



Universidade Federal de Goiás – UFG
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC)
Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC)



Gustavo de Castro Lopes

Efeito da temperatura de intercamada e da adição de arame frio em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco em aço carbono

Goiânia

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Gustavo de Castro Lopes

3. Título do trabalho

Efeito da temperatura de intercamada e da adição de arame frio em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco em aço carbono

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo De Castro Lopes, Discente**, em 09/05/2023, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Demóstenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 10/05/2023, às 15:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3735450** e o código CRC **9F2C61F6**.

Gustavo de Castro Lopes

**Efeito da temperatura de intercamada e da adição de
arame frio em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
em aço carbono**

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração em Ciências Mecânicas.

Universidade Federal de Goiás – UFG

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC)

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC)

Orientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho

Coorientador: Prof Dr. Valtair Antônio Ferraresi

Goiânia

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Lopes, Gustavo de Castro

Efeito da temperatura de intercamada e da adição de arame frio em
Manufatura Aditiva por Deposição a Arco em aço carbono [manuscrito] /
Gustavo de Castro Lopes. - 2023.

CXII, 112 f.

Orientador: Prof. Demostenes Ferreira Filho; co-orientador Valtair
Antônio Ferraresi.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa
de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Goiânia, 2023.

Inclui gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). 2. GMAW. 3.
Arame múltiplos. 4. Resfriamento. 5. Arame frio. I. Filho,
Demostenes Ferreira, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 02 da sessão de Defesa de Dissertação de **Gustavo de Castro Lopes**, que confere o título de Mestre(a) em **Engenharia Mecânica**, na área de concentração em **Ciências Mecânicas**.

Ao vigésimo quarto dia do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e três, a partir das 14h00min., no auditório do prédio do curso de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação e em sala virtual da plataforma Google Meet, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**Influência da utilização de arame frio no processo GMAW aplicado na Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) no percurso de peças de pequeno porte**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Demostenes Ferreira Filho (UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Ruham Pablo Reis (UFU)**, membro titular externo, **cuja participação ocorreu através de videoconferência**; Professor Doutor **Daniel Souza (UFG)**, membro titular interno e Professor Doutor **Valtair Antônio Ferraresi (UFG)**, membro titular interno, **cuja participação ocorreu através de videoconferência**. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho **conforme explicitado abaixo**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Demostenes Ferreira Filho**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao **vigésimo quarto dia do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e três**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

"Efeito da temperatura de intercâmara e da adição de arame frio em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco em aço carbono"



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Aoyagui Nascimento, Coordenadora de Pós-Graduação**, em 09/05/2023, às 15:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Demóstenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 10/05/2023, às 15:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3735436** e o código CRC **8F4D6573**.

Lutas e aventuras têm seu preço em seu corpo. Quando você descansa, seu corpo se fortalece e se repara. Quanto mais você descansa, mais forte se torna.

3º Preceito: Sempre Descanse - Príncipe Cinza Zote

*Este trabalho é dedicado às pessoas que,
mesmo questionadas por mentiras, ainda acreditam na ciência.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus.

Agradeço à minha mãe, Geralda Castro, por todo apoio, paciência e carinho ao longo desse período. Espero que a senhora fique orgulhosa e feliz com mais uma conquista nossa! Agradeço ao meu pai, Gilberto Lopes, pelo apoio e pelos momentos que tivemos preenchidos de muito violão e música.

Agradeço ao meu irmão, Gilberto Filho, por todo conhecimento passado para mim, sou grato por tudo que você me ensinou! Agradeço também pelos momentos de lazer que passamos juntos, nas incansáveis horas de Minecraft, principalmente durante o período de pandemia.

Agradeço à minha tia Cida e meu tio Almir, que cuidaram de mim e do meu irmão quando éramos crianças, enquanto meus pais trabalhavam. Vocês foram e continuam sendo meus segundos pais.

Agradeço aos meus amigos, em especial à toda comunidade que criei durante os últimos anos (salve feras), que foram parceiros de conversas, debates e jogatinas durante diversas madrugadas, não deixando eu desanimar e fazendo com que eu me sentisse mais leve para continuar minha jornada. Espero que possamos passar diversos momentos juntos ainda!

Agradeço à Alexandra Elbakyan por proporcionar a ciência para todos.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pela concessão da bolsa de mestrado. Agradeço ao PPGMEC (Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica) pela oportunidade de fazer parte da primeira turma de mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás. Agradeço também aos professores, técnicos e funcionários que fazem parte de todo esse corpo de trabalho da Engenharia Mecânica da UFG.

Agradeço ao meu orientador Demostenes Ferreira Filho por tudo que me ensinou e também pela paciência durante esse período. Também ao professor Daniel Souza, que juntamente com professor Demostenes, me auxiliou em todo tipo de resolução de problema (muitas gambiarras) nos laboratórios durante a pesquisa. Agradeço também ao Fleide, João Bosco e Cristiano por diversos serviços prestados nos laboratórios, desculpem-me por pedir tantas coisas!

Muito obrigado a todos! Tudo que eu conquistei até aqui foi porque eu tive pessoas muito importantes ao meu redor que contribuíram de alguma forma. Esse trabalho é de todos vocês.

“Se não arriscarmos, não criaremos o futuro”.
(Monkey D. Luffy)

Resumo

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) consiste na fabricação de pré-formas metálicas a partir da deposição de multicamadas de cordões de solda sobre um substrato, ou seja, a partir de um modelo tridimensional, divide-se o objeto em camadas definindo as trajetórias na qual será feita a adição de metal, com a utilização de um manipulador robótico. Esse método apresenta vantagens como alta taxa de deposição e possibilidade de fabricação de peças de grandes proporções, comparado com outros métodos. Entretanto ainda demanda estudos para consolidação da técnica e potencialidades de aprimoramento e desenvolvimento de novos procedimentos, como por exemplo estratégias de preenchimento e processos de resfriamento entre as camadas depositadas. O objetivo deste trabalho é estudar a influência da adição de arame frio no processo MADA, comparando-o com a deposição feita com arame único, observando propriedades mecânicas como a resistência à tração, dureza, além do tempo de resfriamento para diferentes temperaturas de interpasse e da geometria das peças fabricadas. Utilizou-se um sistema de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) acoplado a um manipulador robótico Motoman HP20, com arames múltiplos de 1,6 mm de diâmetro para o energizado e 1,0 mm para o arame frio, sendo ambos classificados como ER70S-6. A velocidade de alimentação dos arames frio e energizado foi de 1,5 m/min e 3,0 m/min, respectivamente. Para a aferição da temperatura, utilizou-se um sensor MLX90614ESF-DCI, conectado em um sistema com Arduino. Além disso, utilizou-se como gás de proteção uma mistura de Argônio com 25% de Gás Carbônico com uma vazão de 25 L/min. Para fabricação dos corpos de prova para ensaio de tração, realizou-se a deposição de 20 camadas sobrepostas em linha reta, formando uma parede, variando a temperatura de interpasse entre cada cordão, utilizando 100°C, 150°C e de forma direta, sem intervalo de espera entre as camadas. Fabricadas as paredes, posteriormente foi realizada a produção dos corpos de prova para ensaios de tração, utilizando um centro de usinagem CNC. Na preparação dos corpos para ensaios de dureza, seguiu-se a mesma metodologia, seguido do processo de lixamento e polimento. De um modo geral, observou-se um tempo mais curto de resfriamento das paredes fabricadas com adição de arame frio quando comparadas às deposições com arame único. Além disso, notou-se que o arame frio também influencia na altura e espessura das peças. Nos ensaios mecânicos o arame frio não influenciou significativamente nos valores de dureza. Os valores mais elevados foram encontrados nas amostras de 100°C. Para os ensaios de tração, observou-se que, de modo geral, a adição de arame frio apresentou a tendência de aumento da resistência máxima à tração das amostras.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), GMAW, arames múltiplos, arame frio, resfriamento.

Abstract

Wire Arc Additive Manufacturing (WAMM) consists in the manufacture of metallic preforms from the deposition of multilayer weld beads on a substrate, that is, from a three-dimensional model, the object is divided into layers defining the trajectories in which the addition of metal will be made, with the use of a robotic manipulator. This method has advantages such as a high deposition rate and the possibility of manufacturing parts of large proportions, compared with other methods. However it still requires studies to consolidate the technique and potential for improvement and development of new procedures, such as filling strategies and cooling processes between deposited layers. The objective of this work is to study the influence of the addition of cold wire in the MADA process, comparing it with the deposition made with a single wire, observing mechanical properties such as tensile strength, hardness, in addition to the cooling time for different interpass temperatures and the geometry of the manufactured parts. A GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) system was used coupled to a Motoman HP20 robotic manipulator, with multiple wires of 1.6 mm in diameter for the energized wire and 1.0 mm for the cold wire, both classified as ER70S-6. The feed speed of the cold and energized wires was 1.5 m/min and 3.0 m/min, respectively. To measure the temperature, an MLX90614ESF-DCI sensor was used, connected to an Arduino system. In addition, a mixture of Argon with 25% of Carbon dioxide was used as a shielding gas with a flow rate of 25 L/min. In order to manufacture the specimens for the tensile test, 20 layers were superimposed in a straight line, forming a wall, varying the interpass temperature between each layer, using 100°C, 150° C and directly, with no waiting interval between layers. The walls were made, later it was production of specimens for tensile tests was carried out, using a CNC machining center. In the preparation of the bodies for hardness tests, the same methodology was followed, followed by the sanding and polishing process. In general, a shorter cooling time was observed for the walls manufactured with the addition of cold wire when compared to depositions with a single wire. In addition, it was noted that the cold wire also influences the height and thickness of the pieces. In the mechanical tests, the cold wire did not significantly influence the hardness values. The highest values were found in the 100°C samples. For the tensile tests, it was observed that, in general, the addition of cold wire tended to increase the maximum tensile strength of the samples.

Keywords: Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), GMAW, multiple wires, cold wire, cooling.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Métodos de Manufatura Aditiva de metal	17
Figura 2.2 – Processos de Manufatura Aditiva classificados de acordo com sua fonte de calor e alimentação	18
Figura 2.3 – Relação entre velocidade de alimentação e corrente de soldagem	19
Figura 2.4 – Relação entre Distância entre o bico de contato e a peça com a corrente de soldagem	19
Figura 2.5 – Tensão e corrente elétrica no tempo	20
Figura 2.6 – Esquema da MADA; (a) modelo CAD 3D; (b) divisão do modelo em camadas; (c) deposição das camadas robotizadas	21
Figura 2.7 – Acúmulo de calor ao longo da deposição da liga Ti6Al4V feita por MADA	22
Figura 2.8 – Comparação das temperaturas simuladas entre camadas para convecção livre e condições de resfriamento por impacto de jato de ar	23
Figura 2.9 – Estrutura do sistema de resfriamento	24
Figura 2.10–Comparação das temperaturas do processo resfriado a jato de ar e processo padrão sem resfriamento	25
Figura 2.11–Diagrama esquemático da entrada de calor (Q_{In}) e dissipação de calor (Q_{Diss}) durante: (a) Soldagem; (b) Manufatura aditiva por deposição a arco (MADA); (c) MADA com resfriamento ativo	26
Figura 2.12–Plataforma de laboratório montada para a técnica NIAC: (1) tanque de água; (2) interruptor de flutuação (3) tocha CMT; (4) sistema de movimento linear; (5) tanque de água pressurizada; (6) válvulas pneumáticas / hidráulicas; (7) controlador CNC; e (8) cortina de proteção	26
Figura 2.13–Ilustração da técnica NIAC com um modelo simplificado de balanço de energia térmica e a representação do parâmetro da borda da camada à água (LEWD), onde: Q_{cond} = calor por condução; Q_{conv} = calor de convecção; Q_{rad} = radiação de calor	27
Figura 2.14–Resultados de medição de tensão residual de XRD da Amostra 1, Amostra 2, Amostra 3 e Amostra 4 em função dos pontos de teste de contorno interno para contorno externo.	29
Figura 2.15–Robô Motoman HP20	29
Figura 2.16–Controlador DX100	30
Figura 2.17–Exemplo de comando para movimentação	30
Figura 2.18–Exemplo da função <i>JUMP</i>	31
Figura 3.1 – Carretéis de Arames ER70S-6 utilizados para o processo GMAW - Arame energizado e arame frio	33
Figura 3.2 – Fonte IMC para alimentação de arame energizado	34

Figura 3.3 – Conjunto do Sensor de Temperatura e alimentação de arame frio acoplados no Robô Motoman HP20	34
Figura 3.4 – Fonte SUMIG para alimentação de arame frio	36
Figura 3.5 – Cordões testes variando a velocidade de alimentação do arame frio	36
Figura 3.6 – Suporte inicial do arame frio com distância de 3 cm entre os bicos	37
Figura 3.7 – Suporte final do arame frio com distância de 10 mm entre os bicos	37
Figura 3.8 – Esquema de corte para corpo de prova de tração	38
Figura 3.9 – Centro de usinagem CNC modelo ROMI D 600	38
Figura 3.10–Medidas do corpo de prova para ensaio de tração	39
Figura 3.11–Exemplo dos corpos de prova fabricados para ensaio de tração	39
Figura 3.12–Máquina Shimadzu modelo UH-FX/FXh	40
Figura 3.13–Exemplo de parede cortada para preparação de corpo de prova	40
Figura 3.14–Durômetro Vickers	41
Figura 3.15–Destaque do esquema de medição de dureza nas peças	41
Figura 4.1 – Configuração 2: Temperatura de intercamada 150°C sem alimentação de arame frio	42
Figura 4.2 – Configuração 5: Temperatura de intercamada 150°C com alimentação de arame frio	43
Figura 4.3 – Corrente elétrica ao longo das camadas - Sem alimentação de arame frio	44
Figura 4.4 – Corrente elétrica ao longo das camadas - Com alimentação de arame frio	45
Figura 4.5 – DBCP ao longo das camadas depositadas - 130 mm - 150°C	46
Figura 4.6 – DBCP ao longo das camadas depositadas - 130 mm - 100°C	46
Figura 4.7 – Configuração 2 - Resfriamento da Parede com Temperatura de intercamada 150°C sem alimentação de arame frio	47
Figura 4.8 – Configuração 5 - Resfriamento da Parede com Temperatura de intercamada 150°C com alimentação de arame frio	48
Figura 4.9 – Tempo de resfriamento das camadas - 100°C, 150° com e sem alimentação de arame frio (AF)	48
Figura 4.10–Corpos de prova preparados	50
Figura 4.11–Macrografia das peças feitas com temperatura de interpasse de 100°C - a) sem alimentação de arame frio b) com alimentação de arame frio	51
Figura 4.12–Geometria das paredes depositadas	53
Figura 4.13–Gráfico Tensão x Deformação - 100°C, 150°C e sem parada - Sem adição de arame frio	54
Figura 4.14–Gráfico Tensão x Deformação - 100°C, 150°C e sem parada - Com adição de arame frio	54
Figura 4.15–Gráfico da média da tensão máxima para cada configuração	55
Figura 4.16–Gráfico Tensão x Deformação - Comparação base e topo para o caso de 150°C - Sem adição de arame frio	55

Figura 4.17–Gráfico Tensão x Deformação - Comparação base e topo para o caso de 150°C - Com adição de arame frio	56
Figura 4.18–Gráfico Dureza por camada - Comparação entre 100°C, 150°C e sem parada - Sem adição de arame frio	56
Figura 4.19–Gráfico Dureza por camada - Comparação entre 100°C, 150°C e sem parada - Com adição de arame frio	57
Figura 4.20–Gráfico Dureza por camada - Comparação para o caso sem parada - Com e sem adição de arame frio	57
Figura 4.21–Microestrutura para o eletrodo AWS ER70S-6 - Ampliação 500x. a) Amostra de temperatura de interpasse 100°C. b) Amostra de temperatura de interpasse 150°C. c) Amostra feita sem parada.	58
Figura A.1 – Configuração 1: Temperatura de intercamada 100°C sem alimentação de arame frio - Parede 1	65
Figura A.2 – Configuração 1: Temperatura de intercamada 100°C sem alimentação de arame frio - Parede 2	65
Figura A.3 – Configuração 1: Temperatura de intercamada 100°C sem alimentação de arame frio - Parede 3	66
Figura A.4 – Configuração 2: Temperatura de intercamada 150°C sem alimentação de arame frio - Parede 1	66
Figura A.5 – Configuração 2: Temperatura de intercamada 150°C sem alimentação de arame frio - Parede 2	67
Figura A.6 – Configuração 2: Temperatura de intercamada 150°C sem alimentação de arame frio - Parede 3	67
Figura A.7 – Configuração 3: Sem intervalo para resfriamento e sem alimentação de arame frio - Parede 1	68
Figura A.8 – Configuração 3: Sem intervalo para resfriamento e sem alimentação de arame frio - Parede 2	68
Figura A.9 – Configuração 3: Sem intervalo para resfriamento e sem alimentação de arame frio - Parede 3	69
Figura A.10–Configuração 4: Temperatura de intercamada 100°C com alimentação de arame frio - Parede 1	69
Figura A.11–Configuração 4: Temperatura de intercamada 100°C com alimentação de arame frio - Parede 2	70
Figura A.12–Configuração 4: Temperatura de intercamada 100°C com alimentação de arame frio - Parede 3	70
Figura A.13–Configuração 5: Temperatura de intercamada 150°C com alimentação de arame frio - Parede 1	71
Figura A.14–Configuração 5: Temperatura de intercamada 150°C com alimentação de arame frio - Parede 2	71

Figura A.15–Configuração 5: Temperatura de intercâmara 150°C com alimentação de arame frio - Parede 3	72
Figura A.16–Configuração 6: Sem intervalo para resfriamento com alimentação de arame frio - Parede 1	72
Figura A.17–Configuração 6: Sem intervalo para resfriamento com alimentação de arame frio - Parede 2	73
Figura A.18–Configuração 6: Sem intervalo para resfriamento com alimentação de arame frio - Parede 3	73
Figura A.19–Configuração 1: Temperatura de intercâmara 100°C sem alimentação de arame frio	74
Figura A.20–Configuração 2: Temperatura de intercâmara 150°C sem alimentação de arame frio	74
Figura A.21–Configuração 3: Sem intervalo para resfriamento e sem alimentação de arame frio	75
Figura A.22–Configuração 4: Temperatura de intercâmara 100°C com alimentação de arame frio	75
Figura A.23–Configuração 5: Temperatura de intercâmara 150°C com alimentação de arame frio	76
Figura A.24–Configuração 6: Sem intervalo para resfriamento com alimentação de arame frio	76
Figura C.1 – Configuração 1 - Resfriamento da Parede com temperatura de intercâmara 100°C sem alimentação de arame frio	88
Figura C.2 – Configuração 4 - Resfriamento da Parede com temperatura de intercâmara 100°C com alimentação de arame frio	89
Figura C.3 – Comparação da média dos resfriamentos das paredes com temperatura de intercâmara 100°C com e sem alimentação	89
Figura C.4 – Configuração 2 - Resfriamento da Parede com Temperatura de intercâmara 150°C sem alimentação de arame frio	90
Figura C.5 – Configuração 5 - Resfriamento da Parede com Temperatura de intercâmara 150°C com alimentação de arame frio	90
Figura C.6 – Resfriamento da Parede de 130 mm - com temperatura de intercâmara 100°C sem alimentação de arame frio - 20 camadas	91
Figura C.7 – Resfriamento da parede de 130 mm - com Temperatura de intercâmara 100°C com alimentação de arame frio - 20 camadas	91
Figura C.8 – Comparação da média dos resfriamentos das paredes para metalografia com temperatura de intercâmara 100°C com e sem alimentação - 20 camadas	92

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Comparação entre a Manufatura Aditiva com base em pó e fusão a laser com o método MADA	21
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas típicas da liga ER70S-6 e da liga ST-37 de referência	28
Tabela 3.1 – Configurações para as deposições	32
Tabela 3.2 – Parâmetros do experimento	35
Tabela 4.1 – Tensão e corrente elétrica ao longo das camadas - sem alimentação de arame frio	44
Tabela 4.2 – Tensão e corrente elétrica ao longo das camadas - com alimentação de arame frio	45
Tabela 4.3 – Tempo de resfriamento por camada	49
Tabela 4.4 – Tempo total e médio de resfriamento	49
Tabela 4.5 – Espessura da camada para cada uma das configurações - 130 mm . . .	51
Tabela 4.6 – Altura da parede para cada uma das configurações - 130 mm	51
Tabela 4.7 – Espessura e altura média das paredes depositadas - 130 mm	52
Tabela 4.8 – Dureza das amostras retiradas dos corpos de prova de tração	58

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Objetivos	15
2	Revisão Bibliográfica	16
2.1	Manufatura Aditiva de Metal	16
2.2	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco - MADA	20
2.3	Manipulador Robô Motoman HP20	29
3	Materiais e métodos	32
3.1	Configurações das deposições	32
3.2	Montagem e parâmetros do experimento	33
3.3	Execução das Deposições	35
3.4	Análise Microestrutural, de Microdureza e Ensaios Mecânicos	38
4	Resultados	42
4.1	Deposições	42
4.2	Tensão e Corrente elétrica	43
4.3	Resfriamento	47
4.3.1	Paredes com comprimento de 180 mm	47
4.4	Propriedades Mecânicas	50
5	Conclusões	59
6	Trabalhos Futuros	60
	Referências	61
	Apêndices	64
	APÊNDICE A Detalhes das configurações	65
A.1	Paredes de 180 mm	65
A.1.1	Configuração 1	65
A.1.2	Configuração 2	66
A.1.3	Configuração 3	68
A.1.4	Configuração 4	69
A.1.5	Configuração 5	71
A.1.6	Configuração 6	72
A.2	Paredes de 130 mm	74
A.2.1	Configuração 1	74

A.2.2	Configuração 2	74
A.2.3	Configuração 3	75
A.2.4	Configuração 4	75
A.2.5	Configuração 5	76
A.2.6	Configuração 6	76
APÊNDICE B	Programas do Matlab	77
B.1	Leitura dos dados	77
B.2	Plotagem dos dados	84
B.3	Comparação entre os tempos médios de resfriamento	87
APÊNDICE C	Gráficos dos Resfriamentos	88
C.1	Paredes de 180 mm de comprimento	88
C.1.1	Temperatura de intercamada: 100°C	88
C.1.2	Temperatura de intercamada: 150°C	90
C.2	Paredes de 130 mm de comprimento	91
C.2.1	Temperatura de intercamada: 100°C	91
APÊNDICE D	Planilhas de dados - Corrente Elétrica e Ensaios de Tração e Dureza	93
Anexos		94
ANEXO A	Catálogo Esab - Eletrodo ER70S-6	95

1 Introdução

A palavra manufatura é de origem latina, sendo sua etimologia formada pela junção das palavras *Manus*, que significa "mão", e *Factura*, uma conjugação do verbo "fazer". Portanto, inicialmente o conceito de manufatura está relacionado a algo que é feito a mão. Com o advento das Revoluções Industriais, iniciou-se a operação de máquinas a vapor, possibilitando a substituição do trabalho manual que antes era feito com auxílio de força animal ou de elementos da natureza. Posteriormente, com o avanço da tecnologia houve mais revoluções na indústria, surgindo novas fontes de energia, além da criação da eletrônica e da informática (SILVA et al., 2017).

Deste modo, a manufatura foi se revolucionando cada vez mais à medida em que evoluía o avanço tecnológico, atingindo a atualidade, na qual pode-se destacar a automação dos processos, a comunicação entre as máquinas e os sistemas de produção, proporcionados pelo avanço da robótica, internet das coisas, inteligência artificial, possibilitando o surgimento de processos de fabricação como por exemplo a manufatura aditiva.

De modo geral, a manufatura aditiva é um processo possui flexibilidade para fabricar desde geometrias simples até mais complexas. Dentre os métodos possíveis para realizar esse processo, pode-se destacar a fusão em leito de pó, deposição por energia direcionada, além do processo por soldagem a arco (LIU et al., 2020).

O mecanismo necessário para um processo de manufatura aditiva inclui uma fonte de energia, material de adição e um manipulador robótico. No geral, a manufatura aditiva está relacionada à diversas segmentos como esculturas e trabalhos artísticos, além de engenharia e arquitetura (HACKENHAAR et al., 2020).

O processo de manufatura aditiva por soldagem a arco (MADA) embora possua alta aplicabilidade, ainda enfrenta gargalos relacionados às variáveis do processo como tensão e corrente elétrica, velocidade de alimentação e temperatura de intercamada. Pode-se destacar o problema de acúmulo de calor ao longo das deposições da camada, o que pode afetar a geometria e as propriedades mecânicas do material.

A amenização dessas dificuldades vêm sendo buscada por meio de desenvolvimentos de trabalhos que abordam as influências dos parâmetros desse processo. Além disso, diferentes métodos de resfriamento começaram a ser estudados, como por exemplo à água e jato de ar, buscando observar o comportamento da temperatura de intercamada ao longo das deposições. Outras estratégias de preenchimento também vêm sendo implementadas no processo, como a adição de arame frio por um arame secundário.

Assim, o processo de manufatura aditiva possui parâmetros como a temperatura de intercamada, que é a temperatura final da camada depositada, além de possibilidades de implementar a adição de um arame secundário na temperatura ambiente (arame frio). Tem-se como motivação para este trabalho, verificar a influência desses parâmetros no tempo de resfriamento, comportamento mecânico e produtividade no MADA. Além disso, justifica-se essa pesquisa também pela ausência de trabalhos na literatura que mostram a influência da temperatura de intercamada nas propriedades mecânicas do material.

1.1 Objetivos

Entre os objetivos deste trabalho estão a contribuição com os avanços científicos na área de manufatura aditiva por soldagem a arco, tendo como objetivo geral avaliar a influência da alimentação de arame frio e da temperatura de intercamada no resfriamento, na geometria e propriedades mecânicas das pré-formas fabricadas pelo processo de manufatura aditiva por deposição a arco (MADA).

Para isso, têm-se como objetivos específicos:

- Verificar o comportamento da tensão e corrente elétrica durante as deposições de cada uma das configurações.
- Avaliar a influência do arame frio e da temperatura de intercamada no tempo de resfriamento das paredes fabricadas.
- Analisar a influência do arame frio na geometria das paredes, examinando a altura e espessura das pré-formas fabricadas.
- Observar a influência da temperatura de intercamada e da alimentação de arame frio na resistência máxima à tração.
- Verificar a influência do arame frio e da temperatura de intercamada na dureza das paredes fabricadas e na microestrutura.

