça. Os processos de arco curto controlado também permitem um controle preciso da taxa de deposição do material, o que é essencial para a construção de peças com geometrias complexas. Além disso, a soldagem GMAW oferece uma ampla gama de opções de materiais, incluindo aços carbono, aços inoxidáveis e ligas de alumínio.

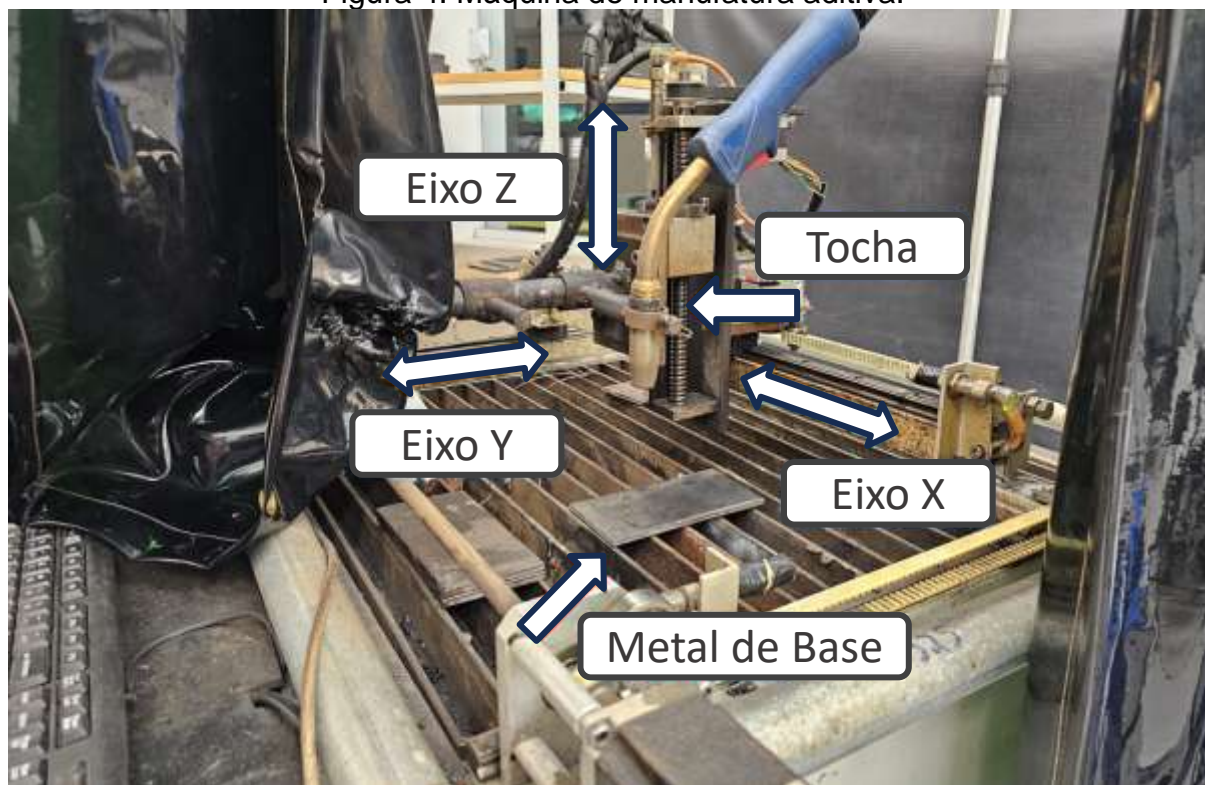
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste estudo consiste em fabricar um corpo de prova simples com o intuito de analisar as possíveis diferenças de microestrutura e dureza entre cada camada depositada. A fabricação da peça foi conduzida no laboratório de manufatura aditiva do Centro Universitário da SATC (UNISATC). Como material de base (substrato) para a manufatura aditiva, foi selecionado o aço SAE 1020, devido à sua ampla disponibilidade e baixo custo, características que o tornam adequado para estudos experimentais.

3.1 MÁQUINA DE MANUFATURA ADITIVA

Para a fabricação da peça, foi utilizado a máquina de manufatura aditiva fabricada na UniSATC, como demonstrado na Fig. 4. O sistema foi desenvolvido com base em uma máquina de solda modelo *Smashweld 250E* da marca ESAB, que foi modificada, a tocha foi acoplada a um braço CNC (Centro Numérico Computadorizado), permitindo a movimentação necessária para a deposição do arame sobre a peça [18].

Figura 4: Máquina de manufatura aditiva.



Fonte: Do autor (2024).

A máquina de manufatura aditiva possui comunicação externa com o software de programação denominado *MACH3*. Este software possui programação CNC, responsável pelo desenvolvimento das trajetórias de deposição de metal, utilizando coordenadas nos três eixos (X, Y e Z).

3.1.1 Câmera térmica

O conjunto completo da máquina de manufatura dispõe de uma câmera infravermelha da marca *Optris*, capaz de visualizar e medir as temperaturas ao longo do processo de deposição de material. Este equipamento foi utilizado para registrar a temperatura ao longo da camada sendo depositada (gradiente horizontal) e das camadas inferiores previamente impressas (gradiente vertical).

3.2 ARAME DE SOLDA

Por se tratar de um estudo comparativo entre as camadas da peça fabricada por meio da MAFL, o arame de solda não foi o foco do estudo, portanto foi

utilizado arame de solda ER70S-6 da marca Balmer, comercializado em bobinas de 15 kg e com diâmetro de 1,00 mm, em conformidade com a norma AWS A5.18.

O ER70S-6 é um tipo comum de arame utilizado na Soldagem a Arco com Gás Metálico (GMAW). Tem alto rendimento, baixo volume de respingos e boa fluidez. Pode ser utilizado em todas as posições de soldagem. Ideal para aços de estruturas metálicas em geral, chapas e perfis, tubos e vasos de pressão, estruturas metálicas, serralherias e oficinas, etc. [19]. As propriedades químicas do arame estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do arame ER70S-6.

Componente	Valor (%)
Carbono (C)	0,07
Manganês (Mn)	1,47
Silício (Si)	0,88
Fósforo (P)	0,0120
Enxofre (S)	0,012
Níquel (Ni)	0,017
Cromo (Cr)	0
Molibidênio (Mo)	0
Vanádio (V)	0

Fonte: Balmer [19] (2021).

3.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Os parâmetros de soldagem adotados são exibidos na Tabela 2, os quais podem variar conforme as tolerâncias existentes na máquina de solda e durante o decorrer da execução das camadas. O gás de proteção utilizado no processo foi a mistura de 85% de Argônio (Ar) com 15% de dióxido de carbono (CO₂). Essa mistura de gases é frequentemente utilizada em soldagem GMAW para proteger a poça de fusão da contaminação atmosférica.

Tabela 2: Parâmetros de soldagem adotados.

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	19,0
Corrente (A)	144
Vazão gás (L/min)	13,9
Velocidade do arame (m/min)	5,5
Deposição (kg/h)	0,65
Velocidade de soldagem (mm/min)	200,0
Velocidade de avanço (mm/min)	350,0

Fonte: Do Autor (2024).

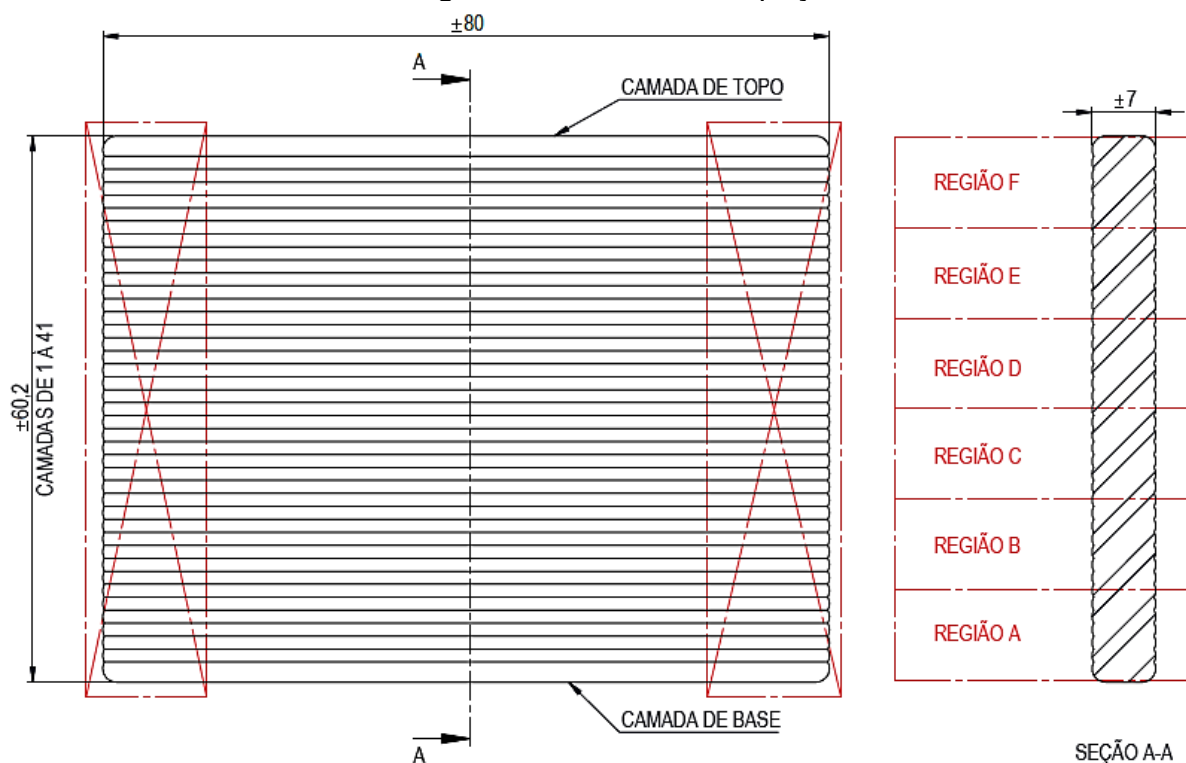
3.4 CORPO DE PROVA

O objetivo deste estudo é comparar as propriedades das diferentes camadas da peça. Para isso, foi fabricado um corpo de prova com geometria simples, no formato de uma parede. A impressão foi realizada em linhas, onde cada camada corresponde a um único cordão de solda em largura.

