

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

Escola de Engenharia de São Carlos

# Estudo da aplicabilidade de gas tungsten arc welding como fonte de energia para os processos directed energy deposition e powder bed fusion de manufatura aditiva

Alcindo Fernando Moreira

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto, Materiais e Manufatura

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Alcindo Fernando Moreira**

**Estudo da aplicabilidade de gas tungsten arc welding como fonte de energia  
para os processos directed energy deposition e powder bed fusion de  
manufatura aditiva**

**São Carlos**

**2024**



**Alcindo Fernando Moreira**

**Estudo da aplicabilidade de gas tungsten arc welding como fonte de energia  
para os processos directed energy deposition e powder bed fusion de  
manufatura aditiva**

**Versão Corrigida**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto, Materiais e Manufatura

Orientador: Prof. Tit. Reginaldo Teixeira Coelho

**São Carlos**

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M835e           Moreira, Alcindo Fernando  
                  Estudo da aplicabilidade de gas tungsten arc  
                  welding como fonte de energia para os processos  
                  directed energy deposition e powder bed fusion de  
                  manufatura aditiva / Alcindo Fernando Moreira;  
                  orientador Reginaldo Teixeira Coelho. São Carlos, 2024.

                  Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em  
                  Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto,  
                  Materiais e Manufatura -- Escola de Engenharia de São  
                  Carlos da Universidade de São Paulo, 2024.

                  1. GTAW. 2. DED. 3. PBF. 4. WAAM. 5. MA. 6.  
                  manufatura híbrida. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ALCINDO FERNANDO MOREIRA**.

Título da tese: "Estudo da aplicabilidade de gas tungsten arc welding como fonte de energia para os processos directed energy deposition e powder bed fusion de manufatura aditiva".

Data da defesa: 05/04/2024.

### Comissão Julgadora

### Resultado

**Prof Titular Reginaldo Teixeira Coelho**  
(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP)

APROVADO

**Prof. Doutor Vicente Afonso Ventrella**

(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP)

APROVADO

**Prof. Doutor Roberto Ramon Mendonça**

(Instituto Federal de São Paulo/IFSP)

APROVADO

**Prof. Associado Alessandro Roger Rodrigues**

(Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP)

Aprovado

**Prof. Doutor Kahl Dick Zilnyk**

(Instituto Tecnológico de Aeronáutica/ITA)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:

Prof. Associado **Adriano Almeida Gonçalves Siqueira**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e Nossa Senhora Aparecida.

À minha família.

Ao professor Tit. Reginaldo Teixeira Coelho pela orientação e parceria.

A todos os professores que participarem da minha formação.

Ao IFSP pelo afastamento concedido para conclusão do doutorado.

À USP pela disponibilização da infraestrutura para execução do projeto.





## RESUMO

MOREIRA, A. F. **Estudo da aplicabilidade de gas tungsten arc welding como fonte de energia para os processos directed energy deposition e powder bed fusion de manufatura aditiva**. 2024. 136p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Processos de Manufatura Aditiva (MA) estão ganhando visibilidade por produzir peças complexas mais rapidamente e com menor descarte de material. Contudo, o elevado custo dos equipamentos, a limitação dimensional e a baixa eficiência energética de alguns processos são aspectos a serem melhorados. O presente trabalho avaliou a combinação do arco elétrico *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) com processos *Powder Bed Fusion* (PBF) e *Directed Energy Deposition* (DED). A escolha de pó metálico como metal de adição foi decorrente da possibilidade de se gerar depósitos de diferentes ligas metálicas com proporções variadas. Neste estudo, pó metálico de aço AISI H-13 foi depositado sobre um substrato a base de aço AISI 1020. Foram gerados depósitos em passes simples, empilhados, lado a lado e multicamadas. Dimensões, geometria, acabamento, repetibilidade, microestrutura e dureza foram analisados. Os resultados obtidos indicaram que, para produção de peças metálicas por MA, o uso de GTAW combinado ao processo DED se mostrou mais adequado que o combinado ao processo PBF devido a menor incidência de “ballings”, menores desvios de arco, melhor uniformidade dimensional e geométrica e, dessa forma, maior previsibilidade para o planejamento de produção. Características relacionadas à microestrutura do depósito tem estreita relação com a diluição e ciclos térmicos que ocorreram durante a produção. Regiões com baixa diluição e sujeitas a uma menor quantidade de ciclos térmicos, como aquelas nas proximidades do topo dos depósitos para passes empilhados obtidos com os aparatos 1 e 2, apresentaram durezas de 679HV e 550HV, respectivamente. Depósitos com elevada diluição e grande quantidade de ciclos térmicos, como é o caso do depósito multicamadas obtido com o aparato 4, o qual apresentou dureza próxima ao topo de 255HV, indicam que a dureza foi afetada pela combinação entre diluição e ciclos térmicos. Por fim, foi identificada a potencialidade para o desenvolvimento de um equipamento híbrido de produção de peças metálicas por MA, onde o uso de GTAW combinado com o processo DED estaria associado a processos subtrativos na mesma célula de fabricação (manufatura híbrida).

Palavras-chave: GTAW, PBF, DED, WAAM, MA, manufatura híbrida.



## ABSTRACT

MOREIRA, A. F. **A study on the applicability of gas tungsten arc welding as an energy source for directed energy deposition and powder bed fusion processes in additive manufacturing.** 2024. 136p. Thesis (Doctor) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Additive Manufacturing (AM) processes are gaining visibility due to factors such as the possibility of producing complex parts faster and with less waste material. However, the high cost of the devices, the dimensional limitation of the parts and the low energy efficiency of some of the current processes for the production of metal parts are still some of the obstacles to be improved. The present study evaluated the combination of the Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) electric arc with Powder Bed Fusion (PBF) and Directed Energy Deposition (DED) process. The choice of metallic powder as feedstock was due to the possibility of generating deposits of varied metallic alloys in different proportions. In this study, metallic powder of AISI H-13 steel was deposited on an AISI 1020 steel substrate. Deposits were generated in single, stacking, side by side and multilayer tracks. Dimensions, geometry, surface finish, repeatability, microstructure and hardness were analyzed. The results indicated that, for the production of metallic parts by AM, the use of the GTAW combined with DED proved to be more suitable than that combined with PBF due the lower incidence of “ballings”, smaller arc deviations, better dimensional and geometrical uniformity, and, thus, greater predictability for production planning. Characteristics related to the microstructure of the deposit are linked with dilution and thermal cycles occurred during production. Regions with low dilution and subject to a smaller number of thermal cycles, such as those close the top of the deposits for stacking tracks obtained with apparatus 1 and 2, presented hardnesses of 679HV and 550HV, respectively. Deposits with high dilution and a large number of thermal cycles, as is the case of the multilayer deposit obtained with apparatus 4, which presented a hardness close to the top of 255HV, indicate that the hardness was affected by the combination of dilution and thermal cycles. Thus, the potential for developing a hybrid equipment for the production of metallic parts by AM was observed, where the use of the GTAW combined with DED should be associated with subtractive processes in the same manufacturing cell (hybrid manufacturing).

Keywords: GTAW, PBF, DED, WAAM, MA, hybrid manufacturing.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Categorias de processos de MA segundo a norma ASTM F 2792-12a (2013)	31
Figura 2 – Geração de camadas no processo PBF. a) LPBF e b) EBPBF.....	32
Figura 3 – Desenho esquemático de um alimentador de pó metálico fluidizado tipo PF..	33
Figura 4 – Sistema PF com disco rotativo utilizado na máquina de MA BeAM modelo 250.....	33
Figura 5 – Figura 05 – Sistema de fornecimento de pó tipo PF aplicado a um processo DED cuja fonte de energia de fusão é um feixe laser.....	34
Figura 6 - a) Bocal coaxial e b) bocal não coaxial ( <i>single nozzle</i> ).....	35
Figura 7 – a) Vista inferior do bocal não coaxial com 4 saídas de pó espaçadas a 90° em relação ao feixe de laser e b) Interação entre o feixe de laser e o pó ejetado...	35
Figura 8 – Processo DED com fonte de energia térmica de fusão por feixe de elétrons e alimentação por arame.....	36
Figura 9 - Energias de processamento e não processamento para o processo SLS.....	39
Figura 10 - Variação de parâmetros dimensionais do depósito em função da potência do laser.....	39
Figura 11 - Desenho esquemático de um equipamento de MA que utiliza o processo PBF e energia de fusão por feixe de elétrons.....	41
Figura 12 – EBAM desenvolvido pela empresa SCIAKY Inc.....	42
Figura 13 – Jarro obtido por Ralph Baker em 1920 pela deposição, camada sobre camada, utilizando arame metálico e arco elétrico.....	42
Figura 14 – Peça fabricada a partir de um equipamento de soldagem GMAW desenvolvido pela empresa Fronius e que utiliza a técnica de transferência CMT.....	43
Figura 15 - Sistema WAAM típico.....	44
Figura 16 – Exemplos de processos WAAM baseados em: a) GMAW, b) GTAW e c) PAW.....	45
Figura 17 - a) Taxa de deposição e b) diâmetro da poça de fusão em função da altura da camada para vários processos de manufatura aditiva.....	46
Figura 18 – Processo de produção de pás de turbina aeronáutica a partir de um leito de pó sobre esteira transportadora.....	48
Figura 19 – Bocal GTAW modificado.....	48
Figura 20 – Método de manufatura aditiva para ligas de alumínio que utiliza como fonte de energia feixe laser e arco elétrico GTAW para a fusão de arame.....	49
Figura 21 – Equipamento de MA baseado no processo GTAW com adição de arame com pós processamento mecânico (martelamento) do depósito.....	49
Figura 22 – Sistema de manufatura aditiva de ligas de Titânio baseado no arco elétrico GTAW.....	50

Figura 23 – Equipamento de MA baseado no arco GTAW combinado à alimentação por arames múltiplos.....	50
Figura 24 – Equipamento baseado no processo TopTIG com dupla alimentação de arame para geração de compostos intermetálicos a base de TiAl.....	51
Figura 25 – Processo de MA que utiliza o processo GTAW para fusão de arame a base de Titânio e adição de Boro em pó via bocal.....	51
Figura 26 - WAAM baseado no processo GMAW com dupla alimentação de arame.....	52
Figura 27 – Desenho esquemático de uma tocha a arco plasma.....	53
Figura 28 - Esquema típico de um processo de MA por fusão de arame sólido a plasma. 54	54
Figura 29 - Comparação das características do arco entre os processos GTAW e PAW..	54
Figura 30 – Comparação entre as larguras do arco entre os processos GTAW e PAW....	55
Figura 31 – Vista em corte de uma tocha PAW mostrando os dutos internos de gás de proteção e de gás de plasma além de outras características.....	55
Figura 32 – Tocha com arco transferido e não transferido no processo PAW.....	56
Figura 33 – Bocal da tocha do dispositivo EuTronic® GAP 3511 DC Synergic.....	57
Figura 34 - Peças produzidas por Hoefler, Haelsing e Mayr (2018) com os processos: a) 3DPMD e b) CMT.....	58
Figura 35 – Representação simplificada de um passe sendo formado utilizando-se o processo GTAW.....	59
Figura 36 – Polaridades do eletrodo e características do cordão (passe).....	61
Figura 37 – Comparação entre o processo de soldagem GTAW (TIG) automatizado e o processo TOPTIG.....	64
Figura 38 – Processo TOPTIG em operação.....	65
Figura 39 a) Vista em corte e b) Esboço da tocha com alguns parâmetros dimensionais utilizados no processo TOPTIG.....	65
Figura 40 – Alimentador de arame utilizado por Geng et al. (2017) para WAAM baseado no processo GTAW.....	66
Figura 41 - Inclinação do arame ( $\theta$ ), distância da ponta do arame à poça de fusão ( $h$ ), variação da distância da ponta do arame à poça de fusão ( $\Delta h$ ) e distância da ponta do arame à ponta do eletrodo ( $h'$ ).....	66
Figura 42 – Fluxo de calor a partir da projeção do ponto central do eletrodo sobre o substrato.....	67
Figura 43 – Projeção da área com capacidade de fusão para o arco elétrico GTAW obtida teoricamente por Geng et al (2017).....	68
Figura 44 – Primeiro protótipo desenvolvido por Moselli (2013) para revestimento superficial.....	69
Figura 45 – Deposição com o primeiro protótipo desenvolvido por Moselli (2013).....	70
Figura 46 - ROMI D HYBRID modelo D-800.....	72
Figura 47 - Componentes básicos da linha ROMI D HYBRID.....	73

Figura 48 – Esquemático da operação de um cabeçote laser.....	73
Figura 49 – Sistema de movimentação da tocha, estação de soldagem GTAW e sistema de coordenadas comuns a todos os aparatos.....	76
Figura 50 – Componentes do sistema de manipulação de pó: a) Sistema alimentador de pó, b) Sistema nivelador de pó e c) Base fixa.....	78
Figura 51 – Principais componentes do Aparato 1.....	79
Figura 52– Aparato 1 como construído.....	79
Figura 53 – Principais parâmetros de posicionamento para o Aparato 1.....	80
Figura 54 – Acúmulo de pó na face superior do substrato.....	81
Figura 55 – Nivelamento da camada de pó.....	81
Figura 56 – Sentidos de alimentação e de nivelamento/fusão do pó metálico.....	82
Figura 57 – Base fixa.....	82
Figura 58 – a) Sistema alimentador de pó e b) Base móvel.....	83
Figura 59 – Principais componentes do Aparato 2.....	84
Figura 60 – Principais parâmetros de posicionamento para o Aparato .....	85
Figura 61 – Alimentação de pó.....	85
Figura 62 – Nivelamento da camada de pó seguido de fusão seletiva.....	86
Figura 63 – Sentidos de alimentação e de planificação/fusão do pó metálico.....	86
Figura 64 – a) Sistema alimentador com dosagem de pó por rosca transportadora e b) Sistema removedor de excesso de pó.....	88
Figura 65 – Principais componentes do Aparato 3.....	89
Figura 66 – Aparato 3 como construído.....	89
Figura 67 – Principais parâmetros de posicionamento para: a) Sistema alimentador de pó e b) Sistema removedor de excesso de pó.....	90
Figura 68 – Sentidos de alimentação e fusão do pó metálico.....	91
Figura 69 – Sistema alimentador com dosagem de pó por vibração mecânica.....	92
Figura 70 – Principais componentes do Aparato 4.....	94
Figura 71 – Aparato 4 como construído.....	94
Figura 72 – Principais parâmetros de posicionamento para o sistema alimentador de pó por vibração mecânica.....	95
Figura 73 - Comparação da fusão autógena com a fusão sobre uma camada de pó metálico com 1mm de espessura.....	105
Figura 74 – Condição do passe após desbaste na região depositada.....	106
Figura 75 - CDP's de números 1 ao 9, partindo da esquerda para a direita, após deposição em passe único.....	107
Figura 76 – a) altura e b) largura dos depósitos em função da corrente elétrica para cada velocidade de deslocamento da tocha.....	107



Figura 77 – Fases do processo de deposição do CDPP-01: a) Finalização de um passe e b) Depósito concluído.....	109
Figura 78 – Corte transversal do CDPP-01. Ataque: Nital 2%.....	110
Figura 79 – Valores de dureza para o CDPP-01 medidos na linha de centro do depósito desde o substrato até um recuo de 1mm do topo do depósito, com espaçamento de 1mm entre medidas.....	110
Figura 80 – Problemas identificados durante depósitos com o Aparato 1: a) <i>Ballings</i> e b) Perda de planicidade.....	111
Figura 81 – Parcela do CDPP-01 após processo de fresamento.....	112
Figura 82 – Fases do processo de deposição do CDPP-02: a) Finalização de um passe e b) depósito concluído.....	112
Figura 83 – Secções transversais do CDPP-02 a distâncias de: a) 12mm, b) 24mm, c) 36mm e d) 48mm em relação ao ponto de abertura do arco no sentido positivo do eixo (z). Ataque: Nital 5%.....	113
Figura 84 – a) Perfil de dureza tomado na linha de centro da secção d) do CDPP-02 com início no substrato até um recuo de 0,0635mm do topo da parede e b) Esquema.....	114
Figura 85 – Depósitos utilizando o Aparato 3: a) passe único e b) lado a lado.....	116
Figura 86 - Depósitos em passe único, empilhados e lado a lado para corrente de 32A...	117
Figura 87 Secções transversais a 15mm do ponto de abertura do arco para depósitos em: a) passe único, b) passes empilhados e c) passes lado a lado. Corrente: 32A. Ataque:Nital 2%.....	117
Figura 88 Valores médios de altura, largura, penetração e diluição em função da corrente para: a) passe único, b) passes empilhados e c) passes lado a lado.....	118
Figura 89- Perfis de dureza Vickers para passe único sob diferentes correntes. a) 28A, b) 30A, c) 32A e d) Esquema de medição.....	120
Figura 90- Perfis de dureza Vickers para passes empilhados sob diferentes correntes. a) 28A, b) 30A, c) 32A e d) Esquema de medição.....	121
Figura 91- Perfis de dureza Vickers para passes lado a lado sob diferentes correntes. a) 28A, b) 30A, c) 32A e d) Esquema de medição.....	121
Figura 92 – Desvio do arco elétrico.....	124
Figura 93 - a) Vista de topo e b) Vista lateral esquerda de um depósito contendo 10 camadas sobrepostas a 90°, onde cada camada foi formada por 10 passes lado a lado..	125
Figura 94 - Tocha de soldagem após a execução do CDPPR-01.....	125
Figura 95 Secção transversal do CDPPR-1. Ataque Nital 5%.....	126
Figura 96 – a) Perfil de dureza Vickers do CDPPR-01 e b) Esquema de medição.....	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais processos de MA disponíveis atualmente e suas características principais.....	30
Tabela 2 – Terminologias empregadas em MA e respectivas definições.....	30
Tabela 3 – Fontes de energia térmica, materiais de adição e equipamentos que utilizam os processos PBF e DED.....	36
Tabela 4 - Parâmetros GTAW aplicáveis para a soldagem de aços com baixo teor de carbono.....	60
Tabela 5 - Composição química, nomenclatura e aplicação de alguns eletrodos GTAW.	61
Tabela 6 – Correntes de soldagem em função do diâmetro do eletrodo, composição química e polaridade para o processo GTAW.....	62
Tabela 7 – Rendimento térmico de alguns processos de soldagem.....	63
Tabela 8 – Parâmetros de processo comuns a todos os ensaios realizados.....	95
Tabela 9 – Composição química do material do substrato – AISI 1020.....	95
Tabela 10 – Composição química do metal de adição AISI – H13.....	96
Tabela 11 – Parâmetros específicos de processo utilizados para ensaios iniciais com o Aparato 1.....	97
Tabela 12 - Parâmetros constantes utilizados para a deposição dos 9 CDP's em passe único.....	97
Tabela 13- Parâmetros variáveis utilizados para a deposição dos 9 CDP's em passe único.....	98
Tabela 14 - Parâmetros utilizados para a deposição do CDPP-01.....	98
Tabela 15 - Parâmetros utilizados para a deposição do CDPP-02.....	99
Tabela 16 - Parâmetros utilizados para a deposição de passes único e lado a lado com o Aparato 3.....	100
Tabela 17 – Vazão mássica de pó obtidas com o sistema de dosagem de pó por vibração mecânica.....	101
Tabela 18 – Identificação dos CDP's em função do tipo de depósito e corrente.....	102
Tabela 19 Parâmetros constantes para os depósitos em passe único, empilhados e lado a lado com correntes de 28A, 30A e 32A.....	102
Tabela 20 – Parâmetros de deposição do CDPPR-01.....	103
Tabela 21 - Largura e altura dos 9 depósitos em passe único utilizando o Aparato 1.....	107
Tabela 22 – Valores médios, e respectivos desvios padrão, de largura e altura para os 9 depósitos em passe único.....	108
Tabela 23 – Comparativo das médias de largura e altura de depósitos em passe único entre Rodriguez et al (2018), utilizando os processos CMT e TOPTIG, e os obtidos no presente trabalho.....	108

Tabela 24 - Altura e largura máximas do CDPP-01 a cada 5mm do ponto de abertura do arco.....	109
Tabela 25 – Valores máximos de altura (H), penetração (D) e largura (W) para as secções a), b), c) e d) do CDPP-02.....	113
Tabela 26 – Média simples dos valores de altura, largura e penetração considerando as quatro secções do CDPP-02.....	114
Tabela 27 – Valores médios de diluição e dureza Vickers para secções à 15mm do ponto de abertura do arco em função do tipo de depósito considerando todas as correntes.....	122
Tabela 28 – Valores máximos de altura, largura, penetração e diluição para o CDPPR-01.....	126

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	–	<i>Alternate Current</i>
ACDC	–	<i>Alternate Current &amp; Direct Current</i>
AISI	–	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AM	–	<i>Additive Manufacturing</i>
ASTM	–	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	–	<i>American Welding Society</i>
CA	–	Corrente alternada
CC	–	Corrente contínua
CCW	–	<i>Counter clockwise</i>
CDP	–	Corpo de prova
CDPP	–	Corpo de prova parede
CDPPR	–	Corpo de Prova Prismático
CMT	–	<i>Cold Metal Transfer</i>
CNC	–	Controle Numérico Computadorizado
CW	–	<i>Clockwise</i>
DC	–	<i>Direct Current</i>
DED	–	<i>Directed Energy Deposition</i>
DE-GMAW	–	<i>Double-Electrode Gas Metal Arc Welding</i>
DMD	–	<i>Direct Metal Deposition</i>
DMLS	–	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
EBF <sup>3</sup>	–	<i>Electron Beam Freeform Fabrication</i>
EDS	–	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
FGM	–	<i>Functionally Graded Materials</i>
EBAM	–	<i>Electron Beam Additive Manufacturing</i>
EBM	–	Electron Beam Melting
EBPBF	–	<i>Electron Beam Powder Bed Fusion</i>
ER	–	<i>Electrode Rod</i>
EWCe-2	–	Tungstênio com (1,8 – 2,2%) de Cério
EWP	–	Eletrodo com 99,5% de Tungstênio

EWTh-2	–	Tungstênio com (1,7 – 2,2%) de Tório
EWZr-1	–	Tungstênio com (0,15 – 0,40%) de Zircônio
<i>FDM</i>	–	<i>Fused Deposition Modeling</i>
<i>GMAW</i>	–	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
<i>GTAW</i>	–	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
<i>H-13</i>	–	<i>Hot Work Tool Steel</i>
<i>IRISS</i>	–	<i>Interlayer Real-time Imaging &amp; Sensing System</i>
<i>ISO</i>	–	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>LAM</i>	–	<i>Laser Additively Manufactured</i>
<i>LBMD</i>	–	<i>Laser Based Metal Deposition</i>
<i>LBW</i>	–	<i>Laser Beam Welding</i>
<i>LENS</i>	–	<i>Engineered Net Shaping Laser</i>
<i>LHW</i>	–	<i>Laser Hot Wire</i>
<i>LMD</i>	–	<i>Laser Metal Deposition</i>
<i>LOM</i>	–	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
<i>LPBF</i>	–	<i>Laser Powder Bed Fusion</i>
<i>LS</i>	–	<i>Laser Sintering</i>
MA	–	Manufatura Aditiva
máx	–	Máximo
min	–	Mínimo
<i>MBLS</i>	–	<i>Metal Based Laser Sintering</i>
<i>MIG</i>	–	<i>Metal Inert Gas</i>
<i>MAG</i>	–	<i>Metal Active Gas</i>
NASA	–	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>Nd : YAG</i>	–	<i>Neodymium : Yttrium-Aluminum-Garnet</i>
PA-DED	–	Plasma Arc Direct Energy Deposition
<i>PAW</i>	–	<i>Plasma Arc Welding</i>
<i>PB</i>	–	<i>Powder Bed</i>
<i>PBF</i>	–	<i>Powder Bed Fusion</i>
<i>PF</i>	–	<i>Powder Feed</i>
<i>PTA</i>	–	<i>Plasma Transferred Arc</i>
<i>PWM</i>	–	<i>Pulse Width Modulation</i>
RPM	–	Rotações por minuto

<i>SAW</i>	–	<i>Submerge Arc Welding</i>
<i>SL</i>	–	<i>Stereolithography</i>
<i>SLA</i>	–	<i>Stereolithography Apparatus</i>
<i>SLM</i>	–	<i>Selective Laser Melting</i>
<i>SLS</i>	–	<i>Selective Laser Sintering</i>
<i>SMAW</i>	–	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
<i>.stl</i>	–	Extensão de arquivos para impressão 3D
Tandem GMAW	–	Gas Metal Arc Welding com arames em tandem
<i>TIG</i>	–	<i>Tungsten Inert Gas</i>
Ti-6Al-4V	–	Liga de Titânio designação UNS R56400
ZTA	–	Zona Termicamente Afetada
W	–	Eletrodo de Tungstênio
WTh	–	Eletrodo de Tungstênio toriado
<i>WAAM</i>	–	<i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i>
3D	–	Tridimensionais
<i>3DPMD</i>	–	<i>3D Plasma Metal Deposition</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

W	Watts
kW	Quilowatts
kg/h	Quilograma/hora
m	Metros
°C	Graus Celsius
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
%	Por cento
l/min	Litros por minuto
A	Amperes
mm	Milímetros
V	Tensão elétrica
”	Polegadas
CC+	Polaridade inversa
CC-	Polaridade direta
$H_L$	Aporte térmico líquido [J/m]
$\eta$	Rendimento do processo [adimensional]
$U$	Tensão na saída da fonte [V]
$I$	Corrente na saída da fonte [A]
$v$	Velocidade de soldagem [m/s]
°	Ângulo em Graus
m/min	Metros por minuto
$\theta$	Inclinação do arame em relação à superfície do substrato
$h$	Distância da ponta do arame à poça de fusão
$\Delta h$	Varição da distância da ponta do arame à poça de fusão
$h'$	Distância da ponta do arame à ponta do eletrodo
$z$	Eixo longitudinal
$x$	Eixo transversal
$y$	Eixo vertical
g/min	Gramas por minuto
$\mu\text{m}$	Mícrons
mm/s	Milímetros por segundo



C	Carbono
Mn	Manganês
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
Cr	Cromo
V	Vanádio
Mo	Molibidênio
$\phi$	Diâmetro
HV	Hardness Vickers
Cf	Composição química final do depósito
Cs	Composição química do substrato
Ca	Composição química do metal de adição
As	Área diluída do substrato
Ad	Área do depósito

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	25
<b>1.1 Objetivo principal</b> .....	27
<b>1.2 Objetivos específicos</b> .....	27
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	29
<b>2.1 Manufatura aditiva</b> .....	29
2.1.1 Metodologias de fornecimento de pó metálico em MA.....	32
<b>2.2 Fontes de energia para deposição metálica em MA</b> .....	36
2.2.1 Lasers em MA.....	37
2.2.2 Feixe de elétrons em MA.....	40
2.2.3 Arco elétrico em MA.....	42
2.2.3.1 WAAM baseado no processo GMAW.....	52
2.2.3.2 WAAM baseado no processo PAW.....	53
2.2.3.3 WAAM baseado no processo GTAW.....	58
2.2.3.3.1 GTAW com adição de arame em MA.....	64
2.2.3.3.2 GTAW com adição de pó metálico em MA.....	69
<b>2.3 Manufatura híbrida</b> .....	71
<b>3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	75
<b>3.1 Características construtivas e operacionais dos aparatos experimentais</b> .....	75
3.1.1 Aparato 1 – GTAW com camada de pó sobre base fixa.....	77
3.1.1.1 Parâmetros de posicionamento para o Aparato 1.....	80
3.1.1.2 Operação do Aparato 1.....	80
3.1.2 Aparato 2 – GTAW com camada de pó sobre base móvel.....	83
3.1.2.1 Parâmetros de posicionamento para o Aparato 2.....	84
3.1.2.2 Operação do Aparato 2.....	85
3.1.3 Aparato 3 – GTAW com dosagem de pó por rosca transportadora sobre base móvel.....	87
3.1.3.1 Parâmetros de posicionamento para o Aparato 3.....	90
3.1.3.2 Operação do Aparato 3.....	90
3.1.4 Aparato 4 – GTAW com dosagem de pó por vibração mecânica sobre base móvel.....	92
3.1.4.1 Parâmetros de posicionamento para o Aparato 4.....	94
3.1.4.2 Operação do Aparato 4.....	95

<b>3.2 Parâmetros gerais de ensaio.....</b>	<b>95</b>
<b>3.3 Parâmetros específicos de ensaio.....</b>	<b>96</b>
3.3.1 Ensaio com o Aparato 1.....	96
3.3.1.1. Ensaio inicial.....	97
3.3.1.2 Ensaio em passe único.....	97
3.3.1.3 Ensaio com passes empilhados (parede) .....	98
3.3.2 Ensaio com o Aparato 2.....	99
3.3.3 Ensaio com o Aparato 3.....	100
3.3.4 Ensaio com o Aparato 4.....	101
3.3.4.1 Ensaio em passe único, empilhados e lado a lado.....	101
3.3.4.2 Ensaio em multi camadas.....	103
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>105</b>
<b>4.1 Aparato 1.....</b>	<b>105</b>
4.1.1 Aparato 1 – Ensaio inicial.....	105
4.1.2 Aparato 1 – Ensaio em passe único.....	106
4.1.3 Aparato 1 – Ensaio em passes empilhados (parede).....	109
<b>4.2 Aparato 2 – Ensaio em passes empilhados (parede).....</b>	<b>112</b>
<b>4.3 Aparato 3 – Ensaio em passe único e lado a lado.....</b>	<b>115</b>
<b>4.4 Aparato 4 – Ensaio em passe único, empilhados e lado a lado.....</b>	<b>116</b>
4.4.1 Aparato 4 – Ensaio em multi camadas.....	124
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>129</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>131</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a demanda da sociedade por produtos e serviços personalizados e prontamente disponíveis ao consumo têm aumentado enormemente. Assim, a indústria tem se aperfeiçoado e vem integrando processos de produção já consolidados a novas metodologias que possibilitem a personalização sem gerar aumento de custos. Essa tendência é conhecida como customização em massa (PAOLETTI, 2017). Cada vez mais os consumidores estão dispostos a pagar mais pela aquisição de produtos únicos, feitos sob medida para seus anseios de consumo, o que demanda aos processos de produção que sejam rápidos, eficientes e economicamente viáveis. De acordo com Pereira, Kennedy e Potgieter (2019), a rapidez entre finalização do projeto e início de fabricação, complexidade da personalização e baixo custo para pequenos lotes de produção coloca os processos de MA (Manufatura Aditiva) à frente de processos convencionais de fabricação no campo da customização em massa. Ngo et al (2018) também evidenciaram que os processos de MA possuem características que os tornam mais adequados para atender às demandas da customização em massa. Rasiya, Shukla e Saran (2021) apontaram outras vantagens da MA em relação a processos tradicionais de usinagem, tais como: maior eficiência na utilização de material, possibilidade de melhoria de determinadas propriedades mecânicas, além de reduções na razão entre o peso do material utilizado e o peso final da peça (*buy to fly ratio*), no tempo e nos custos de fabricação.

A fabricação por MA começou a receber mais atenção a partir de 1986 com Charles Hull através do desenvolvimento de um processo conhecido como *Stereolithography* (SL) e, desde então, os processos de MA vem sendo constantemente estudados e aperfeiçoados (NGO et al., 2018).

Rasiya, Shukla e Saran (2021) destacaram alguns métodos de produção de peças por MA baseados no tipo e forma da matéria prima utilizada. No caso de pós metálicos, foram destacados: *Selective Laser Sintering* (SLS), *Pro Metal*, *Electron Beam Melting* (EBM) e o *Engineered Net Shaping Laser* (LENS). No caso da utilização de metais na forma de chapas, foram destacados o *Laminated Object Manufacturing* (LOM) e na forma de fios o *Cold Metal Transfer* (CMT), TopTIG e o *Plasma Arc Welding* (PAW), sendo estes últimos pertencentes à categoria de métodos de produção por MA definidos como *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM).

De acordo com Li, Su e Zhu (2022), os WAAM possuem características marcantes, tais como baixo custo e maior eficiência quando comparados a outras tecnologias de

fabricação por MA. Para tais pesquisadores, o custo da utilização do arco elétrico como fonte de energia de fusão para processos de MA é cerca de 1/10 do valor de um cabeçote a laser e 1/30 do valor de um gerador de feixe de elétrons. Contudo, Wu et al (2020) destacam que processos WAAM geralmente produzem tensões residuais, delaminações, empenamento, flambagem e variações dimensionais os quais são causadas devido a contração de uma maior área fundida no depósito e de sucessivos ciclos térmicos. Apesar disso, para Treutler e Wesling (2021), WAAM é uma metodologia promissora para fabricação de peças por MA a qual utiliza a combinação de arco elétrico e arames metálicos para fabricação de peças.

WAAM é um termo coletivo aplicado a todas as metodologias de fabricação de peças metálicas por MA as quais utilizam arames metálicos como metal de adição e a energia do arco elétrico proveniente de equipamentos de soldagem como fonte de calor para fusão. Dada a potencialidade dos WAAM, muitos pesquisadores vêm se dedicando ao estudo desta metodologia de fabricação por MA. Dentre os processos de soldagem mais utilizados para pesquisas em MA estão o *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e PAW, além de variações ou combinações destes, tais como Tandem GMAW (*Tandem Gas Metal Arc Welding*), DE-GMAW (*Double-Electrode Gas Metal Arc Welding*) e CMT (LI; SU; ZHU, 2022).

Baseado na revisão de artigos acadêmicos e na consulta de registros de patentes, nacionais e internacionais, notou-se que não havia relatos da existência de uma metodologia de fabricação por MA combinando arco GTAW com alimentação de metal exclusivamente na forma de pó metálico como as desenvolvidas no presente estudo. Adicionalmente, uma vez desenvolvida, tal metodologia de fabricação poderia também ser aplicada em processos de revestimento superficial, nos quais as características mecânicas da superfície devem ser diferentes daquelas em camadas subsuperficiais e, ao mesmo tempo, devem proporcionar uma boa aderência da camada depositada ao substrato. Outras aplicações potenciais para o processo seriam na recuperação de peças de alto valor agregado ou de fabricação descontinuada, na soldagem de união e otimização de projeto através do desenvolvimento de novas ligas cujas características específicas para a peça poderão ser implementadas através da mistura em variadas proporções de pós metálicos com diferentes composições químicas e adicionadas em locais específicos. Tais aplicações sugeridas compreendem um vasto campo de aplicação para essa nova metodologia de fabricação, o qual precisa ser mais bem estudada e entendida, para que se possa explorar todo o seu potencial como uma tecnologia inovadora na área dos processos de fabricação mecânica.

## **1.1 Objetivo principal**

Avaliar a aplicabilidade do arco de soldagem GTAW para a fusão de pó metálico com capacidade de fabricar objetos 3D (Tridimensionais).

## **1.2 Objetivos específicos**

Avaliar as vantagens e desvantagens da combinação dos processos PBF (*Powder Bed Fusion*) e DED (*Directed Energy Deposition*) com o arco GTAW.

Analisar características dos depósitos relacionadas a dimensões, formas, acabamento superficial, repetibilidade, microestrutura e dureza e propor soluções aos problemas encontrados.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Manufatura aditiva

A norma ISO/ASTM 52900 (2015(E)) define MA como um processo de união de materiais para a fabricação de modelos tridimensionais camada por camada a partir de um conjunto de dados e de forma diversa à processos de manufatura subtrativa ou conformação. Tal processo de fabricação também não pode ser confundido com processos de soldagem, que, de acordo com a norma AWS A3.0M/A3.0 (2020), trate-se de um processo que promove a coalescência localizada de metais ou não metais causada pelo aquecimento dos materiais até a temperatura de soldagem, com ou sem aplicação de pressão ou somente pela aplicação de pressão e com ou sem o uso de material de adição.

Para Wang, Chen e Konovalov (2017), MA é vista como um importante símbolo da quarta revolução industrial (Indústria 4.0). Na MA o material de adição pode ser polimérico, metálico, cerâmico ou compósito. A depender do processo, o material de adição pode estar no estado sólido na forma de fios, folhas e pó, ou no estado líquido, como um material fotossensível. Nas últimas décadas tem-se conseguido grandes avanços em processos de MA variando-se as fontes de energia, seleção e disponibilidade de materiais, técnicas de dosagem/distribuição de metal de adição e técnicas de planejamento e controle do processo, já que na grande maioria dos dispositivos a trajetória de deposição é definida com auxílio de programas de computador “*softwares*” específicos do processo e executados a partir de controle numérico computadorizado (CNC) ou braços robóticos.

Existe uma enorme variedade de equipamentos sendo desenvolvidos por empresas e institutos de pesquisa para produção de peças por MA. Sua classificação quanto ao processo e respectiva nomenclatura está definida pela norma ASTM F 2792-12a (2013), cujo escopo é a definição e descrição de termos, nomenclaturas e siglas relacionadas à MA. Isso visa auxiliar usuários, desenvolvedores de equipamentos, pesquisadores, editores, educadores, entre outros, na padronização de terminologias aplicadas à MA.

Os termos destacados a seguir apresentam uma classificação de processos existentes e também são válidos para futuros processos relacionados à fabricação por MA. A Tabela 1 apresenta os principais processos de MA existentes até o momento e as características principais atribuídas a cada um.



Tabela 1 – Principais processos de MA disponíveis atualmente e suas características principais.