2 Revisão Bibliográfica

Conforme Huang et al. (2013), a manufatura aditiva é um processo de junção de materiais, camada sobre camada, para fabricar objetos a partir de um modelo tridimensional. Frazier (2014) compartilha dessa definição de manufatura aditiva e destaca a oposição desse processo às metodologias de manufatura subtrativas, ou seja os processos nos quais ocorre a remoção de materiais a partir de matéria-prima, como por exemplo fresagem e perfuração. Ford (2014) propõe uma definição de manufatura aditiva que não é apenas um processo de fabricação oposto à manufatura tradicional. De acordo com Ford (2014), o processo de manufatura aditiva engloba um grupo de tecnologias emergentes que a partir de um modelo digital fabrica objetos 3D, por meio da adição de algum tipo de material, como por exemplo polímeros, cerâmicas ou metais.

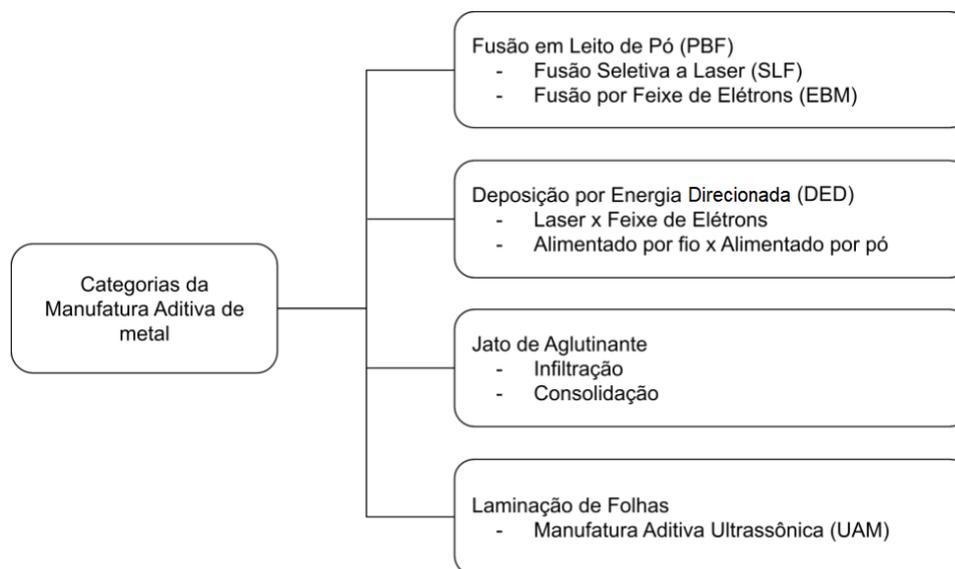
Neste capítulo, serão expostos alguns métodos existentes de manufatura aditiva de metal, com destaque para o processo por soldagem a arco com adição de material em forma de arame, que será o método abordado neste trabalho. Além disso, será apresentado também o manipulador robótico que será utilizado nesse trabalho, mostrando suas funções, programação e características.

2.1 Manufatura Aditiva de Metal

A manufatura aditiva de metal é um processo de fabricação de peças, por meio da adição de algum metal, fabricado a partir de um modelo 3D previamente projetado. Possui alta precisão e tempo de fabricação curto, com liberdade para geometrias simples ou até mais complexas (DUDA; RAGHAVAN, 2016).

Pode-se destacar alguns métodos para realizar o processo de manufatura aditiva de metal, como por exemplo a fusão em leito de pó (*PBF - powder bed fusion*); a deposição por energia direcionada (*DED - directed energy deposition*); por soldagem a arco (*WAAM - Wire and arc additive manufacturing*) (LIU et al., 2020). Além disso, existem outros métodos conforme apresentado no fluxograma da Figura 2.1.

Figura 2.1 – Métodos de Manufatura Aditiva de metal



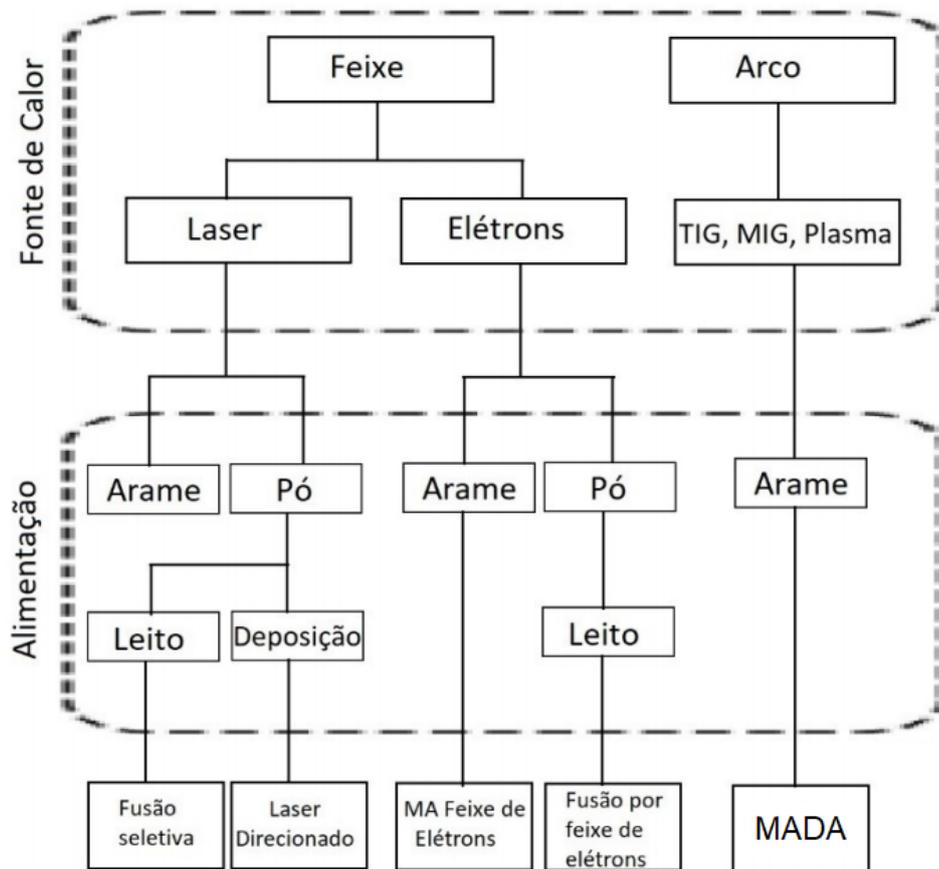
Fonte: Adaptado de Liu et al. (2020)

Em processos de fusão em leito de pó, como fusão por feixe de laser (LBM), fusão por feixe de elétrons (EBM) e sinterização direta a laser de metal (DMLS), o pó de metal é espalhado na área de trabalho em uma câmara fechada. Então, um laser ou feixe de elétrons funde seletivamente o pó, criando uma camada da peça final. A plataforma de base é então abaixada, de acordo com essa espessura da camada feita, e esse procedimento é repetido até que a peça seja concluída. Sistemas de fusão de leito de pó normalmente permitem alta precisão geométrica e boas propriedades mecânicas, entretanto têm uma taxa de deposição relativamente baixa e são usados principalmente para produzir peças com pequenas dimensões (PAOLINI et al., 2019).

No processo de deposição de energia direcionada, uma poça de fusão é criada na superfície da estrutura fabricada, através de laser, feixe de elétrons ou arco elétrico. Ao mesmo tempo, pó de metal ou fio/arame é adicionado ao reservatório de fusão para gerar uma camada adicional da peça (PAOLINI et al., 2019). Dentre esses processos, pode-se destacar a deposição de metal a laser (*LMD - Laser Metal Deposition*), caracterizado pela fusão a laser do material que é adicionado em forma de pó, e o processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (*WAAM - Wire Arc Additive Manufacturing*), na qual a adição de material é feita através de um arame de metal e a fusão através do arco elétrico.

Conforme Figura 2.2, os processos de manufatura aditiva também são classificados de acordo com sua fonte de calor e alimentação. Com relação aos métodos que utilizam alimentação por arame, os processos mais comuns utilizados são TIG, MIG/MAG (GMAW) e Plasma. Desta forma, pode-se denominar esses processos como Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) (SILVA et al., 2020).

Figura 2.2 – Processos de Manufatura Aditiva classificados de acordo com sua fonte de calor e alimentação



Fonte: Adaptado de Williams e Martina (2015)

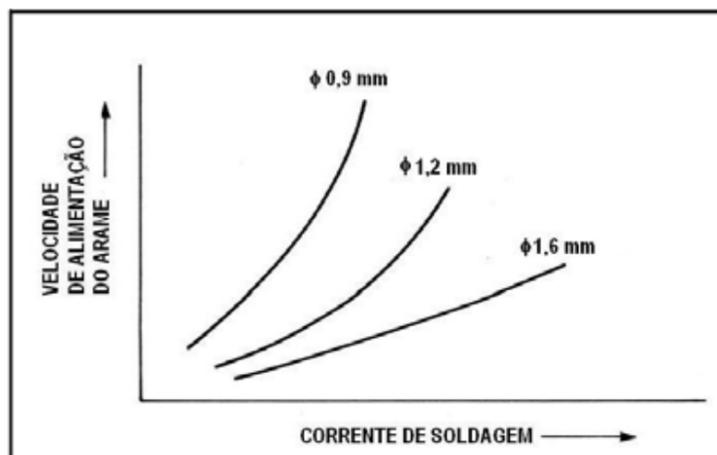
O método GMAW é um processo de soldagem por arco elétrico no qual utiliza-se um eletrodo consumível em forma de arame fornecido por uma alimentação constante de um sistema mecânico, efetuando a união de materiais através da fusão enquanto imerso por um gás de proteção, que pode ser inerte (caracterizando o processo *MIG - Metal Inert Gas*), como por exemplo o Argônio, ou um gás ativo (caracterizando o processo *MAG - Metal Active Gas*), como por exemplo o Dióxido de Carbono, ou ainda uma mistura entre eles. (SILVA et al., 2017).

O processo GMAW possui como principais parâmetros a tensão (que tem como característica uma curva constante) e corrente de soldagem, a distância entre o bico de contato e peça (DBCP), a velocidade de alimentação e a temperatura de intercamada em processos de manufatura aditiva (MARQUES et al., 2017).

Considerando a DBCP constante, pode-se observar conforme a Figura 2.3 que a corrente e a velocidade de alimentação estão diretamente ligadas, ou seja, ao elevar a velocidade de alimentação do arame a corrente de soldagem também irá ser aumentada

(FORTES; VAZ, 2005).

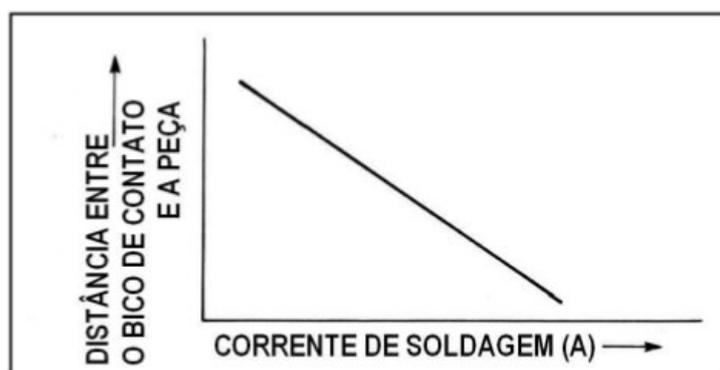
Figura 2.3 – Relação entre velocidade de alimentação e corrente de soldagem



Fonte: (FORTES; VAZ, 2005)

A velocidade de alimentação pode ser definida como uma razão entre a trajetória feita pelo arco na soldagem da peça por um determinado tempo decorrido para efetuar esse caminho. Em processos envolvendo peças de espessura mais elevada, a velocidade tende a diminuir. Caso a velocidade de alimentação se mantenha constante, e a variação ocorra aumentando a DBCP, a corrente de soldagem será diminuída, conforme pode-se observar na Figura 2.4 (FORTES; VAZ, 2005).

Figura 2.4 – Relação entre Distância entre o bico de contato e a peça com a corrente de soldagem

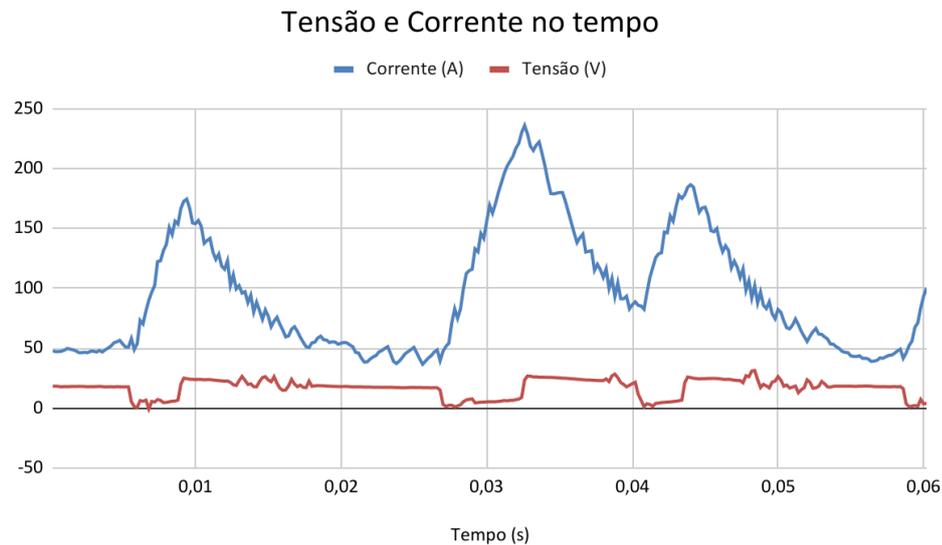


Fonte: (FORTES; VAZ, 2005)

A tensão de soldagem, juntamente com a composição química do eletrodo e o gás de proteção, tem uma influência no modo de transferência metálica que será efetuado no processo de soldagem, isto é, na forma como o metal fundido será transferido do eletrodo para a poça de fusão. Para transferência por curto circuito, a tensão é mais baixa, diferentemente das transferências dos tipos *spray* e globular, nas quais trabalham-se com

tensões mais elevadas (SILVA et al., 2020). O comportamento característico dos parâmetros elétricos do processo GMAW de curto circuito é ilustrado na Figura 2.5, observado nos ensaios realizados por Arcanjo (2021).

Figura 2.5 – Tensão e corrente elétrica no tempo



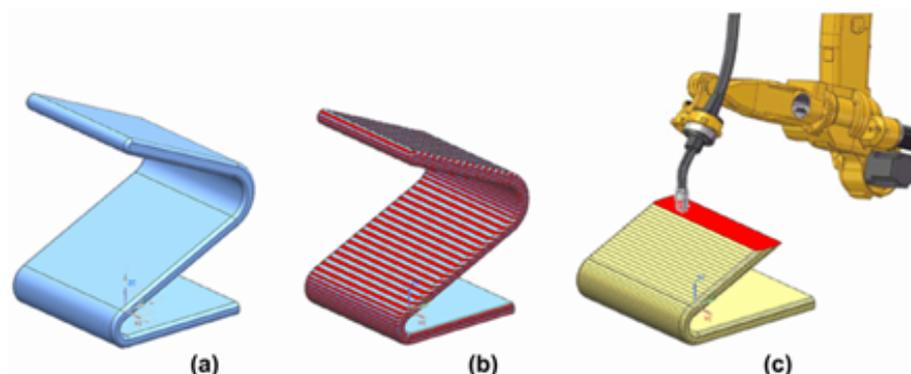
Fonte: (ARCANJO, 2021)

Além disso, nos processos de manufatura aditiva mantendo-se os outros parâmetros constantes, ao diminuir a temperatura de intercamada, isto é a temperatura final da camada que foi depositada quando se iniciar a próxima deposição, a superfície da peça fabricada será de boa qualidade superficial com rugosidade menor (XIONG et al., 2018). Hackenhaar (2021) comenta que a diminuição da temperatura de intercamada está relacionada à um tempo de espera (*idle time*) maior entre as deposições, prejudicando a produtividade. Desta forma, uma maneira de diminuir esse tempo de espera é trabalhar com sistemas de resfriamento ativo, como por exemplo jato a ar, água, arame frio, entre outros.

2.2 Manufatura Aditiva por Deposição a Arco - MADA

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) é um processo no qual a deposição de metal em camadas é feita pelo processo de fusão de um metal de adição na forma de arame (ASTM, 2015). Conforme Figura 2.6(a), a partir de um modelo tridimensional, divide-se o objeto em camadas (Figura 2.6(b)), definindo as trajetórias na qual será feita a adição de metal, com a utilização, por exemplo, de um robô (Figura 2.6(c)) (ALBERTI et al., 2016).

Figura 2.6 – Esquema da MADA; (a) modelo CAD 3D; (b) divisão do modelo em camadas; (c) deposição das camadas robotizadas



Fonte: Alberti et al. (2016)

Conforme Tabela 2.2, comparado com a manufatura feita através de processos com aditivos em pó e fusão a laser, o MADA possui aplicabilidade mais ampla, pois abrange uma maior variedade de materiais metálicos e custo mais baixo, mesmo sendo capaz de fabricar peças grandes e complexas. Além disso, possui maior taxa de deposição e um custo de hardware do sistema mais barato do que os de sistemas envolvendo fusão a laser e pó, fazendo com que o processo MADA possua uma aplicação comercial muito ampla (LIU et al., 2020).

Tabela 2.1 – Comparação entre a Manufatura Aditiva com base em pó e fusão a laser com o método MADA

	Manufatura Aditiva envolvendo laser e pó	MADA
Taxa de deposição	0,1-0,2 kg/h (baixo)	4 kg/h (alto)
Taxa de utilização	10-60% (baixo)	90% (alto)
Materiais adequados	Liga de titânio, liga de aço	Liga de alumínio, liga de magnésio, liga de aço
Custo de fabricação	Alto	Baixo
Aplicação em peças de trabalho	Peças complexas, peças pequenas	Peças em geral
Precisão na fabricação	0,05 mm (alto)	0,2 mm (baixo)

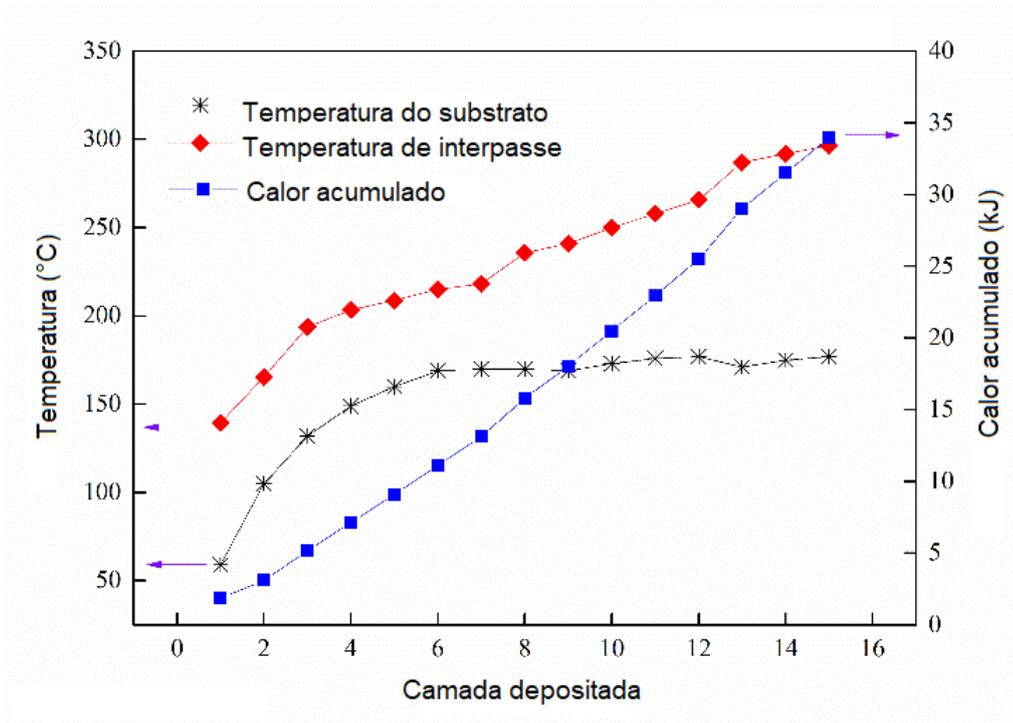
Adaptada de (LIU et al., 2020)

Entretanto, o método MADA também apresenta algumas desvantagens como maior instabilidade no processo, precisão inferior da peça formada e qualidade superficial menor comparado a outros métodos. Além disso, é comum a presença de defeitos de soldagem como trincas, poros e distorções de solda (LIU et al., 2020).

Por possuir uma alta taxa de deposição e uma grande quantidade de energia envolvida no processo, o acúmulo de calor, devido a uma dissipação insuficiente, é um fator crítico que afeta a estabilidade do processo MADA com relação à precisão geométrica, defeitos de deposição e propriedades do material (WU et al., 2017). Conforme Yang et al. (2016), em peças de trabalho com paredes finas, à medida em que a altura da parede se eleva o acúmulo de calor se torna um fator ainda mais influente.

De acordo com Wu et al. (2017), utilizando um pirômetro infravermelho, mediu-se a temperatura de interpasse na manufatura aditiva de uma liga de Ti6Al4V, enquanto a temperatura de substrato foi monitorada por termopares e a estabilidade do arco e transferência de metal eram monitorados por uma câmera de alta velocidade. Os resultados mostraram que devido à dissipação térmica ao longo da parede, existe uma diferença significativa na variação de temperatura entre o substrato e a camada depositada. Além disso, devido ao acúmulo de calor a oxidação da superfície entre camadas e a geometria do cordão variam ao longo da peça, principalmente nas primeiras camadas de parede depositada, levando a uma variação na forma do arco e no comportamento de transferência metálica. Durante a fabricação, a diferença na temperatura de interpasse entre as camadas subsequentes determina o acúmulo de calor final ao longo da deposição, conforme observa-se na Figura 2.7. Notou-se que o acúmulo de calor aumentou conforme aumentou-se também o número de camadas.

Figura 2.7 – Acúmulo de calor ao longo da deposição da liga Ti6Al4V feita por MADA

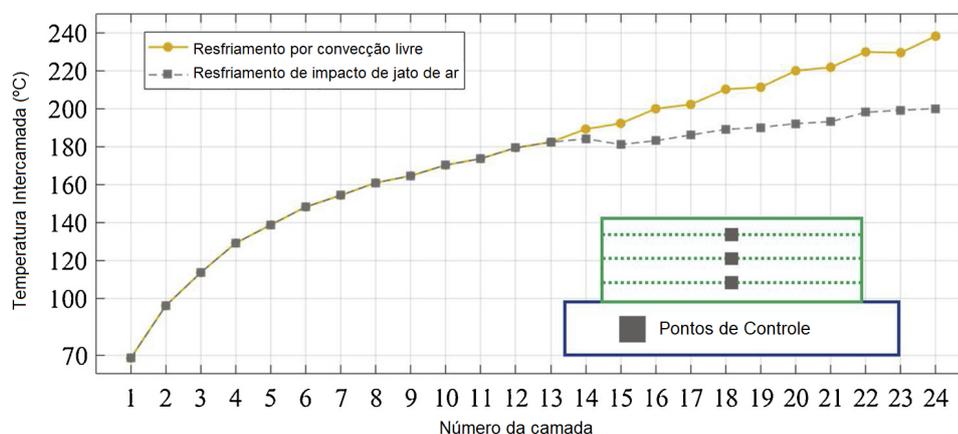


Fonte: Adaptada de Wu et al. (2017)

Hackenhaar et al. (2020) realizou a fabricação de amostras utilizando a liga ER70S-6 como material de deposição através do processo MADA, em seguida comparou amostras que foram resfriadas por convecção livre e por choque de jato de ar. Os resultados indicaram que o resfriamento por jato de ar tem influência significativa no processo, limitando o aumento progressivo da temperatura de interpasse em relação ao resfriamento por convecção livre. O método de resfriamento com jato de ar reduziu as temperaturas do substrato. Ao utilizar esse tipo de resfriamento, o aumento do tempo de espera de 30 segundos para 120 segundos não resultou em diminuição da temperatura do substrato. Entretanto, os testes realizados com tempo ocioso de 10 segundos comprovaram que o jato de ar não evitou o aumento da temperatura do substrato, reduzindo apenas sua magnitude. Isso sugere que, para um determinado processo, tamanho da peça e condição do jato, há um limite para a eficácia do resfriamento de ar.

A Figura 2.8 apresenta os resultados da comparação das temperaturas simuladas entre camadas para convecção livre e condições de resfriamento por impacto de jato de ar. Em ambas as curvas, a temperatura de intercamada aumenta ao longo do processo de deposição. No entanto, a curva relacionada ao jato de ar mostra uma mudança significativa na inclinação da curva após a ativação do resfriamento a ar.

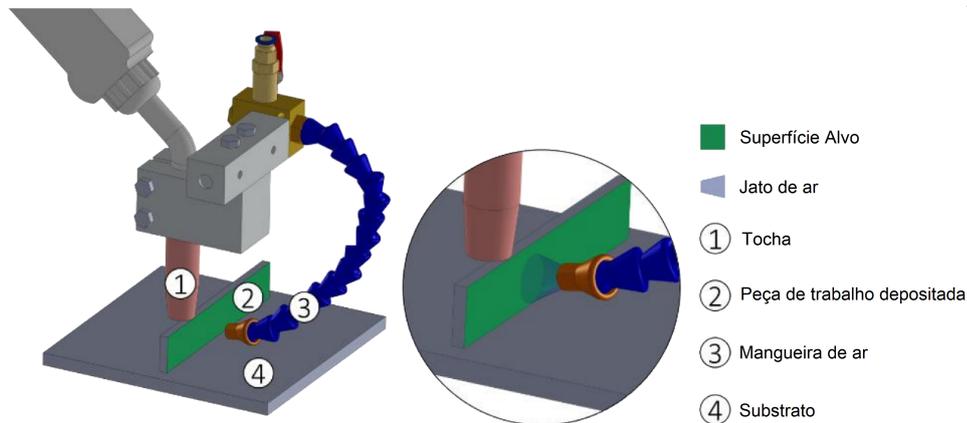
Figura 2.8 – Comparação das temperaturas simuladas entre camadas para convecção livre e condições de resfriamento por impacto de jato de ar



Fonte: Adaptada de Hackenhaar et al. (2020)

Montevecchi et al. (2018) também efetuou um sistema de resfriamento de peças baseado no impacto de jatos de ar, obtendo resultados que destacam que a técnica proposta pode ser considerada uma abordagem promissora a fim de prevenir a ocorrência do acúmulo de calor. A estrutura do sistema de resfriamento montado continha uma mangueira de resfriamento, acoplada à tocha de soldagem, movendo-se sincronizadamente com ela. O bico da mangueira conduzia o jato de ar na superfície depositada (destacada em verde na Figura 2.9) abaixo da tocha de soldagem.

