

DEPOSIÇÃO DE AÇO INOXIDÁVEL, INCONEL E ALUMÍNIO PARA MANUFATURA ADITIVA ATRAVÉS DO PROCESSO CMT: UMA BREVE REVISÃO DE MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS

Catarina Claudino Fernandes de Oliveira

André Luis Silva da Costa

Alysson Martins Almeida Silva

Maksym Ziberov

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília-DF.

catarinaclaudino@hotmail.com

andr.luis27@hotmail.com

alyssonmartins@unb.br

mziberov@unb.br

Resumo: Como uma alternativa aos métodos convencionais de fabricação de componentes metálicos, a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) se destaca devido a capacidade de reproduzir peças com geometrias complexas e maior aproveitamento da matéria-prima, em comparação com métodos convencionais de fabricação, além de possuir aspecto competitivo quanto às taxas de deposição em comparação aos demais processos de deposição da própria manufatura aditiva. Em razão do alto aporte térmico associado a esta fonte de calor, a variante do processo de deposição Gas Metal Arc Welding denominada Cold Metal Transfer (CMT) se destaca por se mostrar uma excelente alternativa, uma vez que, mantém os benefícios associados a MADA, e ainda controla a estabilidade do arco e ameniza os efeitos dos ciclos térmicos na microestrutura de distintos materiais metálicos, cuja demanda na indústria exige que as propriedades mecânicas não sejam prejudicadas, garantindo a eficiência da matéria prima tal qual os métodos de fabricação já disseminados no mercado. Dessa forma, este artigo tem como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre a análise da microestrutura de diferentes materiais depositados via processo CMT e, consequentemente, como suas propriedades mecânicas são afetadas. Por meio da análise literária, foi possível notar, além de certa porosidade na microestrutura, o caráter colunar nos grãos presentes nas zonas de cristalização em comparação aos grãos equiaxiais nas camadas de topo e, além disso, como esta configuração afeta a dureza, resistência mecânica e a susceptibilidade à fratura. Estratégias para amenizar estes efeitos também foram identificadas, entre elas o processo CMT se mostrou uma satisfatória alternativa para manufatura aditiva de componentes metálicos industriais. Sendo assim, a microestrutura dos diferentes materiais como aço inoxidável, Inconel e alumínio demonstrou maior predominância de grãos mais alongados nas camadas internas das paredes depositadas conforme direção dos sucessivos ciclos térmicos, evidenciando, assim, a anisotropia destas ligas. Ademais, pode haver, mesmo com o aporte térmico reduzido, micro poros, micro trincas e precipitados intermetálicos devido ao processo de resolidificação, o que pode reduzir as propriedades mecânicas como, por exemplo, dureza e resistência mecânica e caracterizar como dúctil as amostras estudadas. Logo, para atenuar estas irregularidades, é possível aumentar o tempo de intervalo de interpassa, realizar tratamentos térmico ou utilizar variações do processo CMT que possua maior controle de corrente no momento da deposição.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; MADA; CMT; Propriedades Mecânicas; Microestrutura.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA) consiste na capacidade de se criar componentes físicos, a partir de modelos computacionais, baseados na adição, camada por camada, de materiais como metais, polímeros e cerâmicas. A versatilidade e a liberdade para complexidades quanto ao design são impactos significativos para a indústria de manufatura e processos de fabricação, assim como a oportunidade em reduzir custos a partir maior aproveitamento de materiais e tempo de espera em relação a métodos convencionais (Williams *et al.*, 2016). Singh *et al.* (2017), aborda em sua revisão sobre materiais para manufatura aditiva, que uma das maiores dificuldades deste processo, no que diz respeito a materiais metálicos, é a obtenção de um componente final com propriedades mecânicas e metalúrgicas eficazes, livre de defeitos e que satisfaça os rigorosos requisitos das engenharias e suas aplicações.

Buscando atender as demandas comerciais das indústrias, a técnica de deposição por manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), caracterizada pelo uso do arco elétrico como fonte de calor e do arame consumível como material de adição, é reconhecida devido à abrangência de ligas metálicas comportadas, à alta taxa de deposição em comparação a outros métodos de MA e, em consequência, por permitir a fabricação de componentes com grandes dimensões (Rodrigues