<b>Nomenclatura do processo</b>	<b>Características principais</b>
<i>Binder jetting</i>	Processo de MA onde um agente líquido é aspergido seletivamente para a união de materiais em pó
<i>DED - Directed Energy Deposition</i>	Processo de MA que utiliza uma energia térmica concentrada para fundir materiais a medida em que são depositados. As fontes de energia podem ser: laser, feixe de eletros (para arames) ou arco plasma.
<i>Material extrusion</i>	Processo de MA no qual o material é seletivamente depositado através de um bocal ou orifício
<i>Material Jetting</i>	Processo de MA no qual material é seletivamente depositado através de gotículas (aspergido)
<i>PBF - Powder Bed Fusion</i>	Processo de MA no qual a energia térmica funde seletivamente regiões de uma camada de pó. As fontes de energia podem ser: laser, feixe de eletros ou arco plasma.
<i>Sheet lamination</i>	Processo de MA no qual folhas de material são unidas para formar um objeto
<i>Vat photopolymerization</i>	Processo de MA no qual um líquido fotossensível em uma cuba é seletivamente curado por um feixe de luz ativador de polimerização

Fonte: Adaptado de ASTM F 2792-12a (2013).

A Tabela 2 contém algumas terminologias normalmente encontradas em MA e suas respectivas definições de acordo com a norma ASTM F 2792-12a (2013).

Tabela 2 - Terminologias empregadas em MA e respectivas definições.

<b>Terminologia</b>	<b>Definição</b>
<i>3D Printer</i>	Máquina usada para impressões 3D
<i>3D printing</i>	Processo de fabricação onde o material é depositado através de um cabeçote de deposição, bocal ou outra tecnologia de impressão. É uma terminologia muito utilizada como sinônimo de MA, porém aplicada como referência a equipamentos baratos e de baixa capacidade.
<i>3D scanning</i>	Método de se adquirir a forma e as dimensões de uma peça armazenando as coordenadas de sua superfície e, posteriormente, convertendo-as em dados digitais através de <i>software</i>
<i>AM - Additive Manufacturing</i>	Processo de fabricação de peças a partir de dados de um modelo, geralmente camada sobre camada. Sinônimos: <i>Additive fabrication, Additive processes, Additive techniques, Additive layer manufacturing e Freeform fabrication</i>
<i>Additive systems</i>	Equipamentos usados para fabricação por MA
<i>DMLS - Direct Metal Laser Sintering</i>	Processo PBF utilizado para fabricar peças a partir de pós metálicos tais como os sistemas MBLs - <i>Metal Based Laser Sintering</i>
<i>FDM - Fused Deposition Modeling</i>	Processo de MA baseado na extrusão de material termoplástico aquecido camada sobre camada
<i>LS - Laser Sintering</i>	Processo PBF usado para produção de peças a partir de pó metálico empregando um ou mais feixes de laser para, seletivamente, unir ou fundir partículas na superfície, camada sobre camada, no interior de uma câmara de ambiente controlado. Nestes equipamentos o pó pode ser total ou

	parcialmente fundido.
<i>Rapid prototyping</i>	Emprego de MA para modelar, ajustar ou testar a funcionalidade de uma peça, podendo ser uma combinação destes.
<i>Rapid tooling</i>	Emprego de MA para fabricar ferramentas ou partes destas, de forma direta ou indireta
<i>Reverse engineering</i>	Método de se criar uma representação digital de formas e dimensões de uma peça já existente
<i>SLS - Selective Laser Sintering</i>	São equipamentos fabricados pela empresa 3D Systems Corporation que utilizam LS ( <i>Laser Sintering</i> )
<i>SL - Stereolithography</i>	Emprega o processo <i>Vat photopolymerization</i> para produzir peças através de materiais fotopolimerizantes no estado líquido e utilizam um ou mais feixes de laser para curar este material em espessuras determinadas camada sobre camada até atingir forma e dimensões finais
<i>SLA - Stereolithography Apparatus</i>	São equipamentos fabricados pela empresa 3D Systems Corporation que utilizam SL ( <i>Stereolithography</i> )
<i>Subtractive manufacturing</i>	Processos de fabricação de objetos por remoção de material a partir de uma peça bruta, tais como: fresamento furação, retificação, torneamento, entre outros.
<i>Surface model tool, tooling</i>	Representação matemática ou digital da superfície de um objeto Moldes ou estampos para fabricação de peças
.stl	Tipo de extensão de arquivos de dados de modelos 3D usados por equipamentos em MA. .stl é o tipo de interface padrão para equipamentos de MA

Fonte: Adaptado de ASTM F 2792-12a, (2013).

A Figura 1 contém uma representação simplificada das 7 (sete) categorias de processos de MA segundo a norma ASTM F 2792-12a (2013).

Figura 1 – Categorias de processos de MA segundo a norma ASTM F 2792-12a (2013).



Fonte: Adaptado de Hybrid Manufacturing Technologies (2020).

### 2.1.1 Metodologias de fornecimento de pó metálico em MA

De acordo com Wang, Chen e Konovalov (2017), quanto à forma, existem dois tipos básicos de metais de adição para MA: os pós e os arames. Porém, também existem metais de adição na forma de folhas, tal como ocorre no processo “*Sheet Lamination*”.

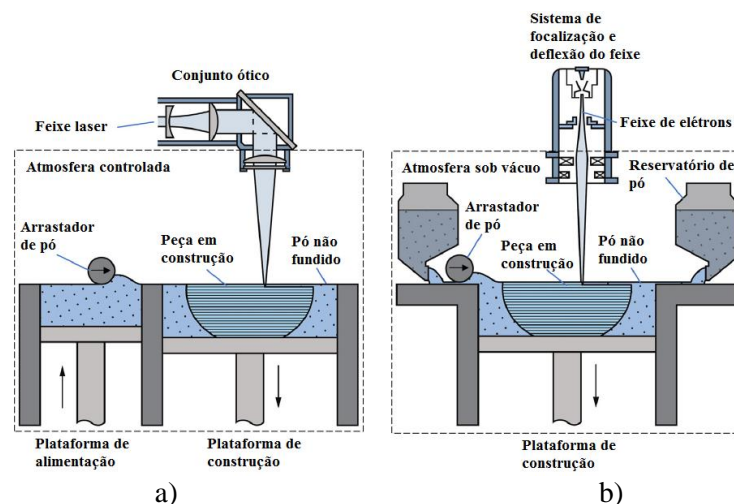
No caso específico de metais em pó, tem-se empregado atualmente duas metodologias distintas de fornecimento de matéria prima para a geração do depósito:

- a de se criar uma camada de pó metálico sobre uma superfície e fundi-la seletivamente por meio da fonte de energia térmica. Esta metodologia de fornecimento de pó metálico é conhecida como “*Powder Bed*” (PB), ou:

- a de se alimentar o pó metálico misturado a uma corrente de gás, a qual é direcionada sobre a região que se quer fazer o depósito. O pó metálico é fundido nas proximidades da poça de fusão, gerada pela fonte de energia, possibilitando sua adesão ao metal de base. Esta metodologia de fornecimento de pó metálico é conhecida como “*Powder Feed*” (PF).

As Figuras 2 a) e b) ilustram a geração de depósitos em processos PBF os quais utilizam a metodologia PB de fornecimento de pó. É possível notar que essa metodologia pode ser empregada tanto com a fonte de calor gerada por um feixe de laser, como no LPBF (*Laser Powder Bed Fusion*), quanto com uma fonte de calor gerada por um feixe de elétrons, como no EBPBF (*Electron Beam Powder Bed Fusion*). Ambas são variantes do processo PBF, diferindo apenas quanto à natureza da fonte de calor, ou seja, se pela utilização de laser ou feixe de elétrons para a fusão.

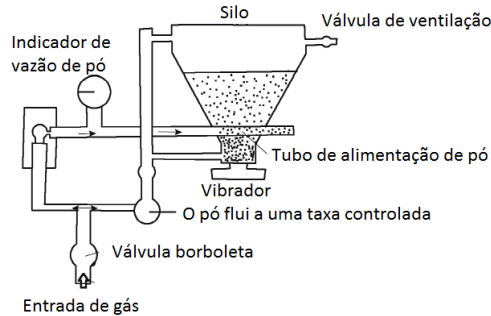
Figura 2 - Geração de camadas no processo PBF. a) LPBF e b) EBPBF.



Fonte: Adaptado de Pragana et al (2021).

No caso de processos DED, o fornecimento de pó metálico geralmente utiliza a metodologia PF. Neste caso, uma corrente de gás de transporte tem a função de conduzir o pó metálico desde o sistema de dosagem até a região nas proximidades da poça de fusão. Sua operação pode ser melhor compreendida com auxílio da Figura 3, a qual ilustra esquematicamente um sistema alimentador de pó metálico fluidizado do tipo PF.

Figura 3- Desenho esquemático de um alimentador de pó metálico fluidizado tipo PF.

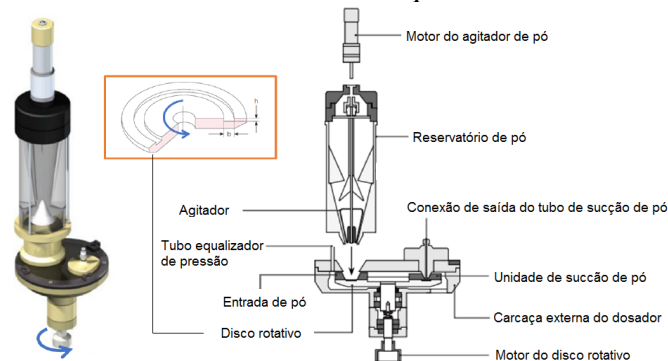


Fonte: Adaptado de Wang, Chen e Konovalov (2017).

No alimentador de pó representado pela Figura 3, uma parcela do gás de transporte faz a agitação do pó metálico no interior do silo através de um sistema de leito fluidizado. A outra parcela do gás de transporte é desviada para passar através do interior do silo. Durante a passagem no interior do silo o gás de transporte flui por um Venturi o qual possui orifícios na região de estrangulamento (garganta), o que promove uma diminuição de pressão e consequente sucção do pó fluidizado. Após coletado na região do Venturi, o pó é transferido com a corrente de gás de transporte até o bocal de deposição.

Devido ao crescente uso em processos de MA, os sistemas tipo PF vêm sendo constantemente aperfeiçoados e atualmente já estão disponíveis modelos mais sofisticados, tal como ilustrado na Figura 4.

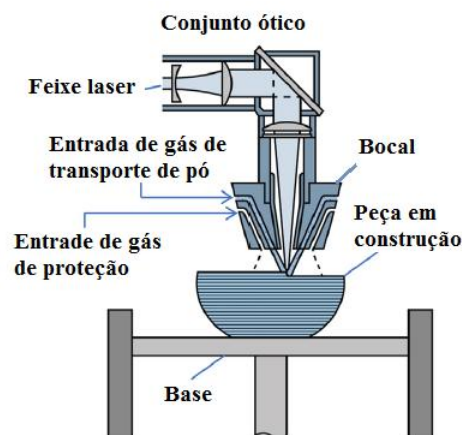
Figura 4 – Sistema PF com disco rotativo utilizado na máquina de MA da marca BeAM, modelo 250.



Fonte: Adaptado de Perilla (2021).

Este sistema, representado na Figura 4, é composto basicamente por: um reservatório de pó, motor do agitador de pó, agitador, carcaça externa do dosador, disco rotativo, motor do disco rotativo, sistema equalizador de pressão e unidade de sucção de pó. O processo de dosagem se inicia no reservatório de pó, responsável por armazenar o material. No interior do reservatório um agitador conectado a um motor externo ao reservatório impede que o pó se aglutine e não desça por gravidade até a entrada de pó localizada entre a carcaça do dosador e o disco rotativo. O disco rotativo contém um rebaixo localizado axialmente com largura ( $b$ ) e profundidade ( $h$ ) o qual será preenchido com pó metálico a cada rotação. O disco rotativo é conectado via eixo a um motor elétrico cuja rotação pode ser controlada pelo operador. A medida em que o disco rotativo gira o pó acumulado na entrada é transportado até a região da unidade de sucção de pó, de onde será transportado com a corrente de gás de transporte até o(s) bocal(is). Já no interior do(s) bocal(is), o pó transportado pela corrente de gás será direcionado pelos dutos/cavidades internas do(s) bocal(is) até a região nas proximidades da poça de fusão. Um exemplo de aplicação de fornecimento de pó tipo PF para um processo DED que utiliza feixe de laser como fonte de energia de fusão pode ser visto na Figura 5.

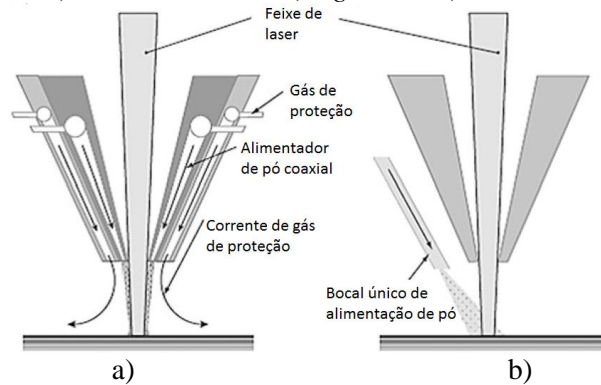
Figura 5 – Sistema de fornecimento de pó tipo PF aplicado a um processo DED cuja fonte de energia de fusão é um feixe laser.



Fonte: Adaptado de Pragana et al (2021).

No caso de bocais coaxiais o pó é direcionado na forma de um toróide ao redor do feixe de laser e focado em um ponto (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). As Figuras 6 a) e b) contêm as representações esquemáticas de um bocal coaxial e de um bocal não coaxial (*single nozzle*), respectivamente.

Figura 6 - a) Bocal coaxial e b) bocal não coaxial (*single nozzle*).

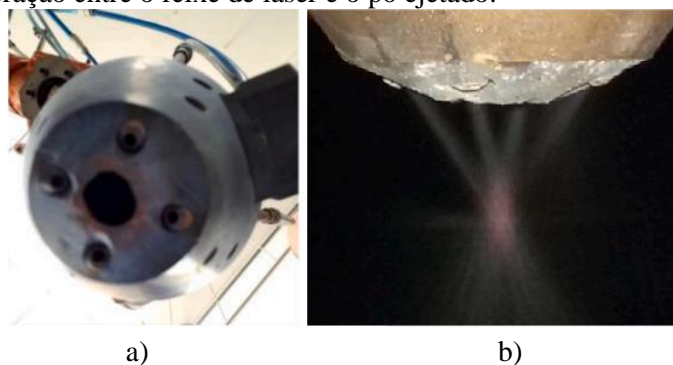


Fonte: Adaptado de Gibson, Rosen e Stucker (2015).

A vantagem em se utilizar bocais coaxiais é que existe uma maior eficiência na captura de pó pela poça de fusão e a proteção da poça de fusão contra contaminação oriunda do ambiente externo é maior. A utilização de um bocal não coaxial (*single nozzle*) tem como vantagem a simplicidade e menor custo e a desvantagem é que a formação da poça de fusão tem uma direção específica (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Alguns pesquisadores, como Yao et al (2021), têm estudado a trajetória das partículas de pó, sua velocidade, sua absorção de calor e respectivo aumento de temperatura para um bocal não coaxial com 4 saídas de pó espaçadas a  $90^\circ$  em relação ao feixe de laser em MA. Um exemplo deste bocal pode ser visto na Figura 7.

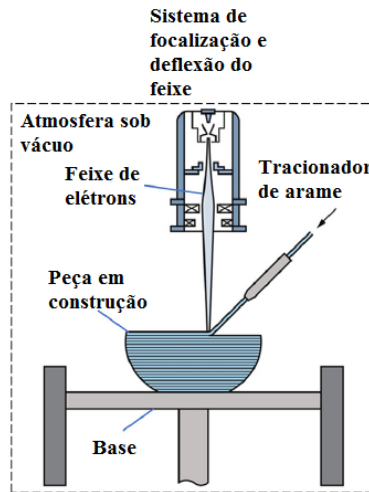
Figura 7 – a) Vista inferior do bocal não coaxial com 4 saídas de pó espaçadas a  $90^\circ$  em relação ao feixe de laser e b) Interação entre o feixe de laser e o pó ejetado.



Fonte: Adaptado de Yao et al (2021).

Sistemas de alimentação do tipo PF não podem ser usados em conjunto com fontes de energia proveniente de feixe de elétrons, devido a fusão do pó ser feita sob vácuo, o que inviabiliza a utilização de um gás para transporte de pó. Neste caso, o pó é substituído por arames metálicos e o sistema de alimentação se dá por tracionamento mecânico do arame – Figura 8.

Figura 8 – Processo DED com fonte de energia térmica de fusão por feixe de elétrons e alimentação por arame.



Fonte: Adaptado de Pragana et al (2021).

## 2.2 Fontes de energia para deposição metálica em MA

Como visto, os processos DED e PBF utilizam técnicas diferentes de fornecimento de pó metálico para adição, porém, compartilham a mesma forma de energia para a fusão do material fornecido, ou seja, energia térmica. A Tabela 3 contém informações a respeito das fontes de energia térmica, dos tipos de materiais e alguns exemplos de equipamentos comerciais desenvolvidos com base nos processos DED e PBF.

Tabela 3 – Fontes de energia térmica, materiais de adição e equipamentos que utilizam os processos PBF e DED.

Processo	Fonte de energia	Materiais de adição	Equipamentos
PBF	Laser	Poliméricos, metálicos e cerâmicos	SLS - <i>Selective Laser Sintering</i> ; DMLS - <i>Direct Metal Laser Sintering</i> ; SLM - <i>Selective Laser Melting</i> ; LPBF - <i>Laser Powder Bed Fusion</i> .
	Feixe de elétrons	Metálicos	EBM - <i>Electron Beam Melting</i> ; EBPBF - <i>Electron Beam Powder Bed Fusion</i> .
DED	Laser	Metálicos e cerâmicos	LMD - <i>Laser Metal Deposition</i> ; LENS - <i>Laser Engineered Net Shaping</i> ; DMD - <i>Directed Metal Deposition</i> .
	Feixe de elétrons	Metálicos (arames)	EBAM - <i>Electron Beam Additive Manufacturing</i>
	Arco elétrico	Metálicos (arames)	CMT - <i>Cold Metal Transfer</i> ; Top TIG
Metálicos (pó)		PA-DED - <i>Plasma Arc Direct Energy Deposition</i>	

Fonte: Próprio autor.



A partir da Tabela 03, é possível notar que processos de MA para adição de metais utilizam basicamente três fontes de energia térmica: lasers, feixe de elétrons e arco elétrico.

### 2.2.1 Lasers em MA

Nos processos de MA que utilizam feixe de laser como fonte de energia térmica, a energia é transferida quando fótons são absorvidos pelo material de adição (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Algumas características dos processos de MA que utilizam laser para fusão são:

- Possuem elevada flexibilidade devido a ausência de moldes ou fixações;
- O ciclo de desenvolvimento e produção pode ser reduzido devido à eliminação de algumas etapas do processo;
- Podem possuir sistemas de autocorreção da trajetória do feixe de laser durante o processo de fusão do material de adição para a produção da peça;
- Permitem a fusão de materiais de elevada densidade e resistência mecânica e;
- Pelo fato de a peça ser fabricada camada sobre camada, a dimensão e a forma dependerão muito da precisão de posicionamento da máquina.

Ainda de acordo com Gibson, Rosen e Stucker (2015), é possível encontrar equipamentos para fabricação por MA os quais utilizam feixes de laser derivados de quatro tipos principais de fontes de energia luminosa:

- *Nd-YAG (Neodymium : Yttrium-Aluminum-Garnet) lasers;*
- *CO<sub>2</sub> (Carbon Dioxide) lasers;*
- *Fiber lasers e;*
- *Diode lasers.*

Porém, a absorptividade de energia luminosa pelos materiais não é a mesma e também depende do comprimento da onda eletromagnética emitida por essas fontes, sendo que ondas eletromagnéticas produzidas por lasers de CO<sub>2</sub> são as que apresentam menores níveis de retenção de energia pelos materiais (absortividade), por isso, para máquinas que utilizam lasers de CO<sub>2</sub>, para compensar a baixa absorptividade há a necessidade de um aumento da potência do laser (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).



Unocic e duPont (2004) testaram a eficiência de transferência energética de um laser de Nd:YAG utilizado em um equipamento LENS de MA desenvolvido pelo *Sandia National Laboratory*.

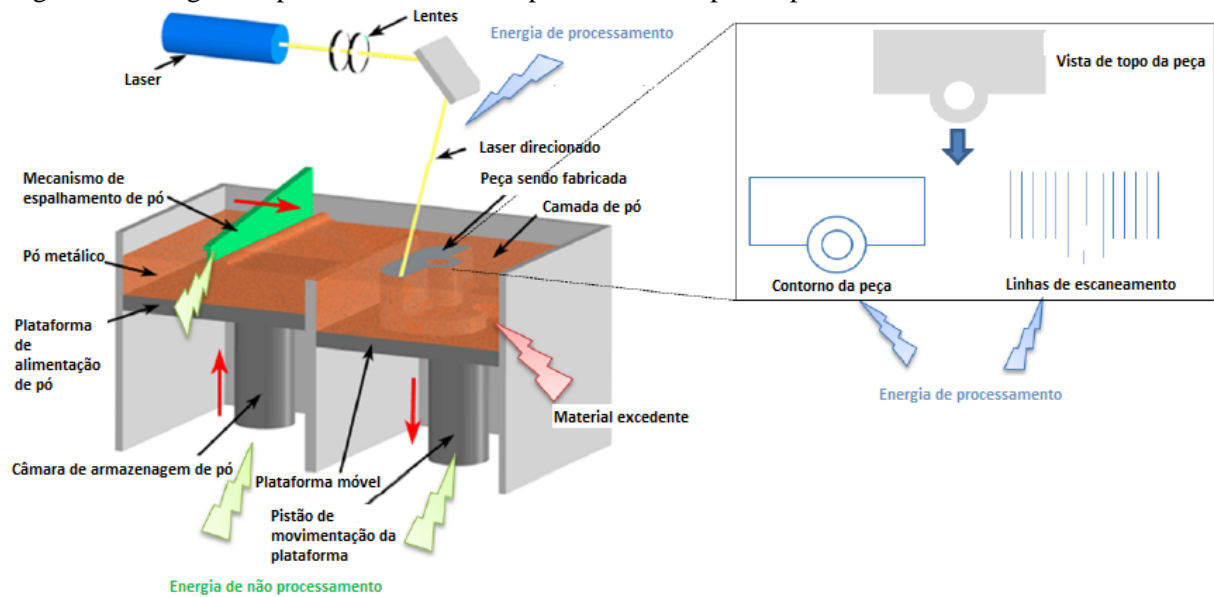
Eficiência de transferência energética pode ser entendida como a relação entre a potência absorvida pela peça e a potência fornecida pelo feixe de laser. A eficiência de transferência energética possui o mesmo conceito físico utilizado para quantificar o rendimento térmico em processos de soldagem, uma vez que, o rendimento térmico para processos de soldagem é a relação entre a quantidade de calor transferido para a peça e a quantidade de calor gerada pelo arco elétrico durante um determinado intervalo de tempo. Esse intervalo de tempo pode ser, inclusive, expresso não como uma unidade de tempo mas como uma unidade de deslocamento, pois o tempo transcorrido multiplicado pela velocidade de soldagem tem como resultado um valor de deslocamento.

Assim, valores de eficiência de transferência energética obtidos por Unocic e duPont (2004) para o feixe de laser de Nd:YAG ficaram entre 30 e 50%.

Em fontes mais antigas de geração de feixes de laser, somente 10 a 20% da potência elétrica fornecida ao equipamento de geração de laser era convertida em potência de saída no feixe de laser. Fontes mais atuais possibilitam que 70 a 80% da potência elétrica fornecida ao sistema de geração de laser seja convertida em potência de saída no feixe de laser (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Verma e Rai (2013), dividiram a energia total consumida por um equipamento SLS de MA em dois tipos, as quais foram denominadas de energia de processamento e energia de não processamento. A energia gasta para a fusão e adesão de pó metálico ao substrato foi chamada de energia de processamento. A energia térmica dissipada e a energia consumida pelo equipamento para funções não diretamente relacionadas à fusão e adesão de pó metálico ao substrato foram denominadas de energia de não processamento. A Figura 9 representa o processo SLS e as parcelas de energias de processamento e não processamento definidas por Verma e Rai (2013).

Figura 9 - Energias de processamento e não processamento para o processo SLS.

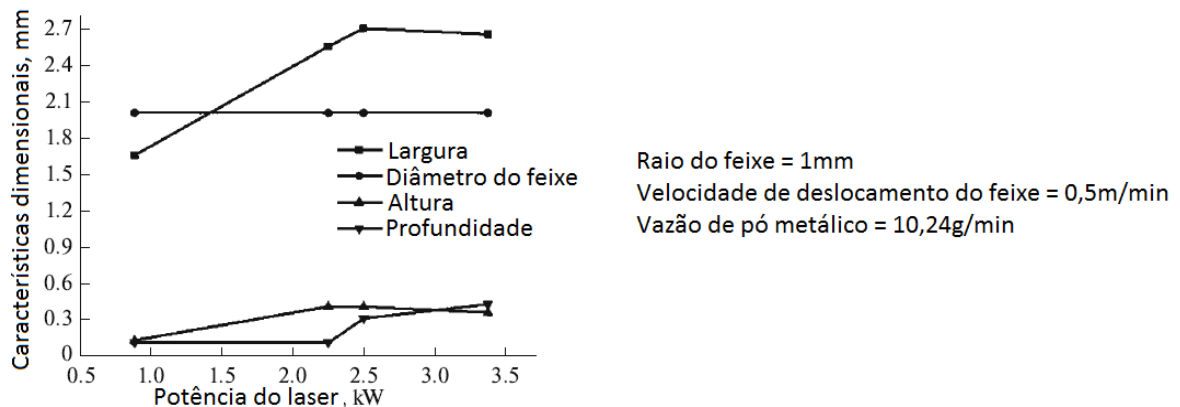


Fonte: Adaptado de Verma e Rai (2013).

Equipamentos de MA geralmente utilizam lasers com potências que variam de 1,5W até 6kW, com comprimentos de onda variando na faixa do ultravioleta até o infravermelho (PINKERTON, 2016).

Estudos têm mostrado que na deposição de um único passe usando laser e pó metálico para MA, a largura do depósito solidificado depende muito da potência do feixe de laser, mantendo-se constante o diâmetro do feixe no ponto focal. Quanto maior a potência do laser, mais largo será o depósito até o valor de 2kW (WANG; CHEN; KONOVALOV, 2017). A Figura 10 mostra a variação desse e de alguns outros parâmetros dimensionais do depósito em passe único em função da potência do laser.

Figura 10 - Variação de parâmetros dimensionais do depósito em função da potência do laser.



Fonte: Adaptado de Wang, Chen e Konovalov (2017).

### 2.2.2 Feixe de elétrons em MA

Em alguns processos PBF de MA utilizados em equipamentos como o EBM, um feixe de elétrons de alta densidade de energia é utilizado para fundir material de adição em pó. A energia cinética fornecida pelo impacto dos elétrons contra o metal que se quer fundir é quem vai possibilitar a fusão entre as partes, logo, o equipamento EBM se aplica a materiais condutores de eletricidade e deve ser realizado em câmaras de baixíssima pressão (sob vácuo) (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Este processo foi desenvolvido na *Chalmers University of Technology*, na Suécia, e posteriormente comercializado pela empresa Arcam AB, em 2001. No processo EBM, devido o aquecimento do pó ocorrer através da energia cinética transferida pelos elétrons quando em contato com as partículas de pó, tais partículas tornam-se negativamente carregadas e este efeito pode conduzir a duas situações prejudiciais:

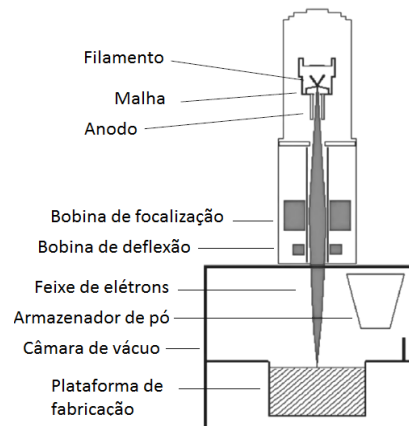
- A força de repulsão da vizinhança supera a força gravitacional e o atrito entre as partículas de pó as quais são responsáveis por manter a camada de pó estática, assim, poderá haver uma perda de planicidade da camada de pó e conseqüente formação de uma “nuvem” de pó a qual é mais prejudicial no caso de pós mais finos; e
- O aumento da carga negativa do pó tenderá a repelir os elétrons vindos do feixe, o que tornará o feixe mais difuso (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Assim, a condutividade da camada de pó nos processos PBF que utilizam feixe de elétrons deve ser elevada o bastante a fim de não permitir que o pó que está formando a camada se torne negativamente carregado em demasia contribuindo para a difusão do feixe. Caso ocorra essa maior difusão do feixe de elétrons, o resultado será um aumento na largura da poça de fusão e a geração de uma zona termicamente afetada maior.

Processos de MA que utilizam feixes de elétrons como fonte de energia são habilitados a fundir somente materiais condutores, ou seja, metais, enquanto aqueles processos que empregam lasers podem fundir quaisquer materiais que absorvam energia na faixa de comprimento de onda do laser (metais, polímeros, cerâmicas e compósitos).

Um desenho esquemático de um processo PBF de MA que utiliza feixe de elétrons para fusão de pó metálico é demonstrado na Figura 11.

Figura 11 - Desenho esquemático de um equipamento de MA que utiliza o processo PBF e energia de fusão por feixe de elétrons.



Fonte: Adaptado de Wang, Chen e Konovalov (2017).

A NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), Langley, US, chegou a desenvolver um equipamento de MA como alternativa para o reparo de estruturas aeronáuticas tanto na atmosfera terrestre quanto no ambiente espacial (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). A denominação utilizada para tal equipamento foi EBF<sup>3</sup> (*Electron Beam Freeform Fabrication*), no entanto, este equipamento não utilizava pó metálico como metal de adição e sim arame, o que permitia uma alta taxa de deposição devido ao emprego de elevadas correntes elétricas. Os motivos que levaram a NASA a optar pelo feixe de elétrons em detrimento ao laser juntamente com metal de adição na forma de arames metálicos foram os seguintes:

- Feixe de elétrons converte mais eficientemente a energia elétrica em calor quando comparado aos lasers;
- Feixe de elétrons funciona bem em ambientes onde a pressão é extremamente baixa, tal como o ambiente espacial;
- Pós metálicos são difíceis de manipular e armazenar de modo seguro em ambientes espaciais onde a gravidade é baixíssima, o que levou a NASA a optar pelo arame.

Um outro exemplo de equipamento que utiliza feixe de elétrons e arame metálico como material de adição é o EBAM (*Electron Beam Additive Manufacturing*) desenvolvido pela empresa SCIAKY Inc. – Figura 12. Este equipamento possui um software próprio denominado Sciaky's IRISS (*Interlayer Real-time Imaging & Sensing System*) para controle da estratégia de deposição e permite que a peça seja construída até próximo às formas e dimensões finais, necessitando então de processos subtrativos adicionais para acabamento. Sua taxa de deposição varia de 3,18 à 18,14kg/h e um sistema de alimentação duplo de arame

permite combinar duas ligas metálicas diferentes na mesma poça de fusão. Também é possível trabalhar com diferentes bitolas de arame e assim controlar melhor a taxa de deposição.

Figura 12 – EBAM desenvolvido pela empresa SCIAKY Inc.



Fonte: Retirado de Sciaky Inc (2024).

### 2.2.3 Arco elétrico em MA

Equipamentos de fabricação de peças por MA que utilizam energia térmica proveniente do arco elétrico para fusão de arames são conhecidos como WAAM.

A primeira patente relacionada a um processo o qual utilizava depósitos metálicos gerados por processos de soldagem para fabricação de peças tridimensionais com funções decorativas foi desenvolvida por Baker (1920) – Figura 13.

Figura 13 – Jarro obtido por Ralph Baker em 1920 pela deposição, camada sobre camada, utilizando arame metálico e arco elétrico.



Fonte: Adaptado de Baker (1920).

Segundo Rodriguez et al (2018), os processos WAAM se tornam interessantes principalmente para a fabricação de peças com dimensões maiores que 0,4m e geometrias de

baixa complexidade. Suas vantagens são um baixo custo de implantação, versatilidade de produção e altas taxas de deposição. Para Nitish, Kala e Sharma (2019), os processos WAAM são capazes de produzir peças metálicas relativamente pesadas com um baixo custo operacional. Outra vantagem dos processos WAAM é que eles possibilitam a fabricação de componentes metálicos altamente reativos como os feitos a base de Ti-6Al-4V em ambientes não confinados “*out of chamber*” (DING et al., 2011).

A Figura 14 mostra uma peça sendo fabricada a partir da deposição através de um equipamento de soldagem desenvolvido pela empresa Fronius e baseado em uma técnica de transferência de metal chamada CMT (*Cold Metal Transfer*).

Figura 14 – Peça fabricada a partir de um equipamento de soldagem GMAW desenvolvido pela empresa Fronius e que utiliza a técnica de transferência CMT.



Fonte: Retirado de Fronius International GMBH (2019).

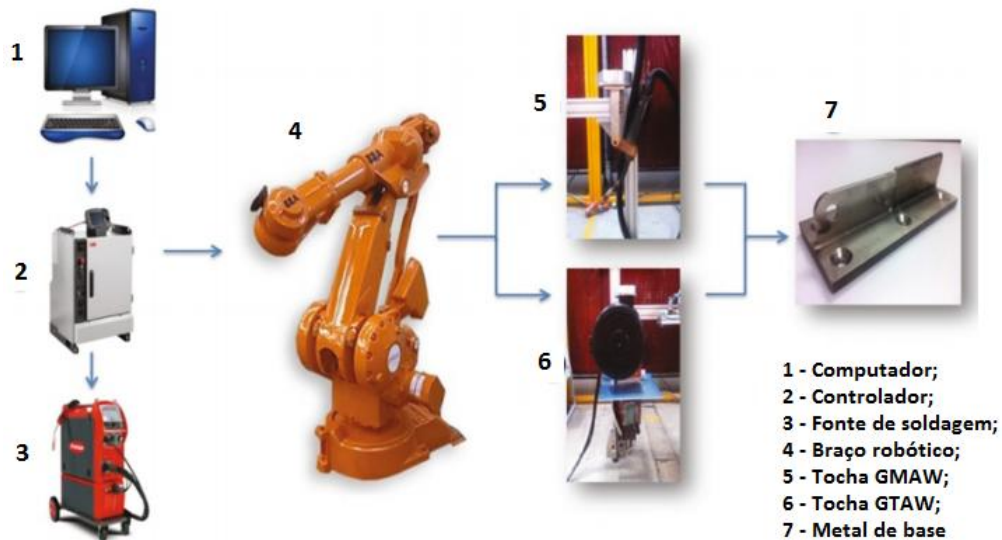
A ideia de se usar o arco proveniente de processos de soldagem para fabricação de objetos tridimensionais foi retomada na Europa por volta de 1990, porém, o WAAM recebeu pouca atenção na época devido a alguns fatores, tais como:

- Alto aporte térmico, o qual pode induzir tensões residuais e distorções (DING et al., 2015);
- Variações dimensionais de  $\pm 0,2$  mm (DING et al., 2015) à  $\pm 0,5$ mm (RODRIGUEZ et al., 2018);
- Acabamento superficial inaceitável para determinadas aplicações (DING et al., 2015);
- Presença de vazios entre as camadas;
- Processo de automatização e planejamento de construção da peça ainda em desenvolvimento; e;
- Falta de processos integrados de produção para avaliar e corrigir variações durante a deposição.

Recentemente tem aumentado o interesse em processos de MA baseados em arco elétrico proveniente de fontes de soldagem devido a grande demanda de componentes de titânio na indústria aeroespacial e a dificuldade de fabricação de tais componentes unicamente por usinagem. Segundo Pan et al (2018), pesquisas indicam que as propriedades mecânicas de peças fabricadas por MA utilizando ligas de Titânio são equivalentes às de peças produzidas por fundição ou conformação mecânica e conclui que processos de MA que utilizam soldagem a arco são uma alternativa promissora quando comparados a processos subtrativos para a fabricação de peças metálicas grandes e com alto custo.

Importantes componentes dos processos WAAM têm sido pesquisados, tais como: processos de soldagem, fontes de soldagem, materiais, modelagem do processo e programação da trajetória. Um processo de WAAM consiste basicamente de uma fonte de soldagem, um sistema automatizado de alimentação de arame(s), uma mesa referenciada controlada por computador ou um braço robótico, além de alguns outros acessórios como gás de proteção, sistema de pré-aquecimento ou resfriamento, etc. Um típico sistema WAAM é mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Sistema WAAM típico.



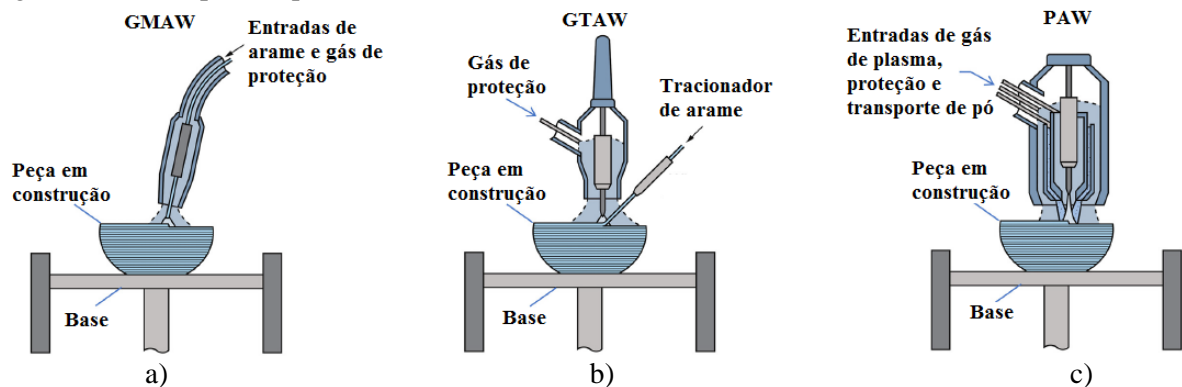
Fonte: Adaptado de Pan et al (2018).

