

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ARTHUR SOARES FERNANDES FERREIRA

LUCAS BERTONI DE ARAÚJO LUIZ

ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E PARÂMETROS DO MATERIAL

H13 DEPOSITADO POR WAAM GTAW

PONTA GROSSA

2023

Arthur Soares Fernandes Ferreira
Lucas Bertoni de Araújo Luiz

**ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E PARÂMETROS DO MATERIAL
H13 DEPOSITADO POR WAAM GTAW**

**Study of mechanical properties and parameters of material H13 deposited by
WAAM GTAW**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Anderson Geraldo Marena
Pukasiewicz.
Coorientador(a): Roger Navarro Verastegui.

PONTA GROSSA
2023



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

Arthur Soares Fernandes Ferreira
Lucas Bertoni de Araújo Luiz

**ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E PARÂMETROS DO MATERIAL
H13 DEPOSITADO POR WAAM GTAW**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 12/Dezembro/2023

Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa

Denilson José Marcolino de Aguiar
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa

Oscar Regis Junior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa

PONTA GROSSA

2023

RESUMO

A manufatura aditiva é uma forma alternativa na confecção de objetos que vem crescendo ao longo do tempo. Considerada alternativa de construção de peças em relação aos processos convencionais de fabricação de peças, como usinagem e fundição. Na manufatura aditiva a metodologia de produção de objetos é feita em camadas até que se obtenha o formato final requerido, diferente do processo de usinagem que consiste na subtração do material até atingir o formato desejado. Há diferentes métodos na manufatura para confecção de peça, para este trabalho é elegido o processo de manufatura aditiva a arco por arame, do inglês *Wire Arc Additive Manufacturing*, conhecido como WAAM, juntamente com o processo de soldagem *Tungsten Inert Gas Welding*, chamado de GTAW ou processo TIG. Sabendo que há diversas formas para a fabricação de um determinado produto, neste trabalho optou pelo estudo das análises geométricas do empilhamento e propriedades mecânicas do aço ferramenta H13 com os parâmetros selecionados de um aço ferramenta VP50IM com o processo WAAM GTAW. No decorrer do estudo o parâmetro selecionado apresentou uma alta energia de deposição para o H13, sendo desfavorável para o processo, com isso optou em continuar com o parâmetro selecionado e denominou de parâmetro A, e escolhido um parâmetro B para o trabalho, com diferença apenas na corrente de soldagem, onde a mesma foi reduzida para menor deposição de energia. Diante as análises geométricas, área inscrita, molhabilidade e diluição, o parâmetro B apresentou maior eficácia, o que contribui fortemente para a realização do empilhamento, e a microestrutura de ambos, apresentou similaridade, por apresentar maior formação dendrítica no topo do que na base, devido o revenimento que acontece nas camadas subjacentes quando ocorre a deposição das camadas. A análise de microdureza mostrou o parâmetro B com maior dureza, mas em contrapartida o parâmetro A possui uma melhor distribuição da dureza ao longo do empilhamento. Os ensaios de resistência a tração não mostraram uma discrepância significativa entre os parâmetros, mas sim na região retirada do empilhamento. Os corpos de prova retirados da base mostraram maior deformação plástica do que retiradas do topo, e as tensões máximas são relativamente próximas dos corpos de prova.

Palavras-chave: Soldagem; Manufatura Aditiva; H13; TIG; WAAM; GTAW.

ABSTRACT

Additive manufacturing is an alternative way on the making of objects which has grown over the years. Considered as an alternative of parts construction compared to more conventional methods as machining and foundry. In additive manufacturing the object production methodology is done in layers until you get the required final shape, different from the machining process which consists in the subtraction of the material until reaching the wished shape. There are different methods of manufacturing the piece, for this job is selected the wire arc additive, as known as WAAM. In it encompasses the weldings processess, for this researched case, the process tungsten inert gas welding, also known as GTAW or TIG process. Knowing there are a lot of ways of making certain products, for this Project, it was opted to the study for the geometry analisys and mechanical properties of the stacking with H13 tool steel with the selected parameters of the VP50IM tool steel by the WAAM GTAW process. During in the work, the selected parameter shown high deposition energy to the H13, it was not be propitious for the process, about it opted to continue with the selected parameter and called it parameter A, and chosen a B parameter for the work, with just a difference in the current welding, where reduced it to the less energy deposition. Given the geometric analysis, inscribed area, mobility and dilution, parameter B showed greater effectiveness, which Strong contributes for the steaky realization, and the both microestructure shown similar, to show higher dendritc formation on the top than the base, due to the tempering process that happen on the underlyers layers when occurs the layer deposition. The hardness analisys shown the parameter B with the higher hadness, however the parameter A have the best hadness distribution along the steaky. The tensile strength tests did not show the high difference between the parameters, but in removal region of the steaky. The samples removed on the base shown the higher plastic deformation than samples removed on the top, and the maximum stress are near relatively the others samples.

Keywords: Welding; Additive Manufacturing; H13; TIG; WAAM; GTAW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de usinagem convencional.....	17
Figura 2 - Composição do H13.....	25
Figura 3 - Propriedades mecânicas aço AISI H13.....	26
Figura 4 - Fluxograma das etapas dos procedimentos experimentais	27
Figura 5 - Ângulos da tocha de soldagem	30
Figura 6 - Proposta de empilhamento	33
Figura 7 - Análise de geometria do cordão de solda simples.....	37
Figura 8 - Análise de preenchimento de área do cordão de solda	38
Figura 9 - Análise de molhabilidade do cordão de solda	39
Figura 10 - Análise de diluição do cordão de solda	40
Figura 11 - Procedimento de medidas do ensaio de microdureza	43
Figura 12 - Dimensões do corpo de prova a ser seguida.....	44
Figura 13 - Análise de composição do material pelo MEV.....	45
Figura 14 - Mapeamento de microdureza	55
Figura 15 - Resumo dos dados de dureza.....	56
Figura 16 - Resultado ensaio de resistência a tração	57
Figura 17 - Resultado comportamento tensão-deformação	58

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Metal base utilizado	28
Fotografia 2 - Sentido de soldagem.....	31
Fotografia 3 - Componentes utilizados no ensaio líquido penetrante	34
Fotografia 4 - Máquina utilizada para lixamento e polimento	36
Fotografia 5 - Microscópio utilizado para análise microestrutural	41
Fotografia 6 - Durômetro utilizado no ensaio de o de dureza.....	42
Fotografia 7 - Cordões de solda realizado	46
Fotografia 8 - Empilhamentos e seus respectivos parâmetros	47
Fotografia 9 - Visualização do ensaio líquido penetrante	48
Fotografia 10 - Geometria cordão do cordão de solda e seus parâmetros.....	49
Fotografia 11 - Análise de área inscrita.....	50
Fotografia 12 - Análise de molhabilidade dos parâmetros	51
Fotografia 13 - Análise de diluição dos cordões	52
Fotografia 14 - Mapeamento microestrutural do parâmetro A.....	53
Fotografia 15 - Mapeamento microestrutural do parâmetro B.....	54
Fotografia 16 - Área da seção transversal dos corpos de prova.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados no processo GTAW pulsado	29
Tabela 2 - Parâmetro B utilizado no processo GTAW pulsado.....	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO TEÓRICA	15
2.1	Processo de Fabricação	15
2.1.1	Processo de Usinagem Convencional	16
2.1.2	Problemáticas da Usinagem Convencional	17
2.2	Manufatura Aditiva	18
2.2.1	Jateamento de Ligante	19
2.2.2	Jateamento de Materiais	19
2.2.3	Extrusão de Materiais	19
2.2.4	Fotopolimerização em Cuba	20
2.2.5	Laminação de Folhas	20
2.2.6	Fusão em Leito de Pó	20
2.2.7	Deposição de Energia Direta	21
<u>2.2.7.1</u>	<u>Manufatura Aditiva por Fio a Laser</u>	<u>21</u>
<u>2.2.7.2</u>	<u>Manufatura Aditiva por Feixe de Elétrons</u>	<u>21</u>
<u>2.2.7.3</u>	<u>Manufatura Aditiva a Arco Elétrico</u>	<u>22</u>
2.3	Manufatura Aditiva a Arco Elétrico com o Processo TIG Pulsado ..	22
2.3.1	Processo TIG	23
<u>2.3.1.1</u>	<u>Aços Ferramenta</u>	<u>25</u>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	Fluxograma	26
3.2	Material	27
3.3	Confecção das Amostras	28
3.3.1	Utilização dos Parâmetros Pré-definidos TIG Pulsado	28
3.3.2	Confecção do Cordão, Novo Parâmetro e Empilhamento	31
3.3.3	Inspeção do Cordão de Solda	33
<u>3.3.3.1</u>	<u>Ensaio do Cordão de Solda</u>	<u>33</u>
<u>3.3.3.2</u>	<u>Ensaio Líquido Penetrante</u>	<u>34</u>
3.4	Análise Metalográfica	35

3.4.1	Preparação Metalográfica	35
3.4.2	Análise de Geometria	36
3.4.3	Análise de Área Inscrita.....	37
3.4.4	Análise de Molhabilidade.....	38
3.4.5	Análise de Diluição	39
3.4.6	Análise Microestrutural	40
3.5	Análise das Propriedades Mecânicas	41
3.5.1	Ensaio de Microdureza Vickers	41
3.5.2	Ensaio de Tração Uniaxial.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Análise do Material.....	45
4.2	Confecção das Amostras.....	45
4.2.1	Confecção dos Cordões de Solda	46
4.2.2	Confecção dos Empilhamentos	46
4.2.3	Ensaio Visual e Líquido Penetrante.....	47
4.3	Análise de Metalográfica	48
4.3.1	Análise de Geometria	48
4.3.2	Análise de Área Inscrita.....	49
4.3.3	Análise de Molhabilidade.....	50
4.3.4	Análise de Diluição	51
4.3.5	Análise de Microestrutural	52
4.4.1	Ensaio de Microdureza Vickers	54
4.4.2	Ensaio de Resistência a Tração	56
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
5.1.1	Recomendações para Trabalhos Futuros.....	60

ANEXO A - Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998

Erro! Indicador não definido.

1 INTRODUÇÃO

A fabricação foi e ainda é essencial para o ser humano, sendo fundamental para diversos ofícios em que o homem necessitava de fazer para sua sobrevivência. Destas ferramentas produzidas, uma muito utilizada foi a fabricação da lança para o uso da caça, quando o ser humano era apenas caçador-coletor, atividade que designava a sobrevivência do homem através da predação de outros animais e ou da coleta de grãos e vegetais encontrados aos arredores. Ao decorrer do tempo e da sofisticação das ferramentas, o ser humano pode entrar na chamada era da revolução agrícola, um marco fundamental em que mudou drasticamente seu hábito diário, agora ao invés da caça e coleta de comida em que encontrava ao longo de sua vida de nômade, o homem estabelece sua moradia fixa, cultiva sua própria comida através de plantações e também cria animais para consumo próprio. (HARARI, 2018).

Das ferramentas para consumo de alimentos, também houve fabricação de utensílios para guerras entre outros povos distintos, povos que não pertencia ao mesmo grupo social. Destas fabricações, foi desenvolvido os processos de fundição, forja e têmpera. Pois com a fabricação do metal, conseguia determinadas características no material que foram cruciais para o combate entre nações. Uma grande descoberta foi o bronze, sendo a fundição da liga de cobre e estanho que revolucionou as armaduras em tempos de guerra. (STRATHERN, 2002).

No decorrer do tempo, a sociedade moderna viu a necessidade da fabricação de componentes em maior escala, onde se destaca o início da revolução industrial. Era muito comum utilizar a técnica de usinagem subtrativa, que corresponde a retirada de material, de uma determinada matéria-prima, até que obtenha a geometria desejada. Hoje em dia, não somente a produção é realizada em larga escala, mas também produção de peças com geometrias complexas em que não cabe a qualquer tipo de processo, também atualmente é visado um menor custo referente ao maquinário e em termos de redução de desperdício de materiais. Por tais motivos, surge métodos alternativos a manufatura de peças, deste método alternativo, um é a manufatura aditiva por arco elétrico.

Sendo a manufatura aditiva a deposição de material que forma camadas, camadas que sobrepostas formam a geometria final, o oposto da subtração na usinagem convencional, onde é possível maior liberdade na formação das camadas, obtendo geometrias de maior complexidade. É necessário um meio de energia que

transferida ao metal de adição, fazendo com que ocorra a fusão do mesmo. Esse meio de energia neste caso, é por meio do arco elétrico, que pela diferença de potencial entre os polos, gera o arco que subsequentemente funde o material. (WANG et al., 2012). O arco elétrico está ligado aos processos de soldagem, sendo possível a realização por processos MIG/MAG, plasma e TIG, neste trabalho é utilizado o processo TIG pulsado.

Na manufatura aditiva por processo a TIG pulsado, tem como fonte de calor para fundir o metal base, o processo TIG pulsado. Dimuindo a energia, beneficia a solda em termos qualitativos, utilizando somente o necessário para a formação da poça de fusão. (YOUSEFIEH, SHAMANIAN e SAATCHI, 2011).

Gerada a fusão do metal de adição pelo processo TIG pulsado, volta aos fundamentos citados da manufatura aditiva, depositando o metal fundido, camadas subsequentes obtém o formato do produto de acordo com o aspecto solicitado.

Este trabalho visa a análise das propriedades mecânicas do H13, por meio de ensaios mecânicos de tração e dureza. A fim de caracterizar as propriedades mecânicas do metal de adição obtidas por meio da manufatura aditiva.

1.1 Justificativa

Este meio alternativo trás relevâncias em termos de fabricação de materiais, possuindo um custo concorrente, grande capacidade de construção independente da geometria e facilidade em questões operacionais.

O presente trabalho busca trazer relevância do processo alternativo de manufatura, sendo apresentado as propriedades mecânicas fundamentais para o uso do aço ferramenta mencionado. Podendo ser analisado se a discrepância de valores em termos de propriedades é significativa a ponto de necessitar de algum tratamento específico do material pós-fabricado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as propriedades mecânicas do material depositado camada a camada, bem como os aspectos dimensionais e microestruturais do material H13.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência dos parâmetros de soldagem no processo de construção de um perfil utilizando soldagem GTAW pulsado como processo WAAM;
- Avaliar a resistência a tração e escoamento das camadas depositadas do material empilhado;
- Avaliar a micro dureza da zona fundida e zona termicamente afetada do material empilhado;
- Analisar a diluição dos elementos químicos e sua influência final no material empilhado;
- Caracterizar a geometria do material empilhado na seção transversal.

2 REVISÃO TEÓRICA

Para melhor compreensão do estudo abordado, é demonstrado fundamentos essenciais no qual o presente trabalho se estrutura.

Os fundamentos mostrados iniciam holisticamente, apresentando de forma geral a fabricação dos materiais, e cita o método convencional de usinagem.

Após a abordagem de forma abrangente da fabricação e sua forma convencional, é apresentado um meio alternativo na produção de peças, a manufatura aditiva, onde o trabalho é estreitado na manufatura aditiva por arco de soldagem. Da manufatura aditiva por arco de soldagem, relembrando a técnica que é aplicada neste trabalho, que é a TIG, cita brevemente sobre aço ferramenta H13, aço utilizado no estudo deste trabalho. A metodologia derivada no processo presente deste estudo, a manufatura aditiva por processo de soldagem GTAW.

2.1 Processo de Fabricação

De acordo com a literatura, processo de fabricação pode ser definido como uma metodologia que tem o desígnio na mudança de geometria através de transformações físicas e/ou químicas de um determinado material de forma que alcance o aspecto desejado. De forma econômica, conceitua os processos de fabricação como, a aplicação que tem como tendência a agregar valor ao material,

mudando sua forma e/ou propriedades, de modo que o objeto tenha um maior valor em seu estado pós processamento. A fabricação se divide em duas principais áreas, sendo uma denominada operações de processamento e outra operações de montagens. Em operações de montagens tem como finalidade de unir dois ou mais componentes para a criação de um novo, podendo ser chamado de conjunto, pode ser citado como exemplificação as operações de rebitagem. Agora em operações de processamento, o objetivo está na transformação do material de um estado de acabamento inicial, para um estado mais avançado conforme desejado ou tão próximo quanto. (GROOVER, 2012).

Deste, é exemplificado um método muito utilizado na fabricação de vários componentes mecânicos, o processo de usinagem convencional, do qual é definido posteriormente.