et al., 2019). A norma ISO/ASTM 52900 (ISO, 2015) engloba a manufatura aditiva por deposição a arco como um dos métodos que partem da categoria *direct energy deposition*, cuja fusão do material parte de processos advindos da soldagem como: arco elétrico por gás ativo e/ou inerte, por plasma ou por tungstênio. Contudo, diversos parâmetros como corrente, tensão, gás de proteção, taxas de deposição, entre outros, precisam ser controlados para que se obtenha uma peça final com qualidade. Diante disso, buscando aperfeiçoar a transferência metálica através da redução do aporte térmico, a empresa Fronius, especializada em soluções de soldagem, em 2004 desenvolveu uma variante do processo *gas metal arc welding* (GMAW) denominada *Cold Metal Transfer* (CMT) que, segundo Fronius (2017), permite maior estabilidade do arco elétrico e mais rápida taxa de resfriamento contribuindo para melhoras na porosidade, penetração e respingos do material (Cong, 2014), por meio da retração do consumível, menor período de curto circuito, e do efeito eletromagnético para separação entre o material fundido na extremidade do arame e do próprio consumível (Selvi *et al.*, 2018).

No entanto, Lehmann *et al.* (2020) nota correlação entre o acúmulo de calor, provocado por sucessivos ciclos térmicos aos quais os materiais são submetidos na MADA, e a geometria final de um componente como também é observado no colapso dos corpos de prova estudados por Liu *et al.* (2020), que possuíam camadas estreitas próximas ao substrato e camadas largas no topo após deposição via processo CMT. O que está de acordo com o que Rodrigues *et al.* (2019) encontra em seus estudos quanto às condições de solidificação decorrentes dos processos de manufatura aditiva baseados na fusão de material que geralmente levam a configurações microestruturais que nem sempre são vistas em processos de fabricação convencionais, visto que o acúmulo de calor entre a sobreposição de camadas gera a cristalização da camada anterior sugerindo um refinamento de grãos nestas áreas o que tende a reduzir os valores encontrados para a propriedade dureza, por exemplo e indicar comportamento dútil do material.

À vista disto, o estudo microestrutural se torna indispensável uma vez que processos que buscam a melhora da qualidade da deposição levam à alterações microestruturais e, em consequência, às propriedades mecânicas que, no entanto, tendem a apresentar melhoras significativas quando associadas a estratégias de controle de calor conforme proposto por Lehmann *et al.* (2020), através do monitoramento de temperatura in-situ com resfriamento entre camadas enquanto Montevecchi *et al.* (2018) indica o uso de jateamento a ar (*air jet impingement*) para aumentar a transferência de calor por convecção para mitigar os efeitos do acúmulo térmico, assim como Chen *et al.* (2021) por meio da variação da temperatura durante a deposição.

Dessa forma, esta revisão possui como objetivo apresentar informações sobre a microestrutural de diferentes materiais, obtidas por deposição a arco via processo CMT, com ampla aplicação em diversos setores industriais e identificar suas características e suas limitações com foco nas respectivas propriedades mecânicas. Adicionalmente, serão apresentadas estratégias para amenizar as desvantagens detectadas como: a presença de porosidade, precipitados, redução da dureza e da resistência mecânica e o aumento da susceptibilidade à fratura mecânicas.

2. INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.1. Aço Inoxidável

Mesmo que a adição de material via processo CMT seja caracterizada pelo baixo aporte térmico em comparação com métodos de deposição a arco convencionais, o efeito do acúmulo de calor entre as camadas depositadas em suas respectivas microestruturas é um importante foco de estudo da manufatura aditiva. Dessa forma, Park e Lee (2021) estudam, através do desenvolvimento de um mapa de solidificação, a partir do gradiente de temperatura (G) e da taxa de crescimento da microestrutura (R), os efeitos que o acúmulo de calor, inerente às sucessivas deposições de material da manufatura aditiva, causam nas propriedades mecânicas do aço inoxidável 316L. O aço inoxidável 316L é reconhecido devido ao seu uso em contextos corrosíveis e com altas temperaturas, o que justifica a sua utilização em indústrias como de óleo e gás, de processamentos químicos e de centrais nucleares, devido às suas significativas resistências mecânicas, à conformabilidade, à resistência a corrosão e acessibilidade associada a um preço intermediário (Qin *et al.*, 2019; Senthil *et al.*, 2021).