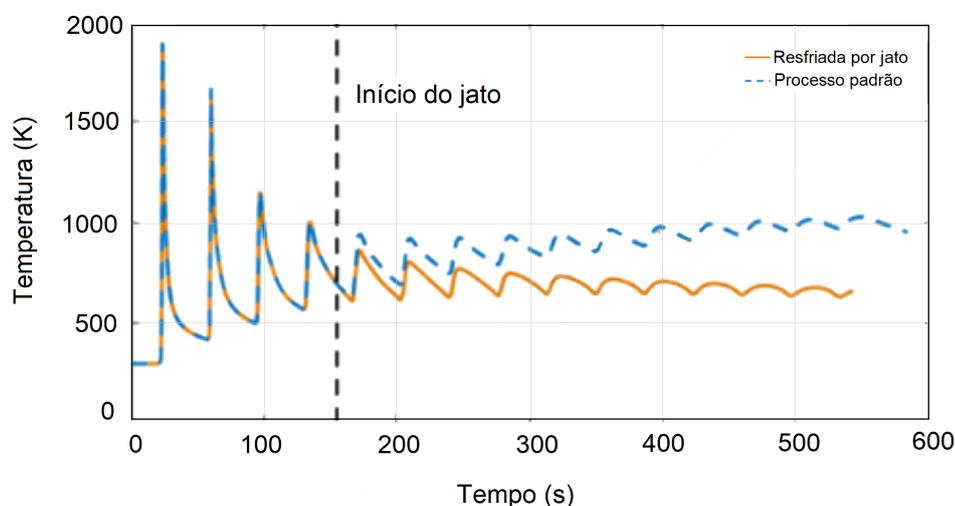
Figura 2.9 – Estrutura do sistema de resfriamento



Fonte: Adaptada de Montevecchi et al. (2018)

A parede fabricada foi feita de aço ER70S-6 com 15 camadas e espessura de 1,6 mm, depositada em um substrato feito de aço estrutural S235. A velocidade de deslocamento foi de 300 mm/min e o aporte térmico de 1480 W. O acionamento do jato de ar ocorreu no início da deposição da quinta camada perpendicular à superfície e em movimentos sincronizado com a tocha de soldagem. Os resultados do monitoramento da temperatura confirmam a eficácia do resfriamento por impacto do jato no que diz respeito à temperatura de interpasse. Observando a simulação de resfriamento padrão, a temperatura mínima por ciclo aumenta progressivamente durante a simulação, indicando uma temperatura variável entre cada passe. Por outro lado, na simulação de resfriamento a jato é praticamente constante desde a ativação do jato, destacando a eficácia do impacto do jato em prevenir um aumento da temperatura entre passes. Portanto, as simulações destacam que o resfriamento por impacto de jato de ar pode ser uma técnica eficaz para prevenir os efeitos prejudiciais do acúmulo de calor (MONTEVECCHI et al., 2018)

Figura 2.10 – Comparação das temperaturas do processo resfriado a jato de ar e processo padrão sem resfriamento

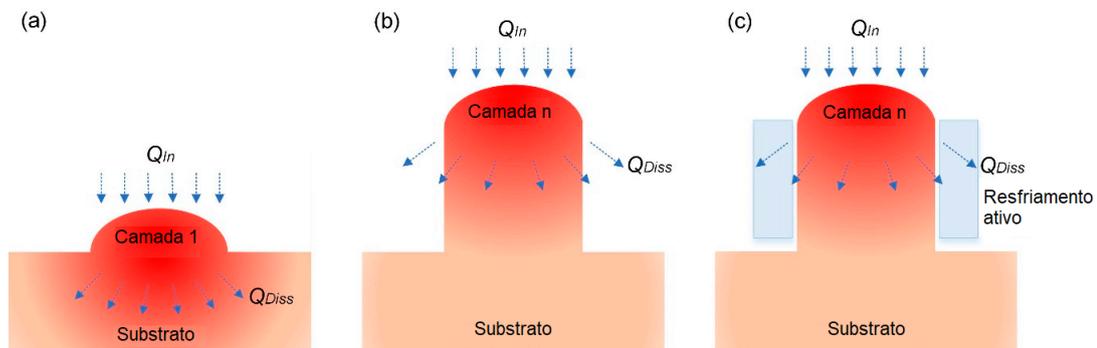


Fonte: Adaptada de Montevecchi et al. (2018)

Li et al. (2018) realizou um estudo de um sistema de resfriamento ativo baseado na tecnologia de resfriamento termoelétrico no MADA, buscando eliminar a diferença na dissipação de calor entre as camadas superior e inferior. Os resultados mostraram que, com o auxílio do resfriamento termoelétrico, o erro de largura do cordão é reduzido em 56,8%, o tempo total de fabricação é reduzido em 60,9% e o tamanho médio do grão é refinado em 25%.

Embora o processo MADA tenha se originado da soldagem, a dissipação de calor apresenta diferenças. Na soldagem, o calor é conduzido da poça de fusão diretamente para o substrato, conforme Figura 2.11. Já no MADA, o calor é transferido parcialmente para o substrato através das camadas previamente depositadas e parcialmente para o ambiente por convecção e radiação, conforme Figura 2.11. A resistência térmica condutiva ao substrato aumenta à medida em que a altura da parede depositada aumenta, dissipando maior quantidade de calor para o ambiente. Entretanto, a condução de calor direta para o substrato é mais eficaz do que essa dissipação atrasando o processo de solidificação da poça fundida e, conseqüentemente, gerando um cordão de solda mais espesso e com altura menor do que o esperado (LI et al., 2018).

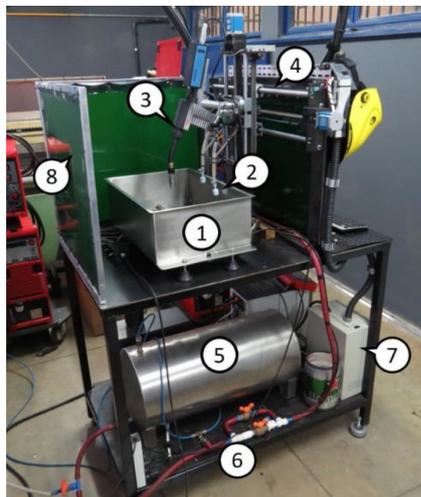
Figura 2.11 – Diagrama esquemático da entrada de calor (Q_{In}) e dissipação de calor (Q_{Diss}) durante: (a) Soldagem; (b) Manufatura aditiva por deposição a arco (MADA); (c) MADA com resfriamento ativo



Fonte: Adaptada de Li et al. (2018)

Outro processo de resfriamento foi realizado por Scotti et al. (2020), denominado NIAC (*Near-Immersion Active Cooling*), o qual trata-se de um resfriamento ativo com uma imersão parcial em um tanque com água, conforme mostrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Plataforma de laboratório montada para a técnica NIAC: (1) tanque de água; (2) interruptor de flutuação; (3) tocha CMT; (4) sistema de movimento linear; (5) tanque de água pressurizada; (6) válvulas pneumáticas / hidráulicas; (7) controlador CNC; e (8) cortina de proteção

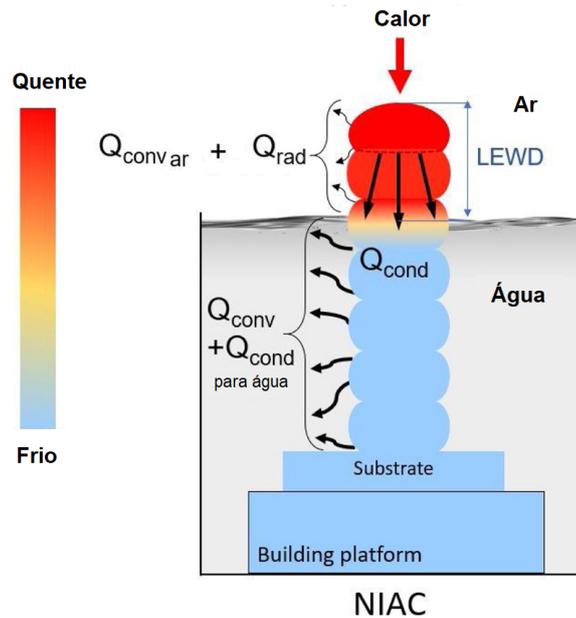


Fonte: (SCOTTI et al., 2020)

O NIAC é baseado na imersão parcial controlada e contínua do pré-molde em construção em um tanque de água para resfriamento, aumentando a dissipação de calor por condução e convecção para este fluido, conforme Figura 2.13. O enchimento do tanque é feito constantemente por um sistema pneumático/hidráulico ao longo da deposição, mantendo uma distância constante, separando a lâmina de líquido e o nível atual de

deposição, definido como a distância entre a borda da camada e a água (LEWD). Devido a essa dissipação de calor, a temperatura de interpassagem e o acúmulo de calor diminuem significativamente à medida em que a deposição acontece (SILVA et al., 2020).

Figura 2.13 – Ilustração da técnica NIAC com um modelo simplificado de balanço de energia térmica e a representação do parâmetro da borda da camada à água (LEWD), onde: Q_{cond} = calor por condução; Q_{conv} = calor de convecção; Q_{rad} = radiação de calor



Fonte: Adaptada de Silva et al. (2020)

Com relação às propriedades mecânicas, Ron et al. (2019) utilizaram uma liga ST-37 como referência para comparação com o aço ER70S-6, visto que ambas as ligas apresentam uma composição química semelhante, chegando em medições que revelaram que a resistência ao escoamento, resistência à tração e dureza da liga ER70S-6 foi inferior comparada com a liga ST-37 de referência, entretanto a ductilidade do ER70S-6 foi superior, conforme Tabela 2.2 a seguir. O autor comenta que essas diferenças nas comparações das ligas podem estar relacionadas à quantidade reduzida da fase perlita, presente na liga ER70S-6, bem como aos processos de deformação plástica, presentes na liga de referência comparada.

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas típicas da liga ER70S-6 e da liga ST-37 de referência

Propriedades Mecânicas	ER70S-6	ST-37
Limite de escoamento (Mpa)	365,9 ± 4,6	593,8 ± 12,9
Resistência à tração (Mpa)	475,7 ± 2,3	611,2 ± 12,9
Alongamento uniforme (%)	12,1 ± 2,7	6,7 ± 0,2
Alongamento total (%)	34,6 ± 3,6	12,6 ± 0,2
Dureza (HV)	192,4 ± 6	259,1 ± 15

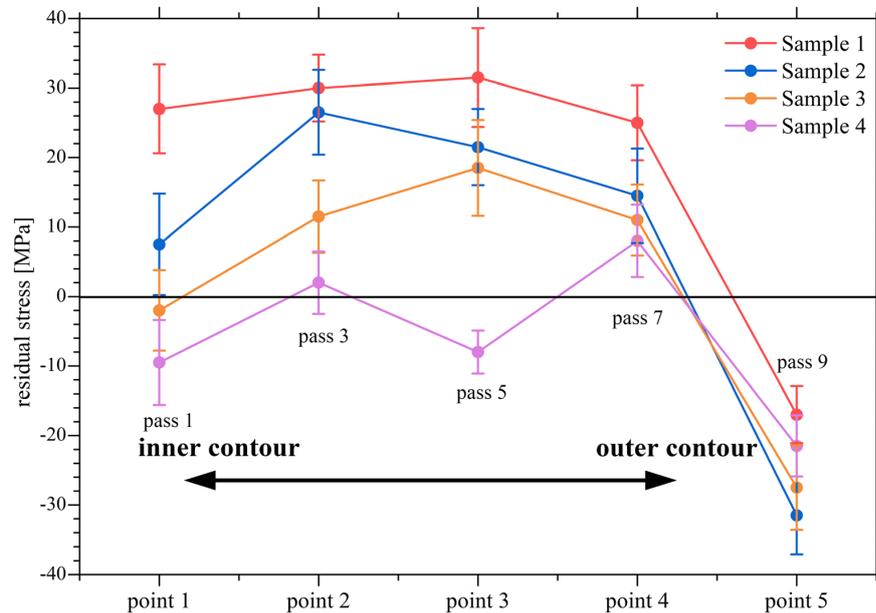
Adaptada de (RON et al., 2019)

Conforme Ermakova et al. (2020), ao realizar uma comparação entre componentes feitos de ligas de aço carbono ER70S-6 e ER100S-1, fabricados por manufatura aditiva, os resultados revelaram que o valor médio de dureza em corpos de prova de aço ER70S-6 é 155 HV, sendo 61% menor do que o valor obtido para o aço ER100S-1. Além disso, na parte superior e inferior das paredes fabricadas por manufatura aditiva, valores de dureza mais elevados são observados para o material ER70S-6, enquanto os valores de dureza no material ER100S-1 foram quase uniformes. Os resultados também mostraram que menor tensão de escoamento e valores de resistência à tração foram observados em corpos de prova feitos de ER70S-6, que exibiram a maior tenacidade à fratura média em comparação com as amostras ER100S1, confirmando que os valores de tensão de escoamento e dureza são proporcionais entre si e inversamente proporcionais à tenacidade à fratura.

Hackenhaar et al. (2020) realizaram um estudo das propriedades mecânicas com resfriamento no processo MADA e analisando o material ER70S-6 observou-se a predominância de ferrita com pequenos carbonetos e variação no tamanho de grão nas regiões de diferentes durezas. Além disso, foi observado que o aumento da dureza está relacionado ao refino da microestrutura. Apesar de diferenças na microestrutura, não houve variação significativa de dureza nas regiões da amostra analisada (base, meio e topo).

Zhang et al. (2020) realizou um estudo de planejamento de caminho na deposição de uma liga de alumínio de grau ER4043, a fim de revelar o efeito da trajetória, obtendo diferentes resultados com relação à tensão residual. Utilizando 4 amostras com diferentes números de camadas, sendo amostra 1 com zero camadas de contorno, amostra 2 com 2 camadas de contorno, amostra 3 com 4 camadas de contorno e amostra 4 com 6 camadas de contorno, foi possível comparar o método zigue-zague e o deslocamento de contorno. Os resultados mostraram que a tensão residual se manteve mais uniforme nas regiões que foram depositadas pelo planejamento de caminho de deslocamento de contorno. Além disso, na Amostra 1, que foi depositada usando o método totalmente em zigue-zague e com nenhuma camada de contorno, as tensões residuais de tração são as maiores em comparação com as outras três amostras. Assim, para um mesmo ponto de teste, à medida em que se aumenta as camadas de contorno, ocorre a diminuição das tensões. Ou seja, a mudança na estratégia de planejamento do caminho influencia nas tensões residuais.

Figura 2.14 – Resultados de medição de tensão residual de XRD da Amostra 1, Amostra 2, Amostra 3 e Amostra 4 em função dos pontos de teste de contorno interno para contorno externo.



Fonte:(ZHANG et al., 2020)

2.3 Manipulador Robô Motoman HP20

Para o desenvolvimento desse projeto será utilizado um manipulador robótico Motoman HP20, conforme exemplo mostrado na Figura 2.15. Esse modelo é caracterizado pela alta precisão e versatilidade de aplicações, como em processos industriais de pintura, montagens, manuseio e soldagem de materiais.

Figura 2.15 – Robô Motoman HP20



Fonte: Motoman

Esse modelo é controlado por um controlador DX100, mostrado na Figura 2.16, que possui uma chave liga/desliga, botão de parada de emergência, conexões para cabos

e portas de entrada/saída, além de um *Pendant*, que é um dispositivo de controle para realizar as operações e programação do robô.

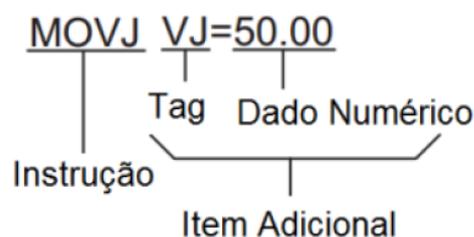
Figura 2.16 – Controlador DX100



Fonte: Motoman

Para realizar as programações desse manipulador, utiliza-se uma linguagem denominada INFORM III, desenvolvida pela própria Motoman. Os comandos efetuados são compostos por uma instrução e outros itens adicionais, conforme exemplificado na Figura 2.17 (SILVA et al., 2017).

Figura 2.17 – Exemplo de comando para movimentação



Fonte: (SILVA et al., 2017)

Nesse exemplo, pode-se observar que trata-se de uma movimentação joint (MOVJ) com uma velocidade definida de 50, que controla o destino do robô. Esse tipo de movimentação é utilizado para movimentos aéreos e de aproximação. Existem outros tipos de movimento utilizados, como por exemplo a função MOVL (Movimento Linear), fazendo o robô se movimentar em linha reta até o ponto desejado; MOVC (Movimento Circular), fazendo o robô se movimentar em uma trajetória circular. Além disso existe também a

função de movimento IMOV que realiza um movimento incremental programado no eixo desejado.

Com relação à programação para realizar a fabricação de uma parede, além das funções de movimentação utiliza-se também o *JUMP* e *SFTON*. O *JUMP* pode ser utilizado para criar um loop, conforme exemplo da Figura 2.18

Figura 2.18 – Exemplo da função *JUMP*

```
0000    NOP
0001    MOVJ VJ=0.78
0002    SET B001 3
0003    MOVJ VJ=100.00
0004    MOVJ VJ=25.00
0005    *LABEL
0006    MOVC V=725
0007    MOVC V=725
0008    MOVC V=725
0009    MOVC V=725
0010    DEC B001
0011    JUMP *LABEL IF B001 > 0
0012    MOVJ VJ=25.00
0013    MOVJ VJ=100.00
0014    END
```

Fonte: Motoman

Neste exemplo quando o controlador passar pela linha 11, o programa retornará para linha 5 e executará esse trecho da programação enquanto a condição determinada for verdadeira. Quando a condição for falsa, o programa seguirá para as linhas seguintes.

A função *SFTON* é uma função de deslocamento que permite a movimentação ao longo de um eixo com uma distância programada. Quando essa função é acionada juntamente com a função *JUMP*, as posições que estavam previamente programadas nesse *sub-job* serão alteradas pelo deslocamento previamente programado. Dessa forma, utiliza-se também dessas duas funções para realizar as deposições incrementando uma altura programada entre uma camada e outra.

3 Materiais e métodos

Para a execução dos experimentos deste trabalho utilizou-se da estrutura do Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Para estudar a influência da adição de arame frio no processo MADA, foram avaliados o tempo de resfriamento para diferentes temperaturas de intercamada (intercamada), a resistência à tração, dureza, além de visualizar também a geometria da parede e qualidade superficial do cordão.

3.1 Configurações das deposições

Conforme Tabela 3.1, estabeleceram-se diferentes configurações dos parâmetros para realizar as deposições, variando a temperatura de intercamada utilizando 100°C, 150°C e de forma direta sem intervalo para resfriamento, além de variar a alimentação alternando entre arame único e arames múltiplos, com a presença de alimentação de arame frio.

Para cada tipo de configuração, foram feitas 3 paredes de 20 camadas e comprimento de 180 milímetros. Posteriormente repetiu-se as mesmas configurações, entretanto com comprimento de 130 milímetros fazendo 1 parede de 20 camadas para cada configuração.

Tabela 3.1 – Configurações para as deposições

Configuração	Observações
1	100°C - Temperatura de Intercamada de 100°C sem alimentação de arame frio
2	150°C - Temperatura de Intercamada de 150°C sem alimentação de arame frio
3	Sem parada - Sem espera para resfriamento e sem alimentação de arame frio
4	AF100°C - Temperatura de Intercamada de 100°C com alimentação de arame frio
5	AF150°C - Temperatura de Intercamada de 150°C com alimentação de arame frio
6	AF Sem Parada - Sem espera para resfriamento e com alimentação de arame frio

Fonte: própria

3.2 Montagem e parâmetros do experimento

Definida as configurações, partiu-se para a montagem e configuração dos equipamentos necessários. Conforme Figura 3.1, os arames utilizados para o processo GMAW foram ambos o AWS ER70S-6. Utilizou-se como metal de base o aço SAE 1020. O gás de proteção foi a mistura de Argônio com 25% de Gás Carbônico ($Ar + 25\%CO_2$) com uma vazão de 25 L/min.

Figura 3.1 – Carretéis de Arames ER70S-6 utilizados para o processo GMAW - Arame energizado e arame frio



Fonte: própria

Para execução das deposições se utilizou uma fonte eletrônica e multiprocesso IMC DIGIPLUS A7 450 com aparato de soldagem GMAW associada a um robô Yaskawa Motoman HP20, conforme mostrado nas Figuras 3.3 e 3.2. A Distância Bico-de-Contato-Peça (DBCP) utilizada foi de 12 mm, utilizando o modo de operação GMAW convencional com transferência por curto circuito, trabalhando com uma tensão de 18 V para o arame energizado. O diâmetro do arame frio utilizado foi de 1,0 mm com velocidade de alimentação de 1,5 m/min e do arame energizado de 1,2 mm de diâmetro com velocidade de alimentação de 3,0 m/min. A corrente elétrica de trabalho durante cada deposição foi monitorada através de um sistema de aquisição de dados, composto por uma placa de aquisição modelo NI USB-6009 com resolução de 14 bits e faixa de medição de ± 10 V, um condicionador de sinal, além de um computador com o software LabView no qual utilizou-se uma frequência de aquisição de 5 kHz com um intervalo de leitura de 5s.

O resfriamento dos cordões foi monitorado pelo sistema de medição de temperatura que está ligado a uma placa Arduino e um computador, com um sensor MLX90614ESF-DCI, que está no interior da peça fabricada por impressão 3D e é protegido por um sistema com portinhola que se abre através de um servo motor no momento da leitura da temperatura. Esse sistema foi acoplado ao robô, conforme mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.2 – Fonte IMC para alimentação de arame energizado



Fonte: própria

Figura 3.3 – Conjunto do Sensor de Temperatura e alimentação de arame frio acoplados no Robô Motoman HP20



Fonte: própria

Embora o sensor possua um limite de medida de temperatura inferior às temperaturas que o cordão depositado apresentava, é possível verificar o tempo de resfriamento até a temperatura de intercâmara desejada. Desta forma as curvas de resfriamento possuem temperatura máxima de aproximadamente 285°C, devido a essa limitação, porém será

possível verificar o tempo de resfriamento até a temperatura de 100°C ou 150°C.

Tabela 3.2 – Parâmetros do experimento

Parâmetros	Observações
Tensão	18 V
Arames frio e energizado	ER70S-6 - com diâmetros de 1,0 mm e 1,2 respectivamente
Velocidade de alimentação	1,5 m/min para o arame frio e 3,0 m/min para o arame energizado
Gás de Proteção	Ar + 25%CO ₂ - vazão de 25 L/min
DBCP	12 mm

3.3 Execução das Deposições

Inicialmente foram fabricadas paredes com comprimento de 180 mm, visando obter posteriormente os corpos de prova para ensaios de tração. Conforme as configurações da Tabela 3.1, as primeiras deposições (configurações 1,2 e 3) foram feitas sem alimentação de arame frio. Em todas as configurações, os cordões foram feitos em linha reta, realizando movimentos de ida e retorno no eixo Y do robô, acrescentando um incremento em altura de 1,85 mm para o eixo Z. Nas deposições cuja temperatura de intercamada foi 100°C e 150°C, o resfriamento foi observado através do sistema de medição de temperatura.

Em cada camada depositada o robô se dirigia a um ponto de medição, no qual o sensor se posicionava na extremidade do cordão depositado, realizando assim a medição de temperatura. Através de um painel ligado ao sistema de temperatura do arduino era possível visualizar as medidas de temperatura lidas pelo sensor. Quando a medida se aproximava da temperatura de intercamada, começava-se a soar um alerta sonoro a cada segundo indicando que a soldagem estava próxima a ser retomada. Atingida a temperatura de intercamada, o robô direcionava-se para posição a qual havia pausado a deposição, e assim, retomava para realizar a camada seguinte.

Nas configurações 4, 5 e 6 existe a presença de alimentação de arame frio, ou seja, as deposições foram feitas com arames múltiplos. Conforme a Figura 3.4, utilizou-se uma fonte SUMIG para o arame frio. Acoplou-se o sistema de arame frio ao robô utilizando um suporte de alumínio. Posteriormente, realizou-se o posicionamento da saída de arame frio, para que ficasse alinhado ao arame energizado de forma que a alimentação ocorresse diretamente na poça de fusão.

Para realizar a deposição com arame frio, inicialmente efetuou-se alguns testes a fim de definir a velocidade de alimentação. Conforme observa-se na Figura 3.5, foram feitos cordões variando a velocidade de 1,5 m/min a 3,0 m/min. Observou-se que a velocidade de 1,5 m/min foi a mais viável, visto que o arame frio se fundiu ao longo da deposição,

Figura 3.4 – Fonte SUMIG para alimentação de arame frio



Fonte: própria

enquanto que em velocidades superiores a deposição apresentava muita instabilidade não fundindo completamente o arame frio em algumas regiões.

Figura 3.5 – Cordões testes variando a velocidade de alimentação do arame frio



Fonte: própria

Com relação ao suporte do arame frio, primeiramente utilizou-se uma distância de 3 cm do bico do arame frio até a ponta do arame energizado, conforme Figura 3.6. Entretanto, notou-se que o arame frio não se fundia completamente nessa configuração, além de desalinhar mais facilmente da poça de fusão. Alterou-se então o suporte do arame frio (Figura 3.7), diminuindo também a distância entre os bicos para 1 cm, conseguindo mais estabilidade e alinhamento, sendo possível a fusão do arame frio durante o processo.

Figura 3.6 – Suporte inicial do arame frio com distância de 3 cm entre os bicos



Fonte: própria

Figura 3.7 – Suporte final do arame frio com distância de 10 mm entre os bicos



Fonte: própria

A deposição dessas três configurações com alimentação de arame frio (4, 5 e 6) ocorreu de forma semelhante às três primeiras citadas anteriormente (1, 2 e 3), com trajetória de ida e retorno, porém com uma alteração que fazia o robô realizar um giro de $+180^\circ$ após a primeira camada e retornar -180° após a segunda camada, fazendo com que a alimentação de arame frio ficasse sempre à frente da tocha de arame energizado, enquanto o sistema de medição de temperatura ficasse posicionado do lado oposto.

Para observação do resfriamento das deposições, criou-se uma sequência de códigos utilizando o *software* Matlab (conforme Apêndice B), para leitura dos dados de temperatura em função do tempo. Plotou-se alguns desses ensaios, a fim de observar a

diferença das deposições com e sem a presença de alimentação de arame frio, além de calcular também o tempo médio de resfriamento para as deposições analisadas.

3.4 Análise Microestrutural, de Microdureza e Ensaio Mecânicos

Feita as deposições, realizou-se a preparação dos corpos de prova para o ensaio de tração, utilizando um centro de usinagem CNC (controle numérico por computador), conforme Figura 3.9. Para cada parede fabricada, retiraram-se dois corpos de prova de tração horizontalmente, sendo um da região da base e outro da região do topo, conforme Figura 3.8.