2.1.1 Processo de Usinagem Convencional

Na definição de usinagem, é estabelecido como um processo em que é feito a submissão de um material com o objetivo de alcançar certa forma, dimensões ou acabamento, ou ainda a combinação destes itens, devido a subtração do material, de forma a produzir cavaco. O cavaco é definido como a porção do material retirado pela ferramenta de corte utilizada. (FERRARESI, 1970).

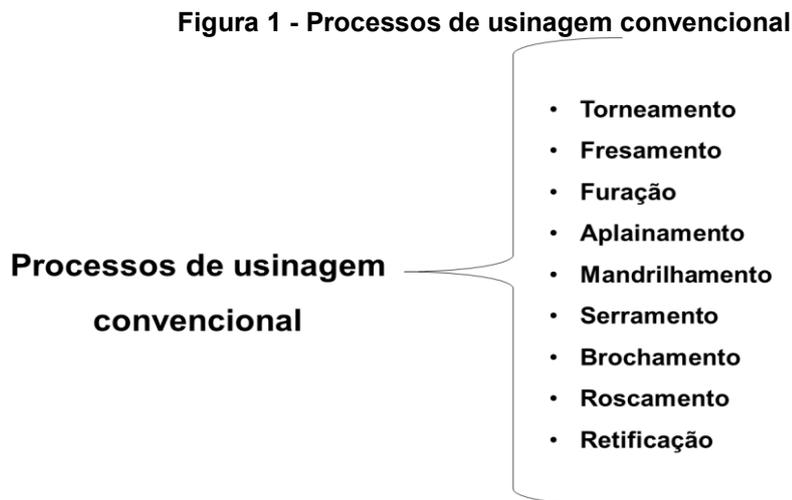
Para que ocorra a produção do cavaco, e por este a geometria final, é necessário a movimentação da ferramenta no material. Referente a este tipo de movimento para confecção no processo de usinagem convencional, no geral, por convenção, todo o movimento realizado no processo é feito pela ferramenta. A peça em si, estabelece parada em relação a ferramenta. (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2008).

Este tipo de movimentação que resulta em um produto final no processo de usinagem convencional, contém vários tipos de operações que se baseia na mesma metodologia.

Destas operações, são mencionadas as principais, que são agrupadas de acordo com a necessidade e máquina-ferramenta empregada. E ainda pode destacar uma subdivisão das operações, que são subdivididas em desbaste e acabamento. No desbaste tem por finalidade de remover a maior quantidade de material possível de acordo com a capacidade da ferramenta e da máquina utilizada, reduzindo o tempo de produção da peça, ou seja, obter uma elevada taxa de remoção de material em

relação ao tempo. No acabamento, o interesse não é mais em alta taxa de remoção, e sim a qualidade final que se deseja obter na superfície da peça, sendo a última operação realizada para atingir requisitos de qualidades superficiais desejados. (MACHADO et al., 2009).

Das operações de usinagem convencional são diversas, e conforme mencionado, se utilizado operações de usinagem convencional, para determinar o tipo, é necessário saber qual a necessidade empregada em termos de geometria e qual a máquina-ferramenta disponível para o mesmo. Sendo várias as opções de usinagem convencional, na Figura 1 é mostrado as principais operações de usinagem convencional.



Fonte: Adaptado de SILVA (2017).

2.1.2 Problemáticas da Usinagem Convencional

Referente a prática da usinagem convencional, para obter o produto desejado, a usinagem possui fatores determinantes que a afeta economicamente e ambientalmente. Um destes fatores está ligado a saúde ocupacional dos seus operadores e também em questões ecológicas. Pois o fluido de corte, que é um fluido responsável para refrigerar a ferramenta de corte, é um agente agressivo ao meio ambiente devido ao seu composto, prejudicando a integridade do operário e contribuindo para poluição ambiental. (CASTRO, 2001).

Também pode ser observado as limitações em relação a geometria da peça que se deseja fabricar. Pois na manufatura aditiva é possível automatizar todo o processo, diferente da manufatura subtrativa como a usinagem convencional, podendo até necessitar de realizar mais de um tipo de operação para conseguir

determinada geometria, tornando o processo com um maior custo e também menor produção. (GU D et al., 2012 apud DING et al., 2015).

Brevemente explicados os termos referentes a processo de fabricação e usinagem convencional, agora é mostrado um meio alternativo de fabricação mecânica, meio que não possui a mesmas problemáticas dos processos referidos anteriormente. O processo de modo abrangente, é denominado de manufatura aditiva, a seguir é explicado o mesmo e referenciado seus métodos de fabricação de produto.

2.2 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva é um termo generalizado para um processo tecnológico de criação de novos produtos. A confecção deste é realizada por meio de camadas, subsequentes a partir de dados modelos 3D, camadas que aglutinadas, tem como finalidade de alcançar uma geometria final de peça desejado. (ASTM, 2021).

Seu primeiro uso comercial como primeira máquina de manufatura aditiva comercialmente disponível, surgiu em 1987, com estereolitografia da 3D Systems. O seu procedimento consiste em solidificação de finas camadas por meio de luz ultravioleta, para que isso ocorra é necessário um material sensível à luz, neste caso geralmente é utilizado um polímero líquido. Ao decorrer do tempo a manufatura aditiva veio ganhando mais espaço no mercado e novos estudos, de forma a aumentar suas variações e seu processo. (WOHLERS, GORNET, 2016).

Este aumento de variações de processos muda significativamente o procedimento de cada, sendo que cada processo tem sua peculiaridade e características atribuída ao produto prototipado. Destas variações, é listado a baixo de acordo com a classificação que a ASTM padronizou. (ASTM, 2021).

- Jateamento de ligante;
- Jateamento de materiais;
- Extrusão de materiais;
- Fotopolimerização em cuba;
- Laminação de folhas;
- Fusão em leito de pó;
- Deposição de energia direta.

2.2.1 Jateamento de Ligante

Este tipo de processo consiste na utilização de dois tipos de materiais, um sendo material utilizado como aglutinante e o outro a matéria-prima escolhida para a formação da peça, o material deve ser em pó e a base de metal ou cerâmica. A aplicação desta metodologia é a dispersão do pó metálico ou cerâmico em um leito, em que subsequentemente é coberto por uma camada de aglutinante depositada sobre o mesmo. (XU et al. 2014 apud GOKULDOSS, KOLLA e ECKERT, 2017).

Antes da deposição da próxima camada, é necessário que a camada passe por um processo de secagem. Nele a superfície do leito em pó é aquecida por uma lâmpada de calor infravermelho, fazendo o processo parcial de cura do aglutinante e camada de pó, que em consequência estabelece maior resistência mecânica para o produto. Assim, camada por camada, de acordo com o formato pretendido, é desenvolvido a impressão da unidade requerida. (MIYANAJI, YANG, 2016).

2.2.2 Jateamento de Materiais

O jateamento de materiais conhecido como MJT, do inglês, *Material Jetting*, é o processo em que a confecção é obtida a partir de um material sendo injetado a uma superfície de construção. O material injetado, geralmente algum tipo de polímero, que é endurecido com luz ultravioleta. Também é feito camada por camada, porém sua peculiaridade é devida a sua deposição que é feita por gotas. Este tipo procedimento é lembrado como a de uma impressora a jato de tinta. (MOORE, WILLIAMS, 2015).

2.2.3 Extrusão de Materiais

Muito difundido na confecção de peças de materiais compósitos, e conhecida como MEAM, acrônimo do inglês, *Material Extrusion Additive Manufacturing*. O processo da manufatura aditiva por extrusão de materiais é devido ao uso de um filamento utilizado através de uma técnica de modelagem de deposição fundida, *Fused Deposition Modeling*, FDM, método no qual o material em um estado semissólido, é forçado a passar por uma matriz de forma a adquirir determinada geometria, que tem por finalidade esta geometria de constituir camadas a fim de obter um formato final desejado. (SPILLER, BERTO, RAZAVI, 2022).

2.2.4 Fotopolimerização em Cuba

A técnica de fotopolimerização em cuba, vem do inglês, *Vat Photopolymerization*, VP, que consiste na utilização de materiais sensíveis a luz UV, sendo chamados de resina fotopolimerizável. Estes são colocados em uma cuba na forma líquida, de forma que o feixe de luz UV é passado de acordo com a geometria da peça a ser construída, assim que passado, o processo solidifica o meio líquido em um determinado formato especificado, determinando a camada. A cada camada realizada foi precedida por passe do feixe de luz. Este método tem como vantagens, uma precisão relativamente alta e um ótimo acabamento superficial. (NOHUT, SCHWENTENWEIN, 2022).

2.2.5 Laminação de Folhas

A laminação de folhas, no inglês se refere a *Sheet Lamination*, SHL, foi um dos processos pioneiros na manufatura aditiva. Tem como princípio, utilizar o material para confecção do produto em forma de folhas, que podem ser cortadas a laser ou CO2. Cada folha utilizada no procedimento de manufatura representa uma camada depositada do produto. A fixação destas camadas sobrepostas vai depender do tipo de material que é empregado. As uniões das camadas foram classificadas como colagem adesiva, colagem térmica, fixação e soldagem ultrassônica. Por fim, ocorrido a adesão de camadas, obtém o formato final do produto. (GIBSON, STUCKER, KHORASANI, 2021).

2.2.6 Fusão em Leito de Pó

Powder Bed Fusion, PBF, ou na língua portuguesa, fusão em leito de pó, é um processo que consiste na fusão a laser de um pó sobre um leito. Este pó pode ser diversos tipos de materiais como, pó metálico, polímeros e também compósitos. A função do laser neste tipo de procedimento é causar a fusão do pó apenas no formato desejado da peça, ou seja, o laser passará fundindo no formato do produto requerido. A cada passe fundido o pó, é a formação de uma camada realizada na confecção da peça. Assim que feito a primeira camada, a mesma é coberta novamente de pó, a fim de sobrepor a camada anterior, de forma que finalize com a geometria pretendida. (YADROITSEV et al., 2021).

2.2.7 Deposição de Energia Direta

Como escopo deste trabalho e conhecida como *Directed Energy Deposition*, DED, este tipo de metodologia consiste na fusão do material, material que pode ser a base de polímeros, cerâmicos, metálicos e vários tipos de compósitos. Sendo assim, diferenciando dos demais métodos citados, em que processos que necessitam de material pré colocado ou processos que precisam de um leito de pó, este simplesmente funde o material à medida que é depositado. (GIBSON, STUCKER, KHORASANI, 2021).

Este tipo de processo possui variações em sua metodologia. Portanto de acordo com (DING et al., 2015), a deposição por energia direta pode ser classificada em três grupos:

- Energia a laser;
- Feixe de elétrons;
- Soldagem a arco elétrico.

2.2.7.1 Manufatura Aditiva por Fio a Laser

Sendo uma variação da deposição de energia direta, a deposição de energia direta a laser é conhecida como *Laser Wire Additive Manufacturing*, LWAM, que consiste na fusão através de um feixe de laser nos fios metálicos que são depositados para confecção da peça. A alimentação do arame de fio metálico em contato com a fonte de calor, o laser, faz com que a matéria-prima seja fundida, realizando assim a camada, e sucessivamente camadas sobre camadas, atingindo a geometria final da peça proposta. (ZENOU, GARINGER, 2018 apud MBODJ et al., 2021).

2.2.7.2 Manufatura Aditiva por Feixe de Elétrons

Processo patenteado pela NASA, com o nome de *Electron Beam Freeform Fabrication*, EBF, é utilizado para fabricação de peças de alta complexidade e geralmente baixo acabamento. Este tipo de operação utiliza feixe de elétrons focalizado em um ambiente a vácuo, assim, colocado o substrato no vácuo, o feixe de elétrons cria uma massa de fusão no arame utilizado, confeccionando a camada da peça. Este procedimento é repetido a fim de formar camadas até que obtenha o formato final do produto. (TAMINGER, HAFLEY, BIRD, 2007).

2.2.7.3 Manufatura Aditiva a Arco Elétrico

A metodologia aplicada neste trabalho é a manufatura aditiva a arco elétrico, comumente conhecida como, *Wire Arc Additive Manufacturing*, WAAM, em que consiste em aplicar o procedimento de manufatura através de cordão de solda. Utilizando o conceito de soldagem, através da diferença de potencial entre dois polos, sendo um negativo e outro positivo, que conseqüentemente gera um arco elétrico, faz com que o metal de adição seja fundido e depositado em um substrato, formando a camada. Assim, camada sobre camada são aderidas até que se forme a geometria final do produto. (WANG et al., 2012).

Considerada uma técnica promissora na manufatura aditiva, a WAAM demonstra grandes vantagens em seu processo, pois possui altas taxas de deposição, e também é considerada uma alternativa de manufatura aditiva de menor custo em relação aos demais. Em comparação com os demais processos, demonstra menor complexidade de operação e maior custo benefício, também vale ressaltar baixa periculosidade em sua execução. (DING et al., 2014).

No presente trabalho é utilizado o processo de manufatura aditiva arco elétrico TIG pulsado. Derivado do processo WAAM, que é explicado a seguir sua metodologia de soldagem e como ocorre a confecção de uma peça neste tipo de processo.

2.3 Manufatura Aditiva a Arco Elétrico com o Processo TIG Pulsado

É um conjunto de processos, o processo TIG pulsado juntamente com o processo WAAM. Em que resulta nas deposições de camadas, camadas realizadas pelo processo TIG pulsado. Quando sobrepostas, tem a intenção de resultar em uma geometria final. Porém este método não pode ser ajustado por soldadores experientes, pois necessita de um controle de automatização que deve ser desenvolvido, a fim de garantir estabilidade e comprimento de arco nas deposições realizadas. As vantagens são baseadas na manufatura aditiva a arco elétrico, onde observa maior deposição de metal de adição em relação aos demais citados no processo de manufatura aditiva em deposição direta. Também o custo e a complexidade técnica do processo são menores, pois não precisa de um ambiente com vácuo como no de deposição por feixe de elétrons. (WANG et al., 2019).

Para entender melhor sobre a atuação do processo TIG pulsado na manufatura aditiva, se faz necessário uma breve explicação sobre o processo TIG

pulsado, como ocorre e o que é necessário neste tipo de técnica. A seguir é explicado os fenômenos do mesmo.

2.3.1 Processo TIG

TIG vem da abreviação, *Tungsten Inert Gas*, que também possui uma outra abreviação muito utilizada GTAW, *Gas Tungsten Arc Welding*, que na língua portuguesa é denominado como soldagem a arco elétrico com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa, ou como popularmente é denominado apenas de processo TIG. Se refere a um processo de soldagem com o intuito de unir peças metálicas a partir do seu aquecimento e fusão causado pelo arco elétrico, estabelecido pela diferença de potencial entre o eletrodo não consumível de tungstênio e o metal base. Para que ocorra a formação de um arco estável e que não obtenha uma má formação do cordão de solda, é necessária uma proteção na poça de fusão e no arco, sendo esta composta de gás inerte ou mistura de gases inertes. (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

Das possíveis operações realizada no TIG, neste presente trabalho é utilizado processo TIG pulsado. Esta técnica possibilita alternar a corrente de soldagem de acordo com a necessidade da frequência no processo. Alternando a corrente, conseqüentemente altera a deposição de energia utilizada no processo, pois o processo TIG contém deposições muito elevadas de energia, desfavorecendo a deposição na manufatura aditiva. (MADALI, SHAMANIAN, ASHRAFIZADEH, 2011 apud CUNHA, 2013).

Alternando a corrente de soldagem em um nível alto e baixo de energia em uma determinada frequência, pode ser observado que o modo de operação de soldagem é por ciclo, sendo o nível alto de pulso para penetração e contorno do cordão, e o outro nível sendo suficientemente baixo de energia para que o arco continue estável com uma menor deposição de energia. Neste procedimento pode ser observado menor efeito na zona termicamente afetada do material. (YOUSEFIEH, SHAMANIAN e SAATCHI, 2011).

Para realizar todo este procedimento de acontecer a geração do arco elétrico e estabilizar o mesmo, e também para que ocorra a fusão e deposição do metal de adição, se faz necessário alguns parâmetros que são imprescindíveis, esses parâmetros são:

- Vazão do gás de proteção;

- Corrente de soldagem;
- Velocidade de alimentação do arame;
- Velocidade de soldagem.