Para os ensaios de microdureza e metalografia, a peça foi cortada ao meio em sua seção transversal. Diferentemente de outros estudos, este considerou toda a altura da peça, incluindo o metal de base.

Para facilitar a análise entre as camadas, optou-se por agrupá-las em regiões. Foi desenvolvido um esquema que dividiu a peça em seis regiões distintas ao longo da altura. As dimensões do corpo de prova, assim como as regiões demarcadas para os ensaios, estão representadas na Fig. 5.

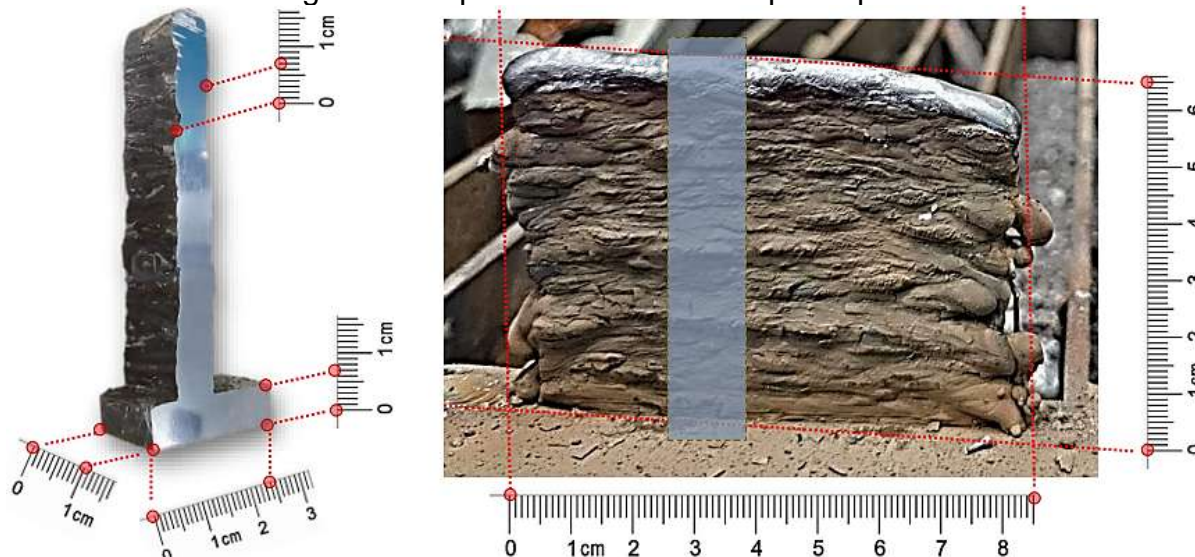
Figura 5: Dimensões da peça.



Fonte: Do autor (2024).

Foram depositadas 41 camadas com uma largura aproximada de 7 mm, sendo que as extremidades da peça (início e fim do cordão) foram excluídas da análise a fim de garantir maior regularidade e confiabilidade nos resultados. A Fig. 6 ilustra como foi aplicado o corte para preparar o corpo de prova para os ensaios.

Figura 6: Esquema de corte do corpo de prova.



Fonte: Do autor (2024).

3.5 ENSAIO DE MICRODUREZA

O ensaio de microdureza Vickers é um método amplamente utilizado para avaliar a resistência de um material à deformação plástica. A técnica consiste em usar um penetrador de diamante em forma de pirâmide, com ângulo de 136° entre as faces opostas, para criar uma indentação na superfície do material sob análise. A partir da medição das diagonais da indentação, calcula-se a área de contato e, consequentemente, a dureza Vickers (HV). [8] O valor da dureza Vickers é obtido pela razão entre a força aplicada (F) e a área da indentação (A), expressa em (1):

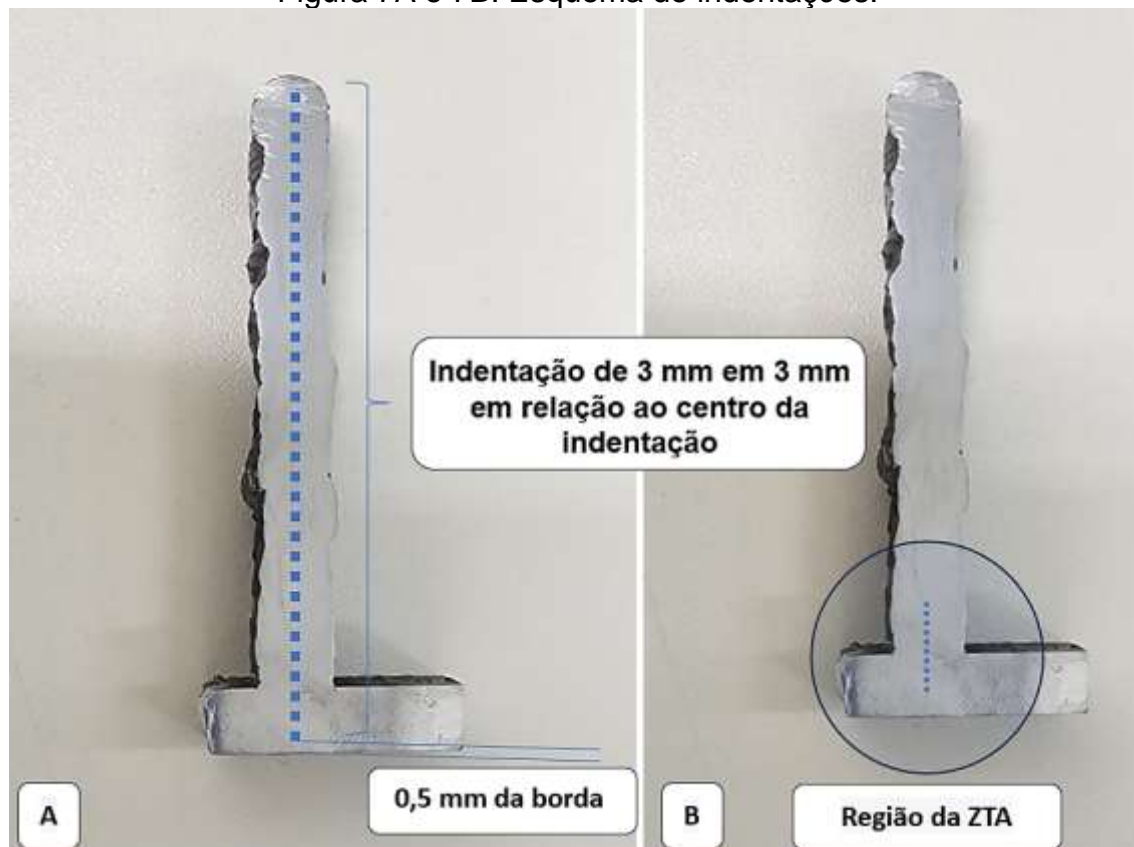
$$HV = 1,8544 * \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

Onde 'd' representa a média das diagonais da indentação. [8] O ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6507, utilizando um microdurômetro modelo HMV-2TADW da marca SHIMADZU®.

A fim de analisar a dureza entre os cordões da peça, foram realizadas 21 indentações na face, a uma distância de 3 mm a cada penetração, partindo de 0,5 mm da face inferior do metal de base. Para analisar com maiores detalhes a ZTA, foi feito um segundo ensaio na qual foram realizadas 18 indentações na face, a uma distância de 0,3 mm a cada penetração, partindo de 0,3 mm da face inferior do metal de base. Todas as indentações desde ensaio foram realizadas aplicando uma força de 9,807

N, com um tempo de penetração de 10 segundos. A Fig. 7A e 7B representam como foram realizados os ensaios de microdureza no corpo de prova.

Figura 7A e 7B: Esquema de indentações.



Fonte: Do autor (2024).

3.5 ENSAIO DE METALOGRAFIA

Para a análise da microestrutura das amostras fabricadas por manufatura aditiva, foi realizado um ensaio de metalografia com o objetivo de identificar as fases presentes e avaliar possíveis mudanças microestruturais. O ensaio foi conduzido utilizando um microscópio óptico modelo Olympus BX51M, conforme as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 15454.

O procedimento metalográfico seguiu quatro etapas principais: preparação da amostra, lixamento e polimento, ataque químico e análise microscópica. O ataque químico foi realizado com uma solução de Nital 2% (ácido nítrico - HNO_3 e etanol - $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), com um tempo de exposição de 10 segundos, a fim de revelar a microestrutura das amostras. Esse processo permitiu observar detalhadamente as



características das camadas depositadas e a possível influência das condições do processo sobre a formação das fases metálicas.