Figura 3.8 – Esquema de corte para corpo de prova de tração



Fonte: própria

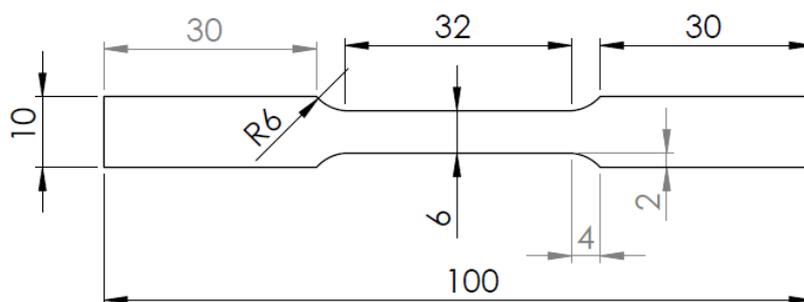
Figura 3.9 – Centro de usinagem CNC modelo ROMI D 600



Fonte: própria

Para o ensaio de tração adotou-se a norma NBR 6152 "Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente". Os corpos de prova possuem medidas previstas, conforme a Figura 3.10.

Figura 3.10 – Medidas do corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: Hackenhaar (2021)

Desta forma, foi possível obter corpos de prova, conforme exposto no exemplo da Figura 3.11. O ensaio foi realizado numa máquina Shimadzu modelo UH-FX/FXh (mostrada na Figura 3.12). A velocidade do ensaio foi de $10 \text{ N/mm}^2/\text{seg}$. Os resultados obtidos foram colocados em uma planilha, exposta no Apêndice D.

Figura 3.11 – Exemplo dos corpos de prova fabricados para ensaio de tração



Fonte: própria

Figura 3.12 – Máquina Shimadzu modelo UH-FX/FXh



Fonte: própria

Foram fabricadas também outras paredes, a fim de retirar corpos de prova para ensaio de dureza e análises geométricas e metalográficas. Seguiram-se as configurações da Tabela 3.1, porém agora produzindo somente 1 parede para cada configuração.

As paredes foram cortadas, conforme apresentado na Figura 3.13, e então foram retificadas, lixadas, polidas e atacadas com ácido picral 5% (ácido pícrico + álcool etílico) para posteriormente serem feitas as medições de altura, espessura e dureza, além das análises metalográficas. Para cada amostra foram feitas capturas de imagens nas lentes de aumento de 100x, 200x, 500x e 1000x, buscando assim a que tivesse melhor qualidade para visualização da microestrutura.

Figura 3.13 – Exemplo de parede cortada para preparação de corpo de prova



Fonte: própria

As medidas de altura e espessura foram realizadas com paquímetro e microscópio, utilizando o software *Axio Vision*. Observando a Figura 3.13 como exemplo, descartaram-se as laterais da peça, visto que apresentaram escorrimiento e então mediu-se a altura em 3 regiões ao longo do comprimento da amostra (duas extremidades e no meio). Com relação a espessura, mediu-se das 20 camadas de cada uma das paredes.

Para realizar as medidas de dureza utilizou-se um durômetro Vickers Mitutoyo, conforme mostrado na Figura 3.14.

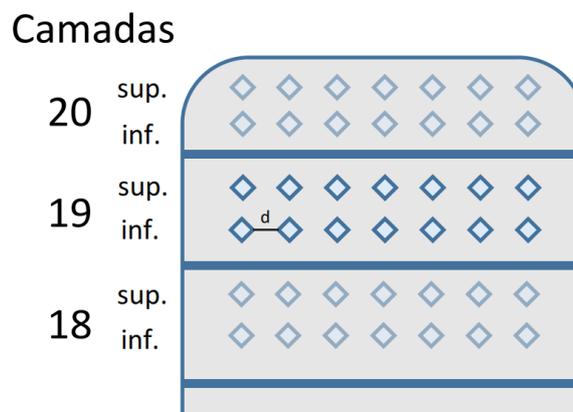
Figura 3.14 – Durômetro Vickers



Fonte: própria

Inicialmente dividiu-se a peça em 20 camadas e dentro de cada uma dessas camadas delimitou-se duas regiões (superior e inferior), visto que como trata-se de uma deposição de um cordão sobre o outro, ocorre uma influência da camada seguinte depositada na região superior da camada anterior. Desta forma, efetuaram-se 7 medidas de dureza (espaçadas por uma distância d de 1 mm) em cada região dentro de cada camada, totalizando 14 medidas por camada, conforme ilustrado no esquema da Figura 3.15.

Figura 3.15 – Destaque do esquema de medição de dureza nas peças



Fonte: própria

4 Resultados

Conforme proposto na metodologia deste trabalho, foram realizadas 3 deposições para cada tipo de configuração mostrado na Tabela 3.1, resultando em um total de 18 paredes de comprimento 180 mm. Além disso, foram produzidas também mais réplicas para análises da geometria e dureza. Neste capítulo serão destacadas algumas das deposições propostas, juntamente com seus gráficos de resfriamento. Foi destacado também o comportamento da corrente elétrica para alguns casos. Além disso, destaca-se também os resultados obtidos com relação às propriedades mecânicas das peças fabricadas, salientando gráficos obtidos nos ensaios de tração, dureza, além das análises de altura e espessura.

4.1 Deposições

Foi possível realizar a deposição de todas as paredes, seguindo as configurações propostas na Tabela 3.1. Os detalhes de todas as deposições podem ser visualizados no Apêndice A.

Observa-se na Figura 4.1 uma das deposições propostas. Nessa deposição seguiu-se a configuração 2, sem alimentação de arame frio e com uma temperatura de intercamada de 150°C.

Figura 4.1 – Configuração 2: Temperatura de intercamada 150°C sem alimentação de arame frio



Fonte: própria

A Figura 4.2 exibe o resultado da deposição feita na configuração 5, com temperatura de intercamada de 150°C com adição de arame frio.

Figura 4.2 – Configuração 5: Temperatura de intercamada 150°C com alimentação de arame frio



Fonte: própria

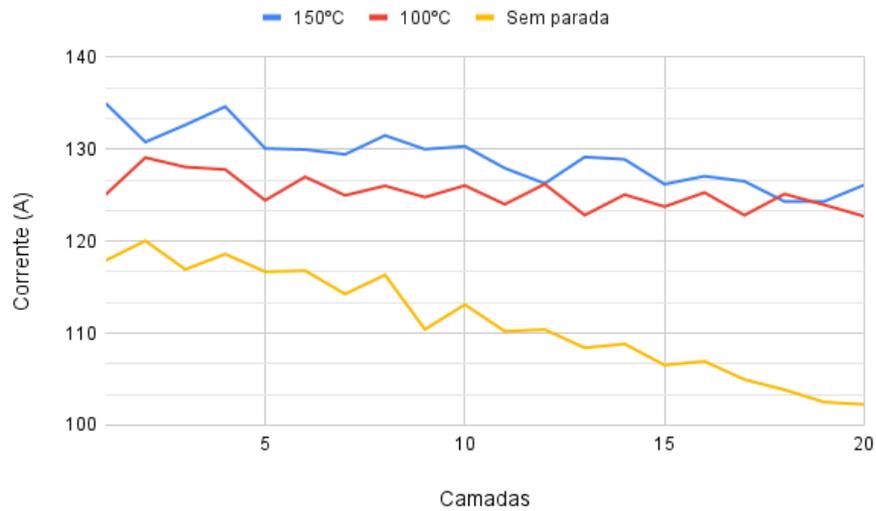
4.2 Tensão e Corrente elétrica

Foi possível destacar o comportamento da tensão e corrente elétrica para as amostras de 130 mm de comprimento, feitas sem alimentação de arame frio. Nota-se que a tensão não apresenta variação significativa, entretanto existe uma variação da corrente ao longo das camadas. Os resultados completos encontram-se expostos no Apêndice D. Observa-se na Tabela 4.1 e na Figura 4.3 que a variação mais significativa da corrente elétrica ao longo das camadas ocorreu na deposição que foi feita de forma de direta sem intervalos, visto que o maior valor encontrado foi de 120,04 A e o menor de 102,26 A. A amostra feita na temperatura de intercamada de 150°C apresentou também um variação considerável, porém menor do que no caso anterior, com valores de corrente máxima de 135,01 A e mínimo de 124,33 A. Por fim, a peça feita com temperatura de intercamada de 100°C foi a que exibiu menor variação de corrente elétrica com valores de corrente máxima de 129,08 A e mínimo de 122,70 A. O mesmo comportamento também foi observado para o caso de alimentação de arame frio, exposto na Tabela 4.2 e Figura 4.4. Conforme observado em Scotti et al. (2008), essa variação de corrente elétrica está relacionada ao aumento da DBCP à medida em que realiza-se a deposição das camadas. Desta forma, os casos que possuem maior variação na DBCP resultaram também em maiores variações de corrente elétrica.

Tabela 4.1 – Tensão e corrente elétrica ao longo das camadas - sem alimentação de arame frio

Camadas	Sem parada		150°C		100°C	
	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)
1	17,85	117,90	17,93	135,01	17,91	125,04
2	17,84	120,04	17,91	130,78	17,94	129,08
3	17,84	116,93	17,86	132,64	17,9	128,06
4	17,85	118,60	17,86	134,63	17,71	127,80
5	17,84	116,68	17,87	130,08	17,93	124,44
6	17,84	116,79	17,89	129,96	17,91	126,99
7	17,83	114,26	17,88	129,44	17,93	124,98
8	17,82	116,34	17,93	131,49	17,91	126,02
9	17,81	110,41	17,92	130,00	17,92	124,78
10	17,82	113,11	17,92	130,32	17,94	126,05
11	17,82	110,21	17,97	127,94	17,88	124,01
12	17,84	110,40	17,93	126,27	17,88	126,21
13	17,81	108,41	17,93	129,15	17,93	122,82
14	17,85	108,83	17,98	128,90	17,81	125,06
15	17,8	106,53	17,99	126,19	17,81	123,75
16	17,81	106,94	17,95	127,07	17,92	125,29
17	17,79	104,96	17,97	126,51	17,87	122,82
18	17,8	103,85	17,94	124,32	17,92	125,13
19	17,81	102,50	17,99	124,33	17,93	123,95
20	17,82	102,26	17,94	126,12	17,92	122,70

Figura 4.3 – Corrente elétrica ao longo das camadas - Sem alimentação de arame frio

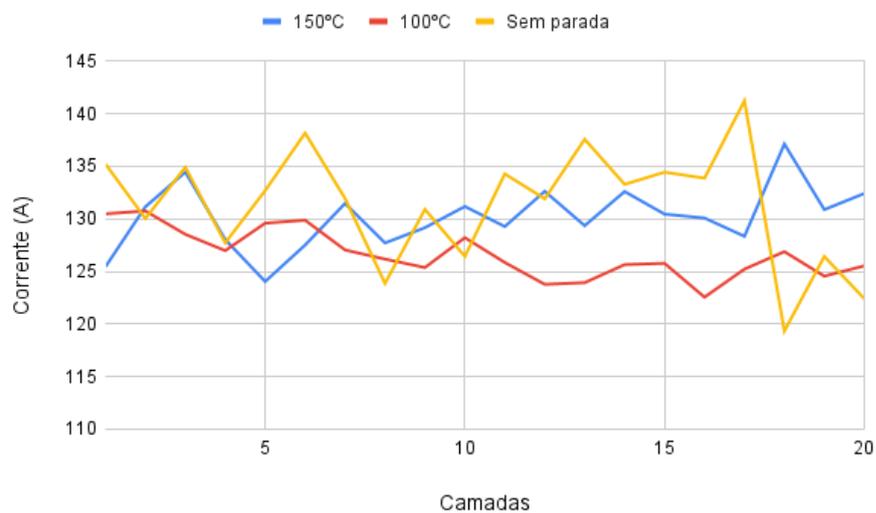


Fonte: própria

Tabela 4.2 – Tensão e corrente elétrica ao longo das camadas - com alimentação de arame frio

Camadas	Sem parada		150°C		100°C	
	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)
1	18,04	135,23	17,95	125,45	17,86	130,49
2	17,98	130,04	18,01	131,16	17,83	130,76
3	18,05	134,92	17,92	134,46	17,92	128,54
4	18,01	127,73	17,93	128,04	17,85	126,99
5	18,02	132,7	17,97	124,05	17,91	129,61
6	18,01	138,17	17,83	127,52	17,75	129,88
7	18,09	131,95	17,94	131,48	17,84	127,05
8	18,01	123,87	17,96	127,72	18,01	126,18
9	17,94	130,91	17,99	129,17	17,93	125,38
10	17,93	126,44	17,98	131,19	18,06	128,22
11	17,91	134,29	18,03	129,28	18,01	125,86
12	17,92	131,92	17,77	132,63	18,03	123,78
13	17,95	137,58	17,74	129,36	18,02	123,94
14	17,99	133,29	17,83	132,61	18,08	125,66
15	17,89	134,45	17,56	130,46	18,01	125,78
16	17,92	133,88	18,06	130,09	18,03	122,56
17	17,93	141,24	18,03	128,35	18,06	125,23
18	18,01	119,34	18,02	137,13	18,02	126,89
19	18,03	126,43	18,07	130,89	18,04	124,56
20	17,96	122,42	18,03	132,42	18,02	125,54

Figura 4.4 – Corrente elétrica ao longo das camadas - Com alimentação de arame frio

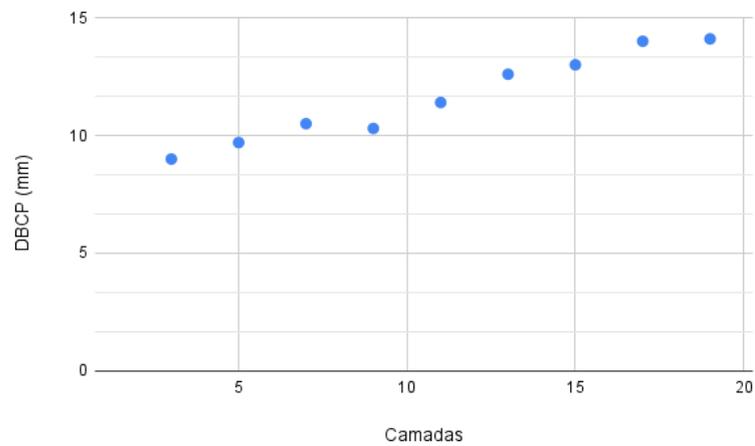


Fonte: própria

Pode-se explicar essa queda de corrente elétrica devido ao aumento da DBCP à medida em que eram depositadas as camadas, conforme ocorreu também nos ensaios realizados por (ARCANJO, 2021). Esse comportamento da DBCP é ilustrado nas Figuras 4.5 e 4.6 para os casos de temperatura de interpasse 100°C e 150°C. Para o caso sem parada não foi possível medir a DBCP para cada camada, pois o processo ocorreu de

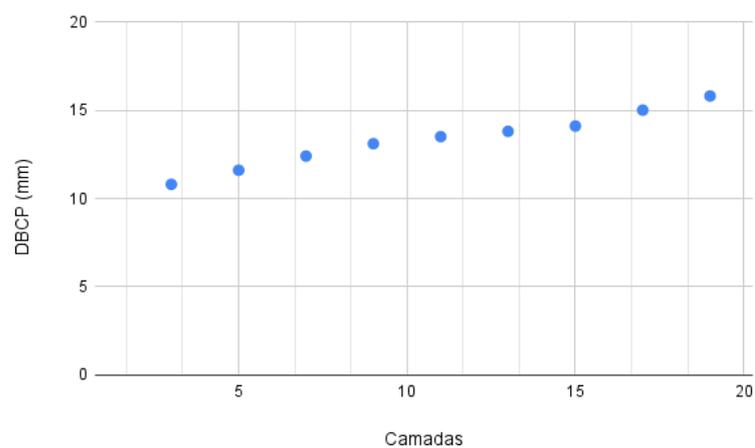
forma ininterrupta, entretanto supõe-se que a variação da DBCP para esse caso seria a maior, visto que sua variação de corrente elétrica é a mais significativa entre os casos. Nota-se que a variação de DBCP é mais significativa para o caso de temperatura de intercamada igual a 150°C quando comparado com o caso de 100°C, conforme havia sido comentado no início desta seção. De acordo com Scotti et al. (2008), mantendo-se os outros parâmetros de soldagem constantes, o aumento da DBCP resultará em maiores comprimentos de arcos e conseqüentemente menores valores de corrente elétrica.

Figura 4.5 – DBCP ao longo das camadas depositadas - 130 mm - 150°C



Fonte: própria

Figura 4.6 – DBCP ao longo das camadas depositadas - 130 mm - 100°C



Fonte: própria

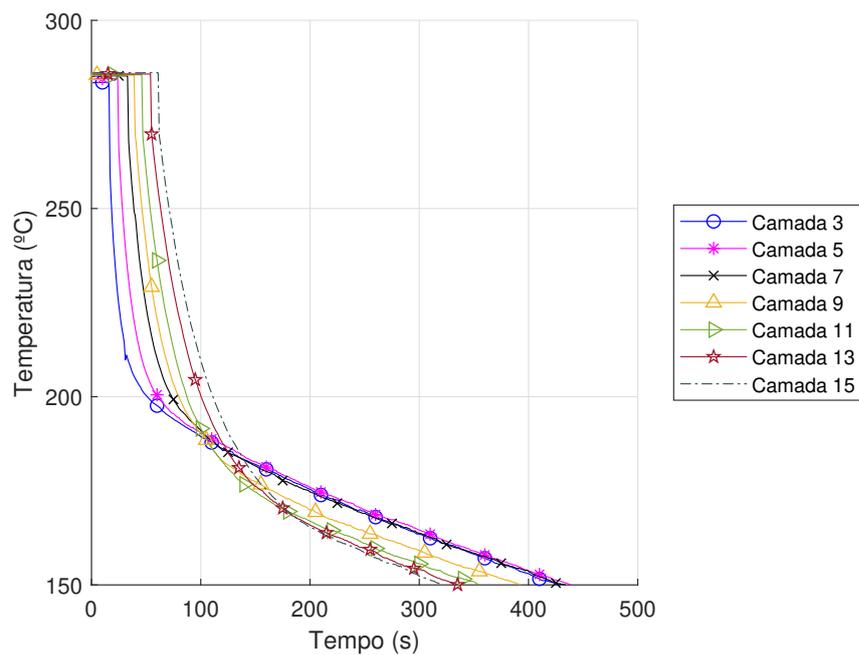
4.3 Resfriamento

Com relação ao monitoramento do resfriamento, através da leitura dos dados coletados pelo sensor de temperatura, geraram-se os gráficos das curvas de resfriamento das deposições e uma tabela com os tempos médios de resfriamento. Os resultados completos de todos os resfriamentos estão expostos no Apêndice C.

4.3.1 Paredes com comprimento de 180 mm

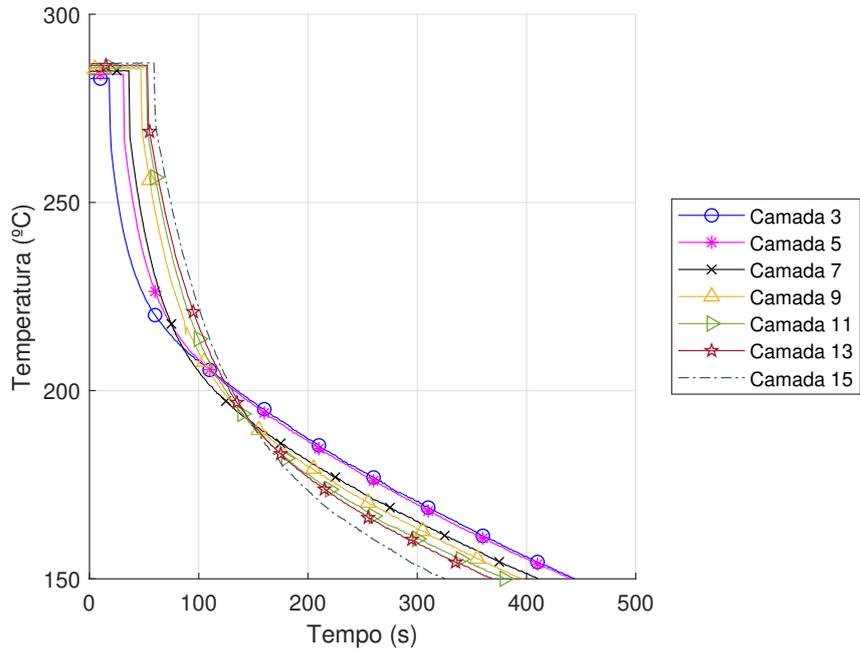
Conforme pode-se observar nas Figuras 4.7 e 4.8, foi possível obter o resfriamento das camadas depositadas (destacando-se as camadas 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15), agrupando-se essas curvas, gerando um gráfico de resfriamento de uma deposição sem arame frio e outro de uma deposição com a presença de arame frio, respectivamente. O gráfico da Figura 4.7 corresponde à deposição mostrada anteriormente na Figura 4.1 e o gráfico da Figura 4.8 corresponde à deposição mostrada na Figura 4.2.

Figura 4.7 – Configuração 2 - Resfriamento da Parede com Temperatura de intercâmara 150°C sem alimentação de arame frio



Fonte: própria

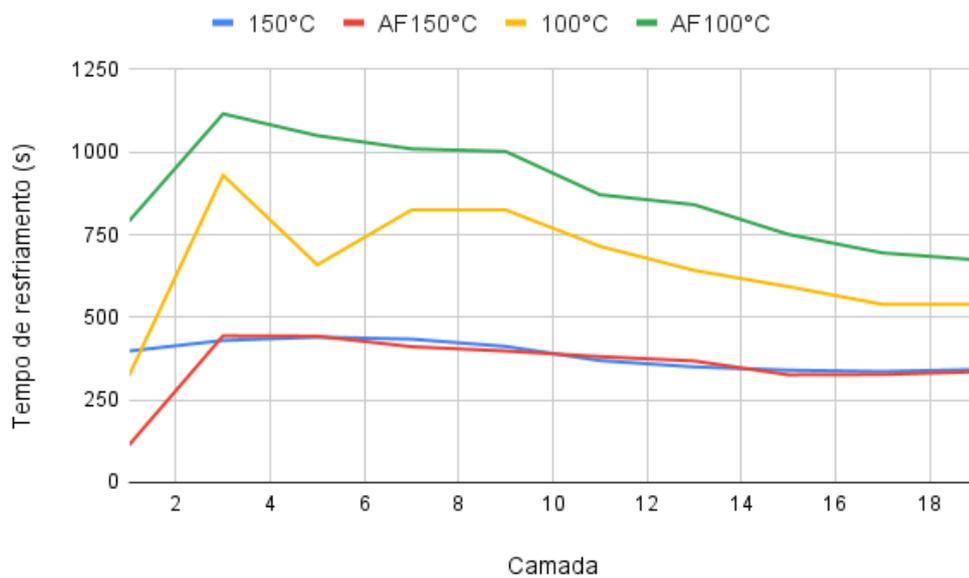
Figura 4.8 – Configuração 5 - Resfriamento da Parede com Temperatura de intercâmara 150°C com alimentação de arame frio



Fonte: própria

A Figura 4.9 destaca os tempos de resfriamento por camada para as temperaturas de intercâmara de 100°C e 150°C com e sem alimentação de arame frio.

Figura 4.9 – Tempo de resfriamento das camadas - 100°C, 150° com e sem alimentação de arame frio (AF)



Fonte: própria

Observa-se que ao comparar as duas temperaturas de intercamada, para a temperatura de 100°C tem-se um tempo de espera maior e conseqüentemente um maior tempo de resfriamento do que a de 150°C. Esse comportamento era esperado visto que demora-se mais tempo o cordão depositado atingir uma temperatura mais baixa (100°C) do que resfriar até temperaturas superiores (150°C). Além disso, nota-se que a presença da alimentação de arame frio contribui no resfriamento do cordão depositado para o caso de temperatura de intercamada de 150°C, deslocando a curva de resfriamento e alcançando a temperatura de intercamada desejada em um tempo menor, quando comparada às curvas do gráfico sem alimentação de arame frio. É possível observar na Tabela 4.4 que o tempo médio de resfriamento da deposição da configuração 5 (374,50 segundos) é menor do que o tempo da deposição da configuração 2 (383,50 segundos).

Essa diferença é observada também em trabalhos que utilizaram outros métodos de resfriamento como em Hackenhaar et al. (2020), o qual utilizaram jato de ar e constataram que o uso desse tipo de resfriamento reduz magnitude da temperatura do substrato, diminuindo o acúmulo de calor ao longo da deposição. Além disso, observando os gráficos de resfriamento, nota-se que existe a tendência das camadas superiores resfriarem de forma mais rápida, conforme também aconteceu nos ensaios realizados por Arcanjo (2021). Supõe-se que esse comportamento ocorra devido ao efeito aleta. Embora a literatura tenha observado somente o comportamento da magnitude da temperatura de intercamada, é possível notar a influência também no tempo de resfriamento.

A Tabela 4.3 apresenta o tempo de resfriamento por camada das paredes para os casos de temperatura de interpasse 100°C e 150°C, com e sem alimentação de arame frio. A Tabela 4.4 apresenta o tempo total e médio de resfriamento.

Tabela 4.3 – Tempo de resfriamento por camada

Camada	Tempo de Resfriamento (s)			
	150°C	AF150°C	100°C	AF100°C
3	430	444	930	1116
5	440	443	659	1050
7	434	411	825	1010
9	412	398	825	1002
11	369	381	715	871
13	350	368	642	841
15	340	326	593	751

Tabela 4.4 – Tempo total e médio de resfriamento

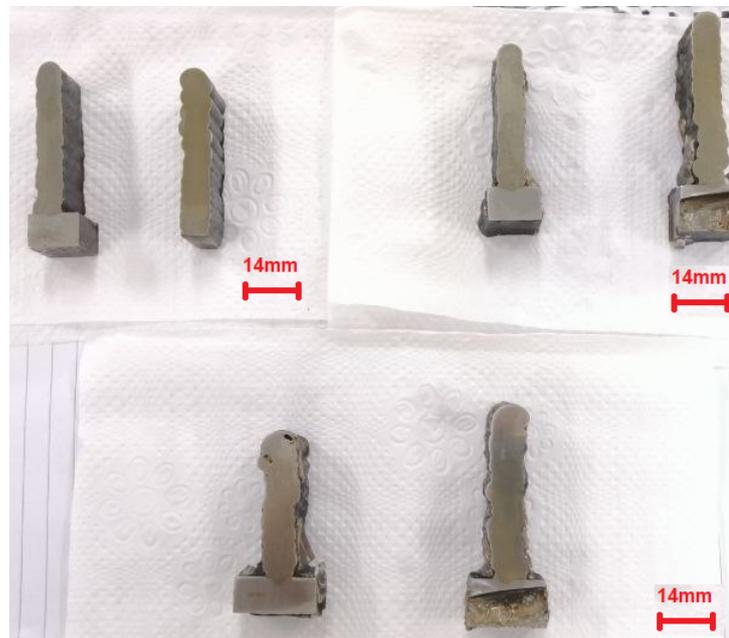
Temperatura de Intercamada	180 mm			
	150°C	AF150°C	100°C	AF100°C
Tempo Total (s)	2775	2771	5189	6641
Tempo Médio (s)	412	398	715	1002
Desvio Padrão	42,371	42,132	121,749	130,110

4.4 Propriedades Mecânicas

A Figura 4.10 exibe uma macrografia geral de todas as amostras feitas, variando a alimentação e temperatura de interpasse. Embora seja possível notar defeitos como porosidade e outras irregularidades nas peças, constatou-se a viabilidade da deposição multicamada. Observa-se também que as paredes feitas das peças sem parada apresentaram maior irregularidade nas laterais, devido ao processo apresentar maior instabilidade quando feito de forma direta sem parada para o resfriamento entre as camadas.