- Vazão do Gás de Proteção

É de fundamental importância a medição de vazão do gás de proteção de soldagem, pois influencia diretamente na qualidade do cordão de solda realizado, pois garante um arco estável, minimizando porosidade e descontinuidade do cordão de solda. A vazão do gás de proteção de soldagem é a quantidade de fluxo de gás de proteção, usualmente se encontra em unidades de litros por minutos “l/min”, que o processo receberá. Para o controle da quantidade de vazão necessária para o processo, é medido através de um rotâmetro preso na saída do cilindro de gás. (SCOTTI, PONOMAREV, 2014).

- Corrente de Soldagem

Responsável pela geração do arco elétrico entre o eletrodo e o metal de adição, é um fluxo de corrente elétrica que por passar por uma determinada resistência, gera calor a ponto de abrir um arco elétrico e fundir o metal de adição. (GUEDES, FILHO, 2009).

- Velocidade de Alimentação do Arame

Para garantir a continuidade do cordão de solda, é necessária uma alimentação constante do metal de adição. Para isso utiliza como parâmetro a velocidade de alimentação do arame, que é um dos responsáveis pela ininterrupção de operação, e que define um comprimento de arco constante durante o processo. (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

- Velocidade de Soldagem

Em termos de quantidade de deposição em relação ao tempo, é utilizado o termo velocidade de soldagem. Sendo a deposição de material para a confecção do cordão de solda em relação ao tempo. Pode ser observado que a velocidade de soldagem é inversamente proporcional a quantidade de energia depositada no cordão de solda, pois quanto maior a velocidade, menor a quantidade de calor cedida por unidade de área. (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

Os parâmetros podem variar de acordo com o metal de adição utilizado no processo de soldagem. Neste trabalho, o material utilizado se refere ao aço

ferramenta H13, é explicado a classificação do aço ferramenta, o H13 e sua composição e propriedades mecânicas pertencente a este metal de adição.

2.3.1.1 Aços Ferramenta

Classificados de acordo com suas características metalúrgicas, os aços ferramentas são aços especiais que contém elevadas propriedades mecânicas de acordo com sua composição, pois possui mais de 100 tipos de aços ferramentas atualmente. Das elevadas propriedades mecânicas, pode ser citado alta dureza e resistência ao desgaste, sendo muito utilizado para processos de fabricação mecânica, como material para matrizes, moldes e entre outras utilizadas para determinados tipos de processos. (VALES, 2010). Dos vários tipos de aços ferramentas, é utilizado neste trabalho o aço AISI H13.

- Aço H13

É um aço ferramenta muito utilizado em trabalho a quente, devido sua composição química que beneficia seu uso neste tipo de trabalho, pois conserva suas propriedades, evitando a depreciação do material de acordo com a função determinada. (NADCA, 1997 apud FERREIRA, 2001).

A Figura 2 representa a composição do aço H13, sendo os teores de sua composição representados em termos percentuais.

Figura 2 - Composição do H13

	C	Mn	Si	Cr	V	Mo
Mínimo	0,37	0,20	0,80	5,00	0,80	1,20
Máximo	0,42	0,50	1,20	5,50	1,20	1,75
Composição química expressa em % peso						

Fonte: NADCA (1997).

De acordo com a composição dada na Figura 2, agora pode ser observado as propriedades mecânicas do H13 na figura 3, propriedades que define a função que o material pode exercer de acordo com a necessidade do trabalho. A figura 3 representa as propriedades deste aço ferramenta, valores baseados para aço AISI H13 temperado a ar ou óleo, em uma faixa de temperatura de 540 a 1025 °C.

Figura 3 - Propriedades mecânicas aço AISI H13

Dureza (HV)	Resistência Máxima de Tração (Mpa)	Alongamento até Ruptura %	Modulo de Elasticidade (Gpa)
595	1990	9	210

Fonte – Adaptado de Matweb (1999).

Observado a composição do aço H13 e algumas de suas propriedades mecânicas, posteriormente é mostrado o resultado destas propriedades pós deposição do processo de manufatura aditiva com o processo TIG pulsado.

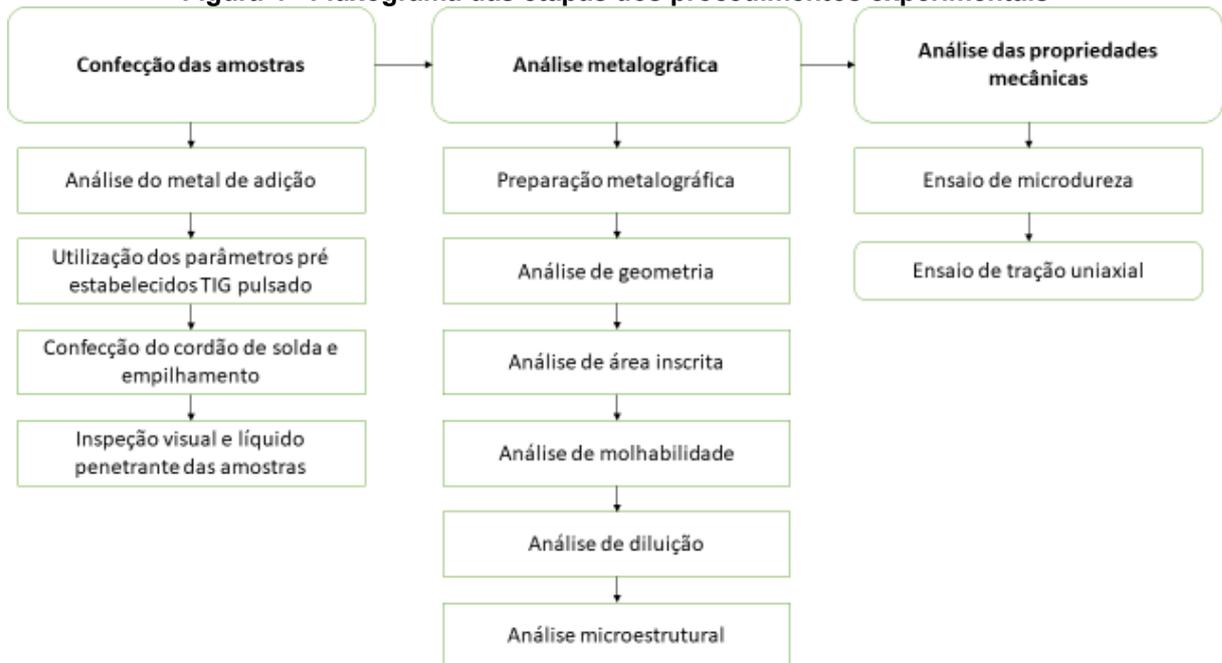
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho é elaborado de forma experimental, onde é abordado de forma qualitativa e quantitativa em seu procedimento, a fim que se obtenha o resultado esperado no término do experimento.

3.1 Fluxograma

A fim de atingir o objetivo desejado explícito no trabalho, são necessários passos experimentais, passos que deve ser seguido em determinada ordem para que não obtenha divergências ao longo do experimento. Destes passos, é mostrado na Figura 4, um fluxograma que prescreve as respectivas sequências de trabalho, a fim de alcançar dados similares aos dados que serão apresentados nos resultados deste trabalho.

Figura 4 - Fluxograma das etapas dos procedimentos experimentais



Fonte: Autoria Própria.

Analisado os passos necessários de acordo com os tópicos e seus respectivos subtópicos do fluxograma, é dada a continuidade ao experimento, explanando detalhadamente cada tópico prescrito acima

3.2 Material

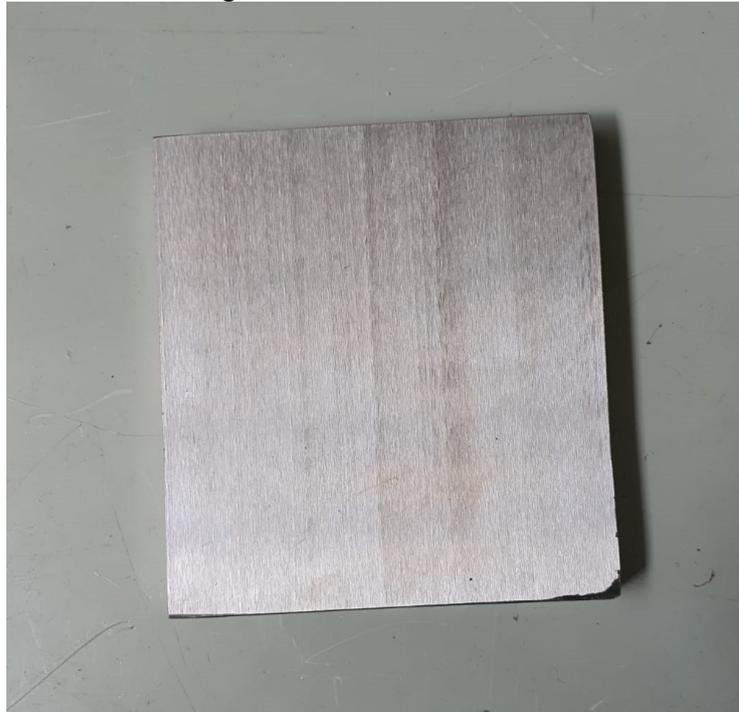
Primeiramente, antes de dar início aos passos descritos anteriormente, foi realizada uma análise no metal de adição, H13. Metal em formato de arame circular com o diâmetro igual a 1,2mm. A análise descreve as composições químicas do material, sendo necessária para a averiguação do material empregado no experimento, pois de acordo com o resultado da composição que é definido qual é o material usado. Para tal feito, foi utilizado o método qualitativo de espectroscopia por dispersão de energia (EDS). Este método é operado no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Para que ocorra o empilhamento com o metal de adição, é necessário um metal base, que nada mais que a base para os cordões solda sobrepostas acima do mesmo. Para isso, utilizou três chapas metálica de aço carbono SAE 1045, com dimensões de 100mm de comprimento, 92mm de largura e 12,7mm de espessura.

3.3 Confeção das Amostras

Na sequência, foi necessário realizar a limpeza do metal base, pois a camada de óxido é prejudicial em termos qualitativos do cordão de solda, podendo comprometer os resultados dos experimentos. Na limpeza, utilizou a esmerilhadora Bosch® GWS 900W e lixa-disco flap grão 80, no qual foi removido as imperfeições e camadas de óxido remanescente.

Fotografia 1 - Metal base utilizado



Fonte – Autoria Própria.

No prosseguimento do experimento, para a realização da confecção dos cordões de solda, foi usado a máquina Multiprocessos Arco Inteligente IMC® DIGIplus A7 ACPO3C, com a configuração de trabalho em 220V. Para configurar esta máquina trabalhando como TIG pulsado, é necessário estabelecer parâmetros de soldagem, parâmetros que estudados previamente, tem o intuito de fornecer a melhor geometria para manufatura aditiva no processo TIG pulsado.

3.3.1 Utilização dos Parâmetros Pré-definidos TIG Pulsado

De acordo com TOALDO (2022), na realização do experimento, é realizado o pré-aquecimento do metal base a 200°C, e em sequência utilizado os parâmetros obtidos experimentalmente na máquina Multiprocessos Arco Inteligente IMC® DIGIplus A7 ACPO3C, conforme a Tabela 1.

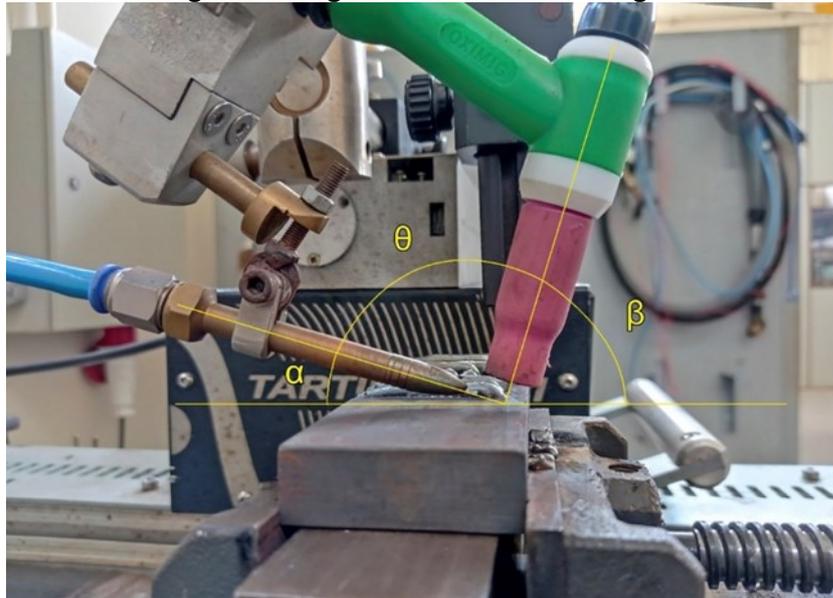
Tabela 1 - Parâmetros utilizados no processo GTAW pulsado

Corrente de Pico	200 A
Corrente de Base	100 A
Tensão de soldagem (média)	14 V
Velocidade de soldagem	20 cm/min
Frequência de pico	10 Hz
Frequência de base	10 Hz
Polaridade	CC -
Gás de proteção	Argônio; 12 L/min
Diâmetro do bocal	10 mm
Eletrodo (W+2%ThO ₂)	Ø 2,4 mm
Ângulo da ponta do eletrodo	60°
Comprimento do arco	3 mm
Arame de alimentação (H13)	Ø 1,2 mm
Alimentação de arame no pico	2,9 m/min
Alimentação de arame na base	1,2 m/min
Ângulo de incidência do arame (α)	15° da superfície
Ângulo de incidência da tocha (β)	75° da superfície
Ângulo entre tocha e arame (θ)	90°

Fonte: Adaptado (2022).

Na velocidade de soldagem conforme a Tabela 1, a programação foi feita pelo Tartílope V1, máquina responsável pela movimentação da soldagem em velocidade constante em um eixo, denominado eixo X, possibilitando a soldagem longitudinal realizada neste trabalho.

Os parâmetros de ângulos de incidência α , β e o ângulo entre tocha e arame θ , devem ser seguidos minuciosamente conforme realizado e demonstrado na Figura 5.

Figura 5 - Ângulos da tocha de soldagem

Fonte: Toaldo (2022).

Após realizar as configurações citadas nas máquinas, é também importante a configuração de geometria do empilhamento e sentido de soldagem, pois interferem qualitativamente o empilhamento desejado. O sentido de soldagem é mostrado na Fotografia 2, sentido único a ser utilizado no experimento.

Fotografia 2 - Sentido de soldagem



Fonte: Autorial Própria.

Pode ser observado a soldagem no metal base tem sentido da esquerda para a direita de acordo com a ilustração da Fotografia 2, onde foi seguido tal procedimento para obter os mesmos resultados posteriormente discutidos.

3.3.2 Confeção do Cordão, Novo Parâmetro e Empilhamento

Após realizar todas as configurações nas máquinas conforme citado, foi realizado a confecção do cordão, onde foi possível de ser observado uma alta taxa de deposição de energia com a utilização dos parâmetros de soldagem selecionados. Com isso, foi denominado este parâmetro como parâmetro A, e alterado a corrente de base e pico de soldagem, para um novo parâmetro denominado de parâmetro B, conforme a Tabela 2 descreve.