Um computador é utilizado para controlar o processo e coletar resultados. O controlador é usado para controlar o movimento do braço robótico e parâmetros da fonte de soldagem. Uma tocha GMAW, ou GTAW, é utilizada para fazer a deposição de material em forma de arame camada sobre camada. Basicamente o WAAM pode ser dividido, a depender do tipo de processo de soldagem, em três tipos principais:

- Os baseados no processo GMAW;
- Os baseados no processo GTAW;e;
- Os baseados no processo PAW.

As Figuras 16 a), b) e c) mostram as características principais dos processos WAAM baseados em GMAW, GTAW e PAW, respectivamente.

Figura 16 – Exemplos de processos WAAM baseados em: a) GMAW, b) GTAW e c) PAW.



Fonte: Adaptado de Pragana et al (2021).

De acordo com Rodriguez et al (2018), os processos por WAAM possuem vantagens e desvantagens.

Vantagens:

- Mínima interferência humana no processo;
- Utilizam fontes de soldagem, sistemas de deslocamento e metais de adição disponíveis e de baixo custo para desenvolvimento;
- Versatilidade, de forma a se adaptar a diversas condições de deposição, ambientes e materiais metálicos;
- Elevadas taxas de deposição, as quais estão na faixa de 1kg/h e 4kg/h para Alumínio e aço, respectivamente. Para ligas de Titânio taxas de deposição de 1,8kg/h podem ser conseguidas.

Desvantagens:

- indução de tensões residuais e distorções;
- variações dimensionais restritivas para determinadas aplicações sem um processo posterior de acabamento;
- superfície com aspecto ondulado ou com degraus.

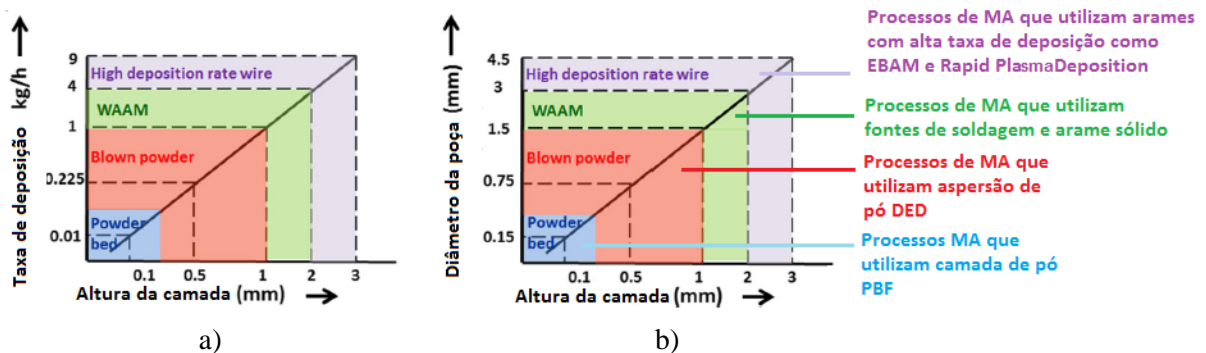


Svetlizky et al (2021) citam em sua pesquisa taxas de deposição para WAAM na ordem de 10kg/h.

Um parâmetro muito utilizado na indústria aeronáutica para avaliar o custo relacionado à fabricação de determinada peça é chamado de “*buy-to-fly ratio*”, que é a relação entre o peso de metal bruto utilizado na fabricação e o peso da peça acabada. Quando mais essa relação se aproxima da unidade menor será a necessidade de retrabalho posterior. Estima-se que processos convencionais de usinagem, tal como o fresamento, podem chegar a relações “*buy-to-fly*” de 10 ou mais ao passo que sistemas de MA baseados em WAAM tem esse parâmetro na ordem de 2 (SCHULZ, 2019).

As Figuras 17 a) e b) comparam taxa de deposição e diâmetro da poça de fusão (*resolution*), formada tanto pela adição de arame ou pó metálico, com a altura da camada depositada para vários processos de MA. É intuitivo que, quanto mais alta a camada depositada, mais largo será o depósito e, conseqüentemente, maior deverá ser a taxa de deposição.

Figura 17 - a) Taxa de deposição e b) diâmetro da poça de fusão em função da altura da camada para vários processos de manufatura aditiva.



Fonte: Adaptado de Rodriguez et al (2018).

Ao se analisar as Figuras 17 a) e b), é possível notar que a taxa de deposição (kg/h) equivale ao quadrado da altura da camada em milímetros, enquanto o diâmetro da poça de fusão varia linearmente com a altura da camada. Em peças espessas, nas quais os depósitos devem ser posicionados lado a lado, grande dificuldade tem sido encontrada para estimar a correta sobreposição “*overlapping*” de forma a produzir uma superfície plana e muitas pesquisas têm se concentrado na estimativa deste parâmetro. Adicionalmente, em processos a arco elétrico, a presença de pontos mais elevados entre cordões dispostos lado a lado gera um desvio no direcionamento do arco elétrico, o que se torna mais um problema a ser contornado durante o planejamento do processo de deposição.

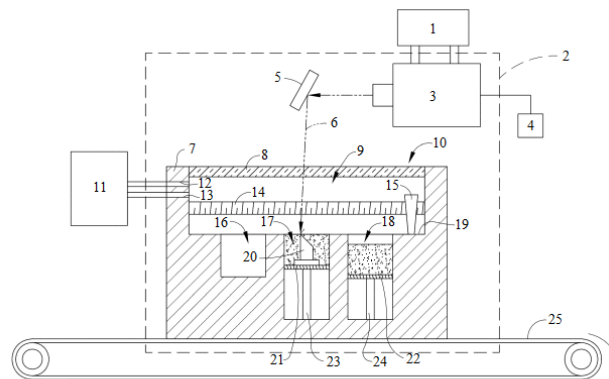
Um grande número de grupos de pesquisa situados em diferentes países têm estudado o uso do arco elétrico gerado por alguns processos de soldagem como mais uma opção de fonte de energia para processos de MA, dentre eles podemos destacar: EUA (*Southern Methodist University, University of Michigan e University of Kentucky*), Reino Unido (*Cranfield University e Loughborough University*), Alemanha (*Fraunhofer Institutes*), Coréia do Sul (*Korean Institute of Science and Technology*), Japão (*Joining and Welding Research Institute*), Índia (*Indian Institute of technology*) e Bélgica (*Katholieke Universiteit Leuven*) (ALBERTI; da SILVA; d'OLIVEIRA, 2014). Porém, a maior desvantagem no uso destas fontes no momento é a geração de uma grande zona termicamente afetada, pois a energia de fusão não é tão concentrada como em processos de MA que utilizam feixe de elétrons ou laser, o que tem mantido, até o momento, processos de MA baseados em WAAM em um estágio de desenvolvimento anterior ao de comercialização (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Outra questão que restringe o uso de processos WAAM em MA é a utilização de varetas/arames metálicos como metal de adição que, embora possibilitem altas taxas de deposição, produzem peças com tolerância dimensional impeditiva para o pronto uso, necessitando de processos posteriores de usinagem de forma a adequar características relacionadas à forma e dimensões às estipuladas em projeto.

Foram realizadas buscas em acervos de registros de patentes, nacionais e internacionais, visando identificar a existência de algum dispositivo de MA o qual combinasse arco GTAW com alimentação de pó metálico para fabricação por MA com características semelhantes aos apresentados no presente trabalho. Alguns exemplos a seguir foram selecionados.

Voiron (2022) é o inventor da patente BR 11 2019 024030 6 a qual refere-se a um processo de fabricação de pás de turbomáquina de aeronave por MA sobre esteira transportadora ou prato giratório com fusão seletiva a laser – Figura 18.

Figura 18 – Processo de produção de pás de turbina aeronáutica a partir de um leito de pó sobre esteira transportadora.

- Legenda
- 1 - Sistema de refrigeração;
  - 2 - Estação de trabalho;
  - 3 - Fonte de energia;
  - 4 - Controlador;
  - 5 - Aparelho de orientação do feixe;
  - 6 - Feixe;
  - 7 - Parede periférica;
  - 8 - Janela;
  - 9 - Espaço de trabalho;
  - 10 - Módulo de construção;
  - 11 - Sistema de ventilação;
  - 12 - Porta de gás;
  - 13 - Porta de vácuo;
  - 14 - Atuador;
  - 15 - Aplicador;
  - 16 - Recuperador de pó;
  - 17 - Câmara de construção;
  - 18 - Reservatório de pó;
  - 19 - Superfície de trabalho;
  - 20 - Peça;
  - 21 - Plataforma de construção;
  - 22 - Plataforma de alimentação;
  - 23 - Haste da plataforma de construção;
  - 24 - Haste da plataforma de alimentação;
  - 25 - Esteira transportadora.

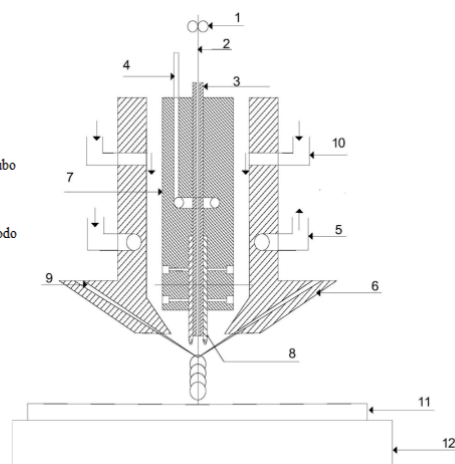


Fonte: Adaptado de Voiron (2022).

Guojian et al (2020) são os inventores da patente CN 111266702A a qual refere-se a um sistema de MA que utiliza uma fonte GTAW juntamente com um sistema de alimentação de pó metálico e arame sólido a partir de um bocal da tocha GTAW modificado. Neste invento o pó metálico é fornecido via corrente de gás de transporte até 4 orifícios existentes no bocal enquanto arame sólido é fornecido por um sistema tracionador através de um conduto de Dióxido de Silício posicionado no interior de um eletrodo de Tungstênio oco. Um corpo fixador modificado de Cobre, constantemente circulado por água, é utilizado para a refrigeração do eletrodo de Tungstênio e do conduto de Dióxido de Silício. Tanto o pó metálico quanto o arame sólido são fornecidos e fundidos simultaneamente nas proximidades da poça de fusão – Figura 19.

Figura 19 – Bocal GTAW modificado.

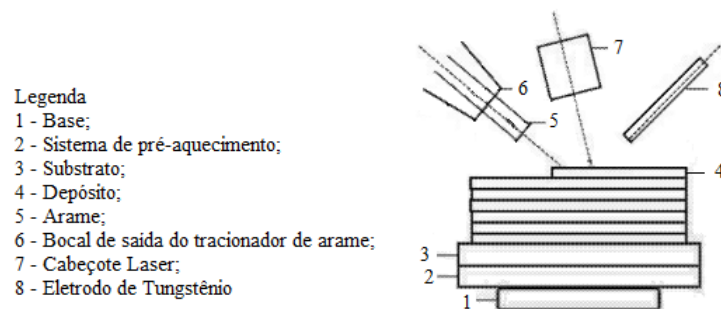
- Legenda
- 1 - Tracionador de arame;
  - 2 - Arame sólido;
  - 3 - Tubo de Dióxido de Silício;
  - 4 - Canal de refrigeração do eletrodo de Tungstênio e tubo de Dióxido de Silício;
  - 5 - Canal de refrigeração do bocal;
  - 6 - Bocal;
  - 7 - Corpo fixador modificado para refrigeração do eletrodo de Tungstênio e tubo de Dióxido de Silício;
  - 8 - Eletrodo de Tungstênio;
  - 9 - Canal de alimentação de pó;
  - 10 - Entrada de gás de proteção;
  - 11 - Substrato;
  - 12 - Suporte de fixação do substrato.



Fonte: Adaptado de Guojian et al (2020).

Dongjiang et al (2018) são inventores da patente CN 108393587 a qual refere-se a um dispositivo que utiliza uma composição de um feixe laser e um arco elétrico GTAW como fontes de energia para fazer a deposição de ligas de Alumínio em paredes finas utilizando arames como metal de adição – Figura 20.

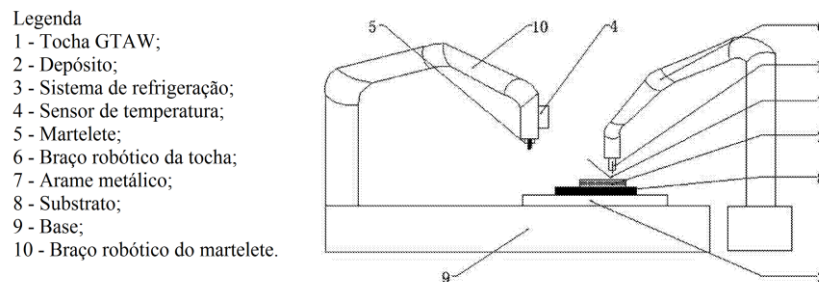
Figura 20 – Método de manufatura aditiva para ligas de alumínio que utiliza como fonte de energia feixe laser e arco elétrico GTAW para a fusão de arame.



Fonte: Adaptado de Dongjiang et al (2018).

Guojian et al (2019) são os inventores da patente CN 109530880A a qual refere-se a um dispositivo que utiliza GTAW com alimentação de arame combinado a um sistema de pós-processamento da camada depositada via trabalho mecânico (martelamento) – Figura 21.

Figura 21 – Equipamento de MA baseado no processo GTAW com adição de arame com pós processamento mecânico (martelamento) do depósito.

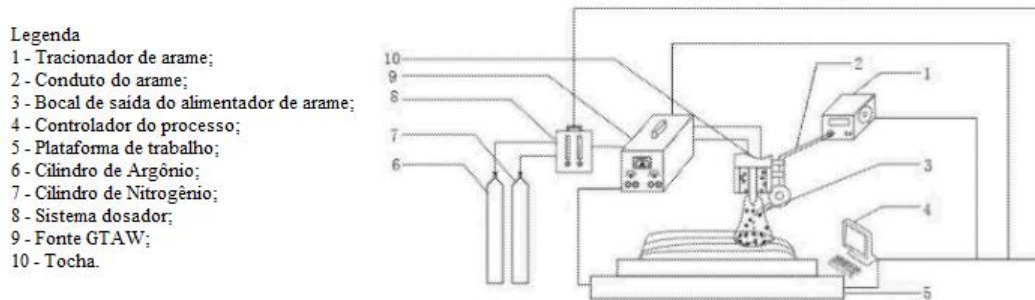


Fonte: Adaptado de Guojian et al (2019).

Jiankang et al (2019) são os inventores da patente CN 109954958A a qual refere-se a um dispositivo que utiliza o processo GTAW com alimentação de arame e uma mistura de Nitrogênio como gás ativo e Argônio como gás de proteção para gerar peças de Titânio por MA – Figura 22. A proporção e o fluxo de Nitrogênio e Argônio são controlados por um

sistema dosador de gás. O objetivo do Nitrogênio é reagir com o Titânio durante sua fusão pelo arco GTAW de forma a gerar um composto a base de Nitreto de Titânio que terá a função de atuar como uma fase de reforço no material depositado.

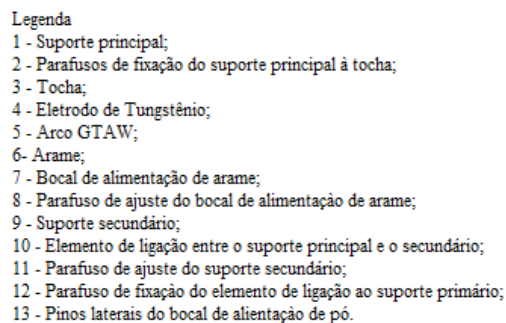
Figura 22 – Sistema de manufatura aditiva de ligas de Titânio baseado no arco elétrico GTAW.



Fonte: Adaptado de Jiankang et al (2019).

Yiming et al (2020) são os inventores da patente CN 111347132A a qual é referente a um equipamento de MA baseado no arco GTAW combinado a um sistema múltiplo de alimentação de arame, o qual é fixado próximo à tocha por um suporte que permite o ajuste da altura e do ângulo de inclinação dos arames – Figura 23

Figura 23 – Equipamento de MA baseado no arco GTAW combinado à alimentação por arames múltiplos.



Fonte: Adaptado de Yiming et al (2020).

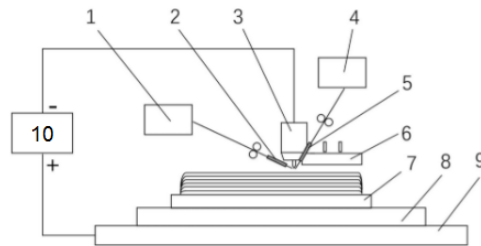
Xiaoyu et al (2020) são os inventores da patente CN 111390338A que combina o processo TOPTIG com um sistema de alimentação de arame adicional para gerar depósitos contendo compostos intermetálicos de Titânio e Alumínio. Assim, através do sistema de alimentação do equipamento TOPTIG, o arame a base de Alumínio (ER1100) é fornecido

enquanto o sistema de alimentação adicional provê o fornecimento de arame a base de Titânio (Ti6Al4V)– Figura 24.

Figura 24 – Equipamento baseado no processo TOPTIG com dupla alimentação de arame para geração de compostos intermetálicos a base de Titânio e Alumínio.

Legenda

- 1 - Alimentador adicional de arame (Ti6Al4V);
- 2 - Bocal do sistema de alimentação adicional de arame;
- 3 - Tocha TOPTIG;
- 4 - Alimentador de arame do sistema TOPTIG;
- 5 - Bocal da tocha TOPTIG;
- 6 - Sistema de proteção da poça de fusão;
- 7 - Substrato (Placa de Titânio)
- 8 - Sistema de pré aquecimento;
- 9 - Plataforma de trabalho
- 10 - Fonte TOPTIG.



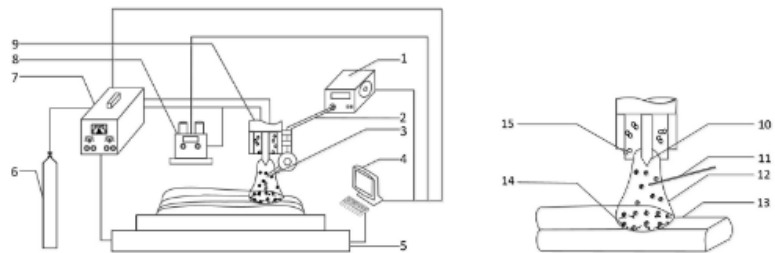
Fonte: Adaptado de Xiaoyu et al (2020).

Jiankang et al (2020) são os inventores da patente CN 210817885U que utiliza uma associação entre o processo GTAW com alimentação de arame a base de Titânio e bocais de alimentação de Boro em pó para gerar um material de resistência superior – Figura 25.

Figura 25 – Processo de MA que utiliza o processo GTAW para fusão de arame a base de Titânio e adição de Boro em pó via bocal.

Legenda

- 1 - Tracionador de arame;
- 2 - Conduto de arame;
- 3 - bocal do sistema de alimentação de arame;
- 4 - Centro de controle;
- 5 - plataforma de trabalho;
- 6 - Cilindro de argônio;
- 7 - Fonte GTAW;
- 8 - Sistema de alimentação de pó (Boro);
- 9 - Tocha.
- 10 - Eletrodo de Tungstênio;
- 11 - Arame;
- 12 - Arco GTAW;
- 13 - Substrato (TC4)
- 14 - Depósito;
- 15 - Partículas de Boro.



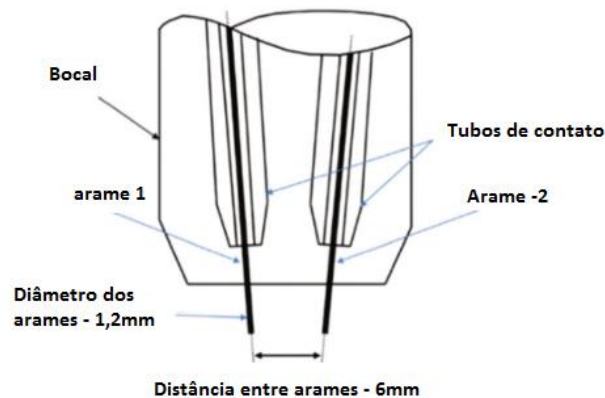
Fonte: Adaptado de Jiankang et al (2020).

Assim, até o momento, não foi encontrado nenhum invento que contenha um alto grau de semelhança relacionado a aspectos construtivos e operacionais quando comparado aos 4 (quatro) aparatos experimentais desenvolvidos neste trabalho.

### 2.2.3.1 WAAM baseado no processo GMAW

O processo de soldagem GMAW é aquele no qual o arco elétrico é formado entre a ponta de um eletrodo consumível, fornecido como um rolo de arame, e o metal base. O posicionamento do arame, chamado ER (*Electrode Rod*), em processos de MA geralmente é perpendicular à peça nos casos onde o arame é singular (bocal único). A transferência de metal geralmente é feita em modo “*spray*” ou “*spray*” pulsado de forma a evitar a presença de respingos. Processos com dupla alimentação de arame têm sido utilizados de forma a aumentar a taxa de deposição, tal como mostrado na Figura 26.

Figura 26 - WAAM baseado no processo GMAW com dupla alimentação de arame.



Fonte: Adaptado de Pan et al (2018).

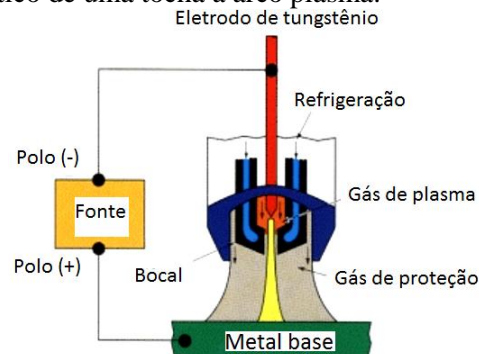
Uma variante do processo GMAW aplicado à MA é o processo conhecido como CMT, o qual é um aperfeiçoamento ao processo de transferência por curto-circuito. Nesse processo um movimento controlado e em alta frequência de alimentação e retração do arame é utilizado juntamente com um sistema dinâmico de controle de corrente elétrica de forma a produzir pequenas gotas de metal fundido. Isto resulta em uma transferência com muito baixo aporte térmico, pouca geração de respingos e arco estável.

De acordo com Nitish, Kala e Sharma (2019), o processo GMAW tem sido mais frequentemente utilizado em MA devido a sua alta taxa de deposição somada a maior facilidade de automação e controle sobre o metal de adição. Poucos pesquisadores têm preferido o processo GTAW ao processo GMAW devido à baixa quantidade de respingos e alta precisão alcançados com os equipamentos GMAW atuais.

### 2.2.3.2 WAAM baseado no processo PAW

PAW é um processo similar ao GTAW. O arco elétrico é formado entre um eletrodo, o qual é geralmente feito de Tungstênio sinterizado, podendo utilizar a adição de outros elementos químicos em sua composição tais como o Tório. A diferença básica entre o processo GTAW e o processo PAW consiste basicamente no bocal da tocha. No processo PAW o eletrodo não consumível é posicionado em uma câmara à parte no interior do bocal da tocha, dessa forma, o fluxo de gás utilizado para formação do arco plasma (gás de plasma) é separado do fluxo de gás utilizado para a proteção (gás de proteção). O gás destinado à formação do plasma é pressionado de forma a atravessar um fino orifício existente na parte central do bocal de Cobre a uma elevada velocidade (aproximadamente a velocidade do som). A Figura 27 representa um desenho esquemático de uma tocha a arco plasma.

Figura 27 – Desenho esquemático de uma tocha a arco plasma.



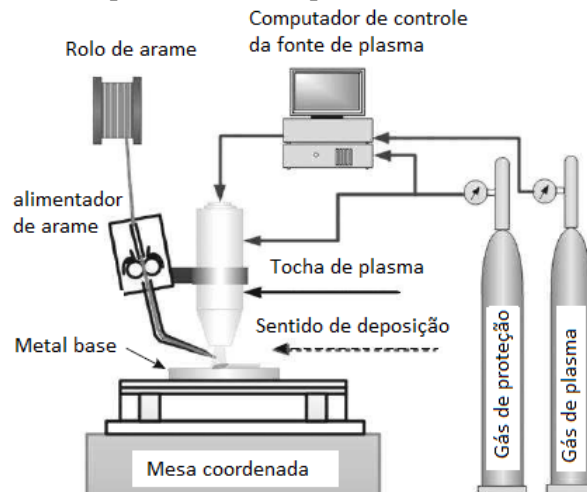
Fonte: Retirado de Bracarense (2000).

A temperatura do arco plasma pode chegar a 16700 °C. O arco plasma é gerado quando uma corrente elétrica atravessa um fluxo gasoso, ionizando-o. No estado ionizado os átomos de gás são “quebrados” em íons positivos do elemento químico formador do gás e elétrons. O grau de ionização de um gás pode variar em uma faixa de 1% até mais de 100% (possíveis com graus duplos ou triplos de ionização) nos quais mais elétrons são removidos de suas órbitas. A energia do “jato” plasma e sua temperatura dependem da potência elétrica da fonte usada para gerá-lo. Todos os arcos elétricos são formados por um gás ionizado, porém, um PAW é um gás ionizado cuja energia é extremamente concentrada.

De acordo com Pan et al (2018), o processo de MA baseado no arco plasma PAW tem sido muito pesquisado ultimamente. A Figura 28 representa um esquema típico de um processo de MA por fusão de arame sólido a plasma.



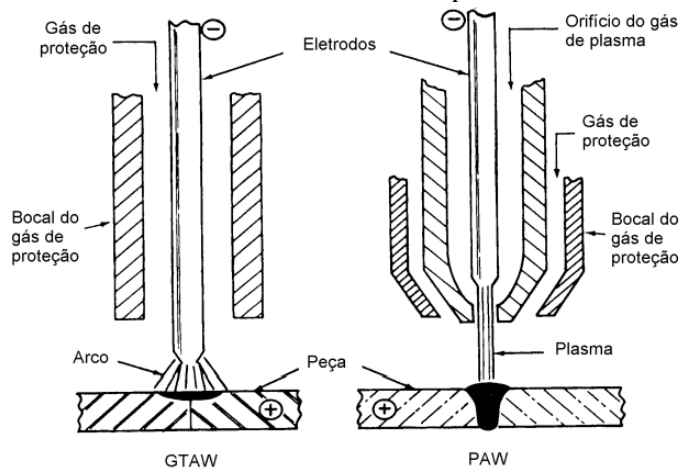
Figura 28 - Esquema típico de um processo de MA por fusão de arame sólido a plasma.



Fonte: Adaptado de Wang, Chen e Konovalov (2017).

Para Pan et al (2018) a vantagem na utilização do PAW consiste no fato de que a densidade de energia do arco neste processo chega a ser três vezes maior do que a do processo GTAW, causando menos distorções, cordões mais estreitos e possibilitando o uso de elevadas velocidades de deslocamento. A Figura 29 mostra uma comparação entre as características do arco formado pelo processo GTAW e PAW.

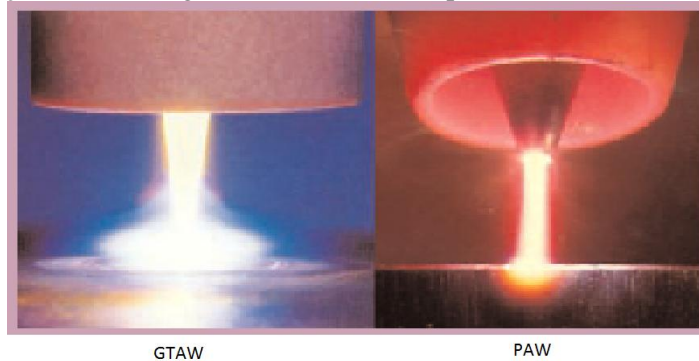
Figura 29 - Comparação das características do arco entre os processos GTAW e PAW.



Fonte: Retirado de Bracarense (2000).

Observando a Figura 29 pode-se notar uma menor largura e maior penetração para o passe gerado pelo processo PAW quando comparado ao processo GTAW. Tal fato é decorrente de uma maior concentração de calor causada pela constrição do arco. Na Figura 30 é possível novamente observar a diferença entre a largura do passe formado pelos processos GTAW e PAW.

Figura 30 – Comparação entre as larguras do arco entre os processos GTAW e PAW.



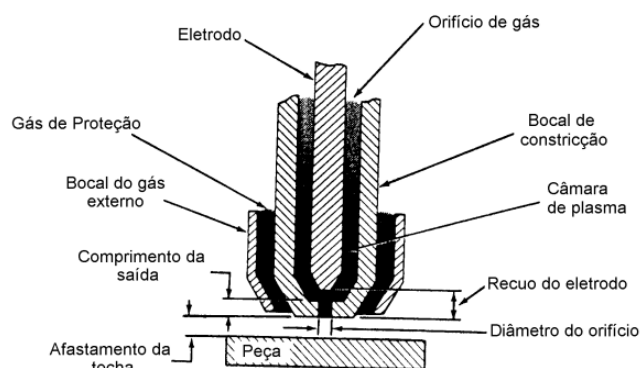
Fonte: Retirado de Bracarense (2000).

O processo PAW, quando comparado ao processo GTAW, também gera uma ZTA (Zona Termicamente Afetada) menor, pois possibilita o emprego de menores níveis de corrente elétrica devido à maior concentração do calor gerado pelo arco elétrico.

No processo PAW podem ser utilizados gases inertes de diferentes composições e a pressões e vazões distintas a depender de qual função estes gases irão exercer no processo, pois existem duas funções específicas para o gás: a de gerar uma corrente elétrica de alta velocidade e a de proteção do passe contra a contaminação por agentes externos. Para equipamentos de MA os quais utilizam a combinação do arco plasma com adição de pó, uma terceira função para o gás é o de transportar o pó desde o sistema de dosagem até o bocal, onde será direcionado para a região nas proximidades da poça de fusão.

Como visto, a tocha PAW é mais complexa quando comparada à tocha GTAW. A Figura 31 mostra a divisão entre o gás para geração do arco e o gás de proteção para uma tocha PAW.

Figura 31 – Vista em corte de uma tocha PAW mostrando os dutos internos de gás de proteção e de gás de plasma além de outras características.



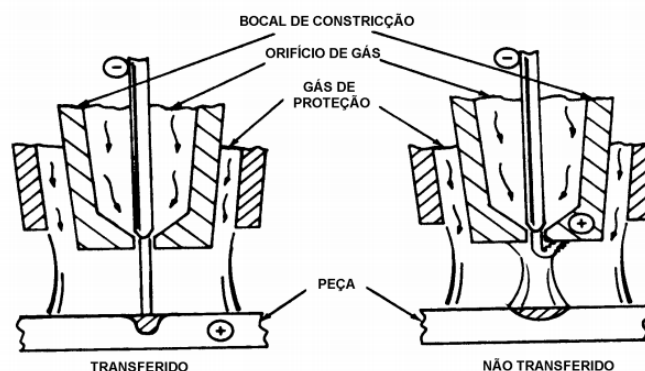
Fonte: Retirado de Bracarense (2000).

Segundo Bracarense (2000), vazões de gás de plasma, também chamado de gás de orifício, podem variar de 0,25 até 5 l/mim. Já vazões de gás de proteção variam geralmente de 10 até 30 l/mim. De acordo com este mesmo pesquisador, as maiores vantagens do arco plasma são sua estabilidade dimensional, focalização e relativa insensibilidade a variações no afastamento da tocha (*standoff*). Quando comparado ao GTAW, o processo PAW permite uma maior distância da ponta do bocal em relação à peça (afastamento da tocha). Como exemplo, para soldas em materiais de pequena espessura utilizando uma corrente elétrica de 10A com o processo PAW é necessário um afastamento da tocha da ordem de 6,4mm. Por outro lado, utilizando-se o processo GTAW a distância da ponta do eletrodo à peça deve ser da ordem de 1,5mm. Assim, para passes em locais de difícil acesso e onde se deseja alta penetração o processo PAW é mais adequado que o processo GTAW.

Outro fator que diferencia o processo GTAW em relação ao processo PAW é o nível de corrente elétrica empregada. No caso do processo GTAW, normalmente fontes comerciais iniciam com uma corrente elétrica mínima de 30A, podendo chegar, a depender da utilização da máquina e de seus acessórios, a 500A. Em processos conhecidos como micro-plasma as correntes elétricas utilizadas variam de 0,1A até 15A. Processos PAW denominados como de média corrente utilizam correntes elétricas que variam de 15A até 200A e processos PAW de altas correntes empregam correntes elétricas superiores a 200A.

Alguns exemplos de gases de proteção utilizados no processo PAW são: Argônio, Hélio, misturas entre Argônio e Hélio e entre Argônio e Hidrogênio. Os materiais passíveis de serem fundidos através do processo PAW, diferentemente do processo GTAW, podem ser condutores ou não, a depender das características da tocha. Existem tochas as quais produzem o chamado arco transferido e tochas que produzem o arco não transferido. Pela Figura 32 é possível identificar estes dois tipos de arco.

Figura 32 – Tocha com arco transferido e não transferido no processo PAW.

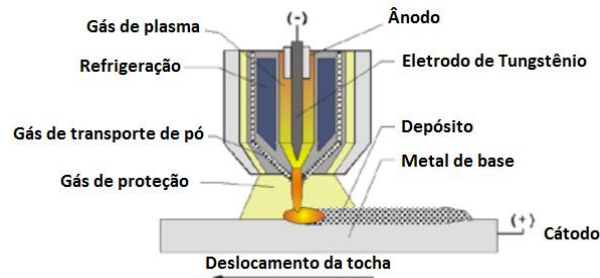


Fonte: Retirado de Bracarense (2000).

Na tocha com arco transferido, chamada de PTA (*Plasma Transferred Arc*), o arco elétrico é estabelecido entre o eletrodo e o material a ser fundido. Neste caso, o material deve ser condutor de eletricidade. Alguns materiais passíveis de serem fundidos com esta técnica são: Cobre, Alumínio, Níquel, Titânio, Zircônio, Magnésio, aço e Cromo. No caso da técnica que usa arco não transferido, o arco elétrico é aberto entre o eletrodo e o bocal interno (bocal de constrição). Esta técnica é mais utilizada em processos de corte ou soldagem de materiais não condutores ou para aplicações onde se deseja baixa concentração de energia.

Um dispositivo comercial o qual associa pó metálico e arco plasma (PAW) com destinação à recuperação superficial de componentes mecânicos é o desenvolvido pela empresa Eutectic Castolin para metalização (aspersão térmica) chamado de EuTronic GAP 3511 DC Synergic. Este dispositivo utiliza o processo PTA com um bocal de tocha modificado e um sistema alimentador de pó metálico, o qual permite conduzir, dosar e direcionar pó metálico com auxílio de um fluxo de gás para o ponto focal do arco plasma sobre o substrato onde ocorrerá a formação do depósito. A Figura 33 ilustra o bocal da tocha do dispositivo mencionado.

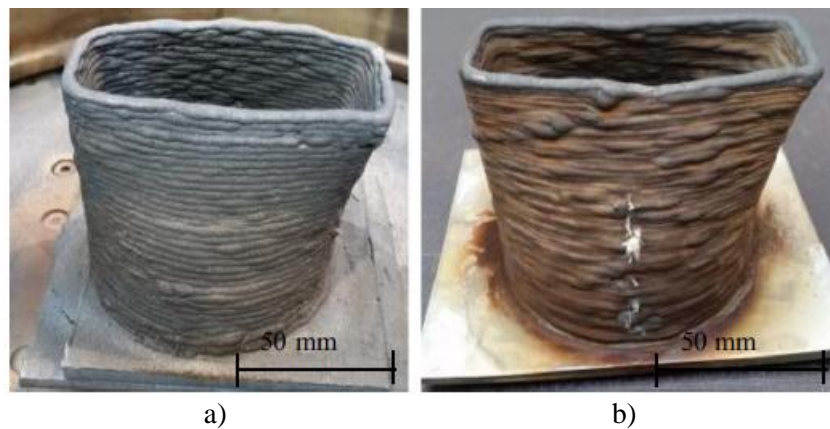
Figura 33 – Bocal da tocha do dispositivo EuTronic® GAP 3511 DC Synergic.



Fonte: Retirado de Eutectic Castolin (2017).

Hoefler, Haelsing e Mayr (2018) compararam o processo Cold Metal Transfer (CMT) desenvolvido pela empresa Fronius, composto por uma fonte Fronius TransPulse Synergic 5000CMT e uma tocha Robacta Drive CMT W com o processo 3D Plasma Metal Deposition (3DPMD) desenvolvido pela empresa PlasmaStar, composto por uma fonte PlasmaStar 500, uma tocha PlasmaStar MV230 e um sistema alimentador de pó PlasmaStar PFII. Tal equipamento é baseado no processo PTA e a tocha possui um bocal modificado para alimentação de pó metálico similar ao mostrado na Figura 33. As Figuras 34 a) e b) mostram as peças produzidas por Hoefler, Haelsing e Mayr (2018) com os 2 processos descritos acima.