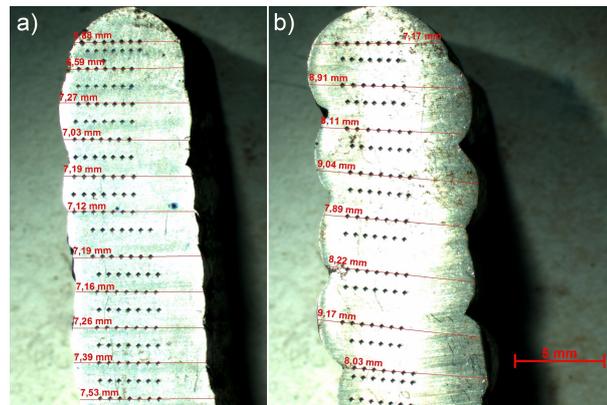
É visível que as peças que foram feitas com alimentação de arame frio apresentam maior espessura e altura, e para isso a Figura 4.11 apresenta em destaque uma macrografia das peças que foram feitas com temperatura de interpasse de 100°C, destacando as medidas de espessura que foram realizadas ao longo das camadas. Confirmou-se que a adição de arame frio faz com que ocorra o aumento da espessura e altura. O mesmo comportamento foi observado também para as outras amostras. A geometria geral das peças estão expostas nas Tabelas 4.5 e 4.6. Esse comportamento também foi destacado por Kovalenko et al. (2019), que ao avaliar o processo MADA na liga Ti-6Al-4V constatou que a adição de arame frio resulta em paredes com maior largura e altura.

Figura 4.10 – Corpos de prova preparados



Fonte: própria

Figura 4.11 – Macrografia das peças feitas com temperatura de interpasse de 100°C - a) sem alimentação de arame frio b) com alimentação de arame frio



Fonte: própria

Tabela 4.5 – Espessura da camada para cada uma das configurações - 130 mm

Camada	Espesura (mm)					
	100°C	AF100°C	150°C	AF150°C	sem parada	AF-sem parada
1	6,74	7,60	8,05	7,43	7,43	8,85
2	7,62	7,99	8,25	8,26	8,75	9,70
3	7,40	8,33	8,22	8,52	9,61	9,21
4	7,57	8,09	7,72	8,45	9,08	9,51
5	7,43	8,16	7,72	8,33	9,15	9,92
6	7,66	7,52	7,96	8,06	9,45	9,68
7	7,43	7,79	7,86	8,48	9,50	10,87
8	7,27	8,48	7,60	8,12	8,88	10,13
9	7,17	8,53	7,70	7,64	9,02	9,35
10	7,20	7,92	7,89	8,33	9,14	9,41
11	7,50	8,62	7,89	8,23	9,02	9,60
12	7,27	8,26	7,72	7,99	8,86	9,55
13	7,23	8,42	7,76	7,92	9,38	9,35
14	7,30	8,47	7,66	7,86	9,16	9,18
15	6,96	8,87	7,72	7,83	10,17	9,94
16	7,13	8,23	7,74	7,72	9,18	9,77
17	6,76	9,18	7,69	7,96	10,37	9,70
18	7,37	9,21	7,47	8,18	10,70	9,55
19	6,83	8,94	7,43	8,26	9,86	9,60
20	6,86	8,23	7,62	8,39	10,04	9,65

Tabela 4.6 – Altura da parede para cada uma das configurações - 130 mm

Medida	Altura (mm)					
	100°C	AF100°C	150°C	AF150°C	Sem parada	AF-sem parada
1	41,55	46,90	40,30	49,15	37,45	45,90
2	43,65	48,80	41,85	49,85	38,45	47,75
3	44,10	48,50	41,25	50,20	38,95	47,45
4	42,45	44,40	40,35	48,25	37,60	44,45
5	43,35	47,60	41,20	49,6	38,10	46,50
6	43,85	48,20	41,35	50,25	38,90	47,85

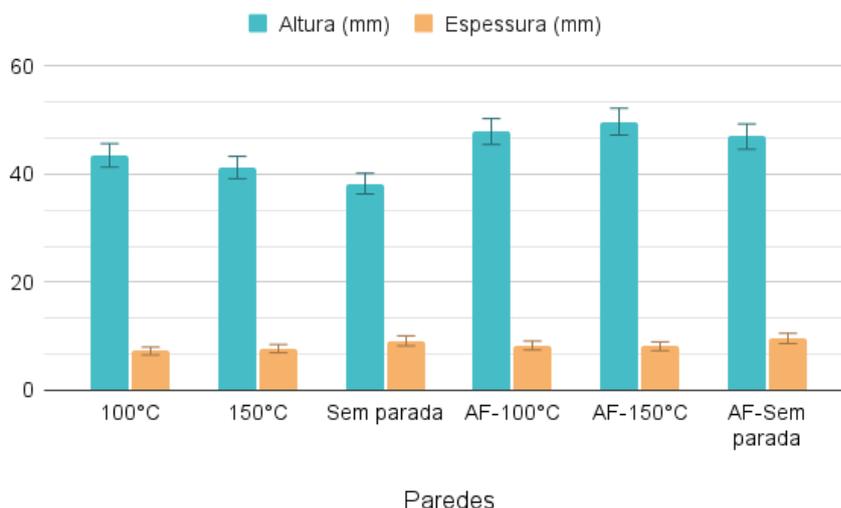
Desta forma, pode-se obter uma média das espessuras e alturas para cada uma das configurações, conforme mostrado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Espessura e altura média das paredes depositadas - 130 mm

Paredes	Altura (mm)	Espessura (mm)
100°C	43,50 ± 0,64	7,27 ± 0,70
150°C	41,22 ± 0,61	7,72 ± 0,21
Sem parada	38,27 ± 0,97	9,17 ± 0,28
AF-100°C	47,90 ± 1,62	8,29 ± 0,41
AF-150°C	49,72 ± 0,75	8,15 ± 0,24
AF-sem parada	46,97 ± 1,32	9,60 ± 0,43

Pode-se observar na Tabela 4.7 e no gráfico exposto na Figura 4.12 que a adição de arame frio (AF) resulta em paredes com maior altura e espessura, quando comparadas às paredes que tiveram ausência de alimentação de arame frio, visto que a quantidade de material depositada é maior com a presença de dois arames no processo de deposição. Além disso, conforme Hackenhaar et al. (2020), nas deposições que houve a presença de jato de ar, resfriando mais rápido, a altura dos depósitos foi maior, desta forma o arame frio por retirar calor da poça de fusão contribui também dessa forma para o aumento da altura da parede. Foi mostrado ainda que o tempo de inatividade contribui para a redução do acúmulo de calor, sendo assim, pode-se fazer um paralelo com a temperatura de intercamada, sendo que em temperaturas menores (100°C) existe um maior tempo de inatividade entre uma deposição e outra do que em temperaturas maiores (150°C). Assim, as paredes feitas na temperatura de intercamada de 100°C resultam em maior altura do que as de 150°C. Já a largura é maior em deposições cujo acúmulo de calor é maior, ou seja, nas deposições com menor tempo de inatividade ou maior temperatura de intercamada. Desta forma, a largura cresce no sentido das temperaturas de 100°C, 150°C, chegando até o caso sem parada, o qual existe maior acúmulo de calor e conseqüentemente maior espessura.

Figura 4.12 – Geometria das paredes depositadas



Fonte: própria

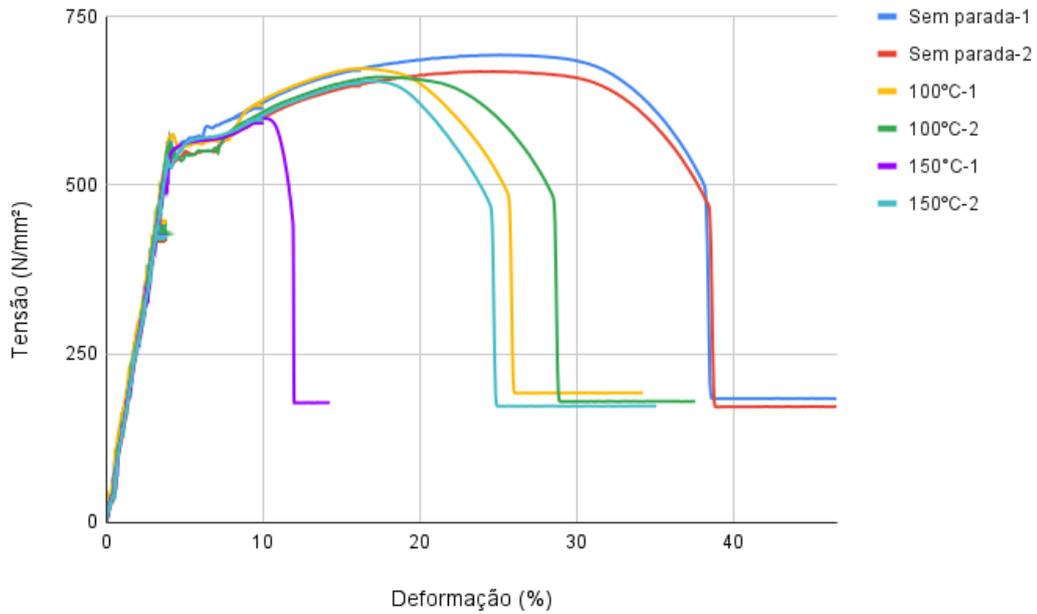
Com relação ao ensaio de tração, a comparação dos resultados de tensão máxima foi feita variando os parâmetros de temperatura de intercamada, adição de arame frio e a região na qual retirou-se o corpo de prova (base ou topo da parede). Os resultados dos ensaios de tração estão expostos no Apêndice D.

A comparação da tensão máxima, variando a temperatura de intercamada está apresentada no gráfico da Figura 4.13. A mesma comparação está exposta no gráfico da Figura 4.14, nesse caso com a presença de alimentação de arame frio. Para ambos os gráficos geraram-se duas réplicas para cada caso. Apesar de apresentar pequenas variações com relação à resistência à tração, os valores estão de acordo com os valores esperados mostrado no catálogo da Esab no Anexo A.

Pode-se observar que no primeiro cenário (sem alimentação de arame frio) a tensão máxima foi maior para o caso em que a deposição foi feita de forma direta, sem intervalo para resfriamento até uma temperatura de intercamada desejada. Observando também o gráfico da Figura 4.15, que representa uma média geral das tensões para cada caso, é possível notar que, com exceção do caso sem parada, a adição de arame frio faz com que a tensão máxima aumente (para os casos de temperatura de intercamada 100°C e 150°C). Com relação à deformação, Hackenhaar et al. (2020) comenta que a deformação pode estar relacionada à instabilidade de alimentação do eletrodo durante as deposições ou também à instabilidade do arco elétrico, gerando uma fusão não homogênea. Desta forma, os casos que apresentaram menor deformação são os que tiveram maior instabilidade. Para o caso sem alimentação de arame frio, os casos tiveram pouca variação no alongamento, com exceção da curva de 150°C que pode ter ocorrido algum problema de instabilidade, gerando menor deformação. Para o caso com adição de arame frio, o arame frio pode ter

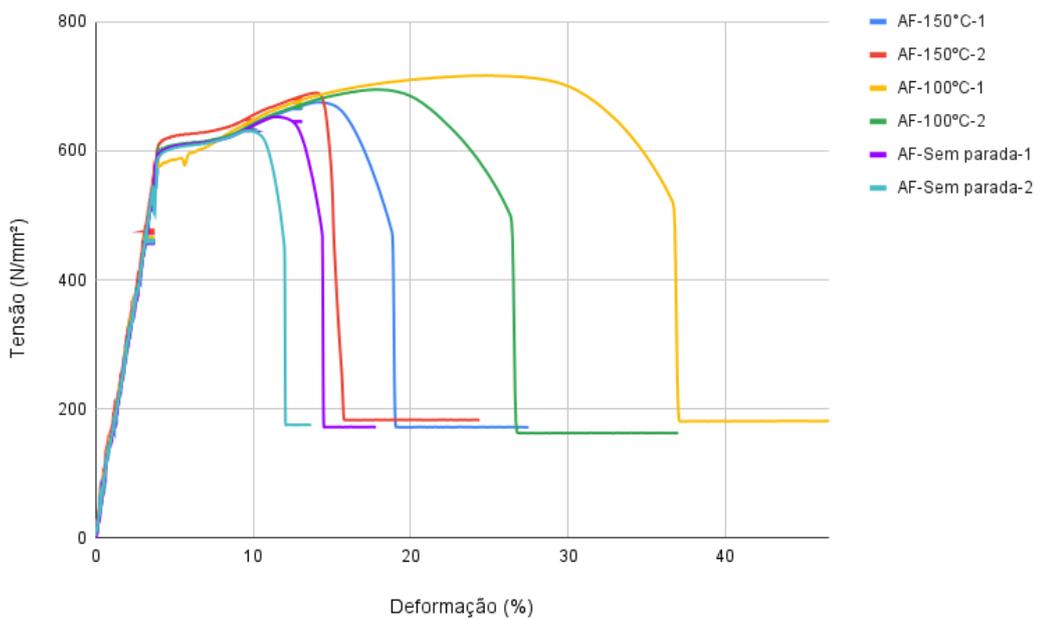
ocasionado uma instabilidade nos casos sem parada, visto que passaram a ter a menor deformação quando comparadas aos outros casos.

Figura 4.13 – Gráfico Tensão x Deformação - 100°C, 150°C e sem parada - Sem adição de arame frio



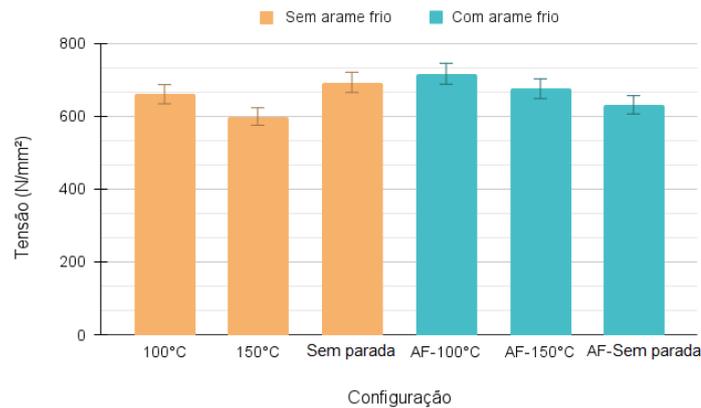
Fonte: própria

Figura 4.14 – Gráfico Tensão x Deformação - 100°C, 150°C e sem parada - Com adição de arame frio



Fonte: própria

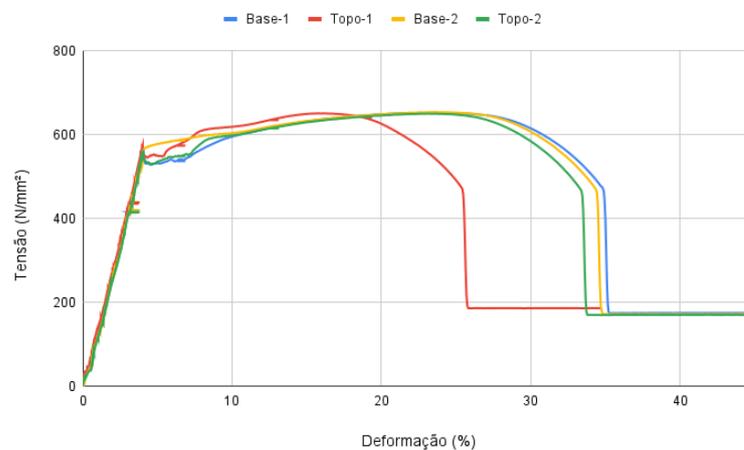
Figura 4.15 – Gráfico da média da tensão máxima para cada configuração



Fonte: própria

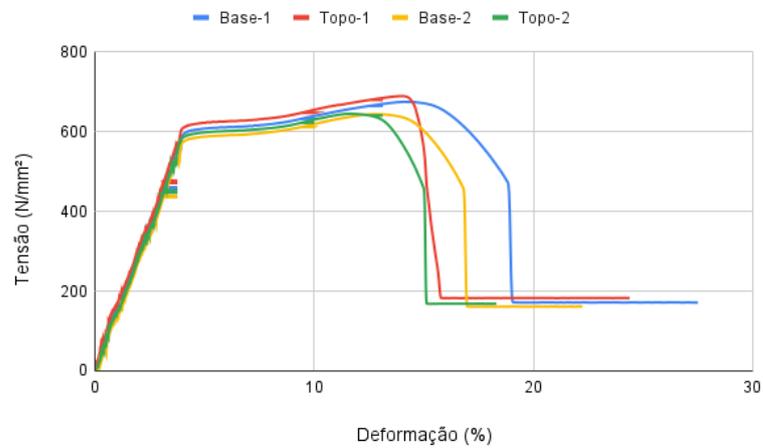
As Figuras 4.16 e 4.17 mostram a comparação da tensão entre as amostras que foram retiradas da base e do topo, para os dois cenários com e sem alimentação de arame frio. No geral, não existe variação significativa da tensão máxima das amostras que foram retiradas da base e das retiradas do topo. Esse comportamento também aconteceu nos ensaios realizados por Hackenhaar et al. (2020), o qual verificou-se que a tensão máxima pouco varia nas amostras retiradas em diferentes regiões (base, meio, topo). Já para o alongamento, a curva do topo 1 foi a única que apresentou uma deformação mais destoante das outras, sendo muito provavelmente uma região na qual tenha ocorrido instabilidade durante a deposição.

Figura 4.16 – Gráfico Tensão x Deformação - Comparação base e topo para o caso de 150°C - Sem adição de arame frio



Fonte: própria

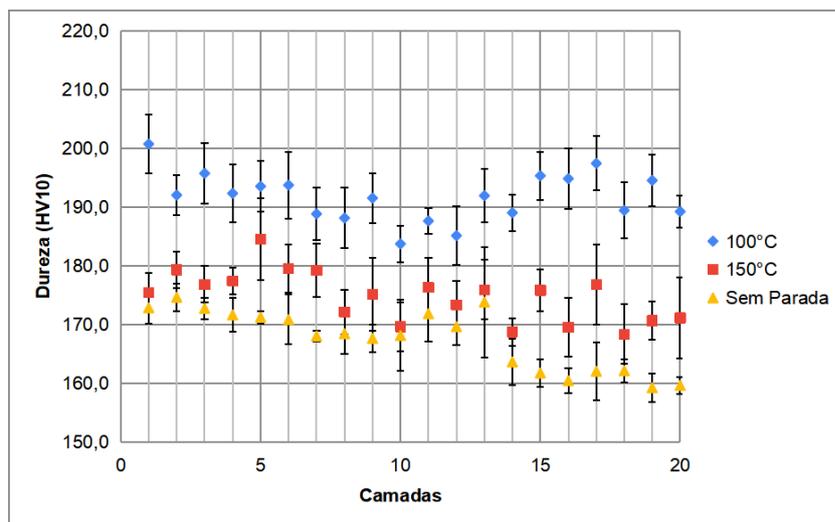
Figura 4.17 – Gráfico Tensão x Deformação - Comparação base e topo para o caso de 150°C - Com adição de arame frio



Fonte: própria

Para os ensaios de dureza, a Figura 4.18 e 4.19 apresentam os gráficos com os valores de dureza para cada uma das regiões determinadas nas camadas. Compararam-se para os casos de temperatura 100°C, 150°C e sem parada, com e sem alimentação de arame frio. Os resultados dos ensaios de dureza estão expostos no Apêndice D.

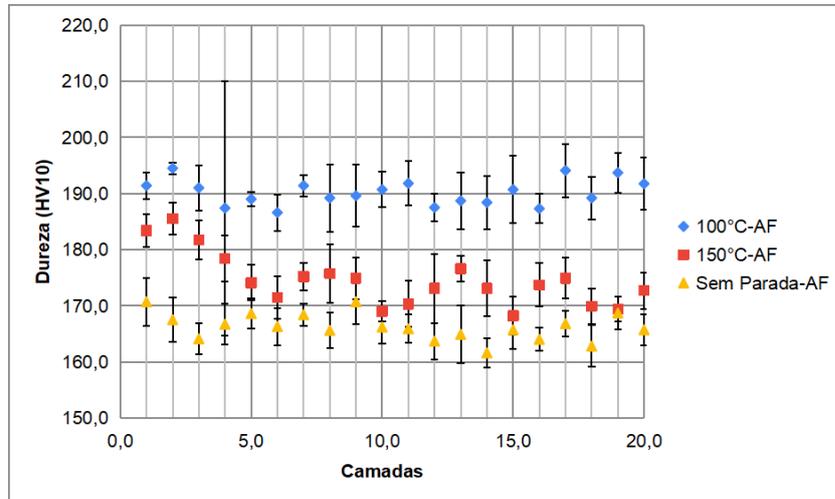
Figura 4.18 – Gráfico Dureza por camada - Comparação entre 100°C, 150°C e sem parada - Sem adição de arame frio



Fonte: própria

Observa-se no primeiro gráfico da Figura 4.18, que os maiores valores de dureza são do caso de temperatura de intercamada igual a 100°C, sendo o maior valor de dureza de 203,5 HV, e o menor de 159,2 HV (no caso sem parada). Este mesmo comportamento também foi visualizado no gráfico da Figura 4.19, no qual o maior valor de dureza foi de

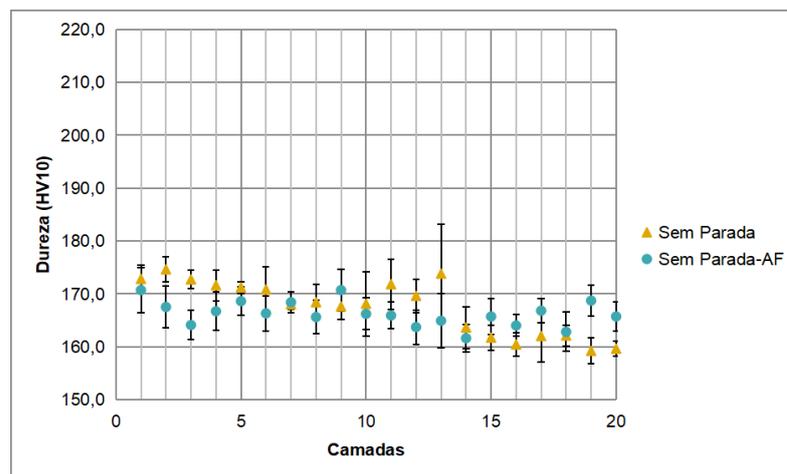
Figura 4.19 – Gráfico Dureza por camada - Comparação entre 100°C, 150°C e sem parada - Com adição de arame frio



Fonte: própria

210,3 HV para o caso de temperatura de intercâmara igual a 100°C, e o menor de 161,6 HV para o caso sem parada. Desta forma, destacou-se na Figura ?? a comparação da dureza do caso sem parada, feitas com e sem alimentação de arame frio. Observa-se que a inserção do arame frio pouco influenciou nos valores de dureza mostrados no gráfico.

Figura 4.20 – Gráfico Dureza por camada - Comparação para o caso sem parada - Com e sem adição de arame frio

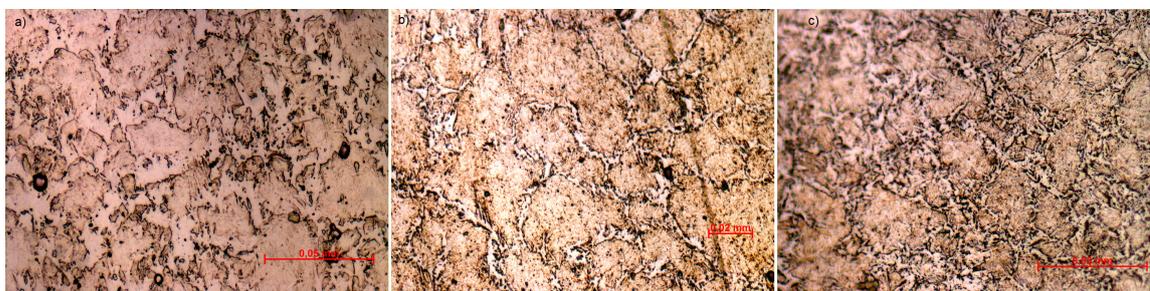


Fonte: própria

De acordo com o gráfico da Figura 4.19, a Figura 4.21 exhibe as microestruturas de três amostras para cada um dos casos apresentados, sendo a) para o caso de 100°C, b) para o de 150°C e c) para o caso sem parada. Nota-se a predominância de ferrita nas microestruturas, além da diferença do tamanho dos grãos entre os casos. Para o caso de

100°C com durezas mais elevadas, observa-se uma microestrutura mais refinada quando comparada com as demais e menor tamanho dos grãos. No caso de 150°C observa-se um refino intermediário e no caso sem parada tem-se maior tamanho de grãos. Esse comportamento também foi observado em Hackenhaar et al. (2020), no qual foram destacadas regiões com predominância de ferrido e com diferentes durezas que apresentaram variação no tamanho do grão e refinamento da microestrutura. Desta forma, foi verificado que o aumento da dureza está associado ao refino da microestrutura e à diminuição do tamanho do grão.

Figura 4.21 – Microestrutura para o eletrodo AWS ER70S-6 - Ampliação 500x. a) Amostra de temperatura de interpasse 100°C. b) Amostra de temperatura de interpasse 150°C. c) Amostra feita sem parada.



