

NEWTON SÉRGIO NASCIMENTO MENDES

**MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO
EM LEITO DE FLUXO: PROVA DE CONCEITO**



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
2022

NEWTON SÉRGIO NASCIMENTO MENDES

**MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO
EM LEITO DE FLUXO: PROVA DE CONCEITO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção de título de **Mestre em Engenharia Mecânica**

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

**UBERLÂNDIA – MG
2022**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M538
2022 Mendes, Newton Sérgio Nascimento, 1965-
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO EM LEITO DE
FLUXO [recurso eletrônico] : PROVA DE CONCEITO / Newton
Sérgio Nascimento Mendes. - 2022.

Orientador: Ruham Pablo Reis.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.35>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Reis, Ruham Pablo ,1979-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-
graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br


ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 606, COPEM				
Data:	31/01/2022	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	10:30
Matrícula do Discente:	11922EMC008				
Nome do Discente:	Newton Sérgio Nascimento Mendes				
Título do Trabalho:	Manufatura aditiva por deposição a arco em leito de fluxo: prova de conceito				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por Soldagem a Arco (MASA) para Fabricação de Componentes Metálicos de Simples, Média e Alta Complexidade utilizados no Setor de Óleo, Gás e Biocombustíveis				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Louriel Oliveira Vilarinho - FEMEC/UFU; Leandro João da Silva - FEMEC/UFU; José Antonio Esmerio Mazzaferro - UFRGS; e Ruham Pablo Reis - FEMEC/UFU, orientador do candidato. Ressalta-se que os Prof. Ruham Pablo Reis, Louriel Oliveira Vilarinho, Leandro João da Silva e o Discente participaram da defesa por meio de videoconferência desde a cidade de Uberlândia/MG, e o Prof. José Antonio Esmerio Mazzaferro desde a cidade de Porto Alegre/RS, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Ruham Pablo Reis, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Ruham Pablo Reir, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/01/2022, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/01/2022, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro João da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/01/2022, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Antonio Esmerio Mazzaferro, Usuário Externo**, em 31/01/2022, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3336950** e o código CRC **86359F99**.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo gostaria de agradecer aos professores e colegas do Laprosolda-UFU, especialmente aos Professores Ruham Pablo Reis e Leandro João da Silva (notadamente pelo apoio laboratorial) por me orientarem nesse trabalho e ao Prof. Louriel Oliveira Vilarinho pela captação dos recursos necessários à realização do mesmo. Também agradeço ao Felipe Ribeiro Teixeira e Prof. Douglas Bezerra Araújo pela ajuda com o escaneamento 3D das amostras. Agradeço também aos colegas Henrique Nardon Ferraresi, Vinicius Lemes Jorge, Daniel Dominices, Neandro Teodoro, Douglas Mazer e Lucas Lannes pelo suporte em diferentes etapas do trabalho. Agradeço a equipe do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD-UFU) pela realização das análises de composição química e macroindentação instrumentada. Por fim, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade e à Petrobras SA pela bolsa de mestrado e demais recursos empregados para realização do trabalho.

MENDES, NEWTON SÉRGIO NASCIMENTO. **Manufatura aditiva por deposição a arco em leito de fluxo: prova de conceito.** 2022. 70 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo provar o conceito de uma nova técnica de manufatura aditiva de peças metálicas grandes e com geometria simples, baseada no processo arco submerso, denominada de manufatura aditiva por deposição a arco em leito de fluxo (MADA-LF). De acordo com esse novo conceito, ao invés do fluxo ser fornecido através da tocha, uma camada de fluxo seria previamente espalhada sobre o substrato (leito de fluxo) e então a camada de metal seria depositada pelo processo a arco submerso (SA). A ideia é que o leito dê sustentação para que o fluxo permaneça sobre a camada durante a deposição de contornos ou estruturas delgadas. Para simular essa condição foi depositada uma pré-forma do tipo parede simples utilizando um protótipo de equipamento que permitiu a formação do leito de fluxo adequado e com espessura ajustável. A pré-forma produzida por MADA-LF foi caracterizada quanto à sua geometria, composição química, microestrutura e propriedades mecânicas. Aplicando o conceito de MADA-LF foi possível produzir uma pré-forma com 42 camadas livre de defeitos e com geometria, microestrutura e propriedades mecânicas adequadas. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o conceito da técnica MADA-LF foi satisfatoriamente provado. A técnica MADA-LF mostrou potencial para fabricação de peças grandes e com geometrias simples de forma rápida e economicamente eficiente, uma vez que pode se alcançar altas taxas de deposição com o processo SA e os seus consumíveis tendem a ser relativamente mais baratos.

Palavras-chave: Manufatura aditiva de metais; Deposição com energia direcionada; Arco submerso; Leito de fluxo; Alta taxa de deposição; Peças grandes com geometria simples.

MENDES, NEWTON SÉRGIO NASCIMENTO. **Flux bed wire + arc additive manufacturing: proof of concept**. 2022. 70 p. Maste's Thesis. Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil.

ABSTRACT

The present work aimed to prove the concept of a novel technique of additive manufacturing of large metal parts and with simple geometry, based on the submerged arc process, called Flux Bed Wire + Arc Additive Manufacturing (FB-WAAM). According to this new concept, instead of the flux being supplied through the torch, a flux layer would be previously spread over the substrate (flux bed) and then the metal layer would be deposited by the submerged arc process (SA). The idea is that the bed supports the flux to remain over the layer during the deposition of contours or slender structures. To simulate this condition, a simple wall-type preform was deposited using an equipment prototype that allowed the formation of the adequate flux bed with adjustable thickness. The preform produced by FB-WAAM was characterized in terms of geometry, chemical composition, microstructure and mechanical properties. By using the FB-WAAM concept was possible to produce a preform with 42 layers free of defects and with appropriate geometry, microstructure and mechanical properties. Based on the results obtained, it can be concluded that the concept of the FB-WAAM technique was satisfactorily proved. The FB-WAAM technique showed potential for manufacturing large metal parts with simple geometries in a rapid and economically efficient way, since high deposition rates can be achieved with the SA process and its consumables tend to be relatively cheaper.

Keywords: Additive manufacturing of metals; Directed energy deposition; Submerged arc; Flux bed; High deposition rate; Large parts with simple geometry.

Lista de abreviações

CAD	<i>Computer aided design</i>
CAM	<i>Computer aided manufacturing</i>
CNC	Controle numérico computadorizado
DBCP	Distância bico de contato peça
DED	Deposição com energia direcionada (termo geral)
DED-EB	Deposição com energia direcionada com feixe de elétrons
DED-GMA	Deposição com energia direcionada com o processo GMA ¹
DED-GTA	Deposição com energia direcionada com o processo GTA ¹
DED-L	Deposição com energia direcionada com laser
DED-PA	Deposição com energia direcionada com arco plasma
DED-PA	Deposição com energia direcionada com o processo PA ¹
DED-PTA	Deposição com energia direcionada com o processo PTA
DED-SA	Deposição com energia direcionada com o processo SA ¹
EA	Energia do arco
FLF-SA	Fusão em leito de fluxo com arco submerso
FLP	Fusão em leito de pó (termo geral)
FLP-EB	Fusão em leito de pó com feixe de elétrons
FLP-L	Fusão em leito de pó a laser
GMAW	<i>Gas Metal Arc welding</i> (MIG/MAG)
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc welding</i> (TIG)
IAM	Índice de aproveitamento de material
I_m	Tensão média
JL	Jato de ligante
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco elétrico/voltaico
NIAC	<i>Near-immersion active cooling</i>
PAW	<i>Plasma arc welding</i> (arame)
PTA	<i>Plasma Transferred Arc</i> (pó)
SAW	<i>Submerged arc welding</i>
U_m	Corrente média
VA	Velocidade de alimentação
VD	Velocidade de deposição

¹ A norma ASTM 3187 (ASTM, 2016) explica que o termo “soldagem” é definido pela AWS (*American Welding Society*) como sendo a união de duas ou mais partes. Como este não é o caso da MA, a palavra “soldagem” foi omitida do acrônimo dos processos de deposição a arco. O termo restante é suficiente para caracterizar a física do arco.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	PROBLEMATIZAÇÃO	15
1.2.	QUESTÃO FUNDAMENTAL	15
1.3.	HIPÓTESE SIMPLIFICATIVA	15
1.4.	OBJETIVO	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.	DEPOSIÇÃO COM ENERGIA DIRECIONADA - DED	16
2.2.	PROCESSOS DED COM ELEVADA TAXA DE DEPOSIÇÃO	18
2.3.	DEPOSIÇÃO COM ENERGIA DIRECIONADA POR ARCO PLASMA	20
2.4.	MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO SUBMERSO	23
2.5.	PROCESSO ARCO SUBMERSO	25
2.5.1.	Princípios básicos do processo SAW	25
2.5.2.	Aparato básico e consumíveis para SAW	26
2.5.3.	Parâmetros de processamento por SAW	27
2.6.	DESTAQUES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
3.	DEFINIÇÃO DO CONCEITO	31
4.	METODOLOGIA	32
5.	ABORDAGEM EXPERIMENTAL	33
5.1.	PROJETO E CONSTRUÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	33
5.2.	MATERIAIS	35
5.3.	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE DEPOSIÇÃO	36
5.4.	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	41
5.5.	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	42
5.5.1.	Geometria	42
5.5.2.	Microestrutura e composição química	45
5.5.3.	Propriedades mecânicas	45
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
6.1.	EFEITO DOS PARÂMETROS SOBRE A GEOMETRIA DA CAMADA	48
6.2.	PROVA DE CONCEITO	53
6.2.1.	Deposição da pré-forma	54
6.3.	CARACTERIZAÇÃO DA PRÉ-FORMA	56
6.3.1.	Geometria	56

6.3.2.	Composição química e microestrutura.....	57
6.3.3.	Propriedades mecânicas.....	60
7.	CONCLUSÕES	62
8.	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS.....	64

1. INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) é definida pela norma ISO/ASTM 52900 (2015) como um processo de união de materiais utilizado para fabricar peças a partir de dados do modelo 3D (CAD), tipicamente com uma abordagem “camada por camada”, em oposição às metodologias de fabricação subtrativas e formativas. O termo “manufatura aditiva” é um termo abrangente que engloba todas as técnicas de MA aplicadas a todos os materiais.

A MA permite a fabricação de peças com geometrias que seriam impossíveis ou inviáveis pelos processos tradicionais de fabricação (ex. usinagem, fundição etc.). Essa perspectiva possibilita novas metodologias de projeto, o que se reflete em maior sustentabilidade, como discutido por Kellens et al. (2017). Além disso, a MA tem um grande potencial para a customização em massa, fabricação de pequenos lotes ou peças isoladas, componentes de reposição que não existem mais e/ou difíceis de se encontrar no mercado.

No que se refere à MA de componentes metálicos, atualmente existem mais de 18 técnicas diferentes (AMPOWER, 2019). No entanto, as opções industriais são limitadas pelas poucas tecnologias comercialmente disponíveis (Thomas-Seale et al., 2018). Toyserkani et al. (2022) destacam três tecnologias principais para fabricação de componentes metálicos funcionais:

- ❖ Fusão em leito de pó (FLP);
- ❖ Jato de ligante (JL); e
- ❖ Deposição com energia direcionada (DED).

Revisões detalhadas sobre as tecnologias de FLP e JL podem ser encontradas nos trabalhos publicados por Frazier (2014), Herzog et al. (2016) e Ziaee e Crane (2019), dentre outros. O foco do presente trabalho fica dentro dos processos de MA de metais baseados na tecnologia DED.

Nos processos de MA baseados na tecnologia DED uma fonte de energia térmica concentrada (laser, feixe de elétrons ou arco elétrico) é utilizada para fundir o material de adição na forma de arame ou pó enquanto ele é seletivamente depositado sobre um substrato ou peça pré-existente (ASTM, 2016). A Figura 1 traz uma representação esquemática de um processo DED.

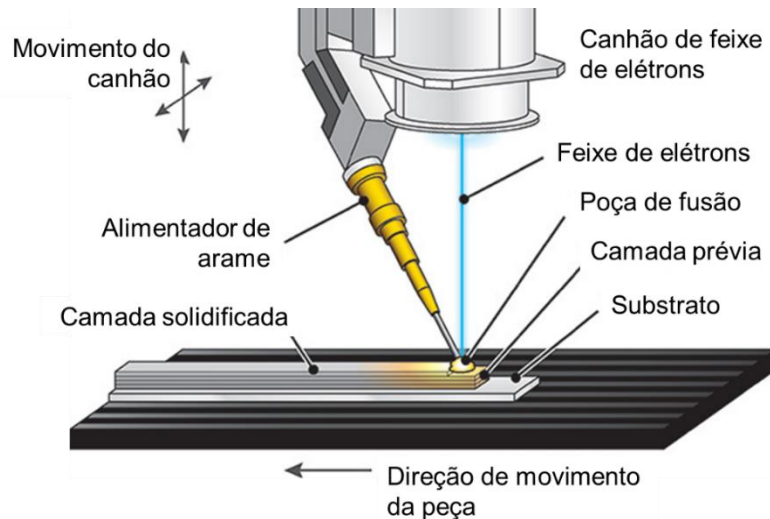


Figura 1. Representação esquemática de um processo DED com feixe de elétrons e arame (adaptado de Sciaky (2021))

Uma sequência básica de MA por DED é apresentada na Figura 2. O processo começa pelo modelo geométrico (CAD 3D), que pode ser gerado diretamente em software CAD 3D ou a partir de dados de um escâner 3D (nuvem de pontos). Posteriormente, esse modelo geométrico passa por uma adaptação/otimização dependendo do processo DED e do material. Na sequência é feita a geração de trajetória utilizando softwares CAM. Essa informação de trajetória é carregada na máquina de DED (CNC ou robô) para deposição da pré-forma. Após a deposição, a pré-forma passa então por uma etapa de inspeção dimensional. Eventualmente, se a pré-forma não atender os requisitos dimensionais, algum retrabalho/reparo pode ser realizado. Por fim a pré-forma é submetida a etapas de pós-processamento para atingir a funcionalidade, tipicamente tratamento térmico e usinagem.

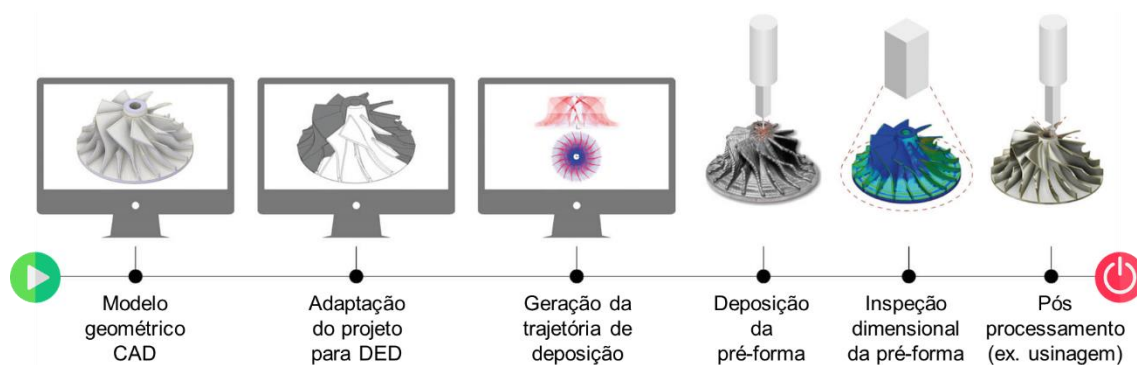


Figura 2. Sequência básica de MA por DED (adaptado de Gefertec (2021))

Os processos DED são adequados para a fabricação componentes grandes (>10 kg) e com geometria moderada (Debroy et al., 2018). Dentre os diversos processos de MA baseados na tecnologia DED, a MA por Deposição Arco (MADA) se destaca pelo seu custo relativamente baixo e facilidade de implementação a partir de uma célula de soldagem (Jafari et al., 2021). O processo GMA é o mais utilizado para MADA (DED-GMA) devido à sua elevada taxa de deposição (1 – 4 kg/h) e alimentação concêntrica do arame que facilita a geração de trajetórias (Williams et al., 2016). Um exemplo de pré-forma fabricada por MADA (DED-GMA) é apresentado na Figura 3.



Figura 3. Pré-forma de flange de pescoço de aço baixa liga com aproximadamente 14 kg fabricado por MADA-GMA (LAPROSOLDA, 2021)

Apesar das vantagens da MA por DED-GMA, tempo de deposição e, conseqüentemente, os custos envolvidos podem ser elevados para deposição de peças muito grandes (Cunningham et al., 2017). Nesse contexto o processo arco submerso (SA), que permite elevada taxa de deposição e tipicamente emprega consumíveis mais baratos pode ser uma alternativa viável para fabricação de peças grandes e de geometria simples.

O processo SA é tipicamente utilizado para a soldagem de chapas grossas e uma das suas características mais referenciadas é a elevada taxa de deposição (Sengupta et al., 2019). Outras características importantes são a proteção por escória, possibilidade de ação metalúrgica no metal de

solda/depósito através da composição do fluxo, consumíveis relativamente baratos e possibilidade de reuso do fluxo não fundido.

Apesar do processo SA ser considerado um dos precursores da MA de peças metálica de grandes dimensões (Brandi and Luckow, 1976; Ujiie, 1967), atualmente a literatura sobre a utilização desse processo para tal finalidade é escassa e, quando existente, é focada principalmente em aspectos metalúrgicos (Li et al., 2021c, 2021b, 2021a). Nesse cenário, o presente trabalho vem contribuir com desenvolvimento da MA pelo processo DED-SA.

1.1. PROBLEMATIZAÇÃO

A partir da experiência com soldagem, alguns desafios óbvios podem ser esperados na utilização do processo SAW para fins de MA (DED-SA), como, por exemplo, a necessidade de remoção de escória a cada depósito e a restrição de deposição na posição plana devido ao grande volume fundido gerado. Para além disso destaca-se a dificuldade de manter o fluxo sobre a camada durante a deposição de contornos/arestas da peça (falta área de apoio para o fluxo).

1.2. QUESTÃO FUNDAMENTAL

Como sustentar o fluxo sobre a camada durante a deposição junto aos contornos/arestas da peça?

1.3. HIPÓTESE SIMPLIFICATIVA

Se, ao invés do fluxo ser fornecido através da tocha, uma camada de fluxo for previamente espalhada sobre o substrato (leito de fluxo), então haverá sustentação para o fluxo sobre a camada durante a deposição dos contornos da peça ou estruturas delgadas.

1.4. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo provar o conceito do que se pode chamar de “manufatura aditiva por deposição a arco em leito de fluxo”.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo dessa seção é apresentar uma revisão sistemática no que concerne processos DED com alta taxa de deposição e assim fornecer subsídios para o estabelecimento da metodologia e discussão dos resultados desse trabalho. Além disso, são apresentados alguns aspectos que motivaram o estudo do processo SA para MADA visando grandes componentes. Para padronização dos termos, bem como para um melhor entendimento da presente dissertação, a terminologia utilizada nesse documento está em conformidades com as normas ASTM comitê F42 e AWS comitê D20.

2.1. DEPOSIÇÃO COM ENERGIA DIRECIONADA - DED

A Deposição com Energia Direcionada (DED) é uma categoria de processos de MA que utilizam energia térmica concentrada para fundir um material de adição enquanto ele é seletivamente depositado sobre um substrato ou peça pré-existente. Processos DED podem ser utilizados para fabricação, reparo ou prototipagem. Segundo a norma ASTM F3187 (2016), os processos DED apresentam as seguintes características:

- Matéria-prima (arame ou pó) fornecida diretamente à poça de fusão;
- Elevadas taxas de deposição;
- Máquinas com grandes volumes de construção (tipicamente $> 1000 \text{ mm}^3$);
- Sistemas de movimentação (CNC ou robô) tipicamente com 5 graus de liberdade (3 na peça + 2 na fonte de energia), pois não se aplica o conceito de estrutura de suporte como em processos FLP;
- Possibilidade de plataforma de manufatura híbrida (deposição + usinagem);
- Deposição em atmosfera controlada local ou ambiente;
- Capacidade de depositar diretamente sobre componentes pré-existentes (por exemplo, reparo de componente desgastado ou construção de detalhes sobre um componente usinado ou forjado); e
- Potencial para alterar a composição química ao longo do volume da peça (componentes com gradiente de funcionalidade).