Figura 34 - Peças produzidas por Hoefler, Haelsig e Mayr (2018) com os processos: a) 3DPMD e b) CMT.



Fonte: Adaptado de Hoefler, Haelsig e Mayr (2018).

Na comparação entre os processos 3DPMD e CMT, Hoefler, Haelsig e Mayr (2018) destacam que as desvantagens do processo CMT como pior aspecto superficial e maior tempo de execução são compensadas pelo melhor aproveitamento de material.

#### 2.2.3.3 WAAM baseado no processo GTAW

O processo GTAW é aquele que utiliza um eletrodo não consumível de Tungstênio puro ou ligas a base de Tungstênio para gerar o arco elétrico entre o eletrodo e o substrato. O metal de adição é, geralmente, uma vareta sólida designada pela sigla ER (*Electrode Rod*) que, embora não seja atravessada pela corrente elétrica é fundida pela exposição ao arco elétrico. Dessa forma, no processo GTAW o direcionamento do metal fundido até a poça de fusão se deve principalmente pela ação da gravidade e, durante a deposição, a posição da vareta de adição em relação à tocha influencia a transferência de metal e a qualidade da deposição. Alimentação posterior, lateral ou anterior à translação da tocha podem ser utilizadas. Alimentação frontal geralmente é preferida para ligas de Titânio e aço.

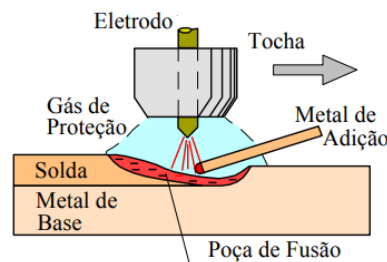
O processo GTAW, também conhecido popularmente como TIG (*Tungsten Inert Gas*), utiliza os seguintes componentes básicos:

- Fonte;
- Gás de proteção (Argônio/Hélio ou mistura de ambos);
- Reguladores de vazão/pressão e manômetros;
- Tocha e seus acessórios;
- Cabo terra;

- Metal de adição (*Electrode Rod*) e;
- Sistema de refrigeração da tocha em casos onde a operação é contínua e a corrente elétrica supera 150A.

Há casos em que a união metálica é chamada autógena, ou seja, não haverá adição de material externo ao metal de base e a união se dará simplesmente pela fusão dos metais a serem unidos. A nomenclatura metal de base é geralmente utilizada em processos de união por soldagem. No caso de processos de soldagem adaptados à MA, como é o caso dos WAAM, o metal de base é denominado como substrato da mesma forma que a expressão cordão de solda é substituída por passe ou “track”. A Figura 35 é uma representação esquemática de um passe sendo formado utilizando-se o processo GTAW.

Figura 35 – Representação simplificada de um passe sendo formado utilizando-se o processo GTAW.



Fonte: Retirado de Modenesi (2012).

As fontes GTAW podem ser divididas em dois tipos principais, o que está diretamente ligado às características do material a ser fundido. Essas fontes podem ser encontradas no mercado em duas configurações:

- DC - *Direct Current*, ou;
- ACDC - *Alternate Current & Direct Current*.

Fontes mais modernas e de mais alto custo possuem várias configurações para controle da tensão/corrente de saída.

Quanto ao gás de proteção, é comum a utilização de gases inertes, ou seja, cuja composição química do gás não irá se combinar com composição química do substrato. Geralmente são utilizados os gases Argônio, Hélio ou uma mistura entre eles. O grau de pureza de tais gases também pode variar desde 99,998% (Grau de pureza 4.8) até 99,9999% (Grau de pureza 6.0) para o gás Argônio e de 99% (Grau de pureza 2.0) até 99,9999% (Grau de pureza de 6.0) para o gás Hélio.

Os reguladores de vazão e pressão são destinados ao controle de pressão e vazão de gás utilizado para a proteção do substrato e abertura do arco. Geralmente os fabricantes de reguladores de vazão informam qual deve ser a pressão de entrada no regulador de vazão para que seu funcionamento siga os padrões de vazão de projeto. Assim, é muito importante a correta seleção e monitoramento dos parâmetros do gás de proteção durante a fusão. Para auxiliar no monitoramento da carga de gás no interior do cilindro e ajustar a pressão de entrada no regulador de vazão, são instalados dois manômetros no registro do cilindro, sendo que um faz a leitura a montante do regulador de pressão (pressão no interior do cilindro) e o outro faz a leitura de pressão a jusante do regulador (pressão de entrada no medidor de vazão).

Quanto à seleção dos parâmetros, os mesmos variam conforme condições específicas para cada caso e há necessidade de se recorrer a tabelas de forma a estimar os valores iniciais e, a partir da observação das características do passe, realizar ajustes. Um exemplo pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros GTAW aplicáveis para a soldagem de aços com baixo teor de carbono.

Espessura da Junta (mm):	1,6-3,2	3,2-6,4	6,4-12,7
Tipo de Junta:	Sem chanfro	V	Duplo V
Corrente, CC- (A):	50-100	70-120	90-150
Tensão (V):	12	12	12
Tipo de eletrodo:	EWTh-2	EWTh-2	EWTh-2
Diâmetro do eletrodo (mm):	2,4	2,4	3,2
Metal de adição (mm)	1,6-2,4	2,4-3,2	2,4-3,2
Gás de proteção:	Argônio	Argônio	Argônio
Vazão (l/min):	7-9	7-9	10-12
Tamanho do bocal (mm):	9,5 (3/8")	9,5 (3/8")	12,7 (1/2")
Distância máxima do bocal à peça (mm)	12,7	12,7	12,7
Temperatura mínima da peça	16°C	16°C	16°C
Tratamento térmico após soldagem:	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Posições de Soldagem:	P, H, V, SC	P, H, V, SC	P, H, V, SC

Posições: P – plana, H – horizontal, V – vertical e SC – sobre-cabeça.

Fonte: Retirado de Modenesi (2012).

A tocha GTAW é um dispositivo destinado a alojar o eletrodo de Tungstênio, que normalmente tem diâmetros variando de 0,5 à 6,4mm. No entanto, os diâmetros mais comuns comercialmente são os de 1,6mm (1/16"), 2,4mm (3/32") e 3,2mm (1/8"). Esses eletrodos são ligados com elementos químicos como Tório, Cério, Lantânio, etc, os quais conferem características especiais de resistência contra desgaste decorrente da exposição ao arco elétrico. A composição do eletrodo e seu diâmetro tem intrínseca relação como o tipo de material a ser fundido, com o tipo (AC ou DC) e magnitude de corrente elétrica. A



composição química, nomenclatura conforme a AWS (*American Welding Society*) e aplicação podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química, nomenclatura e aplicação de alguns eletrodos GTAW.

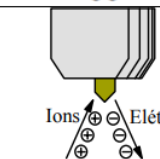
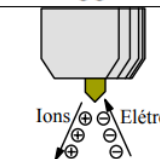
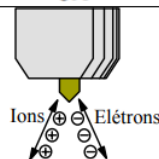



Composição química	Nomenclatura	Aplicação
Tungstênio puro (99,5%)	EWP	Soldagem AC de Alumínio e Magnésio
Tungstênio com (1,7 – 2,2%) de Tório	EWTh-2	Soldagem DC de aços ao Carbono, aços inoxidáveis, Níquel e Titânio
Tungstênio com (1,8 – 2,2%) de Cério	EWCe-2	Soldagem DC de aços ao Carbono, aços inoxidáveis, Níquel e Titânio
Tungstênio com (0,15 – 0,40%) de Zircônio	EWZr-1	Indicados para soldagem AC

Fonte: próprio autor.

A tocha GTAW possui um gatilho que alimenta eletricamente uma válvula solenoide instalada no interior da fonte. Esta válvula solenoide é responsável por liberar o gás proveniente do cilindro e iniciar o arco elétrico com auxílio de um ignitor de alta frequência. Algumas fontes podem disponibilizar temporizadores, os quais liberam inicialmente o gás e depois de um determinado intervalo de tempo acionam o ignitor. Da mesma forma, podem extinguir o arco e, somente após um intervalo de tempo determinado, interromper o fluxo de gás, sempre com o objetivo de preservar o eletrodo e o metal fundido.

A polaridade do eletrodo é de extrema importância. A polaridade inversa (CC+ “reverse”) geralmente é evitada pois desgasta mais rapidamente o eletrodo, já a polaridade direta (CC- “straight”) é mais utilizada, pois consome menos o eletrodo, aumentando sua vida útil. Nesta polaridade (CC-) o eletrodo é o ânodo e o substrato o cátodo. Com a corrente elétrica em AC, a polaridade é invertida com uma certa frequência o que dependerá do tipo de material a ser fundido e das características de ajuste da fonte. A Figura 36 ilustra o efeito da polaridade do eletrodo em relação ao perfil do cordão (passe).

Figura 36 – Polaridades do eletrodo e características do cordão (passe).

Tipo de Corrente:	CC-	CC+	CA
Fluxo de elétrons e ions:			
Perfil do cordão:			
Limpeza de óxido:	Não	Sim	Sim (meio ciclo)
Balanco de calor (aprox.):	70% na peça 30% no eletrodo	30% na peça 70% no eletrodo	50% na peça 50% no eletrodo

Fonte: Retirado de Modenesi (2012).



A Tabela 6 relaciona a corrente elétrica com o diâmetro do eletrodo, composição química e polaridade para o processo GTAW.

Tabela 6 – Correntes de soldagem em função do diâmetro do eletrodo, composição química e polaridade para o processo GTAW.

Diâmetro do Eletrodo (mm)	Corrente de Soldagem (A)			
	CA		CC	
	W	WTh	W/WTh (CC+)	W/WTh (CC-)
0,5	--	--	5 - 35	--
1,0	10 - 40	15 - 60	30 - 100	--
1,6	30 - 70	60 - 100	70 - 150	10 - 20
2,4	70 - 100	100 - 160	150 - 225	15 - 30
3,2	100 - 150	140 - 220	200 - 275	25 - 40
4,0	150 - 225	200 - 275	250 - 350	40 - 55
4,8	200 - 300	250 - 400	300 - 500	55 - 90
6,4	275 - 400	300 - 500	400 - 650	80 - 125
Identificação: W - Eletrodo de tungstênio WTh - Eletrodo de tungstênio toriado				

Fonte: Retirado de Modenesi (2012).

A tocha utilizada no processo GTAW também possui bocais cerâmicos de vários formatos, os quais possuem diâmetros que variam de 6,5 à 19 mm, e cuja função é de confinar o gás ao redor do eletrodo, metal depositado e substrato. Esse confinamento do gás tem três funções importantes:

- Proteger o depósito da contaminação com gases oriundos da atmosfera;
- Gerar uma atmosfera propícia à formação do arco elétrico; e;
- Fazer a refrigeração da tocha.

Existem vários modelos e tamanhos de tochas GTAW, mas sua seleção vai ser definida basicamente pelos seguintes fatores:

- Se o processo será automatizado ou manual;
- Corrente elétrica;
- Fator de trabalho e;
- Acessibilidade da tocha.

Quanto ao metal de adição, no processo GTAW utilizam-se varetas de resistência mecânica compatível ao substrato e com diâmetro próximo à sua espessura. Os diâmetros comumente encontrados no mercado dependem do tipo de metal de adição, mas, de um modo geral, variam de 0,5 à 5mm.

Um fator muito importante para o processo GTAW é a estimativa do aporte térmico ou "*Heat Input*". O aporte térmico é quantidade de energia por unidade de comprimento do passe necessária para possibilitar a fusão do metal de adição ao substrato, o que formará o depósito.

É possível se encontrar em alguns trabalhos na área de soldagem a nomenclatura intensidade da fonte como substituição ao termo aporte térmico. O aporte térmico pode ser calculado a partir da Equação 1.

$$H_L = \eta \frac{UI}{v} \quad (1)$$

Onde:

$H_L$  é o aporte térmico líquido [J/m];

$\eta$  é o rendimento do processo [adimensional];

$U$  é a tensão na saída da fonte [V];

$I$  é a corrente na saída da fonte [A] e;

$v$  é a velocidade de soldagem [m/s].

O rendimento térmico é a razão entre a quantidade de calor realmente transferido para a peça e a quantidade de calor total que é gerado pelo arco. Uma parcela da energia é perdida por radiação/convecção para o meio, outra parcela é absorvida por condução pela própria tocha e a parcela restante é absorvida por condução para a peça e seu sistema de fixação. Testes utilizando processos baseados em calorimetria trazem estimativas do valor para o rendimento térmico em função do tipo de processo de soldagem e condições de execução do passe. A Tabela 7 lista os valores de rendimento térmico para alguns processos.

Tabela 7 – Rendimento térmico de alguns processos de soldagem.

Processo	Rendimento Térmico ( $\eta$ )
Arco Submerso (SAW)	0,85 - 0,98
MIG/MAG (GMAW)	0,75 - 0,95
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,70 - 0,90
TIG (CC-) (GTAW)	0,50 - 0,80
TIG (CC+) (GTAW)	0,20 - 0,50
Laser (LBW)	0,005 - 0,70

Fonte: Retirado de Modenesi, Marques e Santos (2012).

Analisando-se os dados da Tabela 07, pode-se observar que o rendimento térmico para o processo GTAW (CC-) é da ordem de 50 à 80%. Estudos sobre o rendimento térmico de processos de MA os quais utilizam lasers como fonte de energia térmica, cujo conceito é similar ao de eficiência de transferência energética, estão entre 30 e 50% (UNOCIC; duPONT, 2004).

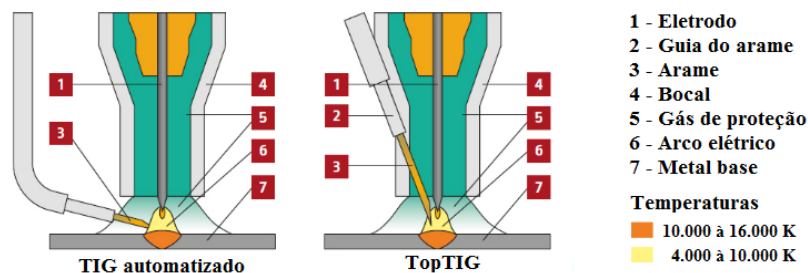
De acordo com a norma ISO/ASTM F 3187-16 (2016), em uma escala graduada de 1 à 4, o rendimento térmico para processos WAAM recebe a graduação 4 enquanto o rendimento térmico cuja fonte são lasers recebem graduação 1. Logo, é possível inferir que a energia térmica proveniente de arco elétrico é melhor aproveitada que a energia térmica proveniente de lasers em MA. Assim, atualmente, muitas pesquisas vêm sendo feitas na direção de se adequar processos de soldagem já existentes para produção de peças por MA, visto que muito conhecimento já foi acumulado no processo de união por soldagem para uma grande variedade de materiais.

#### 2.2.3.3.1 GTAW com adição de arame em MA

Um equipamento desenvolvido no *Lincoln Electric Research Center* cuja finalidade é de automatizar o processo GTAW para soldagem de chapas de aço ao carbono e aço inoxidável de até 3mm de espessura e que utiliza arames sólidos como metal de adição foi denominado de TOPTIG.

Em processos GTAW automatizados, o metal de adição é alimentado sobre a poça de fusão a frente da tocha considerando seu sentido de deslocamento. No processo TOPTIG o metal de adição é alimentado no interior do bocal cerâmico em uma zona do arco onde a temperatura é a mais elevada. Assim, o arame é fundido em pequenas gotas de modo similar ao que ocorre no processo GMAW quando soldando em “*spray*”. O uso de uma corrente elétrica pulsada sincronizada com o sistema de alimentação de arame garante um melhor controle sobre o processo de soldagem. A Figura 37 representa a comparação entre um processo GTAW automatizado e o processo TOPTIG.

Figura 37 – Comparação entre o processo de soldagem GTAW (TIG) automatizado e o processo TOPTIG.



Fonte: Retirado de Lincoln Electric (1999).

A Figura 38 mostra o processo TOPTIG em operação.

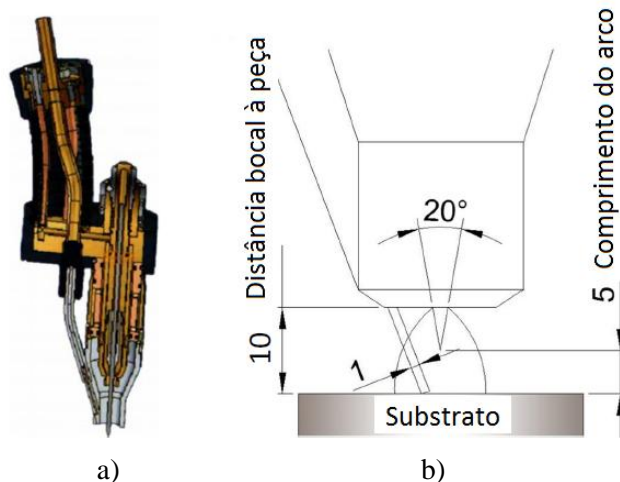
Figura 38 – Processo TOPTIG em operação.



Fonte: Retirado de Lincoln Electric (1999).

O processo TOPTIG ainda está sendo testado para a produção de peças por MA. A diferença deste processo para os demais consiste no posicionamento do metal de adição em relação ao eletrodo. Em processos GTAW automatizados o metal de adição é, na maioria dos casos, alimentado externamente ao bocal da tocha e forma um ângulo de  $90^\circ$  em relação ao eixo longitudinal do eletrodo. Dessa forma, o arame é alimentado praticamente paralelo à superfície do substrato. No processo TOPTIG o arame atravessa o bocal, mantendo um ângulo da ordem de  $20^\circ$  em relação ao eixo longitudinal do eletrodo. Assim, o arame é adicionado na região mais quente do arco, garantindo uma alta taxa de deposição, da ordem de 3kg/h, e velocidades de deslocamento em torno de 1,5m/min. A Figura 39 mostra a secção longitudinal de uma tocha utilizada no processo TOPTIG.

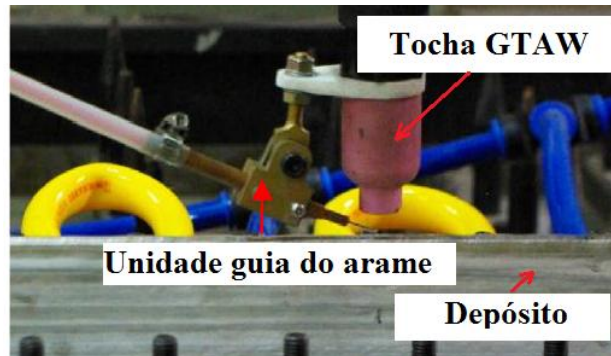
Figura 39 a) Vista em corte e b) Esboço da tocha com alguns parâmetros dimensionais utilizados no processo TOPTIG.



Fonte: Adaptado de Rodriguez et al (2018).

Geng et al (2017) têm estudado formas de se otimizar o aspecto superficial de passes depositados empregando o WAAM baseado no processo GTAW. Para tanto, eles utilizaram uma fonte de soldagem EWM Tetrax 521 Sinergic ACDC juntamente com o alimentador de arame mostrado na Figura 40.

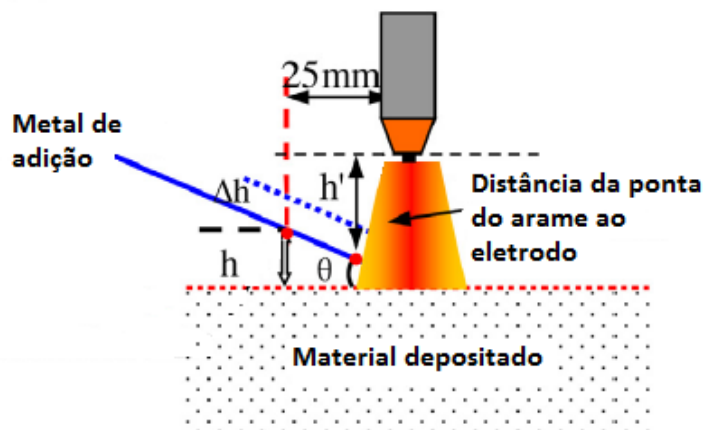
Figura 40 – Alimentador de arame utilizado por Geng et al (2017) para WAAM baseado no processo GTAW.



Fonte: Adaptado de Geng et al (2017).

No experimento conduzido por Geng et al (2017) foram analisadas a influência de alguns parâmetros no aspecto superficial dos passes depositados, tais como: a inclinação do arame em relação à superfície do substrato ( $\theta$ ), a distância da ponta do arame à poça de fusão ( $h$ ), a variação da distância da ponta do arame à poça de fusão ( $\Delta h$ ) e a distância da ponta do arame à ponta do eletrodo ( $h'$ ). Estes parâmetros podem ser melhor visualizados através da Figura 41.

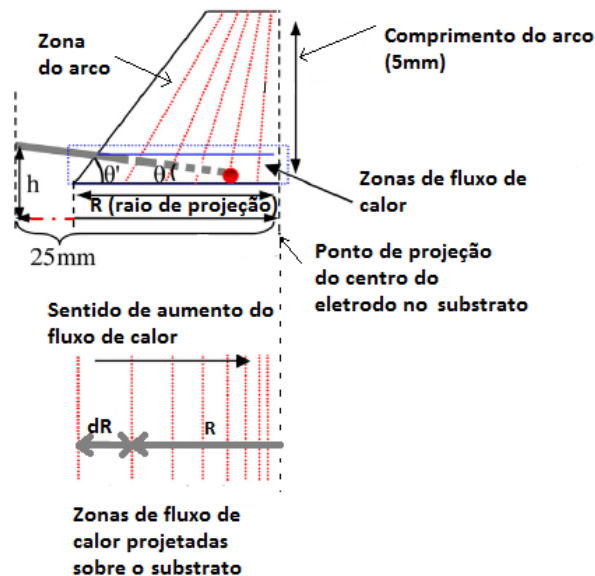
Figura 41 - Inclinação do arame ( $\theta$ ), distância da ponta do arame à poça de fusão ( $h$ ), variação da distância da ponta do arame à poça de fusão ( $\Delta h$ ) e distância da ponta do arame à ponta do eletrodo ( $h'$ ).



Fonte: Adaptado de Geng et al (2017).

Geng et al (2017) verificaram que um aumento na distância da ponta do arame à poça de fusão modificava a dinâmica da transferência de metal de adição para o depósito. Outro ponto verificado pelos pesquisadores é que leves alterações no ângulo de alimentação do arame ( $\theta$ ) podem fazer com que o arame seja deformado pelo excesso de calor ou atravesse a região do arco elétrico. Assim, parâmetros de posicionamento entre metal de adição, substrato e tocha são essenciais para garantir ausência de defeitos e níveis aceitáveis de acabamento, geometria e dimensões. Geng et al (2017) também estudaram a dinâmica da transferência de calor na região do arco elétrico em processos WAAM baseados em GTAW com adição de arame sólido. Através da Figura 42 é possível observar que o fluxo de calor é diferente a partir da projeção do ponto central do eletrodo sobre o substrato.

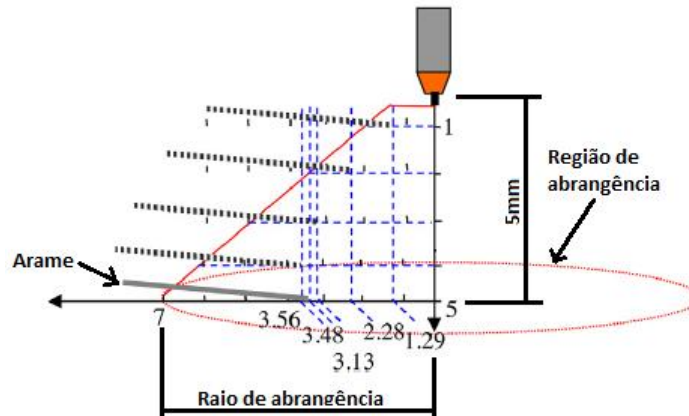
Figura 42 – Fluxo de calor a partir da projeção do ponto central do eletrodo sobre o substrato.



Fonte: Adaptado de Geng et al (2017).

Pela Figura 43 é possível observar a região de abrangência estimada do arco elétrico gerado pela tocha GTAW com capacidade de fusão obtida matematicamente no experimento realizado por Geng et al. (2017). Para um comprimento de arco de 5 mm, a abrangência do arco elétrico com capacidade de fusão esteve inscrita em uma região cônica, na qual o raio de abrangência na base do cone foi de 7 mm.

Figura 43 – Projeção da área com capacidade de fusão para o arco elétrico GTAW obtida teoricamente por Geng et al (2017).



Fonte: Adaptado de Geng et al (2017).

O perfeito entendimento da transferência de calor que ocorre em algumas fontes de energia que se utilizam da ionização de um gás para geração de um arco através de um eletrodo não consumível é de grande valia em equipamentos WAAM, pois, além do processo GTAW, outros processos de soldagem compartilham da mesma fonte de energia de fusão. Para Murphy (2015), o completo entendimento da formação do arco elétrico é de extrema importância para o aprimoramento de processos WAAM e uma previsão confiável do fluxo de calor para o substrato deve considerar a interação entre o arco elétrico e o eletrodo. Assim, modelos matemáticos que levam em consideração essa interação já possibilitam prever a forma e a profundidade da poça de fusão. Implementações destes modelos poderiam permitir a previsão de importantes propriedades do depósito, tais como, microestrutura, tensões residuais e distorções, aumentando a possibilidade de desenvolvimento de simuladores de manufatura.

Muitos pesquisadores têm estudado resistência à tração e dureza em peças obtidas por MA, porém, poucos pesquisadores têm conduzido estudos sobre tensões residuais. Como se sabe, tensões residuais de tração são malélicas para a resistência à fadiga da peça, porém, tensões residuais compressivas aumentam a vida em fadiga. Durante a deposição em várias camadas, o material sofre ciclos de aquecimento e resfriamento, assim, a indução e relaxação de tensões durante o processo de fabricação da peça acontece a cada ciclo de deposição. Segundo Choquet (2018), modelos matemáticos ainda não estão completos o bastante para prever com boa acuracidade do campo de temperaturas na região entre o eletrodo e o substrato.



### 2.2.3.3.2 GTAW com adição de pó metálico em MA

Até o momento foram discutidos alguns exemplos de equipamentos de MA os quais utilizavam o arco elétrico GTAW com adição de arames. No entanto, existem pesquisas as quais avaliam a aplicabilidade de GTAW como fonte de energia para fusão de pó metálico cujo objetivo é a geração de revestimentos superficiais.

Moselli (2013) desenvolveu três protótipos de bocais de tocha para serem utilizados em conjunto com o processo GTAW para realização de revestimentos superficiais. No primeiro protótipo foi inicialmente utilizado um sistema de alimentação de pó por gravidade e, posteriormente, um sistema por transporte forçado de gás do tipo ADP-2, de fabricação da IMC Soldagem de Santa Catarina. A Figura 44 mostra o primeiro protótipo desenvolvido por Moselli (2013).

Figura 44 – Primeiro protótipo desenvolvido por Moselli (2013) para revestimento superficial.

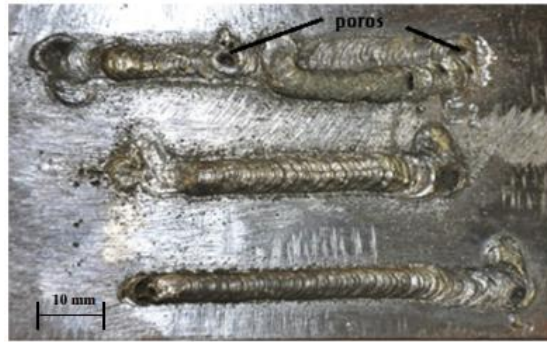


Fonte: Retirado de Moselli (2013).

De acordo com Moselli (2013), a utilização do primeiro protótipo proporcionou resultados insatisfatórios, tais como: contaminação do eletrodo com pó metálico, instabilidades no arco, geometria irregular do cordão, porosidades e falta de fusão. Um exemplo de depósito conseguido pelo referido autor utilizando o seu primeiro protótipo pode ser visto na Figura 45.



Figura 45 – Deposição com o primeiro protótipo desenvolvido por Moselli (2013).



Fonte: Retirado de Moselli (2013).

Processos de MA que utilizam GTAW optam por utilizar arames como metal de adição. A parcela que utiliza GTAW combinada à alimentação de pó metálico não é direcionada à MA e sim a realização de revestimento superficial. Mesmo nestes casos, tais equipamentos requerem o uso de bocais de tocha modificados ou o emprego de aglutinantes para fixação do pó ao substrato, dada a dificuldade em se manipular satisfatoriamente o pó metálico na região do arco elétrico GTAW. Assim, a grande limitação em se utilizar o processo GTAW como fonte de energia térmica para processos de MA, os quais utilizam pós metálicos como metal de adição, é justamente a manipulação adequada do pó.

Segundo Moselli (2013), quando se trata de deposição de pós metálicos pelo processo GTAW, os pesquisadores despendem um tempo considerável na preparação do substrato, dado, que sem a utilização de um aglomerante para fixação do pó ao substrato, ficaria muito difícil realizar a deposição.

Mridha et al (2001) utilizaram aglomerantes orgânicos umedecidos com água e misturados ao pó metálico a base de Alumínio e Titânio, com posterior secagem em forno, para que, durante o processo de fusão a arco elétrico GTAW, a mistura de pó contendo 53% de Titânio e 47% de Alumínio em massa não fosse “soprada” para longe da zona de fusão pela ação do fluxo de gás de proteção.

Uma técnica parecida foi utilizada por Soner (2006) para realizar o revestimento superficial de amostras de aço AISI 1020 utilizando como metal de adição pó a base de Carbetto de Silício com fusão pelo processo GTAW. Para fixar o pó metálico sobre a superfície do substrato, o pó, a base de Carbetto de Silício, foi inicialmente misturado a álcool, espalhado sobre a superfície previamente preparada do substrato e secado em um forno por 1 hora a 60°C, de forma que o pó metálico permanecesse aderido à superfície do substrato e não fosse removido pelo gás de proteção do processo GTAW durante sua fusão.

Uma outra pesquisa relacionada à geração de revestimento superficial utilizando pó como metal de adição e o arco elétrico GTAW para realizar a deposição do pó ao substrato foi conduzida por Eroglu e Ozdemir (2002). Nesta pesquisa, os referidos autores utilizaram como substrato um aço AISI 1020 e como metais de adição pós a base de grafite, Ferro-Cromo-Carbono e Cromo. O substrato foi previamente preparado e então cada um dos pós anteriormente descritos foram misturados com silicato de sódio e aplicados sobre a face preparada do substrato em diferentes espessuras para, posteriormente, serem secos com ar quente. Após a secagem, os corpos de prova, já com as camadas de pó aderido, tinham sua superfície fundida pelo arco elétrico GTAW. Dessa forma, fica evidente a carência de um processo no qual pó metálico possa ser diretamente adicionado à poça de fusão gerada pelo processo GTAW sem a necessidade de aglomerantes ou modificações profundas em componentes da tocha para realização de revestimentos superficiais. Assim, o campo de aplicação da metodologia de MA desenvolvida no presente estudo é vasto. Tal metodologia deverá ser melhor estudada, compreendida, desenvolvida e, possivelmente, integrada a outros processos de produção (manufatura híbrida) para que todo o seu potencial no campo da fabricação mecânica possa ser explorado.

### **2.3 Manufatura híbrida**

Dentre os processos de fabricação de peças metálicas por MA, um dos mais empregados atualmente é o DED com alimentação de pó e fusão a laser. Um exemplo de equipamento que usa esta combinação é o LBMD (*Laser Based Metal Deposition*). Trata-se de um sistema no qual um cabeçote de deposição, formado pelo conjunto ótico do laser, bocal(is) de alimentação, tubulação de gás inerte e, em alguns casos, sensores, faz a deposição camada sobre camada em um substrato. O substrato pode ser tanto uma placa fina ou uma parcela da peça sobre a qual se deseja adicionar material. A deposição é controlada pelo movimento relativo entre a fixação do substrato e o cabeçote de deposição. No LBMD, a geração de camadas é feita através da deposição sucessiva de passes (*tracks*) de material lado a lado. Normalmente, a sobreposição entre passes adjacentes é da ordem de 25% da largura do passe e espessuras típicas deste processo são da ordem de 0,25 a 0,50mm (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

Várias empresas têm iniciado o desenvolvimento e a venda de estações de trabalho onde os cabeçotes de deposição podem ser trocados por pinças, como as utilizadas em centros de usinagem CNC (Controle Numérico Computadorizado). Assim, a partir da integração de

processos de MA, como o LBMD, com máquinas de usinagem CNC, está sendo possível unir processos de fabricação por adição e subtração de material em um mesmo equipamento. Esta possibilidade é ideal principalmente para a recuperação de peças com alto valor agregado. Essas máquinas que aliam processos aditivos e subtrativos de material em um mesmo equipamento são denominadas híbridas. No Brasil, atualmente, a fabricante Romi tem desenvolvido este tipo de equipamento híbrido. Tais equipamentos, da linha Romi D Hybrid, combinam operações de usinagem e MA e possuem as seguintes características:

- Minimização da quantidade de material descartado durante a fabricação nos processos aditivo e subtrativo;
- Economia na fabricação, principalmente de peças de elevado valor agregado;
- Baixo aporte térmico, minimizando trincas e distorções;
- Possibilidade de se executar gravações e texturizações superficiais e;
- Possibilidade de adição de diferentes tipos de materiais em diferentes regiões da peça, alterando mais facilmente as características mecânicas de suas partes conforme necessidade de projeto.

A Figura 46 mostra um modelo de equipamento híbrido da linha ROMI D HYBRID, modelo D-800.

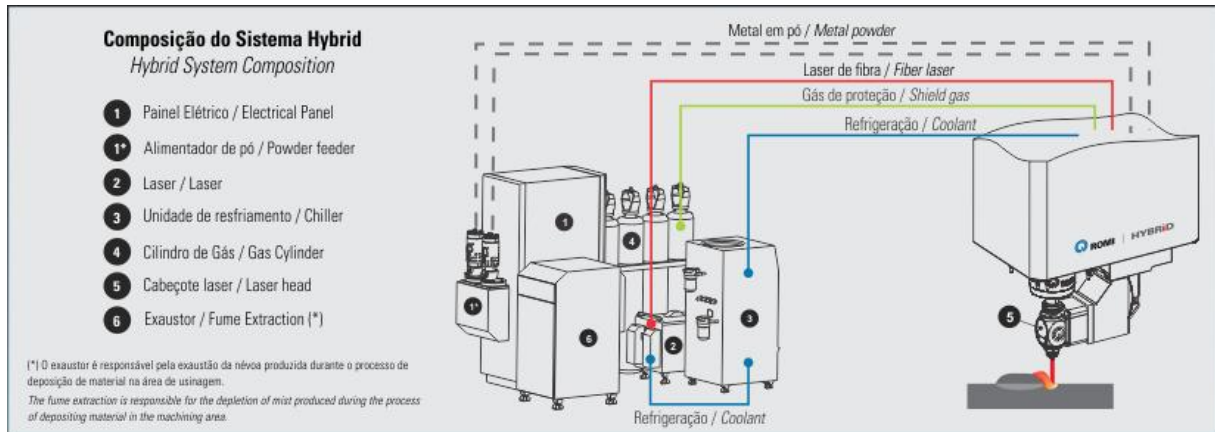
Figura 46 - ROMI D HYBRID modelo D-800.



Fonte: Retirado de Romi (2024).

A Figura 47 mostra alguns componentes básicos do sistema de alimentação e fusão de pó da linha ROMI D HYBRID.

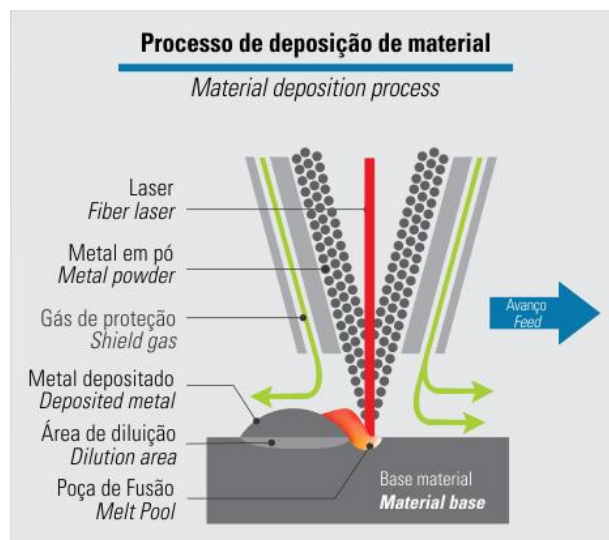
Figura 47 - Componentes básicos da linha ROMI D HYBRID.



Fonte: Retirado de Romi (2024).

A Figura 48 é uma representação esquemática de um cabeçote laser (cabeçote de deposição) na qual é possível observar a interação entre o feixe de laser, o pó metálico, o gás de proteção, a área de diluição e o material depositado conforme ocorre o avanço do cabeçote laser.

Figura 48 – Esquemático da operação de um cabeçote laser.



Fonte: Retirado de Romi (2024).

Uma nova possibilidade, que pode ser aberta pelo presente trabalho, é a utilização do processo GTAW como fonte de energia de fusão aliado ao emprego de pó metálico como

metal de adição para, no futuro, ser mais uma opção de equipamento de manufatura híbrida no mercado e a um custo inferior aos sistemas que utilizam laser como fonte de energia.

### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Como forma de avaliar a aplicabilidade do arco elétrico GTAW como fonte de energia de fusão para processos PBF e DED de MA, foi utilizado pó metálico de aço AISI H-13 como metal de adição.

A escolha do processo de soldagem GTAW como fonte de energia térmica se deu devido a seu custo de aquisição ser muito inferior comparado a outras formas de energia térmica como feixe de elétrons ou laser.

A opção pelo aço AISI H-13 se deve o fato de que este material é muito utilizado para fabricação de moldes de injeção a quente cuja superfície é severamente desgastada por fatores mecânicos e térmicos decorrentes da utilização (WANG et al., 2014). Dessa forma, um aumento na resistência ao desgaste aliada a formas de se recuperar de forma rápida e econômica as regiões danificadas desses moldes têm se tornado o objetivo de estudo de muitos pesquisadores, tais como Moreira et al (2023) e Abdel-latif et al (2021). Adicionalmente, devido às elevadas dureza, tenacidade e resistência ao desgaste do aço AISI H-13, a fabricação de moldes complexos através de métodos tradicionais, tais como fundição e forjamento demandam tempo e custos elevados (JUNG et al., 2019).

A opção pelo uso de pó metálico, além da disponibilidade comercial de variados materiais e granulometrias, é a versatilidade em termos de composição química que a combinação de diferentes materiais e proporções podem proporcionar em termos de características mecânicas através do desenvolvimento de novas ligas. De acordo com Pulugurtha et al (2009), os materiais com gradação funcional - FGM (*Functionally Graded Materials*), têm o potencial de oferecer soluções para limitações de projeto e fabricação tradicionais.

#### 3.1 Características construtivas e operacionais dos aparatos experimentais

Um total de quatro aparatos experimentais (protótipos) foram desenvolvidos, dos quais, os Aparatos 1 e 2 foram baseados no processo PBF e os Aparatos 3 e 4 foram baseados no processo DED. Tais aparatos, baseados em suas características construtivas, foram denominados como:

- Aparato 1 – GTAW com camada de pó sobre base fixa;
- Aparato 2 – GTAW com camada de pó sobre base móvel;

- Aparato 3 – GTAW com dosagem de pó por rosca transportadora sobre base móvel;
- Aparato 4 – GTAW com dosagem de pó por vibração mecânica sobre base móvel;

Todos os aparatos são formados basicamente pelas seguintes partes funcionais:

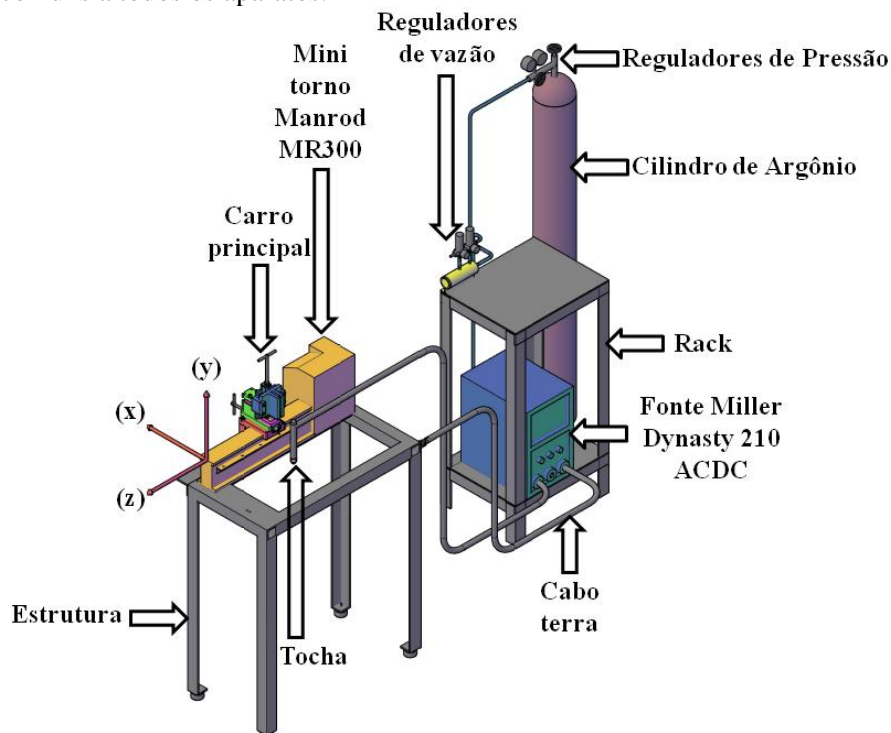
- Sistema de movimentação da tocha;
- Estação de soldagem GTAW e;
- Sistema de manipulação de pó.

Os componentes do sistema de movimentação da tocha são: mini torno Manrod modelo MR300, carro principal e estrutura.

Os componentes da estação de soldagem e acessórios são: fonte de soldagem Miller modelo Dynasty 210 ACDC, tocha, cabo terra, “rack”, cilindro de Argônio e reguladores de pressão e vazão.

O sistema de movimentação da tocha, a estação de soldagem GTAW e o sistema de coordenadas (x, y, z) comuns a todos os aparatos podem ser vistos na Figura 49.

Figura 49 – Sistema de movimentação da tocha, estação de soldagem GTAW e sistema de coordenadas comuns a todos os aparatos.



Fonte: Próprio autor.

Em todos os aparatos a velocidade de deslocamento da tocha deveria ser mensurada e apresentar repetibilidade durante os ensaios. Para isso, foram necessárias algumas adequações no carro principal do mini torno Manrod modelo MR300, de modo a garantir a movimentação da tocha de forma automática na direção (z), através do movimento do carro principal e de forma manual nos eixos (x) e (y), através dos carros transversal e vertical, respectivamente.

Além do sistema de movimentação da tocha, outra parte funcional comum a todos os aparatos consiste da estação de soldagem GTAW, a qual não necessitou adequações substanciais para operação.

A parte funcional ainda não descrita refere-se ao sistema de manipulação de pó. Esta parte funcional é onde se encontram as maiores diferenças construtivas e, por este motivo, para cada aparato serão descritas somente as diferenças nos sistemas de manipulação de pó, visto que o sistema de movimentação da tocha e a estação de soldagem GTAW são os mesmos.

### 3.1.1 Aparato 1 – GTAW com camada de pó sobre base fixa

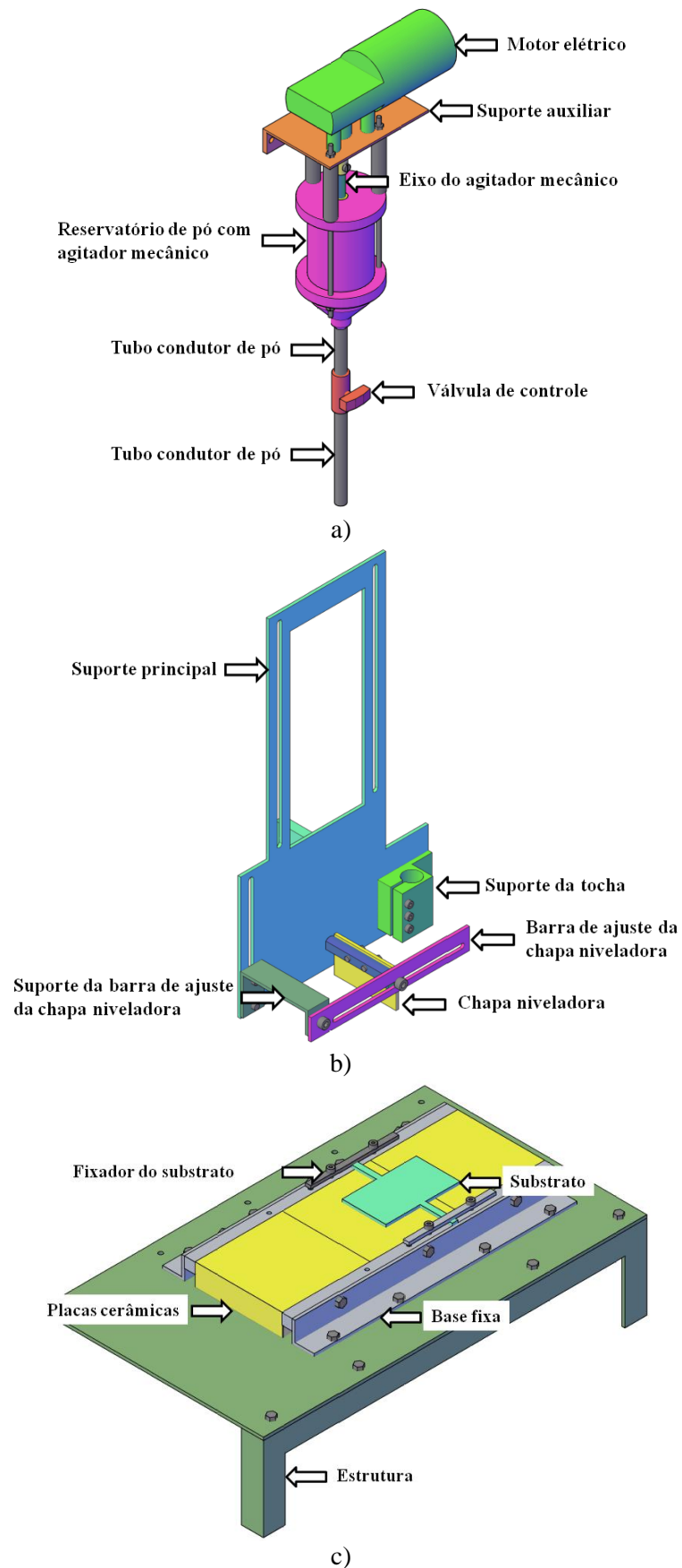
O primeiro aparato desenvolvido, denominado de “GTAW com camada de pó sobre base fixa”, trata-se de um equipamento que utiliza como base o processo PBF. Neste aparato o sistema de manipulação de pó foi subdividido nas seguintes partes:

- Sistema alimentador de pó;
- Sistema nivelador de pó e;
- Base fixa.

As Figuras 50 a), b) e c) mostram as partes funcionais do sistema de manipulação de pó separadamente.



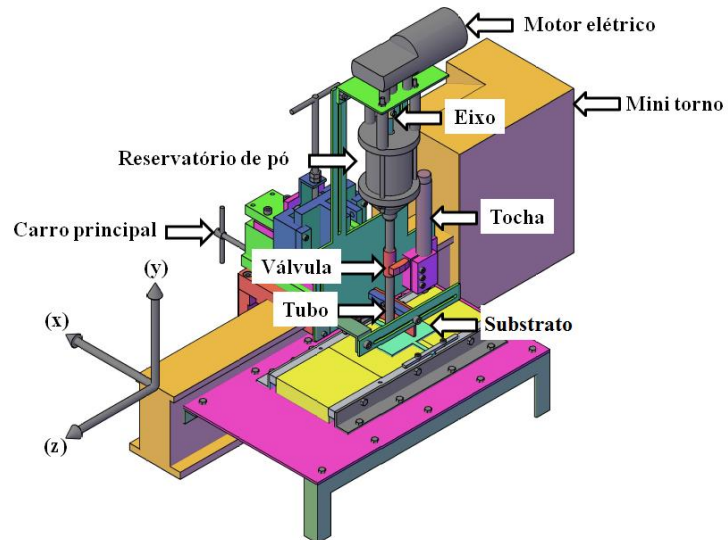
Figura 50 – Componentes do sistema de manipulação de pó: a) Sistema alimentador de pó, b) Sistema nivelador de pó e c) Base fixa.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 51 mostra uma visão geral do Aparato 1, destacando seus principais componentes.

Figura 51 – Principais componentes do Aparato 1.



Fonte: Próprio autor.

Através da Figura 52 é possível visualizar o Aparato 1 como construído.

Figura 52– Aparato 1 como construído.



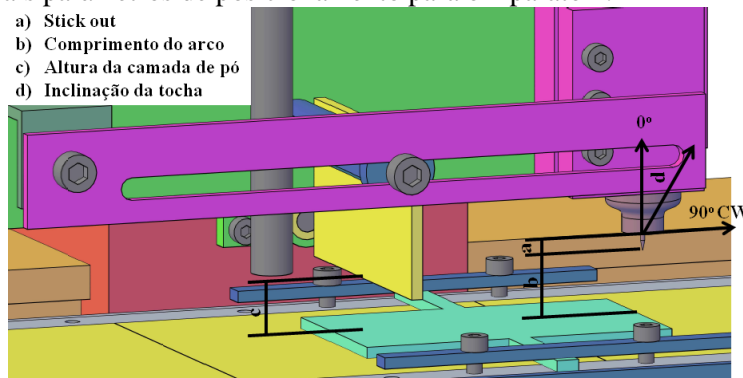
Fonte: Próprio autor.

### 3.1.1.1 Parâmetros de posicionamento para o Aparato 1

Parâmetros de posicionamento estão relacionados ao posicionamento relativo entre os diversos componentes que constituem os aparatos experimentais desenvolvidos. Assim, sua completa compreensão requer um melhor detalhamento uma vez que muitos destes componentes foram desenvolvidos exclusivamente para operar com seu respectivo aparato.

No caso do Aparato 1, os principais parâmetros de posicionamento estão representados na Figura 53.

Figura 53 – Principais parâmetros de posicionamento para o Aparato 1.



Fonte: Próprio autor.

### 3.1.1.2 Operação do Aparato 1

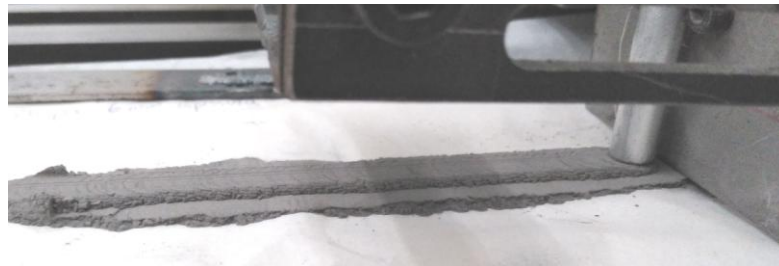
Para realizar os depósitos o Aparato 1 executa três etapas sucessivas:

- Etapa 1 – Deslocamento com alimentação de pó no sentido negativo do eixo (z);
- Etapa 2 – Deslocamento com formação da camada de pó seguida de fusão seletiva no sentido positivo do eixo (z);
- Etapa 3 - Deslocamento do suporte principal nos eixos (x) e/ou (y) e retorno à Etapa 1.

A Etapa 1 se inicia com a introdução de pó no interior do reservatório. A partir daí o carro principal é acionado pelo operador, movimentando o suporte principal a ele conectado. O suporte principal, o qual contém o sistema de manipulação de pó e a tocha, passa então a se deslocar na direção negativa do eixo (z). Durante este deslocamento o motor elétrico do sistema de alimentação de pó é atuado pelo operador e sua rotação é transferida por um eixo até chapas rotativas localizadas no interior do reservatório de pó. Estas chapas rotativas têm a

função de manter a carga de pó no interior do reservatório em constante movimentação, evitando que o pó se acumule e interrompa o fluxo em sua parte inferior. Por gravidade, o pó é conduzido desde a parte inferior do reservatório até a válvula de controle pelo interior de um tubo. A válvula de controle tem a função de auxiliar na correta dosagem de pó e interromper o fluxo quando necessário. A partir da válvula, o pó, ainda por gravidade, flui pelo interior de um segundo tubo até a face superior do substrato, onde se acumula – Figura 54.

Figura 54 – Acúmulo de pó na face superior do substrato.



Fonte: Próprio autor.

Terminada a alimentação de pó o motor elétrico do sistema de alimentação de pó é desligado e o movimento na direção negativa do eixo (z) é interrompido pela atuação do operador. A partir daí inicia-se a Etapa 2, onde o operador procede a inversão no sentido de deslocamento do carro principal e este passa a se deslocar no sentido positivo do eixo (z). Ao deslocar-se no sentido positivo do eixo (z) o pó acumulado sobre o substrato é nivelado pela atuação da chapa niveladora – Figura 55.

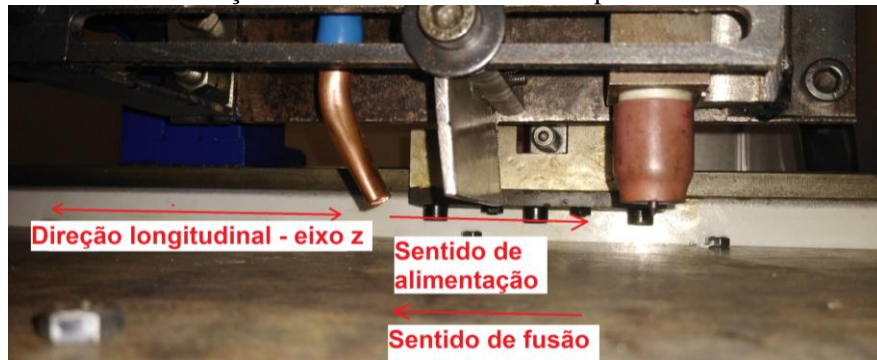
Figura 55 – Nivelamento da camada de pó.



Fonte: Próprio autor.

A medida em que o nivelamento de pó ocorre, a fonte GTAW é acionada em uma posição conveniente, de forma manual ou automática (através da instalação de “switches”), para que o processo de fusão seletiva se inicie. A Figura 56 mostra o sentido no qual o pó é alimentado sobre o substrato (sentido de alimentação) e o sentido no qual o pó é nivelado e seletivamente fundido (sentido de fusão).

Figura 56 – Sentidos de alimentação e de nivelamento/fusão do pó metálico.



Fonte: Próprio autor.

Ao final do percurso a fusão é interrompida, de forma manual ou automática (através de “switches”), e o depósito é obtido. A partir daí inicia-se a Etapa 3, a qual está relacionada à continuidade das deposições. Caso o suporte principal seja deslocado na direção (x), através do manípulo do carro transversal, será possível a geração de depósitos lado a lado. Caso o suporte principal seja deslocado no sentido positivo do eixo (y), através do manípulo do carro vertical, será possível a geração de depósitos empilhados.

No Aparato 1 foi utilizada uma base fixa para apoio e fixação do substrato. Esta base fixa é composta por estrutura, fixador do substrato, além de três placas cerâmicas (Alumina) com dimensões de 250mm x 150mm x 25mm. O objetivo da utilização das placas cerâmicas sob o substrato é o garantir um apoio que minimize o empenamento e dificultar ao máximo que o calor transferido à peça se dissipe pelo contato direto entre a face inferior do substrato e a estrutura da base fixa. Foram soldadas chapas delgadas nas laterais do substrato com as funções de permitir sua fixação, garantir aterramento elétrico e minimizar a transferência de calor para a estrutura metálica da base fixa. A Figura 57 mostra a base de fixa construída para o Aparato 1.

Figura 57 – Base fixa.



Fonte: Próprio autor.

### 3.1.2 Aparato 2 – GTAW com camada de pó sobre base móvel

O segundo aparato desenvolvido, denominado de “GTAW com camada de pó sobre base móvel”, trata-se de um equipamento que utiliza como base o processo PBF.

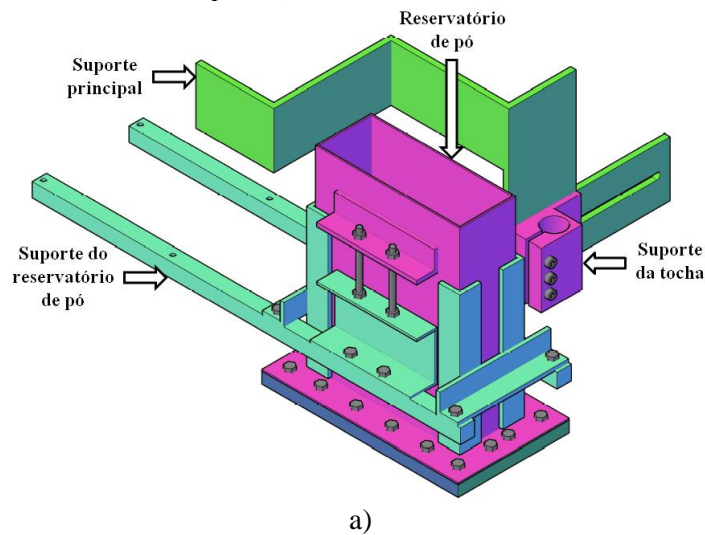
A necessidade de desenvolvimento deste aparato se deu devido a dificuldade em se fazer a contenção lateral do pó depositado utilizando-se o Aparato 1. Assim, no Aparato 2, o pó fica confinado lateralmente pelas paredes internas de um cilindro metálico (cilindro fixo) possibilitando maior regularidade na formação da camada de pó e, por consequência, otimizando a área disponível para deposição.

Neste aparato o sistema de manipulação de pó foi subdividido nas seguintes partes:

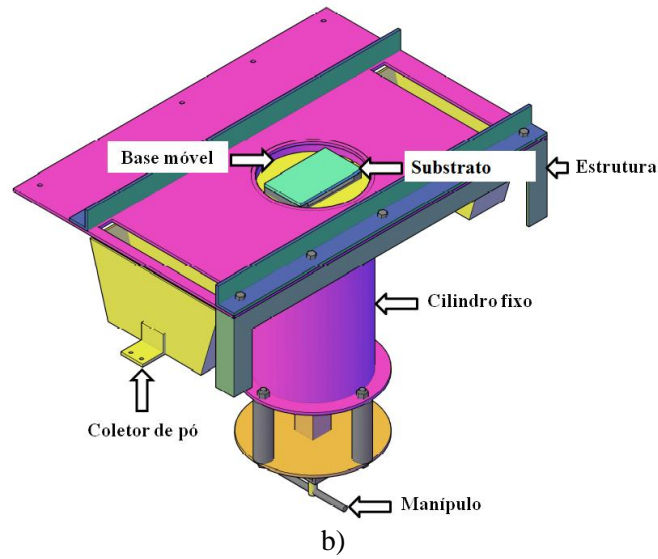
- Sistema alimentador de pó; e;
- Base móvel.

As Figuras 58 a) e b) mostram as partes funcionais do sistema de manipulação de pó separadamente.

Figura 58 – a) Sistema alimentador de pó e b) Base móvel.



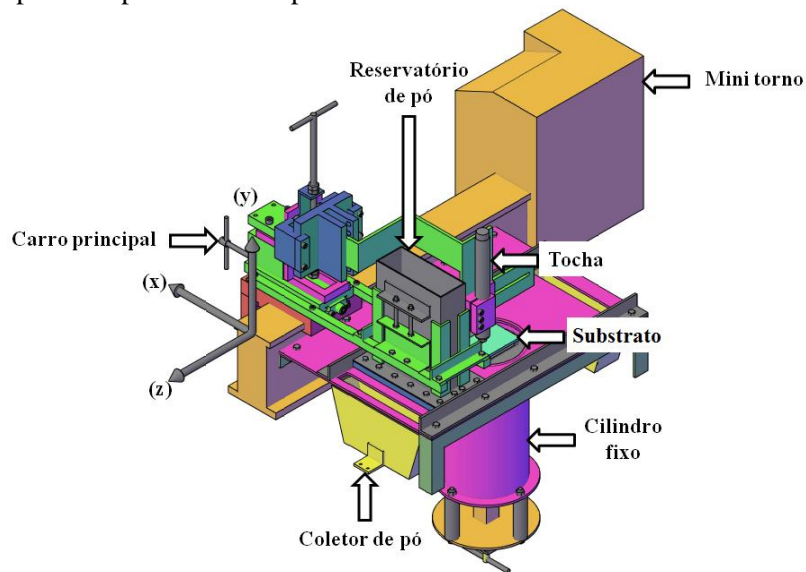




Fonte: Próprio autor.

A Figura 59 mostra uma visão geral do Aparato 2, destacando seus principais componentes.

Figura 59 – Principais componentes do Aparato 2.

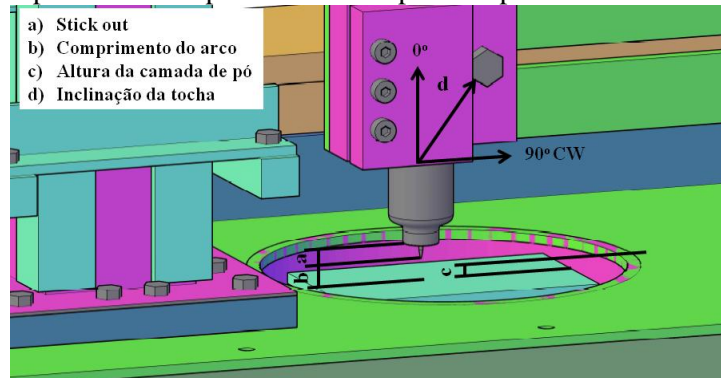


Fonte: Próprio autor.

### 3.1.2.1 Parâmetros de posicionamento para o Aparato 2

No caso do Aparato 2, os principais parâmetros de posicionamento estão representados na Figura 60.

Figura 60 – Principais parâmetros de posicionamento para o Aparato 2.



Fonte: Próprio autor.

### 3.1.2.2 Operação do Aparato 2

Para possibilitar a deposição, foi desenvolvido um mecanismo o qual atuava em 2 (duas) etapas sucessivas:

- Etapa 1 – Deslocamento com formação da camada de pó em ambos os sentidos do eixo (z) seguido de fusão seletiva somente no sentido positivo do eixo (z);
- Etapa 2 – Deslocamentos do suporte principal no eixo (x) e/ou da base móvel no eixo (y) e retorno a Etapa 1.

A Etapa 1 se inicia com a introdução de pó na parte superior do reservatório de pó. Durante a movimentação do carro principal, no sentido negativo do eixo (z), por gravidade, o pó flui do interior do reservatório para a superfície do substrato, preenchendo, inclusive, qualquer espaço vazio entre o suporte do corpo de prova e a parede interna do cilindro fixo – Figura 61.

Figura 61 – Alimentação de pó.

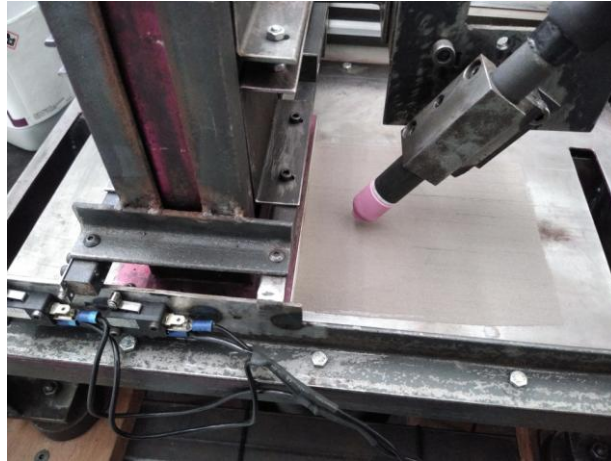


Fonte: Próprio autor.



Ao final do curso do carro principal no sentido negativo do eixo (z) o movimento é interrompido e invertido pelo operador, retornando em sentido contrário (sentido positivo do eixo z) onde a camada de pó sobre o substrato é nivelada, estando apta a ser fundida seletivamente pelo arco elétrico GTAW – Figura 62.

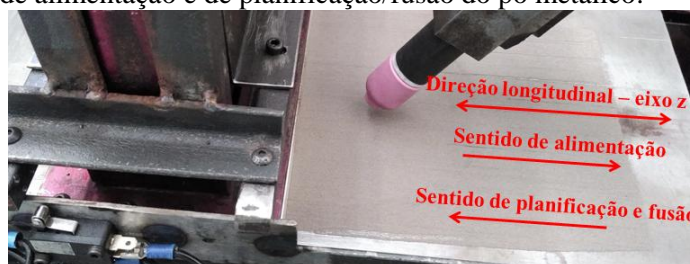
Figura 62 – Nivelamento da camada de pó seguido de fusão seletiva.



Fonte: Próprio autor.

A fonte GTAW pode ser acionada de forma manual ou automática (através da instalação de “switches”). A Figura 63 mostra o sentido no qual o pó é alimentado sobre o substrato (sentido de alimentação) e o sentido no qual o pó é nivelado e posteriormente fundido (sentido de fusão).

Figura 63 – Sentidos de alimentação e de planificação/fusão do pó metálico.



Fonte: Próprio autor.

Ao final do percurso no sentido positivo do eixo (z) a fusão é interrompida, de forma manual ou automática (através de “switches”), e um depósito é obtido. A partir daí inicia-se a Etapa 2, a qual está relacionada à continuidade das deposições. Caso o suporte principal seja deslocado na direção (x), através do manípulo do carro transversal, será possível a geração de depósitos lado a lado. Caso a base móvel seja deslocada no sentido negativo do eixo (y),

através de seu manipulador, será possível a geração de depósitos empilhados. Ao final de cada trajetória executada no eixo (z) o excesso de pó é coletado pelos coletores de pó para que o operador dê a correta destinação. O problema da dificuldade de manutenção do nivelamento da camada de pó foi resolvido no Aparato 2, porém, ainda era observada a presença de “ballings”, que são pequenas porções de pó fundidas mas não totalmente anexadas à poça de fusão (SVETLIZKY et al., 2021).

De acordo com Gu e Shen (2009), “ballings” são os defeitos mais comumente encontrados no processo DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*), o qual é baseado no processo PBF cuja fonte de energia de fusão é o feixe de laser. Para Tolochko et al (2004), o processo de formação de “ballings” em processos SLS (*Selective Laser Sintering*) está associado a parâmetros de irradiação do laser, espessura da camada de pó e material do substrato. Niu e Chang (1999) afirmam que o processo de formação de “ballings” é decorrente da influência do gradiente térmico entre a parte central e a parte lateral da poça de fusão sobre a tensão superficial do metal fundido. Assim, quanto maior a temperatura do metal líquido menor a sua tensão superficial e vice-versa. Como a região mais afastada do centro da poça de fusão recebe uma menor concentração de energia, a temperatura do metal fundido é menor e, conseqüentemente, sua tensão superficial é maior. Portanto, foram atribuídas como possíveis causas de formação dos “ballings” a presença de uma quantidade excessiva de pó nas laterais da poça de fusão somada ao fato de que nessa região o arco elétrico GTAW é menos concentrado. Assim, como haveria grande dificuldade em limitar a presença de pó nas laterais da poça empregando-se o processo PBF, a solução encontrada foi desenvolver um terceiro aparato experimental, agora baseado no processo DED.

### 3.1.3 Aparato 3 – GTAW com dosagem de pó por rosca transportadora sobre base móvel

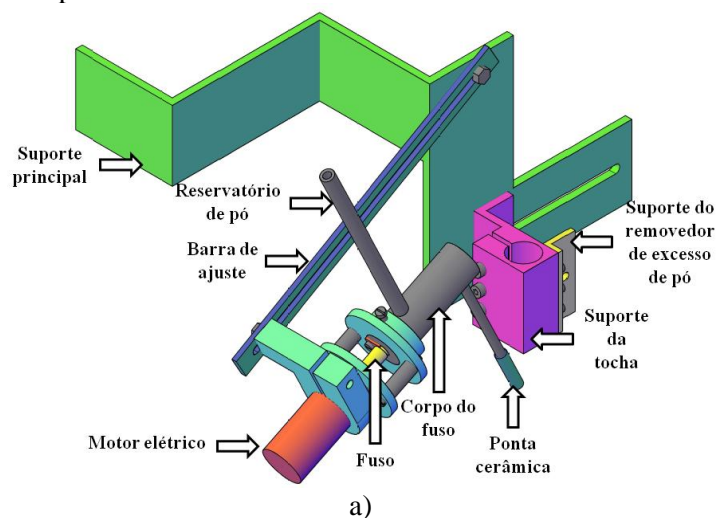
O terceiro aparato desenvolvido, denominado de “GTAW com dosagem de pó por rosca transportadora sobre base móvel”, trata-se de um equipamento que utiliza como base o processo DED.

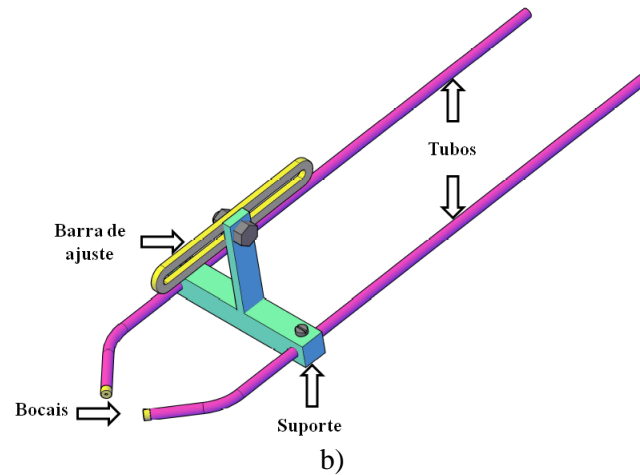
Neste aparato o sistema de manipulação de pó foi subdividido nas seguintes partes:

- Sistema alimentador de pó;
- Sistema removedor de excesso de pó;
- Base móvel.

No sistema alimentador de pó desenvolvido para o Aparato 3, o pó é introduzido pela parte superior do reservatório e adentra, por gravidade, ao corpo do fuso pelo orifício de entrada de pó. Quando no interior do corpo do fuso, pelo movimento rotativo exercido pelo motor elétrico sobre o fuso (rosca transportadora), o pó é movimentado em direção ao orifício de saída do corpo do fuso. Ao atingir o orifício de saída do corpo do fuso, por gravidade, o pó é conduzido até a região próxima à poça de fusão gerada pelo arco elétrico GTAW. Devido à temperatura da região próxima à poça de fusão ser muito elevada, há a necessidade da existência de uma ponta cerâmica, a qual é instalada na extremidade inferior do tubo condutor de pó. Outra parte integrante do sistema de manipulação de pó é o sistema removedor de excesso de pó. Este sistema é composto por tubos, bocais, barra de ajuste e suporte. Sua função é direcionar um fluxo controlado de Argônio sobre a face superior do substrato e evitar que o pó dosado pelo sistema de alimentação de pó se acumule. Este sistema removedor de excesso de pó foi desenvolvido na tentativa de evitar a formação de “ballings”. A parte complementar do sistema de manipulação de pó, denominada de base móvel, é a mesma do Aparato 2. Modificações no bocal da tocha de soldagem foram necessárias devido a presença da ponta cerâmica instalada na extremidade inferior do tubo condutor de pó e da necessidade desta em permanecer o mais próxima possível da região da poça de fusão. Para possibilitar a aproximação da ponta cerâmica da poça de fusão houve a necessidade de se gerar uma cavidade no bocal cerâmico da tocha. As Figuras 64 a) e b) ilustram o sistema alimentador com dosagem de pó por rosca transportadora e o sistema removedor de excesso de pó.

Figura 64 – a) Sistema alimentador com dosagem de pó por rosca transportadora e b) Sistema removedor de excesso de pó.

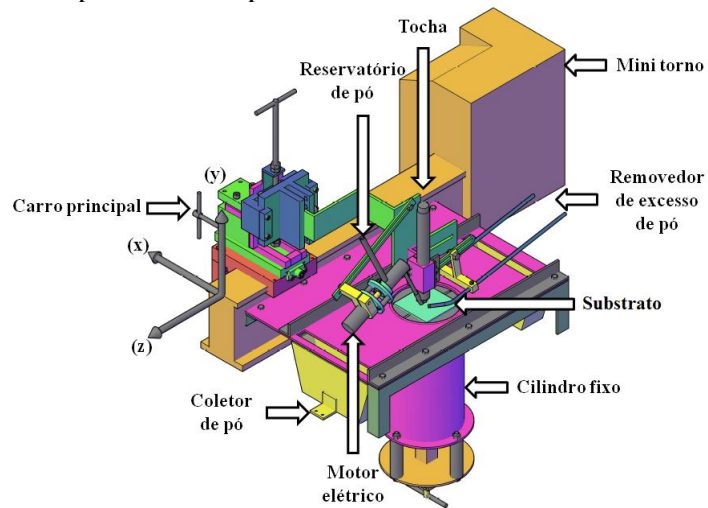




Fonte: Próprio autor.

A Figura 65 mostra o Aparato 3, destacando seus principais componentes.

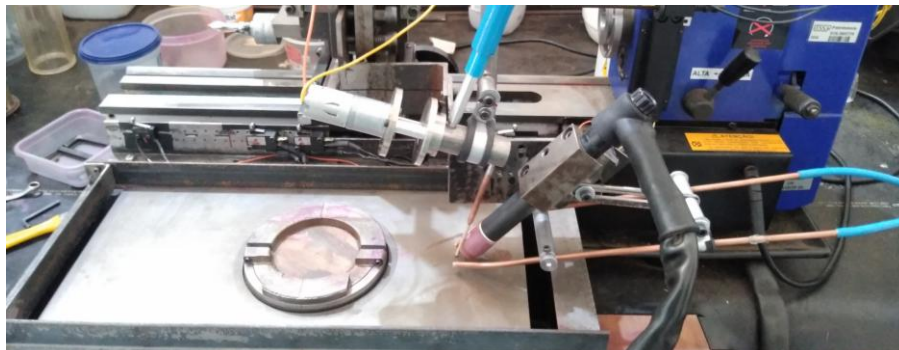
Figura 65 – Principais componentes do Aparato 3.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 66 representa uma imagem do Aparato 3 como construído.

Figura 66 – Aparato 3 como construído.