Fonte: própria

Além disso, foram realizadas também medidas de dureza em amostras retiradas nos corpos de prova de tração. Notou-se que o comportamento foi o mesmo descrito anteriormente, sendo as durezas de maior valor para o caso de temperatura de interpasse de 100°C e as de menor valor para o caso sem parada, conforme observa-se na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Dureza das amostras retiradas dos corpos de prova de tração

	Dureza (HV10)						Desvio Padrão
	Base			Topo			
100°C	218,2	216,4	223,4	198,2	196,6	202,3	11,50
AF-100°C	217,2	208,5	208,3	214,5	204,2	209,4	4,70
150°C	197	198	189	197	193	187	4,64
AF-150°C	202,2	205,4	204,9	206,3	204,3	202,6	1,60
Sem parada	183,2	179,2	174,9	188,2	192,3	194,2	7,57
AF-Sem parada	195,9	194,2	183,3	183,2	189,2	185,4	5,52

Observando as medidas de dureza realizadas para todos os casos, nota-se que a variação nas regiões das amostras (base e topo) é pouco relevante. Entretanto essa variação somente é considerável se comparar-se a dureza em diferentes temperaturas de intercamada, visto que não existe uma variação significativa ao analisar a dureza ao longo das camadas de um caso somente. Este comportamento também foi observado no trabalho de Hackenhaar et al. (2020), o qual constatou que para as diferentes regiões que foram analisadas (base, meio e topo) não houve variação significativa da dureza.

5 Conclusões

A tensão não apresenta variação significativa, entretanto existe uma variação relevante da corrente ao longo das camadas, devido ao aumento da DBCP à medida em que eram depositadas as camadas. A corrente variou de forma mais acentuada no caso sem parada, seguido do caso de temperatura de 150°C e 100°C.

A alimentação com arame frio reduziu o tempo de resfriamento das paredes que foram fabricadas com temperatura de interpasse de 150°C. No entanto, notou-se que a utilização de arame frio não foi efetiva na redução do tempo de resfriamento em deposições com temperatura de interpasse de 100°C.

A adição de arame frio resultou em paredes com maior espessura e altura, quando comparadas às amostras que foram fabricadas sem alimentação de arame frio.

O caso de temperatura de interpasse de 100°C com alimentação de arame frio apresentou maior tensão máxima do que os outros casos. Com exceção do caso sem parada, a adição de arame frio apresentou a tendência de aumento da tensão máxima das amostras. Além disso, não houve variação expressiva da tensão máxima nas amostras que foram retiradas do topo quando comparadas com as que foram retiradas da base.

Não houve variação significativa da dureza quando comparou-se os casos com e sem alimentação de arame frio. Além disso, também não ocorreu variação relevante de dureza entre as diferentes regiões das camadas (superior e inferior). Uma variação expressiva somente ocorre se comparar os valores de dureza para diferentes temperaturas de intercâmara, visto que os maiores valores foram encontrados nas amostras de temperatura de intercâmara de 100°C e os menores nas amostras feitas de forma direta. Verificou-se também que o aumento da dureza está associado ao refino da microestrutura e à diminuição do tamanho do grão.

6 Trabalhos Futuros

Observou-se que houve uma variação significativa da corrente elétrica ao longo das deposições. Desta forma sugere-se realizar uma regulagem adaptativa para compensar o aumento da DBCP que é a causa da queda de corrente elétrica.

Referências

- ALBERTI, E. A.; SILVA, L. J. d.; DOLIVEIRA, A. S. C. Additive manufacturing: the role of welding in this window of opportunity. *Welding international*, Taylor & Francis, v. 30, n. 6, p. 413–422, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- ARCANJO, A. Influência da temperatura de interpasse no perfil de uma parede de em aço carbono fabricada por manufatura aditiva pelo processo mada. *UFG - Universidade Federal de Goiás*, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 20, 45 e 49.
- ASTM. Iso/astm international 52900: Additive manufacturing general principles terminology. ISO/ASTM Geneva, Switzerland, 2015. Citado na página 20.
- DUDA, T.; RAGHAVAN, L. V. 3d metal printing technology. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 49, n. 29, p. 103–110, 2016. Citado na página 16.
- ERMAKOVA, A.; MEHMANPARAST, A.; GANGULY, S.; RAZAVI, J.; BERTO, F. Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Elsevier, v. 109, p. 102685, 2020. Citado na página 28.
- FORD, S. L. Additive manufacturing technology: potential implications for us manufacturing competitiveness. *J. Int'l Com. & Econ.*, HeinOnline, v. 6, p. 40, 2014. Citado na página 16.
- FORTES, C.; VAZ, C. Apostila de soldagem mig/mag. *ESAB, Janeiro*, 2005. Citado na página 19.
- FRAZIER, W. E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, Springer, v. 23, n. 6, p. 1917–1928, 2014. Citado na página 16.
- HACKENHAAR, W. Estudo das propriedades mecânicas e do resfriamento em manufatura aditiva por deposição a arco. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 39.
- HACKENHAAR, W.; MAZZAFERRO, J. A.; MONTEVECCHI, F.; CAMPATELLI, G. An experimental-numerical study of active cooling in wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 52, p. 58–65, 2020. Citado 8 vezes nas páginas 14, 23, 28, 49, 52, 53, 55 e 58.
- HUANG, S. H.; LIU, P.; MOKASDAR, A.; HOU, L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 67, n. 5, p. 1191–1203, 2013. Citado na página 16.
- KOVALENKO, O. et al. Avaliação de aspectos da estabilidade do arco e da geometria de pré-formas em manufatura aditiva utilizando o processo mig/mag cmt com foco na liga ti-6al-4v. Universidade Federal de Uberlândia, 2019. Citado na página 50.

- LI, F.; CHEN, S.; SHI, J.; ZHAO, Y.; TIAN, H. Thermoelectric cooling-aided bead geometry regulation in wire and arc-based additive manufacturing of thin-walled structures. *Applied Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 2, p. 207, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- LIU, J.; XU, Y.; GE, Y.; HOU, Z.; CHEN, S. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, p. 1–50, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 14, 16, 17 e 21.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem fundamentos e tecnologia. atual. *Belo Horizonte: Editora UFMG*, 2017. Citado na página 18.
- MONTEVECCHI, F.; VENTURINI, G.; GROSSI, N.; SCIPPA, A.; CAMPATELLI, G. Heat accumulation prevention in wire-arc-additive-manufacturing using air jet impingement. *Manufacturing Letters*, Elsevier, v. 17, p. 14–18, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 25.
- PAOLINI, A.; KOLLMANNNSBERGER, S.; RANK, E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Additive Manufacturing*, v. 30, p. 100894, 2019. ISSN 2214-8604. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860419309029>>. Citado na página 17.
- RON, T.; LEVY, G. K.; DOLEV, O.; LEON, A.; SHIRIZLY, A.; AGHION, E. Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process. *Metals*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 8, p. 888, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. et al. Soldagem mig/mag: melhor entendimento, melhor desempenho. San Pablo: Artliber,, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 46.
- SCOTTI, F. M.; TEIXEIRA, F. R.; SILVA, L. J. da; ARAUJO, D. B. de; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Thermal management in waam through the cmt advanced process and an active cooling technique. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 57, p. 23–35, 2020. Citado na página 26.
- SILVA, B. H. S. et al. Avaliação e aplicabilidade de arame ultrafino em manufatura aditiva por deposição a arco (mada). Universidade Federal de Uberlândia, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.
- SILVA, F. L. d. S. et al. Desenvolvimento de estratégias para manufatura aditiva via soldagem a arco. Florianópolis, SC., 2017. Citado 3 vezes nas páginas 14, 18 e 30.
- SILVA, L. J. da; SOUZA, D. M.; ARAÚJO, D. B. de; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in waam. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 107, 2020. Citado na página 27.
- WILLIAMS, S.; MARTINA, F. *Wire+ arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison*. [S.l.], 2015. Citado na página 18.

WU, B.; DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H.; HAN, J.; FEI, Z. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in wire arc additive manufacturing of ti6al4v. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 250, p. 304–312, 2017. Citado na página 22.

XIONG, J.; LI, Y.; LI, R.; YIN, Z. Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in gmaw-based additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 252, p. 128–136, 2018. Citado na página 20.

YANG, D.; HE, C.; ZHANG, G. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode gmaw based additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 227, p. 153–160, 2016. Citado na página 22.

ZHANG, C.; SHEN, C.; HUA, X.; LI, F.; ZHANG, Y.; ZHU, Y. Influence of wire-arc additive manufacturing path planning strategy on the residual stress status in one single buildup layer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 111, n. 3, p. 797–806, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

Apêndices

APÊNDICE A – Detalhes das configurações

Neste apêndice são apresentadas as figuras resultantes das configurações presentes da Tabela 3.1.

A.1 Paredes de 180 mm

A.1.1 Configuração 1

Figura A.1 – Configuração 1: Temperatura de intercamada 100°C sem alimentação de arame frio - Parede 1



Fonte: própria

Figura A.2 – Configuração 1: Temperatura de intercamada 100°C sem alimentação de arame frio - Parede 2



Fonte: própria

Figura A.3 – Configuração 1: Temperatura de intercamada 100°C sem alimentação de arame frio - Parede 3



Fonte: própria

A.1.2 Configuração 2

Figura A.4 – Configuração 2: Temperatura de intercamada 150°C sem alimentação de arame frio - Parede 1



Fonte: própria

Figura A.5 – Configuração 2: Temperatura de intercamada 150°C sem alimentação de arame frio - Parede 2



Fonte: própria

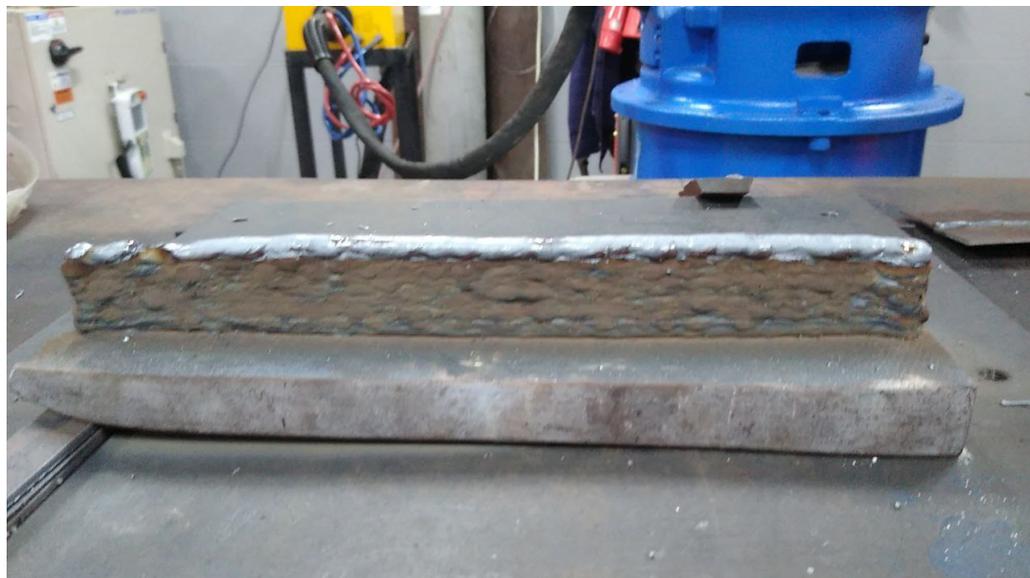
Figura A.6 – Configuração 2: Temperatura de intercamada 150°C sem alimentação de arame frio - Parede 3



Fonte: própria

A.1.3 Configuração 3

Figura A.7 – Configuração 3: Sem intervalo para resfriamento e sem alimentação de arame frio - Parede 1



Fonte: própria

Figura A.8 – Configuração 3: Sem intervalo para resfriamento e sem alimentação de arame frio - Parede 2



Fonte: própria

Figura A.9 – Configuração 3: Sem intervalo para resfriamento e sem alimentação de arame frio - Parede 3



Fonte: própria

A.1.4 Configuração 4

Figura A.10 – Configuração 4: Temperatura de intercamada 100°C com alimentação de arame frio - Parede 1



Fonte: própria

Figura A.11 – Configuração 4: Temperatura de intercamada 100°C com alimentação de arame frio - Parede 2



Fonte: própria

Figura A.12 – Configuração 4: Temperatura de intercamada 100°C com alimentação de arame frio - Parede 3



Fonte: própria

A.1.5 Configuração 5

Figura A.13 – Configuração 5: Temperatura de intercamada 150°C com alimentação de arame frio - Parede 1



Fonte: própria

Figura A.14 – Configuração 5: Temperatura de intercamada 150°C com alimentação de arame frio - Parede 2



Fonte: própria

Figura A.15 – Configuração 5: Temperatura de intercamada 150°C com alimentação de arame frio - Parede 3



Fonte: própria

A.1.6 Configuração 6

Figura A.16 – Configuração 6: Sem intervalo para resfriamento com alimentação de arame frio - Parede 1



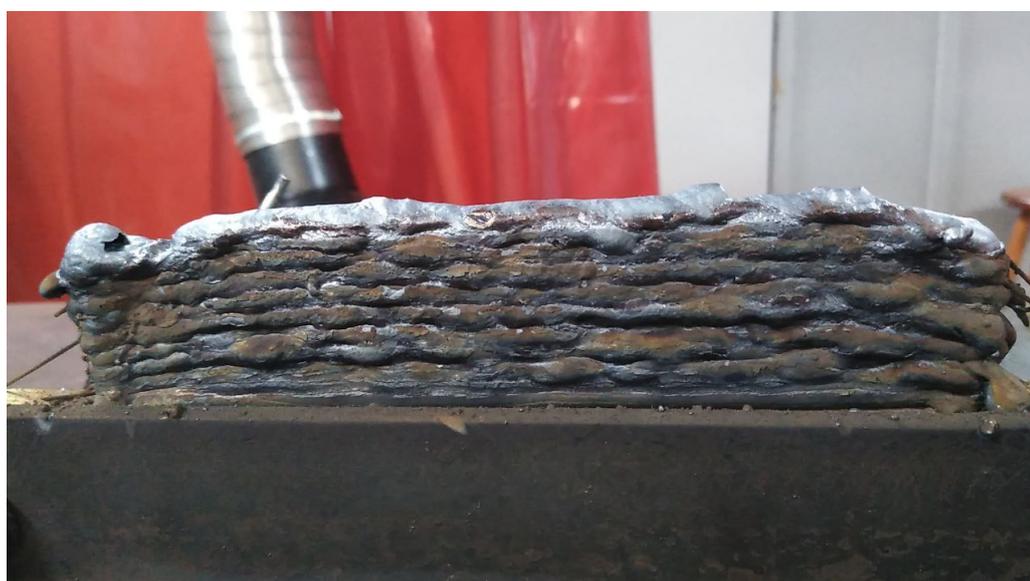
Fonte: própria

Figura A.17 – Configuração 6: Sem intervalo para resfriamento com alimentação de arame frio - Parede 2



Fonte: própria

Figura A.18 – Configuração 6: Sem intervalo para resfriamento com alimentação de arame frio - Parede 3

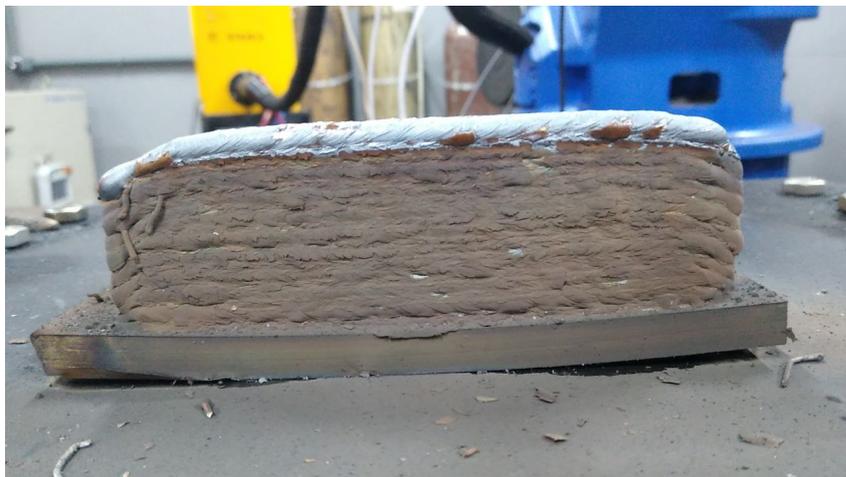


Fonte: própria

A.2 Paredes de 130 mm

A.2.1 Configuração 1

Figura A.19 – Configuração 1: Temperatura de intercamada 100°C sem alimentação de arame frio



Fonte: própria

A.2.2 Configuração 2

Figura A.20 – Configuração 2: Temperatura de intercamada 150°C sem alimentação de arame frio



Fonte: própria

A.2.3 Configuração 3

Figura A.21 – Configuração 3: Sem intervalo para resfriamento e sem alimentação de arame frio



Fonte: própria

A.2.4 Configuração 4

Figura A.22 – Configuração 4: Temperatura de intercamada 100°C com alimentação de arame frio



Fonte: própria

A.2.5 Configuração 5

Figura A.23 – Configuração 5: Temperatura de intercamada 150°C com alimentação de arame frio



Fonte: própria

A.2.6 Configuração 6

Figura A.24 – Configuração 6: Sem intervalo para resfriamento com alimentação de arame frio



Fonte: própria

APÊNDICE B – Programas do Matlab

Neste apêndice, são apresentadas os programas utilizados para lerem os dados coletados do sistema de medição de temperatura e gerar os gráficos de resfriamento mostrados no Capítulo 4 de resultados parciais.

B.1 Leitura dos dados

Neste programa é feita a leitura dos dados coletados que estão em uma planilha do Excel. O exemplo mostrado é da parede de metalografia para temperatura de intercambiada de 100°C, no entanto todas as outras deposições seguiram esse mesmo *script*. Inicialmente define-se a aba da planilha que será feita a leitura dos dados, assim determina-se o intervalo da camada através do *xlRange* e plota-se o gráfico da curva de resfriamento. Posteriormente replicou-se isso para cada uma das outras camadas

```

1
2 clc
3 clear all
4 close
5
6 %% Camada 1 Metal100
7 filename = 'PlanilhaResfriamentos.xlsx';
8 sheet = 1; %aba 1 Parede Meta T100
9 xlRange = 'A3:B236'; %intervalo da Camada 1
10
11 c1m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha ...
    no caso camada 1 metal100
12
13 t1=c1m100(:,1); %tempo
14 temp1=c1m100(:,2); %temperatura
15
16 h1=figure;
17 plot(t1,temp1);
18 grid on;
19 ylim([100 300]);
20
21 %saveas(h1,'graficometa100.epsc');
22
23 %% Camada 2 Metal100
24
25 xlRange = 'A239:B536'; %intervalo da Camada 2

```

```
26
27 c2m100=xlsread(filename, sheet, xlRange); %comando que le a planilha
28
29 t2=c2m100(:,1);
30 temp2=c2m100(:,2);
31
32 h2=figure;
33 plot(t2,temp2);
34 grid on;
35 ylim([100 300]);
36
37 %saveas(h2,'graficometa100.eps');
38
39 %% Camada 3 Meta100
40
41 xlRange = 'A541:B1028'; %intervalo da Camada 3
42
43 c3m100=xlsread(filename, sheet, xlRange); %comando que le a planilha
44
45 t3=c3m100(:,1);
46 temp3=c3m100(:,2);
47
48 h3=figure;
49 plot(t3,temp3);
50 grid on;
51 ylim([100 300]);
52
53 %saveas(h3,'graficometa100.eps');
54
55 %% Camada 4 Meta100
56
57 xlRange = 'A1032:B1432'; %intervalo da Camada 4
58
59 c4m100=xlsread(filename, sheet, xlRange); %comando que le a planilha
60
61 t4=c4m100(:,1);
62 temp4=c4m100(:,2);
63
64 h4=figure;
65 plot(t4,temp4);
66 grid on;
67 ylim([100 300]);
68
69 %saveas(h4,'graficometa100.eps');
70
71 %% Camada 5 Meta100
72
```

```
73 xlRange = 'A1436:B1917'; %intervalo da Camada 5
74
75 c5m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
76
77 t5=c5m100(:,1);
78 temp5=c5m100(:,2);
79
80 h5=figure;
81 plot(t5,temp5);
82 grid on;
83 ylim([100 300]);
84
85 %saveas(h5,'graficometa100.eps');
86
87 %% Camada 6 Meta100
88
89 xlRange = 'A1922:B2332'; %intervalo da Camada 6
90
91 c6m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
92
93 t6=c6m100(:,1);
94 temp6=c6m100(:,2);
95
96 h6=figure;
97 plot(t6,temp6);
98 grid on;
99 ylim([100 300]);
100
101 %saveas(h6,'graficometa100.eps');
102
103 %% Camada 7 Meta100
104
105 xlRange = 'A2337:B2823'; %intervalo da Camada 7
106
107 c7m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
108
109 t7=c7m100(:,1);
110 temp7=c7m100(:,2);
111
112 h7=figure;
113 plot(t7,temp7);
114 grid on;
115 ylim([100 300]);
116
117 %saveas(h7,'graficometa100.eps');
118
119 %% Camada 8 Meta100
```

```
120
121 xlRange = 'A2828:B3255'; %intervalo da Camada 8
122
123 c8m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
124
125 t8=c8m100(:,1);
126 temp8=c8m100(:,2);
127
128 h8=figure;
129 plot(t8,temp8);
130 grid on;
131 ylim([100 300]);
132
133 %saveas(h8,'graficometa100.eps');
134
135 %% Camada 9 Meta100
136
137 xlRange = 'A3260:B3746'; %intervalo da Camada 9
138
139 c9m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
140
141 t9=c9m100(:,1);
142 temp9=c9m100(:,2);
143
144 h9=figure;
145 plot(t9,temp9);
146 grid on;
147 ylim([100 300]);
148
149 %saveas(h9,'graficometa100.eps');
150
151 %% Camada 10 Meta100
152
153 xlRange = 'A3751:B4179'; %intervalo da Camada 10
154
155 c10m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
156
157 t10=c10m100(:,1);
158 temp10=c10m100(:,2);
159
160 h10=figure;
161 plot(t10,temp10);
162 grid on;
163 ylim([100 300]);
164
165 %saveas(h10,'graficometa100.eps');
166
```

```
167 %% Camada 11 Meta100
168
169 xlRange = 'A4184:B4660'; %intervalo da Camada 11
170
171 c11m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
172
173 t11=c11m100(:,1);
174 temp11=c11m100(:,2);
175
176 h11=figure;
177 plot(t11,temp11);
178 grid on;
179 ylim([100 300]);
180
181 %saveas(h11,'graficometa100.eps');
182
183 %% Camada 12 Meta100
184
185 xlRange = 'A4665:B5092'; %intervalo da Camada 12
186
187 c12m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
188
189 t12=c12m100(:,1);
190 temp12=c12m100(:,2);
191
192 h12=figure;
193 plot(t12,temp12);
194 grid on;
195 ylim([100 300]);
196
197 %saveas(h12,'graficometa100.eps');
198
199 %% Camada 13 Meta100
200
201 xlRange = 'A5097:B5564'; %intervalo da Camada 13
202
203 c13m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
204
205 t13=c13m100(:,1);
206 temp13=c13m100(:,2);
207
208 h13=figure;
209 plot(t13,temp13);
210 grid on;
211 ylim([100 300]);
212
213 %saveas(h13,'graficometa100.eps');
```

```
214
215 %% Camada 14 Meta100
216
217 xlRange = 'A5569:B6001'; %intervalo da Camada 14
218
219 c14m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
220
221 t14=c14m100(:,1);
222 temp14=c14m100(:,2);
223
224 h14=figure;
225 plot(t14,temp14);
226 grid on;
227 ylim([100 300]);
228
229 %saveas(h14,'graficometa100.epsc');
230
231 %% Camada 15 Meta100
232
233 xlRange = 'A6006:B6473'; %intervalo da Camada 15
234
235 c15m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
236
237 t15=c15m100(:,1);
238 temp15=c15m100(:,2);
239
240 h15=figure;
241 plot(t15,temp15);
242 grid on;
243 ylim([100 300]);
244
245 %saveas(h15,'graficometa100.epsc');
246
247 %% Camada 16 Meta100
248
249 xlRange = 'A6478:B6904'; %intervalo da Camada 16
250
251 c16m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
252
253 t16=c16m100(:,1);
254 temp16=c16m100(:,2);
255
256 h16=figure;
257 plot(t16,temp16);
258 grid on;
259 ylim([100 300]);
260
```

```
261 %saveas(h16,'graficometa100.eps');
262
263 %% Camada 17 Meta100
264
265 xlRange = 'A6909:B7371'; %intervalo da Camada 17
266
267 c17m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
268
269 t17=c16m100(:,1);
270 temp17=c16m100(:,2);
271
272 h17=figure;
273 plot(t17,temp17);
274 grid on;
275 ylim([100 300]);
276
277 %saveas(h17,'graficometa100.eps');
278
279 %% Camada 18 Meta100
280
281 xlRange = 'A7376:B7801'; %intervalo da Camada 18
282
283 c18m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
284
285 t18=c18m100(:,1);
286 temp18=c18m100(:,2);
287
288 h18=figure;
289 plot(t18,temp18);
290 grid on;
291 ylim([100 300]);
292
293 %saveas(h18,'graficometa100.eps');
294
295 %% Camada 19 Meta100
296
297 xlRange = 'A7806:B8266'; %intervalo da Camada 19
298
299 c19m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
300
301 t19=c19m100(:,1);
302 temp19=c19m100(:,2);
303
304 h19=figure;
305 plot(t19,temp19);
306 grid on;
307 ylim([100 300]);
```

```
308
309 %saveas(h19,'graficometa100.eps');
310
311 %% Camada 20 Meta100
312
313 xlRange = 'A8271:B8629'; %intervalo da Camada 20
314
315 c20m100=xlsread(filename,sheet,xlRange); %comando que le a planilha
316
317 t20=c20m100(:,1);
318 temp20=c20m100(:,2);
319
320 h20=figure;
321 plot(t20,temp20);
322 grid on;
323 ylim([100 300]);
324
325 %saveas(h20,'graficometa100.eps');
```

B.2 Plotagem dos dados

Neste programa realiza-se a plotagem dos dados lidos no programa anterior, agrupando-se todas as curvas de resfriamentos das camadas em um único gráfico.

```
1
2 clear all
3 clc
4
5 load('t1.mat')
6 load('t2.mat')
7 load('t3.mat')
8 load('t4.mat')
9 load('t5.mat')
10 load('t6.mat')
11 load('t7.mat')
12 load('t8.mat')
13 load('t9.mat')
14 load('t10.mat')
15 load('t11.mat')
16 load('t12.mat')
17 load('t13.mat')
18 load('t14.mat')
19 load('t15.mat')
20 load('t16.mat')
21 load('t17.mat')
```

```
22 load('t18.mat')
23 load('t19.mat')
24 load('t20,.mat')
25
26 load('temp1.mat')
27 load('temp2.mat')
28 load('temp3.mat')
29 load('temp4.mat')
30 load('temp5.mat')
31 load('temp6.mat')
32 load('temp7.mat')
33 load('temp8.mat')
34 load('temp9.mat')
35 load('temp11.mat')
36 load('temp10.mat')
37 load('temp11.mat')
38 load('temp12.mat')
39 load('temp13.mat')
40 load('temp14.mat')
41 load('temp15.mat')
42 load('temp16.mat')
43 load('temp17.mat')
44 load('temp18.mat')
45 load('temp19.mat')
46 load('temp20.mat')
47
48 %%
49
50 graficototalmeta100=figure;
51
52 plot(t1,temp1,'r-');
53 hold on;
54 plot(t2,temp2,'g-s', 'MarkerIndices',10:50:length(temp2));
55 plot(t3,temp3,'b-o', 'MarkerIndices',10:50:length(temp3));
56 plot(t4,temp4,'c-+', 'MarkerIndices',10:50:length(temp4));
57 plot(t5,temp5,'m-*', 'MarkerIndices',10:50:length(temp5));
58 plot(t6,temp6,'y-.', 'MarkerIndices',10:50:length(temp6));
59 plot(t7,temp7,'k-x', 'MarkerIndices',25:50:length(temp7));
60 plot(t8,temp8,'-d','color','#0072BD', ...
      'MarkerIndices',10:50:length(temp8));
61 plot(t9,temp9,'-^','color','#EDB120', ...
      'MarkerIndices',05:50:length(temp9));
62 plot(t10,temp10,'-v','color','#7E2F8E', ...
      'MarkerIndices',25:50:length(temp10));
63 plot(t11,temp11,'->','color','#77AC30', ...
      'MarkerIndices',20:40:length(temp11));
64 plot(t12,temp12,'-<','color','#4DBEEE', ...
```

```
        'MarkerIndices',10:50:length(temp12));
65 plot(t13,temp13,'-p','color','#A2142F', ...
        'MarkerIndices',15:40:length(temp13));
66 plot(t14,temp14,'-h','color','#D95319', ...
        'MarkerIndices',10:40:length(temp14));
67 plot(t15,temp15,'-.','color','#2F4F4F', ...
        'MarkerIndices',10:40:length(temp15));
68 plot(t16,temp16,'--','color','#A0522D', ...
        'MarkerIndices',10:40:length(temp16));
69 plot(t17,temp17,'-s','color','#778899', ...
        'MarkerIndices',10:40:length(temp17));
70 plot(t18,temp18,'-o','color','#CD853F', ...
        'MarkerIndices',10:40:length(temp18));
71 plot(t19,temp19,'-d','color','#32CD32', ...
        'MarkerIndices',10:40:length(temp19));
72 plot(t20,temp20,'-+','color','#696969', ...
        'MarkerIndices',10:40:length(temp20));
73
74
75
76 grid on;
77 ylim([100 300]);
78 legend('Camada 1','Camada 2','Camada 3','Camada 4','Camada ...
        5','Camada 6','Camada 7','Camada 8','Camada 9','Camada ...
        10','Camada 11','Camada 12','Camada 13','Camada 14',...
79         'Camada 15','Camada 16','Camada 17','Camada 18','Camada ...
        19','Camada 20','location','eastoutside');
80 xlabel('Tempo (s)');
81 ylabel('Temperatura (°C)');
82 %title('Resfriamento Parede para Metalografia com Temperatura de ...
        intercamada 100°C - 20 camadas');
83
84 % saveas(graficototalmeta100,'graficototalmeta100.epsc');
85
86
87 %tempo médio ate chegar 100
88
89 tempoMedio = mean([t1(end) t2(end) t3(end) t4(end) t5(end) t6(end) ...
        t7(end) t8(end) t9(end) t10(end)...
90         t11(end) t12(end) t13(end) t14(end) t15(end) t16(end) t17(end) ...
        t18(end) t19(end) t20(end)])
```

B.3 Comparação entre os tempos médios de resfriamento

Neste programa foi realizada a comparação dos tempos médios de resfriamento das deposições e posteriormente foi feita também a plotagem das curvas no mesmo gráfico.

