

PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) EM AÇO CARBONO COM E SEM ADIÇÃO DE ARAME FRIO

¹Gustavo de Castro Lopes

²Demostenes Ferreira Filho

³Daniel Souza

⁴Valtair Antônio Ferraresi

¹⁻³ Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação/UFG

⁴ Núcleo de Fabricação, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia/UFU

castro.gustavo@discente.ufg.br

demostenesferreira@ufg.br

daniel.souza@ufg.br

valtair@ufu.br

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, comparados 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 com a deposição feita com arame único, observando o tempo de resfriamento para diferentes temperaturas de interpasse e o impacto na geometria da parede depositada. Embora os dois arames sejam depositados, o arame frio é inserido à temperatura ambiente e não possui corrente elétrica passando por ele, diferente do arame energizado. 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 das amostras, 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. Fabricada as paredes, posteriormente analisaram-se os gráficos de resfriamento ao longo do tempo de cada amostra e as diferentes alturas de paredes fabricadas em cada configuração. Nas diferentes temperaturas de interpasse, observou-se uma variação significativa no tempo de resfriamento nas deposições com aplicação do arame frio quando comparadas às deposições com arame único. Além disso, notou-se que as diferentes temperaturas de interpasse e configurações de arames afetaram na altura da parede fabricada.

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

1. INTRODUÇÃO

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 1(a), a partir de um modelo tridimensional, divide-se o objeto em camadas (Fig. 1(b)), definindo as trajetórias na qual será feita a adição de metal, com a utilização, por exemplo, de um robô (Fig. 1(c)) (ALBERTI et al., 2016).

Comparado com outros métodos de manufatura aditiva, como por exemplo processos feitos 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., 2020a).

Fonte: Alberti et al. (2016)

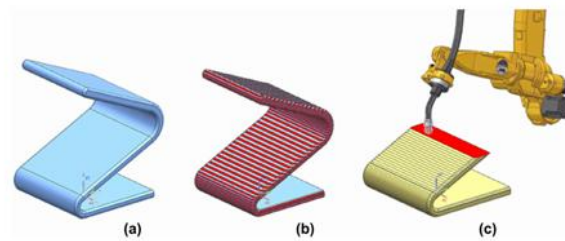


Figura 1. Esquema da MADA; (a) modelo CAD 3D; (b) divisão do modelo em camadas; (c) deposição das camadas robotizadas

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. Notou-se que o acúmulo de calor aumentou conforme aumentou-se também o número de camadas.

Adaptada de Wu et al. (2017)

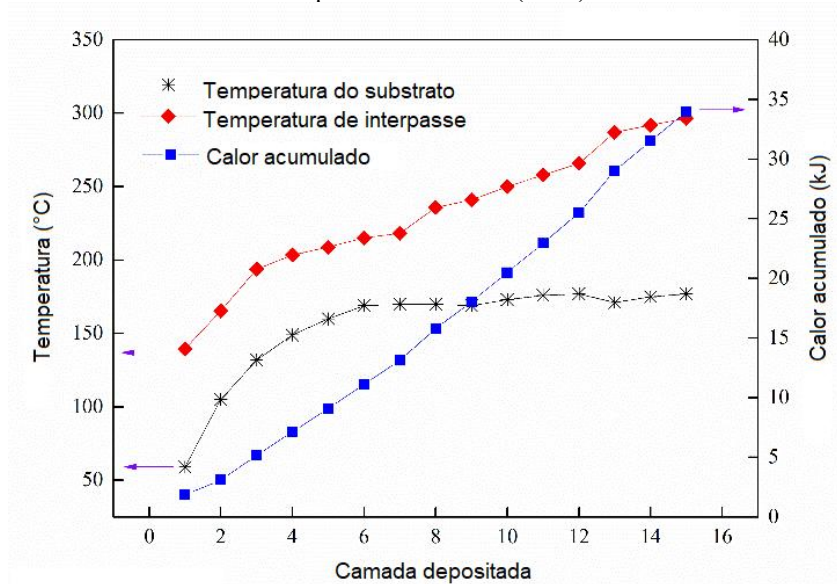


Figura 2. Acúmulo de calor e temperaturas ao longo da deposição da liga Ti6Al4V feita por MADA

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 Fig. 3 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 intercâmara 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.