4 ANÁLISE DOS DADOS

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios de microdureza e análise metalográfica do corpo de prova estudado. Os dados coletados permitem avaliar a influência dos parâmetros de deposição sobre as propriedades microestruturais e mecânicas do material.

A análise foi conduzida com foco na comparação das diferentes camadas depositadas, levando em consideração as regiões ao longo da altura da peça e o efeito das condições de processo sobre a formação das fases e o comportamento de endurecimento. Os resultados permitem compreender como a temperatura da camada depositada influencia as camadas inferiores da peça, gerando alterações de propriedades ao longo da altura.

A seguir, será apresentada uma análise detalhada de cada região, correlacionando os valores de temperatura coletados por termografia e os valores de dureza com as características microestruturais observadas nas imagens metalográficas. Essa abordagem permitirá identificar possíveis variações na microestrutura e nas propriedades mecânicas ao longo do corpo de prova.

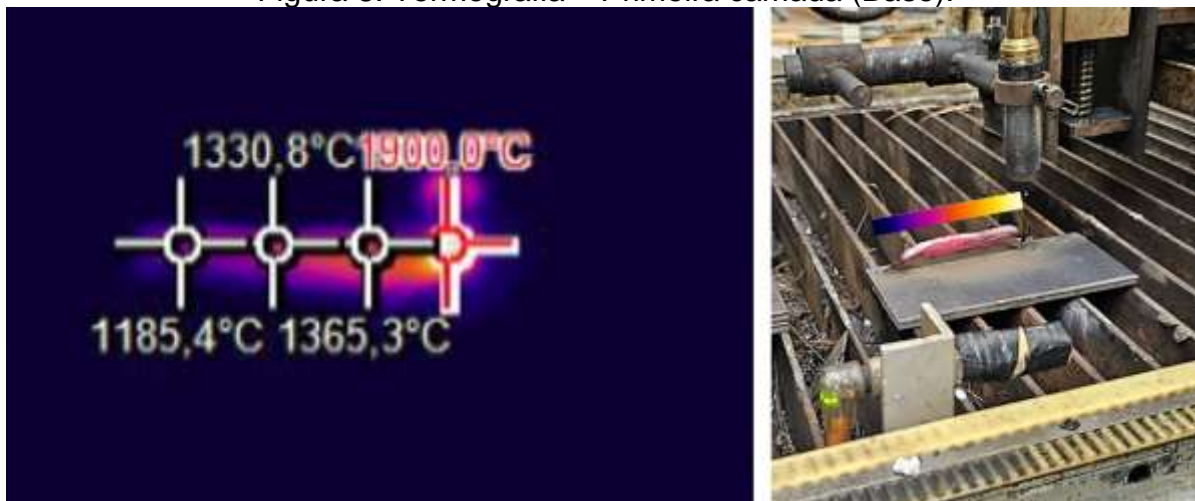
4.1 ANÁLISE TERMOGRÁFICA

Ao analisar o processo de manufatura através da ótica termográfica, a alta temperatura de fusão de 1900,0°C observada na Região A (Base) é um fator crucial que influencia diretamente a microestrutura do material. Esse rápido aquecimento e o subsequente resfriamento, característico de processos como a manufatura aditiva por deposição de metal, levam à formação de grãos finos na região. A solidificação rápida restringe o tempo para o crescimento dos grãos, resultando em uma microestrutura mais refinada [1].

A presença da Zona de Transição Termomecânica (ZTA) na Região A é outro aspecto importante a ser destacado. Essa zona, localizada entre o metal base e a zona de fusão, é caracterizada por um gradiente de temperatura acentuado e por ciclos térmicos complexos durante o processo de fabricação. Como mencionado, a

ZTA está propensa a transformações de fase devido ao calor intenso. Essas transformações de fase podem levar à formação de diferentes microestruturas e, conseqüentemente, afetar as propriedades mecânicas do material na ZTA.

Figura 8: Termografia – Primeira camada (Base).



Fonte: Do autor (2024).

Ao analisar as regiões “B” até “D”, é possível identificar que à medida que nos afastamos da base, a temperatura diminui, resultando em uma microestrutura com grãos ligeiramente mais grossos e menores transformações de fase. A solidificação é mais lenta, permitindo o crescimento dos grãos.

A Fig. 9 mostra a termografia da última camada. Observa-se que na região “F”, a temperatura de 1900°C no topo indica que a fusão ainda está ocorrendo, característica que se repetiu a cada nova camada. A microestrutura aqui será mais estável, com grãos mais grossos e menos transformações de fase. À medida que a peça é construída, as camadas inferiores sofrem reaquecimento da mesma forma que em um tratamento térmico. A última camada foi encerrada 41 minutos após o início do processo de manufatura.

Figura 9: Termografia – Última camada (Topo).



Fonte: Do autor (2024).

4.2 ANÁLISE DE DUREZA

A análise das durezas revelou que a região “A”, correspondente à base, apresentou durezas variando de 145,20 HV a 181,75 HV. Esta variação significativa pode ser atribuída à influência da ZTA, que causa endurecimento devido ao calor e à deformação mecânica durante o processo de soldagem.

A região “B” mostrou durezas relativamente altas e consistentes, variando de 156,05 HV a 165,01 HV, indicando uma boa fusão e solidificação do material. Na região “C”, as durezas variaram de 145,20 HV a 161,94 HV, sugerindo pequenas diferenças na taxa de resfriamento ou na composição do material depositado. A região “D” apresentou durezas elevadas, variando de 147,80 HV a 171,41 HV, com algumas variações atribuídas a diferenças na microestrutura resultantes do processo de deposição em camadas. As regiões superiores, “E” e “F”, apresentaram durezas mais baixas e consistentes. A região “E” teve durezas variando de 135,44 HV a 145,20 HV, enquanto a região “F”, no topo da peça, apresentou durezas variando de 135,44 HV a 140,19 HV. Essas regiões sofreram menos influência térmica e mecânica, resultando em durezas mais uniformes.

Comparativamente, a menor dureza na Região “F” em relação às regiões anteriores (A até D) pode ser atribuída à redução da densidade de discordâncias e à presença de grãos maiores, que oferecem menor resistência à deformação plástica.

O gráfico da Fig. 10 consolida os valores de dureza obtidos. Observa-se que, apesar da grande variação entre os pontos adjacentes, a dureza do material diminui gradualmente ao longo da altura do corpo de prova.

Figura 10: Dureza consolidada.

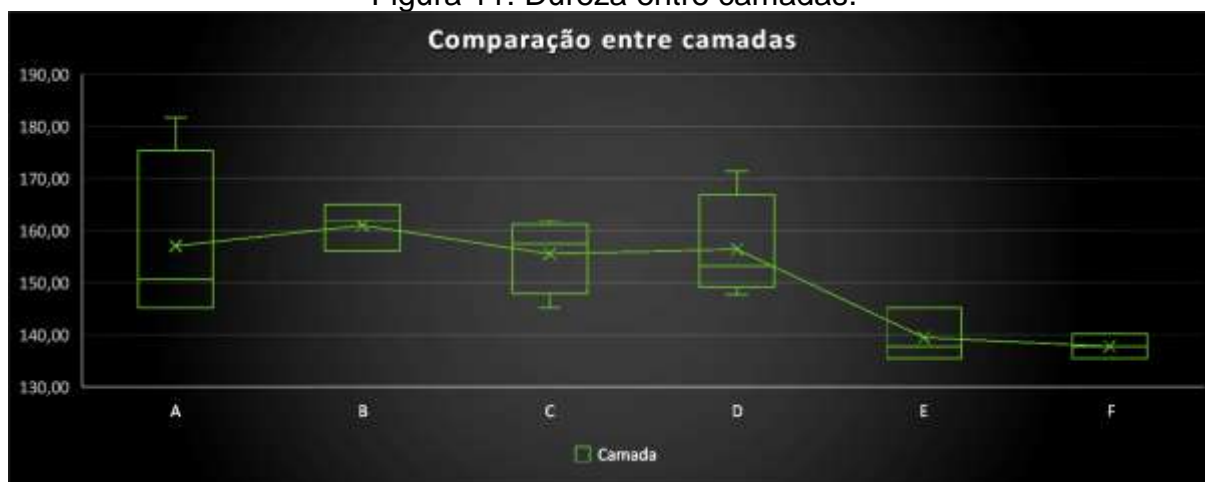


Fonte: Do autor (2024).

Observa-se na Fig. 11, que as barras no gráfico representam a dureza média de cada camada, com as linhas verticais indicando a variação (ou erro) em torno dessa média. A dureza varia entre aproximadamente 130 HV e 190 HV. Cada barra representa uma camada específica da peça entre as regiões “A” e “F”.

A variação na dureza entre as camadas pode ser devido a diferentes fatores, como a composição do material, a temperatura de deposição, ou a taxa de resfriamento durante o processo de manufatura aditiva. A presença de barras de erro indica que há algumas inconsistências na dureza dentro de cada camada. Isso pode ser um reflexo das condições de processamento não uniformes, defeitos nos grãos, inclusões, variações na composição do material e de temperatura [20]. Observa-se novamente que a linha que conecta os pontos médios das barras sugere uma tendência de queda na dureza ao longo das camadas. Essa redução da microdureza é uma característica documentada em peças de WAAM com ER70S-6 [21].

Figura 11: Dureza entre camadas.



Fonte: Do autor (2024).