Tabela 2 - Parâmetro B utilizado no processo GTAW pulsado

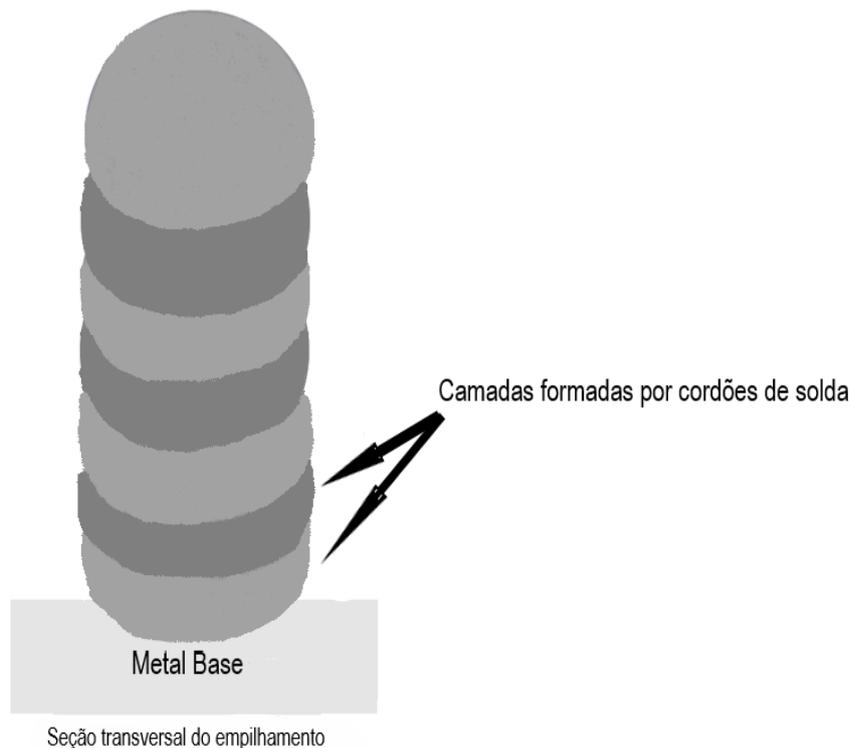
Corrente de Pico	180 A
Corrente de Base	90 A
Tensão de soldagem (média)	14 V
Velocidade de soldagem	20 cm/min
Frequência de pico	10 Hz
Frequência de base	10 Hz
Polaridade	CC -

Gás de proteção	Argônio; 12 L/min
Diâmetro do bocal	10 mm
Eletrodo (W+2%ThO ₂)	Ø 2,4 mm
Ângulo da ponta do eletrodo	60°
Comprimento do arco	3 mm
Arame de alimentação (H13)	Ø 1,2 mm
Alimentação de arame no pico	2,9 m/min
Alimentação de arame na base	1,2 m/min
Ângulo de incidência do arame (α)	15° da superfície
Ângulo de incidência da tocha (β)	75° da superfície
Ângulo entre tocha e arame (θ)	90°

Fonte: Adaptado (2022).

Realizado os dois cordões de solda, um com o parâmetro A e outro com o parâmetro B, posteriormente foi feito dois empilhamentos, cada qual com um parâmetro, empilhamento de cordões que formaram camadas de acordo com o esperado do experimento. A geometria requisitada para os dois parâmetros é mostrada na Figura 6, sendo um total de 40 cordões de solda em cada empilhamento.

Figura 6 - Proposta de empilhamento



Fonte: Adaptado (2022).

3.3.3 Inspeção do Cordão de Solda

Produzidos os cordões conforme os parâmetros dos procedimentos mencionados, é necessária uma inspeção qualitativa do cordão, pois na soldagem os cordões podem surgir defeitos que comprometem a qualidade do cordão de solda. Para isso realizou inspeções visuais e líquido penetrante para avaliar se o cordão de solda é aceitável qualitativamente.

3.3.3.1 Ensaio do Cordão de Solda

Na inspeção visual de solda, após confeccionar o cordão, é realizado o ensaio visual, avaliando o estado da superfície do cordão de solda. Como critério, primeiramente foi limpado a peça soldada com a esmerilhadora Bosch® GWS 900W e lixa-disco flap grão 80 e posteriormente feito a inspeção visual a olho nu em um local devidamente iluminado, tornando possível a identificação de trincas, descontinuidades e porosidades superficiais do cordão soldado.

3.3.3.2 Ensaio Líquido Penetrante

Feito a inspeção visual, executou em seguida o ensaio de líquido penetrante. Primeiro foi limpados os empilhamentos com a escova de aço e posteriormente aplicado na superfície do cordão de solda o líquido Metal-chek VP-30 do tipo aerossol removível a água. Aplicado o líquido na superfície do material, é necessário esperar um tempo de 10 minutos para a penetração do produto. Passados os 10 minutos, realizou a remoção do excesso com água e esperado um tempo de 5 minutos de secagem da superfície, que subsequentemente aplicou o revelador Metal-chek D70 do tipo aerossol, onde revelado se a solda possui trincas, porosidades e descontinuidades que não foram detectadas no ensaio visual.

Fotografia 3 - Componentes utilizados no ensaio líquido penetrante



Fonte: Autoria Própria.

3.4 Análise Metalográfica

Realizado o empilhamento conforme prescrito, iniciou a preparação dos corpos de prova soldados e empilhados, para posteriormente realizar as análises necessárias para conclusão deste trabalho.

3.4.1 Preparação Metalográfica

Para ter conseguido utilizar as máquinas onde foi possível analisar as propriedades desejadas, foi realizado uma sequência de passos que devem seguir o seguinte critério. Primeiro executado o corte na solda do material transversalmente, onde utilizou a máquina de corte (Buehler® IsoMet 4000), de arrefecimento controlado pelo fluido (Buehler® Cool 3 10-6001), com avanço de 5,0 mm/min e 4000 rpm.

Realizado os cortes dos corpos de prova, é passado para a etapa de lixamento para a análise macroestrutural e microestrutural. Para a análise macroestrutural e microestrutural o lixamento das amostras sucedeu pela lixadeira semiautomática Buehler Vector com água como fluido de trabalho para as lixas.

Utilizou uma variação das lixas, as lixas variaram de 220, 400, 800, 1000 e 2000 mesh, com uma carga programada de 15N mantendo a amostra fixa e com rotação contrária à lixa.

Sucessivamente foi iniciado a etapa de polimento, onde ainda foi realizada na máquina de lixamento das amostras, onde mudado o procedimento de execução. Utilizado o lubrificante Schneider® LubBlue de baixa viscosidade ao invés da água como prescrito anteriormente, e suspensão de diamante Stuers® DiaDuo de granulometria 3 μm e 0,25 μm com rotações 200 rpm.

Polido a amostra para a análise microestrutural, foi realizado ataque químico para observar as características microestruturais do mesmo. Com isso utilizou ataque químico com Vilela, imerso por um tempo de 10 segundos. Onde passado este tempo, foi imediatamente lavado com água e álcool, e sucessivamente secado, para que esteja pronto para os próximos passos que foram realizados em seguida.

Fotografia 4 - Máquina utilizada para lixamento e polimento

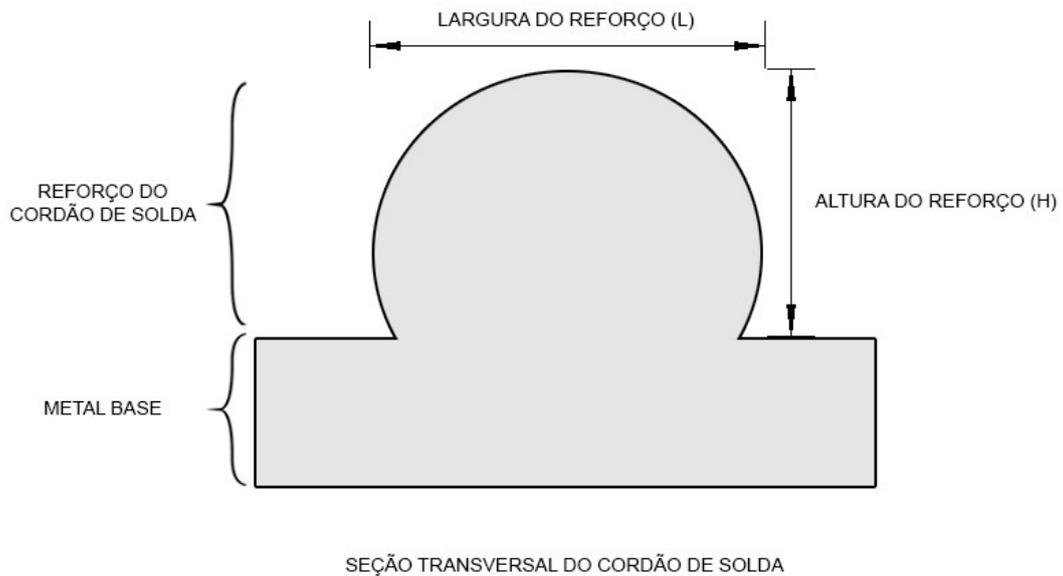


Fonte: Autoria Própria.

3.4.2 Análise de Geometria

Realizado a preparação dos corpos de prova, foi passado para a primeira análise realizada do experimento, a análise geométrica. Esta análise consiste na determinação da medida da base e da altura do reforço, onde é calculada pela divisão da altura pela largura, encontrando a razão. Esta razão deve ser o mais próximo de 1 (um) possível, com o intuito da similaridade da razão de um quadrado, para a melhor geometria de empilhamento. De acordo com a Figura 7 as dimensões coletadas para análise da razão do cordões de solda do parâmetro A e parâmetro B realizado.

Figura 7 - Análise de geometria do cordão de solda simples



Fonte: Toaldo (2022).

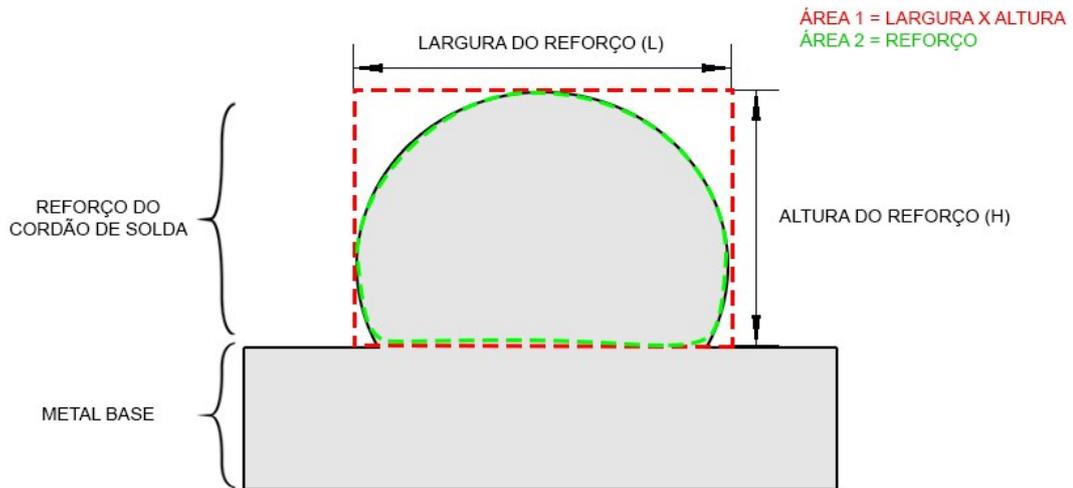
As análises e medições foram realizadas pelo software ZEISS® AxioVision SE64 Rel. 4.9.1 pertencente à empresa ZEISS®.

Após a primeira análise, foi efetuada a segunda análise, análise de área inscrita do cordão de solda.

3.4.3 Análise de Área Inscrita

Com o intuito similar da análise geométrica, também foi realizado a análise da área inscrita, onde compara a razão de áreas, sendo a de melhor qualidade a razão que estiver mais próxima de 1 (um). A comparação realizada, é feita pela razão da área do reforço do cordão de solda pela razão de um quadrado com a largura e altura mais próxima possível do reforço, conforme na Figura 8.

Figura 8 - Análise de preenchimento de área do cordão de solda



SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORDÃO DE SOLDA

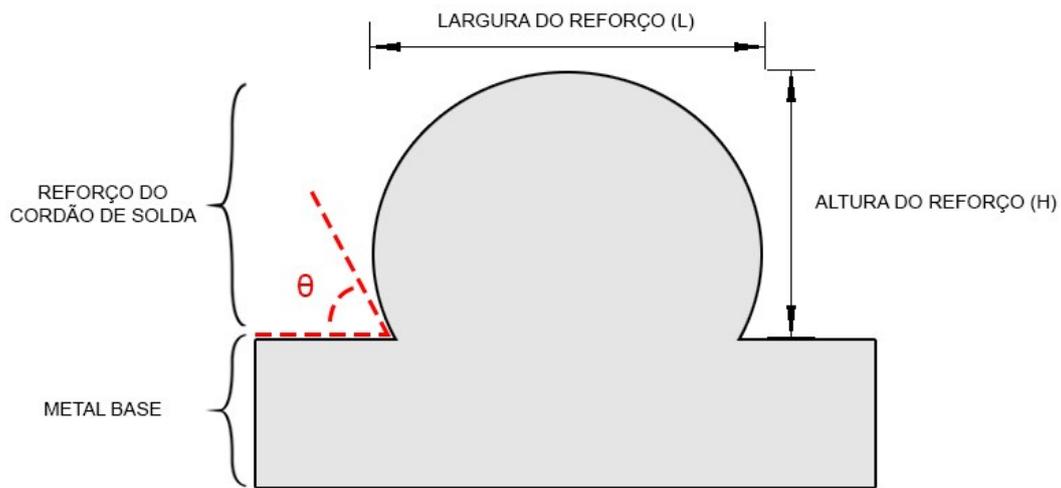
Fonte: Toaldo (2022).

Para a análise das áreas mencionadas acima, utilizou o software ZEISS® AxioVision SE64 Rel. 4.9.1, fazendo a medida da área do cordão (ÁREA 2) e área entre base e altura (ÁREA 1).

3.4.4 Análise de Molhabilidade

Executado as análises de geometria e área, ainda em termos construtivos foi realizado a análise de molhabilidade, onde compara o ângulo entre o metal base e o reforço, influenciando diretamente no empilhamento das respectivas camadas desejadas, onde é desejado uma perpendicularidade possível entre o metal base e o empilhamento efetuado. A Figura 9 demonstra com melhor clareza o ângulo mencionado.

Figura 9 - Análise de molhabilidade do cordão de solda



SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORDÃO DE SOLDA

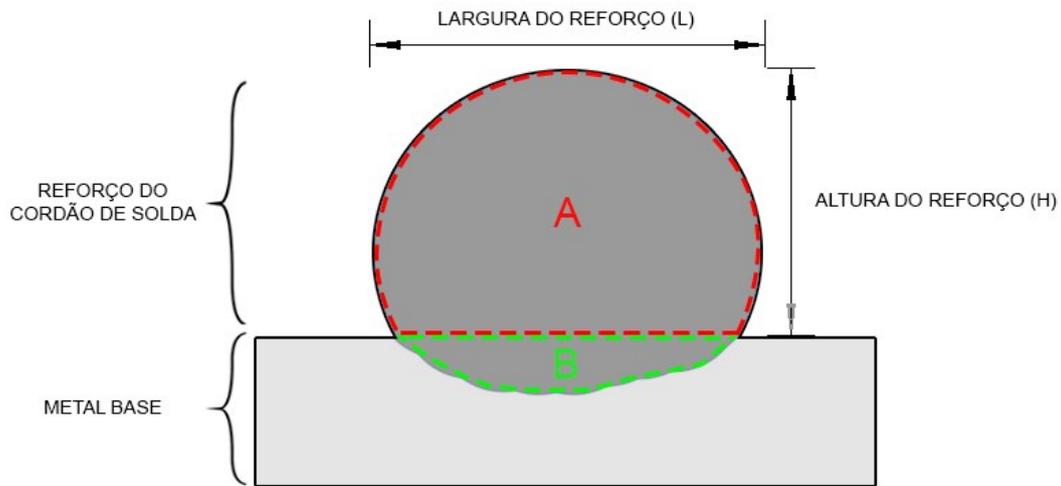
Fonte: Toaldo (2022).

A realização desta análise foi feita pelo software ZEISS® AxioVision SE64 Rel. 4.9.1, fazendo uma medida direta do ângulo (θ), onde é desejado o ângulo mais próximo possível de 90° (graus).

3.4.5 Análise de Diluição

Passados os termos construtivos para melhor geometria, executou a análise de diluição, que se trata da quantidade de material fundido do metal de adição no metal base, com o intuito de uma diluição otimizada, pois ela influencia diretamente no empilhamento do cordão de solda. A análise de diluição foi obtida pelo software ZEISS® AxioVision SE64 Rel. 4.9.1, medindo a área A (área acima do Metal Base) e a área B (área abaixo do Metal Base), demonstrada na Figura 10.

Figura 10 - Análise de diluição do cordão de solda



SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORDÃO DE SOLDADA

Fonte: Toaldo (2022).

O valor obtido para ser analisado com clareza qual a medição da diluição é realizada pela razão da área diluída do metal base sobre a área diluída do metal base mais a área do reforço das amostras, conforme a equação determina.

$$\text{DILUIÇÃO } (\sigma) = \frac{\text{ÁREA B}}{(\text{ÁREA A} + \text{ÁREA B})} \times 100 \quad (1)$$

3.4.6 Análise Microestrutural

Realizado as análises macroestruturais geométricas, realizou a análise microestrutural dos corpos de prova conforme precedido anteriormente na preparação metalográfica do microestrutural das amostras.