Os processos DED podem ser classificados de acordo com o tipo de material de adição (arame ou pó) e de energia (térmica ou cinética) empregada, conforme apresentado na Figura 4. Os processos baseados em energia térmica, ainda podem ser subclassificados de acordo com o tipo de fonte de energia: laser, feixe de elétrons e arco plasma (ASTM, 2016).

Os processos DED que utilizam pó e laser tem sido amplamente estudados e são os mais difundidos. Os processos que utilizam arame geralmente têm capacidade de fabricar peças de grandes dimensões, com maior taxa de deposição, mas com menor resolução. Adicionalmente, o arame é de mais fácil manuseio e estocagem, apresenta baixos riscos de contaminação e mesmo de saúde e segurança ocupacional. Os processos DED baseados em arame geralmente utilizam um feixe de elétrons ou arco elétrico como fonte de calor. Os processos DED baseados em feixe de elétrons operam sob vácuo e são adequados para o processamento de materiais reativos, como as ligas de titânio, tântalo, tungstênio, etc. Já os processos DED baseados no arco elétrico utilizam equipamentos e consumíveis de soldagem para fins de MA.

Os sistemas DED baseados em energia cinética, geralmente chamados de *Cold Spray*, usam um bico convergente e divergente para acelerar partículas micrométricas a velocidades supersônicas. Com o impacto, as partículas se ligam adesivamente ao substrato formando as camadas (Dass and Moridi, 2019).

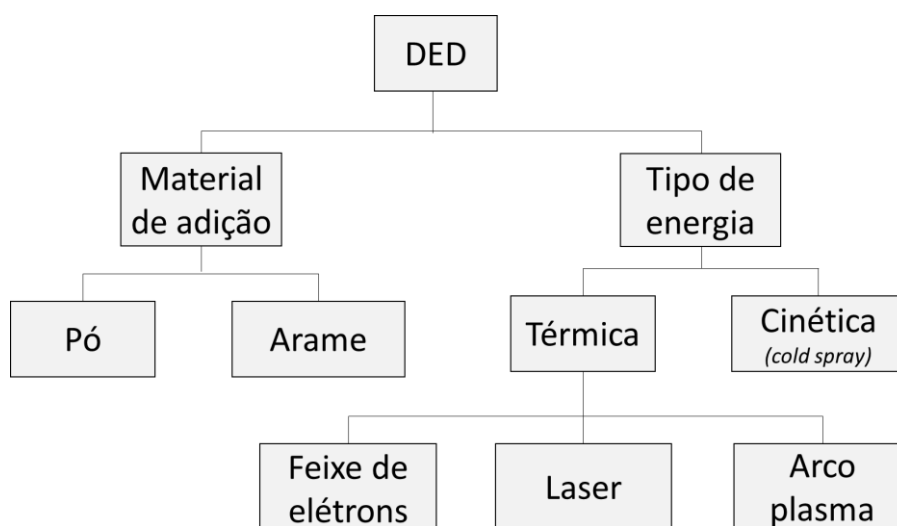


Figura 4. Classificação dos processos DED segundo a forma do material e o tipo de fonte de energia (adaptado de Dass and Moridi (2019))

2.2. PROCESSOS DED COM ELEVADA TAXA DE DEPOSIÇÃO

Objetivando obter uma visão holística sobre os processos DED que utilizam energia térmica, foi realizada uma revisão sistemática de publicações recentes com foco em aços, ligas de Ni e Co, conforme Tabela 1.

A partir dessa tabela, observa-se uma variação significativa da taxa de deposição dos processos DED dependendo do tipo de fonte de calor e material de adição. Os processos DED que utilizam feixe de elétrons e arco elétrico como fonte de calor tendem a ter maior taxa de deposição que os processos a laser. Em parte, esse comportamento pode ser creditado à eficiência de fusão desses processos (Kou, 2002).

Em relação ao tipo/forma do material de adição, observa-se uma tendência de maior taxa de deposição para o arame com processos a arco e para o pó com os processos a laser. No caso do arco, considerando o processo GMA, a maior taxa de deposição para o arame está relacionada com a elevada queda de tensão e conseqüentemente maior geração de energia no acoplamento arame-arco. Já para o laser, esse comportamento pode ser explicado considerando que o pó tem maior capacidade de absorção de energia que o arame, além das múltiplas reflexões da luz que ocorrem no feixe de pó.

Em relação ao processo DED-L, é importante mencionar que desenvolvimentos recentes têm elevado significativamente a sua taxa de deposição, por exemplo com DED-L assistido por aquecimento indutivo (Dalaee et al., 2020), utilização de arame-quente (Bambach et al., 2018), otimização do feixe de pó (Zhong et al., 2017), dentre outros.

Como mencionado por Ding et al. (2015), a utilização de processos DED-AP com arame (DED-GMA, DED-GTA ou DED-PA) permite a fabricação de grandes componentes de forma mais rápida (alta taxa de deposição) e mais econômica (equipamentos e consumíveis mais baratos e acessíveis). Em contrapartida, Martina (2020) explica que esses processos têm menor resolução e capacidade de fabricar geometrias complexas, o que se reflete em restrições de fabricação e em maiores volumes de usinagem após a deposição.

Cunningham et al. (2017) propuseram um modelo de custo para processos DED e reportaram custos significativamente menores para os processos a arco. Quando comparado com usinagem, o processo DED-GMA se

mostrou economicamente viável para um índice de aproveitamento de material² (IAM) da usinagem maior que 5. Considerando operações de usinagem com IAM de 10, a redução de custo pode chegar a 53%. Em relação aos processos DED-EB e DED-L a redução de custo pode ser respectivamente de até 45 e 69% para o DED-PA.

Apesar das vantagens mencionada, o custo e o tempo de fabricação por DED podem ser significativos para peças muito grandes, particularmente para processos com proteção local (fluxo constante) e materiais reativos que exigem gases de alta pureza. Nesse caso, a utilização de câmaras ou “bolhas” inertes são alternativas comuns. A Figura 5 traz um exemplo de um equipamento comercial de DED-L com câmara inerte e sistema de regeneração da atmosfera. Vale mencionar que nesse tipo de equipamento, dependendo do tamanho da câmara, há um grande desperdício de gás com a purga inicial. Além disso, de certa forma, a câmara inerte limita a operação e capacidade do equipamento.



Figura 5. Exemplo de máquina de DED-L com câmara inerte
(RPM Innovations, 2021)

² IAM, amplamente referenciado como razão *Buy-to-Flight* (BTF), representa a razão entre a massa da matéria-prima utilizada e o componente acabado. Esse termo foi originalmente desenvolvido para o setor aeronáutico, porém se popularizou no contexto da MA de metais. Como a MA é aplicada em diversas áreas além da aeroespacial, o BTF pode ser traduzido num contexto mais amplo como sendo um índice de aproveitamento de material (IAM).

Tabela 1. Taxas de deposição (\dot{m}) típicas dos diferentes processos DED

Referência	Processo	Material	\dot{m} (kg/h)
Sciaky*, 2020	DED-FE	Não informa	9,0
Weglowski et al., 2018	DED-FE	Aço inox. aust.	1,9
Martina et al., 2019	DED- GMA duplo arame	17-4 pH	9,5
Gefertec*, 2020	DED-GMA	Aço	4,0
Ali et al., 2019	DED-GMA	Aço ferr.	4,8
Xu et al., 2018	DED-GMA	Maraging 250	4,2
Yangfan et al., 2019	DED-GMA	Inconel 625	3,7
Rajeev et al., 2020	DED-GMA	Stellite 6	2,7
A Hosseini et al., 2019	DED-GMA	Duplex	3,4
Rodriguez et al., 2018	DED-GMA GTA-DED	AISI 316L	3,7 1,9
Li et al., 2019	DED-GTA	Stellite 6	0,6
Ivántabernero et al., 2018	DED-PA (aramé frio)	AISI 316	1,5
Cardozo et al., 2018	DED-PA (aramé frio) DED-PTA (pó)	Inconel 625	1,0 0,3
Mercado Rojas et al., 2018	DED-PTA (pó)	Liga de Ni	1,2
BeAM 2020*	DED-L (pó)	Aço	1,0
Zhong et al., 2017	DED-L (pó)	Inconel 718	2,7
Dalaei et al., 2020	DED-L (pó)	Inconel 625	1,2
Bambach et al., 2018	DED-L (pó)	Inconel 718	0,6
	DED-L (aramé frio)		0,3
	DED-L (aramé quente)		0,9
Akbari and Kovacevic, 2018	DED-L (aramé)	AISI 316L	0,4

* fabricante/fornecedor de equipamentos DED

2.3. DEPOSIÇÃO COM ENERGIA DIRECIONADA POR ARCO PLASMA

Williams et al. (2016) e Ding et al. (2015) concordam que, para a fabricação por MA de peças relativamente grandes (> 10 kg) e com geometrias moderadas, os processos de DED baseados em arco plasma/elétrico têm mostrado ser a opção de maior capacidade de produção, maior flexibilidade de implementação e menor custo operacional. Um exemplo de componente fabricado por DED-GMA é apresentado na Figura 6. Trata-se do primeiro componente metálico aplicado em uma instalação da indústria de óleo e gás no Brasil (ABM, 2020).



Figura 6. Pré-forma de luva de redução concêntrica de 3x4 polegadas (aprox. 7 kg) de aço carbono fabricada por DED-GMA (LAPROSOLDA, 2021)

Atualmente, os principais processos de MADA são o GMA, GTA e PA (Debroy et al., 2018), ou seja, processos que utilizam arame e proteção gasosa. Informações detalhadas sobre esses processos, mais focadas em soldagem, podem ser encontrada nos livros de Reis e Scotti (2007), Scotti e Ponomarev (2014), Marques et al., (2017).

Para Williams et al. (2016), o processo GMA é a particularmente interessante para a MA por DED de aços e ligas de alumínio, principalmente devido à alimentação concêntrica do arame, que facilita a geração de trajetórias de deposição. Porém, tais autores comentam que processos GMA tendem a ser instáveis para o processamento de ligas de titânio. Nesse caso, os processos GTA ou PA são então recomendados.

No processo GTA o arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça, enquanto a alimentação de arame é feita separadamente. Se por um lado a alimentação separada da fonte de energia

(arco) permite maior controle sobre o aporte térmico e características do depósito, por outro demanda a rotação da tocha para manter o arame alinhado com a direção de deposição em mudanças de direção na trajetória de deposição, impondo restrições significativas na arquitetura de máquinas e de geração de trajetórias. Pan et al. (2017) acrescentam que esse desafio de alinhamento do arame em relação a trajetória de deposição não é exclusivo dos processos com eletrodo não consumível (GTA e PA), mas é enfrentado por qualquer processo de MADA com mais de um arame, com é o caso do GMA duplo arame explorado por Martina et al. (2019).

O processo PA é uma modificação do GTA, que tem como diferença principal a constrição do arco, que resulta em maior densidade de energia (Reis and Scotti, 2007). Na prática isso pode se traduzir em menos distorção da peça e possibilidade de maiores velocidades de deposição. Além disso, a constrição do arco permite a utilização de material de adição na forma de pó.

Quando se utiliza material de adição na forma de pó, o processo PA é referenciado como PTA (*Plasma Transferred Arc*). O processo PTA vem sendo estudado como alternativa para o processamento de materiais difíceis de se encontrar na forma de arame, bem como para a fabricação de componentes com gradiente de funcionalidade (Cardozo et al., 2018; Mercado Rojas et al., 2018).

Na Figura 7 é apresentada uma classificação dos principais processos de deposição a arco utilizados para fins de MA por DED-AP segundo o tipo de material de adição (arame ou pó) e fonte de energia.

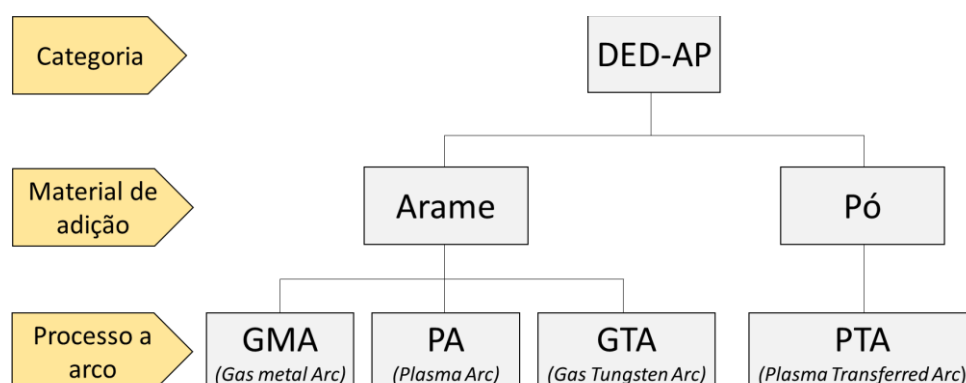


Figura 7 Classificação dos processos DED-AP de acordo com o tipo de material e fonte de energia (classificação baseada na norma ASTM (2016))

2.4. MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO SUBMERSO

A partir do histórico da MADA traçado por Almeida (2012), pode-se dizer que o processo arco submerso (SA) foi um dos precursores na MA de metais de para fabricação de pré-formas de grandes dimensões.

O uso de DED-SA para a fabricação de grandes eixos de turbinas e geradores elétricos foi alavancado início da década de 70 pela empresa *Thyssen-Hütte*. Na Figura 8a é mostrada a instalação industrial dessa empresa para DED-SA com capacidade de produção de geometrias cilíndricas de até 500 toneladas com comprimento de até 11 metros e diâmetro entre 2,5 e 5,8 metros. O equipamento de DED-SA era equipado com 16 cabeçotes de deposição SAW em *tandem* com capacidade máxima de taxa de deposição de aço de 300 kg/h, Figura 8b (Almeida, 2012).

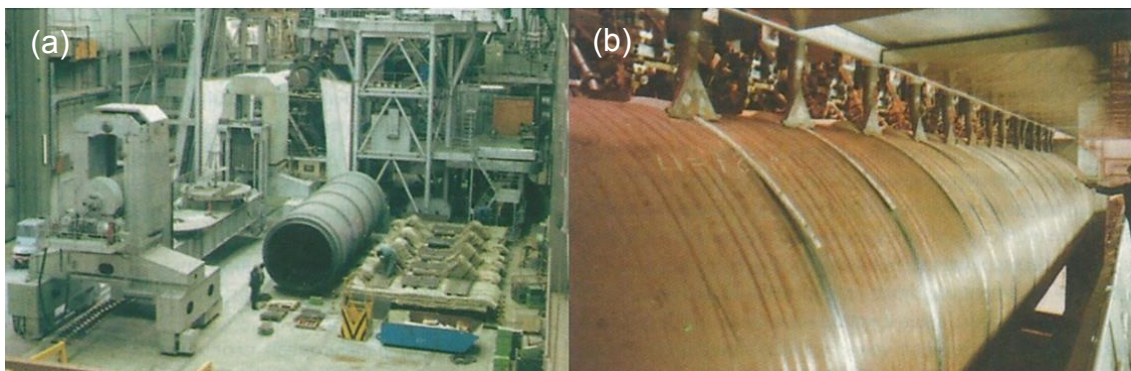


Figura 8. Instalação (a) industrial de DED-SA da empresa *Thyssen-Hütte* e (b) detalhe da máquina com 16 cabeçotes de deposição e capacidade máxima de taxa de deposição de 300 kg/h (Almeida, 2012)

A fabricação e entrega de um vaso de alta pressão de 80 toneladas (Figura 9) para uma planta piloto de liquefação de carvão é considerado como sendo um dos passos mais importante para a comercialização desta tecnologia (Almeida, 2012).

Para Almeida (2012), resultados adversos obtidos no final da década de 80 utilizando materiais com alta susceptibilidade a trincas devem ser considerados um grande retrocesso para o uso generalizado e comercialização da tecnologia DED-SA. No entanto, esse mesmo autor menciona que antes disso o progresso tecnológico significativo alcançado ao longo de um período de mais

de dez anos pela empresa *Thyssen-Hütte AG* em parceria com a Universidade de Stuttgart na deposição aços bainíticos de baixo carbono por DED-SA nunca foi questionado, uma vez que nenhuma evidência de trinca foi encontrada, tampouco falha de algum componente fabricado por essa técnica.



Figura 9. Vistas do vaso de alta pressão pesando 80 toneladas fabricado por DED-SA. Material do cilindro 10 MnMoNi 5-5, espessura de 300 mm, diâmetro de 1,8 metros e comprimento de 6 metros (Almeida, 2012)

Atualmente a literatura sobre DED-SA é escassa e os poucos trabalhos reportados na literatura são focados em aspectos metalúrgicos (Li et al., 2021c, 2021b, 2021a). Também vale destacar um relato não científico da empresa ARCSpecialities (2020) na plataforma Youtube® sobre a fabricação de um flange de 12 polegadas de aço inoxidável AISI 316 por DED-SA, Figura 10.



Figura 10. Pré-forma de flange de 12 polegadas de AISI 316 fabricado por DED-AS (ARCSpecialities, 2020)

2.5. PROCESSO ARCO SUBMERSO

O processo de soldagem com arco submerso (SAW) é um dos mais antigos. Assim, pode-se dizer que o processo SAW é relativamente bem entendido, sendo seus fundamentos estabelecidos principalmente por Lancaster (1986). Recentemente Mendez et al. (2015), Li et al. (2017) e Sengupta et al. (2019) revisaram a fenomenologia do processo SAW.

O foco dessa revisão é o processo SAW com um arame maciço de aço. Vale mencionar que múltiplos arcos e arames, arame tubular e fita também são utilizados. Em relação aos materiais, além dos aços, que são a classe de material mais comumente explorada nesse processo, há relatos de SAW com alumínio e titânio (Sengupta et al., 2019).

2.5.1. Princípios básicos do processo SAW

Apesar das diversas configurações do processo SAW, em última análise, os princípios básicos permanecem os mesmos: o calor para fusão do arame é gerado por um arco elétrico estabelecido entre um arame-eletrodo consumível continuamente alimentado e a chapa, sendo que o arco arde sob uma camada de fluxo granular que tem as funções de proteger o metal em transferência, a poça de fusão e o metal de solda, estabilizar o arco e adicionar elementos de liga no metal de solda (ASM Handbook, 1993). Uma representação esquemática do processo SAW é apresentada na Figura 11.

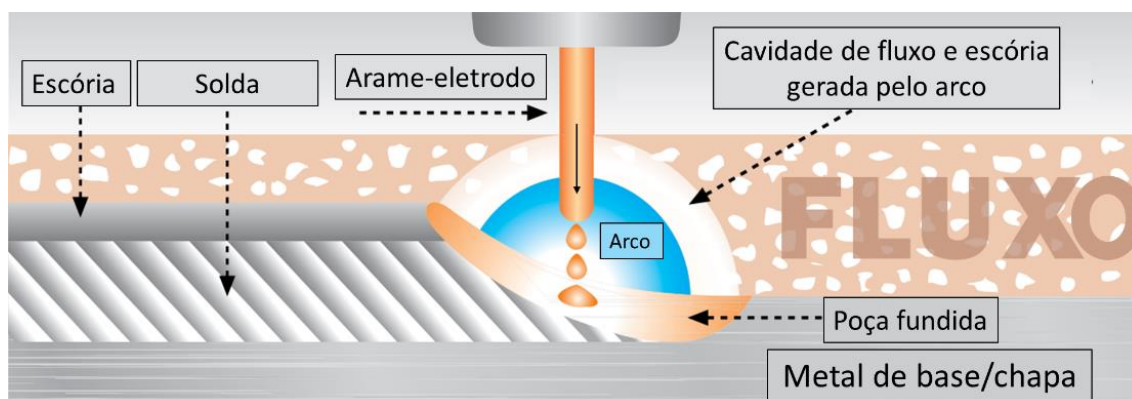


Figura 11. Representação esquemática do processo SAW (adaptado do catálogo comercial da empresa Miller (2021))

Como a soldagem por SAW se desenvolve sob uma camada de fluxo (razão do nome), não há luz de arco visível, respingos ou faíscas que caracterizam os processos de arco aberto, como por exemplo o GMAW ou SMAW (eletrodo revestido). Além disso, como no SAW as perdas de calor para o ambiente são muito baixas, sua eficiência térmica é a maior dentre os processos a arco (TWI, 2020). A proteção no processo SAW é essencialmente por escória. Quando o processo está corretamente parametrizado a remoção da escória se dá facilmente.

