

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW CMT PARA MANUFATURA ADITIVA DE LIGA DE TITÂNIO TI-6AL-4V

Data de aceite: 02/05/2023

Oksana Kovalenko

Doutora em Engenharia Mecânica pela
Universidade Federal de Uberlândia

RESUMO: O processo MIG/MAG com modo operacional CMT é frequentemente usado para manufatura aditiva por deposição a arco de vários materiais, incluindo ligas de aço ao carbono, aço inoxidável e alumínio. No entanto, seu uso para ligas de titânio é pouco comum, uma vez que tradicionalmente utiliza-se processos com alimentação externa de arames, como TIG e PAW. Processo MIG/MAG pode apresentar tais dificuldades como transferência metálica irregular, instabilidade de arco e alta taxa de geração de respingos, altamente indesejáveis durante a deposição. Este estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do modo operacional CMT para a confecção de pré-formas de liga de titânio por manufatura aditiva. Para isso, realizou-se a deposição de uma parede usando o modo operacional CMT, com linha sinérgica própria para a liga de titânio Ti-6Al-4V, deposição no sentido bidirecional e gás de proteção de Ar+25%He, além de proteção auxiliar por

meio de trailing gas. A parede depositada foi avaliada por meio de oscilogramas de corrente e tensão, aspecto visual, geométrico e microestrutura. Os resultados indicaram que o modo operacional CMT apresenta as características suficientes para a confecção de pré-formas de liga de titânio por manufatura aditiva.

PALAVRAS-CHAVE: GMAW, CMT, Manufatura Aditiva, Titânio.

PRELIMINARY EVALUATION OF GMAW CMT WELDING PROCESS FOR ADDITIVE MANUFACTURING OF TI-6AL-4V TITANIUM ALLOY

ABSTRACT: The MIG/MAG process with CMT operating mode has been applied to additive manufacturing by arc deposition of various materials, such as carbon steel alloys, stainless steel alloys, and aluminum. However, there are few reports of its use for titanium alloys. Traditionally, external wire feeding processes such as TIG and PAW are used for titanium alloys due to the MIG/MAG process's difficulties with irregular metal transfer, arc instability, and high spatter generation rate. This study aims to evaluate the applicability of the CMT operating mode for the additive manufacturing of titanium

alloy preforms. To achieve this, a wall deposition was performed using the CMT operating mode, with a synergic line for the Ti-6Al-4V titanium alloy, bidirectional deposition, Ar+25%He shielding gas, and auxiliary protection via trailing gas. The deposited wall was evaluated using current and voltage oscillograms, visual, geometric, and macrostructure analysis. The results showed that the CMT operating mode has the sufficient characteristics for the additive manufacturing of titanium alloy preforms.

KEYWORDS: GMAW, CMT, Additive Manufacturing, Titanium.

1 | INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a maneira de se fabricar produtos tem se modificado. Para se manterem competitivos, os fabricantes têm procurado produzir com mais qualidade, mas sempre buscando concomitantemente reduzir os tempos e os custos de produção. Nesta linha se enquadra a chamada manufatura aditiva.

Em manufatura aditiva peças são construídas utilizando-se diversas tecnologias de adição de material com alto grau de automação. A sequência das etapas típicas de procedimento de manufatura são: geração do modelo 3D em CAD; arquivamento do modelo em CAD em um formato compatível para a máquina de manufatura aditiva, por exemplo STL, SLC, CLI, RPI, LEAF, LMI, HPGL; preparação da estrutura de suporte (plataforma, substrato ou base de construção plana); fatiamento do arquivo em camadas; a peça é matematicamente seccionada por *software* em camadas paralelas e/ou horizontais; geração das coordenadas que utilizadas para fabricação da peça; determinação da trajetória do material a ser depositado ou foco do fonte de calor que, desloca-se pelo eixos X e Y; construção do protótipo camada por camada; operações de acabamento (retirada do suporte e usinagem) (Lira, 2008).