Os autores realizam uma comparação entre os perfis de temperatura de um modelo computacional de 10 camadas, estimando os parâmetros de solidificação a partir das propriedades mecânicas do material e de uma análise tridimensional de transferência de calor transiente, e da deposição experimental realizada via processo GMAW-CMT com arame de 1,2 mm. É observado que cerca de 50% da segunda camada é fundida novamente no processo de deposição da terceira camada o que implica que tanto a fusão quanto a solidificação ocorrem, minimamente, duas vezes em cada camada, a depender da quantidade de sobreposições. No mapa de solidificação, Figura 1f, a curva G/R (quanto à morfologia) demonstra variação no formato dos grãos, desde dendrítico colunar, Figura 1b,c,d até dendrítico equiaxial, Figura 1e. Nota-se para a amostra analisada, a morfologia da microestrutural é semelhante entre a primeira e a nona camada, e a décima camada, influenciada pela maior taxa de resfriamento, é a que apresenta a exceção com a curva G/R significativamente inferior de 10°C.s/mm em contraste à 480°C.s/mm das demais camadas.

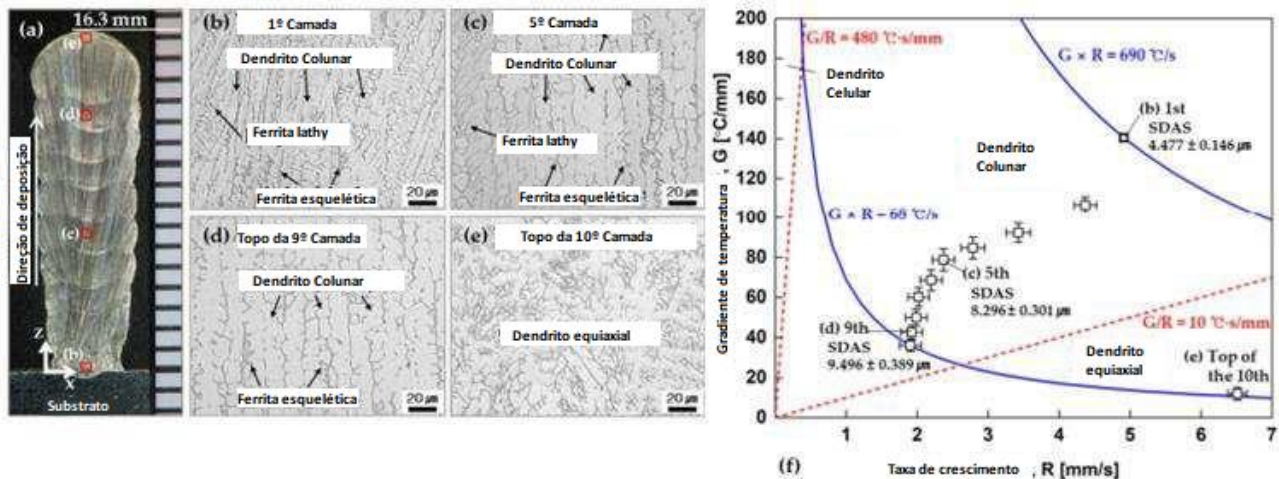


Figura 1. Solidificação do Aço Inoxidável 316L via processo CMT, a) Seção transversal, b) microestrutura 1ª camada, c) microestrutura 5ª camada, d) microestrutura 9ª camada, e) microestrutura 10ª camada, f) mapa de solidificação (adaptado de Park e Lee, 2021)

Adicionalmente, visualizam-se nas Figuras 1b-e a anisotropia da amostra devido ao crescimento epitaxial da microestrutura e, à medida que $G \times R$ diminui conforme o aumento de camadas, há o aumento do tamanho dos grãos, afetando o espaçamento dendrítico secundário que tende a aumentar, o que pode reduzir os valores de dureza (Teram *et al.*, 2019). Lee (2020) avalia a microestrutura do mesmo material para 0 e 60 segundos para tempo de interpasse (ITP), identificando um aumento de cerca 1,7 mm quanto à altura, conforme Figura 2a-b, o que sugere mudança na viscosidade do metal derretido e um menor acúmulo de calor.

Na Figura 2c-e o autor também identifica uma microestrutura equiaxial na décima camada por sua taxa de resfriamento ser mais rápida comparada com as camadas interiores. Enquanto na interseção das camadas, como ocorre em 2d-f, a nova fusão da camada inferior contribuiu para o desenvolvimento de uma morfologia dendrítica colunar, o que também é visto no estudo de Park e Lee (2021) e identificado em estudos de variações do processo CMT, como o CMT Plus Pulse para o aço inoxidável 316L nos estudos de deposição de Xie *et al.*, (2020).