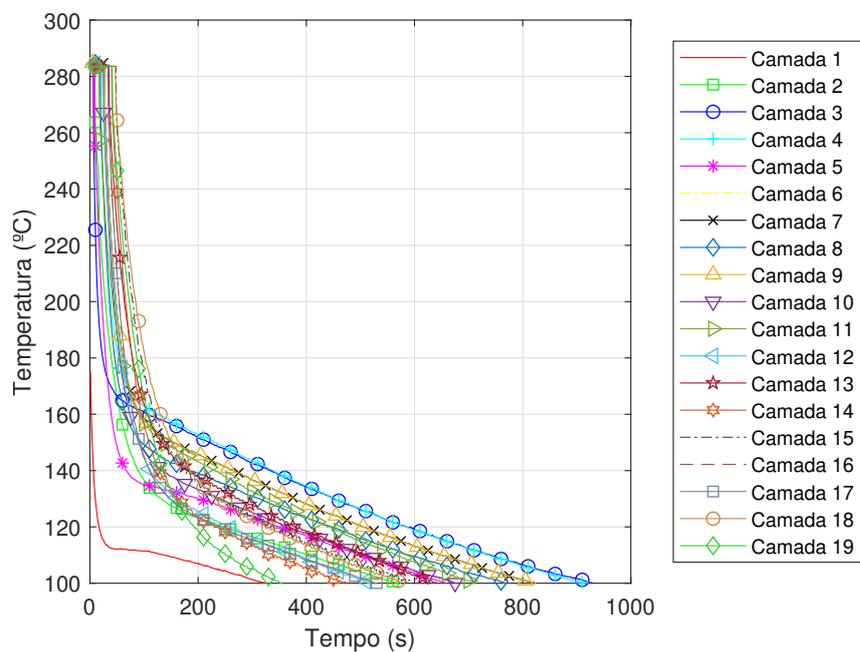
```
1
2 %%
3 clear all
4 close all
5
6 load('tempTodas100.mat')
7 tempTodas100=tempTodas;
8 load('tempTodas100AF.mat')
9
10 h1 = figure;
11 %title('todas as camadas')
12 plot(tempTodas100');
13
14 h2 = figure;
15 plot(tempTodas100AF');
16
17 h3 = figure;
18 %title('valor médio das camadas')
19 tempTodasMedio100 = nanmean(tempTodas100);
20 tempTodasMedio100AF = nanmean(tempTodas100AF);
21 plot(tempTodasMedio100, '--');
22 hold on;
23 plot(tempTodasMedio100AF);
24 xlabel('Tempo (s)');
25 ylabel('Temperatura (°C)');
26 grid on;
27
28 legend('Sem arame frio', 'Com arame frio');
29
30 saveas(h3, 'ComparaMetal100.epsc');
```

APÊNDICE C – Gráficos dos Resfriamentos

C.1 Paredes de 180 mm de comprimento

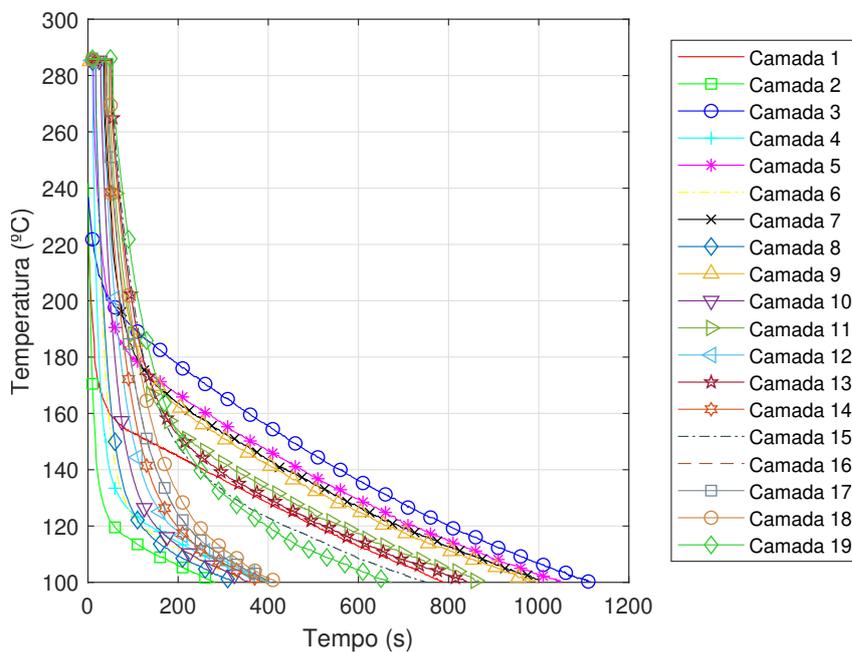
C.1.1 Temperatura de intercamada: 100°C

Figura C.1 – Configuração 1 - Resfriamento da Parede com temperatura de intercamada 100°C sem alimentação de arame frio



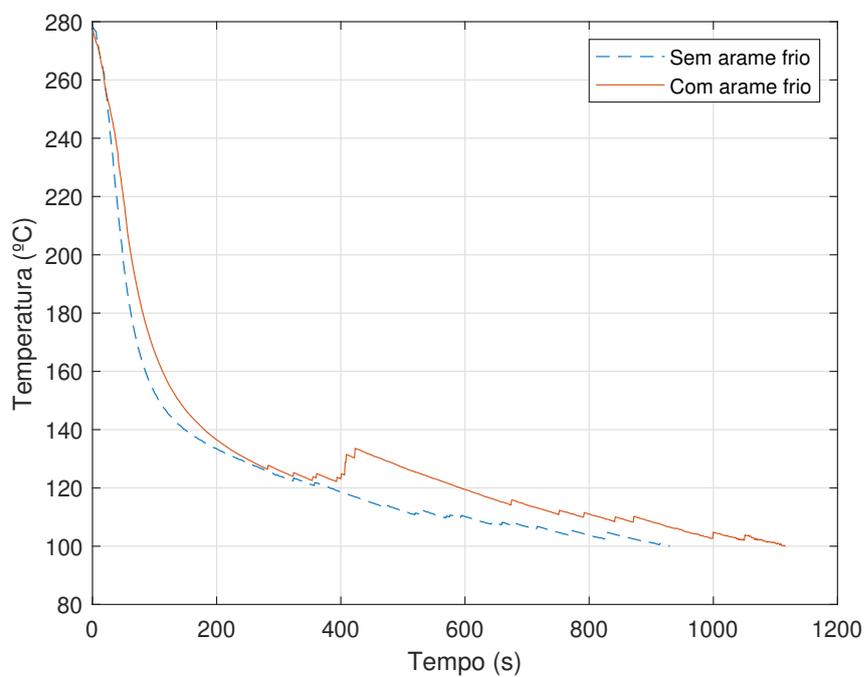
Fonte: própria

Figura C.2 – Configuração 4 - Resfriamento da Parede com temperatura de intercâmara 100°C com alimentação de arame frio



Fonte: própria

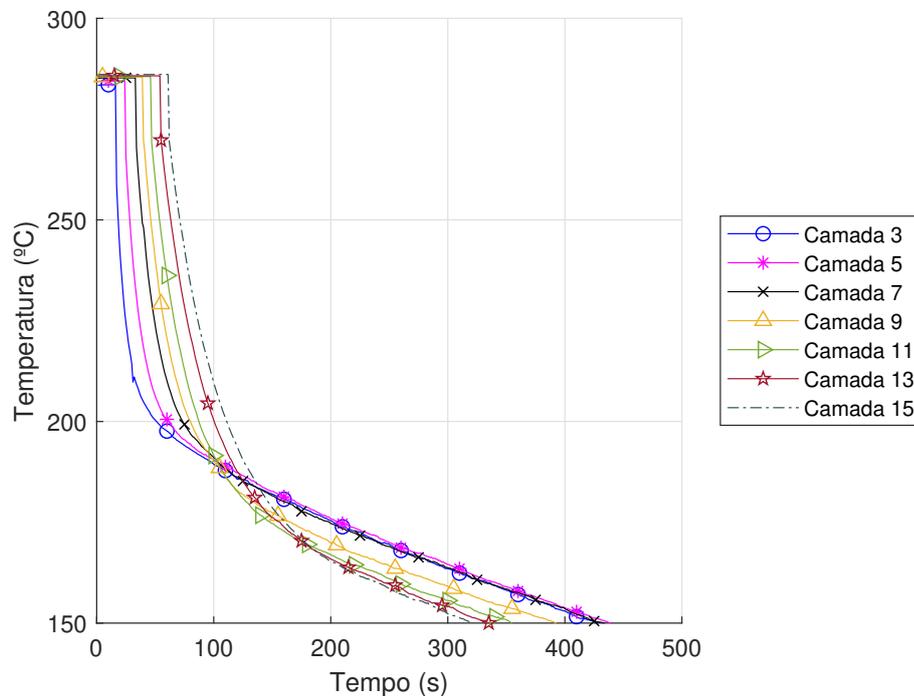
Figura C.3 – Comparação da média dos resfriamentos das paredes com temperatura de intercâmara 100°C com e sem alimentação



Fonte: própria

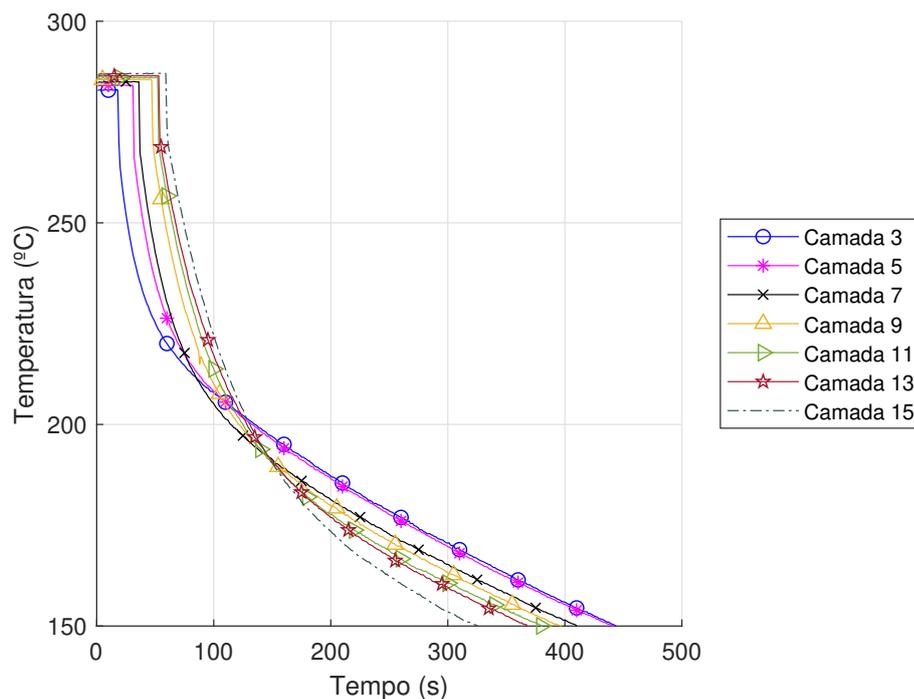
C.1.2 Temperatura de intercamada: 150°C

Figura C.4 – Configuração 2 - Resfriamento da Parede com Temperatura de intercamada 150°C sem alimentação de arame frio



Fonte: própria

Figura C.5 – Configuração 5 - Resfriamento da Parede com Temperatura de intercamada 150°C com alimentação de arame frio

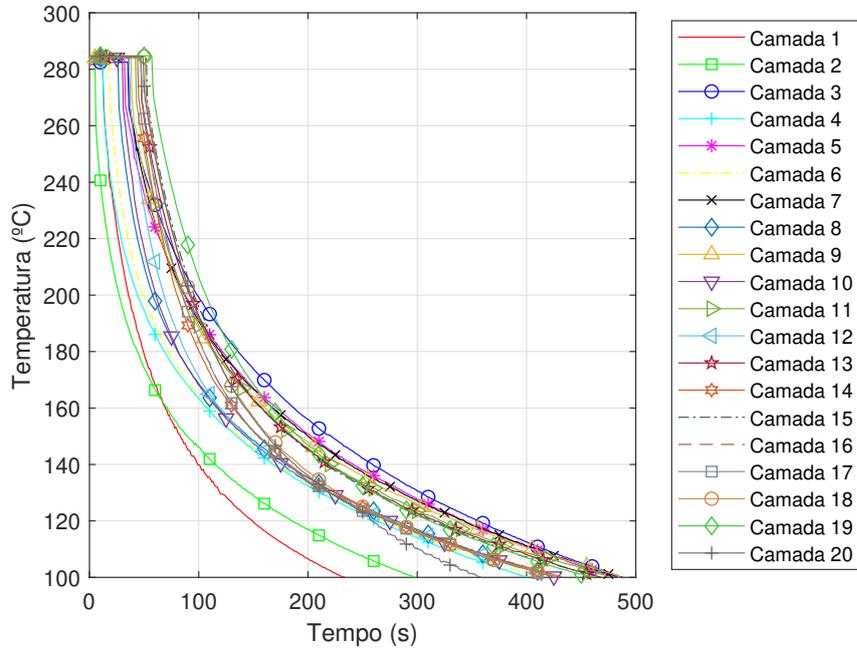


Fonte: própria

C.2 Paredes de 130 mm de comprimento

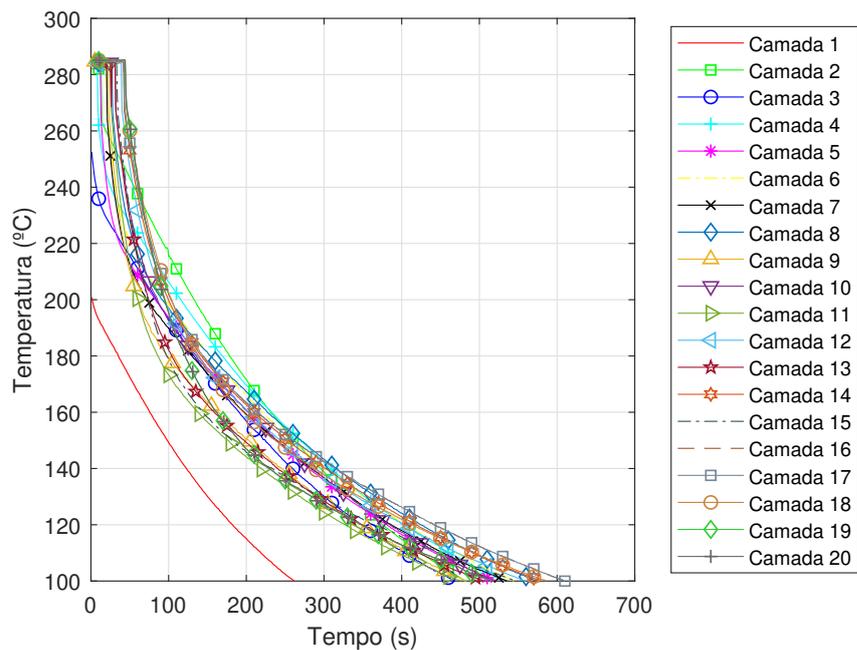
C.2.1 Temperatura de intercamada: 100°C

Figura C.6 – Resfriamento da Parede de 130 mm - com temperatura de intercamada 100°C sem alimentação de arame frio - 20 camadas



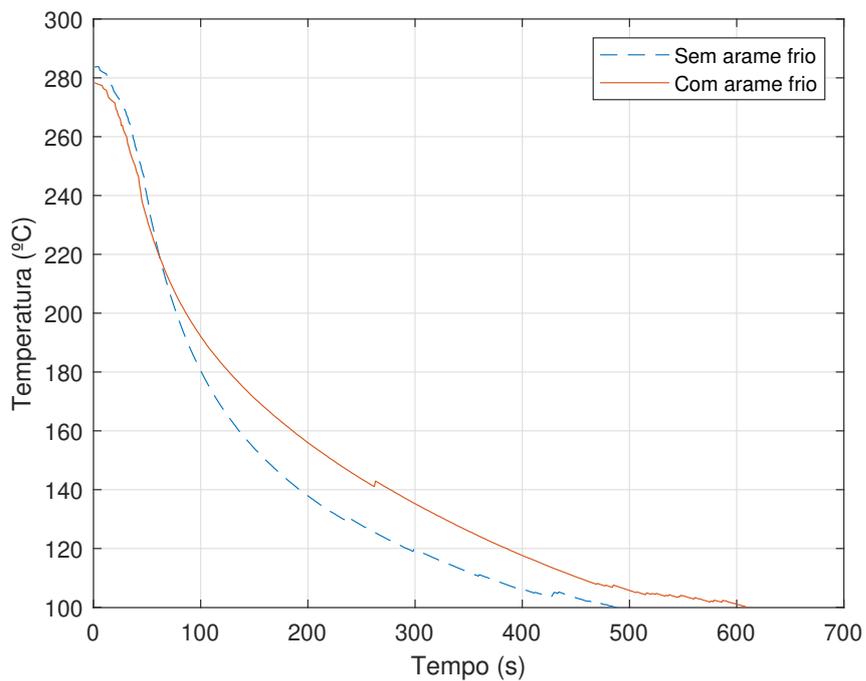
Fonte: própria

Figura C.7 – Resfriamento da parede de 130 mm - com Temperatura de intercamada 100°C com alimentação de arame frio - 20 camadas



Fonte: própria

Figura C.8 – Comparação da média dos resfriamentos das paredes para metalografia com temperatura de intercâmara 100°C com e sem alimentação - 20 camadas



Fonte: própria

APÊNDICE D – Planilhas de dados - Corrente Elétrica e Ensaios de Tração e Dureza

Neste capítulo estão anexados os dados coletados de corrente elétrica, além dos ensaios de dureza e tração para cada um dos casos analisados ao longo do trabalho.

Planilha Tensão - Corrente - 130 mm - Direto

Camadas	Tensão [V]	Corrente [A]
C01	17,85	117,9
C02	17,84	120,044
C03	17,84	116,939
C04	17,85	118,605
C05	17,84	116,685
C06	17,84	116,795
C07	17,83	114,26
C08	17,82	116,34
C09	17,81	110,414
C10	17,82	113,11
C11	17,82	110,21
C12	17,84	110,4018
C13	17,81	108,411
C14	17,85	108,839
C15	17,8	106,533
C16	17,81	106,944
C17	17,79	104,963
C18	17,8	103,856
C19	17,81	102,509
C20	17,82	102,262

Planilha Tensão - Corrente - 130 mm - 100°C

Camadas	Tensão [V]	Corrente [A]
C01	17,9174	125,048
C02	17,9421	129,088
C03	17,9307	128,065
C04	17,7188	127,8
C05	17,9357	124,445
C06	17,9152	126,994
C07	17,9324	124,986
C08	17,913	126,022
C09	17,9212	124,786
C10	17,9405	126,054
C11	17,8873	124,016
C12	17,8865	126,211
C13	17,9349	122,828
C14	17,8138	125,064
C15	17,9152	123,758
C16	17,9283	125,294
C17	17,8794	122,823
C18	17,9261	125,136
C19	17,9317	123,95
C20	17,928	122,706

Planilha Tensão - Corrente - 130 mm - 100°C

Camadas	Tensão [V]	Corrente [A]
C01	17,931	135,016
C02	17,913	130,786
C03	17,865	132,643
C04	17,868	134,633
C05	17,878	130,087
C06	17,895	129,964
C07	17,881	129,446
C08	17,939	131,499
C09	17,923	130,005
C10	17,928	130,322
C11	17,976	127,942
C12	17,939	126,278
C13	17,9735	129,157
C14	17,9887	128,9
C15	17,992	126,197
C16	17,9517	127,07
C17	17,9737	126,515
C18	17,947	124,326
C19	17,999	124,331
C20	17,946	126,124

Camada		Medidas de Dureza [HV] - 100°C								Média D1-D7	Média das Camadas	Média Geral da Peça
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7				
20	20 sup	189,8	188,3	187,2	200,4	196,3	198	197,7	196,3	199,9	189,45	
	20 inf	200,8	205,4	205,7	209	196	203,5	192,8	203,5			
19	19 sup	189,6	197,3	201,7	212	198,3	194,3	204,7	198,3	195,3		
	19 inf	191,7	190	192,8	192,3	194,4	193,1	189,2	192,3			
18	18 sup	183,1	188,8	189,5	189,9	191,3	190,2	188,3	189,5	188,4		
	18 inf	181,1	187,3	183,8	188,5	196	189,4	184,7	187,3			
17	17 sup	182,2	191,5	188,4	185,6	184,7	183,3	184,1	184,7	186,9		
	17 inf	181,3	185,1	192,2	191,8	189,8	189,1	186,4	189,1			
16	16 sup	175,9	179	179	181,6	179,5	183,2	179,3	179,3	180,95		
	16 inf	175,3	179,3	180,4	183,5	184,4	186,9	182,6	182,6			
15	15 sup	173,7	175,2	185,2	179,3	173,8	180,7	185,7	179,3	182,95		
	15 inf	186,6	187,6	194,9	192,4	184,1	181,3	183,9	186,6			
14	14 sup	176,7	179,5	182,9	185,3	182,2	182,8	179,9	182,2	185		
	14 inf	185,8	192,9	187,2	194,9	195,4	187,8	181,6	187,8			
13	13 sup	184,9	180,6	180,8	188,4	195,7	185,8	183,4	184,9	187,1		
	13 inf	186	191,4	192,4	187,2	189,3	193,8	183,1	189,3			
12	12 sup	174,3	173,6	195,3	186,6	183,1	182,1	180,3	182,1	186,7		
	12 inf	182,4	188	191,3	192,8	192,6	193	184,4	191,3			
11	11 sup	184,2	187,7	191,1	188,6	194	189	189,3	189	191		
	11 inf	193	186,7	192,2	198,3	198,4	196,9	185,4	193			
10	10 sup	185,5	187,3	189,2	191,8	190,4	193,6	188,7	189,2	191,85		
	10 inf	186,2	192,8	198,1	194,5	198,4	197,3	191,5	194,5			
9	9 sup	186,1	188,3	188,5	189,4	191,2	198,2	197,9	189,4	193,4		
	9 inf	188,8	196,9	197,6	197,4	204,3	199,7	195,9	197,4			
8	8 sup	182,5	195,1	193,6	193,7	194,8	197,3	197,8	194,8	195,05		
	8 inf	188,2	200,2	195,3	195,7	197,3	195	190,4	195,3			
7	7 sup	184,5	182,5	190,1	189,2	187,2	191	189	189	190,45		
	7 inf	184,9	191,9	186,1	192,5	198,3	189,6	193,5	191,9			
6	6 sup	179,7	178,9	182,6	188,2	188,3	192,5	185,1	185,1	186,35		
	6 inf	187,6	189,2	185,1	183	188,1	188,9	186,4	187,6			
5	5 sup	184,7	183,7	183,6	190,7	185,3	180,8	182,9	183,7	187,6		
	5 inf	182,4	187,3	193,1	191,5	195,3	191,7	191,5	191,5			
4	4 sup	181,1	186,9	191,5	197,8	188,1	190,7	187,1	188,1	188,45		
	4 inf	183,5	188,1	185,3	193,9	193,3	194,8	188,8	188,8			
3	3 sup	183,1	191,2	200,7	198	193,7	192,2	195,8	193,7	193,6		
	3 inf	190,1	198,9	194,6	186,2	197,6	193,5	192,4	193,5			
2	2 sup	191	192,3	195,9	197,5	200,7	187,5	188,1	192,3	194		
	2 inf	192,8	199,1	198	196,6	195,7	191,2	184,2	195,7			
1	1 sup	184,8	192	190,8	191,3	194,2	192,2	195,7	192	196,35		
	1 inf	198,9	201,6	207,1	203,2	200,7	200,5	190,9	200,7			