4.3 ANÁLISE METALGRÁFICA

Para as análises metalográficas, foram escolhidas as ampliações de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x. Essa seleção permite uma compreensão detalhada e completa da microestrutura do material. As ampliações menores (50x e 100x) são ideais para observar a macroestrutura e a distribuição geral de fases. Já as ampliações intermediárias (200x e 500x) revelam detalhes mais finos, como a morfologia dos grãos e a presença de precipitados. Por fim, a ampliação maior (1000x) é relevante para identificar inclusões, defeitos e outras características microscópicas. Essa abordagem multifacetada garante uma análise precisa e abrangente, facilitando a correlação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas do material, além de ajudar na identificação de possíveis problemas de qualidade da peça final.

As informações obtidas foram cruzadas com os ensaios de dureza Vickers (HV), permitindo uma correlação entre a microestrutura observada e as propriedades mecânicas do material, proporcionando uma análise ainda mais robusta e confiável. Além disso, as deduções e análises levaram em consideração os gradientes de temperatura gerados a partir da termografia durante o processo de manufatura das camadas, oferecendo uma visão completa dos efeitos térmicos na microestrutura e nas propriedades do material sob condições cíclicas [22]

Nas próximas seções, as seis regiões preconizadas (A, B, C, D, E, F) serão analisadas separadamente, garantindo uma avaliação detalhada e específica de cada

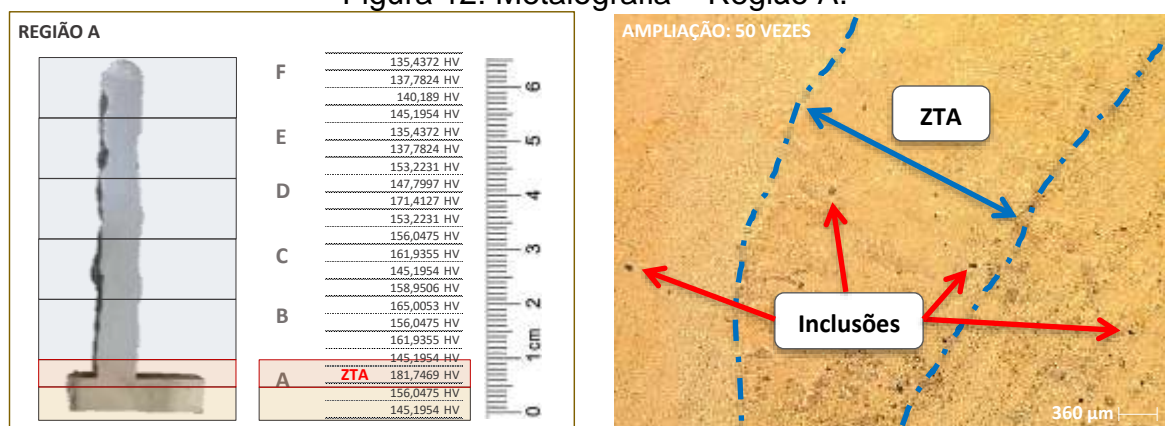
área do corpo de prova. A região A representa a base da peça, enquanto a região F representa o topo da peça.

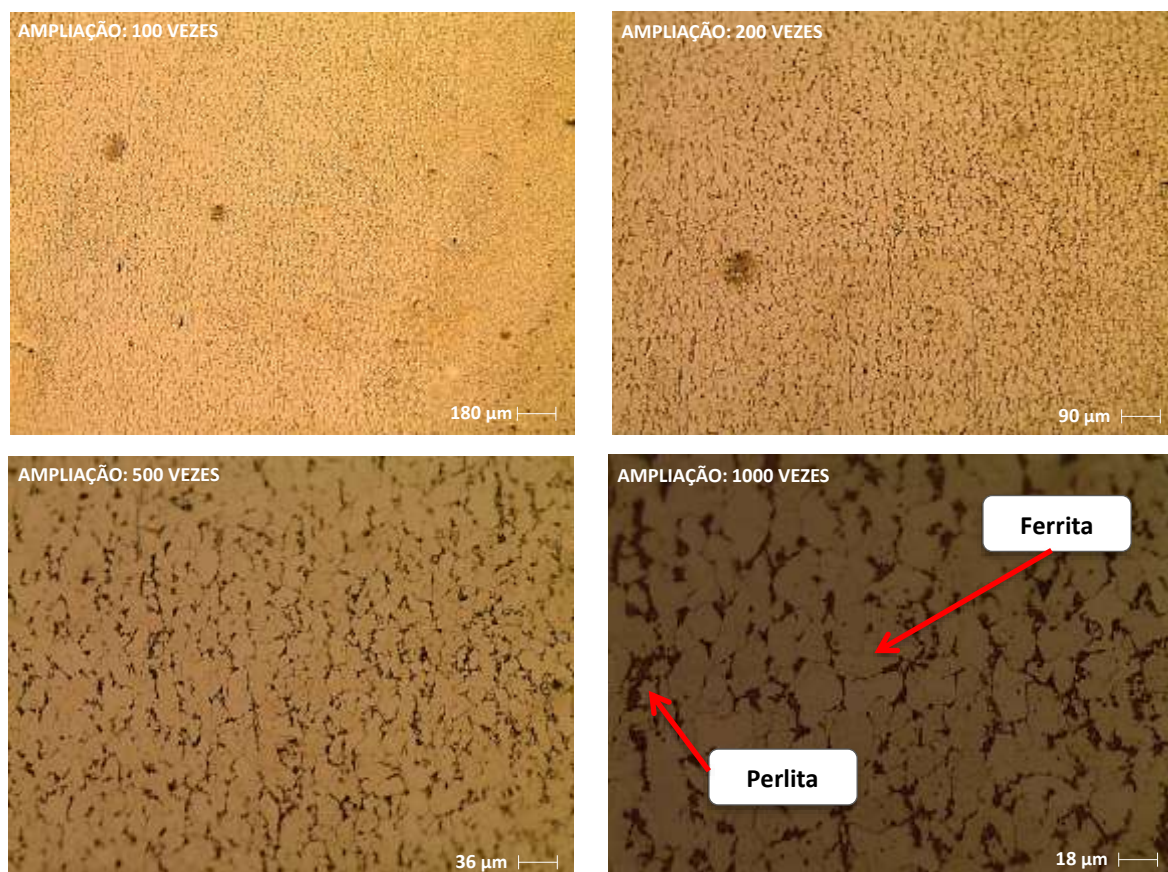
4.3.1 Análise metalográfica – Região A

A análise das imagens metalográficas e dos valores de dureza revelou que a região “A”, correspondente à base, apresentou durezas variando de 145,20 HV a 181,75 HV. Essa variação significativa pode ser atribuída à influência da ZTA, que causa endurecimento devido ao calor e à deformação mecânica durante o processo de soldagem. A presença de porosidade e inclusões, características comuns em processos de soldagem, contribui para a variação da dureza. Essa variação pode ser atribuída à porosidade, que atua como ponto de concentração de tensão e pode levar a uma subestimação da dureza em algumas medições. A maior dureza observada em algumas medições na Região “A” pode indicar que, nas áreas sem porosidade, a microestrutura oferece maior resistência à penetração do indentador. Além disso, áreas com menor concentração de defeitos podem apresentar maior resistência à penetração.

A Fig. 12, apresenta a imagem metalográfica da região A, revelando limites de grão bem definidos, indicando a estrutura policristalina do material. A observação da perlita e ferrita a um aumento de 1000x é viabilizada pela diferença de relevo induzida pelo ataque químico com Nital a 2%, que realça a perlita (camadas alternadas) e a ferrita (camadas claras) [5]. Esta análise metalográfica, utilizando diferentes magnificações, é crucial para correlacionar a microestrutura com as propriedades mecânicas do material.

Figura 12: Metalografia – Região A.





Fonte: Do autor (2024).

A Fig. 13 apresenta os valores de dureza obtidos na região da ZTA. Observou-se uma redução significativa na dureza em alguns pontos. Os valores discrepantes, variando de 1,89 HV a 1,93 HV, possivelmente ocorrem devido à porosidade e falhas na execução da medição de dureza.

Figura 13: Dureza na região da ZTA



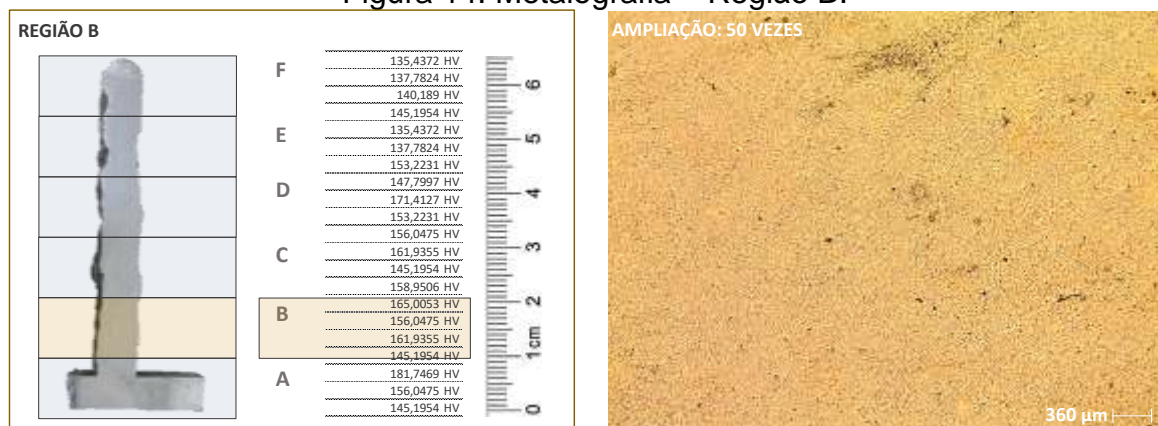
Fonte: Do autor (2024).