Adaptada de Hackenhaar et al (2020)

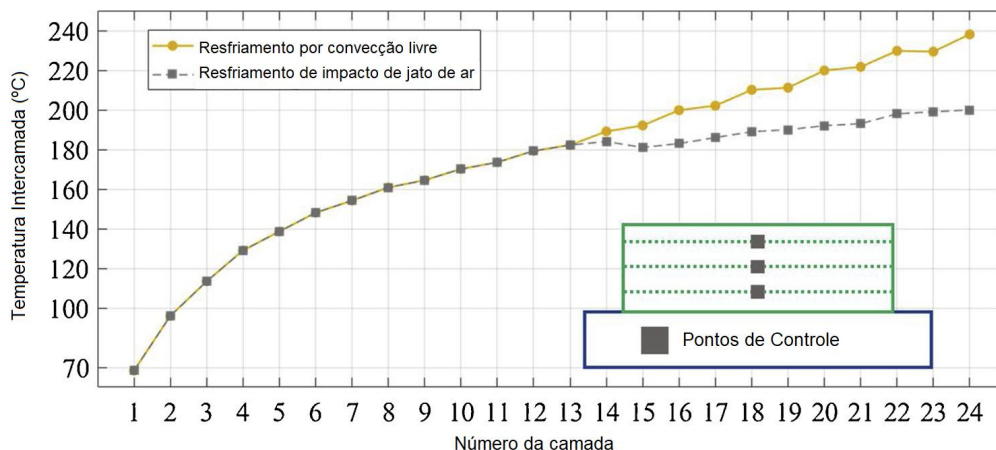


Figura 3. Comparação das temperaturas simuladas entre camadas para convecção livre e condições de resfriamento por impacto de jato de ar

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. Os resultados do monitoramento da temperatura confirmam a eficácia do resfriamento por impacto do jato no que diz respeito à temperatura de interpasse, conforme Figura 4. 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).

Fonte: Montevecchi et al. (2018)

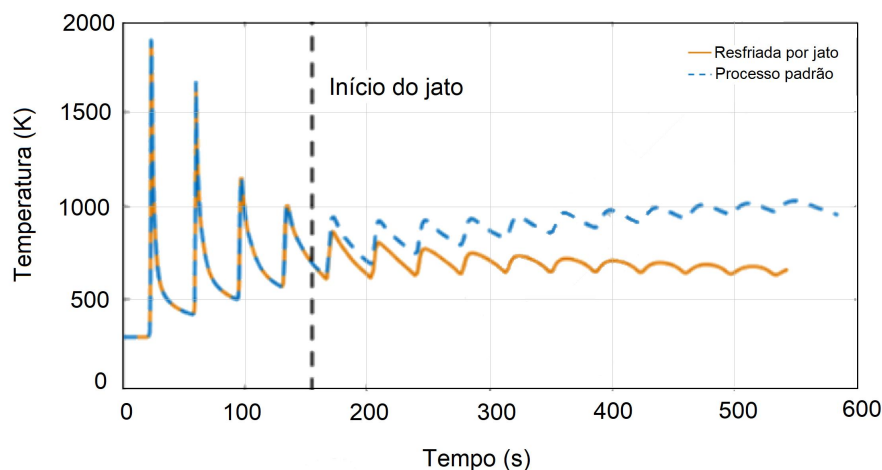


Figura 4. Comparação das temperaturas do processo resfriado a jato de ar e processo padrão sem resfriamento

2. METODOLOGIA

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, serão avaliados o tempo de resfriamento para diferentes temperaturas de interpasse e a geometria da parede depositada.

2.1. Configurações das deposições

Conforme Tab. 1, estabeleceram-se diferentes configurações dos parâmetros para realizar as deposições, variando a temperatura de interpasse 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.

Tabela 1. Configurações para as deposições

Configuração	Temperatura de Interpasse (°C)	Alimentação com Arame Frio
1	100	Não
2	150	Não
3	Direto	Não
4	100	Sim
5	150	Sim
6	Direto	Sim

2.2. Montagem e parâmetros do experimento

Os arames utilizados para o processo GMAW foram ambos o AWS ER70S-6, sendo o arame frio com 1,0 mm de diâmetro e velocidade de alimentação de 1,5 m/min e o arame energizado com 1,6 mm com velocidade de alimentação de 3,0 m/min. Utilizou-se como metal de base o aço ASTM A36. O gás de proteção foi a mistura de Argônio com 25% de Gás Carbônico (Ar+25% CO₂) com uma vazão de 25 l/min, com pré gás de 0,2 s e um pós gás de 3,0 s.

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 Fig. 5. 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.

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 Fig. 5b. 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 interpasse desejada. Desta forma as curvas de resfriamento terão 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.