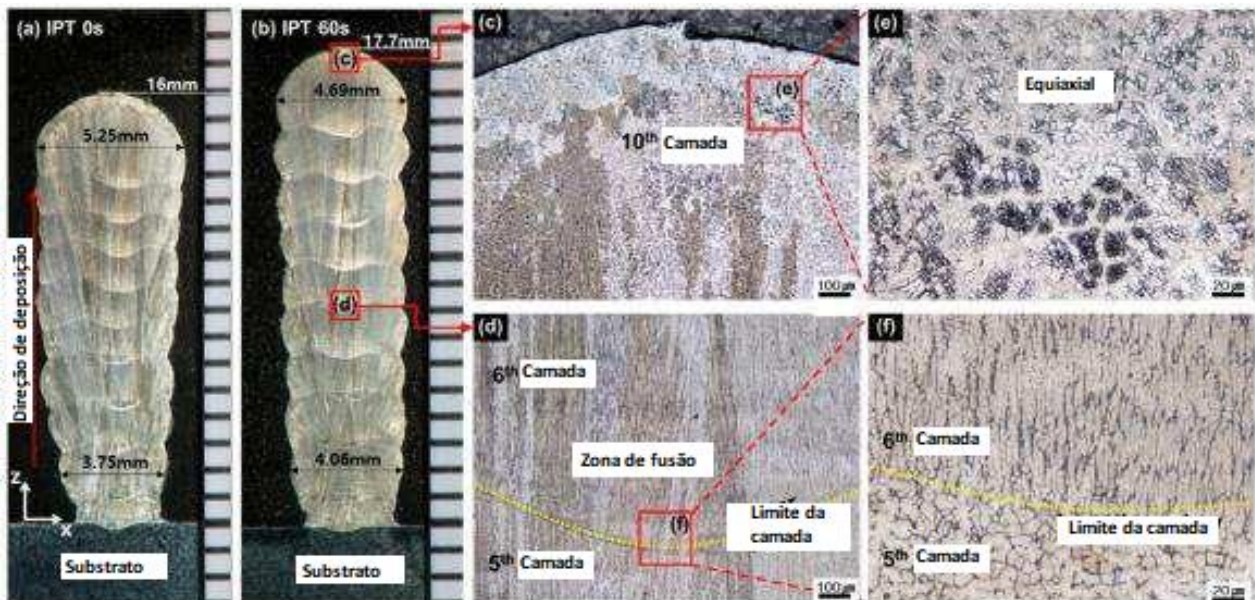


Figura 2. Seção transversal de a) Tempo de interpasse de 0s, b) Tempo de interpasse de 60s, c) 10ª camada para 60s ITP, d) Interface da 5ª e 6ª camada para 60s ITP, e) Morfologia da 10ª camada e f) Morfologia da interface entre 5ª e 6ª camada (adaptado de Lee, 2020)

2.2. Inconel

Buscando soluções para a ineficiência de ligas convencionais para condições em altas temperaturas e estresse térmico, Naotake Noda (1999) propõe que *Functionally Graded Materials* seja uma nova categoria de materiais que aborde a combinação de diferentes composições químicas visando microestruturas que contribuam intencionalmente para

propriedades mecânicas desejadas (Reddy, 2000). Dessa forma, Senthil *et al.* (2021) avaliam a microestrutura da deposição por manufatura aditiva via processo CMT da combinação de Inconel 825 e do aço inoxidável 316L, ambos os materiais são reconhecidos devido ao uso em indústrias de óleo e gás, de reprocessamento de combustível nuclear, de fornos de hidrogênio e de manuseio de resíduos radioativos. Em um mesmo substrato, foram depositadas 16 camadas de Inconel 825 seguidas de 16 camadas do aço 316L, conforme Figura 3a. Três amostras para análises foram retiradas na vertical com o objetivo de comparar a microestrutura da deposição do Inconel 825, do aço 316L e da área de interface entre os respectivos materiais, Figura 3b.



Figura 3. a) Vista frontal dos materiais recém depositados, b) localização das amostras retiradas (adaptado de Senthil *et al.*, 2021)

A partir da caracterização microestrutural de Senthil *et al.* (2021), é observado que a zona de interface (FGM) apresentou homogeneidade, quanto a fusão, sem defeitos como trincas ou delaminações, contudo, em razão do baixo aporte térmico do processo CMT associada a uma rápida taxa de resfriamento, é identificada uma área parcialmente mista devido a difusão incompleta dos elementos químicos como a variação de Ni e Fe, em ambos os materiais resultando numa microestrutura de transição partindo de grãos alongados, Figuras 4a e 4b, para grãos equiaxiais finos, Figura 4c e 4d.