O processo SAW é referenciado na literatura especializada principalmente pela sua elevada taxa de deposição e restrição a apenas operação na posição plana. A elevada taxa de deposição está relacionada com os elevados níveis de corrente utilizados no SAW, tipicamente entre 400 e 1200 A. Esses elevados níveis de corrente são possíveis devido ao comprimento livre do eletro (*stick-out*) curto e diâmetro do arame grande, quando comparado com os processos SMAW e GMAW, respectivamente. A limitação de operação à posição plana está relacionada principalmente com os grandes volumes fundidos gerados pelos elevados aportes térmicos e por facilitar manter a proteção por escória.

A transferência metálica no processo SAW ocorre dentro de uma cavidade de fluxo e escória gerada pelo arco (Figura 11). Essa cavidade permite uma transferência metálica estável e sem respigo mesmo para elevados níveis de corrente. Segundo Sengupta et al. (2019), a transferência metálica no SAW pode ser por voo livre ou guiada por escória, mas a transferência guiada por escória é a mais comum.

2.5.2. Aparato básico e consumíveis para SAW

Normalmente o processo SAW é mecanizado ou automatizado. O aparato básico para soldagem por SAW consiste em fonte de soldagem, sistema de alimentação de arame, reservatório de fluxo, e tocha, conforme apresentado na Figura 12. A fonte tem a função de transformar a energia da rede para um formato adequada para soldagem (alta corrente e baixa tensão). A fonte pode ser do tipo transformadora ou retificadora, corrente/tensão constante e CC/CA. O arame é desbobinado de um carretel ou barrica e alimentado com velocidade adequada por um sistema de alimentação composto principalmente por um

motor e roletes. O fluxo é posto num reservatório e desce gradativamente até a região da solda, normalmente, por ação da gravidade. A tocha tem a função de direcionar o arame e o fluxo até a região da soldagem e fazer o contato elétrico com o arame.

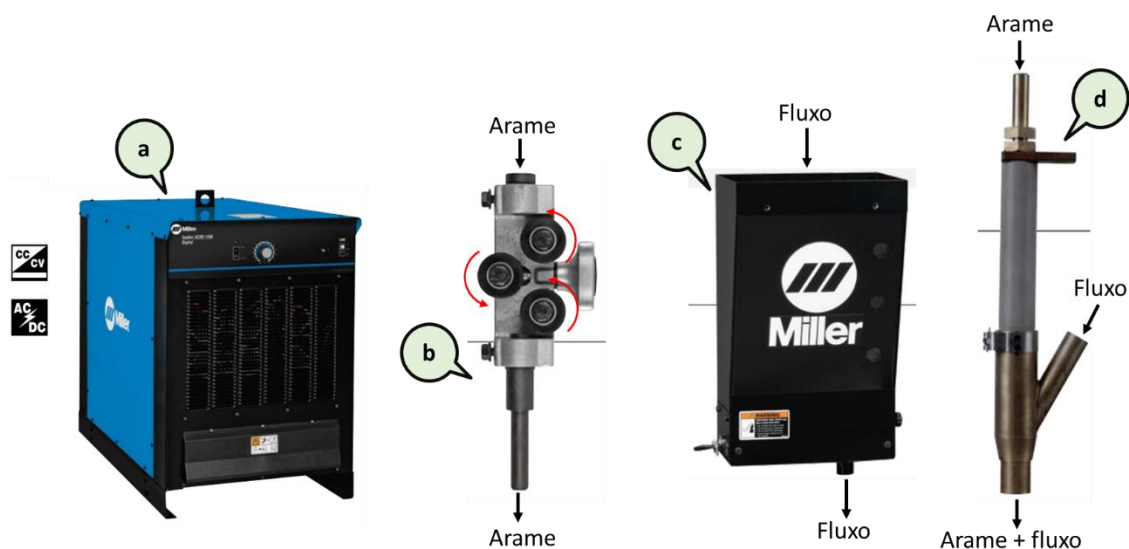


Figura 12. Exemplo de aparato básico para SAW: (a) fonte, (b) alimentador de arame, (c) reservatório de fluxo, e (d) tocha (adaptado do catálogo comercial da empresa Miller (2021)). As imagens não estão em escala

Os consumíveis para o processo SAW são basicamente o arame-eletrodo e o fluxo. As características da solda dependem da combinação de ambos. Os arames eletrodos são classificados pela composição química, enquanto os fluxos pelas propriedades mecânicas da solda quando combinado com um determinado arame. Elementos para controlar as propriedades são adicionadas principalmente pelo arame, enquanto elementos com ação desoxidante, remoção de enxofre e fósforo, etc., são transferidos principalmente pelo fluxo. Os fluxos podem ser classificados pelo método de fabricação (aglomerado ou fundido) e pela ação no metal de solda (ácido, básico ou neutro) (TWI, 2020).

2.5.3. Parâmetros de processamento por SAW

Dentre os vários parâmetros do processo SAW, os principais são a corrente (A) ou velocidade de alimentação do arame (m/min), a tensão do arco

(V), a velocidade de deslocamento (cm/min) e a distância entre o bico de contato e a peça – DBPC (mm) (ASM Handbook, 1993). O efeito isolado das principais variáveis do processo SAW sobre as características dos depósitos é sumarizado na Tabela 2. Na Tabela 3 é apresentado um resumo com valores usuais de parâmetros de SAW reportados na literatura.

Tabela 2. Efeito isolado das principais variáveis do processo SAW sobre as características dos depósitos

(adaptado do catálogo comercial da empresa Miller (2021))

Efeito do aumento da corrente (A)	
<ul style="list-style-type: none"> > taxa de deposição > aporte de calor > penetração > altura do cordão > ZAC 	
Efeito do aumento da tensão (V)	
<ul style="list-style-type: none"> > largura do cordão < altura do cordão > ZAC > consumo de fluxo + elementos do fluxo 	
Efeito do aumento da velocidade de deslocamento (cm/min)	
<ul style="list-style-type: none"> < aporte de calor (J/mm) < volume do cordão < altura do cordão < Penetração < ZAC 	
Efeito do aumento da DBCP (mm)	
<ul style="list-style-type: none"> > taxa de deposição < penetração > altura do cordão = largura do cordão < ZAC 	

Obs: "<" menor, ">" maior, "+" mais e "=" igual.

Tabela 3. Valores dos principais parâmetros de soldagem por SAW reportados na literatura

Referência	Corrente (A)	Tensão (V)	Valim (m/min)	Vs (cm/mim)	Polaridade	DPBC (mm)	Arame (Ø mm)	Fluxo	Chapa	Temperatura de Pré-aquecimento e/ou interpasso
(Choudhary et al., 2019)	N.C.	30-41	1 - 2	30-60,6	CC-EP	20-30	Aço médio carbono com Ø 3,15	Fluxo aglomerado	AISI 1023 com espessura de 12 mm	N.C.
(Silva and Bracarense, 2015)	236-212	25	8,0	60	CC-EP	12	ER70S-6 com Ø 1.2	OK Flux 10.71 e fluxo customizado	ASTM A36 com espessura de	N.C
(Silva et al., 2016)	142-186	30-40	6,0-7,0	22	CC-EP	20-30	AWS ERNiCrMo-4 com Ø 1,13	Neutro e básico (EN 760: SA AF 2 DC).	Tubos de aço API 5L Gr B com e espessura de 18 mm	N.C.
(Cunha and Ribeiro, 2018)	328-438	30	2,0-2,5	40-30	CC-EP	20	AWS F7A6-EM12K com Ø 2,4 mm	AWS F7A6-EM12K	ASTM A36 com espessura de 15,8 mm	N.C.
(Osorio et al., 2016)	600-980	34-36	N.C.	30	CC-EP CA	32	AWS F7A4 EM12K com Ø 4	ESAB – OK FLUX 10.71	ASTM A131 Grau EH36, esp. de 25 mm	N.C.
(Zimmermann and Bond, 2016)	485	32	N.C.	26	CC-EP	30	AWS EM12K com Ø 2,4	AWS F7A0 ativo	ASTM SA 516 Grau 70 com esp. de 15 mm	N.C.
(Ferrari et al., 2019)	547-659	29-32	N.C.	6-10	CC-EP CA	N.C.	AWS 5.17 com Ø 4	AWS EM12K	ASTM A36, com espessura de 50 mm.	TP de 75° C TI < 250 °C
(Borba et al., 2017)	720-1000	32-36	N.C	75-45	N.C.	N.C	AWS F7A8 com Ø 5	AWS -EM12K	Sincron EN 10025-4 S355M, 40 mm e ASTM A572 grau 50, 38 mm	TI < 250° C

2.6. DESTAQUES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os seguintes pontos podem ser destacados da revisão da literatura:

1. Os processos DED com as maiores taxas de deposição são aqueles que utilizam arco plasma (DED-AP) e feixe de elétrons (DED-EB) como fonte de energia e material de adição na forma de arame;
2. Atualmente o processo DED-GMA é o mais utilizado para aços devido principalmente à alimentação concêntrica e elevada taxa de deposição.
3. A necessidade de se fazer o alinhamento do arame em relação a trajetória de deposição não é exclusiva dos processos com eletrodo não consumível (GTA e PA), mas comum também a qualquer processo DED-AP com mais de um arame; e
4. Apesar de pouco referenciado na literatura atual, a DED-SA foi uma das precursoras na MA de metais de baixo custo para fabricação de pré-formas de grandes dimensões aplicadas industrialmente. A Tabela 4 lista algumas vantagens e limitações esperadas para a DED-SA.

Tabela 4. Vantagens e limitações esperadas para a DED-SA

Vantagens	Limitações
Alta taxa de deposição	Menor resolução
Arco não visível	Normalmente limitado à posição plana
Proteção por escória	Necessidade de remoção de escória
Controle da composição química	Peça não visível
O fluxo não fundido por ser reutilizado	Dificuldade para resfriamento forçado

3. DEFINIÇÃO DO CONCEITO

Uma representação esquemática do conceito geral de manufatura aditiva por deposição a arco em leito de fluxo (MADA-LF), a partir de desenvolvimento do processo SAW, é apresentada na Figura 13. O ciclo se inicia com espalhamento de uma camada de fluxo granulado com altura adequada (Figura 13(a)). Na sequência uma camada de metal é depositada (Figura 13(b)). Então a escória deve ser removida. Então a plataforma de construção desce uma distância equivalente à altura de uma camada e uma nova camada de fluxo é espalhada (Figura 13(c)). Por fim, o ciclo se repete (Figura 13(d)).

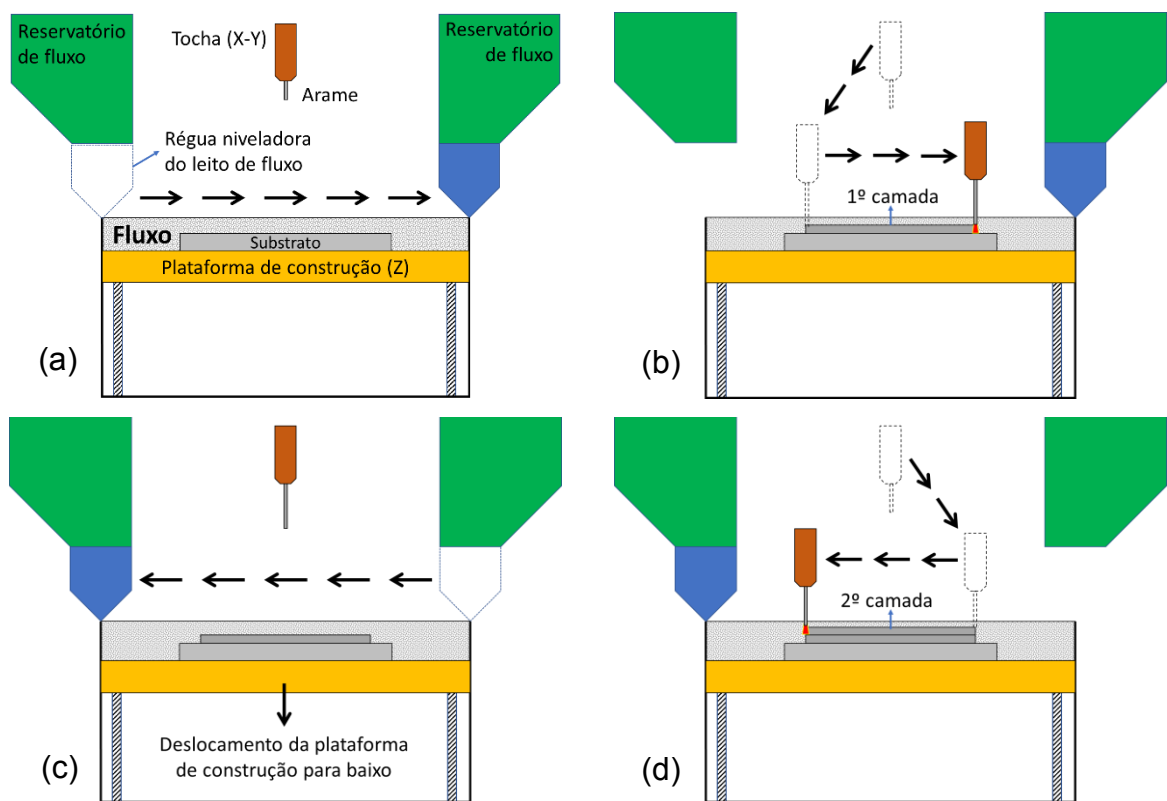


Figura 13. Representação esquemática do conceito da fusão em leito de fluxo: (a) espalhamento do leito de fluxo; (b) deposição de uma camada; (c) descida da plataforma de deposição e espalhamento de uma nova camada de fluxo; e (d) deposição de uma nova camada para reinício do ciclo

4. METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo provar o conceito de uma nova técnica para MA de metais denominada de manufatura aditiva por deposição a arco em leito de fluxo (MADA-LF). Para atingir esse objetivo a estratégia foi trabalhar com base nos chamados níveis de maturidade tecnológica (TRL – *Technology readiness level*) definidos pela norma ISO 16290 (ISO, 2013). Ao término dessa dissertação, pretende-se alcançar um TRL 3-4, que corresponde a prova de conceito em ambiente laboratorial. Conforme descrito na Tabela 5, foram propostos alguns pacotes de trabalho (WP) visando alcançar esse nível de maturidade.

Tabela 5. Descrição dos pacotes de trabalho (WP)

WP	Descrição
1	Projeto, construção e montagem da bancada experimental com todos os recursos necessários para realização das deposições (fonte, tocha, dispositivo para fixação do substrato, resfriamento etc.).
2	Calibração da fonte de SA e sistema de movimentação. Instalação de sistema de aquisição de sinais elétricos (calibrado) para monitorar e adquirir parâmetros de deposição (corrente e tensão).
3	A partir de revisão da literatura, identificar os parâmetros mais influentes do processo SA. Então executar alguns testes preliminares (simples deposição) para identificar a janela operacional da fonte de deposição e do sistema de movimentação.
4	A partir do conhecimento da janela operacional, executar um DOE (planejamento de experimentos) visando estabelecer uma correlação entre os parâmetros de deposição e geométricos dos depósitos.
5	Deposição de uma pré-forma (parâmetros fixos) com aquisição de sinais a cada camada, controle da temperatura de interpasse e tempo de resfriamento.
6	Caracterização da geometria, composição química, microestrutura e propriedades mecânicas da pré-forma produzida.

5. ABORDAGEM EXPERIMENTAL

A abordagem do presente trabalho é experimental. Nos subitens a seguir é feita uma descrição detalhada sobre os experimentos visando facilitar o entendimento acerca dos resultados obtidos, bem como, uma eventual reprodução dos testes.

5.1. PROJETO E CONSTRUÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

O projeto da bancada para prova de conceito do processo MADA-LF é apresentado na Figura 14. A plataforma de construção consiste em uma chapa de aço baixa liga de 550x300x5,8 mm³ onde um substrato de 300x100x12,7 mm³ é fixado através de 8 parafusos M12. Para resfriamento da plataforma de construção (gerenciamento térmico) foram projetados 6 furos passantes de Ø 10 mm para circulação de água. O nivelamento do leito de fluxo é feito manualmente com auxílio de uma régua que corre sobre as guias de nivelamento. Essas guias foram montadas em 4 barras roscadas de M12x120 mm permitindo o ajuste da altura do leito de fluxo. Uma cuba de cantoneiras e chapas de 400x250x120 mm³ foi projetada para contenção do fluxo não fundido.

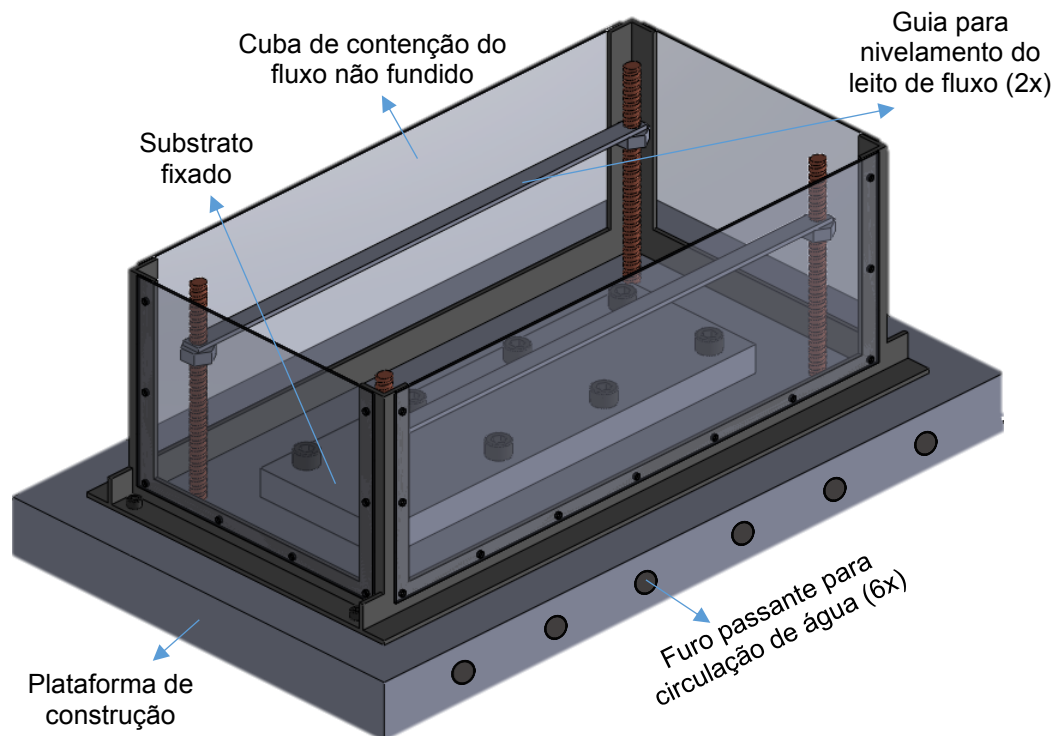


Figura 14. Projeto do dispositivo para prova de conceito da técnica de MADA-LF

Uma vista isométrica do dispositivo de prova de conceito montado é mostrada na Figura 15a. A refrigeração da plataforma de construção se dá através da circulação de água em contrafluxo como indicado na Figura 15b. Para circulação da água foi utilizada um *chiller* Mecalor – MAS 9RI220 conectado à plataforma de construção através de mangueira e engates rápidos. Na Figura 15c é mostrado o dispositivo sem a cuba de fluxo destacando as guias de nivelamento do leito de fluxo.