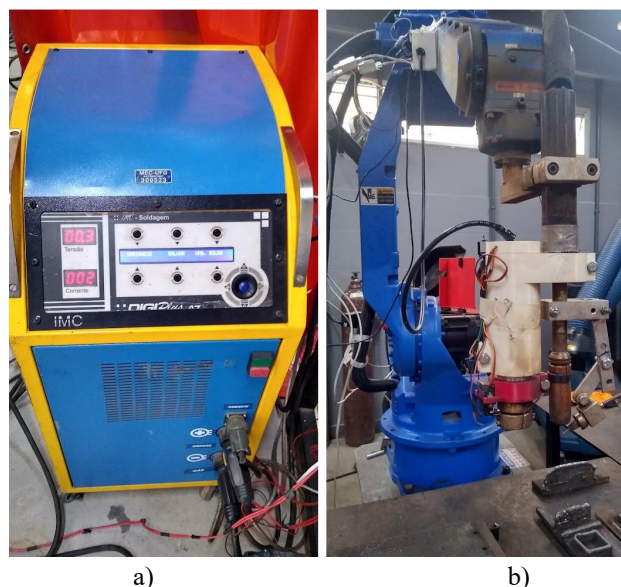


Figura 5. a) Fonte IMC para alimentação de arame energizado e b) Conjunto do Sensor de Temperatura e alimentação de arame frio acoplados no Robô Motoman HP20

2.3 Execução das deposições

Conforme as configurações da Tab. 1, as primeiras deposições (configurações 1,2 e 3) foram feitas sem alimentação de arame frio. Em todas 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 interpasse foi 100°C e 150°C, o resfriamento foi observado através do sistema de medição de temperatura.

Para cada tipo de configuração, foram feitas inicialmente 3 paredes com comprimento de 180 mm, e posteriormente mais outras 6 com comprimento de 130 mm, seguindo as mesmas configurações.

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 interpasse, começava-se a soar um alerta sonoro a cada segundo indicando que a soldagem estava próxima a ser retomada. Atingida a temperatura de interpasse, 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 Fig. 6a, 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.

Com relação ao suporte do arame frio, utilizou-se uma distância de 10 mm do bico do arame frio até a ponta do arame energizado, conforme Fig. 6b, gerando estabilidade e alinhamento, sendo possível a fusão do arame frio durante o processo de soldagem.

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° 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.

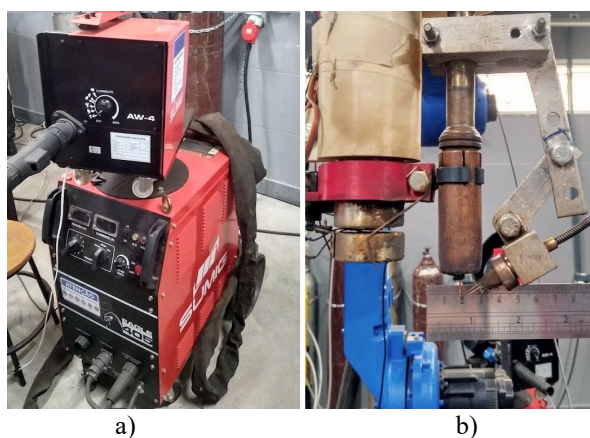


Figura 6. a) Fonte SUMIG para alimentação de arame frio e b) Suporte final do arame frio com distância de 10 mm entre os bicos

3. RESULTADOS

3.1 Deposições

Seguindo as configurações propostas na metodologia, foi possível realizar as deposições variando a temperatura de interpasse e a presença alimentação de arame frio. Algumas deposições são mostradas nas Figs 7 a 10.



Figura 7. Configuração 2: Temperatura de interpasse 150°C sem alimentação de arame frio - 180 mm



Figura 8. Configuração 5: Temperatura de interpasse 150°C com alimentação de arame frio - 180 mm



Figura 9. Configuração 2: Temperatura de interpasse 150°C sem alimentação de arame frio - 130 mm



Figura 10. Configuração 5: Temperatura de interpasse 150°C com alimentação de arame frio - 130 mm

3.2 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.

Conforme pode-se observar nas Figs 11 e 12, foi possível obter o resfriamento das paredes depositadas com 180 mm de comprimento, 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 Fig. 11 corresponde à deposição mostrada anteriormente na Fig. 7 e o gráfico da Fig. 12 corresponde à deposição mostrada na Fig. 8. Observa-se que a presença da alimentação de arame frio influencia no resfriamento do cordão depositado, deslocando a curva de resfriamento e alcançando a temperatura de interpasse desejada em um tempo menor, quando comparada às curvas do gráfico sem alimentação de arame frio. Além disso, foi possível observar na Tab. 2 que o tempo médio de resfriamento da deposição da configuração 5 (267,94 segundos) é menor do que o tempo da deposição da configuração 2 (370,17 segundos).