Os processos de manufatura aditiva surgiram como possíveis soluções para atender requisitos de qualidade, de tempo de produção e de economia de recursos (matéria prima). Deve ser dito, entretanto, que a fabricação através de manufatura aditiva pode não livrar o produto final de etapas de usinagem posteriores, mas sua diminuição significativa é sempre presente (usinagem apenas para desbaste fino e acabamento estético e dimensional). Esta tecnologia tem encontrado aplicação em várias áreas, como médica (próteses dentárias, implantes, coroas e próteses de partes de ossos), na área aeroespacial, automobilística, química, óleo e petróleo, etc. (motores, rotores e pás, bombas, etc.). A maior contribuição da manufatura aditiva, com destaque para o setor aeroespacial, é a maior liberdade em criação de projetos das peças, permitindo desenvolver as peças inovadoras, que dificilmente poderiam ser produzidas pela fabricação tradicional. O potencial da manufatura aditiva se deve ainda aos fatores como redução ou eliminação das matrizes e suportes; facilidade em modificar o produto a partir de modificações de projeto simplesmente mudando parâmetros e trajetórias em softwares; facilidade em testar novos materiais (protótipos) de maneira mais rápida e econômica, sem necessidade de investir em ferramentas específicos.

De acordo com Ding *et al.* (2014) os processos tipicamente concebidos na área de soldagem a arco tais como MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), TIG (*Tungsten Inert Gas*), ou PAW (*Plasma Arc Welding*) estão amplamente empregados para a manufatura aditiva. Sequeira Almeida e Williams (2010) apresentaram a WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*) para indústria aeroespacial como única solução de baixo custo para produção de componentes estruturais de grande escala. Nesse sentido, o modo operacional CMT (*Cold Metal Transfer*) tem um grande potencial para ser aplicado à manufatura aditiva devido à sua alta taxa de deposição e alto controle de transferência metálica. Com a utilização do modo operacional CMT para manufatura aditiva é possível vencer com maior facilidade alguns desafios de deposição, por exemplo quando a acessibilidade é limitada ou a geometria da peça exige a deposição fora da posição plana. Conforme Kazanas *et al.* (2012), o modo CMT é capacitado para atender a deposição de paredes inclinadas de 0° a 180°, sem necessidade de material de suporte, e deposição de paredes horizontais com a liberdade de inclinação da tocha em 0° a 50°, sem perda de qualidade. Porém, para evitar ângulos agudos e possibilitar a realização de raios durante a usinagem pode ser utilizada a estratégia de construção por “pirâmide”.

Williams *et al.* (2016) apontam a importância da seleção de parâmetros de regulagem para dominar a lei da gravidade durante a deposição na posição horizontal. A princípio, a manutenção de um volume depositado por unidade de comprimento (relação entre a velocidade de alimentação e velocidade de soldagem/deposição) não garante a formação estável do cordão/camada. A velocidade certa para esse volume é quem determina a formação do cordão/camada que se estabiliza através da força de tensão superficial. Martina *et al.* (2012) ressaltou que o modo CMT tem característica de formação de cordões/camadas bastante altos, maiores do que nos processos PAW e TIG, levando assim a menor quantidade de camadas por parede. Porém, a eficiência de deposição de material do CMT é um pouco inferior (80 %) comparando a outros processos (85 - 98%). Também o modo CMT se caracteriza pelo alto fator da eficiência térmica ($\eta = 0,9$), considerado como superior ao processo MIG/MAG DCEP ($\eta = 0,8$) e TIG ($\eta = 0,6$) e uma alta taxa de deposição, acima dos 3 kg/h (Sequeira Almeida e Williams, 2010). Dos limites de modo CMT podem ser citados: o envelope operacional restrito por *software* da fonte (limite de velocidade de alimentação), o crescimento linear da corrente e da velocidade de alimentação (impossibilidade de programar independente), e a capacidade reduzida de fusão de metal de base.