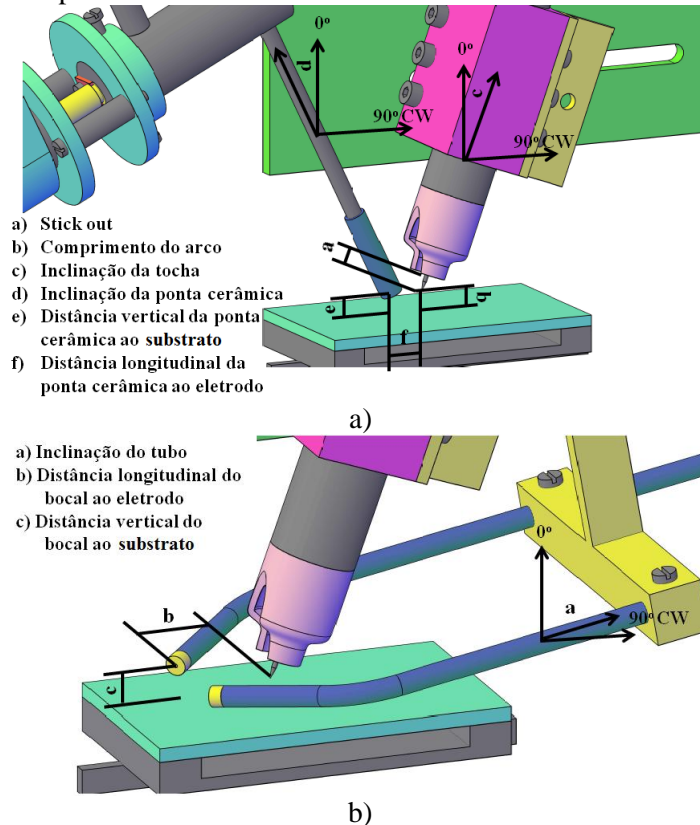


Fonte: Próprio autor.

### 3.1.3.1 Parâmetros de posicionamento para o Aparato 3

As Figuras 67 a) e b) ilustram os principais parâmetros de posicionamento para os sistemas alimentador e removedor de excesso de pó do Aparato 3.

Figura 67 – Principais parâmetros de posicionamento para: a) Sistema alimentador de pó e b) Sistema removedor de excesso de pó.



Fonte: Próprio autor.

### 3.1.3.2 Operação do Aparato 3

No Aparato 3 o processo de formação do(s) depósito(s) consiste em 2 (duas) etapas sucessivas:

- Etapa 1 – Deslocamento com alimentação de pó seguido de fusão seletiva no sentido positivo do eixo (z);
- Etapa 2 – Deslocamento do suporte principal no eixo (x) e/ou da base móvel no eixo (y) e retorno a Etapa 1.

A Etapa 1 se inicia com a introdução de pó na parte superior do reservatório. O passo seguinte é o deslocamento do carro principal através do comando do operador no sentido

negativo do eixo (z) até uma posição conveniente para início da deposição. Em seguida o operador comanda a reversão do sentido de deslocamento do carro principal. No carro principal estão acoplados, através do suporte principal, o sistema de alimentação de pó e a tocha. Assim, quando o carro principal inicia o movimento no sentido positivo do eixo (z), por meio de um comando do operador, o motor elétrico do fuso do sistema alimentador de pó é acionado e a dosagem de pó é iniciada. A rotação do fuso tipo rosca transportadora, e, conseqüentemente, a dosagem de pó, pode ser ajustada dinamicamente por uma placa de controle de rotação do tipo PWM (*Pulse Width Modulation*). Iniciada a dosagem de pó o passo seguinte é o acionamento da fonte GTAW, que pode ser manual (através do operador) ou automática (via instalação de “switches”). Terminada a execução do depósito, o arco elétrico e o movimento na direção positiva do eixo (z) são interrompidos. A Figura 68 mostra o sentido no qual o pó é alimentado e fundido (sentido de alimentação e fusão).

Figura 68 – Sentidos de alimentação e fusão do pó metálico.



Fonte: Próprio autor.

A Etapa 2 está relacionada à continuidade das deposições. Caso o suporte principal seja deslocado na direção (x), através do manípulo do carro transversal, será possível a geração de depósitos lado a lado. Caso a base móvel seja deslocada no sentido negativo do eixo (y), através de seu manípulo, será possível a geração de depósitos empilhados.

O problema da presença de “ballings” foi resolvido com o Aparato 3, contudo, o sistema de alimentação de pó por rosca transportadora apresentava dosagem irregular de pó, gerando pontos com variações significativas de altura nos depósitos. Na tentativa de resolver este problema foi desenvolvido um novo sistema de alimentação de pó, dando origem ao Aparato 4.

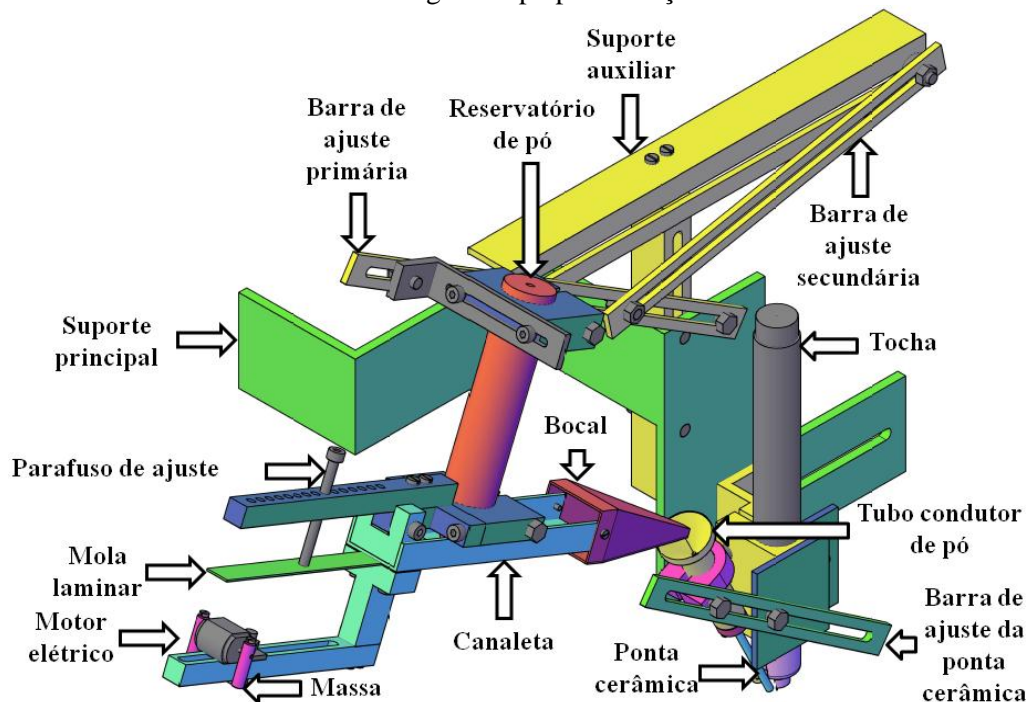


### 3.1.4. Aparato 4 – GTAW com dosagem de pó por vibração mecânica sobre base móvel

O quarto aparato desenvolvido, denominado de “GTAW com dosagem de pó por vibração mecânica sobre base móvel”, utilizou como base o processo DED. A necessidade de desenvolvimento deste aparato ocorreu devido à dificuldade em se conseguir uma dosagem de pó constante para valores de vazão de pó na faixa de 0,3 à 3g/min. Para esta faixa de vazões, o sistema por rosca transportadora apresentava grandes variações na vazão de pó, que ocorriam devido à baixa rotação do fuso para movimentação de pó no interior do corpo do fuso. Essa baixa rotação fazia com que o pó fosse se acumulando paulatinamente próximo ao orifício de saída no corpo do fuso e, quando esse acúmulo de pó perdia a capacidade de se manter coeso, ocorria uma dosagem excessiva em um pequeno intervalo de tempo, gerando pontos de maior acúmulo de material fundido nos depósitos.

Dessa forma, a única diferença construtiva entre o Aparato 3 e o Aparato 4 está na substituição do sistema alimentador com dosagem de pó por rosca transportadora pelo sistema alimentador com dosagem de pó por vibração mecânica, permanecendo todas as demais partes do sistema de manipulação de pó (sistema de remoção de excesso de pó e base móvel) presentes no Aparato 3 inalteradas. A Figura 69 mostra o sistema alimentador com dosagem de pó por vibração mecânica utilizado no Aparato 4.

Figuras 69 – Sistema alimentador com dosagem de pó por vibração mecânica.



Fonte: Próprio autor.

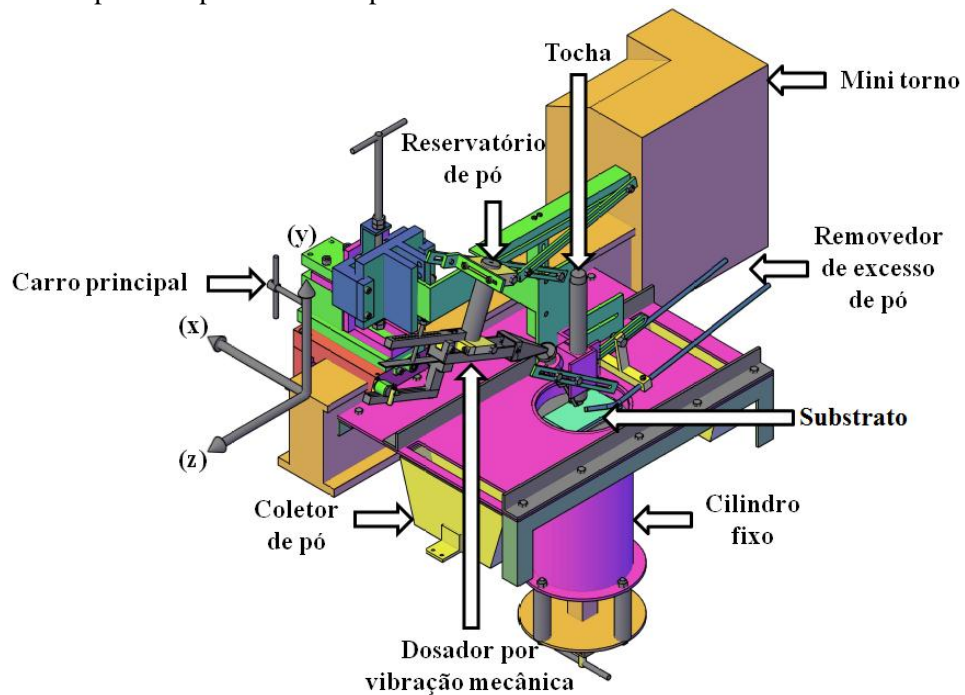
Neste sistema alimentador o pó é introduzido pela parte superior do reservatório de pó cuja extremidade inferior se assenta sobre a face interna da canaleta. Quando em repouso (sem estar sujeito a vibrações oriundas da rotação das massas desbalanceadoras) uma mola laminar pressiona a parte interna da canaleta contra a extremidade inferior do reservatório de pó onde encontra-se instalado um “*o-ring*”. A função deste “*o-ring*” é auxiliar na vedação, propiciando a contenção do pó no interior do reservatório quando o sistema está em repouso. Quando o motor elétrico é acionado pelo operador e tem sua rotação alterada, via placa de controle de rotação do tipo PWM, é gerada uma vibração provocada pela rotação das massas desbalanceadoras fixadas nas extremidades do eixo do motor elétrico, vibração esta transferida para a canaleta, a qual sofre pequenos deslocamentos de forma a se criar uma abertura entre a face interna da canaleta e a extremidade inferior do reservatório de pó, possibilitando o escoamento de uma pequena parcela de pó até o bocal.

A função do bocal é a de guiar o fluxo de pó que escoar pela canaleta para o centro da abertura superior do tubo condutor de pó, logo, o bocal trata-se de mais um artifício para ajuste do sistema dosador em relação ao tubo condutor de pó. Uma vez no interior do tubo condutor o pó é guiado até a região onde se localiza a poça de fusão para fundir-se e formar o depósito. Devido a temperatura da região próxima à poça de fusão ser muito elevada, há a necessidade de uma ponta cerâmica, a qual é instalada na extremidade inferior do tubo condutor de pó e fixada por atrito com auxílio de um sistema flange e “*o-ring*”. Assim, a função do flange e “*o-ring*” é a de criar uma condição de fácil fixação da ponta cerâmica ao tubo condutor de pó visando facilidade para substituição.

Em decorrência do fato de o conjunto de dosagem de pó produzir vibração, percebeu-se a necessidade de aumentar a rigidez da barra de ajuste primária, pois, sua esbelteza influenciava a constância da dosagem de pó. Dessa forma, foi desenvolvido um suporte auxiliar e adicionada uma barra de ajuste secundária com a finalidade de aumentar a rigidez da parte estática do dosador. Outro componente que necessitou ser modificado foi o suporte da barra de ajuste do sistema removedor de excesso de pó, que agora também acumula a função de ser o suporte da barra de ajuste da ponta cerâmica. A Figura 70 mostra o Aparato 4, destacando seus principais componentes.



Figura 70 – Principais componentes do Aparato 4.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 71 representa uma imagem do Aparato 4 como construído.

Figura 71 – Aparato 4 como construído.

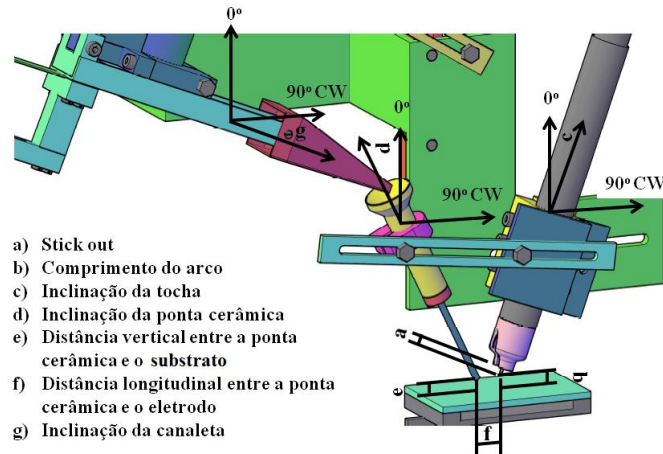


Fonte: Próprio autor.

#### 3.1.4.1 Parâmetros de posicionamento para o Aparato 4

A Figura 72 mostra os principais parâmetros de posicionamento do sistema dosador de pó por vibração mecânica desenvolvido para o Aparato 4. Os parâmetros de posicionamento para o sistema de remoção de excesso de pó são os mesmos do Aparato 3.

Figura 72 – Principais parâmetros de posicionamento para o sistema alimentador de pó por vibração mecânica.



Fonte: Próprio autor.

### 3.1.4.2 Operação do Aparato 4

Quanto à operação, o Aparato 4 segue a mesma lógica do Aparato 3.

## 3.2 Parâmetros gerais de ensaio

Durante os ensaios com os quatro aparatos experimentais desenvolvidos, alguns parâmetros se mantiveram inalterados, os quais estão listados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de processo comuns a todos os ensaios realizados.

Parâmetro	Especificações
Material do substrato	Aço AISI 1020
Metal de adição	Aço AISI H-13
Granulometria do metal de adição	53 à 150µm
Tipo de tocha	“straight” com refrigeração
Tipo de corpo fixador	Gas Lens
Polaridade	CC(-)
Tipo de eletrodo	EWTh-2
Ângulo de afiação do eletrodo	37°
Gás de proteção/remoção de excesso de pó	Argônio

Fonte: Próprio autor.

A composição química do material do substrato está detalhada na Tabela 9.

Tabela 9 – Composição química do material do substrato – AISI 1020.

%C		%Mn		%P	%S
min	máx	min	máx	máx	máx
0,18	0,23	0,30	0,60	0,03	0,35

Fonte: Adaptado de ASTM A 1040-10 (2010).

O metal de adição utilizado foi o AISI H-13, com granulometria variando de 53 - 150µm, lote: 2272336, do fabricante Höganäs Belgium SA. Sua composição química está detalhada na Tabela 10.

Tabela 10 – Composição química do metal de adição AISI H-13.

%C		%Mn		%P	%S	%Si		%Cr		%V		%Mo	
min	máx	min	máx	máx	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
0,32	0,45	0,20	0,60	0,03	0,03	0,80	1,25	4,75	5,50	0,80	1,20	1,10	1,75

Fonte: Adaptado de ASTM A681 (1994).

A tocha GTAW do tipo reta (*straight*) é adequada para sistemas automatizados, pois seu corpo cilíndrico de geometria regular permite a adaptação de dispositivos de fixação em sistemas de deslocamento automatizados, tais como "tartarugas" de soldagem e braços robóticos.

O corpo fixador do tipo *Gas Lens*, combinado a bocais de grande diâmetro ( $\geq 7$ ), gera um escoamento do gás de proteção menos turbulento, de modo a interferir minimamente na alimentação de pó.

O uso da polaridade CC(-) e eletrodo EWTh-2 é indicada para soldagem DC de aços ao carbono, inoxidáveis, Níquel e Titânio – Tabela 5.

O ângulo de afiação do eletrodo utilizado nos experimentos foi de 37°, o que corresponde a uma altura da ponta do eletrodo de uma vez e meia seu diâmetro (1,5  $\phi$ ).

### 3.3 Parâmetros específicos de ensaio

Dadas as características construtivas e operacionais de cada aparato experimental, parâmetros específicos de deposição foram definidos e selecionados de acordo com o tipo e evolução de cada protótipo desenvolvido.

#### 3.3.1 Ensaios com o Aparato 1

Ensaios realizados com este aparato experimental compreenderam ensaios iniciais, ensaios em passe único e ensaios em passes empilhados (parede).

### 3.3.1.1 Ensaios iniciais

O objetivo de se realizar ensaios iniciais era o de avaliar características dimensionais e metalúrgicas dos depósitos obtidos com base no processo PBF usando arco GTAW combinado ao pó metálico como metal de adição. Os parâmetros de processo utilizados para os ensaios iniciais com o Aparato 1 estão contidos na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros específicos de processo utilizados para ensaios iniciais com o Aparato 1.

<b>Parâmetro</b>	<b>Especificações</b>
Dimensões do metal de base	(150 x 100 x 3,25) mm
Altura da camada de pó	1mm
Inclinação da tocha	0°
<i>Stick out</i>	4mm
Comprimento do arco	4,5mm
Vazão de Argônio	8 l/min
Número do bocal cerâmico	7
Diâmetro do eletrodo	2,4mm
Corrente	50A
Velocidade da tocha	0,603mm/s

Fonte: Próprio autor.

### 3.3.1.2 Ensaios em passe único

Uma vez constatado que a utilização do processo GTAW para realizar a fusão de pó metálico era factível, passou-se a investigar quais parâmetros eram ideais para a obtenção de depósitos uniformes. Assim, a próxima etapa da pesquisa consistiu em elaborar uma matriz de experimentos com um total de 9 Corpos de prova (CDP's) em passe único. Os parâmetros foram divididos em dois conjuntos: constantes e variáveis. Os parâmetros constantes e variáveis utilizados para a execução dos 9 CDP's estão resumidos nas Tabelas 12 e 13, respectivamente.

Tabela 12 - Parâmetros constantes utilizados para a deposição dos 9 CDP's em passe único.

<b>Parâmetro</b>	<b>Especificações</b>
Dimensões do metal de base	(100 x 20 x 3,25)mm
Altura da camada de pó	1.25mm
Inclinação da tocha	0°
<i>Stick out</i>	4mm
Comprimento do arco	2,75mm
Vazão de Argônio	7 l/min
Número do bocal cerâmico	7
Diâmetro do eletrodo	2,4mm
Comprimento médio do cordão	60mm

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13- Parâmetros variáveis utilizados para a deposição dos 9 CDP's em passe único.

Parâmetro	Especificações								
	0,625			0,794			0,943		
Velocidade da tocha (mm/s)									
Corrente (A)	50	60	70	50	60	70	50	60	70
Identificação do CDP	1	7	4	2	8	5	3	9	6

Fonte: Próprio autor.

Após a deposição os corpos de prova (CDP's) foram seccionados na parte central e realizadas medidas de largura e altura.

### 3.3.1.3 Ensaios com passes empilhados (parede)

Terminada a fase de avaliação dos parâmetros de deposição, o passo seguinte foi a geração de uma estrutura formada por vários depósitos empilhados (parede).

O depósito denominado CDPP-01 (Corpo de Prova Parede-01) consiste de 10 passes empilhados. Os parâmetros de execução do CDPP-01 estão resumidos na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros utilizados para a deposição do CDPP-01.

Parâmetro	Especificações
Dimensões do metal de base	(100 x 20 x 3,25)mm
Altura da camada de pó	1,25mm
Inclinação da tocha	0°
<i>Stick out</i>	4mm
Comprimento do arco	2,75mm
Vazão de Argônio	7 l/min
Número do bocal cerâmico	7
Diâmetro do eletrodo	2,4mm
Número de passes sobrepostos	10
Corrente	60A
Velocidade da tocha	0,625mm/s

Fonte: Próprio autor.

Terminada a deposição e feita a limpeza, foram realizadas medidas de altura e largura em 6 pontos distintos do CDPP-01 no sentido positivo do eixo (z) partindo do ponto de abertura do arco.

Após a análise dimensional, o CDPP-01 foi seccionado transversalmente na região central, lixado, polido e atacado com Nital 2% para análises metalográficas.

Foram realizadas 11 medidas de dureza percorrendo a altura total da parede em intervalos de 1mm desde o substrato até um recuo de 1mm do topo do depósito. Para realizar as medidas foi utilizado um microdurômetro marca Buehler, modelo 1600-6300, e a carga

aplicada foi de 50gf. Este equipamento e carga serão os mesmos utilizados para medidas de dureza nos ensaios que seguem.

### 3.3.2 Ensaio com o Aparato 2

Com a finalidade de melhorar a qualidade dos depósitos e resolver o problema de perda de planicidade da camada de pó que ocorria no Aparato 1, um segundo aparato foi desenvolvido e denominado de GTAW com camada de pó sobre base móvel. Como o objetivo principal deste equipamento era promover a manutenção da planicidade da camada de pó durante todo o processo de deposição e já se ter disponível alguns parâmetros base para deposição, maior atenção foi dada para a execução de passes empilhados. Assim, foram escolhidos um conjunto de parâmetros para a execução de 10 passes empilhados, chamado de CDPP-02 (Corpo de Prova Parede-02). A Tabela 15 contém os parâmetros utilizados para a realização do CDPP-02.

Tabela 15 - Parâmetros utilizados para a deposição do CDPP-02.

<b>Parâmetros</b>	<b>Especificações</b>
Dimensões do metal de base	(85 x 50 x 3,25)mm
Altura da camada de pó	1,75mm
Inclinação da tocha	10,5° no sentido horário (CW)
<i>Stick out</i>	5mm
Comprimento do arco	2,5mm
Vazão de Argônio	7 l/min
Número do bocal cerâmico	7
Diâmetro do eletrodo	2,4mm
Número de passes sobrepostos	10
Corrente	60A
Velocidade da tocha	0,750mm/s

Fonte: Próprio autor.

Terminada a deposição, o CDPP-02 foi seccionado a 12mm, 24mm, 36mm e 48mm no sentido positivo do eixo (z) tomando como referência o ponto de abertura do arco. Após os cortes realizou-se o embutimento a quente, lixamento, polimento e ataque químico com Nital 5%. Após ataque químico e utilizando o microscópio a laser marca Olympus, modelo OLS 4100, foram obtidas medidas de altura, penetração e largura máximas para cada secção do CDPP-02. Este mesmo equipamento foi utilizado para obtenção imagens e dimensões nos ensaios que seguem. Terminada a fase de análise dimensional, foram realizadas medidas de dureza em cada secção do CDPP-02 desde o metal de base até um recuo de 0,0635mm do topo da parede com um distanciamento de 0,125mm entre medidas.

### 3.3.3 Ensaios com o Aparato 3

Durante a utilização do Aparato 2 o problema de perda de planicidade da camada de pó foi corrigido, porém a presença de “ballings” nas laterais do depósito ainda persistia. O que se sabia era que a formação de “ballings” estava associada a dois fatores atuando conjuntamente: o excesso de pó intrínseco ao processo PBF e a baixa concentração de energia em uma região mais afastada do centro do arco elétrico. Como o processo de aumentar a concentração do arco elétrico implicava em diminuir a distância da ponta do eletrodo à camada de pó, a qual já era pequena, a probabilidade de contaminação da ponta do eletrodo com pó metálico iria aumentar. Assim, optou-se por diminuir a disponibilidade de pó metálico o que conduziu a mudança de processo de PBF para DED e levou ao desenvolvimento do Aparato 3 chamado de GTAW com dosagem de pó por rosca sem fim sobre base móvel. Após o desenvolvimento do Aparato 3, vários ensaios foram feitos para avaliação do protótipo. A Tabela 16 contém os parâmetros de deposição utilizados para a execução de passes único e lado a lado, obtidos com o Aparato 3.

Tabela 16 - Parâmetros utilizados para a deposição de passes único e lado a lado com o Aparato 3.

<b>Parâmetros</b>	<b>Especificações</b>
Dimensões do metal de base	(85 x 50 x 3,25) mm
Inclinação da tocha “Stick out”	40° no sentido horário (CW) 10mm
Comprimento do arco	4mm
Vazão de Argônio	7l/min
Número do bocal	8 (com entalhe)
Diâmetro do eletrodo	1mm
Número de passes únicos	1
Número de passes lado a lado	10
Inclinação da ponta cerâmica	18° no sentido horário (CW)
Distância vertical da ponta cerâmica ao substrato	5mm
Distância longitudinal da ponta cerâmica ao eletrodo	4 mm
Inclinação dos tubos de remoção de excesso de pó	70° no sentido horário (CW)
Distância longitudinal dos bocais de remoção de excesso de pó ao eletrodo	13mm
Distância vertical dos bocais de remoção de excesso de pó ao substrato	6mm
“Overlapping”	25%
Comprimento médio dos depósitos	45mm
Vazão de gás do sistema removedor de excesso de pó	6l/min
Rotação do fuso	4RPM
Velocidade de deslocamento da tocha	0,47mm/s

Fonte: Próprio autor.

Durante os ensaios com o Aparato 3 observou-se que a taxa de dosagem de pó fornecida pelo sistema de alimentação por rosca sem fim era irregular e dificultava a geração de depósitos lado a lado pelo fato de gerar pontos com altura irregular, o que contribuía para o desvio do arco elétrico. Assim um novo sistema de alimentação por vibração mecânica foi desenvolvido na tentativa de melhorar a uniformidade na dosagem de pó e dando origem ao Aparato 4.

### 3.3.4 Ensaio com o Aparato 4

Uma vez identificada a necessidade de um controle preciso da vazão mássica de pó durante a deposição, dada sua grande influência sobre o aspecto superficial do depósito, um novo padrão de controle da dosagem de pó foi estabelecido para ser utilizado no Aparato 4. Para tanto, utilizou-se uma balança de precisão marca Marte, modelo AD200, e um cronômetro marca Casio, modelo Stopwatch hs-80tw. Assim, antes de cada deposição, eram realizadas de 10 medidas de massa fornecida pelo sistema de dosagem de pó por vibração mecânica dentro do intervalo de 1 minuto. A partir desses dados calculava-se um valor médio de vazão mássica que era a base para a realização de deposições e posterior registro. A Tabela 17 contém uma série de 10 medidas feitas utilizando-se o sistema de dosagem de pó por vibração mecânica dentro de um intervalo de tempo de 1 minuto.

Tabela 17 – Vazão mássica de pó obtidas com o sistema de dosagem de pó por vibração mecânica.

<b>Medida</b>	<b>Vazão (g/min)</b>
1	1,920
2	2,092
3	2,010
4	2,055
5	1,722
6	1,943
7	2,272
8	2,223
9	2,216
10	2,206
Média	2,066±0,172

Fonte: Próprio autor.

#### 3.3.4.1 Ensaio em passes único, empilhados e lado a lado

A Tabela 18 contém a identificação dos 9 CDP's, produzidos utilizando-se o Aparato 4, em função do tipo de depósito e corrente elétrica.



Tabela 18 – Identificação dos 9 CDP's em função do tipo de depósito e corrente elétrica.

		Identificação dos CDP's		
		Passé único	Empilhado	Lado a lado
Corrente	28A	1	2	3
	30A	4	5	6
	32A	7	8	9

Fonte: Próprio autor.

No caso de depósitos lado a lado, um fator de grande influência para a geração de uma superfície com recobrimento uniforme foi a definição do “*overlapping*”. Após vários ensaios chegou-se a conclusão que o valor de “*overlapping*” o qual apresentou melhores resultados acerca da uniformidade de recobrimento do substrato foi de 50%. De acordo com Imran et al (2011), em processos DMD (Direct Metal Deposition), valores de “*overlapping*” próximos de 50% produzem camadas contínuas. “*Overlappings*” de 50% também foram utilizados em experimentos realizados por Yellup (1995). A Tabela 19 contém os parâmetros constantes para as deposições dos 9 CDP's utilizando o Aparato 4.

Tabela 19 Parâmetros constantes para os depósitos em passe único, empilhados e lado a lado com correntes de 28A, 30A e 32A.

Parâmetros	Especificações
Dimensões do metal de base	(85 x 25,4 x 3,25) mm
Inclinação da tocha “ <i>Stick out</i> ”	20° no sentido horário (CW) 10mm
Comprimento do arco	4mm
Vazão de Argônio	4l/min
Número do bocal	8 (com entalhe)
Diâmetro do eletrodo	1mm
Número de passes únicos	3
Número de passes lado a lado	5
Número de passes empilhados	5
Inclinação da ponta cerâmica	30° no sentido anti-horário (CCW)
Distância vertical da ponta cerâmica ao substrato	5mm
Distância longitudinal da ponta cerâmica ao eletrodo	4 mm
Inclinação da canaleta	113° no sentido anti-horário (CCW)
Inclinação dos tubos de remoção de excesso de pó	70° no sentido horário (CW)
Distância longitudinal dos bocais de remoção de excesso de pó ao eletrodo	13mm
Distância vertical dos bocais de remoção de excesso de pó ao substrato	6mm
“ <i>Overlapping</i> ”	50%
Comprimento médio dos depósitos	40mm
Vazão de gás do sistema removedor de excesso de pó	6l/min
Vazão mássica de pó	0,7g/min
Velocidade de deslocamento da tocha	0,44mm/s

Fonte: Próprio autor.

Os depósitos foram cortados para análise a distâncias de: 5mm, 15mm, 25mm e 35mm no sentido positivo do eixo (z) tomando-se como referência o ponto de abertura do arco. Na sequência as amostras foram embutidas a quente, lixadas, polidas e atacadas quimicamente com Nital 2%.

Após ataque químico valores de altura, largura, penetração e áreas foram medidos em cada uma das quatro secções dos 9 CDP's. A partir destes valores foi calculado um valor médio de altura, largura, penetração e diluição representativo de cada CDP. Em seguida esses valores médios foram plotados em função da corrente para cada tipo de depósito.

Com o objetivo de se avaliar aspectos metalúrgicos dos 9 CDP's, além de análises metalográficas foram realizadas medidas de dureza Vickers nas secções localizadas a 15mm a partir do ponto de abertura do arco no sentido positivo do eixo (z) de cada CDP. Os valores de dureza foram medidos na linha de centro do corte transversal, iniciando no substrato até um recuo de 0,125mm do topo do depósito. Os intervalos entre indentações foram de 0,125mm para passes único e lado a lado e 0,25mm para passes sobrepostos.

#### 3.3.4.2 Ensaios em multi camadas

De posse de parâmetros base obtidos em ensaios anteriores foi gerado um depósito multi camadas denominado CDPPR-01 (Corpo de Prova Prismático-01) e constituído por 10 camadas sobrepostas a 90°. Cada camada foi formada por 10 passes lado a lado, totalizando 100 passes. Os parâmetros de deposição para o CDPPR-01 estão contidos na Tabela 20.

Tabela 20 – Parâmetros de deposição do CDPPR-01.

<b>Parâmetros</b>	<b>Especificações</b>
Dimensões do metal de base	(85 x 25,4 x 3,25)mm
Inclinação da tocha	18.5° horário (CW)
“Stick out”	10mm
Comprimento do arco	4mm
Vazão de Argônio	4l/min
Número do bocal	8
Diâmetro do eletrodo	1,6mm
Número de passes lado a lado por camada	10
Número de camadas	10
Inclinação da ponta cerâmica	35° anti horário (CCW)
Distância vertical da ponta cerâmica ao substrato	5mm
Distância longitudinal da ponta cerâmica ao eletrodo	4mm
Inclinação da canaleta	112° horário (CW)
Inclinação dos tubos de remoção de excesso de pó	70° horário (CW)
Distância longitudinal dos bocais de remoção de excesso de pó ao eletrodo	13mm
Distância vertical dos bocais de remoção de excesso de pó ao substrato	6mm

---

Largura média do passe	4mm
“ <i>Overlapping</i> ”	50%
Comprimento total do passe	20mm
Vazão de gás do sistema removedor de excesso de pó	6l/min
Vazão mássica de pó	0,3g/min
Velocidade de deslocamento da tocha	0,44mm/s
Corrente	42A

---

Fonte: Próprio autor.

Para uma melhor análise, o CDPPR-01 foi seccionado em sua parte central, embutido a quente, lixado, polido e atacado quimicamente com Nital 5%. Após ataque químico, sua secção transversal foi observada e análises metalográficas e dimensionais foram realizadas.

Na sequência foram tomadas medidas da dureza Vickers na linha de centro da secção transversal do CDPPR-01. As medidas de dureza iniciaram no substrato até um recuo de 0,125mm do topo do depósito, com espaçamento de 0,25mm entre indentações sucessivas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Aparato 1

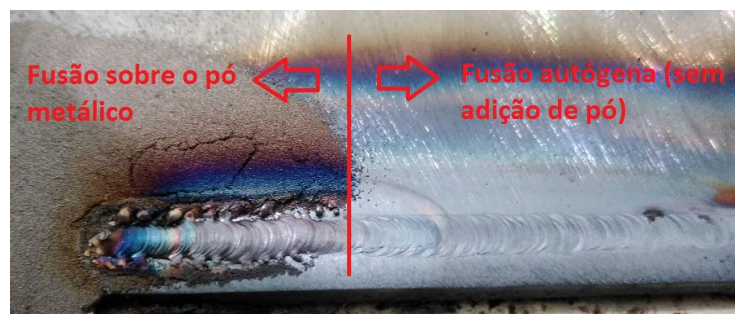
Os resultados e respectivas discussões para os ensaios com o Aparato 1 seguem a ordem cronológica de execução compreendendo ensaios iniciais, ensaios em passe único e ensaios em passes empilhados (parede).

#### 4.1.1 Aparato 1 - Ensaios iniciais

Com esse primeiro aparato experimental pôde-se obter as primeiras deposições testando-se parâmetros considerados importantes para o processo, tais como: distância entre a extremidade do bocal cerâmico até a ponta do eletrodo (*stick out*), distância da ponta do eletrodo à superfície da camada de pó metálico (comprimento do arco), altura da camada de pó metálico, velocidade de deslocamento da tocha, corrente e inclinação da tocha em relação à direção perpendicular ao plano de trabalho. Esses ensaios visaram explorar a faixa de valores utilizável para esses parâmetros, assim como sua influência no aspecto superficial, forma e dimensões do depósito.

Durante os ensaios iniciais a abertura do arco ocorreu em uma região do substrato inicialmente sem cobertura de pó metálico (fusão autógena) para, paulatinamente, ir migrando para uma região onde existia uma fina camada de pó metálico de aço AISI H-13 com cerca de 1mm de espessura – Figura 73.

Figura 73 - Comparação da fusão autógena com a fusão sobre uma camada de pó metálico com 1mm de espessura.



Fonte: Próprio autor.

Analisando-se a Figura 73, percebe-se que houve um aumento na altura do cordão formado sobre a região coberta em relação a região não coberta com pó metálico, o que

sugere, a primeira vista, que é possível fazer a fusão de pó metálico utilizando o processo GTAW.

Um outro fator investigado foi a presença de defeitos internos passíveis de serem detectados por exame visual no material depositado. Para isso o depósito foi desbastado com um disco abrasivo montado em uma lixadeira manual marca DeWalt, modelo DWE4020, de 4 1/2". Em uma primeira análise através de exame visual, sem ampliação e sem ataque químico, após leve desbaste, não foram observadas porosidades, descontinuidades, trincas e deficiências de fusão do material depositado ao substrato - Figura 74.

Figura 74 – Condição do passe após desbaste na região depositada.



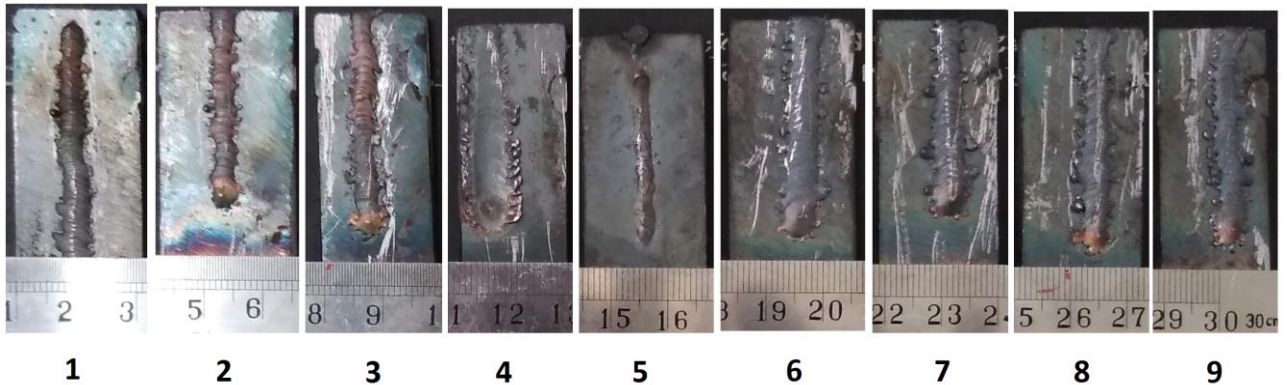
Fonte: Próprio autor.