As Figs. 13 e 14 mostram o resfriamento das paredes mostradas nas Figs. 9 e 10, com 130 mm de comprimento. Conforme Tab. 2, observa-se que o tempo médio de resfriamento das duas deposições foi muito semelhante, sendo o da configuração 2 de 264,85 segundos, enquanto que o da configuração 5 foi de 262,05 segundos. Desta forma, o processo mostrou-se ser pouco influenciável pela alimentação de arame frio na deposição de paredes de comprimento menor.

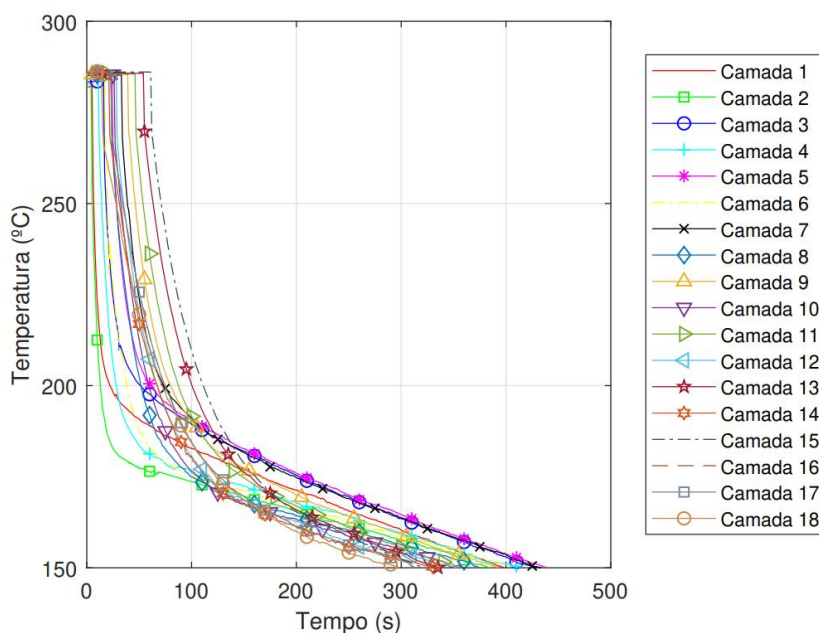


Figura 11. Configuração 2 - Resfriamento da parede com temperatura de interpasse 150°C sem alimentação de arame frio - 180 mm

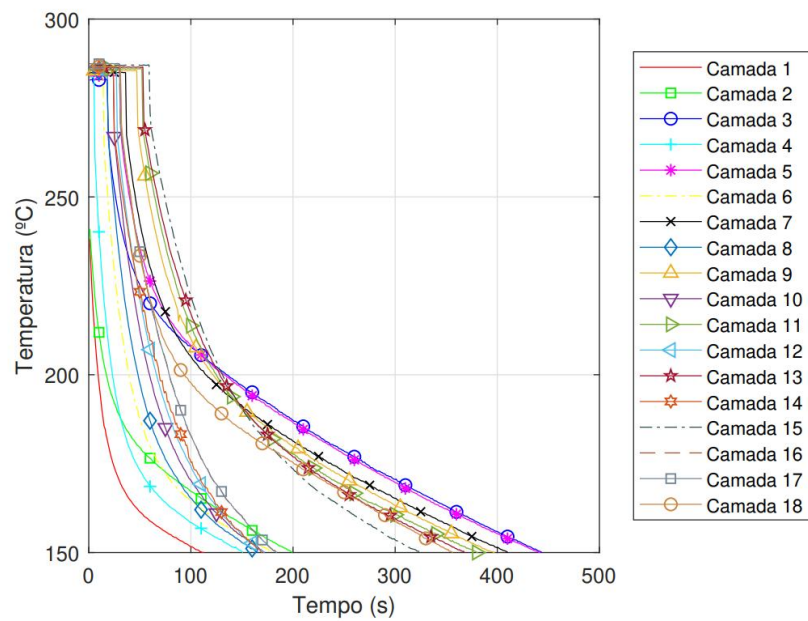


Figura 12. Configuração 5 - Resfriamento da parede com temperatura de interpasse 150°C com alimentação de arame frio - 180 mm