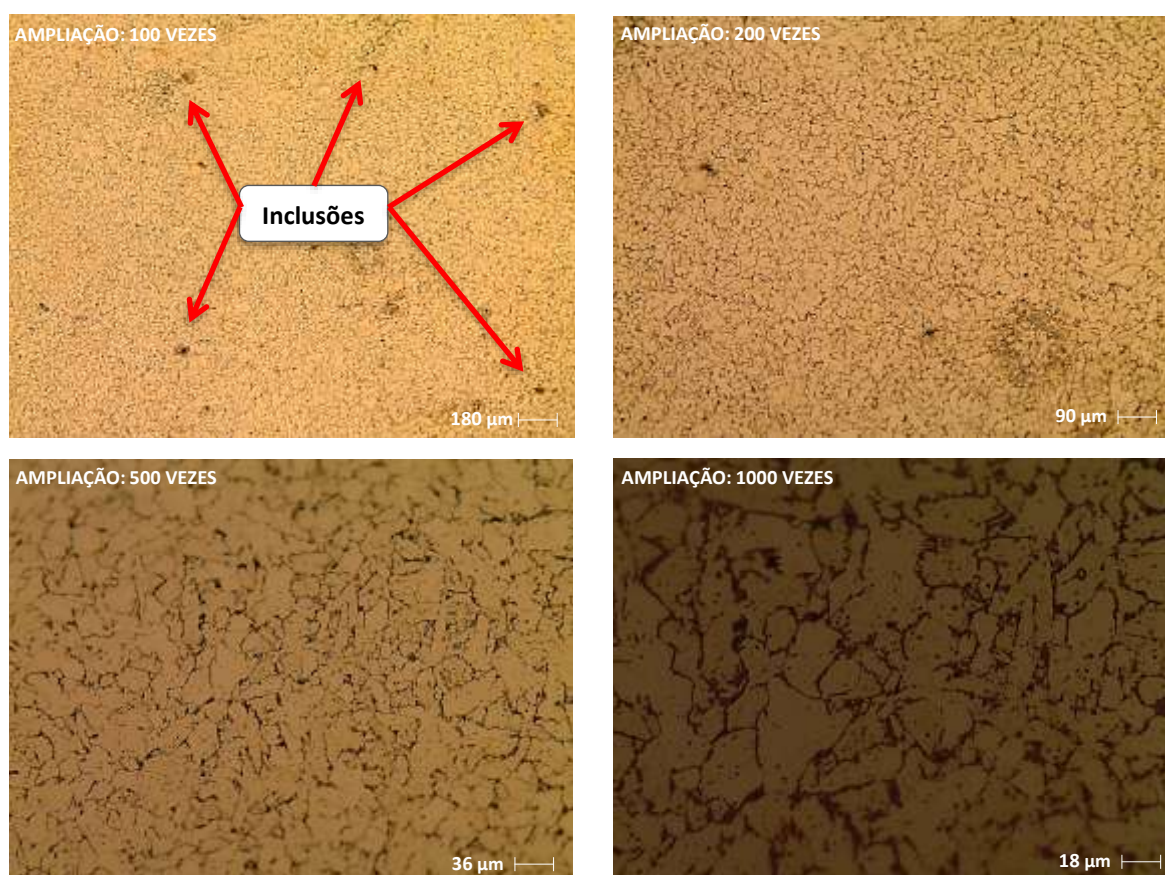
4.3.2 Análise metalográfica – Região B

A região "B", caracterizada por uma estrutura granular e presença de inclusões, exibe uma dureza Vickers que varia entre 156,05 e 165,01 HV. Essa variação, consideravelmente menor do que a observada na Região A (145,20 HV a 181,75 HV), sugere uma microestrutura mais homogênea na Região B. É importante ressaltar que a presença de porosidade na Região "A", conforme evidenciado na Fig. 12, pode ter influenciado os resultados de dureza. A porosidade atua como um ponto de concentração de tensão, potencialmente levando a uma subestimação da dureza em algumas áreas da Região "A" e contribuindo para a maior variação observada.

A Fig. 14, correspondente as imagens metalográficas da região "B". A técnica de manufatura aditiva por fusão, utilizando soldagem MAG (*Metal Active Gas*), cria um gradiente térmico durante a deposição das camadas. As camadas inferiores, depositadas primeiro, são submetidas a múltiplos ciclos de aquecimento e resfriamento à medida que novas camadas são adicionadas. Essa variação térmica afeta a microestrutura e a dureza do material. A região "B", assim como as camadas superiores subsequentes, será impactada por essa variação. A sobreposição de valores de dureza entre as regiões "A" e "B" reforça que a microestrutura, por si só, não define a dureza. Fatores como tamanho de grão, distribuição de inclusões e defeitos localizados influenciam os resultados. Portanto, a dureza de um material é um resultado combinado de vários fatores.

Figura 14: Metalografia – Região B.



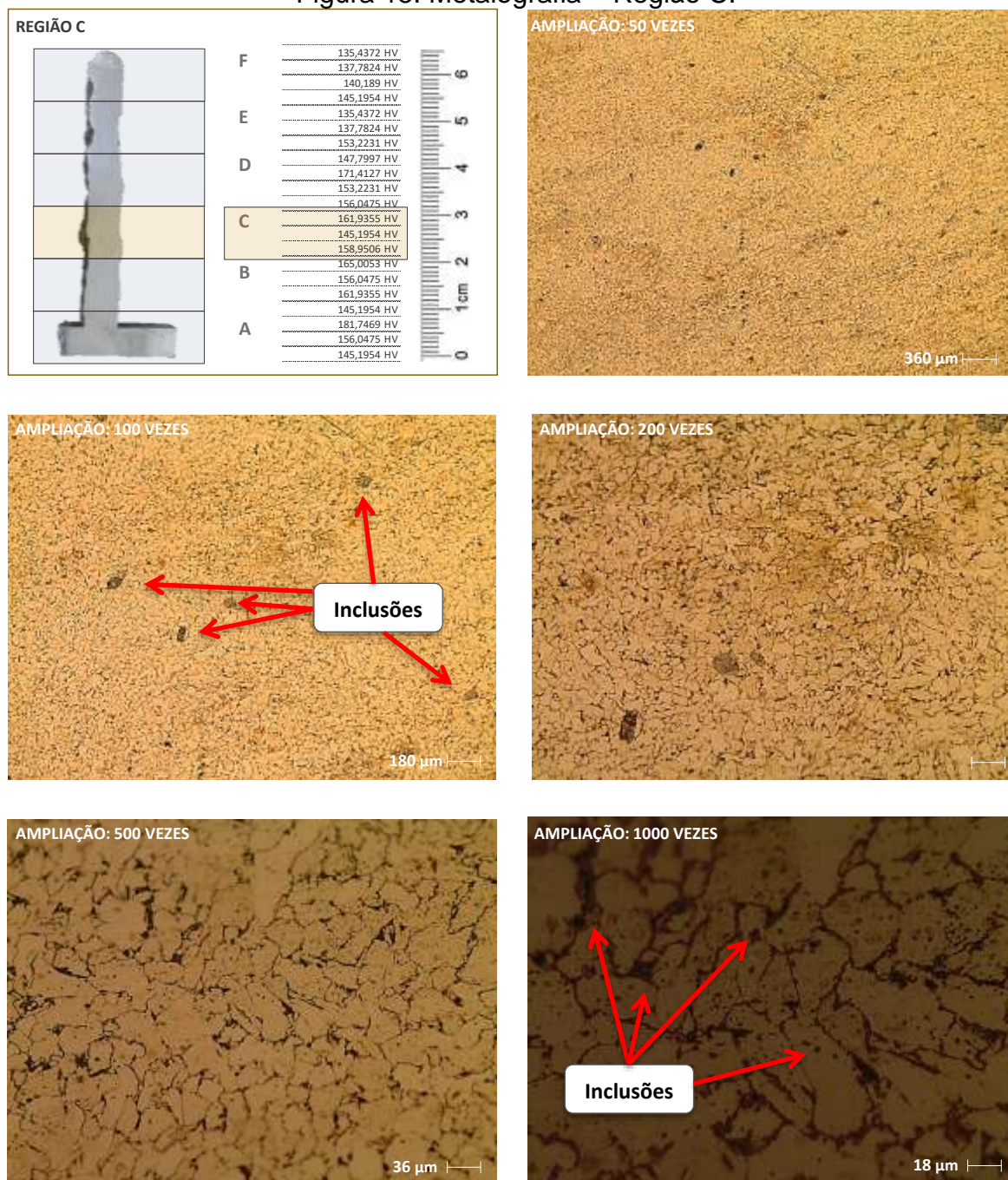


Fonte: Do autor (2024).

4.3.3 Análise metalográfica – Região C

A região “C”, similar à Região “B” em termos de características microestruturais, exibe valores de dureza Vickers de 145,20 a 161,94 HV. A sobreposição nos valores de dureza entre as Regiões “A, B e C” indica que a microestrutura por si só não é o único fator determinante da dureza, e outros aspectos como tamanho de grão, distribuição de inclusões e presença de defeitos localizados podem influenciar os resultados.

Figura 15: Metalografia – Região C.