O que pode ser notado lateralmente ao cordão é a presença de uma aglutinação de pequenas porções de pó que se fundiram mas não anexaram totalmente à poça de fusão (*ballings*). A causa deste comportamento se deve ao fato de que, uma vez formada a poça de fusão, esta tende a anexar o pó fundido em contato direto com sua vizinhança. Tomando-se como base o sentido de deslocamento para fusão como sendo o sentido positivo do eixo (z), o pó que se encontra à frente da poça de fusão é constantemente fundido e anexado à mesma, a parte traseira da poça já é parte do depósito previamente fundido, não existindo ali qualquer parcela de pó ainda não fundido. Já nas laterais, além da existência de uma abundância de pó característica do processo PBF, a energia do arco elétrico é menos concentrada o que aumenta a tensão superficial do metal fundido, dificultando a uniforme adesão à poça de fusão.

#### 4.1.2 Aparato 1 - Ensaio em passe único

A Figura 75 mostra os CDP's de números 1 ao 9 após deposição em passe único.

Figura 75 - CDP's de números 1 ao 9, partindo da esquerda para a direita, após deposição em passe único.



Fonte: Próprio autor.

As dimensões relativas à altura e largura, tomadas na parte central do depósito, para cada velocidade de deslocamento da tocha e corrente testadas, constam na Tabela 21.

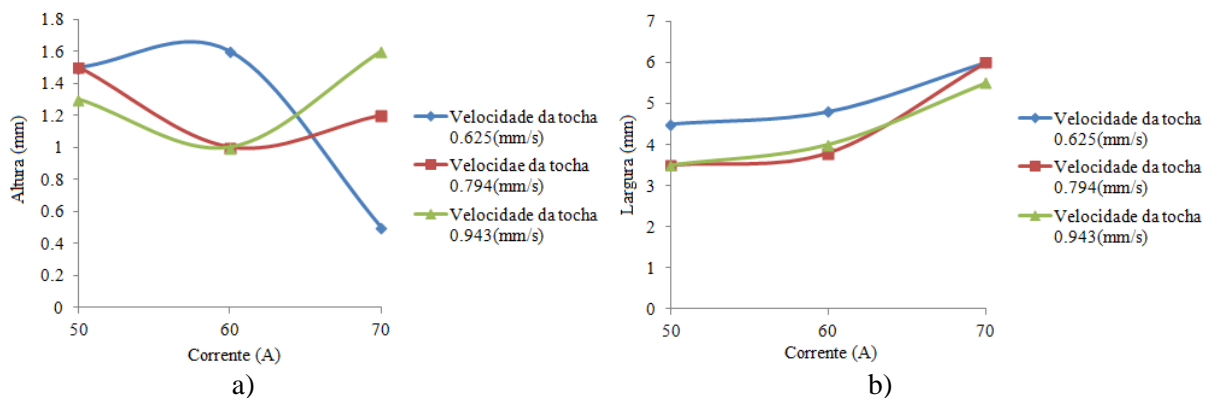
Tabela 21 - Largura e altura dos 9 depósitos em passe único utilizando o Aparato 1.

CDP	Velocidade (mm/s)	Corrente (A)	Largura (mm)	Altura (mm)
1	0,625	50	4,5	1,5
2	0,794	50	3,5	1,5
3	0,943	50	3,5	1,3
4	0,625	70	6,0	0,5
5	0,794	70	6,0	1,2
6	0,943	70	5,5	1,6
7	0,625	60	4,8	1,6
8	0,794	60	3,8	1,0
9	0,943	60	4,0	1,0

Fonte: Próprio autor.

As Figuras 76 a) e b) mostram graficamente o comportamento da altura e da largura dos depósitos em função da corrente elétrica para cada velocidade de deslocamento da tocha.

Figura 76 – a) altura e b) largura dos depósitos em função da corrente elétrica para cada velocidade de deslocamento da tocha.



Fonte: Próprio autor.

O que pode ser constatado após a análise das Figuras 76 a) e b) é que, para uma mesma velocidade de deslocamento da tocha, houve uma tendência de aumento da largura do depósito para maiores valores de corrente. A largura do cordão possui uma relação mais previsível em relação às variações de corrente do que a altura do cordão, o que vai ao encontro a estudos feitos por Wang, Chen e Konovalov (2017), os quais demonstraram que, na deposição em passe único, a largura do metal fundido é diretamente proporcional à potência do feixe de laser, ou seja, quanto maior a potência da fonte de fusão, mais largo será o depósito. A Tabela 22 contém os valores médios, e respectivos desvios padrão, de altura e largura para os 9 depósitos em passe único.

Tabela 22 – Valores médios, e respectivos desvios padrão, de largura e altura para os 9 depósitos em passe único.

	<b>Largura (mm)</b>	<b>Altura (mm)</b>
Valor médio	4,62±1,01	1,24±0,36

Fonte: Próprio autor.

Rodriguez et al (2018) estudaram os processos CMT e TOPTIG para deposição de aço inox 316L em passes único e empilhados (parede). A Tabela 23 mostra um comparativo entre valores médios de largura e altura de depósitos em passe único obtidos por Rodriguez et al (2018), utilizando os processos CMT e TOPTIG, sob diferentes condições de ensaio, com os valores médios de altura e largura dos 9 depósitos em passe único obtidos no presente trabalho.

Tabela 23 – Comparativo das médias de largura e altura de depósitos em passe único entre Rodriguez et al (2018), utilizando os processos CMT e TOPTIG, e os obtidos no presente trabalho.

	<b>Altura média(mm)</b>	<b>Largura média(mm)</b>
Rodriguez et al (2018) - CMT	1,50±0,12	7,25±1,19
Rodriguez et al (2018) - TOPTIG	1,48±0,46	4,80±0,41
Presente trabalho	1,24±0,36	4,62±1,01

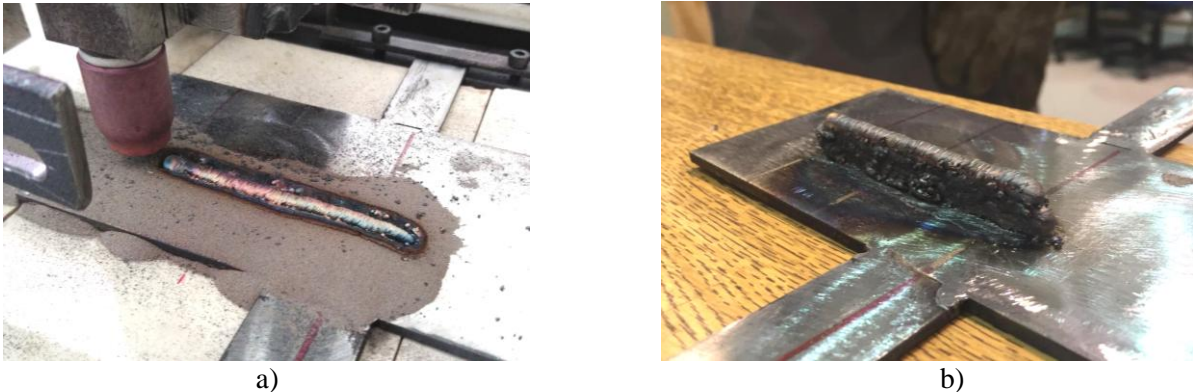
Fonte: Adaptado de Rodriguez et al (2018).

A partir da análise da Tabela 23, nota-se grande semelhança entre os valores médios de largura e altura dos depósitos obtidos por Rodriguez et al (2018), com o processo TOPTIG, e os obtidos no presente trabalho utilizando o Aparato 1. Esses dados encorajaram a prosseguir com os testes, assim, o próximo passo foi realizar depósitos em passes empilhados (parede).

#### 4.1.3 Aparato 1 - Ensaio em passes empilhados (parede)

As Figuras 77 a) e b) mostram algumas fases do processo de deposição do CDPP-01.

Figura 77 – Fases do processo de deposição do CDPP-01: a) Finalização de um passe e b) Depósito concluído.



Fonte: Próprio autor.

Valores de altura e largura tomados em seis pontos distintos no sentido positivo do eixo (z) tomando como referência o ponto de abertura do arco são mostrados na Tabela 24.

Tabela 24 - Altura e largura máximas do CDPP-01 a cada 5mm do ponto de abertura do arco.

	Distância do ponto de abertura do arco (mm)					
	5	10	15	20	25	30
Largura máxima (mm)	5,0	5,6	6,0	4,8	4,9	5,2
Altura máxima (mm)	11,3	11,3	11,3	11,4	11,3	11,0

Fonte: Próprio autor.

Valores de largura de depósitos empilhados (paredes) encontrados na literatura para processos WAAM que utilizaram uma fonte GTAW e metal de adição na forma de arames estão na faixa de 3,5 à 8mm (ALBERTI; da SILVA; d'OLIVEIRA, 2014), concordando com a faixa de valores de largura máximas obtidas com o Aparato 1 (4,8 à 6,0mm). Adicionalmente, o que se observa é uma pequena variação entre valores de altura, onde a máxima variação entre os valores medidos foi de 0,4 mm.

A Figura 78 mostra o corte transversal do CDPP-01 após ataque químico com Nital 2%.



Figura 78 – Corte transversal do CDPP-01. Ataque: Nital 2%.



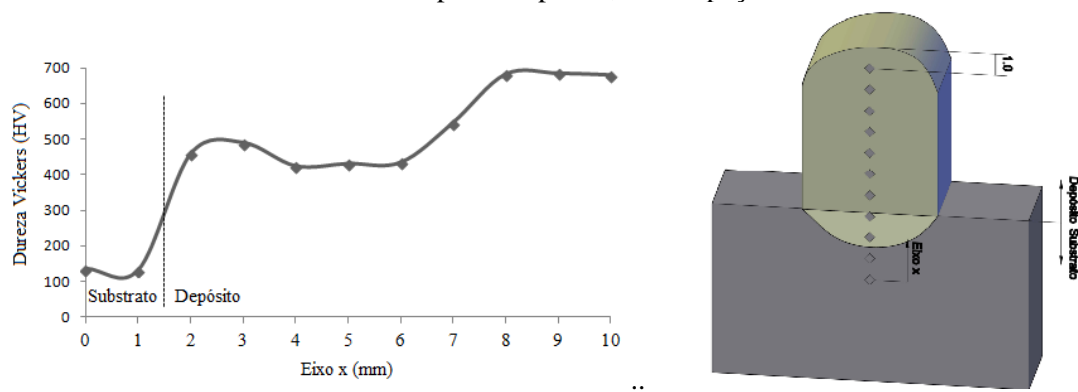
Fonte: Próprio autor.

Durante a inspeção visual, sem ampliação, nas regiões seccionadas para metalografia, não foram detectadas porosidades, trincas ou inclusões no material depositado.

Observando-se a Figura 78, nota-se que houve fusão entre as camadas depositadas, além de uma mudança gradual no padrão revelado pelo ataque químico, o que sugere que ocorreram mudanças na microestrutura desde o substrato até o topo do depósito.

A Figura 79 contém os valores de dureza para o CDPP-01 medidos na linha de centro do depósito desde o substrato até um recuo de 1mm do topo do depósito, com espaçamento de 1mm entre medidas.

Figura 79 – Valores de dureza para o CDPP-01 medidos na linha de centro do depósito desde o substrato até um recuo de 1mm do topo do depósito, com espaçamento de 1mm entre medidas.



Fonte: Próprio autor.

Analisando-se os dados apresentados na Figura 79, percebe-se um comportamento para o perfil de dureza compatível com a mudança microestrutural indicada pelo ataque químico. A dureza no substrato se situou entre 135HV e 131HV, a qual é compatível com a dureza padrão do aço AISI 1020 (~150HV).

A partir da região diluída a dureza começa a se elevar, partindo de 458HV até atingir valores da ordem de 679HV a 1mm do topo do depósito.

Nie et al (2016) realizaram depósitos em várias camadas utilizando arame a base aço AISI H-13 sobre um substrato a base de aço AISI H-13 revenido utilizando o processo LHW (Laser Hot Wire) e identificaram regiões onde a dureza Vickers apresentou valores próximos de 400HV. Segundo estes autores, a queda na dureza pode ter sido causada pela formação de austenita reversa.

Depósitos sobrepostos de aço AISI H-13 com o processo DMD (Direct Metal Deposition) obtidos por Mazumder et al (1997) apresentaram valores médios de dureza variando entre 690knoop (~650HV) para paredes delgadas e 675Knoop (~640HV) para paredes espessas.

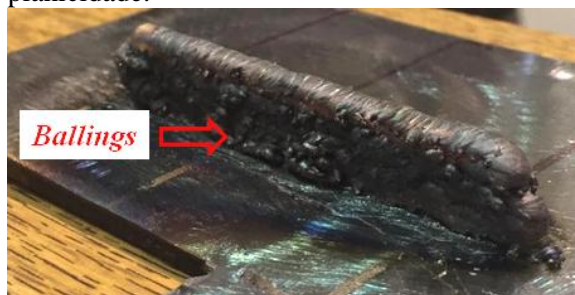
Considerando-se a média simples dos valores de dureza na região do depósito para o CDPP-01, o valor calculado foi de 536HV, compatível com valores médios de dureza Vickers obtidos por Chen et al (2017) utilizando a tecnologia LAM (Laser Additively Manufactured) para deposição de camadas sobrepostas de aço AISI H-13, que se situaram próximos de 550HV na condição como depositado (sem pós tratamento térmico de revenimento).

Adicionalmente, o valor de dureza a 1mm do topo do depósito é compatível ao valor de dureza para o aço AISI H-13 na condição temperado e revenido (~600HV).

Estas observações indicam que mudanças microestruturais relacionadas aos ciclos térmicos durante a deposição estão diretamente associadas a variações de dureza ao longo da altura do depósito.

Os resultados obtidos com o Aparato 1 se mostraram promissores porém, dois problemas foram identificados: a presença de “ballings” e a perda de planicidade da camada de pó. Estes dois problemas podem ser melhor identificados na Figura 80.

Figuras 80 – Problemas identificados durante depósitos com o Aparato 1: a) “Ballings” e b) Perda de planicidade.



a)



b)

Fonte: Próprio autor.

Terminadas as análises, uma parte do CDPP-01 foi fresada a fim de adquirir forma, dimensões e acabamento similares a de produtos para aplicações mecânicas – Figura 81.

Figura 81 – Parcela do CDPP-01 após processo de fresamento.



Fonte: Próprio autor.

#### 4.2 Aparato 2 – Ensaio em passes empilhados (parede)

Um ponto a ser melhorado no Aparato 1 consistia na manutenção da planicidade da camada de pó metálico ao redor do depósito, independentemente da altura. A solução pensada para este problema consistia em se desenvolver um sistema de alimentação de pó, ainda baseado no processo PBF, o qual permitisse que, mesmo com o aumento no número de camadas, a região ao redor do depósito permanecesse uniformemente plana. Tal objetivo foi conseguido através do sistema de alimentação de pó desenvolvido para ser utilizado no Aparato 2, o qual já foi detalhado na metodologia experimental.

As Figuras 82 a) e b) mostram algumas fases do processo de deposição do CDPP-02.

Figura 82 – Fases do processo de deposição do CDPP-02: a) Finalização de um passe e b) depósito concluído.



a)

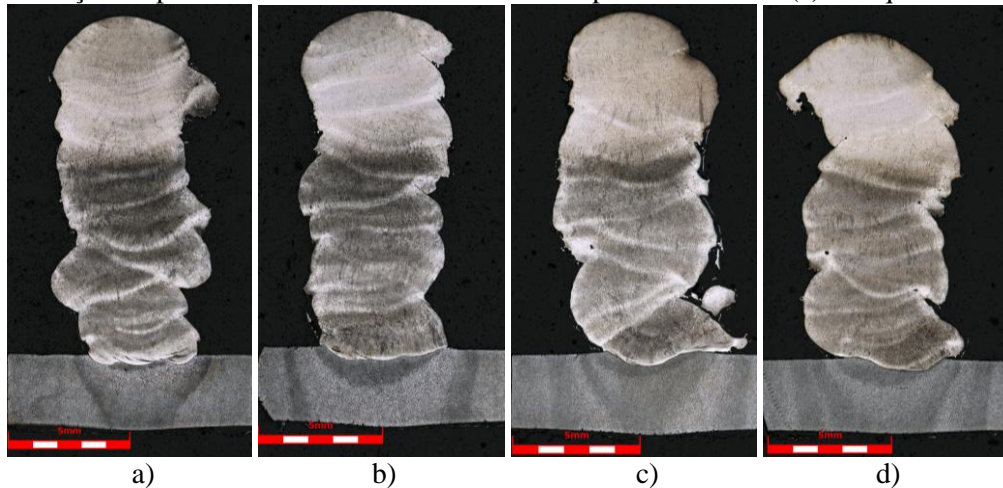
b)

Fonte: Próprio autor

Como pode ser visto na Figura 82 a), o problema de perda de planicidade da camada de pó foi resolvido e conseguiu-se manter a camada de pó ao redor do depósito uniformemente plana durante todo o processo de deposição. Isto foi possível pela presença da parede interna do cilindro fixo que, aliado ao movimento descendente da base móvel, mantém

sempre a última camada de pó confinada lateralmente. Todavia, os “ballings” ainda se mantiveram – Figura 82 b). As Figuras 83 a), b), c) e d) mostram as secções do CDPP-02 após ataque químico a 12mm, 24mm, 36mm e 48mm, respectivamente.

Figura 83 – Secções transversais do CDPP-02 a distâncias de: a) 12mm, b) 24mm, c) 36mm e d) 48mm em relação ao ponto de abertura do arco no sentido positivo do eixo (z). Ataque: Nital 5%.



Fonte: Próprio autor

Observando-se as Figuras 83 de a) até d), é possível observar a diferença de ataque entre a parte inferior e a parte superior do depósito, além da zona termicamente afetada do substrato. De acordo com Mazumder et al (1997), a região mais escura do depósito é composta por martensita revenida enquanto a região mais clara é de martensita ainda não revenida. No primeiro cordão depositado o calor é rapidamente absorvido pelo substrato e a martensita formada ainda é não revenida. Em depósitos subsequentes o calor gerado na última camada atravessa as camadas anteriormente depositadas em direção ao substrato promovendo um efeito similar ao processo de revenimento, uma vez que a martensita revenida tem coloração escura.

Valores máximos de altura, penetração e largura para cada secção do CDPP-02 podem ser vistos na Tabela 25.

Tabela 25 – Valores máximos de altura (H), penetração (D) e largura (W) para as secções a), b), c) e d) do CDPP-02.

Secção	Distância a partir da abertura do arco (mm)	H (mm)	D (mm)	W (mm)
a	12	14,12	0,42	6,98
b	24	13,74	0,58	6,24
c	36	13,42	0,57	7,72
d	48	13,28	0,50	7,48

Fonte: Próprio autor.

Os valores médios de altura, largura e penetração, considerando as quatro secções do CDPP-02, podem ser vistos na Tabela 26.

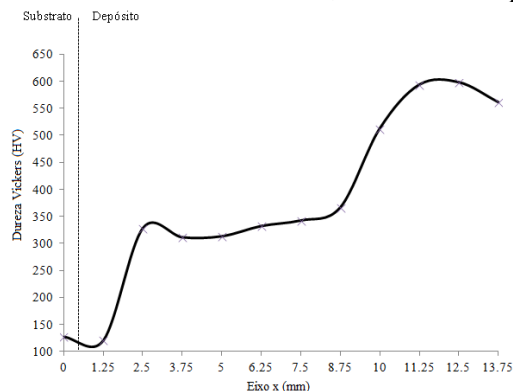
Tabela 26 – Média simples dos valores de altura, largura e penetração considerando as quatro secções do CDPP-02.

	<b>Altura (mm)</b>	<b>Penetração (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>
Valor médio	13,64±0,37	0,52±0,07	7,10±0,65

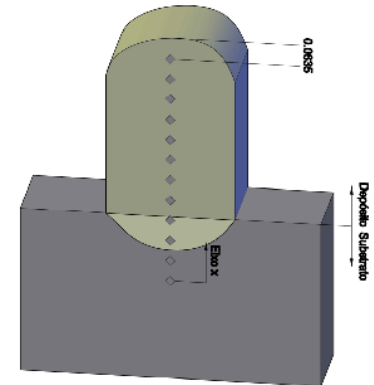
Fonte: Próprio autor.

Analisando-se os dados de altura do depósito apresentados na Tabela 26, merece destaque a tendência de diminuição da altura desde a parte inicial (secção - a) até a parte final do depósito (secção d). Este fato pode ser explicado pelo acúmulo de energia térmica durante o percurso da tocha (MARTINA et al., 2012). Valores de penetração e largura também apresentaram variações desde a parte inicial até a parte final do depósito, o que também pode estar relacionado ao fato de que a transferência de calor desde a poça de fusão até o substrato ficar dificultada para maiores alturas do depósito, contribuindo para ocorrência de picos de temperatura (DEBROY et al., 2018). O conhecimento dos valores dos parâmetros dimensionais, e respectivas variações, é de extrema importância para o planejamento da produção, pois, sua correta estimativa influi diretamente no sucesso do processo produtivo. Como o número de pontos amostrais para a estimativa de parâmetros geométricos do CDPP-02 foram restritos (4 secções), sugere-se que, em ensaios futuros, um maior número de pontos amostrais sejam gerados de forma a se permitir uma melhor previsão estatística do comportamento da altura, largura, e penetração durante a formação do depósito. O perfil de dureza tomado na linha de centro da secção d) do CDPP-02, localizada a 48mm do ponto de abertura do arco, é mostrado na Figura 84 a).

Figura 84 – a) Perfil de dureza tomado na linha de centro da secção d) do CDPP-02 com início no substrato até um recuo de 0,0635mm do topo da parede e b) Esquema.



a)



b)

Fonte: Próprio autor.

Comparando-se os perfis de dureza para as várias secções do CDPP-02, notou-se que estes perfis têm comportamentos similares, o que representa um bom indicativo da repetibilidade e, conseqüentemente, da previsibilidade da dureza em função da altura ao longo de todo o comprimento do depósito. Com respeito a valores de dureza, o gráfico representado pela Figura 84 pode ser dividido em três regiões distintas. A primeira região apresenta um rápido crescimento nos valores de dureza partindo de 130HV, que corresponde a dureza do aço AISI 1020, até valores em torno de 350HV. A partir daí inicia-se a segunda região do gráfico onde existe uma estabilização dos valores de dureza por volta de 350HV. Na terceira região ocorre novamente um aumento nos valores de dureza de 350HV até valores próximos de 550HV. Acredita-se que essas variações de dureza estejam relacionadas aos ciclos térmicos ocorridos durante a deposição. Outro ponto a ser destacado é que na segunda região do gráfico, onde os valores de dureza ficaram próximos de 350HV, o aço AISI H-13 depositado apresentou dureza superior ao aço AISI H-13 fornecido na condição normalizado (~200HV). Já na terceira região do gráfico, próximo ao topo, o aço AISI H-13 depositado apresentou dureza próxima de 550HV, a qual é próxima a dureza do aço AISI H-13 fornecido na condição temperado e revenido (580HV), o que reforça a ideia de que alterações microestruturais causadas pelos ciclos térmicos exercem forte influência sobre as características mecânicas do depósito, especialmente para materiais mais propensos a sofrer alterações microestruturais pelo efeito de variações de temperatura, tais como o AISI H-13.

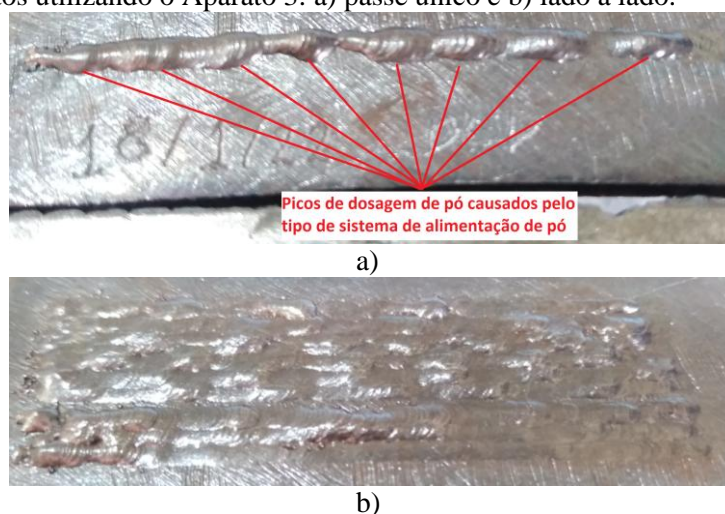
Durante os ensaios com o Aparato 2, o que se observou foi a continuidade da presença de “ballings”, o que dificultava a deposição de camadas lado a lado. De acordo com Kruth et al (2004), a presença de “ballings” constitui um severo impedimento para a fusão entre camadas.

### **4.3 Aparato 3 – Ensaios em passes único e lado a lado**

As Figuras 85 a) e b) mostram depósitos em passe único e lado a lado, respectivamente, obtidos com o Aparato 3.



Figura 85 – Depósitos utilizando o Aparato 3: a) passe único e b) lado a lado.



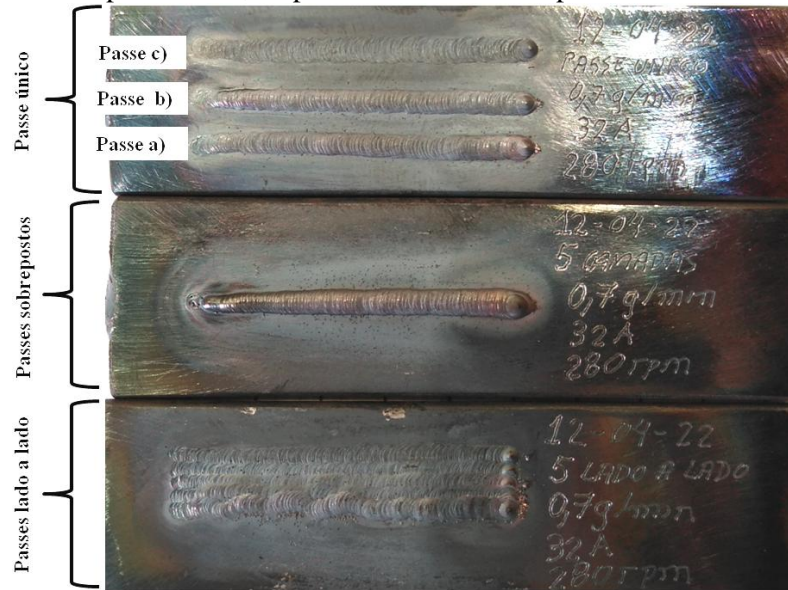
Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado nas Figuras 85 a) e b), o problema de “ballings” foi sanado, todavia, o que se observa são picos de dosagem de pó – Figura 85 a), o que pode ser explicado pelo tipo de sistema de alimentação de pó utilizado no Aparato 3. Outro problema que ainda persiste está relacionado ao desvio do arco, que ocorre devido a pontos mais elevados de acúmulo de material metálico solidificado decorrentes de depósitos anteriores e que também está relacionado a uma alimentação irregular de pó. Assim, o passo seguinte era de se desenvolver um sistema de alimentação que possibilitasse um controle mais preciso e uniforme da quantidade de pó depositado, visto que, o sistema por rosca, devido a sua construção, não gerava uma taxa de fornecimento de pó uniforme. Para tanto foi desenvolvido um novo sistema de dosagem de pó baseado em vibração mecânica e que deu origem ao Aparato 4.

#### 4.4 Aparato 4 – Ensaios em passes único, empilhados e lado a lado

A Figura 86 mostra depósitos em passes único, empilhados e lado a lado obtidos com o uso do Aparato 4 para a corrente de 32A. No caso de depósitos em passe único, os dois primeiros passes, designados como passe a) e passe b), foram destinados à calibragem inicial dos parâmetros e avaliação do aspecto superficial. O terceiro passe, designado como passe c), foi objeto de análises dimensionais, metalográficas e de dureza.

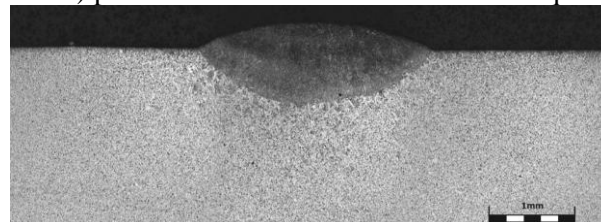
Figura 86 - Depósitos em passe único, empilhados e lado a lado para corrente de 32A.



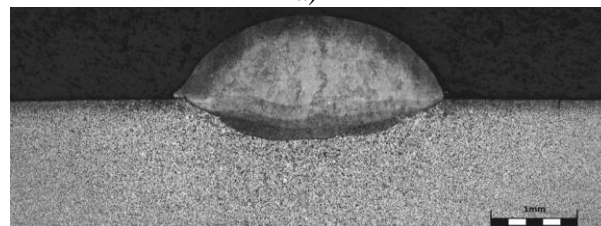
Fonte: Próprio autor.

As Figuras 87 a), b) e c) mostram as secções transversais dos depósitos em passe único, empilhados e lado a lado a 15mm do ponto de abertura do arco para a corrente de 32A.

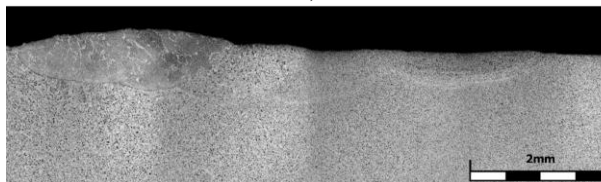
Figura 87 Secções transversais a 15mm do ponto de abertura do arco para depósitos em: a) passe único, b) passes empilhados e c) passes lado a lado. Corrente: 32A. Ataque:Nital 2%.



a)



b)



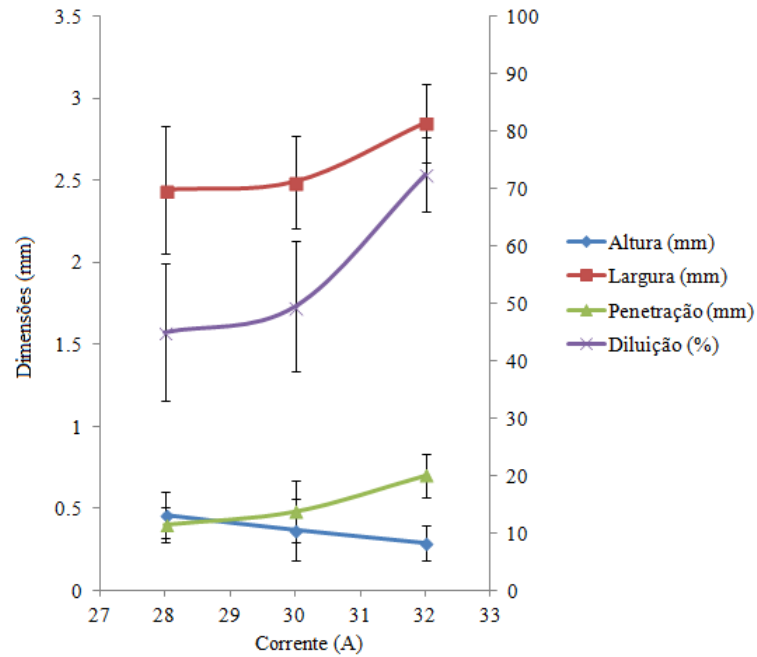
c)

Fonte: Próprio autor.

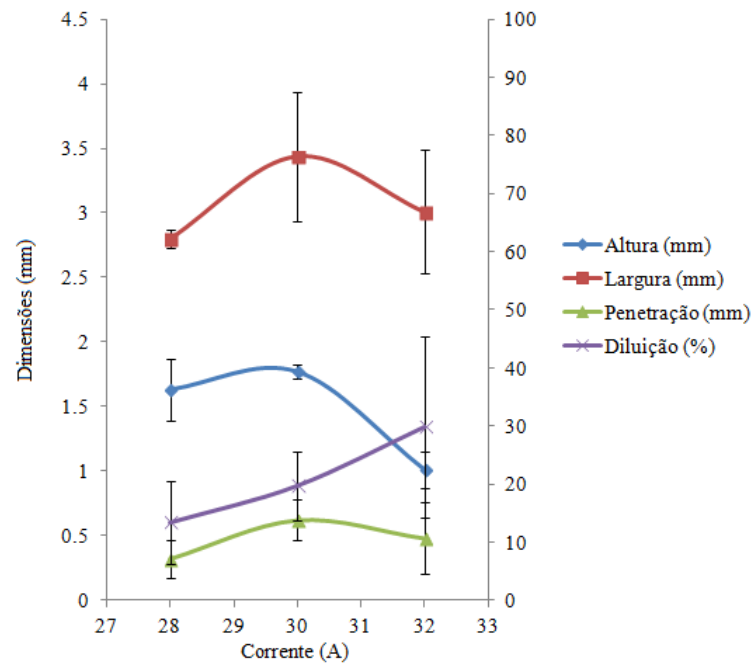


As Figuras 88 a), b) e c) apresentam graficamente o comportamento dos valores médios de altura, largura, penetração e diluição em função da corrente para cada tipo de depósito.

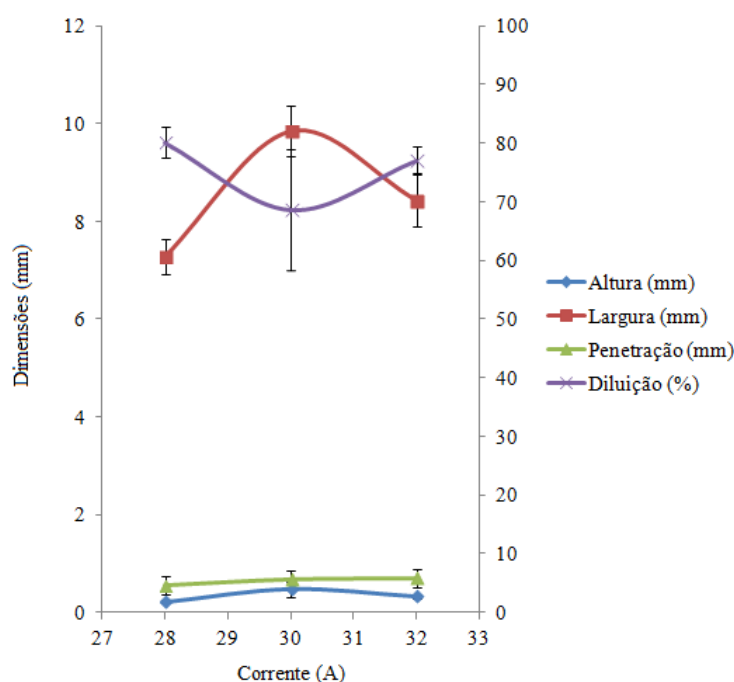
Figura 88 Valores médios de altura, largura, penetração e diluição em função da corrente para: a) passe único, b) passes empilhados e c) passes lado a lado.



a) Passe único



b) Passes empilhados



c) Passes lado a lado

Fonte: Próprio autor.

Uma tendência de diminuição nos valores de altura para valores crescentes de corrente foi novamente observada, principalmente em depósitos em passes simples e empilhados (parede). Essa diminuição nos valores de altura de depósitos em passes empilhados constatados por Martina et al. (2012) e DebRoy et al (2018) já foram discutidos anteriormente.

Uma tendência de aumento da largura dos depósitos para maiores valores de corrente foi observada durante os experimentos. Essa tendência de aumentos nos valores de largura para maiores correntes também foi destacada por (WANG; CHEN; KONOVALOV, 2017).

No caso de passes empilhados, o máximo valor de largura foi de 3,44mm, o qual ainda é menor que o mínimo valor encontrado na literatura (3,5mm) para passes empilhados (parede) obtidos com arco GTAW e metal de adição na forma de arames (ALBERTI; da SILVA; d'OLIVEIRA, 2014).

O valor médio de penetração considerando passes único, empilhados e lado a lado foi de 0,55mm. Segundo Spalding (2007), para processos de revestimento superficial um mínimo de adesão entre o depósito e o substrato é desejável, o que corresponde a penetrações variando de 0,5 à 2,0mm.