Camada		Medidas de Dureza [HV] - 100°C-AF							Média D1-D7	Média das Camadas	Média Geral da Peça
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7			
20	20 sup	197,1	195	204,3	199,4	200,6	208,4	198,9	199,4	204,85	191,15
	20 inf	213,1	209,9	210,9	206,3	210,3	212,5	204,3	210,3		
19	19 sup	196,8	196,2	201,3	198,4	201,8	201,8	192,8	198,4	196,55	
	19 inf	193,9	194,7	198,4	194,5	197	197	191,4	194,7		
18	18 sup	193,7	197,4	195,3	192,7	193,3	193,3	191,4	193,3	194	
	18 inf	197,5	201,2	194,7	198,9	190,7	190,7	190,7	194,7		
17	17 sup	184,2	186,7	190,3	191,4	192,5	192,5	196,5	191,4	191,95	
	17 inf	190,7	182,7	188,3	194,8	193,8	193,8	192,5	192,5		
16	16 sup	185,6	182,7	186,5	190	189,4	189,4	193,9	189,4	189,85	
	16 inf	181,7	190,1	194,5	190,3	193,1	193,1	184,7	190,3		
15	15 sup	178	188,8	186,2	190,6	184,2	184,2	187,6	186,2	188,25	
	15 inf	185,3	178,5	190,3	187,6	190,9	190,9	196	190,3		
14	14 sup	174,2	192,4	183,7	189,6	189,6	189,6	191,4	189,6	190,2	
	14 inf	186,7	188,7	196,7	191,2	190,8	190,8	200,3	190,8		
13	13 sup	182,4	189,3	187,7	190,4	184,8	184,8	186,5	186,5	189,8	
	13 inf	187,1	192,7	193,1	201,5	193,8	193,8	190,9	193,1		
12	12 sup	177,1	181,4	193,3	186,1	192,3	192,3	195	192,3	192,35	
	12 inf	187,3	184	192,1	193,1	193,5	193,5	192,4	192,4		
11	11 sup	189,2	191,8	189,5	191	199,1	199,1	199,1	191,8	194,75	
	11 inf	197,3	195,2	197,7	198,8	192,2	198,2	202,2	197,7		
10	10 sup	186,2	196,3	195,5	196,6	191,74	190,1	185,4	191,74	192,72	
	10 inf	192,3	189	191,1	193,7	199,9	196,4	194,1	193,7		
9	9 sup	180,1	187,4	187,1	189,2	189,4	189,4	192	189,2	191,65	
	9 inf	185,6	192	194,1	196,4	199,4	198,8	192,9	194,1		
8	8 sup	182,5	183,8	187,3	187,6	184,5	189,6	188,1	187,3	189	
	8 inf	180,8	184,5	190,7	197,1	194	196,2	190,7	190,7		
7	7 sup	180	186,5	188,4	185,2	195,9	188,9	188,4	188,4	188,55	
	7 inf	182,6	188	187,5	192	193,6	198,3	188,7	188,7		
6	6 sup	187,5	183,5	187,1	190	188,3	191,3	187,2	187,5	189,65	
	6 inf	192	188,6	191,6	191,8	196,8	197,6	186,8	191,8		
5	5 sup	187,1	195,5	188,4	192	195	190,7	189,9	190,7	190,15	
	5 inf	184	180,4	191,5	197,5	189,5	191	189,6	189,6		
4	4 sup	179,5	188	190	197,3	196,8	188,7	189,2	189,2	190,3	
	4 inf	191,9	189,2	187,3	191,8	189,6	192,5	191,4	191,4		
3	3 sup	182,9	187,4	186,6	186,3	192,7	186,4	190,7	186,6	187,8	
	3 inf	188,1	188,7	192	189,8	189	188,6	189,4	189		
2	2 sup	184,4	187,4	196,7	187,2	190,4	190,4	130,3	187,4	189,2	
	2 inf	190,9	192,9	187,7	193,2	191	192	181,8	191		
1	1 sup	194,5	195,4	193,1	195,6	194,6	193	194,3	194,5	192,95	
	1 inf	191,4	188,3	189,4	194,3	192,1	191,3	194,7	191,4		

Camada		Medidas de Dureza [HV] - 150°C							Média D1-D7	Média da Camada	Média Geral da Peça
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7			
20	20 sup	179	184,3	186,2	190,6	187,4	191	188,3	187,4	191,4	173,8
	20 inf	194,8	198,3	195,4	190,1	195,7	196,3	187,4	195,4		
19	19 sup	180,5	182,6	185,4	180,8	191,8	182,7	182,5	182,6	180,6	
	19 inf	175	181,6	176,2	181,3	178,6	180,5	170,7	178,6		
18	18 sup	168,5	173,2	177,3	176,4	177,2	174,5	174,5	174,5	174,8	
	18 inf	172,3	172,7	175,1	178,9	178,6	181,4	170,4	175,1		
17	17 sup	169,3	171,2	172,9	174,2	173,7	174,1	173	173	172,95	
	17 inf	165,9	172,9	169,3	176,7	175,7	179,5	168	172,9		
16	16 sup	165	169,2	167,2	169,3	172,4	174,7	173,3	169,3	172,25	
	16 inf	167,3	169,1	175,2	177,4	178,1	178,1	170,1	175,2		
15	15 sup	162	168,4	172,6	170,1	174	168,8	171,3	170,1	169,75	
	15 inf	165	167,4	169,4	177,7	176,3	178,9	169,1	169,4		
14	14 sup	160,5	169,5	172,9	173,8	174,5	171,6	173,5	172,9	170,05	
	14 inf	164,1	165,3	166,7	173,6	176	173,5	167,2	167,2		
13	13 sup	160,5	172,8	177,9	173,8	173,6	169,6	165,8	172,8	171,05	
	13 inf	169,7	171,3	170,2	167,3	169,3	168,4	167,4	169,3		
12	12 sup	164,2	169,7	171,8	172,7	173,5	169	163,9	169,7	170,45	
	12 inf	166,3	172,1	173,8	170,5	174,3	171,2	164,3	171,2		
11	11 sup	162,7	169,2	177,4	177,4	175,5	175	171,7	175	173,75	
	11 inf	167,6	168,9	172,5	177,7	180,8	174,5	165,7	172,5		
10	10 sup	156	164,5	168,7	175,9	173,8	173,3	171,1	171,1	170,85	
	10 inf	170,6	169,7	172	176,4	175,6	168,7	168,4	170,6		
9	9 sup	159,6	161,6	168,1	171,4	171,7	172,4	168,3	168,3	172,55	
	9 inf	171,8	176,8	183,3	186,7	181,7	176,7	167,2	176,8		
8	8 sup	162,6	173,1	176	172,8	169,5	168,5	163,8	169,5	172,65	
	8 inf	173,8	175,8	179,2	177,9	177,4	174,5	168,3	175,8		
7	7 sup	166,1	168,7	168,4	171,7	170,9	169,4	165,4	168,7	172,3	
	7 inf	175,3	184,5	179,5	180,6	175,9	173,4	169,2	175,9		
6	6 sup	165,1	175,1	175,9	173,3	173,3	168,8	167,8	173,3	174,8	
	6 inf	178,1	176,3	180,3	180,5	175	169,4	167,7	176,3		
5	5 sup	168,8	175,5	178,1	174	168,5	169,6	167	169,6	172,35	
	5 inf	175,1	180,4	182,8	175,9	172,4	174,4	163,6	175,1		
4	4 sup	172,1	180,4	173,5	170,4	172,6	169,9	169,4	172,1	175,65	
	4 inf	179,2	185	181,3	175,5	180,3	175,5	171,5	179,2		
3	3 sup	176,4	181,5	182,4	180,8	179,5	172,9	172,5	179,5	182	
	3 inf	181,5	185,1	188,1	186,1	184,5	176,5	168,2	184,5		
2	2 sup	176,3	175,4	177,4	179,4	182,1	178,7	176,5	177,4	177,1	
	2 inf	181,2	183,4	175,6	176,8	176,2	175,2	178,2	176,8		
1	1 sup	179,3	178,9	183,4	181,4	182,1	175,6	175,3	179,3	177,35	
	1 inf	172,4	174,5	181,2	178,4	172,3	177,8	175,4	175,4		

Camada		Medidas de Dureza [HV] - 150°C-AF							Média D1-D7	Média da Camada	Média Geral da Peça
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7			
20	20 sup	197,9	199,9	196,9	195,5	188,1	189,2	194,7	195,5	199,45	174,3
	20 inf	203,4	200,9	204,5	202,9	204,9	201,3	205,3	203,4		
19	19 sup	192,8	190,7	198,1	196,1	198,1	196,1	192,8	196,1	191,25	
	19 inf	185,1	189,8	185,2	186,4	185,3	191,1	187,4	186,4		
18	18 sup	164,7	173,8	179,5	176,5	175,9	178,2	181	176,5	175,5	
	18 inf	170,8	170,5	168,9	174,5	181,7	177,7	174,8	174,5		
17	17 sup	169,3	171,9	170,9	175,4	172,3	175,2	168,8	171,9	172,65	
	17 inf	170,1	174,2	173,4	172	175,6	176,8	171,2	173,4		
16	16 sup	168,4	173,7	174	175,5	174,5	174,8	172,9	174	175,75	
	16 inf	178	177,5	177,4	179,1	179,9	176,3	170	177,5		
15	15 sup	170	167,8	171,5	172,1	174,4	174	175,4	172,1	172,6	
	15 inf	170,7	173,1	172,4	176,4	171,8	177,9	174,3	173,1		
14	14 sup	165,4	170,5	167	172,9	176	171	171,1	171	171,75	
	14 inf	169,8	174,8	177,3	177,5	172,2	172,5	168	172,5		
13	13 sup	166,8	175,9	173,2	179,2	178	172,3	171	173,2	173,8	
	13 inf	171,2	177,9	179,1	182,6	174,4	173,9	165,8	174,4		
12	12 sup	166,1	166,7	172,4	169,1	170,2	169,8	171,4	169,8	171,6	
	12 inf	171,5	174,1	173,2	176	173,4	175	167,4	173,4		
11	11 sup	166	176,9	172,2	177,4	171,1	174,6	173,2	173,2	175	
	11 inf	174,3	176,8	180,5	182,7	183,2	171,8	168,3	176,8		
10	10 sup	167	170,6	173,6	173,6	175,2	167,4	172,7	172,7	171,05	
	10 inf	168,5	172,7	169,6	172,5	168,6	169,4	166,7	169,4		
9	9 sup	165,6	171,3	174,3	169,9	168,6	173,8	168,5	169,9	172,4	
	9 inf	170	174,2	178,1	174,9	177,9	176,2	168,8	174,9		
8	8 sup	164,4	168,4	174,4	173,7	174,5	172,7	174,2	173,7	170,95	
	8 inf	165,3	170,9	168,2	168,5	167,9	173,4	163	168,2		
7	7 sup	163,8	168,5	172,4	174,5	174,6	173,1	17936	173,1	174,85	
	7 inf	175	176,6	174,9	179	179,2	180,7	176,4	176,6		
6	6 sup	157,6	170	175,3	171,7	175,1	173,4	173,1	173,1	171,7	
	6 inf	163,5	165,7	170,3	174,2	172,2	172,6	166	170,3		
5	5 sup	165,5	169	166,6	168,2	169,6	170,4	170,2	169	171,95	
	5 inf	170,5	174,9	175,3	177,2	180,8	174,7	170	174,9		
4	4 sup	164,2	171,6	174	175,7	177,9	179,3	177,9	175,7	175,45	
	4 inf	173,9	176,6	174,9	180,6	177,2	175,2	173,2	175,2		
3	3 sup	171,3	170,2	171,5	170,9	177,2	177,4	179,2	171,5	172,8	
	3 inf	170,1	173,6	174,1	179,5	178,3	173,9	174,4	174,1		
2	2 sup	174,4	175,5	178,5	174,9	178,4	181,5	185,7	178,4	180,05	
	2 inf	180,2	178,6	179,9	188,7	182,7	181,7	185,2	181,7		
1	1 sup	185	183,2	187,2	190,3	190,9	185,5	185	185,5	184,45	
	1 inf	183,4	181	182,9	182,4	188,7	188,2	184,9	183,4		

Camada		Medidas de Dureza [HV] - Direto								Média D1-D7	Média da Camada	Média Geral da Peça
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7				
20	20 sup	183,8	181,9	186,9	186,1	189	188	204	186,9	187	172,45	
	20 inf	182,7	187,1	186,9	193,5	184,8	189	193,9	187,1			
19	19 sup	182,6	180,5	176	185,9	184,4	181,9	179	181,9	180,25		
	19 inf	178,4	189,3	175,8	178,6	179,9	177,4	185,8	178,6			
18	18 sup	191,8	188,5	183,1	182,1	179,9	186,4	190,1	186,4	185,3		
	18 inf	184,8	177,7	184,2	173,6	181,9	184,8	196	184,2			
17	17 sup	180,9	178,8	179,9	183,1	184	187,8	182,8	182,8	183,1		
	17 inf	183,4	182,5	184,4	183,2	185,6	183	186,1	183,4			
16	16 sup	178,1	182,9	183,1	176,9	184,3	183,9	174,9	182,9	182,6		
	16 inf	179	183,1	188,4	182,3	184,6	178,7	180,2	182,3			
15	15 sup	175,8	180,4	183,6	182,2	178,4	177,2	175	178,4	177,65		
	15 inf	173,9	176,5	180,4	180,1	174,3	179,7	176,9	176,9			
14	14 sup	171,1	174,8	173,7	172,8	176,2	178	179	174,8	173,8		
	14 inf	170,5	171	172,9	172,8	177,7	177,7	171,5	172,8			
13	13 sup	172,3	175,2	171,1	175,1	172	178,3	176,3	175,1	175,5		
	13 inf	168,8	171,3	174,4	175,9	182,8	184,2	180,6	175,9			
12	12 sup	162,6	169	165,2	169,4	175,9	173	174,5	169,4	170,2		
	12 inf	162,1	165,9	163,4	172,4	171	172,7	177,1	171			
11	11 sup	162,8	162,3	164,4	171,4	166,6	171,8	180,2	166,6	167		
	11 inf	160,3	167,4	165,1	169,2	164,6	170,2	174,1	167,4			
10	10 sup	159,6	157,6	160,6	160,8	158,8	162	159,6	159,6	159,4		
	10 inf	163,4	160,2	156,4	159,2	159,2	156,3	159	159,2			
9	9 sup	159,6	163,2	163,6	162	158,3	162,1	162,7	162,1	162,05		
	9 inf	156,7	162	162,5	164,6	167,3	154,7	155,3	162			
8	8 sup	158,3	159,1	156,2	160,5	160,4	161,8	162,6	160,4	161,05		
	8 inf	160,4	161,7	160,6	159,1	163,7	164,7	165,2	161,7			
7	7 sup	168,7	169,1	168,1	162,3	161,7	163,6	159,1	163,6	168,7		
	7 inf	176,6	173,8	176,2	174,8	164,8	159,5	152,9	173,8			
6	6 sup	169,6	172,5	169,5	172	170,9	166,1	163,7	169,6	170,7		
	6 inf	159,8	171,8	173,4	172,9	171,3	171,4	172,6	171,8			
5	5 sup	165,3	164,5	167	168,1	172,9	178,3	179,2	168,1	167,85		
	5 inf	166,4	166,8	167,7	166,8	167,6	168,1	173,4	167,6			
4	4 sup	166,5	167,8	171,9	171,6	175,5	168,4	166,2	168,4	168,2		
	4 inf	168	168,2	168	165,8	166,8	168,4	168	168			
3	3 sup	172,2	176,5	171,6	170,8	169,5	168	162,7	170,8	171		
	3 inf	171,2	171,7	171,7	171,7	168,8	170,2	171,1	171,2			
2	2 sup	168,5	175,1	166,9	173,3	171,6	173,6	170,7	171,6	172,15		
	2 inf	172,7	173,2	172,4	174,5	173,3	170,4	169,4	172,7			
1	1 sup	174,6	175,3	172,3	174,7	170,1	173,6	177,7	174,6	173,7		
	1 inf	176,4	172	174,5	172,8	172,3	171,4	178,6	172,8			

Camada		Medidas de Dureza [HV] - Direto-AF							Média D1-D7	Média da Camada	Media Geral da Peça
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7			
20	20 sup	160,7	169,1	168,7	167,9	164,9	166,9	163,1	166,9	168,45	166,9
	20 inf	174,5	170,7	172,4	170	169,6	167,1	162,8	170		
19	19 sup	165,3	170,6	168,7	168,5	168,3	169,5	163,8	168,5	171,85	
	19 inf	172,2	175,2	178,7	175,5	177,5	174,1	169,7	175,2		
18	18 sup	166,6	176,7	173,8	173,4	169,7	175,7	173,5	173,5	172,25	
	18 inf	171	170,7	171,8	171,4	171,3	169,1	162,6	171		
17	17 sup	163,9	171,6	177	180,8	172,5	169,4	165,1	171,6	172,8	
	17 inf	176,7	170	174,2	174	178	168,7	166,2	174		
16	16 sup	163,9	169,2	172,1	170,5	168,9	168,8	163,5	168,9	171,45	
	16 inf	176,7	172,5	175,4	174,9	174	166,7	161,6	174		
15	15 sup	164,8	168,3	167,9	170,7	164,9	170,7	165,8	167,9	169,25	
	15 inf	170,6	168,3	170,9	171,2	171,2	165,4	161,9	170,6		
14	14 sup	162,7	167,4	165,3	174	168,8	164,7	166,7	166,7	167,55	
	14 inf	170,3	173,4	168,4	172,8	165,2	167,8	161,1	168,4		
13	13 sup	159,5	162,9	164,9	163	167,7	166,1	171,3	164,9	167,2	
	13 inf	167,2	164,2	171,1	173,4	169,5	173,7	165,4	169,5		
12	12 sup	160,6	162,7	166,3	162,7	164,9	163,7	165,7	163,7	164,2	
	12 inf	162,8	170,1	164,7	165,4	164,5	166,4	161,8	164,7		
11	11 sup	156,3	162,5	164,3	163,3	169,3	167,4	163,4	163,4	167,3	
	11 inf	173,1	171,9	171,2	170,7	173,2	168,6	165,6	171,2		
10	10 sup	162,9	161,4	166,5	168,4	165,7	161,4	167	165,7	167,2	
	10 inf	161,6	169,3	166,5	169,5	170	167,8	168,7	168,7		
9	9 sup	154,9	165	162,8	162,6	162,1	164,5	166,4	162,8	164,8	
	9 inf	163,6	165,7	166,8	167,9	168,2	169,8	163,6	166,8		
8	8 sup	161,4	163,2	164,2	164	165,3	166	160,2	164	164,85	
	8 inf	164	165,7	165,8	169,2	169,1	163,6	159,5	165,7		
7	7 sup	157,5	160,7	161,5	163,2	166	163	161,6	161,6	163,25	
	7 inf	164,9	166,6	169,3	163,1	156,7	169,54	157,9	164,9		
6	6 sup	159,5	162,5	163,7	166,8	163,7	164,7	157,2	163,7	164,8	
	6 inf	166,1	164,5	167,7	165,6	169,7	165,9	161,5	165,9		
5	5 sup	160,2	166,8	163,9	166,2	167,5	167,6	161,6	166,2	168,45	
	5 inf	167,4	166,9	171,9	171,4	174,2	170,7	162,4	170,7		
4	4 sup	161,9	163,7	169,2	169,6	165,6	161,8	165,8	165,6	167	
	4 inf	170	168,9	168,4	167,6	169,8	164,3	168,4	168,4		
3	3 sup	161,7	164,1	167,3	170,9	170,5	166,3	165,9	166,3	167,45	
	3 inf	168,7	164,3	166,1	168,6	170,4	169,9	163,5	168,6		
2	2 sup	162,4	164,3	167,1	166,7	170,7	168,4	160,3	166,7	165,4	
	2 inf	164,1	161,4	168,7	163,2	168,5	166,2	163,2	164,1		
1	1 sup	162,4	166,3	167,5	170,3	167,7	171,4	160,5	167,5	169,1	
	1 inf	166,2	170,7	175,9	171,6	172,2	168	162,9	170,7		

Ensaio de Tração							
Peça	Tensão Max. (N/mm²)	Max. Força (kN)	Max. Deslocamento (mm)	Tensão Média da Base	Tensão Média do Topo	Tensão Média Geral	
Temperatura 100°C - Sem alimentação de Arame Frio							
B-100-1	729,128	17,499	7,626	660,181	390,677	594,6495	
T-100-1	390,677	9,376	1,954				
B-100-2	529,118	12,699	2,547				
T-100-2	322,211	7,733	1,811				
B-100-3	660,181	15,844	7,589				
T-100-3	672,905	16,15	7,511				
Temperatura 100°C - Com alimentação de Arame Frio							
B-AF-100-1	1327,62	31,863	8,104	716,412	684,691	689,767	
T-AF-100-1	684,691	16,433	6,828				
B-AF-100-2	662,295	15,895	5,889				
T-AF-100-2	650,438	15,61	7,398				
B-AF-100-3	716,412	17,194	7,441				
T-AF-100-3	694,843	16,676	7,178				
Temperatura 150°C - Sem alimentação de Arame Frio							
B-150-1	599,023	14,376	6,984	652,52	650,299	650,724	
T-150-1	651,149	15,628	7,307				
B-150-2	653,958	15,695	6,899				
T-150-2	650,299	15,607	7				
B-150-3	652,52	15,66	7,52				
T-150-3	650,175	15,604	7,98				
Temperatura 150°C - Com alimentação de Arame Frio							
B-AF-150-1	644,366	15,465	7,535	675,217	689,721	682,469	
T-AF-150-1	724,2	17,381	7,079				
B-AF-150-2	709,581	17,03	6,982				
T-AF-150-2	650,06	15,601	7,684				
B-AF-150-3	675,217	16,205	7,21				
T-AF-150-3	689,721	16,553	5,927				
Direto - Sem alimentação de Arame Frio							
B-D-1	668,196	16,037	7,623	692,741	679,334	685,821	
T-D-1	679,334	16,304	7,555				
B-D-2	703,959	16,895	7,579				
T-D-2	674,848	16,196	4,24				
B-D-3	692,741	16,626	7,637				
T-D-3	692,308	16,615	7,733				
Direto - Com alimentação de Arame Frio							
AF-B-D-1	645,177	15,484	7,583	645,177	659,537	648,8705	
AF-T-D-1	660,865	15,861	7,38				
AF-B-D-2	652,564	15,661	7,939				
AF-T-D-2	659,537	15,829	7,822				
AF-B-D-3	631,118	15,147	7,922				
AF-T-D-3	573,556	13,765	4,092				

Anexos

ANEXO A – Catálogo Esab - Eletrodo ER70S-6

3 - ARAMES SÓLIDOS OK

3.1 - ARAMES SÓLIDOS OK PARA AÇOS DE BAIXO E MÉDIO TEOR DE CARBONO

Estes aços são ligas Ferro-Carbono com teor de Carbono até 0,5%. É comum, nessa classe de aços, a presença de elementos de ligas como Manganês e Silício. É a classe mais comum de aços e tende a apresentar boa a razoável soldabilidade em função do teor de carbono.

ARAME SÓLIDO OK	COMPOSIÇÃO DO ARAME (%)	APLICAÇÕES	PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS	POSIÇÕES SOLDAGEM	DIÂM. (mm)	TENSÃO	FAIXA DE CORRENTE	DEPOS. (Kg/h)	GÁS DE PROTEÇÃO TIPO DE CORRENTE
OK Autrod 12.51 AWS / ASME SFA 5.18 ER70S-6 EN 440 G3Si1	C 0,08 Si 0,90 Mn 1,50	Arame sólido cobreado manganês-silício destinado à soldagem MIG/MAG dos aços não ligados, como por exemplo, os aços de construção em geral com uma tensão de ruptura mínima de 485 MPa. O OK Autrod 12.51 solda utilizando as misturas Ar + 20-25% CO ₂ ou CO ₂ puro como gases de proteção. Homologações: FBTS(CO ₂) ER70S-6 ABS(CO ₂) 3YSA BV(CO ₂) SA3,3YM DNV (CO ₂) 3YMS LR(CO ₂) DXVudO BF 3YS H15 NA GL 3YS VdTÜV 00899	Ar + 20% CO₂ L.R. 560 MPa L.E. 470 MPa A 26% ChV (20 °C) 130J ChV (-20 °C) 90J ChV (-29 °C) 70J 100% CO₂ L.R. 540 MPa L.E. 440 MPa A 25% ChV (20 °C) 110J ChV (-20 °C) 70J		0,8 1,0 1,2 1,6	18 - 24 V 18 - 32 V 18 - 34 V 28 - 38 V	60 - 200 A 80 - 300 A 120 - 380 A 225 - 550 A	0,8 - 3,0 1,0 - 5,6 1,3 - 8,0 2,0 - 11,4	Ar + 8 - 25% CO ₂ ou 100% CO ₂ CC+
OK AristoRod 12.50 AWS / ASME SFA 5.18 ER70S-6 EN 440 G3Si1	C 0,10 Si 0,90 Mn 1,50	Arame sólido, não cobreado, de baixo teor de carbono, destinado à soldagem de aços não ligados. Indicado para soldagem na construção em geral, fabricação Naval & Offshore e na indústria automotiva. Sua fabricação diferenciada lhe confere excelente desempenho, maior estabilidade de arco e menores níveis de respingo, até mesmo quando utilizam elevadas correntes de soldagem. A ausência da camada de cobre evita problemas de alimentação, o que torna este arame especialmente indicado para soldagens mecanizadas e robotizadas. Este arame possui elevada tecnologia de proteção contra a corrosão de sua superfície. Homologações: ABS 3SA, 3YSA BV SA3YM DNV III YMS GL 3YS LR 3S, 3YS VdTÜV 10052	Ar+20% CO₂ L.R. 560 MPa L.E. 470 MPa A 26% ChV (20 °C) 130J ChV (-20 °C) 90J ChV (-30 °C) 70J ChV (-40 °C) 60J 100% CO₂ L.R. 540 MPa L.E. 440 MPa A 25% ChV (20 °C) 120J ChV (-20 °C) 70J		0,9 1,0 1,2	18 - 24 V 18 - 32 V 18 - 35 V	60 - 200 A 80 - 300 A 120 - 380 A	0,8 - 2,5 1,0 - 5,5 1,3 - 8,0	Ar + 8 - 25% CO ₂ ou 100% CO ₂ CC+