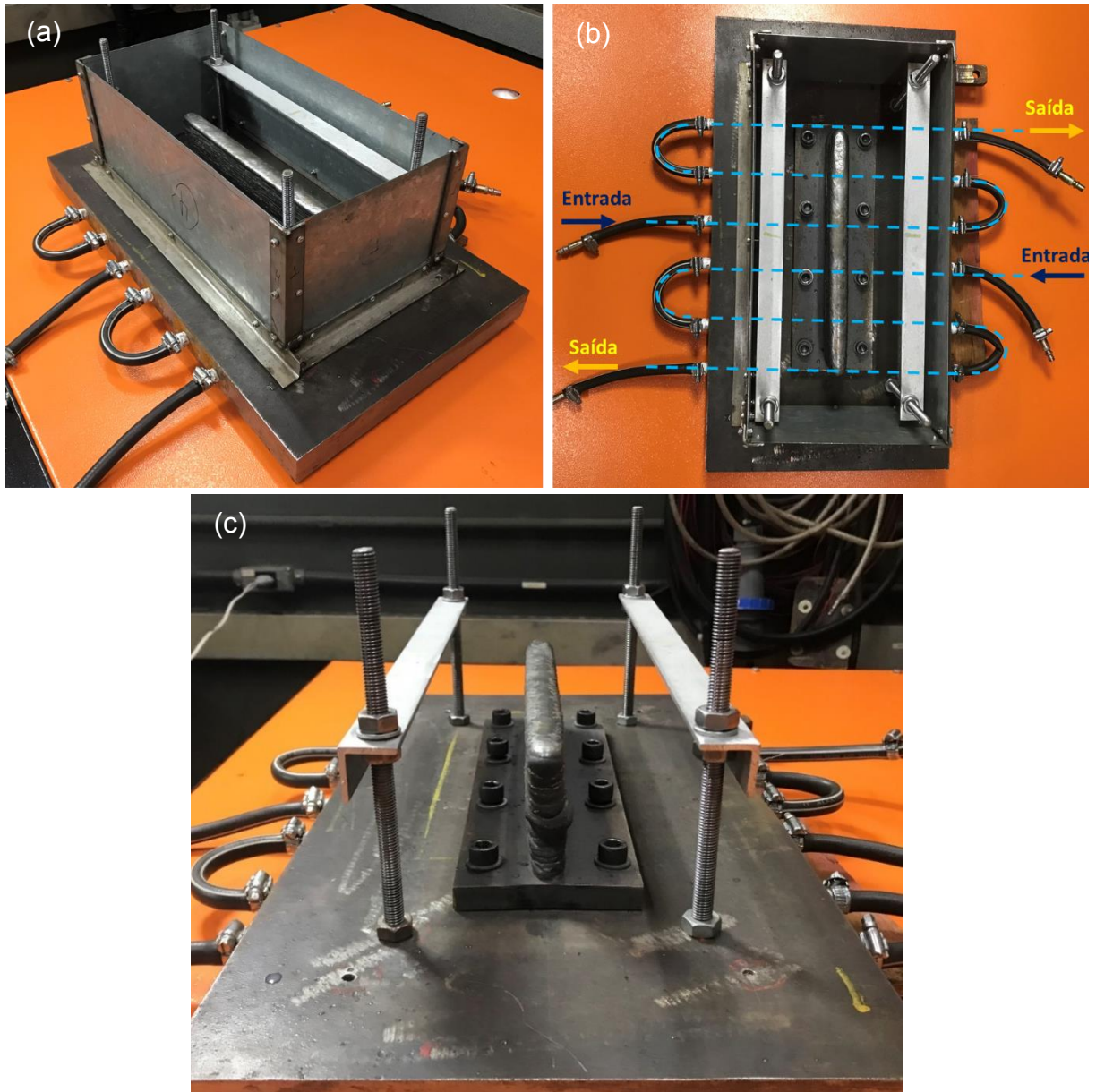


Figura 15. Dispositivo fabricado para prova de conceito da MADA-LF: (a) vista isométrica do dispositivo montado; (b) detalhes do circuito de refrigeração; e (c) dispositivo sem a cuba de contenção do fluxo para destacar as guias de nivelamento e ajuste de altura do leito de fluxo

5.2. MATERIAIS

Chapas de SAE 1020 nas dimensões de 300x100x12,7 mm³ foram utilizadas como substrato. O material de adição foi um arame maciço de aço ligado ao cromo e molibdênio com Ø de 2,50 mm comercialmente conhecido como Union S 1 CRMO 2 e designado pela norma EN ISO 24598-A – S S CrMo2R e AWS A5.23: EB3R. Em conjunto com esse arame, foi utilizado fluxo básico aglomerado comercialmente conhecido como UV 420 TTR e designado pela norma EN ISO 14174: AS FB 65 DC.

A composição química nominal do arame, do fluxo e do metal depositado são apresentadas nas Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente. Os níveis típicos de resistência mecânica para o metal de solda são apresentados na Tabela 9.

Tabela 6. Composição química nominal do arame
(Böhler Voestalpine, 2019, p. 201)

Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo
Bal.	0,12 %p	0,08 %p	0,55 %p	2,5 %p	1,0 %p

Tabela 7. Composição química nominal do fluxo
(Böhler Voestalpine, 2019, p. 201)

SiO₂ + TiO₂	CaO+MgO (%p)	Al₂O₃ + MnO	CaF₂
15 %p	35 %p	21 %p	26 %p

Tabela 8. Composição química nominal do metal de solda
(Böhler Voestalpine, 2019, p. 201)

Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo
Bal.	0,08 %p	0,20 %p	0,75 %p	2,3 %p	1,0 %p

Tabela 9. Resistência mecânica típica do metal de solda na condição como depositado (Böhler Voestalpine, 2019, p. 201)

UTS	YS	Alongamento	Resistência ao impacto (ISO-V KV J)
720 MPa	600 MPa	20 %	≥ 54 J (-30° C) e ≥ 80 J (-20° C)

5.3. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE DEPOSIÇÃO

Para a deposição das camadas foi utilizada uma fonte e sistema de movimentação para soldagem por SAW da Bambozzi modelo TRR 3600. Visto que a interface para ajuste de parâmetros na fonte e no carro de movimentação é por meio de potenciômetros e posição de um borne (Figura 16), foi necessário realizar uma calibração para garantir que os valores ajustados na fonte correspondessem ao desejado.



Figura 16. Fonte de soldagem e carro de movimentação para SAW utilizada para MADA-LF: interface de ajuste de parâmetros através de potenciômetros e posição de borne

Para a calibração da velocidade de alimentação do arame (VA) foram ajustados valores crescentes de 10 a 100 ao passo de 10 no potenciômetro da fonte e o tempo para que o rolete desse 10 voltas foi cronometrado. Então, a partir do diâmetro do rolete (\varnothing 50 mm) estimou-se a VA do arame. A curva de calibração da VA é apresentada na Figura 17, na qual observa-se um comportamento linear e velocidade máxima de alimentação (potenciômetro na posição 100) de 2 m/min.

A calibração da velocidade de deposição (VD) foi realizada através da medição do tempo para que o carro deslocasse de 50 cm. A curva de calibração da VD é apresentada na Figura 18, onde observa-se que a velocidade aumenta linearmente até um valor de 40 no potenciômetro. A velocidade máxima atingida nesse regime linear (potenciômetro em 40) é de 200 cm/min.

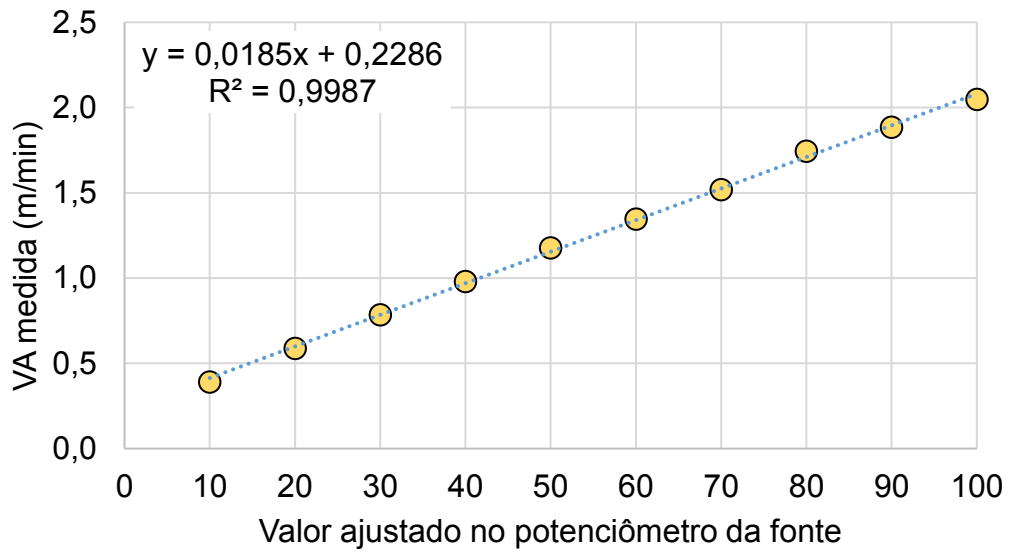


Figura 17. Curva de calibração da velocidade de alimentação do arame (VA)

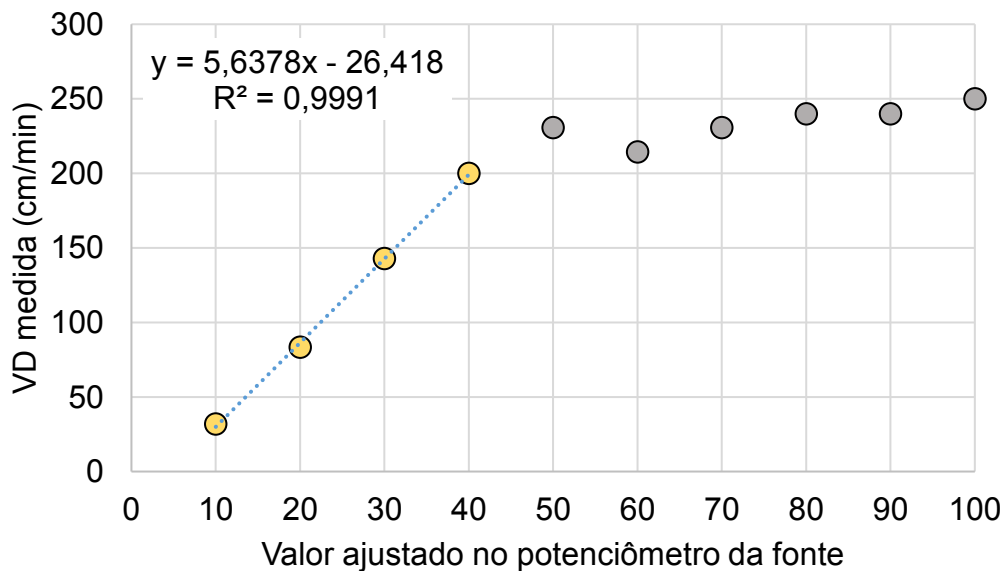


Figura 18. Curva de calibração da velocidade de deposição (VD)

Para medição dos sinais elétricos da fonte (tensão e corrente) foi utilizado um sistema de aquisição desenvolvido pelo grupo LAPROSOLDA (2021). Esse sistema de aquisição é composto por transdutor de corrente por efeito Hall (LEM, HTA 600-S), condicionador de sinal, placa de aquisição com resolução de 14 Bits (National Instruments, NI USB-6009) e interface construída em ambiente LabView. Detalhes

sobre esse sistema de aquisição podem ser encontrados na dissertação de Machado (2011).

Conforme mostrado na Figura 19, o ajuste da faixa de tensão é feito através da posição do borne e o ajuste fino da tensão através da posição de um potenciômetro. Então, foram feitas simples deposições variando a posição do borne, do potenciômetro e da velocidade alimentação. A distância bico de contato peça (DPBC) foi mantida num valor constante de 25 mm para todas as deposições. Os valores de corrente (A) e tensão (V) durante as deposições foram medidos por 5 segundos com taxa de aquisição de 5 kHz. Esses mesmos testes foram utilizados para determinação da janela operacional do equipamento, isto é, combinações de parâmetros que resultaram na formação de depósitos razoáveis.

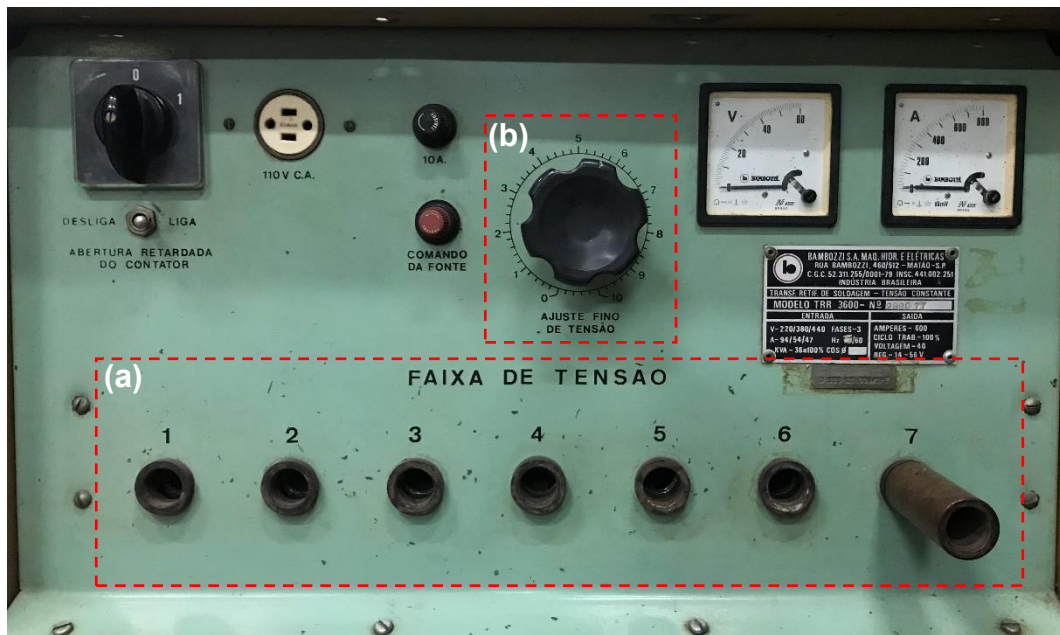


Figura 19. Detalhes do ajuste de tensão da fonte: (a) ajuste da faixa de tensão através da posição do borne e (b) ajuste fino da tensão através do potenciômetro

Na Figura 20 são apresentadas as curvas de calibração da tensão em função da posição do borne de seleção de faixa de tensão e do potenciômetro de ajuste fino de tensão para diferentes valores de VA. Para todos os casos observa-se um comportamento linear. Além disso, como esperado, quanto maior a posição do borne e o valor ajustado no potenciômetro de ajuste fino de tensão, maior os valores de tensão. Vale destacar que essas curvas de calibração de tensão são válidas apenas para as condições sob as quais elas foram levantadas (arame, fluxo e DBCP).

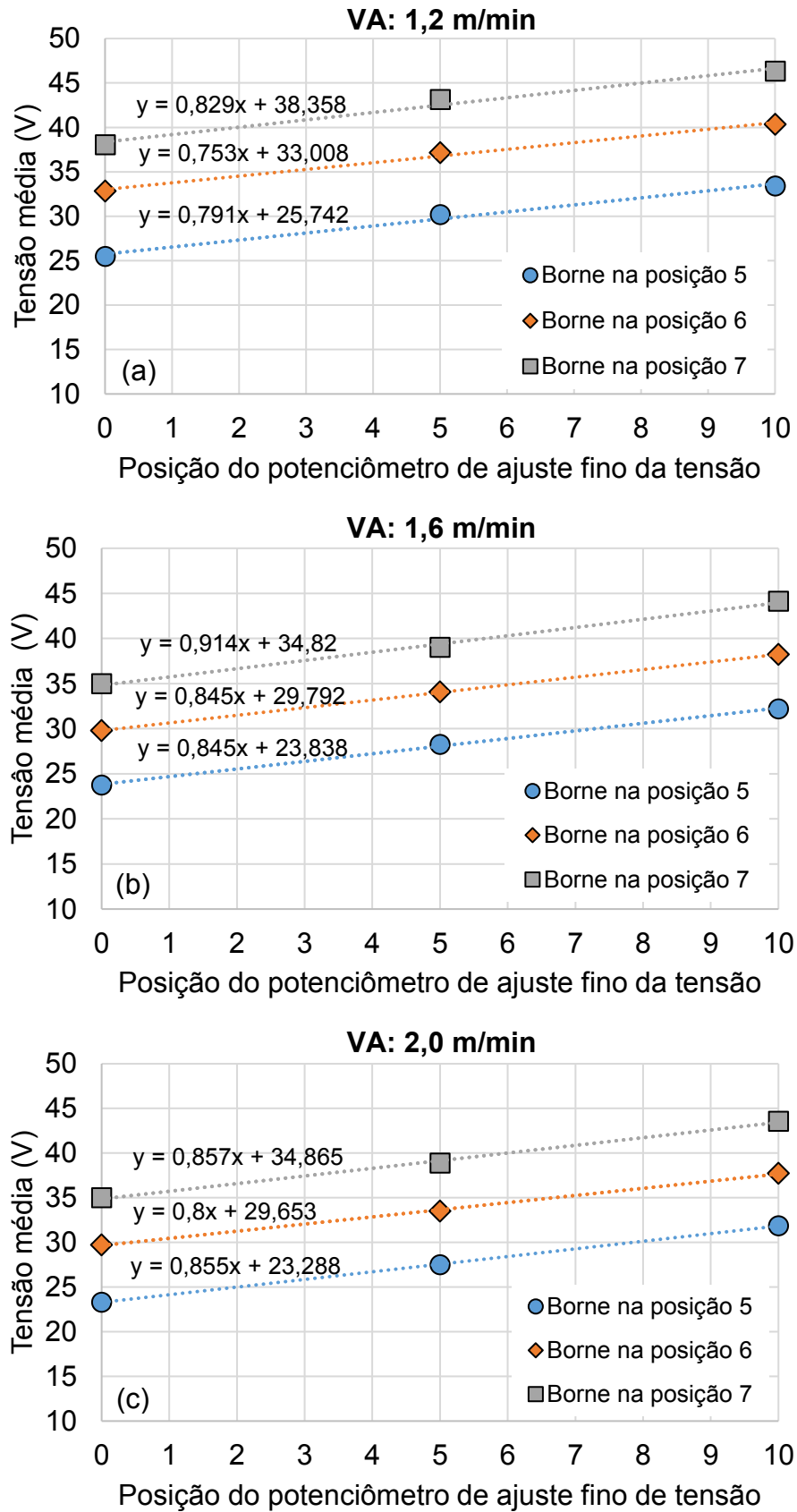


Figura 20. Curvas de calibração da tensão em função da posição do potenciômetro de ajuste fino e da posição do borne da fonte: (a) VA de 1,2; (b) 1,6; e (c) 2,0 m/min

A corrente de deposição é função da velocidade de alimentação e vice-versa. A fonte de deposição utilizada no presente trabalho é do tipo tensão constante e o operador ajusta a tensão e a velocidade de alimentação (VA) desejadas. Portanto, a VA é a variável de entrada, enquanto a corrente é uma consequência da VA e da DBCP. A Figura 21 ilustra a característica estática tombante da fonte utilizada no presente trabalho. Como esperado para esse tipo de fonte, quando maior a VA ou a corrente, menor a tensão. Uma discussão detalhada sobre características de fonte e do arco é apresentada por Scotti and Ponomarev (2014).

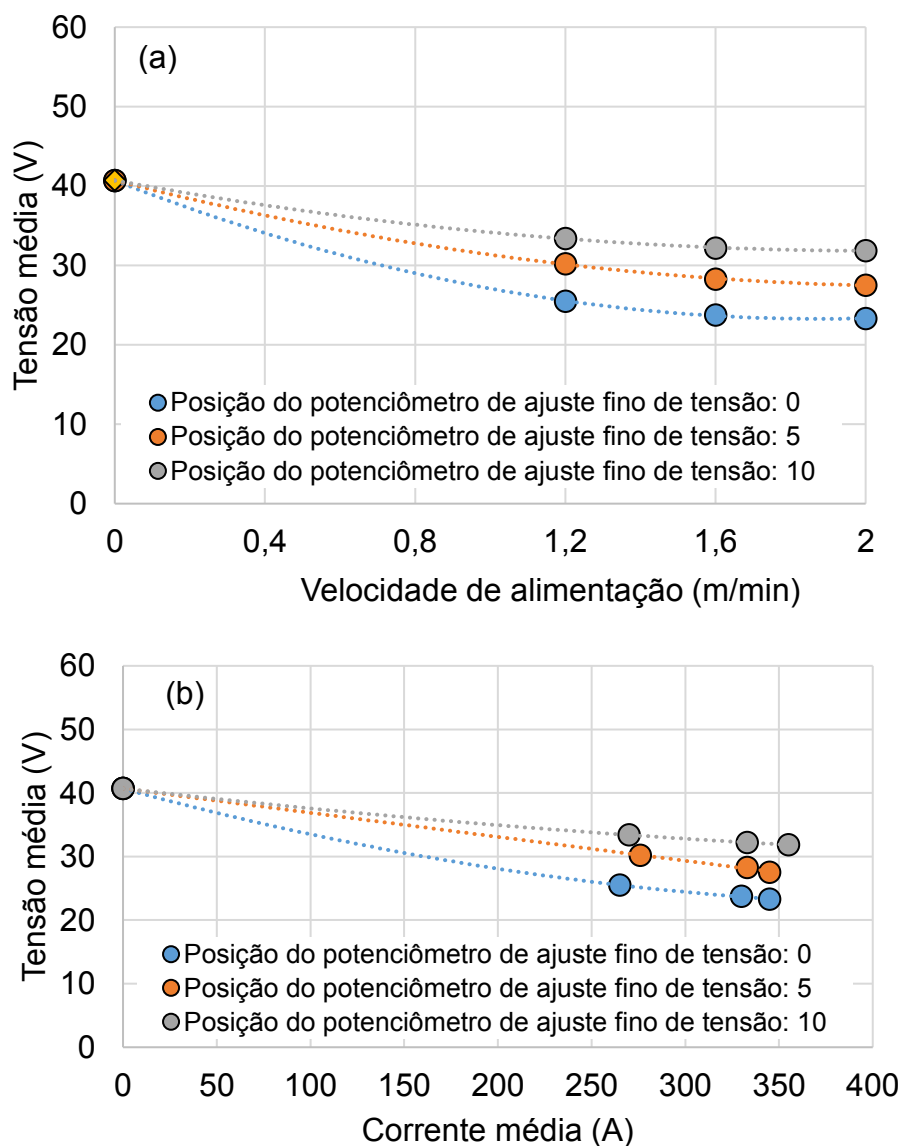


Figura 21. Característica estática da fonte em função da (a) velocidade de alimentação e (b) da corrente para o borne de tensão na posição 4

5.4. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

A través da revisão bibliográfica e dos testes de calibração de fonte de deposição, definiu-se como sendo os parâmetros de deposição mais influentes sobre a geometria da camada a velocidade de alimentação (VA), a velocidade de deposição (VD) e a tensão (U). Para avaliar e quantificar o efeito desses parâmetros sobre a geometria da camada foi utilizada a metodologia de superfície de resposta.