O modo operacional CMT tem sido aplicado para manufatura aditiva por deposição a arco de vários materiais, como ligas de aço ao carbono, de aço inoxidável e de alumínio. Para manufatura aditiva de ligas de titânio, tradicionalmente são utilizados mais os processos com alimentação externa de arames, como TIG, PAW, LBW, EBW (*University of Wollongong, University of Sheffield, etc.*). O processo MIG/MAG tem certas dificuldades em aplicação para ligas de titânio, como transferência metálica irregular, instabilidade de

arco e alta taxa de geração de respingos. Para superar essas particularidades é necessário passar por uma complexa tarefa de seleção de parâmetros. Porém, Sequeira Almeida e Williams (2010) declararam que com uso do modo operacional CMT esses obstáculos foram superados. Além disso, o modo proporciona uma microestrutura mais vantajosa em relação de outros processos. A aplicação de modo CMT para manufatura aditiva de liga de titânio foi ainda encontrada no trabalho de Kapustka (2012), porém por si tratar de uma apresentação de slides, não foram vistos os detalhes operacionais referentes.

A liga de titânio é um material de qualidades bastante diferenciadas. Algumas propriedades físicas e elétricas de titânio, em comparação com outros materiais, estão demonstradas na Tabela 1 (ASM Handbook).

Material	Liga de titânio	Liga de aço inoxidável	Aço ao carbono	Liga de alumínio
Densidade, g/cm ³	4,4	7,9	7,8	2,7
Temperatura de solido-líquido, °C	1604-1660	1400-1455	1425-1538	646-657
Calor específico, J/g °C, 20 °C	0,53	0,5	0,49	0,9
Condutividade térmica, W/m K, 20 °C	6,7	16,2	51,9	231,0
Coefficiente de expansão térmica, µm/m K, at 500 °C	9,7	18,7	11,7	25,5
Resistividade elétrica, ohm cm x10 ⁻⁶	55,6	-	9,71	2,66
Permeabilidade magnética, H/m	1,00005	1,008	1,82	-

TABELA 1. Propriedades físicas e elétricas de titânio e metais mais populares.

Visto a baixa condutividade térmica do titânio, a taxa de resfriamento também é baixa, demandando um tempo de espera entre as camadas, aplicação de uma estratégia de deposição ou/e uso de algum meio de aceleração de resfriamento. Martina *et al.* (2012) citaram que em manufatura aditiva metodologicamente correto esperar até que o material depositado chegue a 100 °C antes de começar a nova camada. Também, deve ser lembrado que a temperatura do substrato afeta a tensão superficial da gota em transferência, o que afeta a geometria do cordão/camada. Conforme Wang *et al.* (2011), a formação do cordão/camada de liga de titânio apresenta uma certa sensibilidade aos parâmetros de regulação. A formação pode deteriorar caso a pressão do arco for elevada, o que se traduz em defeitos superficiais em forma de “holes and humps”. Conforme Martina *et al.* (2012) esses defeitos também são sensíveis ao uso de velocidades de soldagem elevadas.

Outra particularidade da liga de titânio é a alta reatividade do material em temperaturas elevadas e em estado líquido quando estão em contato com os gases atmosféricos, como oxigênio, nitrogênio, hidrogênio. A contaminação por esses gases afeta a plasticidade e resistência mecânica e pode levar até a falha em juntas soldadas. A temperatura referente a absorção ativa de oxigênio varia de fonte para fonte na literatura, a 600 °C a 350 °C,

enquanto que a contaminação por nitrogênio começa em temperaturas superiores a 550 °C e por hidrogênio a 250 °C ou 300 °C. De uma forma interessante, a absorção ativa de hidrogênio acontece até 625 °C, e depois de 700 °C começa a dessorção do hidrogênio. Dessa forma, exige-se uma proteção gasosa do titânio líquido ou aquecido, depois da passagem de arco elétrico, por meio de *trailing gas*, câmara de vácuo ou fluxos especiais desoxigenados (Akulov, 1971). A proteção via um *trailing gas* é mais universal e de fácil adaptação às condições de soldagem/deposição. Existem versões comerciais do *trailing gas*, porém na maioria das vezes são produzidos especialmente para atender as condições particulares de cada caso.