Para a realização desta análise foi utilizado o microscópio ótico ZEISS® visto na Fotografia 5.

Fotografia 5 - Microscópio utilizado para análise microestrutural



Fonte: Autoria Própria.

Analisado de forma macro e microestrutural as amostras com os parâmetros A e B, encerrou este tipo de análise e foi dado prosseguimento para as análises de propriedades mecânicas a seguir.

3.5 Análise das Propriedades Mecânicas

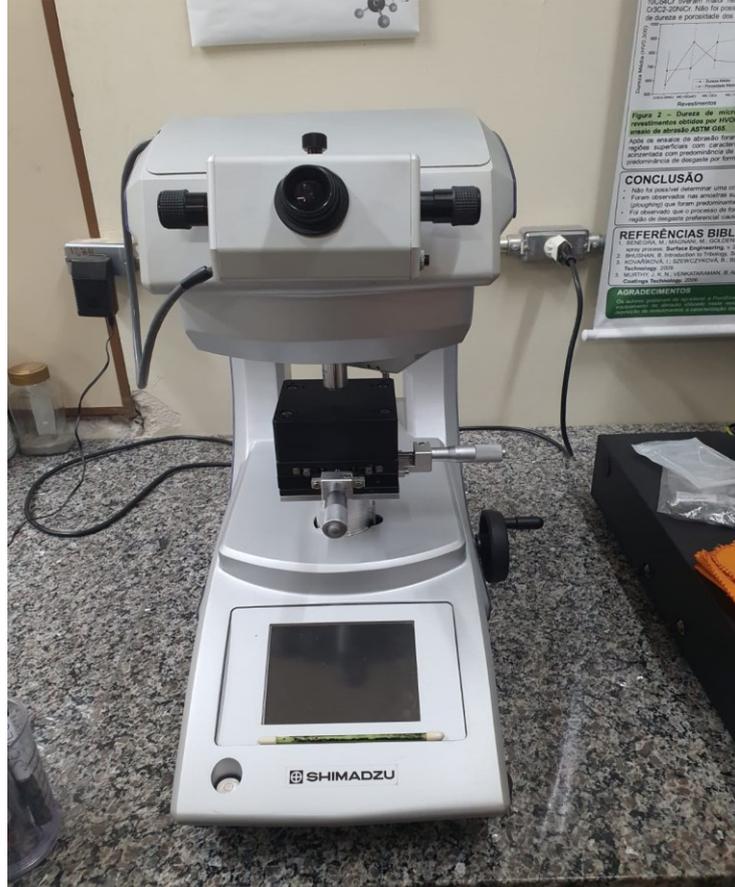
Analisado criteriosamente conforme prescrito os passos da análise metalográfica, é passado para a próxima etapa, onde analisada as propriedades mecânicas dos corpos de prova soldado conforme as instruções em seguida.

3.5.1 Ensaio de Microdureza Vickers

A primeira propriedade mecânica analisada é a microdureza das amostras, pois o H13 sendo um aço ferramenta, a dureza é uma propriedade preponderante para a utilização deste material. Com isso foi mapeado a dureza ao longo dos empilhamentos pelo método de micropenetração de Vickers, fazendo com que seja analisado se ao longo do material a sua dureza é uniforme. Para tal, utilizou o durômetro de Microescala Shimadzu HMV-G20 Series, conforme a norma ASTM

E384-11 (2011) - Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials, para durezas Vickers com pré carga de 300 gf (gramas-força) e indentador de pirâmide de diamante de base quadrada, com ângulo de 136° entre as faces opostas. Na Fotografia 6 a seguir, é mostrado o durômetro utilizado neste presente trabalho.

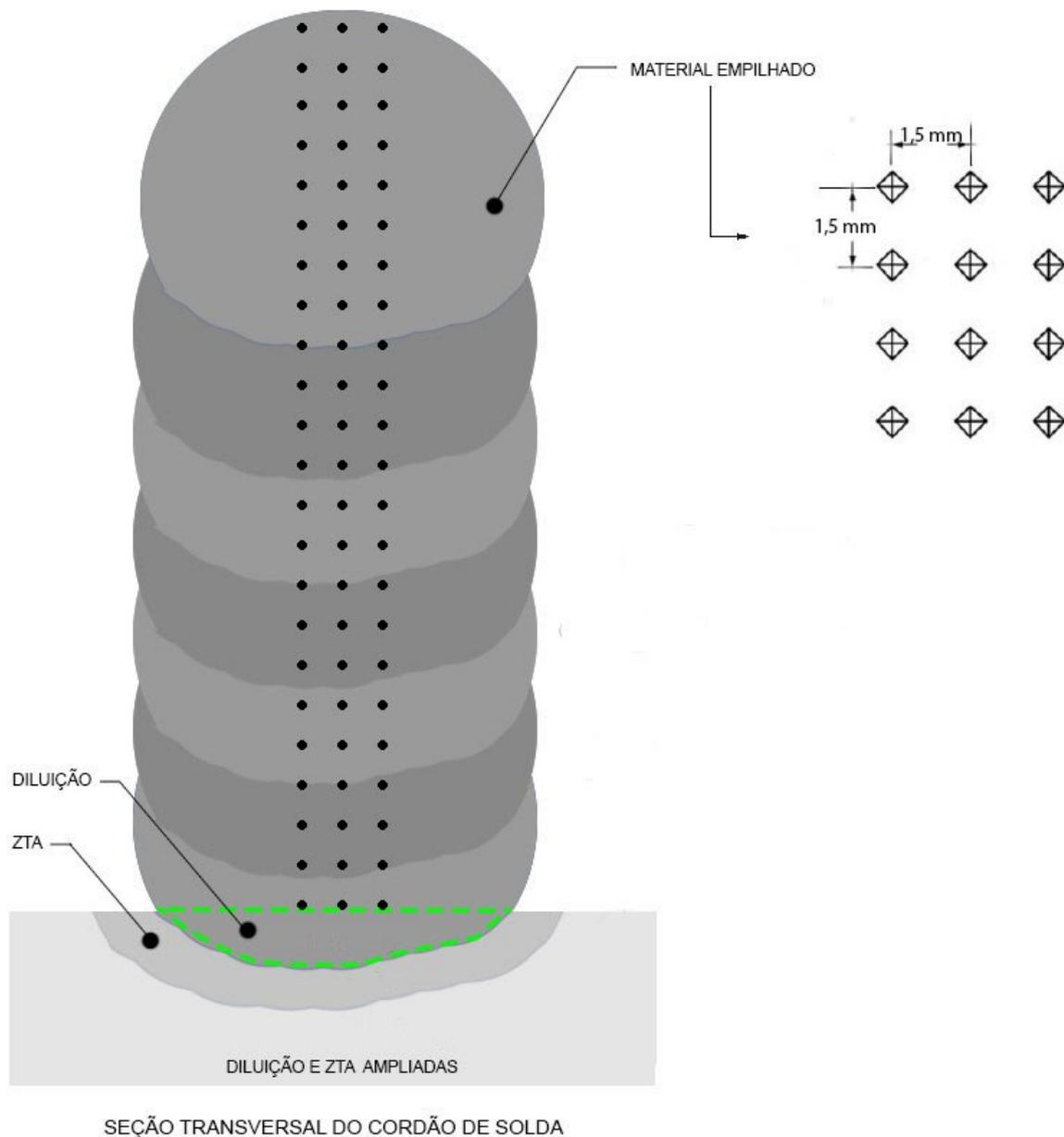
Fotografia 6 - Durômetro utilizado no ensaio de microdureza



Fonte: Autoria Própria.

Os corpos de prova são posicionados com o lado da preparação amostral voltado para o microdurômetro, onde ao longo do corpo da amostra, foi realizado sucessivos ensaios de microdureza com o espaçamento de 1,5 mm entre identificações, mapeando a dureza ao longo dos empilhamentos. Este procedimento pode ser visto com maior clareza de acordo com a Figura 11.

Figura 11 - Procedimento de medidas do ensaio de microdureza



Fonte: Adaptado (2022).

Os pontilhados pretos da figura mostram o mapeamento da dureza ao longo dos corpos de prova, e ao lado é mostrado o espaçamento realizado entre cada ensaio de microdureza Vickers conforme mencionado.

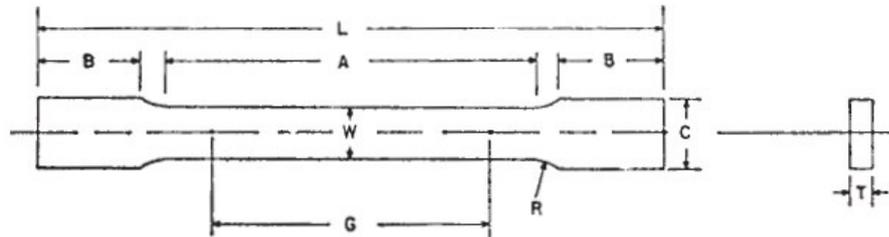
3.5.2 Ensaio de Tração Uniaxial

Mapeado a dureza das amostras conforme realizado os empilhamentos, para que seja efetuado os ensaios de tração, os corpos de prova foram cortados com as

dimensões segundo a variação da norma ASTM E 8M – 04, norma que estabelece o critério das dimensões e força de tração aplicado para coleta e análise dos dados da resistência mecânica a tração do material estudado.

De acordo com a Figura 12, é prescrito as dimensões que foram seguidas minuciosamente para obter os dados desejados.

Figura 12 - Dimensões do corpo de prova a ser seguida



Largura Nominal	ASTM E 8M - 04	UTILIZADOS NO TRABALHO
	6 mm	-
G— Comprimento do medidor	25.0 +/- 0.1	12.5 +/- 0.1
W— Lagura	6.0 +/- 0.1	6.0 +/- 0.1
T— Espessura (função do material)		4
R— Raio	6	3
L— Comprimento total	100	50
A— Comprimento da seção reduzida	32	16
B— Comprimento da seção de aperto	30	15
C— Largura da seção de aperto	10	10

Fonte: Toaldo (2022).

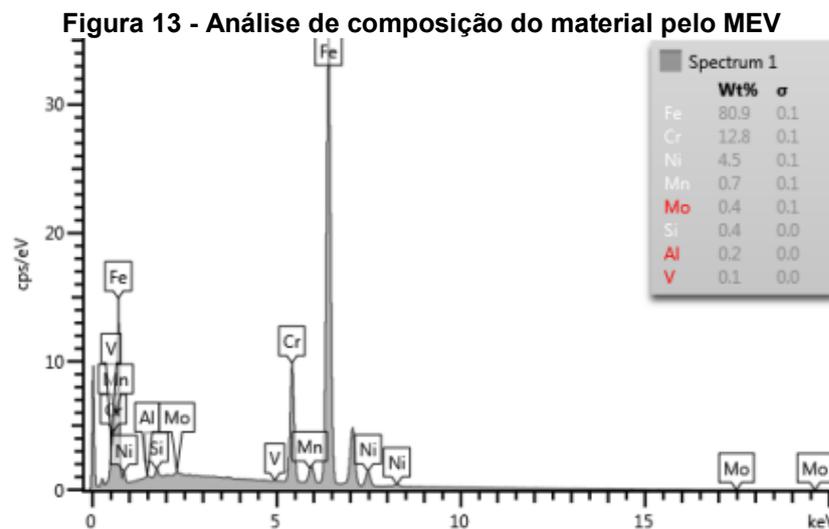
Para cada parâmetro utilizado, foram cortados dois corpos de prova, e dimensionado as amostras conforme a norma, foram realizados os ensaios de tração uniaxial pela máquina EMIC Linha DL-30000 de capacidade até 10t, que sucessivamente coletado e estudado os dados obtidos pelos ensaios.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos seguindo a metodologia citada do processo de manufatura aditivada por TIG pulsado para o aço H13, onde é caracterizado as propriedades macroscópica, microscópica e mecânicas dos empilhamentos com seus respectivos parâmetros.

4.1 Análise do Material

De acordo com a metodologia citada anteriormente, o primeiro passo feito foi o da análise do material pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV), onde foi determinado a composição do arame trabalhado para a manufatura aditiva. Desta composição, apresentou um percentual de cromo acima da tolerância máxima, resultado de 12,8Wt%, ao invés do estabelecido anteriormente por NADCA (1997), da revisão bibliográfica, o limite do percentual de cromo deve ser no máximo de 5,5Wt% na composição expressa em peso, e também o manganês está acima 0,7%Wt do máximo da composição imposta. Para os elementos abaixo do mínimo estabelecido estão o molebdênio com uma diferença de 0,8%Wt, silício com diferença de 0,4%Wt e vanádio com 0,7%Wt. Essas diferenças consequentemente mudam as propriedades mecânicas do material estudado.



Fonte: Autoria Própria.

4.2 Confecção das Amostras

Após analisado o arame para soldagem pelo MEV, foi realizado o primeiro cordão de solda com o parâmetro A estabelecido por TOALDO (2022), onde é definido os parâmetros de soldagem para manufatura aditiva.

4.2.1 Confeção dos Cordões de Solda

Realizado o primeiro cordão de solda, pode ser observado um cordão com larga espessura, ou seja, um aspecto achatado. Devido a essa característica, foi resolvido trabalhar com o parâmetro B conforme dito, com mudança na corrente de pico e corrente de base. Na Fotografia 7 é mostrado os dois cordões realizados com seus respectivos parâmetros de soldagem.

Fotografia 7 - Cordões de solda realizado



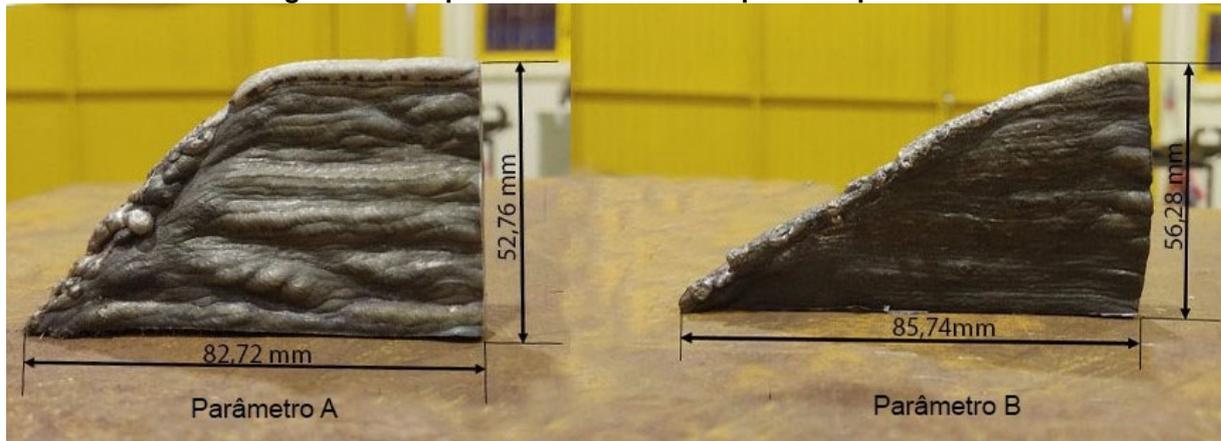
Fonte: Autoria Própria.

Visualmente pela figura, pode ser visto uma redução de largura devido a redução das correntes de pico e base, que conseqüentemente reduz a energia de deposição do material. Nas análises de geometria, área, molhabilidade e diluição, será possível definir com precisão a diferença imposta pela mudança de parâmetro.

4.2.2 Confeção dos Empilhamentos

Realizado os cordões, passou para a realização dos empilhamentos com os dois parâmetros atribuídos neste trabalho. Para a caracterização das propriedades mecânicas, foi realizado um total de 40 cordões em cada empilhamento. Na Fotografia 8, é possível observar os dois empilhamentos após retirado do metal base e suas dimensões, que é um fator importante para a confecção dos corpos de prova para ensaio de tração conforme a norma.

Fotografia 8 - Empilhamentos e seus respectivos parâmetros



Fonte: Autoria Própria.