Os dados para elaboração da superfície de resposta foram levantados através de projeto de experimentos (DOE) do tipo Box-Behnken. Esse tipo de DOE foi selecionado por necessitar de poucos experimentos e para garantir operação na janela de operação do equipamento (Minitab, 2022). A Figura 22 ilustra um experimento Box-behnken com três fatores. Os pontos no diagrama representam os testes executados.

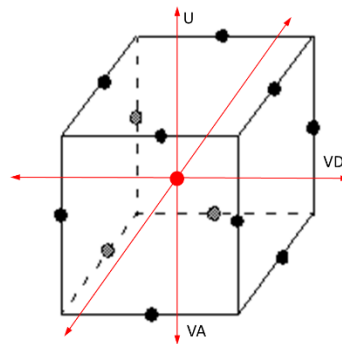


Figura 22. Representação do DOE Box-Behnken com três fatores, onde cada ponto representa um teste (Minitab, 2022)

Os níveis e fatores do DOE Box-Behnken são sumarizados na Tabela 10, enquanto a matriz de experimento na Tabela 11. As deposições foram iniciadas e finalizadas com o ponto central, testes 14 e 15, como forma de avaliar a repetibilidade das deposições. Os demais foram executados em ordem aleatória.

Tabela 10. Descrição dos níveis e fatores do DOE Box-Behnken

	-1	0	1
VA (m/min)	1,2	1,6	2,0
VD (cm/min)	20	30	40
U (V)	30	34	38

Tabela 11. Matriz de experimento para avaliação do efeito dos principais parâmetros de deposição sobre a geometria da camada através de um DOE Box-Behnken

Teste	VA (m/min)	VD (cm/min)	U (V)
1	1,2	20,0	34,0
2	2,0	20,0	34,0
3	1,2	40,0	34,0
4	2,0	40,0	34,0
5	1,2	30,0	30,0
6	2,0	30,0	30,0
7	1,2	30,0	38,0
8	2,0	30,0	38,0
9	1,6	20,0	30,0
10	1,6	40,0	30,0
11	1,6	20,0	38,0
12	1,6	40,0	38,0
13 (C)*	1,6	30,0	34,0
14 (C)*	1,6	30,0	34,0
15 (C)*	1,6	30,0	34,0

* ponto central do DOE Box-Behnken

5.5. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Nessa seção são apresentadas todas as técnicas e procedimento de caracterização das camadas e da pré-forma.

5.5.1. Geometria

A geometria das camadas (depósitos) obtidas no DOE e posteriormente a geometria da pré-forma produzida foram caracterizadas por meio de escaneamento 3D. Para digitalização foi utilizado um escâner HandSCAN 3D da Creafom com resolução de 0,025 mm. Esse escâner é operado manualmente conforme ilustrado na Figura 23. As nuvens de pontos obtidas foram tratadas e analisadas através do módulo VXModel do programa VXEelements do mesmo fabricante do escâner.

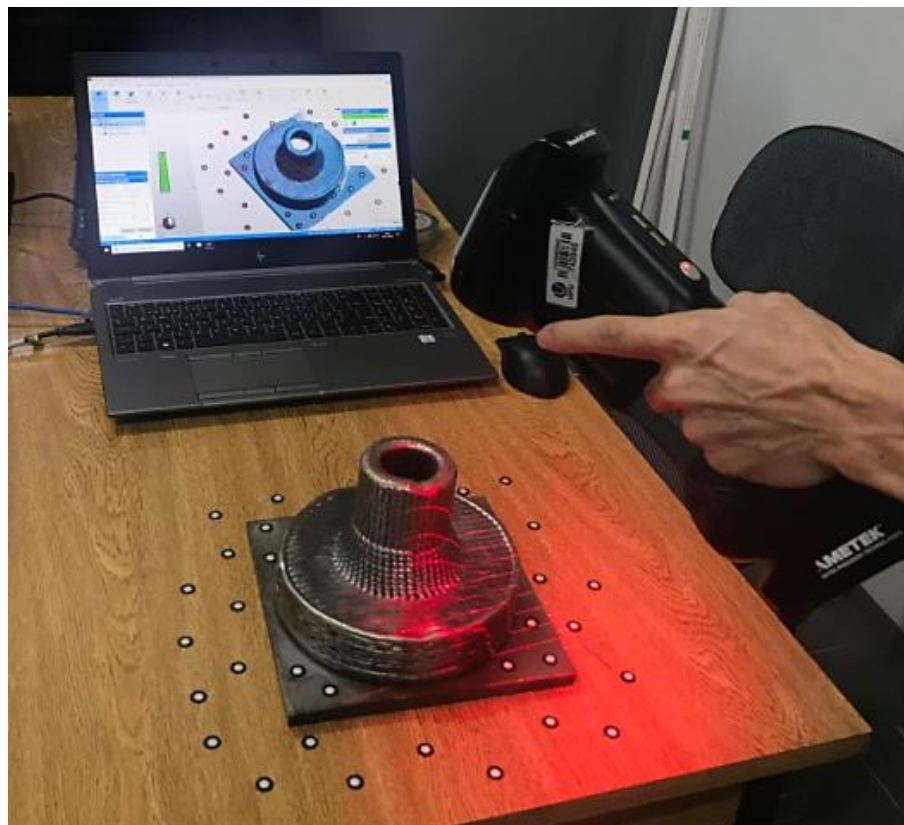


Figura 23. Digitalização de uma peça fabricada por MADA utilizando o escâner disponível no LAPROSOLDA (2021)

A análise da geometria das camadas e da pré-forma foi realizada segundo procedimento proposto por Scotti (2021). Inicialmente a malha é tratada e quaisquer anomalias são removidas e/ou corrigidas. Posteriormente, são feitos recortes e uma região de interesse é selecionada para análise, tipicamente a região central da pré-forma que é livre de desvios devido ao início e fim dos depósitos e quando há estabilização do processo. A Figura 24 ilustra um procedimento típico de análise geométrica de uma pré-forma digitalizada. Posteriormente, essa região de interesse é exportada do programa VXModel no formato *txt* e então esse arquivo é carregado num algoritmo escrito em Python para a análises das seções. Esse algoritmo analisa os parâmetros geométricos em seção a cada 0,5 mm. Na Figura 25 são mostrados os parâmetros geométricos que foram analisados nas camadas (Figura 25a), na pré-forma (Figura 25b) e a equação para determinação da ondulação superficial (Figura 25c).

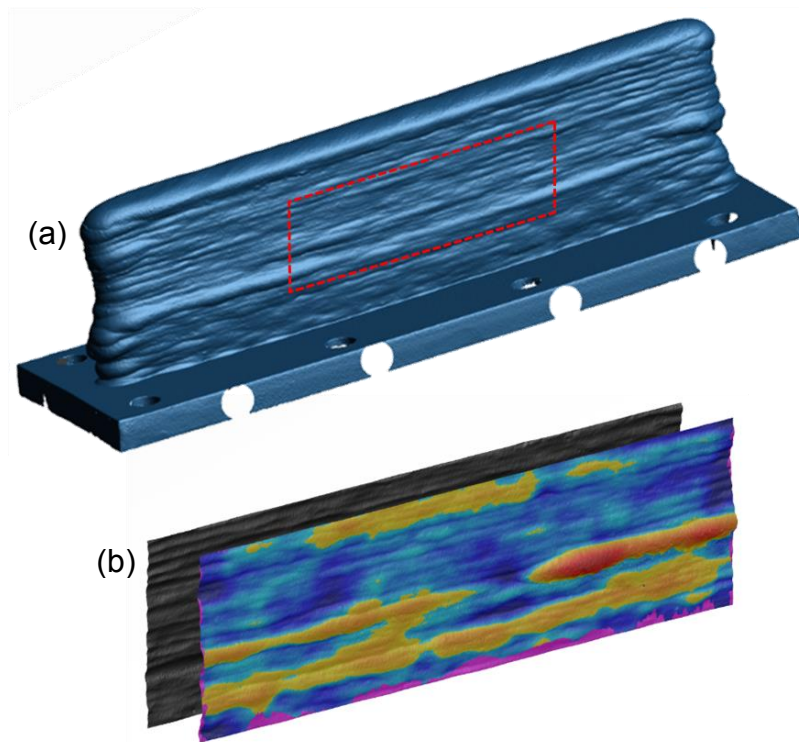


Figura 24. Procedimento para análise geométrica da pré-forma digitalizada: (a) correção da malha e seleção da região de interesse e (b) recorte da região de interesse

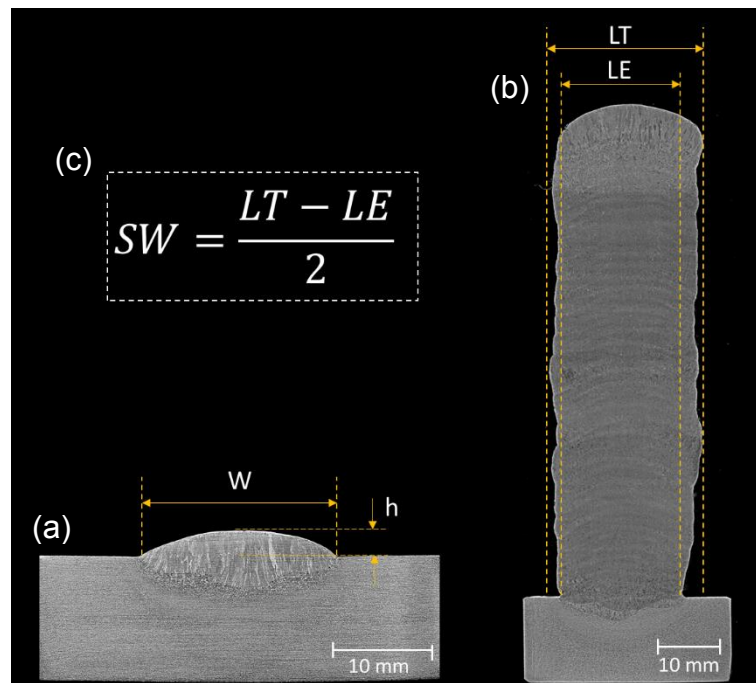


Figura 25. Parâmetros geométricos que foram medidos na (a) camada e (b) pré-forma. W : largura da camada, h : altura da camada, LT : largura total da pré-forma, LE : largura efetiva da pré-forma e SW : ondulação da superfície

5.5.2. Microestrutura e composição química

As análises microestrutural e de composição química foram realizadas apenas na pré-forma com objetivo de identificar a presença de descontinuidades e inclusões, o efeito dos múltiplos ciclos térmicos sobre a microestrutura e variação da composição química ao longo da altura de uma peça produzida pelo processo MADA-LF.

Inicialmente, amostras da seção transversal junto ao substrato (base), a meia altura (meio) e das últimas camadas (topo) foram cortadas da pré-forma em uma serra fita. No caso das amostras de metalografia, elas foram lixadas com lixas d'água de granulometria 120 até 1200 *mesh*. O polimento foi realizado com pastas de diamante de 6, 3 e 1 μm e a microestrutura foi revelada usando o reagente Nital a 2%. A microestrutura foi avaliada em um microscópio óptico Olympus - BX51M, equipado com uma câmera digital Zeiss AxioCam ICc5 e *software* ZenCore®.

Para a análise de composição química foi utilizado um espectrômetro de emissão ótica por descarga luminescente (GDS) da marca LECO modelo GDS 500 como apresentado em LTAD (2022). As amostras para medição de composição química são idênticas as amostras de metalografia, mas nesse caso foram lixadas com lixas d'água de granulometria 220 *mesh*. Foram realizadas 3 medições em cada amostra.

5.5.3. Propriedades mecânicas

Os valores de limite de escoamento (YS), de limite de resistência (UTS) e de dureza (HB) em diferentes posições da pré-forma foram levantados através de ensaios de macroindentação instrumentada. A utilização dessa técnica foi motivada pelo elevado custo associado com a deposição de uma pré-forma com tamanho suficiente para fabricação de corpos de prova padronizados para ensaio de tração e dificuldade envolvida com testes de tração em miniatura.

O ensaio de macroindentação instrumentada consiste na indentação controlada em uma superfície, utilizando um indentador esférico, através de múltiplos ciclos de carregamento e descarregamento em um mesmo ponto. A força aplicada e profundidade de penetração (deslocamento) são continuamente medidas através de uma célula de carga e um sensor de deslocamento (Nicolosi, 2015).

Uma curva típica obtida de um ensaio de macroindentação é apresentada na Figura 26. Os dados levantados a partir dessa curva são utilizados para calcular valores incrementais de tensão e deformação verdadeiras (Figura 27) utilizando o modelo de Haggag et al. (1990).

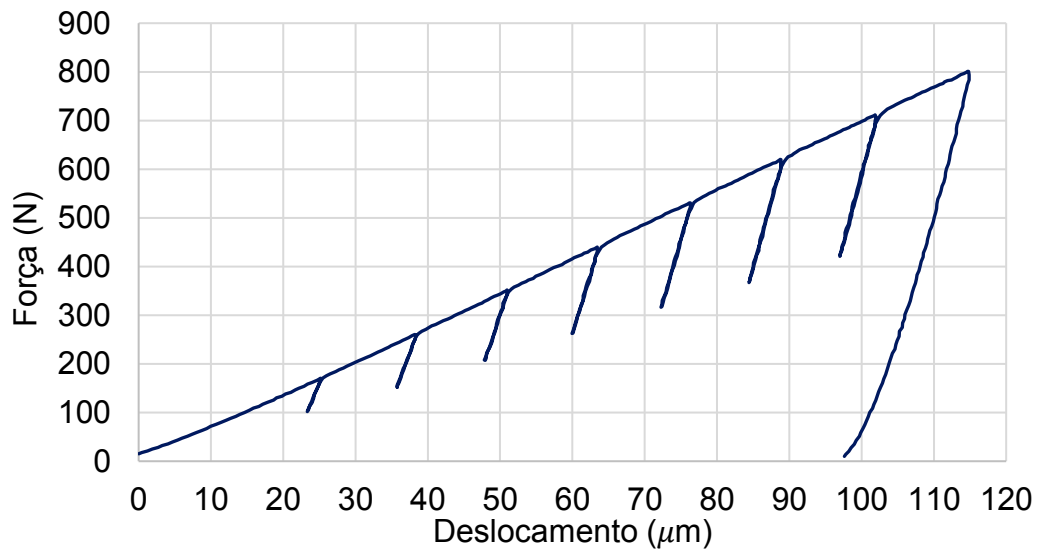


Figura 26. Curva típica de carregamento e descarregamento obtida no ensaio de macroindentação instrumentada

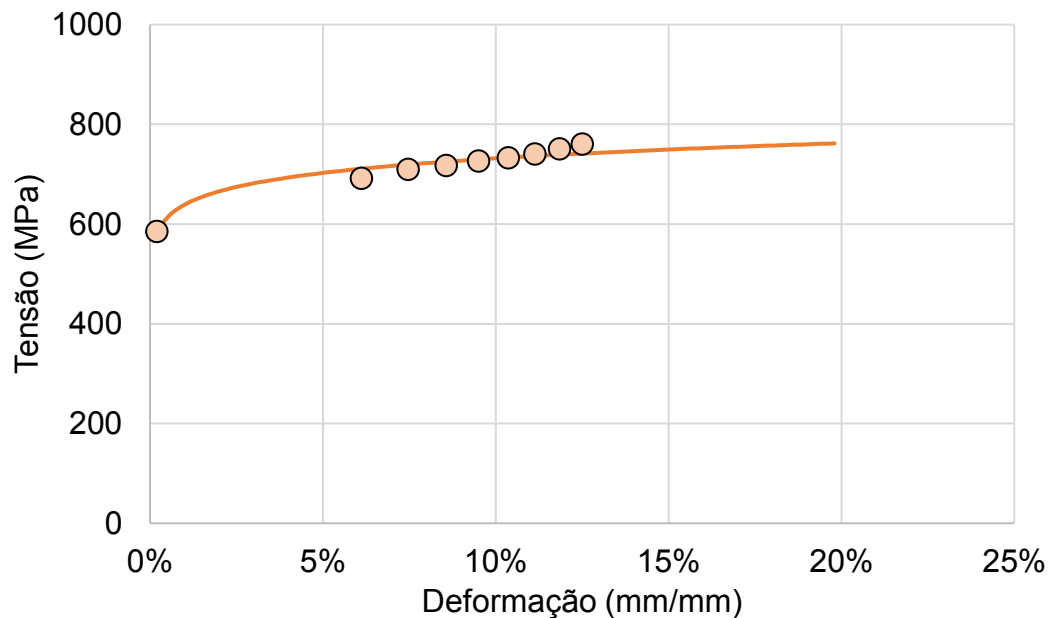


Figura 27. Curva tensão deformação verdadeira obtida através dos dados do ensaio de macroindentação instrumentada (Figura 26) utilizando o modelo proposto por Haggag et al. (1990)

Os parâmetros do ensaio de macroindentação instrumentada utilizados no presente trabalho são sumarizados na Tabela 12. Uma revisão detalhada sobre a técnica de macroindentação instrumentada, bem como sobre o modelo de Haggag et al. (1990) e o efeito de diversos parâmetros do ensaio sobre os resultados obtidos pode ser encontrada na dissertação de Nicolosi (2015).

Tabela 12. Parâmetros de entrada do ensaio de macroindentação instrumentada

Material da esfera	WC-Co
Módulo de elasticidade da esfera	645 GPa
Ø da esfera	1,0 mm
Módulo de elasticidade da amostra	210 GPa
β_m^*	0,4324
b_m^*	-329
Força máxima	800 N
Número de ciclos	8
Descarregamento por ciclo	40%
Velocidade do ensaio	0,76 mm/min

* constantes do modelo Haggag et al. (1990) levantadas por Nicolosi (2015) para aços

Por fim, resistência ao impacto foi medida por meio de ensaios Charpy. Os corpos de prova (3 no total) foram usinados segundo a ASTM E23 e retirado da base, meia altura e topo da pré-forma, conforme mostrado na Figura 28. Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente com um pêndulo Charpy de 300 J.