Algumas observações relevantes em relação à construção de *trailing gas* estão rescritos nos trabalhos de Jacket *et al.* (2015) e Ding *et al.* (2015). Autores recomendam utilizar uma esponja metálica ou algum material poroso para promover fluxo laminar de gás de proteção e posicionar o *trailing gas* mais perto à superfície de proteção. Hoje em dia, o desenvolvimento de tecnologia de proteção por *trailing gas* apresenta soluções com capacidades múltiplas, que agrupam várias funções (proteção gasosa, direcionador de arame frio, pirômetro, etc.) em só um aparelho. A vazão de gás utilizada na proteção por *trailing gas* depende da energia de soldagem, dimensão do substrato, configuração do *trailing gas*, condições ambientais, etc. Foram encontrados vários valores de vazão na literatura, variando de 280 l/min (Stark *et al.*, 1962) a 17 l/min (Hoye *et al.*, 2013), indicando que é um parâmetro que talvez deva ser procurado por metodologia de tentativas e erros.

Assim, observa-se que o modo CMT já é bastante conhecido na área de soldagem e na manufatura aditiva de materiais mais comuns, contudo ainda há pouca informação sobre a aplicação para liga de titânio. O objetivo principal deste trabalho é realizar a avaliação exploratória de modo operacional CMT para fabricação de pré-formas de liga de titânio.

2 | METODOLOGIA

A bancada utilizada para esse trabalho consistiu novamente de um robô MOTOMAN HP 20-A0 com controlador NX100, uma fonte de soldagem TransSynergic 5000, Fronius com controle remoto RCU 5000i, um sistema de aquisição de dados, uma mesa de apoio, um suporte para corpo de prova, um dispositivo *trailing gas* e um pirômetro infravermelho.

Como material de base, utilizou-se chapas de liga de titânio Ti-6Al-4V com dimensões de 250 x 30 x 4 mm. O arame-eletrodo pertence à classe do material de base, sendo Ti-6Al-4V (especificação SAE AMS 4954J), com diâmetro de 1,2 mm. Como gás de proteção, foi utilizado Ar + 25 % He, com vazão de 13 l/min. Já no dispositivo *trailing gas* foi utilizado Ar 4.8 com vazão de 20 l/min colocado integralmente na parte traseira de *trailing gas*, sendo a parte frontal não foi utilizada. Dispositivo foi posicionado a 20 mm de distância do substrato (Figura 1).

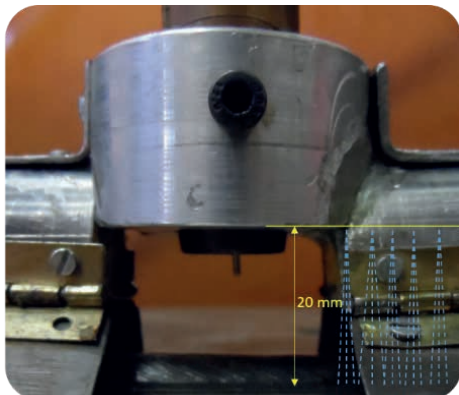


FIGURA 1. Posicionamento do *trailing gas* em relação ao substrato.

Durante a produção da parede foi utilizada a programação voltada ao alargamento da primeira camada, utilizando velocidade de soldagem reduzida e tecimento transversal. Também, foi utilizada a troca de sentidos de deposição de cada camada, sendo a primeira no sentido de vai e a próxima no sentido de vem, assim adiante (bi-direcional). Razão para isso foi a procura de controlar a igualdade de altura de parede ao longo de comprimento, evitando assim a formação de perfil de parede depositada com único sentido, sendo de altura maior no início e menor no final. Cada camada foi iniciada quando a depositada anteriormente havia chegado à temperatura ambiente (32 – 34 °C). A temperatura foi monitorada com um pirômetro ao infravermelho. Enquanto, a velocidade de alimentação real foi verificada a base de massa depositada por tempo de deposição (assumindo o rendimento de deposição como 100%) para os dois tipos de regulagem. Os parâmetros de regulagem utilizados estão apresentados na Tabela 2.