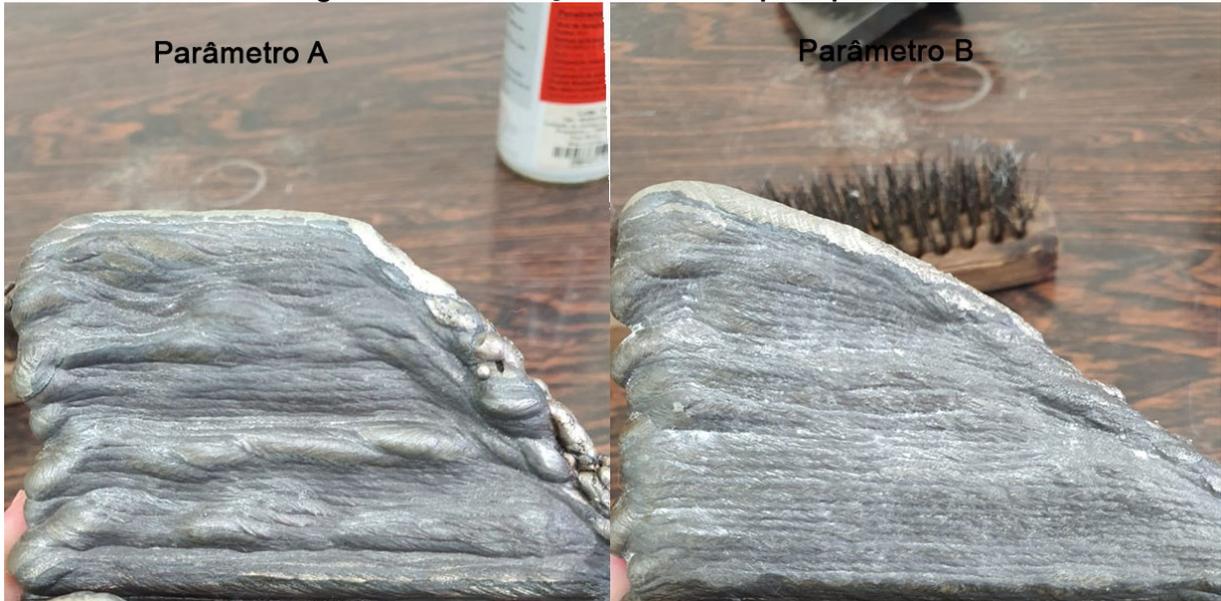
No parâmetro A é possível observar maior irregularidade do empilhamento e também uma altura menor comparada ao parâmetro B, devido a maior taxa de deposição de energia. As irregularidades dos empilhamentos têm melhor visibilidade na seção transversal que será mostrado posteriormente.

4.2.3 Ensaio Visual e Líquido Penetrante

Realizado os empilhamentos, é passado para o ensaio visual e líquido penetrante. No ensaio visual percebeu apenas irregularidades no empilhamento, não houve descontinuidades ou porosidade a ponto de comprometer o empilhamento manufaturado.

Para o ensaio de líquido penetrante, com o intuito de analisar se os empilhamentos contêm trincas superficiais, foi aplicado primeiramente o líquido penetrante e depois o revelador. Passado o tempo necessário e tirado o excesso do revelador, pode ser percebido que não havia trincas superficiais em nenhum dos empilhamentos, portanto, em termos qualitativos de soldagem, o empilhamento estava de acordo com o que foi requisitado. Na Fotografia 9 é mostrado os empilhamentos com o revelador, e na mesma é possível notar que não a presença de trincas.

Fotografia 9 - Visualização do ensaio líquido penetrante



Fonte: Autoria Própria.

Visto que os empilhamentos tinham geometria e qualidades de soldagem suficientemente necessárias, foi possível dar continuidade o trabalho para realizar as análises metalográficas e propriedades mecânicas.

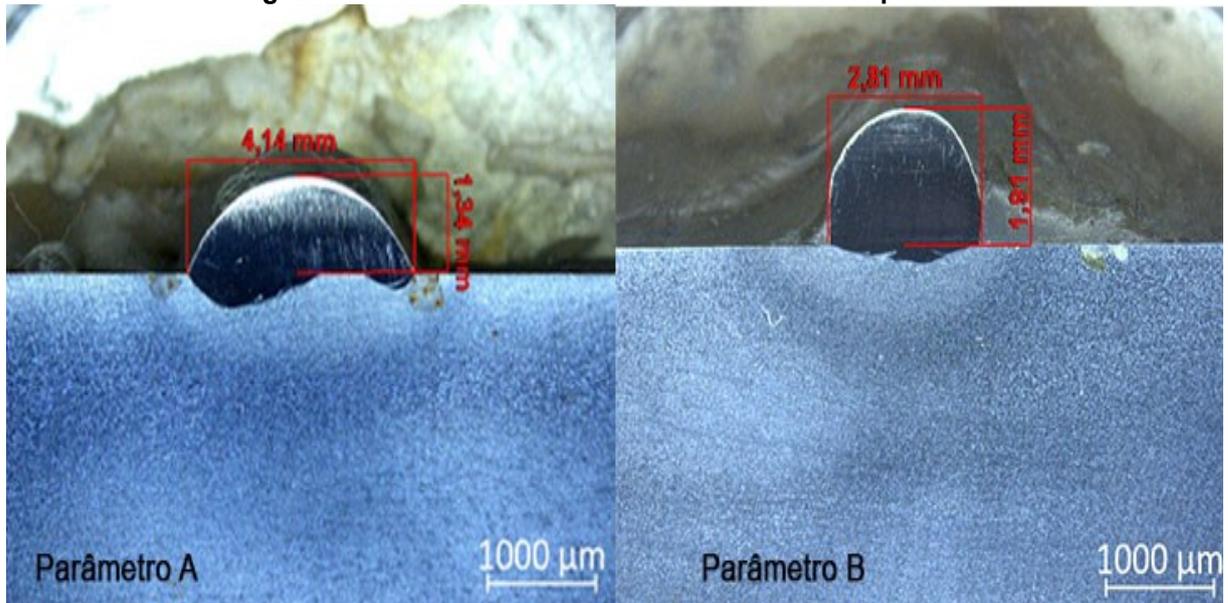
4.3 Análise de Metalográfica

Passado os ensaios de soldagem, foi prosseguido para a próxima etapa do trabalho, análise metalográfica, primeiro foi preparado as amostras conforme citado na metodologia e realizado a análises conforme os resultados em seguida.

4.3.1 Análise de Geometria

Feita a análise geométrica para os respectivos parâmetros, foi possível visualizar entre os parâmetros o que mais se adequa a razão do quadrado, ao seja, mais próximo de um, pois em termos geométricos de empilhamento, o formato quadrático é o que melhor se enquadra. Na Fotografia 10 mostra as medidas de altura e largura do parâmetro A e parâmetro B.

Fotografia 10 - Geometria do cordão de solda e seus parâmetros



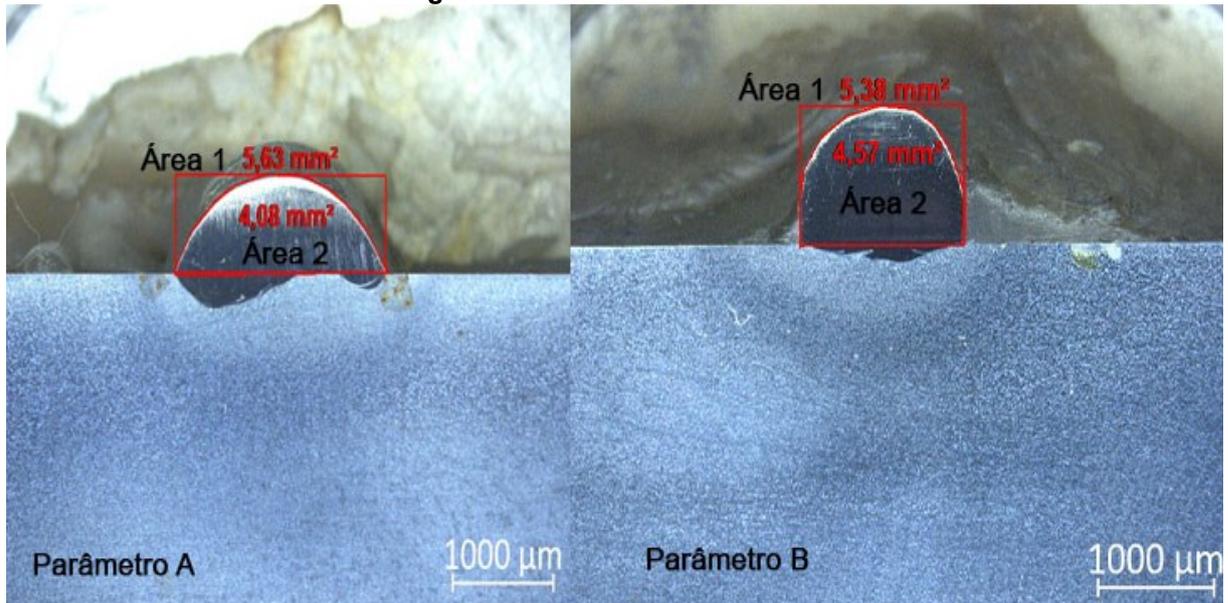
Fonte: Autoria Própria.

Dividido a largura pela altura no parâmetro A, obteve um valor aproximado de 0.32, com uma diferença de 0.68 para a razão geométrica esperada. Agora para o parâmetro B, a razão obtida foi de aproximadamente 0.68, com uma diferença de 0.32 da razão 1(um). Nesta análise, o parâmetro B mostrou ser promissor pelo quesito geométrico. As análises de área e molhabilidade a seguir confirmam qual tem melhor vantagem geométrica.

4.3.2 Análise de Área Inscrita

Passado a análise geométrica, é feito a análise do preenchimento de área, onde o ideal é a área mais próxima possível da área um indicada na Fotografia 11. Na figura mostra o comparativo das áreas com o parâmetro A e parâmetro B.

Fotografia 11 - Análise de área inscrita

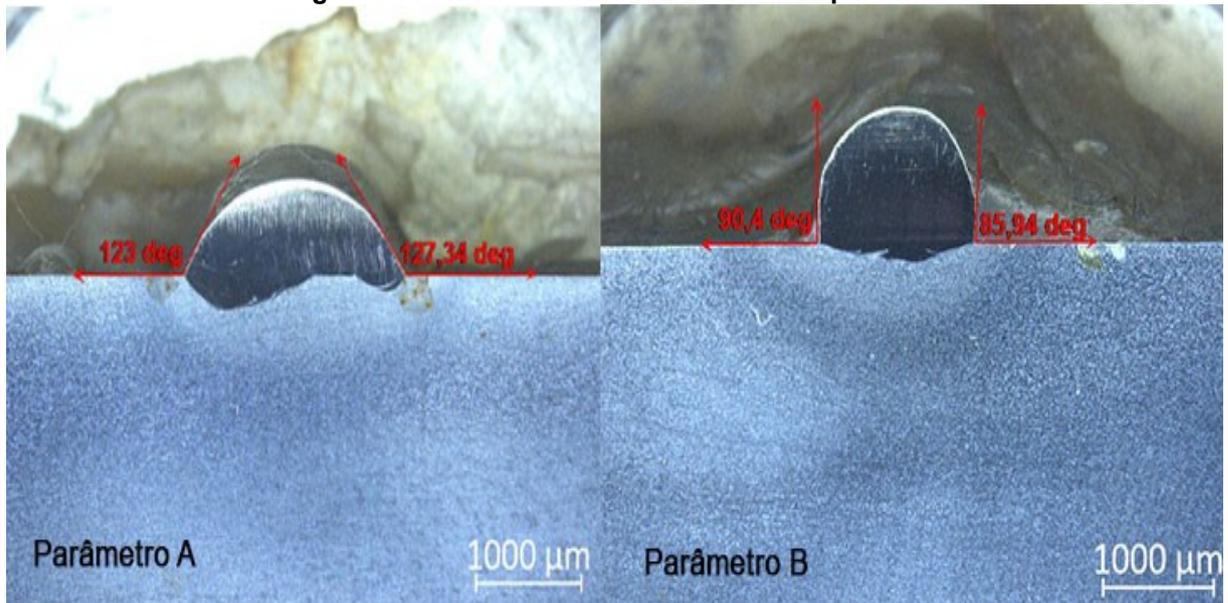


Fonte: Autoria Própria.

No parâmetro A, a área 2 que é a área soldada ocupa cerca de 72,5% da área 1, representada como área ideal. Já no parâmetro B a área soldada ocupa cerca de 85% da área 1. Em comparação, foi observado que o parâmetro B ocupa uma área significativa maior do que o parâmetro A. Passado a análise da área inscrita deu sequência para a análise de molhabilidade.

4.3.3 Análise de Molhabilidade

Na análise de molhabilidade o ideal é que o cordão de solda tenha um ângulo de 90° entre o metal base e o reforço, sendo benéfico em termos de sobreposição de camadas. Com isso, foi analisado a molhabilidade do parâmetro A e B conforme mostrado na Fotografia 12.

Fotografia 12 - Análise de molhabilidade dos parâmetros

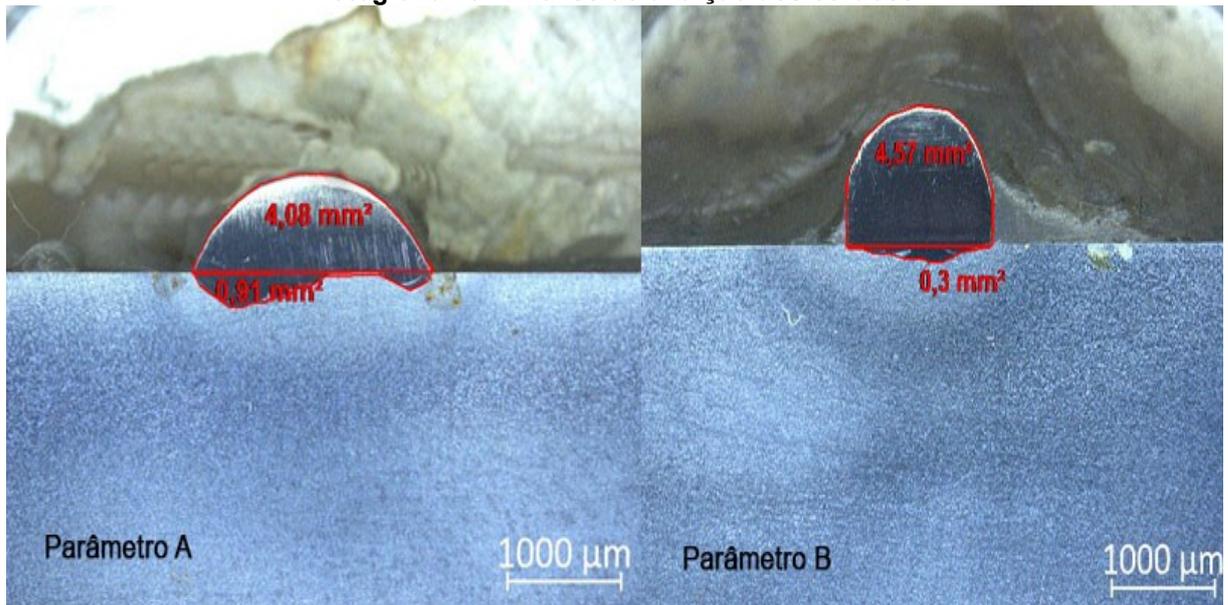
Fonte: Autoria Própria.

É visualizado que o parâmetro B tem proximidade maior de 90° do ângulo de molhabilidade em comparação do parâmetro A. Essa vantagem geométrica, preenchimento de área e ângulo de molhabilidade mostra um maior benefício no empilhamento da manufatura aditiva.

4.3.4 Análise de Diluição

Na análise de diluição entre o metal base e o reforço, o ideal é uma diluição otimizada o suficiente que não tenha dificuldades de retirar o metal base do produto manufaturado. Com esse conhecimento, realizado a análise de diluição para os parâmetros conforme mostra na Fotografia 13.