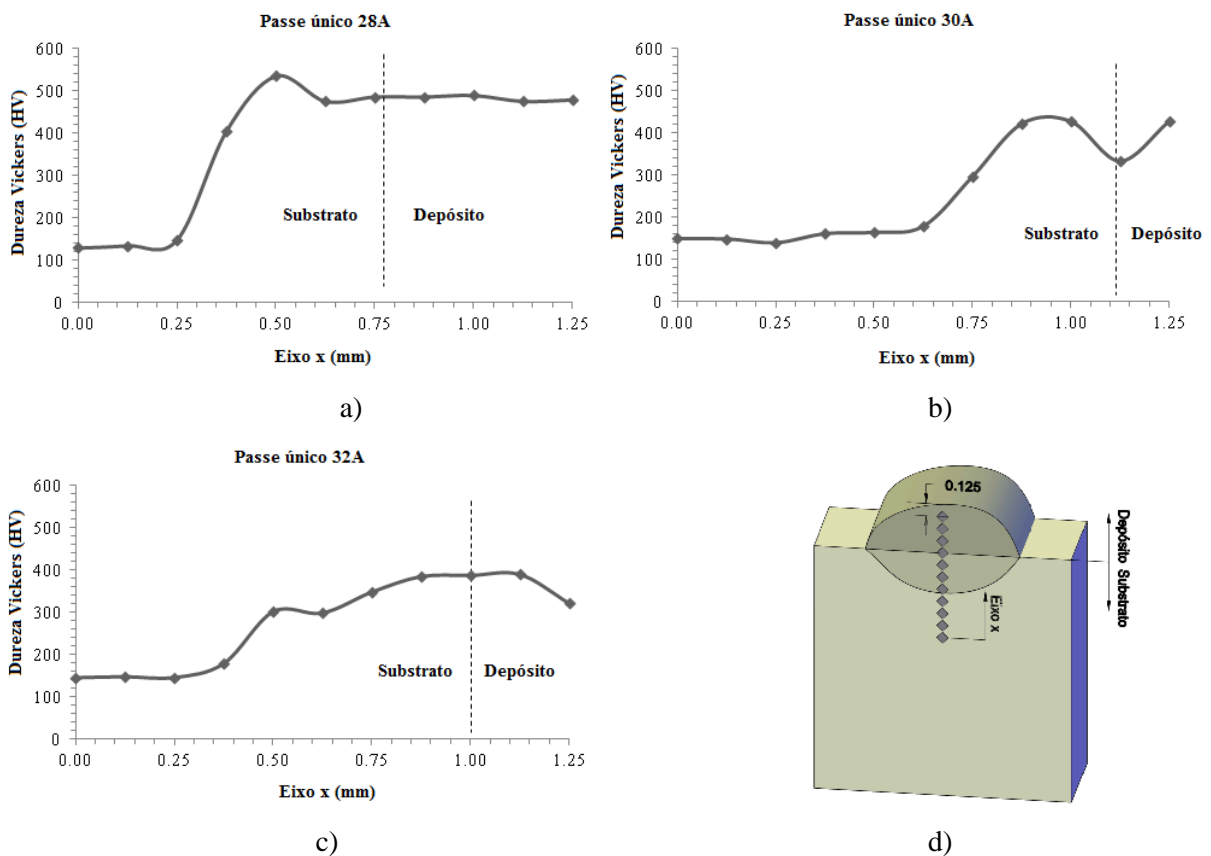
De acordo com Chryssolouris et al (2002), ao estudar o processo DED aplicado a revestimento superficial cuja fonte de energia térmica é um feixe de laser, os fatores que mais afetam as características dimensionais do depósito, tais como altura, largura, penetração e

diluição estão relacionados a parâmetros de processo como a vazão de alimentação de pó, velocidade de varredura e vazão de gás inerte.

A simples escolha da secção para análise onde tenha ocorrido um desvio do arco elétrico durante o processo de deposição pode induzir a erros de interpretação relacionados a características dimensionais do depósito. Tais análises mostram que a previsibilidade de parâmetros dimensionais dos depósitos associados a este processo de MA ainda em desenvolvimento são extremamente dependentes de um preciso sistema de dosagem de pó e do correto direcionamento da energia térmica no substrato durante o processo de deposição. Assim, parâmetros dimensionais para cada tipo de depósito deverão ser melhor estudados e entendidos de forma a possibilitar um assertivo planejamento de produção para este processo.

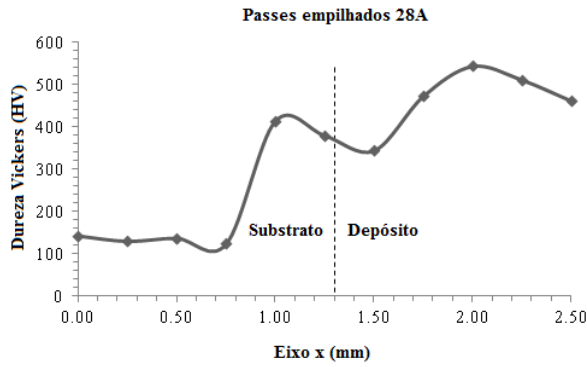
Os perfis de dureza Vickers para depósitos em passe único, empilhados e lado a lado para correntes de 28A, 30A, 32A e o respectivo esquema de medição podem ser vistos nas Figuras 89, 90 e 91, respectivamente.

Figura 89- Perfis de dureza Vickers para passe único sob diferentes correntes. a) 28A, b) 30A, c) 32A e d) Esquema de medição.

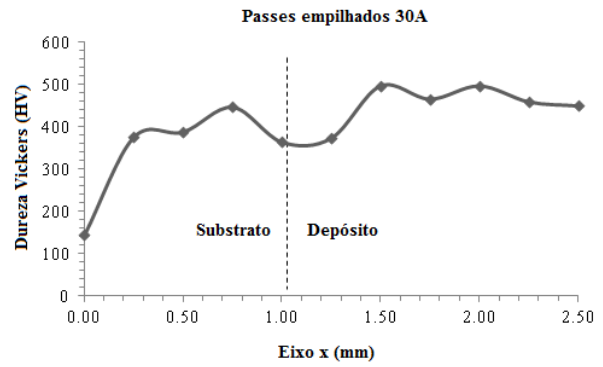


Fonte: Próprio autor.

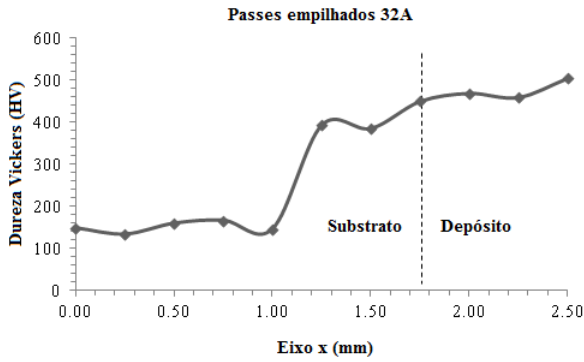
Figura 90- Perfis de dureza Vickers para passes empilhados sob diferentes correntes. a) 28A, b) 30A, c) 32A e d) Esquema de medição.



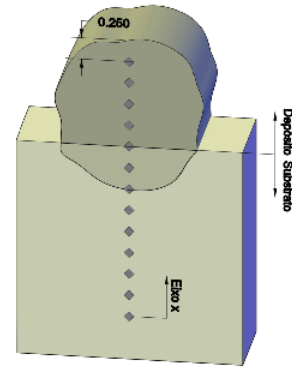
a)



b)



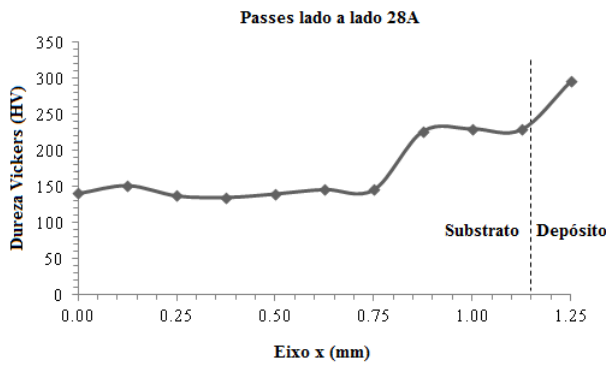
c)



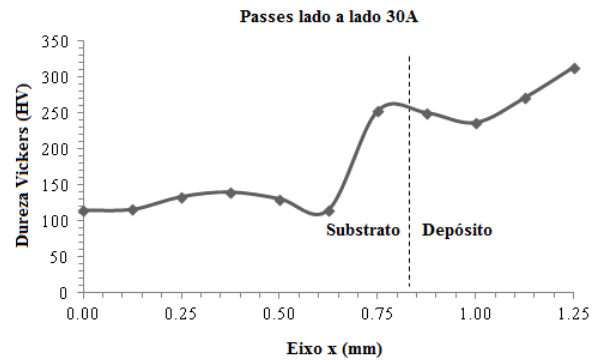
d)

Fonte: Próprio autor.

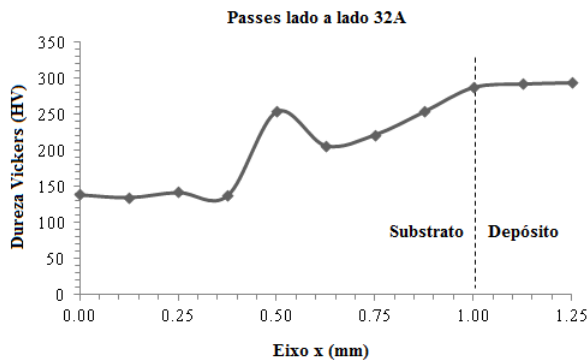
Figura 91- Perfis de dureza Vickers para passes lado a lado sob diferentes correntes. a) 28A, b) 30A, c) 32A e d) Esquema de medição.



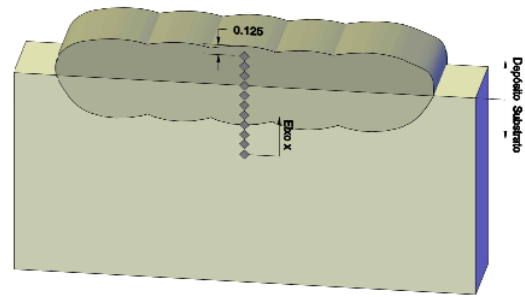
a)



b)



c)



d)

Fonte: Próprio autor.

Analisando-se os perfis de dureza Vickers representados pelas Figuras 89, 90 e 91, é possível identificar basicamente três regiões distintas. A primeira é a região do substrato onde não ocorreu diluição e na qual os valores de dureza Vickers se situaram dentro da faixa de valores de dureza Vickers esperada para o aço AISI 1020 (~150HV). A segunda região é aquela onde se iniciou a diluição entre o metal de adição e o substrato, a qual apresentou um rápido aumento nos valores de dureza.

A Tabela 27 contém valores médios de dureza Vickers e diluição das secções localizadas à 15mm do ponto de abertura do arco para um mesmo tipo de depósito e considerando-se todas as correntes (28A, 30A e 32A).

Tabela 27 – Valores médios de diluição e dureza Vickers para secções à 15mm do ponto de abertura do arco em função do tipo de depósito considerando todas as correntes.

	Tipo de depósito		
	Passes empilhados	Passe único	Passes lado a lado
Valor médio			
Dureza Vickers (HV)	350,05±145,90	308,14±140,17	194,62±66,03
Diluição (%)	25,83±10,27	55,50±12,76	77,67±5,87

Fonte: Próprio autor.

De acordo com os valores médios apresentados na Tabela 27 é possível observar que a dureza decresceu com o aumento da diluição. Este fato indica que altos valores de diluição influenciam a composição química e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do depósito. A relação entre diminuição da dureza com aumentos de diluição também foi observado por Yellup (1995).

Para Pickin, Williams e Lunt (2010), a composição química final do depósito é a soma ponderada entre a composição química do substrato e a composição química do metal de

adição - Equação 2. Assim, um aumento na taxa de diluição resulta em uma maior mistura do metal de adição ao substrato.

$$C_f = (A_s/(A_s+A_d)) \times C_s + (A_d/(A_s+A_d)) \times C_a \dots\dots\dots(2)$$

Onde:

- $C_f$  = Composição química final do depósito [%];
- $C_s$  = Composição química do substrato [%];
- $C_a$  = Composição química do metal de adição [%];
- $A_s$  = Área diluída do substrato [ $m^2$ ];
- $A_d$  = Área do depósito [ $m^2$ ];

A terceira região é a área correspondente ao depósito. Esta região é aquela onde os valores de dureza Vickers atingiram os maiores valores para todos os tipos de depósito ensaiados. Próximo do topo do depósito, na secção localizada a 15mm do ponto de abertura do arco e utilizando-se correntes de 32A, os valores de dureza Vickers partiram de um mínimo de 294,2HV para passes lado a lado, atingiram 322,7HV para passe único até um máximo de 505HV para em passes empilhados. Um fato a se destacar é que os valores de dureza Vickers nesta terceira região para todos os tipos de depósito foram maiores que os valores de dureza Vickers do aço AISI H-13 na condição normalizado (~200HV) e menores que na condição temperado e revenido (~600HV). Outro ponto a ser destacado é que nas proximidades do topo do depósito os valores de dureza Vickers para passes empilhados apresentaram os maiores valores quando comparados a passes único e lado a lado. Este fato pode estar relacionado tanto a um menor grau de diluição quanto a uma maior temperatura atingida na região próxima ao topo do depósito nesta condição. Para Dass e Moridi (2019), o acúmulo de calor gerado por sucessivas deposições irá afetar a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades finais da peça.

Considerando metodologia de fabricação por MA aqui apresentada, é razoável dizer que tanto a diluição quanto os efeitos térmicos experimentados pelo depósito serão responsáveis pela microestrutura final e, conseqüentemente, pelas as propriedades mecânicas.

#### 4.4.1 Aparato 4 – Ensaio em multi camadas

Durante testes com o Aparato 4 para a geração de depósitos multi camadas notou-se que problemas relacionados ao desvio do arco elétrico ainda estavam ocorrendo em alguns casos, tal como pode ser visto na Figura 92.

Figura 92 – Desvio do arco elétrico.

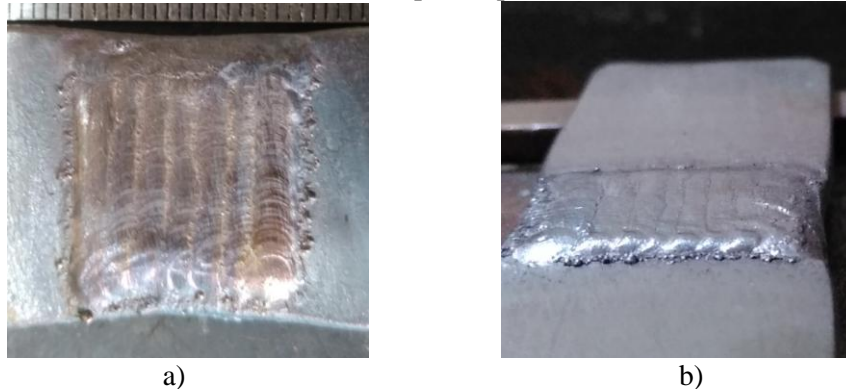


Fonte: Próprio autor.

Foi observado que o desvio do arco elétrico ocorria principalmente pela presença de pontos metálicos mais elevados existentes no depósito, os quais possibilitavam uma condição de menor resistência elétrica com o respectivo deslocamento do arco elétrico. Duas soluções foram propostas para o problema: aumentar o aporte térmico ou diminuir a vazão de pó. O aumento do aporte térmico iria conduzir a um arco elétrico de maior energia, contudo, como já destacado anteriormente, elevados aportes térmicos iriam promover o aumento da largura do depósito, o que é prejudicial para processos de MA. Assim, optou-se por diminuir a vazão mássica de pó nos testes seguintes. Para Chryssolouris et al (2002), quando baixas vazões de pó são usadas a altura do depósito é baixa e a aderência ao substrato é alta devido à fusão substancial do substrato. Porém, segundo DebRoy et al (2018), construir uma peça com pequenos incrementos na espessura da camada depositada gerada por baixas vazões de pó pode efetivamente reduzir a rugosidade superficial, no entanto torna o processo de fabricação mais demorado.

As Figuras 93 a) e b) mostram as vistas de topo e lateral esquerda, respectivamente, de um depósito multi camadas denominado CDPPR-01.

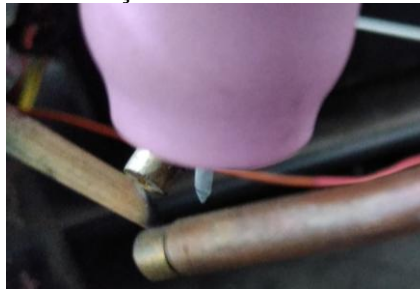
Figura 93 - a) Vista de topo e b) Vista lateral esquerda de um depósito contendo 10 camadas sobrepostas a 90°, onde cada camada foi formada por 10 passes lado a lado.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 94 mostra a parte inferior da tocha de soldagem após a execução do CDPPR-01 representado pelas Figuras 93 a) e b).

Figura 94 Tocha de soldagem após a execução do CDPPR-01.



Fonte: Próprio autor.

A garantia para a não contaminação do eletrodo depende de uma correta seleção dos vários parâmetros envolvidos no processo, mas é principalmente dependente da relação entre aporte térmico e vazão em massa de pó.

O ajuste dos valores para os parâmetros de processo, no caso do presente trabalho, foi decorrente de observação e testes com o equipamento em operação e podem ser mais bem investigados e aprimorados em trabalhos futuros.

No exame visual externo e sem ampliação do CDPPR-01, representado pelas Figuras 93 a) e b), percebe-se a ausência de trincas, porosidades e falhas de preenchimento superficial decorrentes do desvio do arco elétrico. A Figura 95 representa a secção transversal do CDPPR-1 após ataque com Nital 5%.



Figura 95 Secção transversal do CDPPR-1. Ataque Nital 5%.



Fonte: Próprio autor

A Tabela 28 contém os valores máximos de largura, altura e penetração para o CDPPR-01.

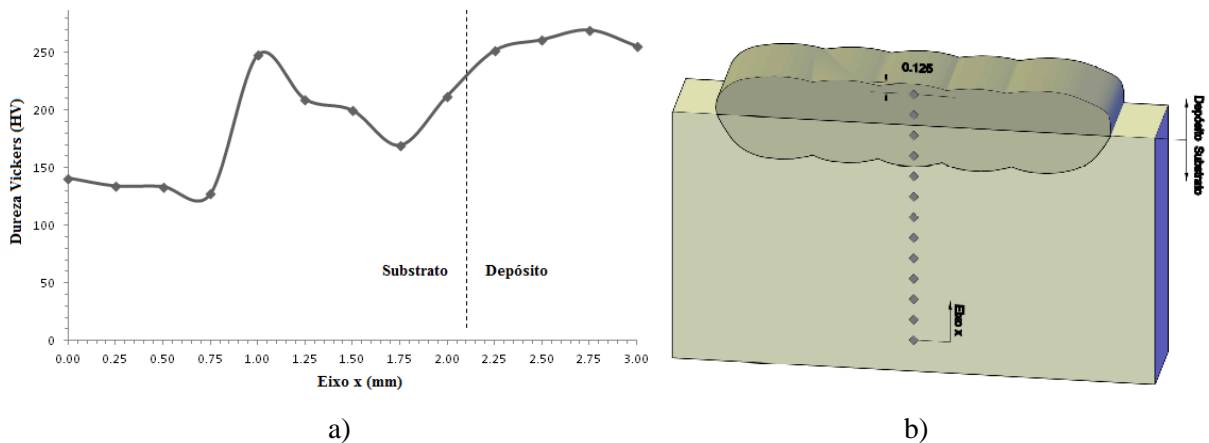
Tabela 28 – Valores máximos de altura, largura, penetração e diluição para o CDPPR-01.

Largura (mm)	Altura (mm)	Penetração (mm)	Diluição (%)
18,003	0,992	1,984	65,83

Fonte: Próprio autor.

A Figura 96 contém perfil de dureza Vickers na linha de centro da secção transversal do CDPPR-01. As medidas iniciaram no substrato e terminaram a 0,125mm do topo do depósito com intervalos de 0,25mm entre indentações sucessivas.

Figura 96 – a) Perfil de dureza Vickers do CDPPR-01 e b) Esquema de medição.



Fonte: Próprio autor.

Observando-se a Figura 95 é possível notar que ocorreu um empenamento (distorção) do CDPPR-01, porém não foram notadas trincas ou porosidades observáveis através de exame visual sem ampliação na região depositada. Para Chryssolouris et al (2002), em processos de recobrimento e tratamento superficial, defeitos relacionados a porosidades, baixa adesão do material depositado ao substrato, mistura do material adicionado ao substrato e empenamentos são comuns.

Nie et al (2016) realizaram depósitos em várias camadas utilizando arame a base aço AISI H-13 sobre um substrato a base de aço AISI H-13 com o processo LHW (*Laser Hot Wire*) e identificaram que o processo de empenamento foi mais pronunciado entre a primeira e a décima camada, permanecendo estagnado para camadas subsequentes, o que tem relação com uma maior uniformidade de temperatura do substrato.

De acordo com Wu et al (2020), o tamanho da poça de fusão, seu processo de contração e o excesso de ciclos térmicos são os principais causadores de tensões residuais, delaminações, empenamentos, flambagem e acabamento superficial de baixa qualidade encontrados em processos WAAM.

Medidas de dureza Vickers tomadas no substrato apresentaram valores variando de 127 à 141 HV, o que é compatível com a dureza do aço AISI 1020 (150HV). À medida que as indentações se dirigiram para a região próxima ao topo do depósito houve a elevação dos valores de dureza Vickers, porém o valor máximo foi de 255HV, bem abaixo dos valores de dureza na região próxima ao topo do depósito para passes lado a lado (294,2HV), único (322,7HV) e empilhados (505HV) sob correntes de 32A. O fato de o CDPPR-01 ter sofrido uma quantidade de ciclos térmicos vinte vezes maior que a quantidade de ciclos térmicos sofrido para passes lado a lado (100 ciclos para multi camadas contra 5 ciclos para passes lado a lado) sugere que o efeito dos ciclos térmicos tem um forte peso formação da microestrutura do depósito e, por consequência disso, nas propriedades mecânicas.



## 5 CONCLUSÕES

É possível a utilização do processo GTAW como fonte de energia térmica para processos de MA os quais utilizam pó metálico como metal de adição, contudo, processos de fabricação subtrativos deverão ser empregados em uma fase posterior à deposição de forma a garantir formas, dimensões e acabamento finais à peça.

Dentre os aparatos experimentais desenvolvidos neste trabalho, os baseados no processo DED se mostraram mais adequados que os baseados no processo PBF para MA devido a problemas relacionados ao aparecimento de “ballings” e desvio do arco elétrico ser de difícil solução em metodologias baseadas no processo PBF.

Em processos de MA que combinam o arco GTAW e pó metálico como metal de adição, um fornecimento de pó em excesso vai ser propício à formação de “ballings” e um perfil de depósito mais alto e estreito vai potencializar desvios do arco elétrico.

Os aparatos experimentais baseados no processo DED necessitam de um sistema de alimentação de pó preciso e que não utilize gases para transporte de pó até a poça de fusão.

Diluição e ciclos térmicos estão entre os fatores de maior influência sobre a microestrutura e, conseqüentemente, sobre as propriedades mecânicas do depósito.

Valores de dureza variaram gradativamente desde o substrato até o topo do depósito, concordando com as mudanças na microestrutura observadas nas análises metalográficas.

Assim, a aplicabilidade de GTAW como fonte de energia térmica para processos de MA que utilizam pó metálico como metal de adição foi observada, contudo, é necessário mais pesquisas e desenvolvimentos para que este processo se torne uma alternativa de baixo custo para produção de peças metálicas por MA.

Como sugestões para trabalhos futuros estão a implementação do sistema de manipulação de pó e estação GTAW em um centro de usinagem CNC para melhor controle e precisão dos deslocamentos, desenvolvimento de um sistema de dosagem de pó mais preciso e análises via Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS - *Energy Dispersive Spectroscopy*) na secção transversal dos depósitos, como forma de identificar e quantificar a variação no percentual de Cromo, desde o substrato até o topo do depósito, obtendo, assim, mais um parâmetro indicativo de início e término da diluição.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Latif, M., Abdel-Ghany, K., El-Mahallawy, N., Mattar T. (2021). Effect of Laser Speed on Microstructure and Mechanical Properties of AISI H13 Tool Steel Prepared by Laser Powder Bed Fusion Process. *Journal of Materials Engineering and Performance on Additive Manufacturing*, 30(12), 8821–8830.
- Alberti, E.A., da Silva, L.J., d'Oliveira, A.S.C.M. (2014). Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. *Soldagem & Inspeção*, 19. 190-198.
- ASTM A 681-94. (1994). Standard Specification for Tool Steels Alloy. United States: ASTM International 1994.
- ASTM A 1040-10. (2010). Standard Guide for Specifying Harmonized Standard Grade Compositions for Wrought Carbon, Low-Alloy, and Alloy Steels. United States: ASTM International 2010.
- ASTM F 2792-12a. (2013). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. United States: ASTM International 2013.
- AWS A3.0M/A3.0 (2020). Standard welding terms and definitions. American Welding Society. United States, 13 ed. 2020.
- Baker, R. Method of Making Decorative Articles, US Patent 1533,300, filed November 12, 1920, patented 14th April, 1925.
- Bracarense, A.Q. Soldagem a Plasma – PAW. 2000. Adaptado de <[https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos\\_solda/soldagem-a-plasma-PAW.pdf](https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/soldagem-a-plasma-PAW.pdf)>. acesso em: 15/08/2020.
- Chen, C., Yan, K., Qin, L., Zhang, M., Wang, X., Zou, T., Hu, Z. (2017). Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Additively Manufactured AISI H13 Tool Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26, 5577-5589.
- Choquet, I. (2018). Gas tungsten arc models including the physics of the cathode layer: remaining issues. *Weld World*, 62, 177-196.
- Chryssolouris, G., Zannis, S., Tsirbas, K., Lalas, C. (2002). An Experimental Investigation of Laser Cladding. *CIRP Annals*, 51(1), 145-148.
- Dass, A. & Moridi, A. (2019). State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to material Design. *Coatings*, 9, 418.
- 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). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112-224.

Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 81, 465-481. doi: 10.1007/s00170-015-7077-3

Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Almeida, P.M.S., Wang, F., Williams, S. (2011). Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. *Computational Materials Science*, 50, 3315-3322.

DONGJIANG, W., MIAORAN, L., QIUYU, M., GUANGYI, M., JINGLING, Y., DONGSHENG, C. **Aluminum alloy laser-TIG composite additive manufacturing method**. Applicants: UNIV DALIAN TECH. CN 108393587A. Application: 01-23-2018. Publication: 08-14-2018.

Eroglu, M., & Ozdemir, N. (2002). Tungsten-inert gas surface alloying of a low carbon steel. *Surface & Coatings Technology*, 154, 209-217.

EUTECTIC CASTOLIN. Eutronic Gap 3511 Sinergic. 2017. Adaptado de: <[https://www.castolin.com/sites/default/files/products/docs/GAP\\_3511\\_PTA\\_plasma\\_transfe\\_red\\_arc\\_joining\\_coating\\_brazing.pdf](https://www.castolin.com/sites/default/files/products/docs/GAP_3511_PTA_plasma_transfe_red_arc_joining_coating_brazing.pdf)>, acesso em: 23/01/2023.

FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. Fabricação econômica de componentes metálicos Wire Arc Additive Manufacturing. 2019. Disponível em: <<https://www.fronius.com/pt-br/brasil/tecnologia-de-soldagem/centro-de-informcoes/revista/2019/waam>>, acesso em: 21/09/2022.

Geng, H., Li, J., Xiong, J., Lin, X., Zhang, F. (2017). Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technologies*, 243, 40-47.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies – 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing**. 2. ed. New York: Springer, 2015.

Gu, D., Shen, Y. (2009). Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials and Design*, 30, 2903-2010.

GUOJIAN, X., DONGSA, C., JIN, L., YUNHAI, S., WENTAO, Z., YINGDONG, Q., WEI, W., BAOYI, Y. **Hammering method and device for manufacturing TIG wire feeding electric arc additive**. Applicants: UNIV SHENYANG TECHNOLOGY. CN 109530880A. Application: 11-30-2018. Publication: 03-29-2019.

GUOJIAN, X., JIN, L., ZHANQI, L., DONGSA, C., BAOYI, Y., YUNHAI, S., WENTAO, Z., FANG, H., YINGDONG, Q. **Coaxial in-arc wire feeding and out-arc powder feeding TIG electric arc additive manufacturing device**. Applicants: UNIV SHENYANG TECHNOLOGY. CN 111266702A. Application: 03-18-2020. Publication: 06-12-2020.

Hofer, K., Haelsig, A., Mayr, P. (2018). Arc-based additive manufacturing of steel components - comparison of wire- and powder-based variants. *Welding in the World*, 62, 243-247.

HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES. 7 Families of Additive Manufacturing. 2020. Adaptado de: <<http://www.hybridmanutech.com/resources/>>. acesso em: 03/07/2020.

Imran, M.K., Masood, S.H., Brandt, M., Bhattacharya, S., Mazumder, J. (2011). Direct metal deposition (DMD) of H13 tool steel on copper alloy substrate: Evaluation of mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, 528, 3342-3349.

ISO/ASTM 52900. (2015). Standard terminology for Additive Manufacturing - General principles - Terminology. United States: ISO/ASTM International 2016.

ISO/ASTM F3187-16. Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals. United States: ASTM International 2016.

JIANKANG, H., WEN, Y., SHURONG, Y., DING, F., TAO, Y., WEI, P., YULONG, L., HUIZI, C., XIUJUAN, C. **Boron element in-situ reinforced gradient titanium alloy TIG electric arc additive manufacturing device**. Applicants: UNIV LANZHOU TECH. CN 210817885U. Application: 04-30-2019. Publication: 06-23-2020.

JIANKANG, H., YULONG, L., WEI, P., ZHICHEN, G., HUIZI, C., WEN, Y., TAO, Y., SHI'EN, L., SHURONG, Y., DING, F. **Titanium alloy additive manufacturing device and method based on TIG (Tungsten Inert Gas Welding) electric arc**. Applicants: UNIV LANZHOU TECH. CN 109954958A. Application: 04-30-2019. Publication: 07-02-2019.

Jung, I.M., Choe, J., Yun, J., Yang, S., Yang, D.Y., Kim, Y.J., Yu, J.H. (2019). Dual speed laser re-melting for high densification in H13 tool steel metal 3D printing, *Arch. Metall. Mater*, 64(2), 571-578.

Kruth, J.P., Froyen, L., Vaerenbergh, J.V., Mercelis, P., Rombouts, M., Lauwers, B. (2004). Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 616-622.

Li, Y., Su, C., & Zhu, J. (2022). Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects. *Results in engineering*, 13, 100330.

Lincoln Electric. TOPTIG. 1999. Disponível em: <<https://origin-www.lincolnelectric.com/en-gb/automation/Pages/welding-processes-toptig.aspx>>, acesso em: 05/07/2020.

Martina, F., Mehnen, J., Willians, S.W., Colegrove, P., Wang, F. (2012). Investigation of benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 1377-1386.

Mazumder, J., Choi, J., Nagarathnam, K., Koch, J. Hetzner, D. (1997). The Direct Metal Deposition of H-13 tool steel for 3-D components, *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 49(5), 55-60.

MODENESI. Técnica operatória de soldagem GTAW. 2012. Disponível em: <[http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/pratica\\_gtaw.pdf](http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/pratica_gtaw.pdf)>, acesso em: 23/05/2019.



MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V.; SANTOS, D.B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

MOREIRA, A.F., MARIANI, F.E., COELHO, R.T., HUNG, W.N. (2023). Directed Energy Deposition of H13 tool steel for mold and die repair. In: 12TH BRAZILIAN CONGRESS OF MANUFACTURING ENGINEERING. *Anais*. 2023, Brasilia, DF, Brazil.

MOSELLI, P.C. **Desenvolvimento de dispositivo, adaptado à tocha SATG, para realização de revestimento duro, utilizando ligas, em forma de pó**. 2013. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

Mridha, S., Ong, H.S., Poh, L.S., Cheang, P. (2001). Intermetallic coatings produced by TIG surface melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 113, 516-520.

Murphy, A. B. (2015). A perspective on Arc Welding Research: The Importance of the Arc, Unresolved Questions and Future Directions. *Plasma Chem Plasma Process*, 35, 471-489.

Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.D., Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B*, 143, 172-196.

Nie, Z., Wang, G., McGuffin-Cawley, J.D., Narayanan, B., Zhang, S., Schwam, D., Kottman, M., Rong, Y.K. (2016). Experimental study and modeling of H13 steel deposition using laserhot-wire additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 235, 171-186.

Nitish, G.P., Kala, P., & Sharma, V. (2019). Experimental investigations of TIG welding based additive manufacturing process for improved geometrical and mechanical properties. *Journal of Physics: Conference Series*, 1024, 012045. doi: 10.1088/1742-6596/1240/1/012045

Niu, H.J., & Chang, I.T.H. (1999). Instability of scan tracks of selective laser sintering of high speed steel powder. *Scripta Materialia*, 41(11), 1229-1234.

Pan, Z., Ding, D., Wu, B., Cuiuri, D., Li, H., Norrish, J. (2018). Arc Welding Process for Additive Manufacturing: A Review. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*. doi: 10.1007/978-981-10-5355-9\_1

Paoletti, I. (2017). Mass customization with additive manufacturing: new perspectives for multi performative building components in architecture. *Procedia Engineering*. 180, 1150-1159.

Pereira, T., Kennedy, J.V., & Potgieter, J. (2019). A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing*, 30, 11-18.

PERILLA, D.A.R. **A first approach to predict the material deposition volume in a Direct Energy Deposition (DED) process by means of an analytical model**. 2021. 103 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

- Pickin, C.G., Williams, S.W., Lunt, M. (2010). Characterization of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 496-502.
- Pinkerton, A.J. (2016). Lasers in additive manufacturing. *Optics & Laser Technology*. 78. 25-32.
- Pragana, J.P.M., Sampaio R.F.V., Bragança, I.M.F., Silva, C.M.A., & Martins, P.A.F. (2021). Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2. 100032.
- PULUGURTHA, S.R., NEWKIRK, J.W., LIOU, F.W., CHOW, H. (2009). Functionally Graded Materials by Laser Metal Deposition. In: 20TH ANNUAL INTERNATIONAL SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM. **Proceedings**. 2009, Austin, Texas, United States.
- Rasiya, G., Shukla, A., & Saran, K. (2021). Additive Manufacturing - A Review. *Material Today: proceedings*. 47, 6896-6901.
- Rodriguez, N., Vázquez, L., Huarte, I., Arruti, E., Taberero, I., Alvarez, P. (2018). Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel. *Welding in the World*, 62, 1083-1096. doi: 10.1007/s40194-018-0606-6
- ROMI. Linha ROMI D Hybrid. Disponível em: <<https://www.romi.com/produtos/linha-romi-d-hybrid/>>, acesso em 15/04/2024.
- Schulz, B. (2019). Wire Arc Additive Manufacturing Delivers Low Buy-to-Fly Ratios. Retrieved from: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/wire-arc-additive-manufacturing-delivers-low-buy-to-fly-ratios>. Accessed in: 07/31/2023.
- SCIAKY INC. Make Metal Parts Faster & Cheaper with EBAM® Metal 3D Printing Technology. 2024. Disponível em: <<https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>>. acesso em: 09/04/2024.
- Soner, B. (2006). Microstructural properties of SiC based hardfacing on low alloy steel. *Surface & Coatings Technology*, 200, 3734-3742.
- SPALDING, I.J. **Applied laser tooling**. 1st ed. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers.
- Svetlizky, D., Daz, M., Zheng, B., Vyatskikh, A.L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J.M., Lavernia, E.J., Eliaz, N. (2021). Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical Characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 49, 271-295.
- Tolochko, N.K., Mozzharov, S.E., Yadroitsev, I.A., Laoui, T., Froyen, L., Titov, V.I., Ignatiev, M.B. (2004). Balling processes during selective laser treatment of powders. *Rapid Prototyping Journal*, 10(2), 78-87.

Treutler, K., & Wesling, V. (2021). The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review. *Applied Sciences*, 11, 8619.

Unocic, R.R., & DuPont, J.N. (2004). Process efficiency measurements in the laser engineered net shaping process. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35B, 143-152.

Verma, A., & Rai, R. (2013). Energy efficient modeling and optimization of Additive Manufacturing Process. DART LAB Mechanical and Aerospace Engineering Department. University at Buffalo. United States. 11p.

VOIRON, Mickael. **Método de realização por fabricação aditiva de uma pá de turbomáquina de aeronave, pá de turbomáquina de aeronave e setor do distribuidor ou do retificador.** Depositante: SAFRAN AIRCRAFT ENGINES (FR). BR 11 2019 024030 6. Depósito: 16-05-2018. Concessão: 20-12-2022.

Wang, L., Li, J., Ning, B., Li, Y. (2014). Effects of Magnesium on Wear Resistance of H13 Steel. *Materials Transactions*, 55(7), 1104-1108.

Wang, Y., Chen, X., & Konovalov, S.V., (2017). Additive manufacturing based on welding arc: a low-cost method. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 11(6). 1317-1328.

Wu, Q., Mukherjee, T., De, A., DebRoy, T. (2020). Residual stress in wire-arc additive manufacturing – Hierarchy of Influential variables. *Additive Manufacturing*. 35, 101355.

XIAOYU, C., SANBAO, L., BOLUN, D., CHENGLI, F., CHUNLI, Y. **Method for manufacturing TiAl intermetallic compound through heterogeneous double-wire TOP-TIG electric arc additive manufacturing.** Applicants: HARBIN INST TECHNOLOGY. CN 111390338A. Application: 04-03-2020. Publication: 07-10-2020.

Yao, X.X., Li, J.Y., Wang, Y.F., Gao, X., Li, T., & Zhang, Z. (2021). Experimental and numerical studies of nozzle effect on powder flow behaviors in directed energy deposition additive manufacturing. *International Journal of Mechanical Sciences*. 210. 106740.

Yellup, J.M. (1995). Laser cladding using the powder blowing technique. *Surface and Coatings Technology*, 71, 121-128.

YIMING, H., SHUAISHUAI, H., YUXUE, Y., LIJUN, Y., XIAOYAN, Z., YUNFU, T. **Multi-wire TIG electric arc additive manufacturing device.** Applicants: UNIV TIANJIN. CN 111347132A. Application: 01-22-2020. Publication: 06-30-2020.



***EESC • USP***