Camada	V_a (m/min)	cca	cd	V_s (cm/min)	DBCP (mm)	Tecimento transversal	
						F (Hz)	Ampl (mm)
1	8,3	0	0	30	13	3	4
De 2 a 12	8,0	0	0	32	13	-	-

Obs.: V_a – velocidade de alimentação; cca – correção de comprimento de arco; cd – correção dinâmica; V_s – velocidade de soldagem; DBCP – distância bico de contato à peça; F – frequência de tecimento transversal; Ampl. – amplitude de tecimento

TABELA 2. – Parâmetros de regulagem.

3 | RESULTADOS E DISCUÇÕES

Os parâmetros monitorados estão na Tabela 3. A velocidade de alimentação verificada foi de 8,0 m/min para regulagem da primeira camada, e de 7,7 m/min para regulagem das camadas posteriores. Os oscilogramas de corrente e tensão de uma das

camadas, no caso da camada 2, estão apresentados na Figura 2.

Camada	I_m (A)	I_{rms} (A)	U_m (V)	U_{rms} (V)	Camada	I_m (A)	I_{rms} (A)	U_m (V)
1	122,9	138,8	14,2	17,2	7	124,7	139,4	14,6
2	122,4	137,4	14,5	17,4	8	120,2	135,8	14,2
3	116,9	133,1	13,9	16,9	9	121,9	137,2	14,5
4	114,1	130,8	14,1	17,1	10	119,1	134,9	14,1
5	112,8	129,7	13,8	16,8	11	116,6	132,8	14,0
6	113,3	130,1	14,1	17,1	12	118,9	134,8	13,9

Obs.: I_m – corrente média; I_{rms} – corrente eficaz; U_m – tensão média; U_{rms} – tensão eficaz

TABELA 3. Parâmetros monitorados.

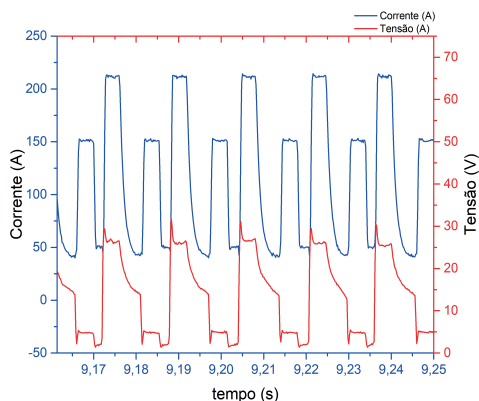


FIGURA 2. Oscilogramas de corrente e tensão da camada 2.

O processo se mostrou bastante estável sem a geração de respingos. Porém, durante toda deposição foi observada a instabilidade de arco do arco, representada pelos desvios aleatórios em direção de sentido de deposição. Os aspectos superficiais da parede depositada com uso de modo CMT, de ambos os lados, e o aspecto da seção transversal estão apresentados na Figura 3, enquanto os detalhes de macroestrutura estão na Figura 4.



FIGURA 3. Aspecto superficial dos ambos lados da parede e macroestrutura da seção transversal da parede depositada com modo CMT.



FIGURA 4. Macroestrutura de seção transversal com maior aproximação.

A parede demonstrou aspecto visual satisfatório com boa perpendicularidade ao substrato, pouca irregularidade geométrica e boa molhabilidade, sem nenhum indício de imperfeições. Os parâmetros geométricos e o fator *buy-to-apply* (relação entre área total de seção transversal e área efetiva de seção transversal, onde a área efetiva é definida pela metodologia descrita no trabalho de Kovalenko (2019) estão na Tabela 4.