Fotografia 13 - Análise de diluição dos cordões

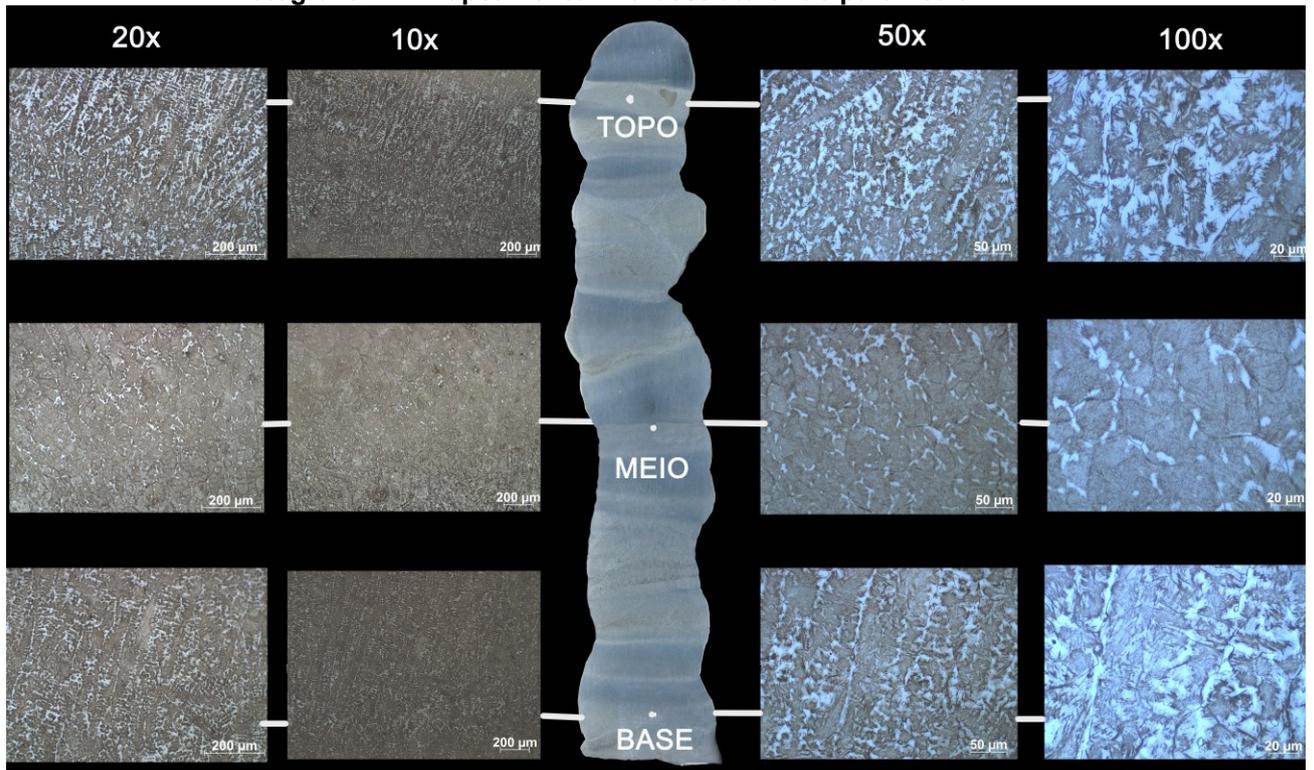


Fonte: Autoria Própria.

Conforme a equação 1 citada na metodologia, foi dividido a área de diluição pela soma da área de diluição mais a área do reforço, tudo isso multiplicado por 100 (cem), para ter conhecimento do percentual de diluição no metal base. O parâmetro A apresentou um percentual de área de diluição de 24,5%, já o parâmetro B apresentou um percentual de 6,7%. Com isso é possível perceber que o parâmetro B possui um percentual de área de diluição com maior otimização do que o parâmetro A.

4.3.5 Análise de Microestrutural

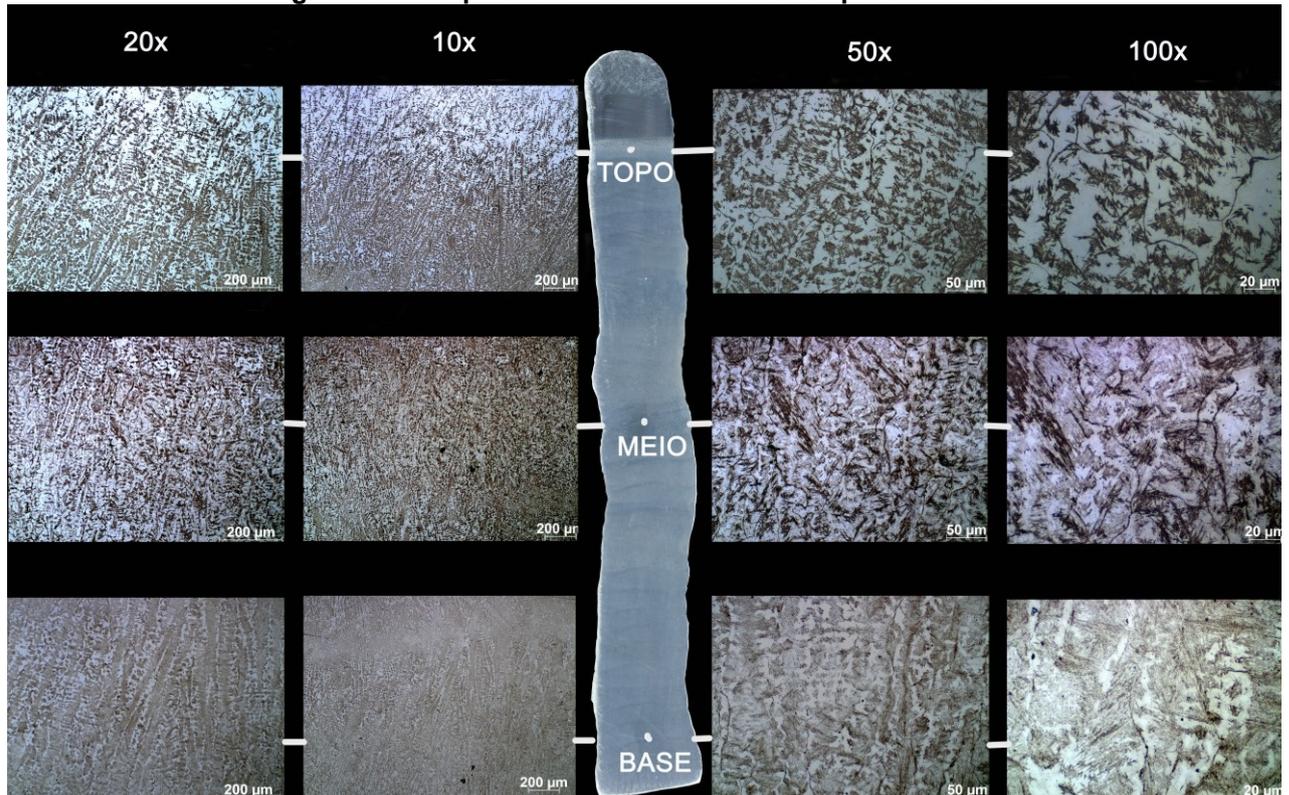
Na análise microestrutural, foi realizada a imagem do empilhamento ao todo e mapeado em microestruturas nos três pontos denominados como base, meio e topo. Em cada ponto utilizou as objetivas do microscópio de 10x, 20x, 50 e 100x. Na Fotografia 14 é visto o mapeamento microstructural do parâmetro A.

Fotografia 14 - Mapeamento microestrutural do parâmetro A

Fonte: Autoria Própria.

Para o parâmetro B a proposta foi a mesma, pego imagem da seção transversal do empilhamento, foi feito o mapeamento microscópico de três pontos, com a resolução de 10x, 20x, 50 e 100x conforme a Fotografia 15 mostra.

Fotografia 15 - Mapeamento microestrutural do parâmetro B



Fonte: Autoria Própria.

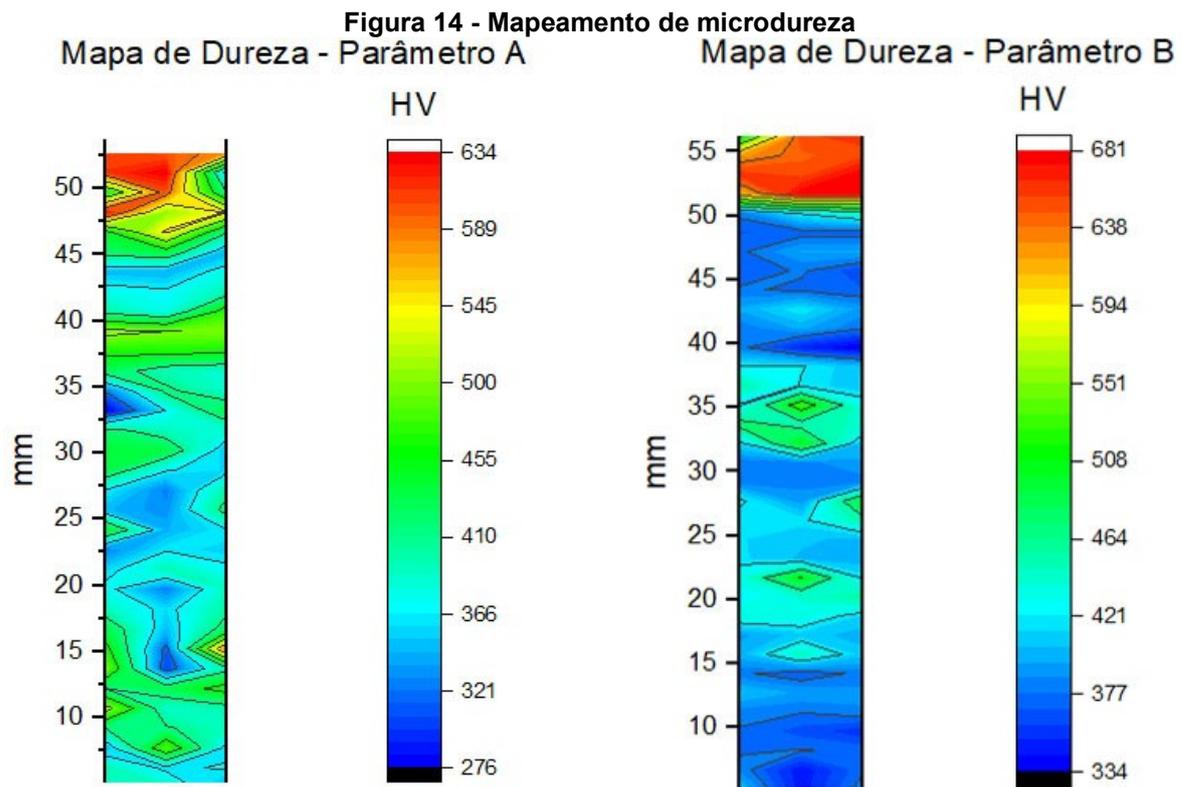
Nos parâmetros A e B pode ser observado uma maior formação dedrítica no topo da microestrutra do que na base, isso é devido o calor que a base recebe das outras camadas de solda, que consequentemente altera a microestrutura, fazendo um revenimento no material. Nas análises de propriedades a seguir é possível observar como as mudanças microestruturais afetam as propriedades mecânicas.

4.4 Análise das Propriedades Mecânicas

Análizado os aspectos geométricos e microestruturais das amostras com os parâmetros A e B, realizou as análises de dureza e resistência a tração para discutir as propriedades mecânicas em relação as análises anteriores discutidas. A primeira análise de propriedades mecânicas realizada é a análise de microdureza.

4.4.1 Ensaio de Microdureza Vickers

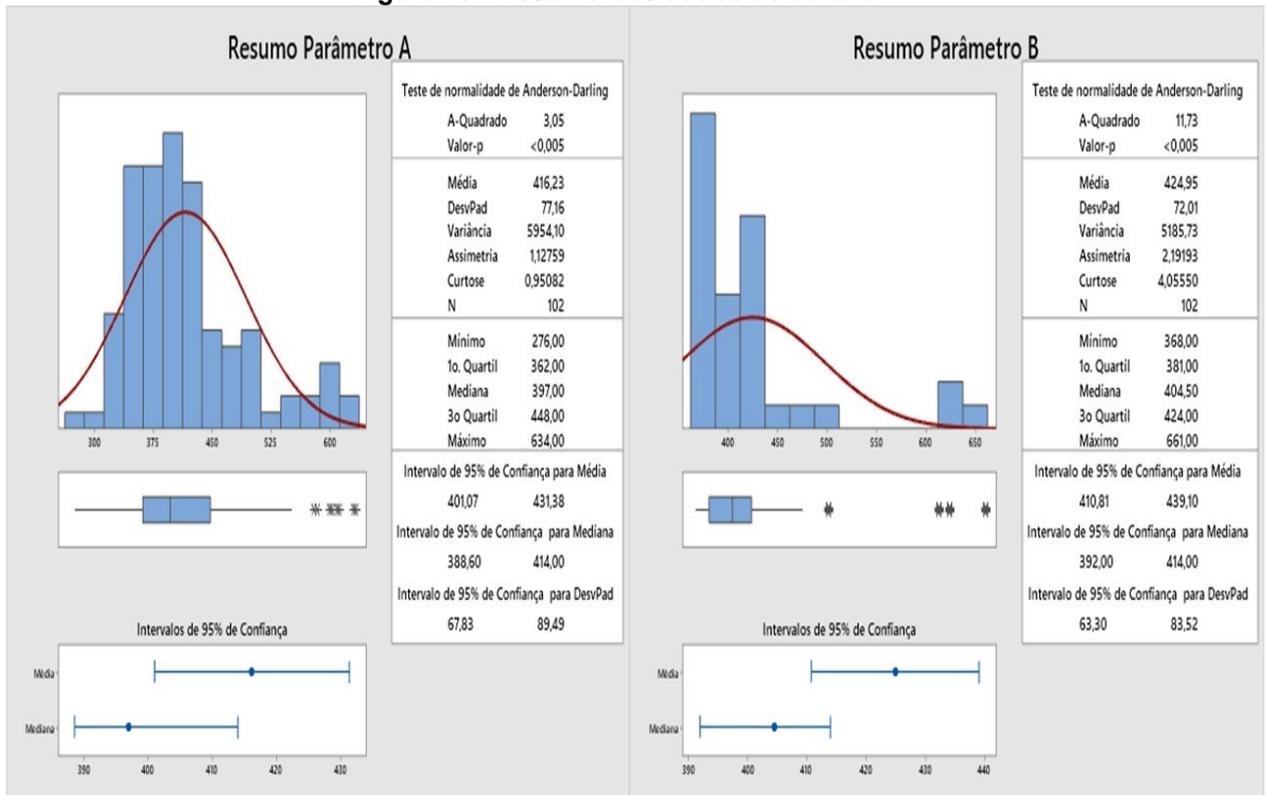
A mesmas seções transversais utilizadas paras as caracterizações microestruturais, foram utilizadas para o mapeamento de dureza. O mapeamento das seções transversais para os parâmetros A e B são os seguintes.



Fonte: Autoria Própria.

Também foi realizado um resumo estatístico dos dados encontrados no ensaio de microdureza, para uma análise numérica da diferença de dureza dos parâmetros de acordo com suas seções transversais.

Figura 15 - Resumo dos dados de dureza



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com os resultados de dureza, o topo dos empilhamentos possui uma maior dureza, isso é devido a maior presença de formação dendrítica no topo das amostras do que na base, confirmando a influência térmica das camadas subsequentes realizadas no experimento. Em comparação com os parâmetros A e B, apesar do parâmetro B possuir uma maior dureza, o parâmetro A possui uma melhor distribuição de dureza ao longo do empilhamento. Após esta análise foi realizado o ensaio de resistência a tração.