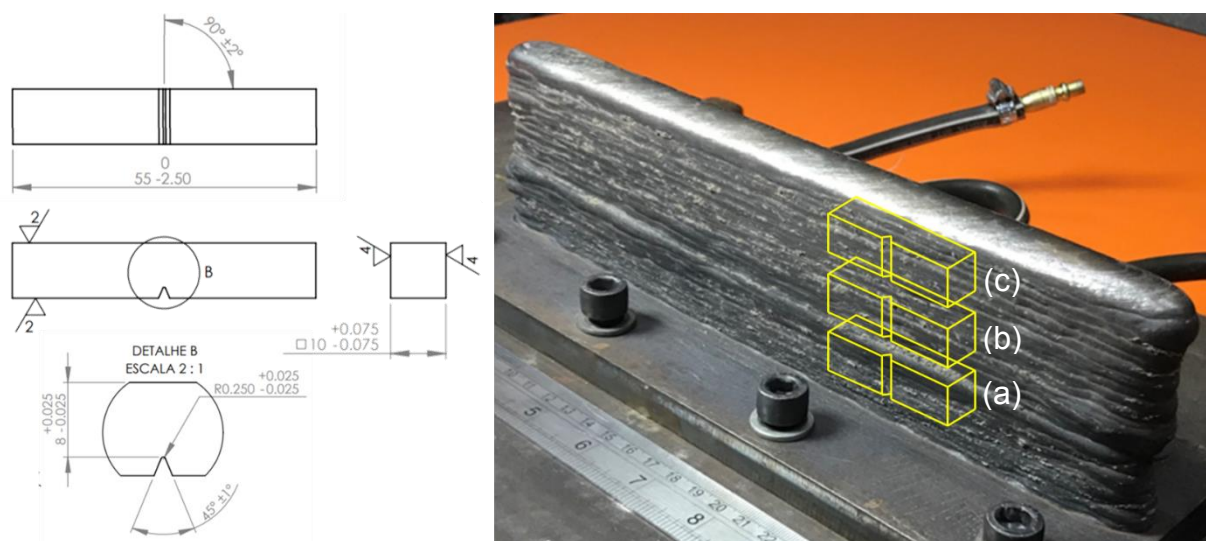


Figura 28. Corpos de prova para ensaio Charpy: (a) base; (b) meia altura; e (c) topo

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. EFEITO DOS PARÂMETROS SOBRE A GEOMETRIA DA CAMADA

Os efeitos dos parâmetros de deposição (VA, VD e U) sobre a geometria das camadas (altura e largura) obtidas no DOE (simples deposições de uma camada sobre chapa) são apresentadas na Figura 29 por meio de superfícies de respostas.

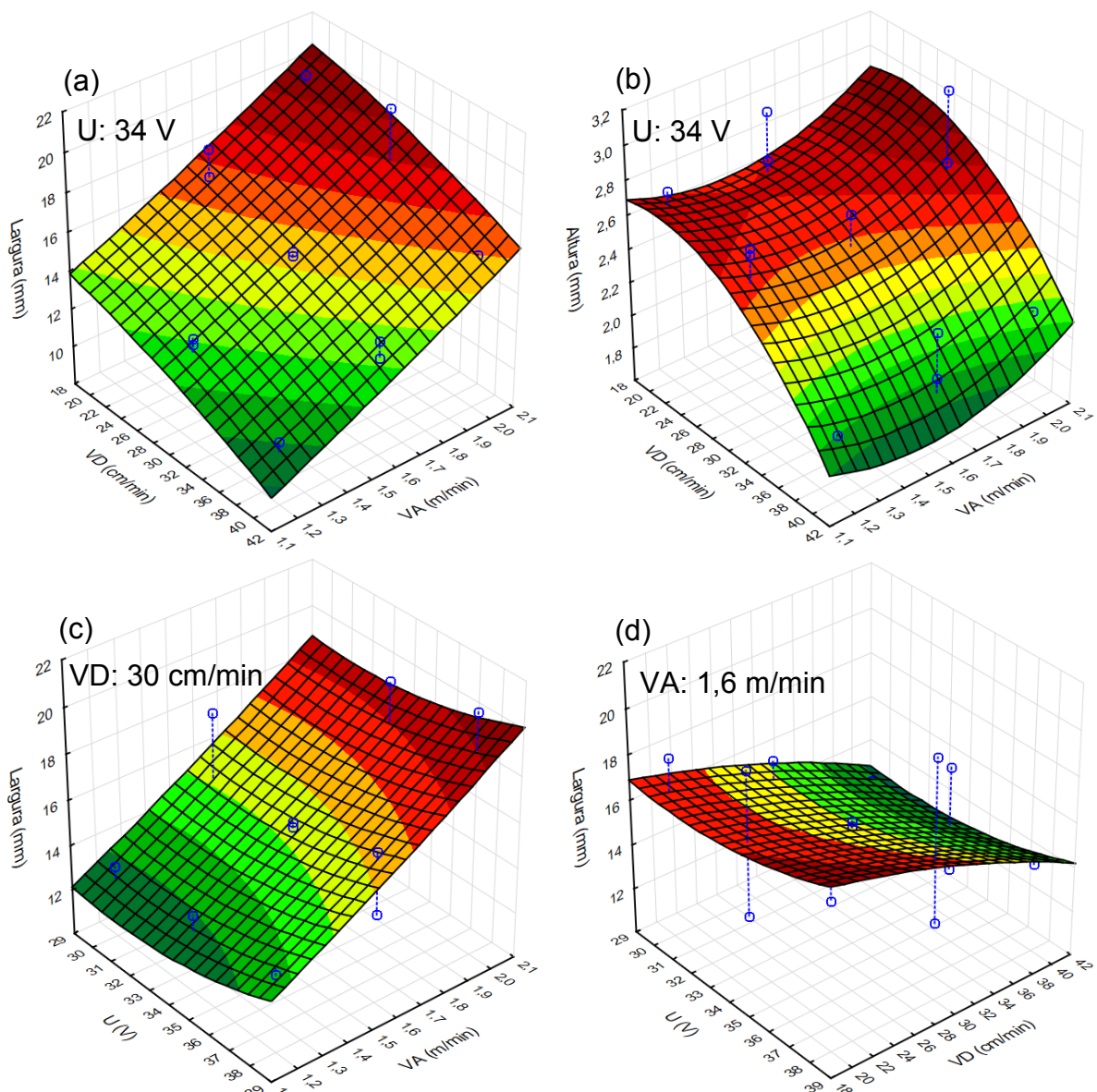


Figura 29. Superfícies de respostas: (a) efeito da VA e VD sobre a largura da camada; (b) efeito da VA e VD sobre a altura da camada; (c) efeito da U e VA sobre a largura da camada; e (d) efeito da U e VD sobre a altura da camada. Para cada superfície de resposta uma variável foi mantida constante

O efeito dos parâmetros de deposição sobre a geometria das camadas corrobora o que é amplamente reportado na literatura de soldagem (Tabela 2). Por meio do diagrama de Pareto do tamanho padronizado do efeito dos parâmetros de deposição sobre a geometria da camada (Figura 30), observa-se que os parâmetros de deposição com efeito significativo sobre a largura da camada são a VA e a VD, sendo o impacto da VA maior (Figura 30a). Em relação à altura da camada, os parâmetros VD e U são significativos, sendo que a VD tem o maior impacto.

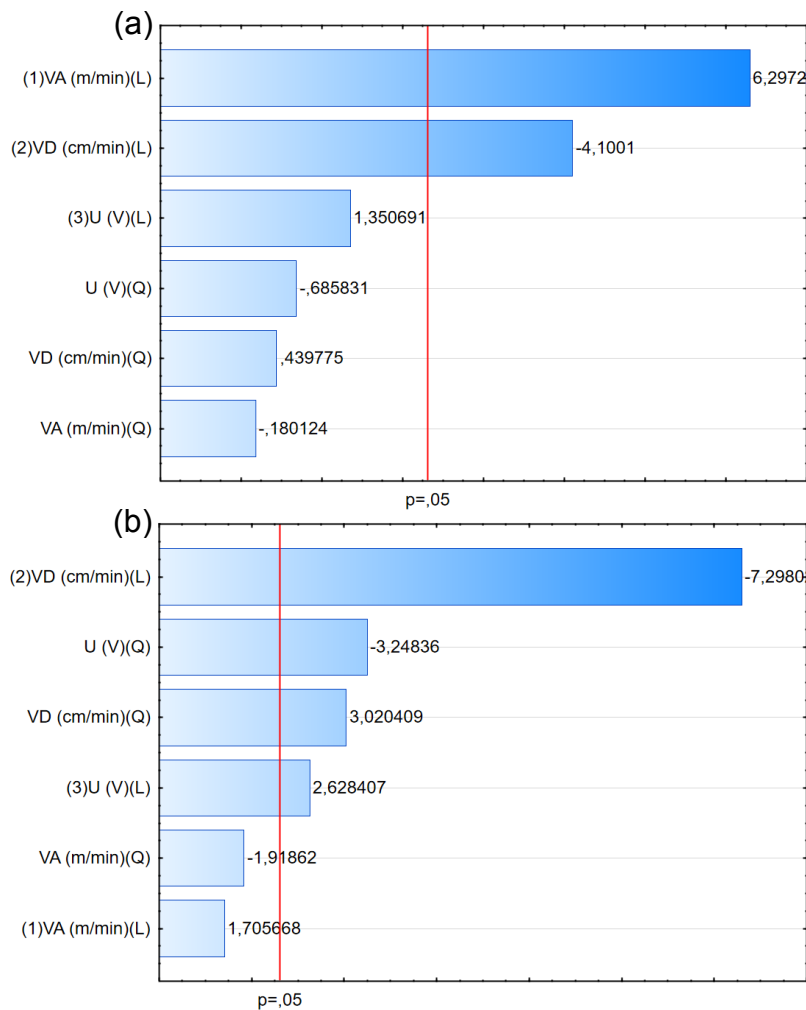


Figura 30. Tamanho padronizado do efeito dos parâmetros de deposição sobre:
(a) largura e (b) altura da camada

A seção transversal e aspecto superficial das camadas obtidas no DOE são apresentadas na Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15. De forma geral todas as combinações de parâmetros resultaram em deposições estáveis, boa formação da camada e boa destacabilidade da escória. Além disso, não foram identificadas descontinuidades como trincas, poros ou inclusões.

Tabela 13. Seção transversal e aspecto superficial das camadas obtidas nos testes de 1 a 5 do DOE

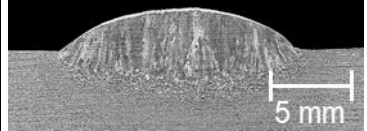
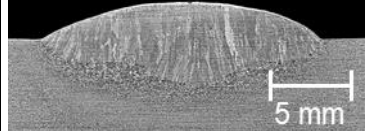
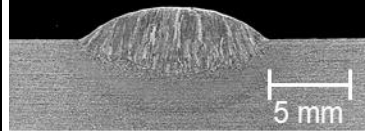
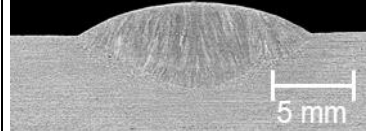
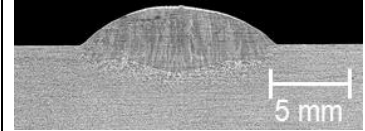





Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
				
				
VA: 1,2 m/min VD: 20 cm/min U_m: 33,3 V I_m: 238 A EA: 2380 J/mm W: 13,5 ± 0,9 mm h: 2,7 ± 0,4 mm	VA: 2,0 m/min VD: 20 cm/min U_m: 35,1 V I_m: 354 A EA: 3731 J/mm W: 19,7 ± 0,3 mm h: 2,7 ± 0,3 mm	VA: 1,2 m/min VD: 40 cm/min U_m: 33,2 V I_m: 181 A EA: 901 J/mm W: 11,3 ± 0,3 mm h: 2,0 ± 0,2 mm	VA: 2,0 m/min VD: 40 cm/min U_m: 34,0 V I_m: 365 A EA: 1860 J/mm W: 16,0 ± 0,3 mm h: 2,2 ± 0,2 mm	VA: 1,2 m/min VD: 30 cm/min U_m: 31,9 V I_m: 281 A EA: 1791 J/mm W: 13,2 ± 0,7 mm h: 2,7 ± 0,2 mm

Tabela 14. Seção transversal e aspecto superficial das camadas obtidas nos testes de 6 a 10 do DOE

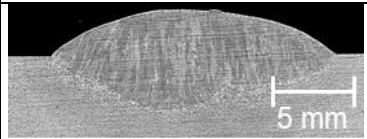
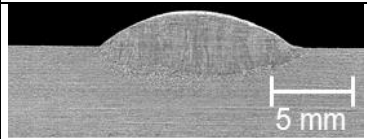
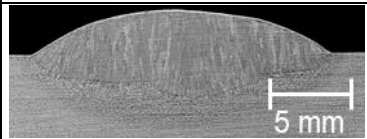
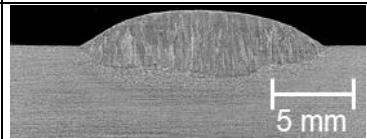
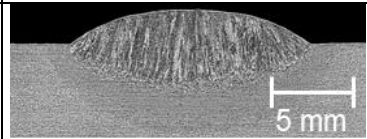





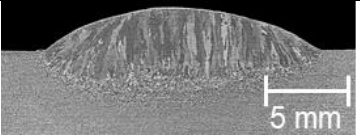
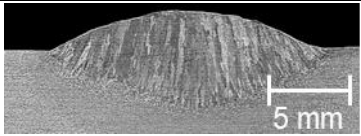
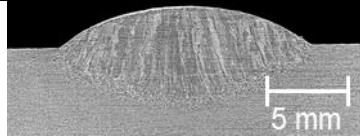
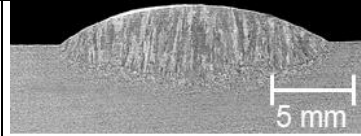
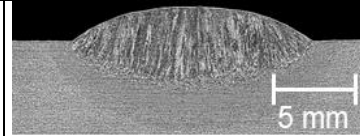





Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10
				
				
VA: 2,0 m/min VD: 30 cm/min U_m: 30,7 V I_m: 410 A EA: 2519 J/mm W: 16,0 ± 1,1 mm h: 2,7 ± 0,2 mm	VA: 1,2 m/min VD: 30 cm/min U_m: 39,1 V I_m: 273 A EA: 2135 J/mm W: 13,5 ± 0,4 mm h: 2,3 ± 0,3 mm	VA: 2,0 m/min VD: 30 cm/min U_m: 37,3 V I_m: 408 A EA: 3042 J/mm W: 20,7 ± 0,7 mm h: 3,1 ± 0,3 mm	VA: 1,6 m/min VD: 20 cm/min U_m: 31,3 V I_m: 301 A EA: 2829 J/mm W: 18,0 ± 0,7 mm h: 2,7 ± 0,3 mm	VA: 1,6 m/min VD: 40 cm/min U_m: 30,5 V I_m: 316 A EA: 1445 J/mm W: 13,1 ± 0,4 mm h: 2,0 ± 0,1 mm

Tabela 15. Seção transversal e aspecto superficial das camadas obtidas nos testes de 11 a 15 do DOE

Teste 11	Teste 12	Teste 13 (C)	Teste 14 (C)	Teste 15 (C)
				
				
VA: 1,6 m/min VD: 20 cm/min U_m: 39,2 V I_m: 323 A EA: 3794 J/mm W: 16,7 ± 1,2 mm h: 3,0 ± 0,2 mm	VA: 1,6 m/min VD: 40 cm/min U_m: 37,2 V I_m: 289 A EA: 1610 J/mm W: 14,0 ± 0,6 mm h: 2,3 ± 0,3 mm	VA: 1,6 m/min VD: 30 cm/min U_m: 35,4 V I_m: 358 A EA: 2535 J/mm W: 15,3 ± 0,6 mm h: 2,7 ± 0,3 mm	VA: 1,6 m/min VD: 30 cm/min U_m: 36,8 V I_m: 316 A EA: 2327 J/mm W: 15,5 ± 0,6 mm h: 2,4 ± 0,3 mm	VA: 1,6 m/min VD: 30 cm/min U_m: 34,8 V I_m: 355 A EA: 2468 J/mm W: 15,0 ± 0,8 mm h: 2,4 ± 0,3 mm

6.2. PROVA DE CONCEITO

Para fins da prova de conceito foi depositada uma pré-forma do tipo parede simples/fina (camada sobre camada). Essa geometria foi selecionada pela sua facilidade de deposição e por representar uma condição na qual seria difícil sustentar o fluxo sobre a camada durante a deposição. O conjunto de parâmetros referente ao teste 8 do DOE foi selecionado para a deposição da pré-forma, pois essa condição se mostrou estável, com menor variabilidade da largura e resultou em camadas com ótimo aspecto superficial.

Dado que nessa prova de conceito o fluxo não seria fornecido através da tocha, mas sim espalhado sobre o substrato antes da deposição – daí o nome da técnica de MADA-LF – foram realizados alguns testes preliminares para determinação da altura da camada de fluxo a ser utilizada. Da tecnologia da soldagem por SAW é sabido que uma camada de fluxo muito fina poderia gerar instabilidade no processo de deposição, enquanto uma muito grossa poderia dificultar o escape dos gases resultando em porosidade ou formação de vazios. A partir desses testes preliminares chegou-se a uma faixa de espessura de fluxo de 25 a 30 mm.

A pré-forma foi então depositada utilizando uma estratégia de deposição bidirecional com tempo de resfriamento entre as camadas, ou seja, após uma camada atingir um dado nível de temperatura (temperatura de interpasse), uma nova é depositada iniciando onde a anterior terminou. Durante a deposição, a temperatura de interpasse foi mantida entre 70 e 100° C. O monitoramento foi feito com um pirômetro e o tempo de resfriamento até atingir 100° C foi cronometrado após cada camada.

Para fins didáticos, as condições de deposição utilizadas na prova de conceito são sumarizadas na Tabela 16. Os materiais são os mesmos descritos no item 5.2.

Tabela 16. Condições de deposição para a prova de conceito

VA (m/min)	2,0
VD (cm/min)	30,0
U (V)	34,0
DBCP (mm)	25,0
Altura da camada de fluxo (mm)	25 - 30
Temperatura de interpasse (° C)	70 - 100
Estratégia de deposição	Bidirecional com tempo de resfriamento

6.2.1. Deposição da pré-forma

O leito de fluxo e a pré-forma produzida na prova de conceito são mostrados na Figura 31. Foram depositadas 42 camadas para a construção dessa pré-forma. A energia do arco (EA) obtida a partir da aquisição dos parâmetros de tensão (U) de corrente (I) durante 30 s em cada camada é mostrada na Figura 32. Pode-se dizer que a EA se manteve constante durante a deposição de todas as camadas, o que se reflete no aspecto superficial regular da pré-forma.



Figura 31. Prova de conceito da técnica de MADA-LF:

(a) leito de fluxo e (b) pré-forma construída

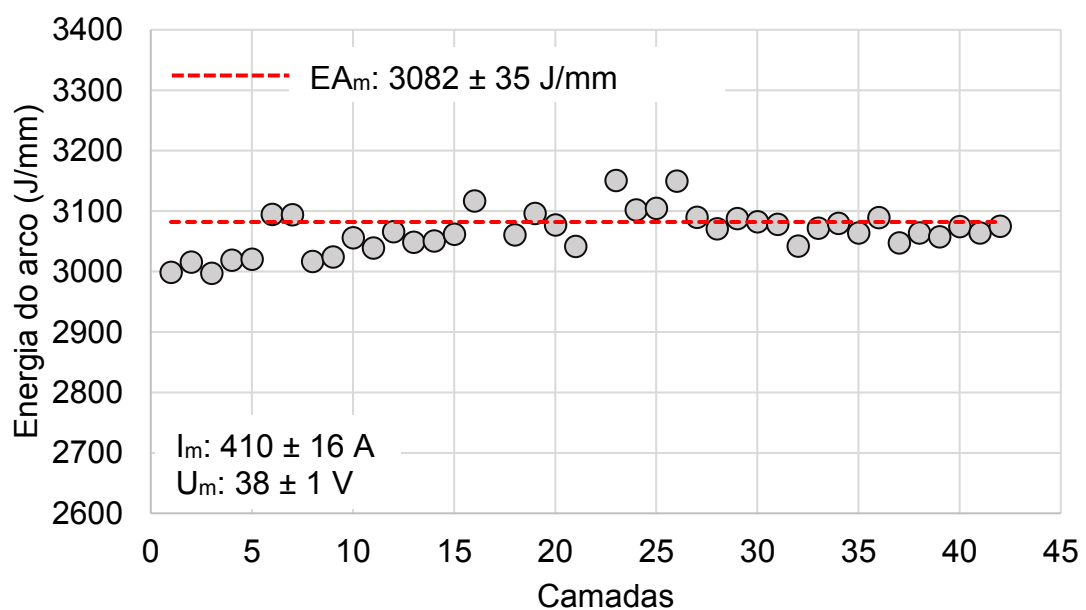


Figura 32. Energia do arco (EA) em cada camada

O tempo de resfriamento para cada camada atingir 100°C é mostrado na Figura 33. Apesar da EA e, conseqüentemente, a energia aportada na pré-forma se manter virtualmente constante durante a deposição das camadas, observa-se uma tendência do aumento do tempo de resfriamento com o aumento do número de camadas. Segundo da Silva et al. (2021) esse comportamento está associado a maior restrição ao escoamento de calor por condução através da pré-forma à medida que ela fica mais alta (maior número de camadas). Além disso, como a pré-forma fica submersa no fluxo, pode-se dizer que há menos troca de calor para o ambiente por convecção. Por fim, foi observado um aquecimento significativo do leito de fluxo durante as deposições, o que pode contribuir para um maior tempo de resfriamento com o aumento do número de camadas.