Altura efetiva de parede (mm)	Altura média de camada	área total (mm ²)	área efetiva (mm ²)	Fator <i>buy-to-apply</i>	Largura média efetiva (mm)
34,2	4,3	214,2	186,9	1,15	5,5

TABELA 4. Parâmetros de avaliação da parede de Ti-6Al-4V.

Ainda, pode ser percebido que os grãos possuíram tamanhos médios e não estão se expandindo ao longo de várias camadas, que deve ser o resultado de técnica de troca de sentidos de deposição. O resultado coincide com resultado obtido por Saqueira Almeida e Williams (2010). Assim, ficou evidenciado que o modo operacional CMT tem um bom potencial para fabricação de pré-formas por manufatura aditiva.

4 | CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho pode ser feitos as conclusões que processo MIG utilizado com modo operacional CMT para deposição de pré formas de liga de titânio apresentou aspecto visual satisfatório com boa perpendicularidade ao substrato, pouca irregularidade geométrica, boa molhabilidade, sem nenhum indício de imperfeições, com elevado índice de fatos *buy-to-apply*, assim considera-se modo operacional adequado.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

A autora é a única responsável por este trabalho

AGRADECIMENTOS

Autora agradece à CAPES pelo suporte com bolsa de doutorado, ao Laboratório para Desenvolvimento de Processos de Soldagem – LAPROSOLDA/UFU e a Pós-Graduação da FEMEC pela infraestrutura, equipamentos e consumíveis utilizados

REFERÊNCIAS

Akulov, A. I. Manual de soldagem. Ed. Engenharia mecânica. Moscou, p. 208, 1971

Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Critical Review*. 2014

Ding, J.; Colegrove, P.; Martina, F.; Williams, S. Wiktorowicz, R; Palt, M.R. Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 226, p. 99–105, 2015. Doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.005

Hoye, N. P.; Appel, E. C.; Cuiuri, D.; Li, H. Characterisation of metal deposition during additive manufacturing of Ti-6Al-4V by arc-wire methods. *Conference paper*. p. 1015-1023, Jan., 2013

Jacket, S.; Hertel, M.; Rose, S.; Fussel, U. Evaluation and comparison of gas trailing shield concepts using diagnostic and numerical methods. IIW. Doc.XII-2244-15. 2015

Kapustka, N. Arc welding capabilities at EWI. 29 nov., 2012

Kazanas, P.; Deherkar, P.; Almeida, P.; Helen, L.; Willaims, S. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. Journal of Engineering Manufacture published. v. 1, n. 10, 2012 <http://piib.sagepub.com/content/early/2012/02/17/0954405412437126>

KOVALENKO, O. 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. 2019. 244 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.629>

Lira V. M. Desenvolvimento de Processo de Prototipagem Rápida via Modelagem por deposição de formas livres sob temperatura ambiente de materiais alternativos. Tese de doutorado. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 199 f, 2008

Martina, F.; Mehnen, J.; Williams, S. W.; Colegrove, P.; Wang, F. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. Journal of Materials Processing Technology. v. 212, n. 6, p. 1377-1386, 2012

Sequeira Almeida, P. M.; Williams, S. Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT). Proceedings of the 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA, p. 25-36, August 9-11, 2010

Stark, L. E.; Bartlo, L. J.; Porter, H. G. Welding of one-inch thick Ti-6Al-4V plate. Welding Journal. v. 41(9), p. 805-814, 1962

Wang, F.; Williams, S.; Rush, M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy. Int J Adv Manuf Technol. v. 57, p. 597-603, 2011. DOI 10.1007/s00170-011-3299-1.

Williams, S. W.; Martina, F.; Addison, A. C.; Ding, J.; Pardal, G; Colegrove, P. Wire + Arc Additive Manufacturing. Materials Science and Technology. 2016