4.4.2 Ensaio de Resistência a Tração

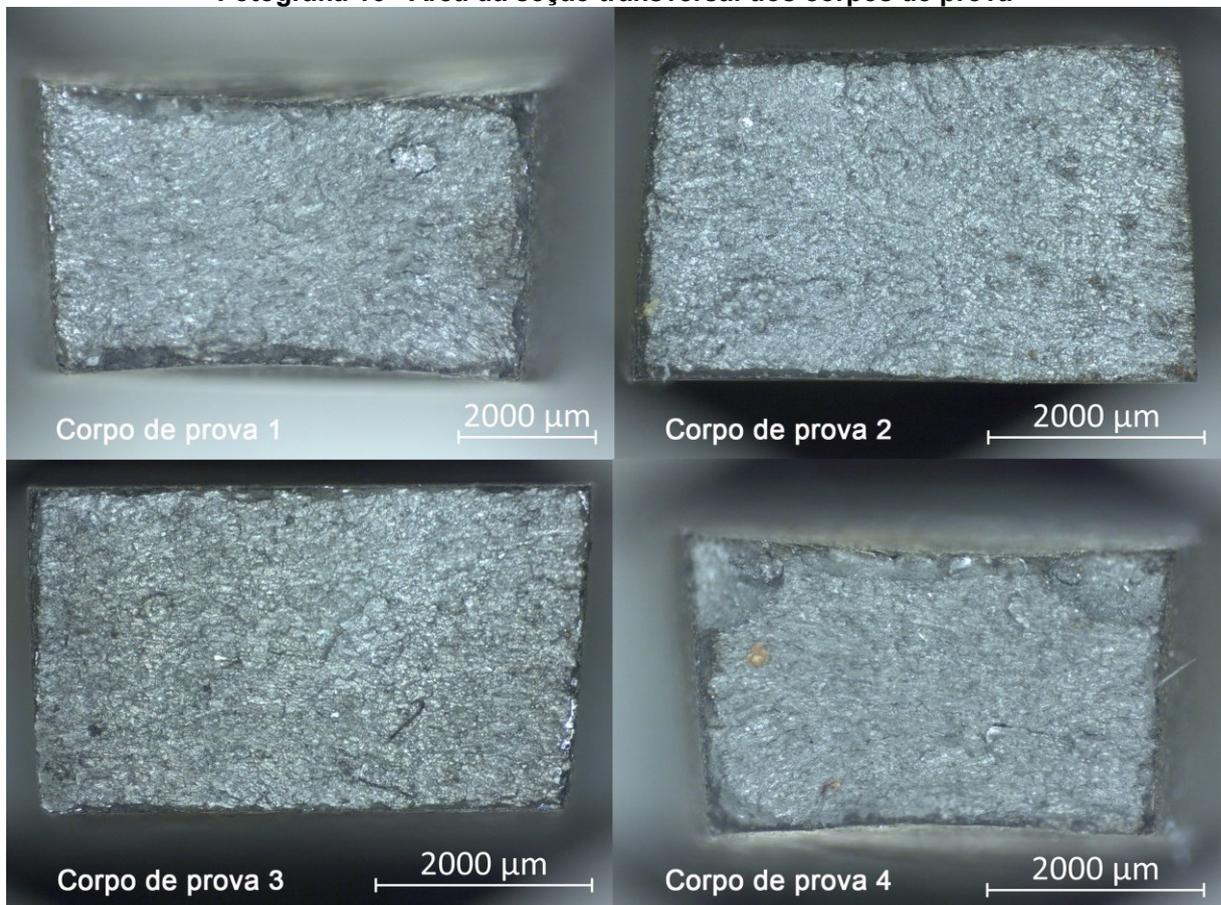
Observado durante a análise de microestrutura a diferença de homogeneidade do topo em relação a base. Para cada empilhamento foi cortado duas amostras de acordo com a variação da norma ASTM E 8M – 04. Para o parâmetro A, o corpo de prova 1 (CP1) foi cortado na base do empilhamento, enquanto o corpo de prova 2 (CP2) cortado na região do topo do empilhamento. Para o parâmetro B, o corpo de prova 4 (CP4) foi cortado na região da base, enquanto o corpo de prova 3 (CP3) cortado na região do topo. Com isso, foram obtidos os seguintes resultados.

Figura 16 - Resultado ensaio de resistência a tração

Corpo de Prova	Seção Transversal Inicial (mm ²)	Seção Transversal Final (mm ²)	Percentual de Redução transversal (%)	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)
CP 1	24,31	16,72	31	1046,25	1215
CP 2	24,11	23,39	3	1137,5	1184
CP 3	24,75	23,49	5	1118,5	1167,2
CP 4	25,4	17,13	33	1040,82	1200,3

Fonte: Autoria Própria.

De acordo com os resultados obtidos, os corpos de prova retirados da base, que são CP1 e CP4, apresentaram maior deformação plástica, observado pela redução da área da seção transversal, e uma tensão máxima maior que os corpos de prova do topo. Os corpos de prova do topo apresentaram uma redução de seção de área transversal menor que os anteriores, sendo no máximo de 5%. Essa redução de seção da área transversal pode ser observado na Fotografia 16.

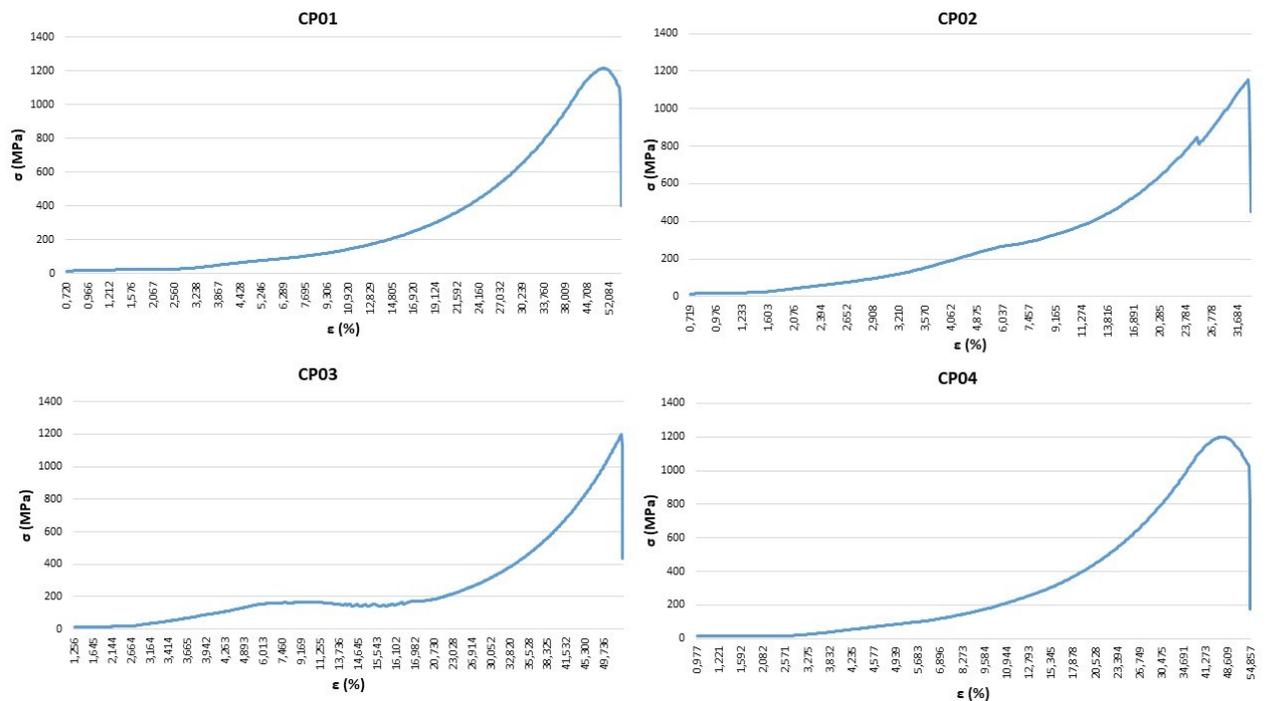
Fotografia 16 - Área da seção transversal dos corpos de prova

Fonte: Autoria Própria.

Foi observado que devido o calor recebido pela base das outras camadas depositadas, afetou os corpos de prova da base no ensaio de resistência a tração, a

ponto de atingir uma maior deformação plástica sem alterar significativamente a tensão máxima suportada pelo corpo de prova. Esse calor alterou a microestrutura formada das camadas anteriores, esse processo que acontece no material é o revenimento. Na figura 17 pode ser observado o comportamento tensão-deformação dos corpos de prova, vale ressaltar na figura 17 que devido aos tamanhos dos corpos de prova, houve um dificuldade de prender o corpo de prova na garra, havendo alterações de deformação no início dos ensaios.

Figura 17 - Resultado comportamento tensão-deformação



Fonte: Autoria Própria.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na avaliação dos resultados obtidos, pode ser constatado que o arame utilizado para o processo de manufatura aditiva é similar ao aço ferramenta H13, com variações em sua composição, no qual a maior variação encontrada é no teor de cromo com 7,3%Wt a mais do que o limite estabelecido por NADCA (1997).

Os parâmetros de soldagem escolhido neste trabalho apresentou uma geometria achata, devido a alta energia de deposição do processo, que então foi optado por usar um segundo parâmetro, com a modificação na corrente de pico para 180 amperes e na corrente de base 90 amperes. Com isso, realizou o experimento com dois parâmetros, o primeiro o parâmetro A e o segundo o parâmetro B.

Das análises geométricas, área inscrita, molhabilidade e diluição, o parâmetro B apresentou maior relevância na contribuição significativa de empilhamento por manufatura aditiva, sendo um parâmetro promissor a ser escolhido para este tipo de processo.

Na análise microestrutural, ambos os parâmetros apresentaram maior formação dendrítica no topo do empilhamento do que na base. Essa mudança microestrutural influenciou nas propriedades mecânicas e mostrou que as camadas subjacentes são influenciadas com as temperaturas das camadas posteriores, passando por um processo de revenimento.

Na análise de dureza, o parâmetro B apresentou uma maior dureza em relação o parâmetro A. Em contrapartida, essa maior dureza não possui um valor discrepante e o parâmetro A mostrou uma melhor distribuição de dureza ao longo do empilhamento.

No teste de resistência a tração, ambos os empilhamentos foram retirados corpos de prova da região da base e do topo. As diferenças de propriedades de resistência a tração dos parâmetros não foi significativa, porém, mostrou grande relevância da região em que o corpo de prova foi retirado do empilhamento. Na região da base, o corpo de prova mostrou comportamento plástico, diferente da região do topo, em que o comportamento plástico é mínimo.

5.1.1 Recomendações para Trabalhos Futuros

Nesse contexto, como sugestão de trabalho de acordo com a realização e resultados obtidos, recomenda possíveis temáticas vinculadas a este trabalho como:

- Reaplicação do estudo para análise de outras propriedades mecânicas como, ensaio de impacto e resistência ao desgaste.
- Reaplicação do estudo com o acréscimo de tratamento térmico, com o intuito de homogeneizar a microestrutura e propriedades mecânicas.
- Mudança de processo de manufatura aditiva por processo de soldagem com o mesmo material, para o comparativo de suas propriedades.

REFERÊNCIAS

AISI Type H13 Hot Work Tool Steel. MatWeb MATERIAL PROPERTY DATA.

Disponível em:

https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7 . Acesso em: 28 de Set. 2022.

ASTM. 52900:2021. Additive Manufacturing – General Principles – Terminology, v. i, p. 1-9, 2021. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en> . Acesso em: 17 de Set. de 2022.

CASTRO, P. R. A. **Aspectos tecnológicos da usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal.** 2001. 208p. Dissertação - UFSC, Florianópolis, Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/81635> . Acesso em: 15 de Set. 2022.

CUNHA, T. V. **Proposta de roteiro para a determinação das variáveis de soldagem do Processo TIG pulsado aplicado à soldagem de chapas finas.** Soldagem & Inspeção [online], v. 18, n.1, p. 64-71, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000100009> . Acesso em: 25 de Set. 2022.

DING, D. et al. **A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing.** Wollongong: Faculty of Engineering and Information Sciences - Papers, v. 2729, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5808-5> . Acesso em: 23 de Set. 2022.

DING, D. et al. **Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.81, p. 465–481, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3> . Acesso em: 20 de Set. 2022.

DINIZ, A. E., MARCONDES, P. COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos metais.** 9ª. ed. Artliber, 2008. 262 p. ISBN 9788587296016.

FERREIRA, G. E. F. **Avaliação da resistência à fadiga térmica do aço AISI H13 nitretado pelos processos gasoso e por plasma.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/80332> . Acesso em: 27 de Set. 2022.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1ª. ed. Edgar Blucher, 1970. 747 p. ISBN 9788521208594.

GIBSON, I., ROSEN, D., STUCKER, B., KHORASANI, M. **Additive Manufacturing Technologies**. 2ª. ed. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2021. 487 p. ISBN 978-1-4939-2113-3.

GOKULDOSS, P. K., KOLLA, S., ECKERT, J. **Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines**. *Materials*, v. 10, n. 6, p. 672, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma10060672> . Acesso em: 18 de Set. 2022.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. 1ª. ed. Bethlehem: John Wiley & Sons, 2012. 758 p. ISBN 978-0-470-63228-4.

HARARI, Y. N. **Sapiens: Uma breve história da humanidade**. Porto Alegre: L&PM Editores S. A., 2018. 464 p. ISBN 978-85-254-3218-6.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 1ª. ed. Edgard Blucher, 209. 261 p. ISBN 978-85-212-0452-7.

MARQUES, P. V., MODONESI, P. J., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3ª. ed. UFMG, 2009. 363 p. ISBN 978-85-7041-748.

MBODJ, N. G. et al. **Bead Geometry Prediction in Laser-Wire Additive Manufacturing Process Using Machine Learning: Case of Study**. *Applied Sciences*, v.11, p. 17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app112411949> . Acesso em: 22 de Set. 2022.

MIYANAJI, H., YANG, L. **EQUILIBRIUM SATURATION IN BINDER JETTING ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES : THEORETICAL MODEL VS . EXPERIMENTAL OBSERVEATIONS**. *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, Texas, 2016, 15 p. Disponível em: <https://hdl.handle.net/2152/89742> . Acesso em: 18 de Set. 2022.

MOORE, J. P., WILLIAMS, C.B. **Fatigue properties of parts printed by PolyJet material jetting**. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21 No. 6, p. 675-685, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2014-0031> . Acesso em: 19 de Set. 2022.

NOHUT, S., SCHWENTENWEIN, M. **Vat Photopolymerization Additive Manufacturing of Functionally Graded Materials: A Review**. Journal of Manufacturing and Materials Processing, v. 6, n. 1, p. 17, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/jmmp6010017> . Acesso em: 20 de Set. 2022.

Pereira G. R., FILHO, S. L. U. **Influência da corrente de soldagem nas propriedades de juntas de aço de alta resistência e baixa liga soldadas com eletrodo revestido**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5108> . Acesso em: 26 de Set. 2022.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG Melhor entendimento, melhor rendimento**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2014. 288 p. ISBN 978-85-88098-42-8.

SPILLER, S., BERTO, F., RAZAVI, S. M. J. **Mechanical behavior of Material Extrusion Additive Manufactured components: an overview**. 2 nd Mediterranean Conference on Fracture and Structural Integrity, v.41, p. 158–174, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.05.018> . Acesso em: 20 de Set. 2022.

STRATHERN, P. **O sonho de Mendeleiev**: A verdadeira história da química. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor Ltda, 2002. 24 p. ISBN 978-85-7110-653-6.

TAMINGER, K., HAFLEY, R. A. **Electron beam freeform fabrication: a rapid metal deposition process**. In: 3rd annual automotive composites conference. P. 16, 2003. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20040042496/downloads/20040042496.pdf> . Acesso em: 23 de Set. 2022.

TOALDO, P. H. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO NA MANUFATURA ADITIVA DO AÇO FERRAMENTA P20 POR ARCO ELÉTRICO A GÁS INERTE**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2022.

VALES, S. S. **Estudo da influência do tratamento criogênico no aço AISI H13**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em:

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-21042011-153009/> . Acesso em: 26 de Set. 2022.

WANG, F. et al. **Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V**. Metallurgical and materials transactions A, v. 44, n. 2, p. 968-977, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6> . Acesso em: 23 de Set. 2022.

WANG, X., WANG, A., WANG, K. LI, Y. **Process stability for GTAW-based additive manufacturing**. Rapid Prototyping Journal, Vol. 25 No. 5, p. 809-819, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2018-0046> . Acesso em: 29 de Set. 2022.

WOHLERS, T., GORNET, T. **History of additive manufacturing. Wohlers report**, v. 24, n. 2014, p. 118, 2016. Disponível em: <https://wohlersassociates.com/wp-content/uploads/2022/08/history2016.pdf> . Acesso em: 17 de Set. de 2022.

YADROITSEV, I. et al. **FUNDAMENTALS OF LASER POWDER BED FUSION OF METALS**. Elsevier, 2021. 658 p. ISBN 978-012-824090-8.

YOUSEFIEH, M.; SHAMANIAN, M.; SAATCHI, A. **Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method**. Journal of Alloys and Compounds, Isfahan, IRÃ, v. 509, p. 782-788, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.087> . Acesso em: 25 de Set. 2022.