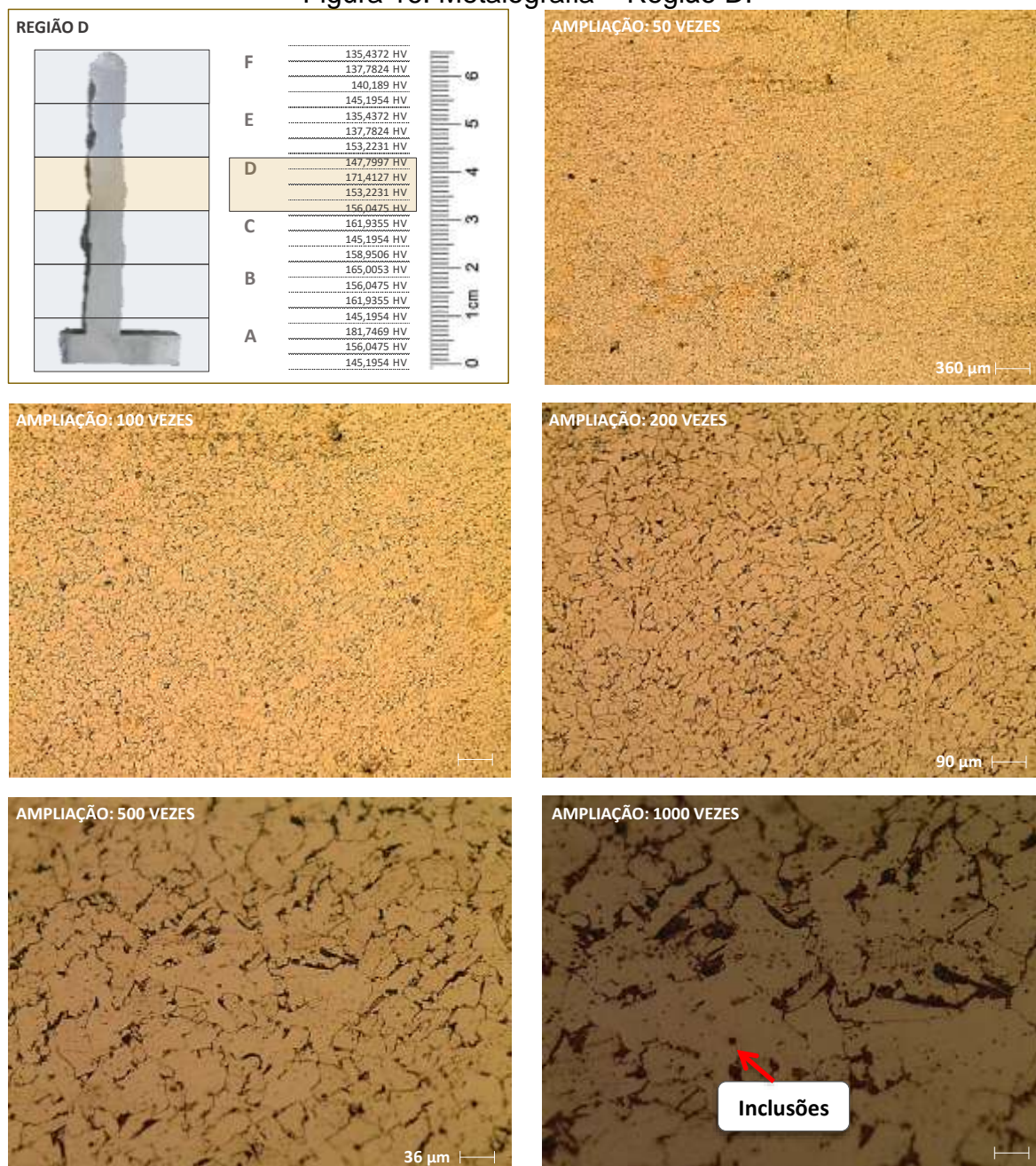


Fonte: Do autor (2024).

4.3.4 Análise metalográfica – Região D

A Região D, com estrutura granular, grãos de tamanho médio a fino e presença de subgrãos, apresenta dureza Vickers variando de 147,80 a 171,41 HV. A presença de subgrãos pode ter contribuído para a maior dureza observada em algumas medições, já que os contornos dos subgrãos podem atuar como barreiras ao movimento das discordâncias [23]. Observe a metalografia da região “D” abaixo:

Figura 16: Metalografia – Região D.



Fonte: Do autor (2024).

Na região “D”, durante o processo de manufatura, ocorreu uma falha na impressão, resultando em uma deformação nesta camada. Foi necessário realizar ajustes e novas varreduras para corrigir o problema. Isso pode ter influenciado a dureza e as características dessa região [23]. Para corrigir, foi necessário realizar novas passadas localizadas até que o “vale” causado na peça fosse totalmente preenchido. Essas novas varreduras também causaram novos processos de aquecimento, criando uma condição fora do planejado. A Fig. 17 mostra o corpo de

prova após o término do processo de manufatura, destacando o local da falha com um recorte que ilustra o aspecto real da mesma.

Figura 17: Dureza entre camadas – Região D.



Fonte: Do autor (2024).

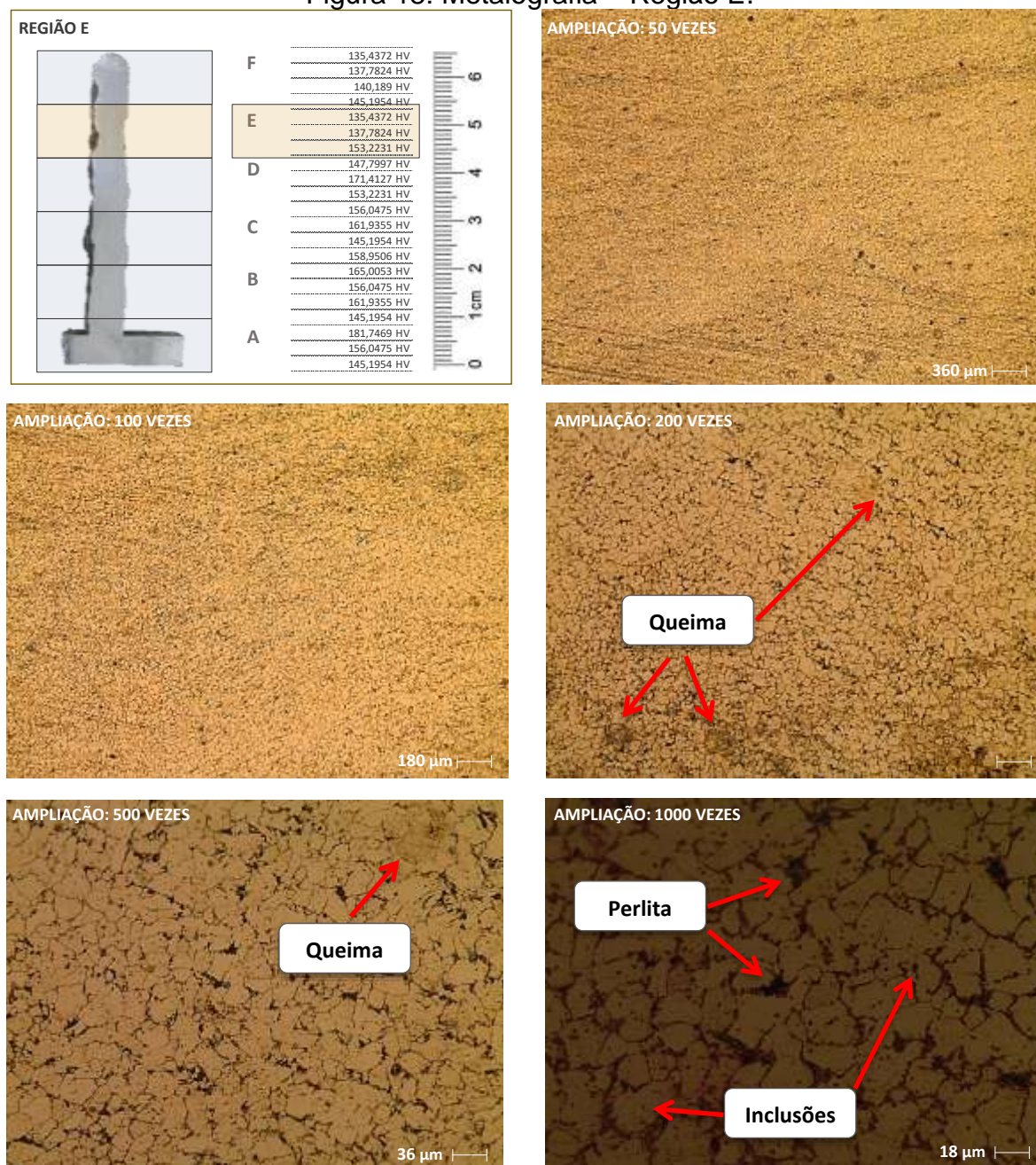
4.3.5 Análise metalográfica – Região E

Com base na metalografia da Fig. 18, a região “E” apresenta uma estrutura granular que sugere um aumento dos grãos em relação as camadas anteriores. Essa região exibe os menores valores de dureza Vickers (135,44 a 145,20 HV).

Observa-se que durante o processo de preparação do corpo de prova, especificamente no processo de ataque químico, o Nital causou a “queima” da amostra em certas regiões. Isso resulta em uma superfície excessivamente corroída ou danificada, comprometendo a análise. A queima pode se manifestar de diversas formas. A superfície da amostra pode exibir uma corrosão severa, com regiões onde o material foi removido de maneira desigual, criando uma textura áspera e irregular. Além disso, os contornos dos grãos, que normalmente seriam bem definidos, tornam-se indistintos, dificultando a observação da microestrutura original. A descoloração da

superfície, com áreas mais escuras ou manchadas, é um sinal comum de queima. Este aspecto tornou-se mais proeminente, especialmente nas ampliações de 200 e 500 vezes.