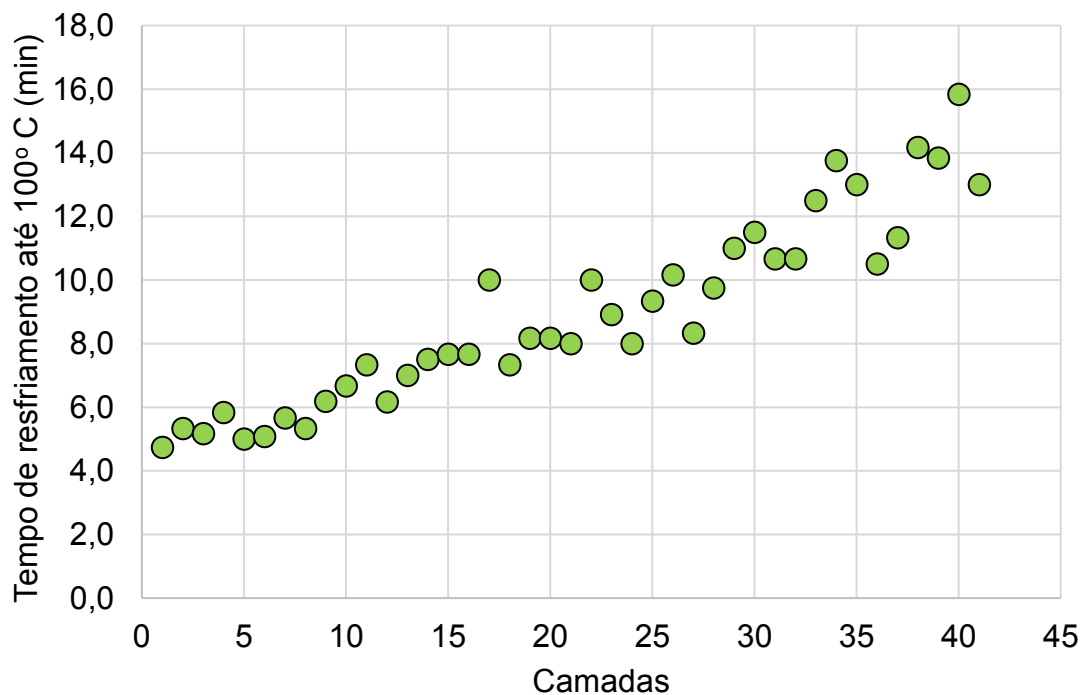


Figura 33. Tempo de resfriamento para cada camada atingir 100°C

Ao contrário do observado nas simples deposições sobre chapa do DOE, a escória formada na deposição da pré-forma se mostrou de difícil destacabilidade, exigindo, na maioria dos casos, o uso de talhadeira e marteladas vigorosas para remoção. Para entender esse comportamento analisou-se a geometria da escória sobre a camada e a fratura da escória após a sua remoção. Conforme mostrado na Figura 34a, na deposição de uma parede simples, a escória tende a abraçar a camada

gerando um travamento mecânico. Evidências desse travamento mecânico da escória sobre a camada podem ser observadas na superfície interna da escória mostrada na Figura 34b, onde observa-se a fratura da escória junto as bordas.

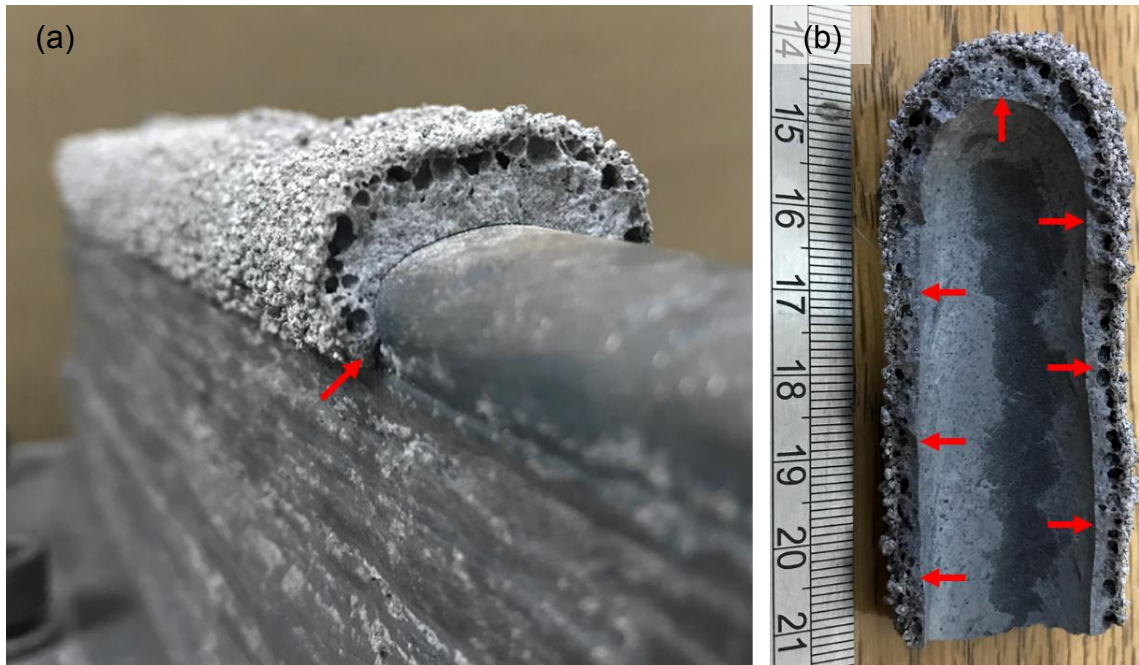


Figura 34. Formação da escória: (a) travamento mecânico associado com a geometria da camada (c) detalhe da fratura nas bordas da escória ao ser removida

6.3. CARACTERIZAÇÃO DA PRÉ-FORMA

6.3.1. Geometria

Através do aspecto superficial e da seção transversal da pré-forma apresentados na Figura 35, destaca se a regularidade geométrica. Os parâmetros geométricos da pré-forma, obtidos a partir de escaneamento 3D são apresentados na Tabela 17. Esses parâmetros geométricos, particularmente a ondulação na superfície lateral da pré-forma estão com concordância com o que é reportado para MADA com GMA (Williams et al., 2016). Vale mencionar que o presente trabalho não teve o objetivo de otimizar a geometria, portanto pré-formas ainda melhores poderiam ser obtidas através de um estudo das condições de deposição e seleção adequada dos consumíveis, particularmente o fluxo.

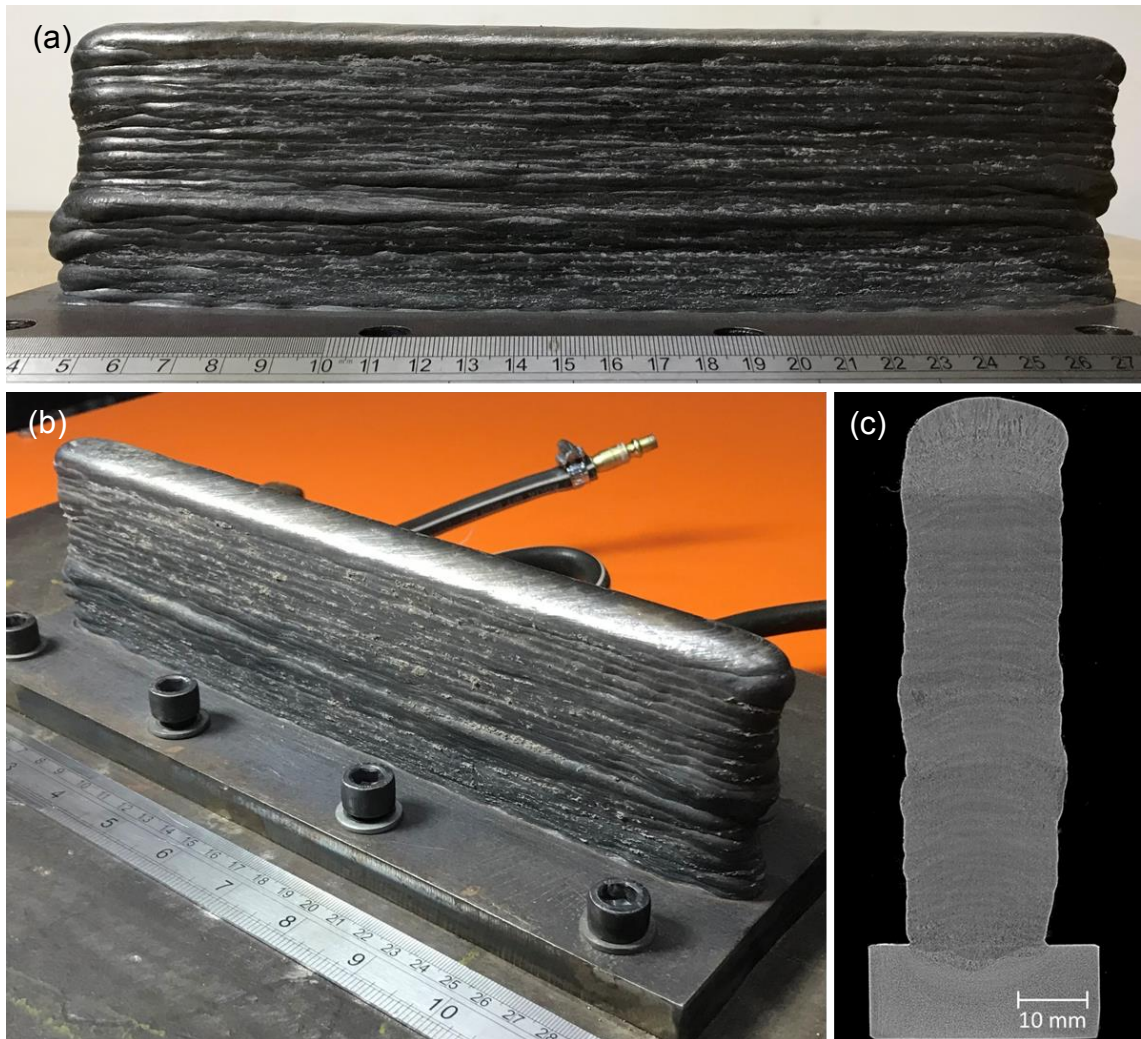


Figura 35. Aspecto da pré-forma produzida na prova de conceito (42 camadas):
(a) vista lateral, (b) vista isométrica e (c) seção transversal

Tabela 17. Parâmetros geométricos da pré-forma produzida na prova de conceito

Largura total	21,8 ± 0,2 mm
Largura efetiva	20,6 ± 0,2 mm
Ondulação superfície lateral	0,6 ± 0,1 mm
Altura total	73,2 mm
Altura da camada	1,7 mm

6.3.2. Composição química e microestrutura

Visto que o escoamento de calor é maior junto ao substrato e tende a ser reduzido à medida que o número de camadas e, conseqüentemente, a altura de pré-forma aumentam, levantou se a hipótese de que o volume de fluxo fundido e,

consequentemente, a composição química da camada poderiam variar ao longo da altura. Visando avaliar isso, a composição química da pré-forma foi medida na seção transversal em três altura diferentes. Mas conforme mostrado na Tabela 18, a composição química não se alterou significativamente ao longo da altura da pré-forma. Todavia, não se descarta que essa hipótese se mostre válida para o caso de um fluxo mais ativo, isto é, com mais elementos de liga.

Tabela 18. Composição química medida por GDS em diferentes alturas da pré-forma

Posição	C (%p)	Cr (%p)	Mo (%p)	Mn (%p)	Si (%p)
Base	0,06	2,20	0,91	0,87	0,22
Meia altura	0,06	2,20	0,91	0,88	0,23
Topo	0,05	2,23	0,91	0,87	0,22

Visando avaliar o efeito do histórico térmico experimentado pela pré-forma ao longo do tempo de fabricação sobre a microestrutura da mesma, avaliou se a microestrutura na seção transversal ao longo da altura, conforme mostrado na Figura 36. Vale mencionar que quando mais próximo do topo (última camada), menor a quantidade de ciclos térmicos e menor o tempo de exposição em elevada temperatura transcorridos no material naquela posição.

Com base nos diagramas de transformação sob resfriamento contínuo (TRC) levantados por Schönmaier et al. (2020) para soldagem de um aço similar com o processo SAW, pode ser que a microestrutura na região do topo da pré-forma (última camada) é predominantemente bainítica. Nas demais camadas observa-se um aumento na quantidade de ferrita em direção à base (primeira camada), ou seja, quanto maior a quantidade de ciclos térmico e o tempo de exposição em elevada temperatura experimentados, maior a quantidade de ferrita formada. A microestrutura na região da base se assemelha com a microestrutura de uma chapa recozida com composição química semelhante descrita por King (2005). Li et al. (2021b) também reporta uma variação significativa da microestrutura de um aço baixa liga devido aos múltiplos ciclos térmicos impostos pela abordagem de camadas da MADA.

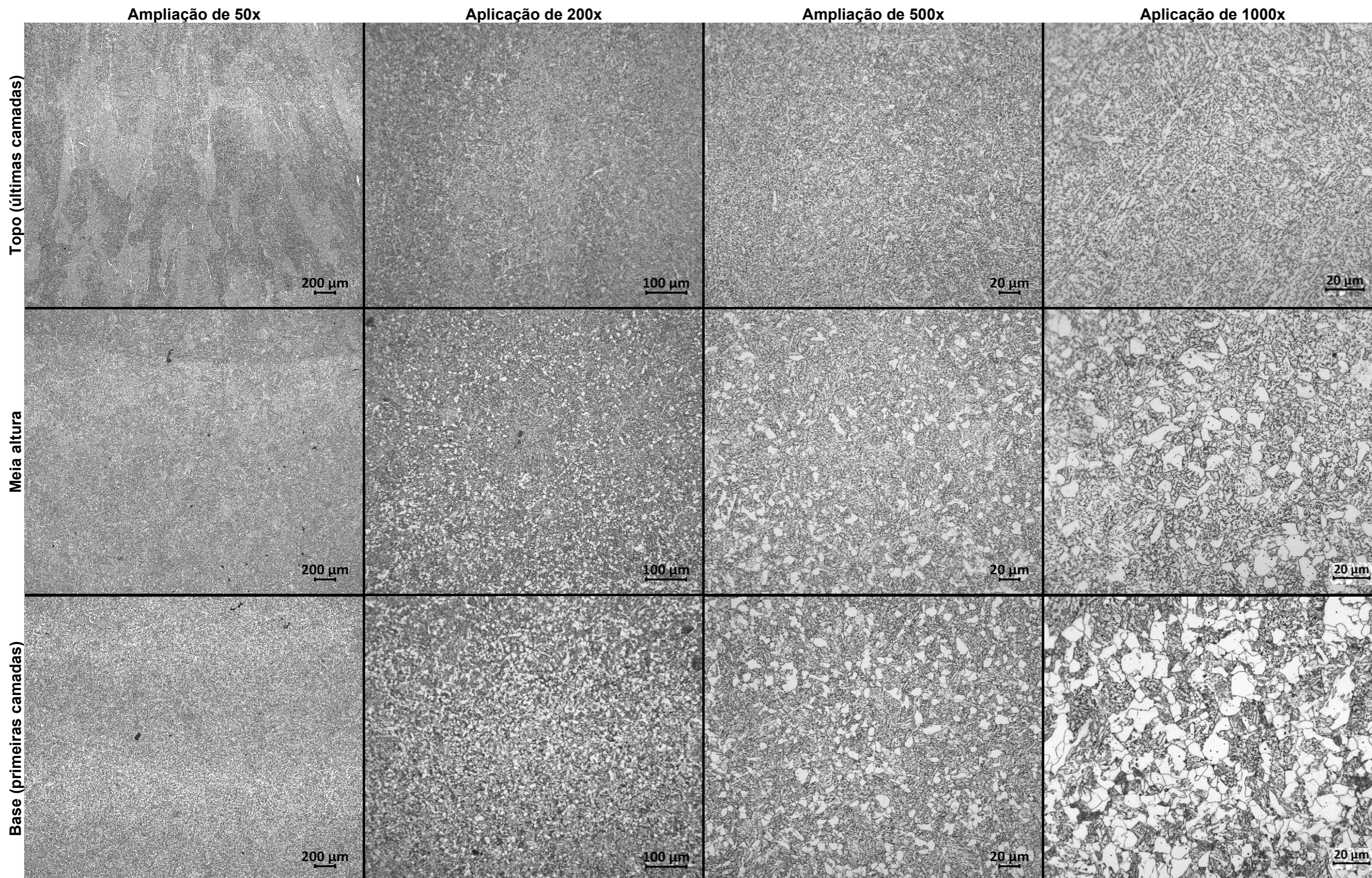


Figura 36. Microestruturas típicas da préforma analisadas por microscopia óptica ao longo da seção transversa. Ataque com Nital a 2%

6.3.3. Propriedades mecânicas

Perfis de propriedades mecânicas ao longo da altura da pré-forma são mostrados na Figura 37. A variação observada pode ser associada à variação da microestrutura. Os níveis médios dessas propriedades corroboram o que o fabricante garante para essa combinação de arame e fluxo (Tabela 9). A dureza segue o mesmo comportamento e a média é de 255 ± 13 HB.

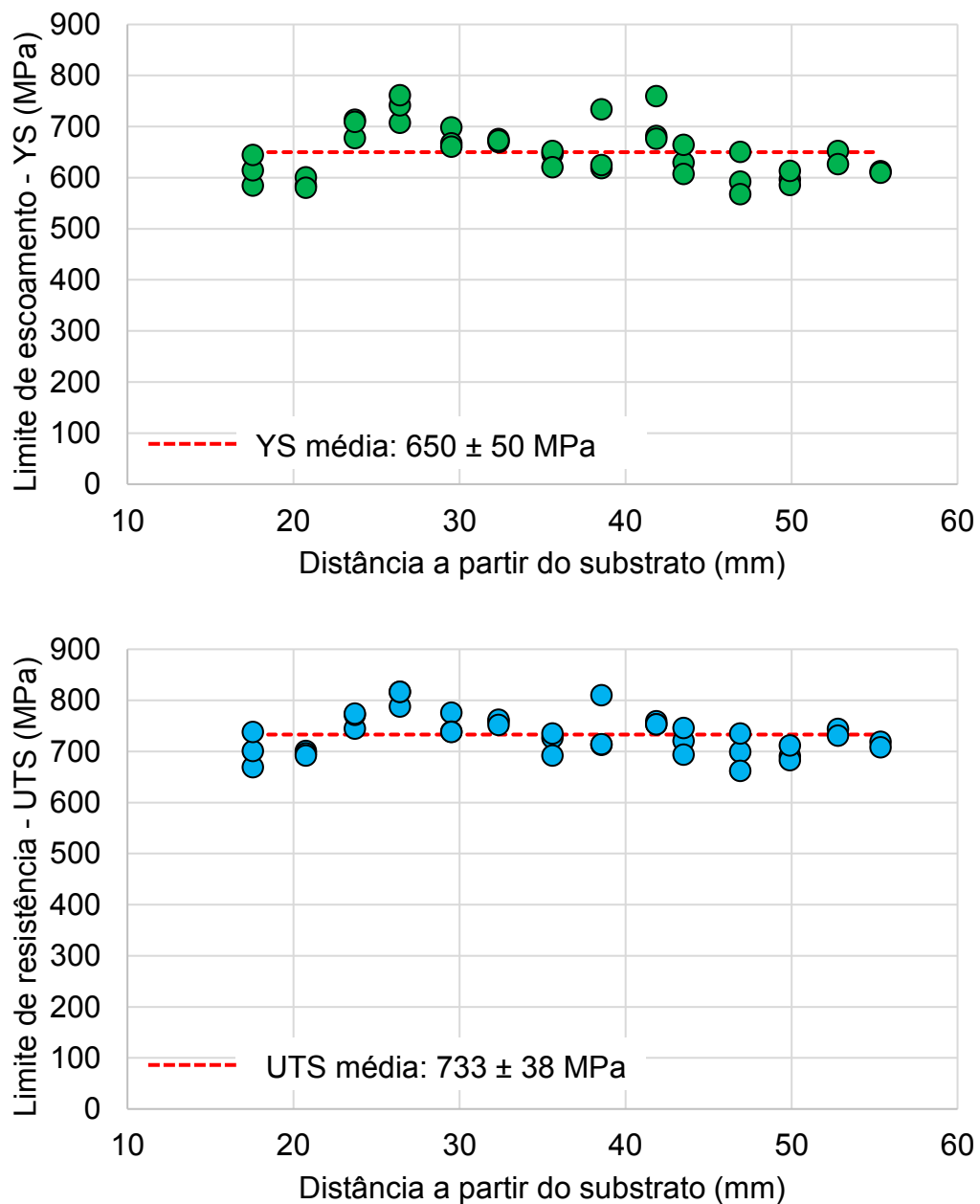


Figura 37. Perfil de propriedades mecânicas obtidas por macroindentação instrumentada: (a) limite de escalonamento – YS e (b) limite de resistência (UTS)

O pêndulo Charpy de 300 J utilizado nesse trabalho não foi capaz de romper as amostras a temperatura ambiente, conforme mostrado na Figura 38. Portanto, pode-se dizer que a resistência ao impacto das amostras extraídas da pré-forma foram superiores a 300 J. Li et al. (2021a) também reportaram um aumento significativo da resistência ao impacto de amostras de aços de baixa liga extraídas de pré-formas fabricadas por DED-SA. Esses autores explicam que o ciclo térmico da camada subsequente recristaliza a camada anterior, algo similar à zona afetada pelo calor (ZAC) de grãos refinados reportada na soldagem de aços por Kou (2002).