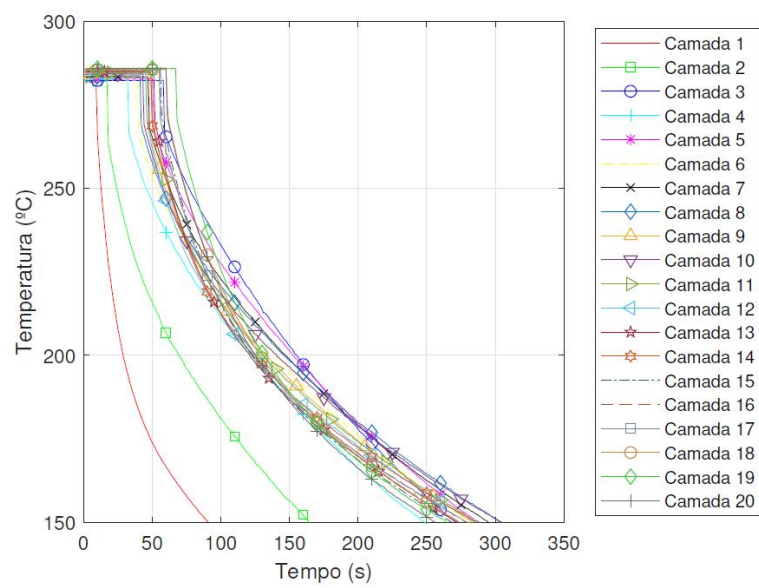


Figura 13. Configuração 2 - Resfriamento da parede com temperatura de interpasse 150°C sem alimentação de arame frio - 130 mm

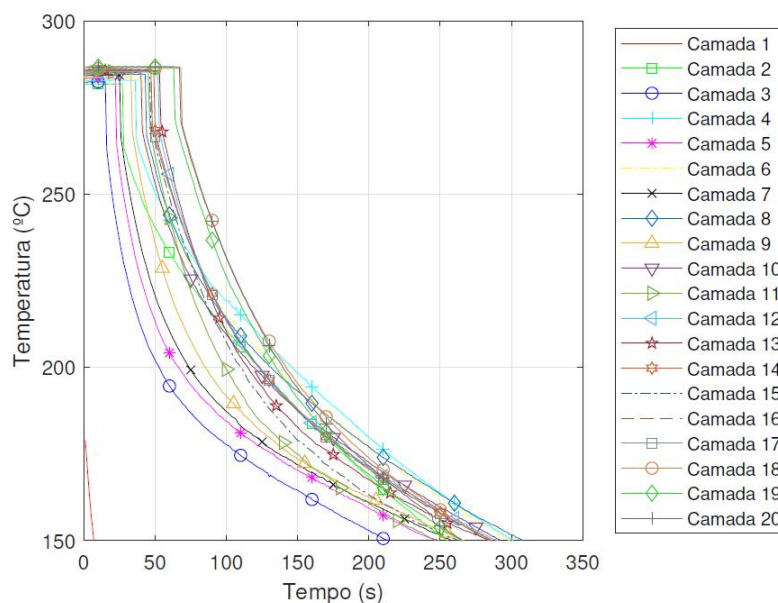


Figura 14. Configuração 2 - Resfriamento da parede com temperatura de interpasse 150°C com alimentação de arame frio - 130 mm

Tabela 2. Tempo médio de resfriamento para as deposições

Configuração	Temperatura de Interpasse (°C)	Comprimento da parede (mm)	Alimentação com Arame Frio	Tempo médio de resfriamento (s)
2	150	180	Não	370,17
5	150	180	Sim	267,94
2	150	130	Não	264,85
5	150	130	Sim	262,05

Além disso, com relação à geometria das paredes depositadas, pode-se observar na Tab. 3 que a adição de arame frio resulta em paredes com maior altura e espessura, quando comparadas às paredes que tiveram ausência de alimentação de arame frio.

Tabela 3. Geometria das paredes depositadas - 130 mm

Configuração	Temperatura de Interpasse (°C)	Alimentação com Arame Frio	Altura (mm)	Espessura (mm)
1	100	Não	43,50	7,27
2	150	Não	41,22	7,72
3	Direto	Não	38,27	9,17
4	100	Sim	47,90	8,29
5	150	Sim	49,72	8,15
6	Direto	Sim	46,97	9,60

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os resultados de algumas deposições realizadas pelo processo MADA. Foi possível realizar todas as deposições propostas, variando a temperatura de interpasse, e a presença de alimentação de arame frio. Observou-se que o arame frio influencia de forma significativa no tempo médio de resfriamento nas deposições com comprimento de 180 mm, visto que, na deposição que houve alimentação de arame frio o tempo médio de resfriamento foi menor. No entanto, para comprimentos menores, essa diferença no tempo de resfriamento médio foi bem pequena.

Além disso, observou-se que a alimentação de arame frio influencia na geometria das paredes fabricadas, visto que a altura e espessura das paredes com alimentação de arame frio foram maiores do que as das outras deposições.

5. 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.

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.

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.

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.

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.

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.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.