Figura 18: Metalografia – Região E.



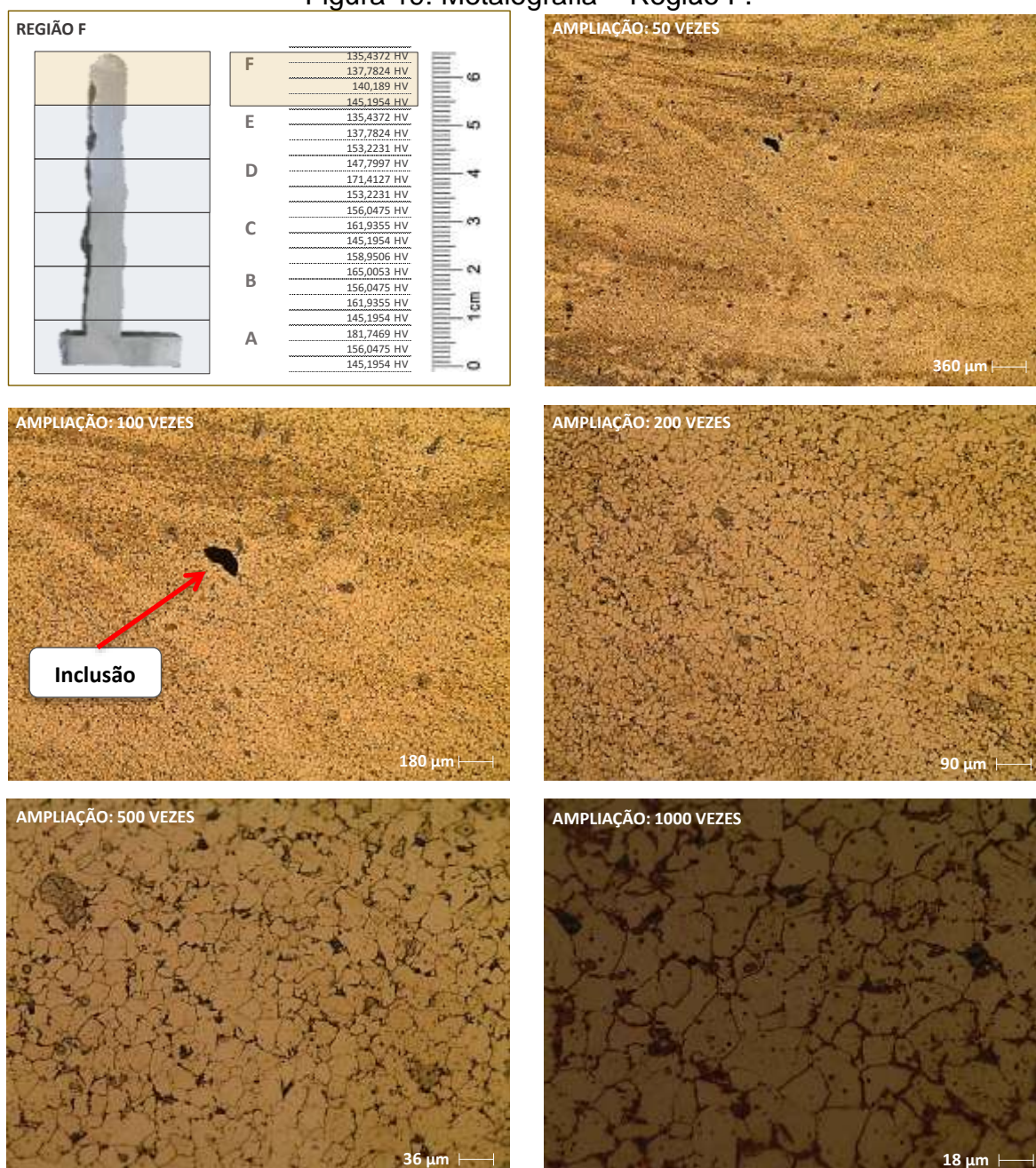
Fonte: Do autor (2024).

4.3.6 Análise metalográfica – Região F

A Região de topo “F”, observada na figura 19, apresenta uma estrutura de grãos ligeiramente maior em comparação com as regiões de base e valores de dureza

Vickers variando de 135,44 a 140,19 HV. A menor dureza observada na Região “F” em relação às regiões anteriores “A” a “D” pode ser atribuída à menor exposição a temperatura e à presença de grãos maiores, que oferecem menor resistência à deformação plástica [24; 25]. Além disso, foram observados artefatos originados do processo de polimento. Após o processo de corte e polimento, ranhuras ainda permaneceram na peça nessa região. Como a superfície não está perfeitamente lisa, essas irregularidades podem influenciar a análise metalográfica.

Figura 19: Metalografia – Região F.



Fonte: Do autor (2024).



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo indicou a profunda interconexão entre os parâmetros do processo MAFL-GMAW, a microestrutura resultante e as propriedades de dureza em peças de aço SAE 1020. A análise da ZTA, utilizando diferentes magnificações durante a metalografia, mostrou-se fundamental para entender as variações de dureza encontradas ao longo da altura da peça. Através desta análise multi-escala, características microestruturais como tamanho de grão, presença de subgrãos, porosidade e inclusões foram identificadas e correlacionadas com os valores de dureza, revelando uma complexidade que a observação macroscópica não permitiria.

A evidente influência da ZTA na heterogeneidade da dureza entre as camadas destaca a importância do controle rigoroso dos parâmetros do processo MAFL-GMAW. As camadas inferiores, sujeitas a múltiplos ciclos de aquecimento e resfriamento, exibem maior variação de dureza, podendo comprometer o desempenho mecânico da peça. Essa heterogeneidade é uma característica documentada em peças de WAAM de aços carbono [25]. A correlação entre os ciclos térmicos e as propriedades finais de aços WAAM valida a metodologia empregada [26]. A análise da microestrutura em diferentes magnificações foi essencial para identificar a presença de grãos finos na base, resultado do rápido resfriamento, e grãos mais grosseiros nas camadas superiores.

A experiência prática obtida pelos autores durante este estudo, desde os desafios da fabricação aditiva até a análise detalhada dos materiais, se mostrou de grande valor acadêmico. A metodologia utilizada, combinando análise termográfica, ensaios de microdureza e metalografia, oferece uma visão abrangente da caracterização de peças produzidas por MAFL-GMAW. Os resultados obtidos não só contribuem para o desenvolvimento de processos de fabricação mais confiáveis, como também para a formação de profissionais mais qualificados em manufatura aditiva.

Este estudo serve como base complementar para futuras pesquisas, abrindo caminho para a investigação de novos materiais, a otimização de parâmetros de processo e o desenvolvimento de tratamentos térmicos específicos para a manufatura aditiva. Adicionalmente, o estudo da influência de diferentes gases de proteção e a correlação com as propriedades mecânicas da peça, como resistência à fadiga e resistência ao desgaste, surgem como temas promissores para futuras investigações.



REFERÊNCIAS

- [1] HOLZMANN, Henrique Ajuz; DALLAMUTA, João; BISCAIA (Organizadores). **Engenharia de Materiais e Metalúrgica: Tudo à sua Volta 2**, Atena Editora, 2021
- [2] ALBERTI, Eduardo André, SILVA, Leandro João da, D'OLIVEIRA, Ana Sofia C. **M. Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade**. Soldag. Insp. São Paulo, Vol. 19, Nº. 02, p.190-198, Abr/Jun., 2014
- [3] SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- [4] CALLISTER, William D., Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução de Sérgio Murillo Stamile Soares. Revisão Técnica de José Roberto Moraes de Almeida. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [5] HOLZMANN, Henrique Ajuz; DALLAMUTA, João; BISCAIA, Ricardo Vinicius Bubna (Organizadores). **Engenharia de Materiais e Metalúrgica: Tudo à sua Volta**, Atena Editora, 2020
- [6] STORK, Leonardo de Souza, SANTOS, Matheus Furlanetto dos, GUAREZI, Vinícius Souza. **Tratamentos Térmicos, Tração E Dureza: Resfriamento A Ar**. Relatório submetido a Universidade Do Extremo Sul Catarinense - Unesc, Criciuma-SC. 2018
- [7] ABDALA, Maria Regina Wener Schneider (Organizadora). **Ciência e Engenharia de Materiais**. Atena Editora, 2018
- [8] GONTARSKI, Thiago de Lima, CASALI, Rafael Machado, MIKOWSKI, Alexandre. **Dureza vickers – definição, normatização e perspectivas de pesquisa: uma revisão**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.2, p. 15736-15754 fev., 2021
- [9] ALIXANDRE, Josias de Brittes, DALEFFE, Anderson, CONGER, Rodrigo. Viabilidade Técnica Na Fabricação De Peça Complexa Comparando Manufatura Aditiva Versus Manufatura Subtrativa No Aço Inoxidável AISI-304L. **Revista Vincchi – Periódico Científico da UniSATC**, v. 8, n. 1, p. 349-361, jan./jun., 2023
- [10] FERRARESI, Henrique Nardon. **Efeitos dos Ciclos Térmicos da Manufatura Aditiva por Soldagem a Arco Sobre a Dureza e Microestrutura da ZAC de Um Ferro Fundido Nodular**. Dissertação apresentada a Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG, 2018.
- [11] FERREIRA, Carlos Antonio, CASAGRANDE, Henrique Cechinel, DALEFFE, Anderson, FRITZEN, Daniel, MARCH, Gilson de, SCHAEFFER, Lirio. Fabricação de peças metálicas por manufatura aditiva com diferentes características mecânicas superficiais. **Revista de Gestão e Secretariado – GeSec**, V. 15, N. 7, P. 01-15, 2024