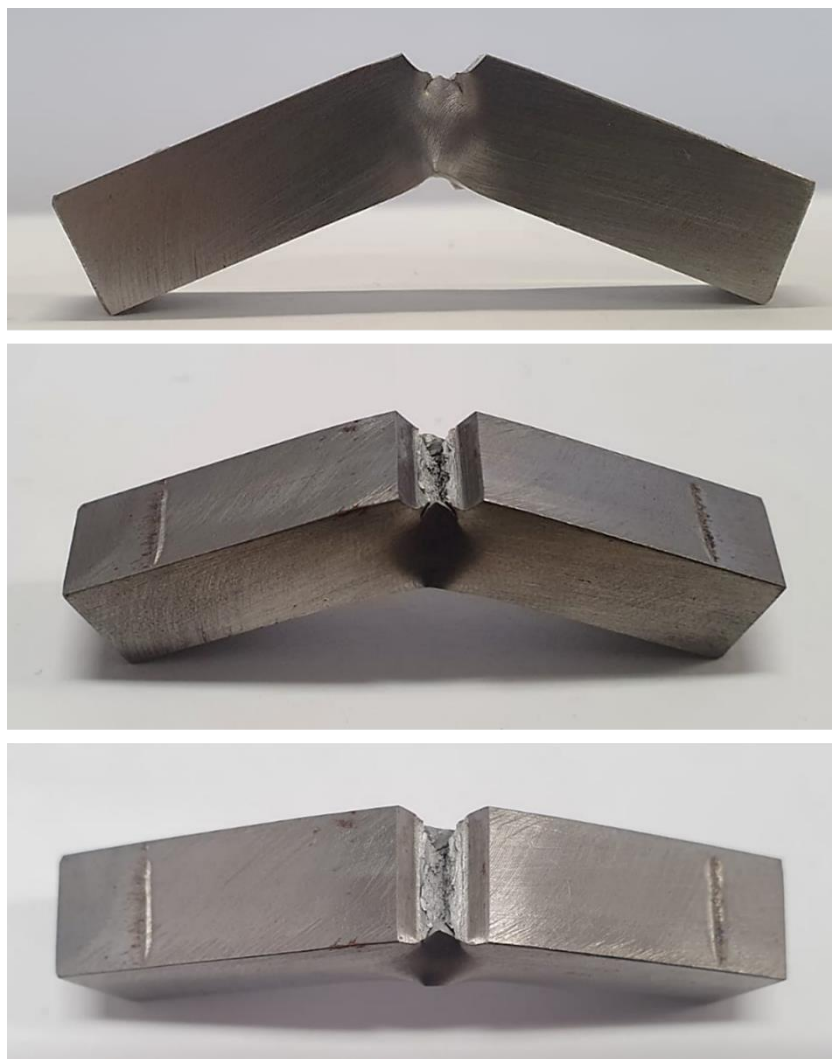


Figura 38. Corpo de prova não rompido submetido ao ensaio Charpy

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo provar o conceito de uma nova técnica para manufatura aditiva de metais denominada de manufatura aditiva por deposição a arco em leito de fluxo (MADA-LF). Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o conceito da MADA-LF foi satisfatoriamente provado. A técnica MADA-LF mostrou potencial para fabricação de peças grandes e com geometrias simples de forma rápida e economicamente eficiente, uma vez que pode se alcançar altas taxas de deposição com o processo SA e os seus consumíveis tendem a ser relativamente mais baratos. Além disso, destacam-se os seguintes pontos:

- Foi produzida uma pré-forma livre de defeitos e com características geométricas, microestruturais e de propriedades mecânicas adequadas;
- De forma inédita, foi descrito o fenômeno de travamento mecânico da escória na deposição de paredes simples; e
- A pré-forma apresentou uma resistência ao impacto muito superior ao esperado.

8. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Para avançar no desenvolvimento da MADA-LF e sanar algumas limitações do presente trabalho propõe-se o estudo dos seguintes aspectos em trabalhos futuros:

- Aumentar o grau de automação do sistema;
- Avaliar o efeito do tipo de fluxo sobre a geometria da camada; e
- Desenvolver solução para o travamento mecânico da escória.

REFERÊNCIAS

- A Hosseini, V., Högström, M., Hurtig, K., Valiente Bermejo, M.A., Stridh, L.E., Karlsson, L., 2019. Wire-arc additive manufacturing of a duplex stainless steel: thermal cycle analysis and microstructure characterization. *Weld. World* 63, 975–987. <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00735-y>
- ABM, 2020. Petrobras e Universidade Federal de Uberlândia produzem peça de aço impressa em 3D. <https://www.abmbrasil.com.br/por/noticia/petrobras-e-universidade-federal-de-uberlandia-produzem-peca-de-aco-impressa-em-3d>.
- Akbari, M., Kovacevic, R., 2018. An investigation on mechanical and microstructural properties of 316LSi parts fabricated by a robotized laser/wire direct metal deposition system. *Addit. Manuf.* 23, 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.031>
- Ali, Y., Henckell, P., Hildebrand, J., Reimann, J., Bergmann, J.P., 2019. Wire arc additive manufacturing of hot work tool steel with CMT process. *J. Mater. Process. Tech.* 269, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.034>
- Almeida, P.M.S., 2012. PROCESS CONTROL AND DEVELOPMENT IN WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING. Cranfield University.
- AMPOWER, 2019. Technology overview metal Additive Manufacturing [WWW Document]. MAP. URL <https://am-power.de/en/insights/metal-additive-manufacturing/>
- ARCSpecialities, 2020. Additive Manufacturing with Submerged Arc Welding [WWW Document]. Youtube. URL <https://www.youtube.com/watch?v=dqKpYRQoFWY&t=43s>
- ASM Handbook, 1993. WELDING, BRAZING, AND SOLDERING. ASM International.
- ASTM, 2016. ASTM F3187 - 16 - Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals. *ASTM Int.* 1–22. <https://doi.org/10.1520/F3187>
- Bambach, M., Sizova, I., Silze, F., Schnick, M., 2018. Comparison of laser metal deposition of Inconel 718 from powder, hot and cold wire. *Procedia CIRP* 74, 206–209. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.095>
- Böhler Voestalpine, 2019. Product catalogue [WWW Document]. URL <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/cs/app/uploads/sites/18/2019/03/Böhler-Welding-Produktkatalog-EN-2019-1.pdf>

- Borba, T.M.D., Oliveira, R.S., Gama, H.R., Caizer, M.F. de O., Turani, L. de O., 2017. Avaliação da soldabilidade do aço sincron em 10025-4 S355M aplicado na fabricação de torres eólicas com processo de soldagem de alta deposição. *Soldag. e Insp.* 22, 413–428. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2204.12>
- Brandi, H.T., Luckow, H., 1976. Method of making large structural one-piece parts of metal, particularly one-piece shafts. US3985995.
- Cardozo, E.P., Ríos, S., Ganguly, S., D'Oliveira, A.S.C.M., 2018. Correction to: Assessment of the effect of different forms of Inconel 625 alloy feedstock in Plasma Transferred Arc (PTA) additive manufacturing (*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2018), 98, 5-8, (1695-1705), 10.1007/s00170-. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 98, 1707. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2394-y>
- Choudhary, A., Kumar, M., Unune, D.R., 2019. Experimental investigation and optimization of weld bead characteristics during submerged arc welding of AISI 1023 steel. *Def. Technol.* 15, 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.08.004>
- Cunha, T.V. da, Ribeiro, H.O., 2018. Avaliação do Uso do Tecimento na Soldagem a Arco Submerso. *Soldag. Inspeção* 23, 73–82. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2301.08>
- Cunningham, C.R., Wikshåland, S., Xu, F., Kemakolam, N., Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S.T., 2017. Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing 11, 650–657. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.163>
- da Silva, L.J., Ferraresi, H.N., Araújo, D.B., Reis, R.P., Scotti, A., 2021. Effect of thermal management approaches on geometry and productivity of thin-walled structures of er 5356 built by wire + arc additive manufacturing. *Coatings* 11. <https://doi.org/10.3390/coatings11091141>
- Dalae, M.T., Gloor, L., Leinenbach, C., Wegener, K., 2020. Experimental and numerical study of the influence of induction heating process on build rates Induction Heating-assisted laser Direct Metal Deposition (IH-DMD). *Surf. Coatings Technol.* 384, 125275. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125275>
- Dass, A., Moridi, A., 2019. State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. *Coatings* 9, 1–26. <https://doi.org/10.3390/COATINGS9070418>
- Debroy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O.,

- Beese, A.M., Wilson-heid, A., De, A., Zhang, W., 2018. Progress in Materials Science Additive manufacturing of metallic components – Process , structure and properties. *Prog. Mater. Sci.* 92, 112–224.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., 2015. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 81, 465–481. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
- Ferrari, M., Neves, M.D.M. das, Panão, J.N., 2019. Análise das Propriedades Mecânicas de Juntas de Aço Carbono Estrutural Soldadas pelo Processo Arco Submerso com os Arcos Simples e Duplo (Tandem-Arc). *Soldag. Inspeção* 24, 1–11. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2304.07>
- Frazier, W.E., 2014. Metal Additive Manufacturing : A Review 23, 1917–1928.
<https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- GEFERTEC, 2021. The 3DMP® Process Chain [WWW Document]. URL
<https://www.gefertec.de/en/waam-technology/>
- Haggag, F.M., Nanstad, R.K., Hutton, J.T., Thomas, D.L., Swain, R.L., 1990. Use of automated ball indentation testing to measure flow properties and estimate fracture toughness in metallic materials. *ASTM Spec. Tech. Publ.* 188–208.
<https://doi.org/10.1520/stp25039s>
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C., 2016. Additive manufacturing of metals. *Acta Mater.* 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- ISO/ASTM 52900, 2015. Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. ISO/ASTM 52900. <https://doi.org/10.1520/F2792-12A.2>
- Ivántabernero, Paskual, A., Álvarez, P., Suárez, A., 2018. Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* 68, 358–362. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.095>
- Jafari, D., Vaneker, T.H.J., Gibson, I., 2021. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Mater. Des.* 202, 109471.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109471>
- Kellens, K., Mertens, R., Paraskevas, D., Dewulf, W., Duflou, J.R., 2017. Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes : Does AM contribute to a more sustainable way of part manufacturing ? *Procedia CIRP* 61, 582–587.

- <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.153>
- King, B., 2005. Welding and post weld heat treatment of 2.25%Cr-1%Mo steel. University of Wollongong.
- Kou, S., 2002. Welding Metallurgy, 2nd ed. Wiley, New Jersey.
- Lancaster, J.F., 1986. The Physics of Welding, 2nd ed. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/C2013-0-03805-4>
- LAPROSOLDA, 2021. Laboratório de processos de soldagem [WWW Document]. UFU-FEMEC. URL <http://www.femec.ufu.br/unidades/laboratorio/laboratorio-de-processos-de-soldagem>
- Li, K., Wu, Z., Zhu, Y., Liu, C., 2017. Metal transfer in submerged arc welding. J. Mater. Process. Technol. 244, 314–319.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.004>
- Li, Y., Wu, S., Li, H., Cheng, F., 2021a. Dramatic improvement of impact toughness for the fabricating of low-carbon steel components via submerged arc additive manufacturing. Mater. Lett. 283, 128780.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128780>
- Li, Y., Wu, S., Li, H., Dong, Y., Cheng, F., 2021b. Submerged arc additive manufacturing (SAAM) of low-carbon steel: Effect of in-situ intrinsic heat treatment (IHT) on microstructure and mechanical properties. Addit. Manuf. 46, 102124. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102124>
- Li, Y., Wu, S., Lv, X., Feng, J., Qu, H., Cheng, F., 2021c. Study on the influence of interlayer temperature on microstructure and mechanical properties of submerged arc additively manufactured low-carbon steel and its in-situ toughening mechanism. J. Manuf. Process. 71, 356–373.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.016>
- Li, Z., Cui, Y., Wang, Jie, Liu, C., Wang, Jiachen, Xu, T., Lu, T., Zhang, H., Lu, J., Ma, S., Fan, H., Tang, S., 2019. Characterization of microstructure and mechanical properties of stellite 6 part fabricated by wire arc additive manufacturing. Metals (Basel). 9. <https://doi.org/10.3390/met9040474>
- LTAD, 2022. Laboratório de tecnologia em atrito e desgaste [WWW Document]. URL <http://www.ltad.mecanica.ufu.br/>
- Machado, M.V.R., 2011. Sistema embarcado sem fio para monitoramento de sinais em soldagem a arco elétrico com abordagem tecnológica [WWW Document]. URL <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14897>

- Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q., 2017. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia.
- Martina, F., 2020. A comparison framework to support the selection of the best additive manufacturing process for specific aerospace applications manufacturing process for specific aerospace applications. <https://doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2020.10019230>
- Martina, F., Ding, J., Williams, S., Caballero, A., Pardal, G., Quintino, L., 2019. Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel. *Addit. Manuf.* 25, 545–550. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.022>
- Mendez, P.F., Goett, G., Guest, S.D., 2015. High-speed video of metal transfer in submerged arc welding. *Weld. J.* 94, 326s-333s.
- Mercado Rojas, J.G., Wolfe, T., Fleck, B.A., Qureshi, A.J., 2018. Plasma transferred arc additive manufacturing of Nickel metal matrix composites. *Manuf. Lett.* 18, 31–34. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.10.001>
- Miller, 2021. Submerged Arc [WWW Document]. URL <https://www.millerwelds.com/equipment/welders/submerged-arc>
- Minitab, 2022. O que são experimentos de superfície de resposta, experimentos centrais compostos e experimentos Box-Behnken? [WWW Document]. URL <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/>
- Nicolosi, E., 2015. Avaliação de métodos analíticos para determinação de propriedades mecânicas de aços via ensaio de macroindentação instrumentada. Universidade Federal de Uberlândia. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2015.113>
- Osorio, A.G., Fernandes, K.B., Salomão, L., Mumbach, E., de Araújo, D.B., Souza, D., 2016. Estudo da transferência de elementos químicos do fluxo para o metal fundido na soldagem a Arco Submerso. *Rev. Matéria* 21, 510–524. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160002.0048>
- Pan, Z., Ding, D., Wu, B., Cuiuri, D., Li, H., Norrish, J., 2017. Arc Welding Processes for Additive Manufacturing : A Review. *Trans. Intell. Weld. Manuf.* 13–20. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-5355-9_1
- Rajeev, G.P., Rahul, M.R., Kamaraj, M., Bakshi, S.R., 2020. Microstructure and High Temperature Mechanical Properties of Wire Arc Additively Deposited Stellite 6

- Alloy. SSRN Electron. J. 400. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3531316>
- Reis, R.P., Scotti, A., 2007. FUNDAMENTOS E PRÁTICA DA SOLDAGEM A PLASMA, 1st ed. Artliber.
- Rodriguez, N., Vázquez, L., Huarte, I., Arruti, E., Taberner, I., Alvarez, P., 2018. Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel. *Weld. World* 62, 1083–1096. <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0606-6>
- RPM Innovations, 2021. 222XR Standard System [WWW Document]. URL <https://www.rpm-innovations.com/laser-deposition-systems-222xr.html>
- Schönmaier, H., Loder, B., Fischer, T., Grimm, F., Krein, R., Schmitz-Niederer, M., Schnitzer, R., 2020. Continuous Cooling Transformation Diagrams of 2.25Cr-1Mo-0.25V Submerged-Arc Weld Metal and Base Metal. *Metals (Basel)*. 10, 1055. <https://doi.org/10.3390/met10081055>
- Sciaky, 2021. What is Directed Energy Deposition (DED) 3D Printing? [WWW Document]. URL <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/what-is-ded-3d-printing>
- Scotti, A., Ponomarev, V., 2014. Soldagem MIG/MAG, 2ª EDIÇÃO. ed. Artliber.
- Scotti, F.M., 2021. Manufatura aditiva por deposição a arco de paredes finas de aço inoxidável super duplex com resfriamento ativo por quase-imersão. Universidade Federal de Uberlândia.
- Sengupta, V., Havrylov, D., Mendez, P.F., 2019. Physical phenomena in the weld zone of submerged arc welding - A review. *Weld. J.* 98, 283S-313S.
- Silva, A., Bracarense, A.Q., 2015. Soldagem com Arco Submerso Utilizando Fluxo Aglomerado com Polímero (Submerged Arc Welding Using Flux with Polymer Binder). XLI CONSOLDA – Congr. Nac. Soldag. 10.
- Silva, M.M. da, Batista, V.R., Maciel, T.M., dos Santos, M.A., Brasileiro, T.L., 2016. Otimização de parâmetros do processo de soldagem arco submerso para revestimentos anticorrosivos. *Soldag. e Insp.* 21, 115–124. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2101.11>
- Thomas-Seale, L.E.J., Kirkman-brown, J.C., Attallah, M.M., Espino, D.M., Shepherd, D.E.T., 2018. International Journal of Production Economics The barriers to the progression of additive manufacture : Perspectives from UK industry. *Int. J. Prod. Econ.* 198, 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.02.003>
- Toyserkani, E., Dyuti, S., Ibhaddode, O.O., Liravi, F., Russo, P., Taherkhani, K., 2022.

- Metal additive manufacturing, 1st ed. Wiley, NJ.
- TWI, 2020. TWI [WWW Document]. URL <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/submerged-arc-welding-process-005>
- Ujii, A., 1967. Method of constructing substantially circular cross-section vessel by welding. US3558846A.
- Weglowski, M., Błacha, S., Pilarczyk, J., Dutkiewicz, J., Rogal, L., 2018. Electron beam additive manufacturing with wire - Analysis of the process. AIP Conf. Proc. 1960. <https://doi.org/10.1063/1.5035007>
- Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P., 2016. Wire + Arc Additive Manufacturing. Mater. Sci. Technol. 32, 641–647. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>
- Xu, X., Ding, J., Ganguly, S., Diao, C., Williams, S., 2018. Oxide accumulation effects on wire + arc layer-by-layer additive manufacture process. J. Mater. Process. Technol. 252, 739–750. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.030>
- Yangfan, W., Xizhang, C., Chuanchu, S., 2019. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing. Surf. Coatings Technol. 374, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.079>
- Zhong, C., Pirch, N., Gasser, A., Poprawe, R., Schleifenbaum, J.H., 2017. The influence of the powder stream on high-deposition-rate laser metal deposition with inconel 718. Metals (Basel). 7. <https://doi.org/10.3390/met7100443>
- Ziaee, M., Crane, N.B., 2019. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. Addit. Manuf. 28, 781–801. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>
- Zimmermann, J.I., Bond, D., 2016. Utilização do processo de soldagem arco submerso para manufatura aditiva. Semin. Iniciação Científica 2.