- [12] SATURNO, Rafael, FERREIRA, Carlos Antônio, DALEFFE, Anderson, SCHAEFFER, Lirio, CONGER, Rodrigo. **Avaliação do Processo de Manufatura Aditiva Baseado na Técnica WAAM a Partir do HL 85 MC-B.** Revista Vincchi – Periódico Científico da UniSATC, v. 8, n. 1, p. 258-278, jan/jul., 2023
- [13] CIZENSKI, Ricardo Peres, DALEFFE, Anderson, FERREIRA, Carlos Antônio, SHAEFFER, Lirio. **Manufatura Aditiva Na Construção De Peças Metálicas Para Uso Na Indústria Cerâmica.** Revista Vincchi – Periódico Científico da UniSATC, v. 8, n. 2, p. 515-541, jul./dez., 2023
- [14] TABERNERO, Iván, PASKUAL, Amagoia, ÁLVAREZ, Pedro, SUÁREZ, Alfredo. Study on Arc Welding processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing. 19ª Conferência CIRP sobre Usinagem Eletrofísica e Química, Bilbao, Espanha, 23-27 de abr., 2018
- [15] JEFFUS, Larry. **Welding Principles and Applications.** 8. ed. Boston, USA: Cengage Learning, 2015.
- [16] TREUTLER, Kai, WESLING, Volker. **The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review.** Appl. Sci 2021, 11, 8619. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11188619>
- [17] FERREIRA, Marcelo, DALEFFE, Anderson, COSTA, Adelor Felipe da, PERUCH, Fabio, FRITZEN, Daniel. **Caracterização de Corpos de Provas de Aço Inoxidável 304L Depositados por Manufatura Aditiva de Metais com Fusão Localizada.** Revista Vincchi – Periódico Científico da UniSATC, v. 7, n. 2, p. 268-291, jan/jul., 2022
- [18] FERREIRA, Marcelo, DALEFFE, Anderson, COSTA, Adelor Felipe da, PERUCH, Fabio, FRITZEN, Daniel. **Caracterização de Corpos de Provas de Aço Inoxidável 304L Depositados por Manufatura Aditiva de Metais com Fusão Localizada.** Revista Vincchi – Periódico Científico da UniSATC, v. 7, n. 2, p. 268-291, jan/jul., 2022
- [19] BALMER. **Arame MIG, AWS A5.18 / ASME SFA5.18 ER70S-6.** Disponível em: <https://www.balmer.com.br/arames-mig-bitola-0-80mm-15kg>
- [20] NOVELINO, Eduardo et al. **Influence of Interlayer Temperature and Deposition Method on the Wall Geometry and Vickers Microhardness Profile of ER70S-6 Parts Manufactured by Additive Manufacturing Using CMT.** Journal of Manufacturing and Materials Processing, Basel, v. 8, n. 3, p. 93, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-4494/9/3/93>. Acesso em: 16 out. 2025.
- [21] SINGH, Aman et al. **Influence of progressive deposition on microstructure and mechanical properties of ER70S-6 in wire arc additive manufacturing process.** Materials & Design, 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/395603887_Influence_of_progressive_deposition_on_microstructure_and_mechanical_properties_of_ER70S-6_in_wire_arc_additive_manufacturing_process. Acesso em: 16 out. 2025.



- [22] MAHMOUD, M. S.; AHMAD, S.; ELHAREED, K. M. **On the microstructure development under cyclic temperature conditions during WAAM of microalloyed steels**. Metals, Basel, v. 12, n. 11, p. 1957, 2022. Disponível em: https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/clausthal_mods_00002342. Acesso em: 16 out. 2025.
- [23] TAHA, Mahmoud et al. **Study on the thermal cycle of Wire Arc Additive Manufactured (WAAM) carbon steel wall using numerical simulation**. Frattura ed Integrità Strutturale, Roma, n. 66, p. 297-308, 2023. Disponível em: <https://www.fracturae.com/index.php/fis/article/download/2660/2949/13280>. Acesso em: 16 out. 2025.
- [24] DENG, Ming et al. **Microstructure and mechanical properties of the wire arc additively manufactured 316L/ER70S-6 bimetal structure**. Science and Technology of Welding and Joining, London, v. 29, n. 7, p. 642-649, 2024. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452759.2024.2375105>. Acesso em: 16 out. 2025.
- [25] FANANI, Muhammad Ivan et al. **Characterization Study of Wire Arc Additive Manufacturing Layer in Metal Inert Gas Welding Process**. Engineering Innovations, Rijeka, v. 12, n. 1, p. 7-12, 2025. Disponível em: <https://www.scientific.net/El.12.7>. Acesso em: 16 out. 2025.
- [26] AHMED, A. S.; AHMED, M. Z. **Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of Thermal Cycles on Microstructure and Mechanical Properties**. Materials & Design, 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332105893_Wire_and_arc_additive_manufacturing_of_HSLA_steel_Effect_of_Thermal_Cycles_on_Microstructure_and_Mechanical_Properties. Acesso em: 16 out. 2025.
- [27] MÉNDEZ-MORALES, Mariela et al. **Assessment of cyclic deformation behaviour of wire arc additively manufactured carbon steel**. International Journal of Fatigue, Oxford, v. 182, 109008, 2024. Disponível em: <https://research.tudelft.nl/files/184778033/1-s2.0-S0142112324001658-main.pdf>. Acesso em: 16 out. 2025.
- [28] CASAGRANDE, H.C., DALEFFE, A., FERREIRA, C., FRITZEN, D., MARCH, G., CASTELAN, J. **Processo de fabricação de peças metálicas por manufatura aditiva com fusão localizada de aços baixa liga**. Científica digital. 2023.
- [29] CIPRIANO, A., CASAGRANDE, H. C., CASTELAN, J., DALEFFE, A., MALFATTI, C. DE F., BILESSIMO, L. D., MARCH, G. DE, & FRITZEN, D. **Investigação do processo de manufatura aditiva com fusão de aço baixa liga através do Processo Tandem**. Revista Caribeña. 2025.
- [30] CASAGRANDE, Henrique.; DALEFFE, Anderson.; MARCH, Gilson.; FERREIRA, Carlos.; SILVA, Joelson.; MARTINS, Hadrian.; SCHAEFFER, Lírio.; CASTELAN, Jovani.; FRITZEN, Daniel. **Carbon precipitation on the bonding line between deposited material and base material using an additive manufacturing process**. 2024.



- [31] FERREIRA, C., DALEFFE, A., CASAGRANDE, H.C, MARCH, G. D., MARTINS, H., & SCHAEFFER, L. **Mechanical Analysis of ER70S-6 Wire in Pulsed Additive Manufacturing**. Revista De Gestão - RGSA, Volume 19. 2025.
- [32] FERREIRA, C. A., CASAGRANDE, H. C., DALEFFE, A., FRITZEN, D., MARCH, G. DE, & SCHAEFFER, L. **Fabricação de peças metálicas por manufatura aditiva com diferentes características mecânicas superficiais**. Revista De Gestão E Secretariado, Volume 15. 2024.
- [33] CIPRIANO, A., MALFATTI, C. D. F., CASAGRANDE, HC, DALEFFE, A., CASTELAN, J., & POSSAMAI, PHM. **Análise da microestrutura e das propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico 310 fabricado via WAAM**. *Materials*. Volume 18. 2025.
- [34] MARCH, G. DE, DALEFFE, A., CASAGRANDE, H.C., FERREIRA, C., SCHAEFFER, L., & MILANEZ, A. **Additive Manufacturing by Arc Deposition: Study of Mechanical and Chemical Properties with Stainless Electrode ER 310**. Revista De Gestão - RGSA, Volume 19. 2025.
- [35] SILVA, J. V. DA, DALEFFE, A., SCHAEFFER, L., CASTELAN, J., CASAGRANDE, H. C., & FERREIRA, C. A. **Study of the Mechanical Joint of a Bimetallic Cross Obtained by Localized Additive Manufacturing of Fusion Applied to Automotive Transmissions**. Revista De Gestão - RGSA, Volume 19. 2025.
- [36] SILVA, J.V., SCHAEFFER, L., DALEFFE, A., MILANEZ, A., CASAGRANDE, H.C., MARCH, G. **Analysis of the Bimetallic Joint of a Hot-Forged Crosshead Composed of ASTM B221 6060 Aluminum and AWS A5.36 E110C-G M Low Alloy Steel Obtained by Localized Fusion Additive Manufacturing**. *Materials Research*. 2025.
- [37] FERREIRA, C., SCHAEFFER, L., DALEFFE, A., CASTELAN, J., CASAGRANDE, H., & MARCH, G. DE. M.A. **Hybrid Manufacturing Process and Hot Forging: Preform Manufacturing Through Localized Melting Material Deposition Using UTP AF DUR 600 Wire**. Revista De Gestão - RGSA, Volume 19. 2025.
- [38] CASAGRANDE, H. C., DALEFFE, A., FERREIRA, C. A., MILANEZ, A., MARCH, G. DE, & SCHAEFFER. **Additive Manufacturing in the Forging Process: Preform Manufacturing Through Localized Melting Material Deposition Using Low Carbon Wire**. Revista De Gestão - RGSA, Volume 19. 2025.