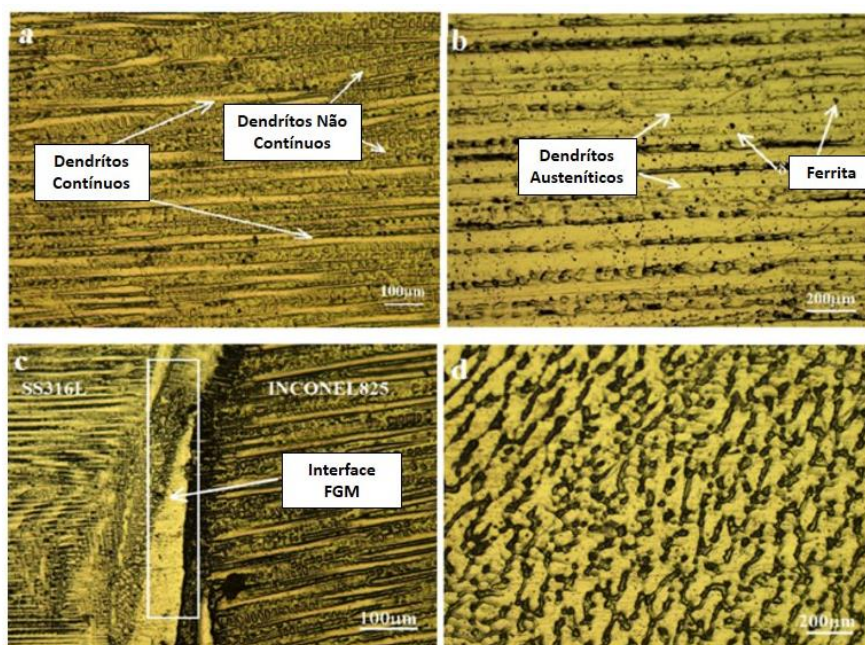


Figura 4. Micrografia das amostras a) Inconel 825, b) Aço inoxidável 316L, c) Interface entre os materiais e d) Interface com maior ampliação (adaptado de Senthil *et al.*, 2021)

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado ao longo da direção de construção das camadas, e observou-se um decaimento de 2,2% de dureza na zona de interface, Figura 5, consequente da solidificação ferrítica-austenítica devido a velocidade da taxa de resfriamento que, mesmo com o auxílio do gás de proteção de argônio, ainda houve efeito notável do acúmulo de calor.

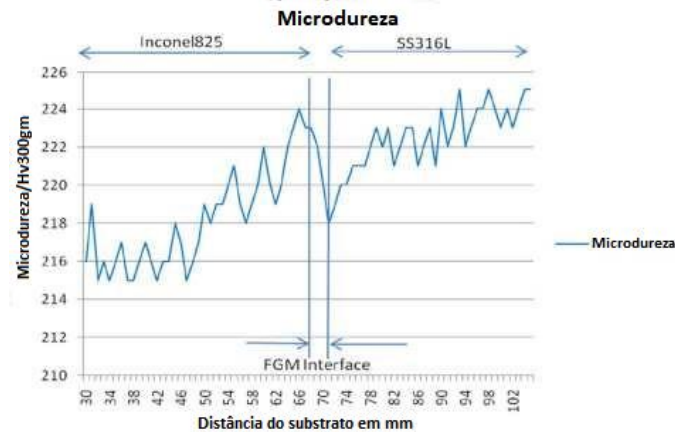


Figura 5. Distribuição de microdureza ao longo da combinação de Inconel 825 e Aço Inoxidável 316L (Adaptado de Senthil *et al.*, 2021)

Já os testes de tração realizados por Senthil *et al.* (2021) apresentaram que a resistência mecânica da amostra de interface foi ligeiramente menor, 4,2 %, em comparação às amostras dos materiais isolados, assim como a sua ruptura também ocorreu antes que as amostras de Inconel 825 e do aço 316L.

Com o objetivo de analisar o efeito da microestrutura nas propriedades mecânicas do Inconel 718, Kindermann *et al.* (2022) optaram por avaliar três amostras de seção transversal do material: 1) recém depositado via manufatura aditiva via processo CMT, 2) com tratamento térmico AMS 5663 (utilizado na indústria aeroespacial) e 3) com tratamento térmico API 6ACRA (empregado nas indústrias de petróleo e gás) para comparar as respectivas propriedades mecânicas com as do mesmo material fabricado por forjamento. Os tratamentos térmicos, segundo as normas, consistem em submeter as amostras a altas temperaturas seguidas de tratamento para envelhecimento em temperaturas mais baixas a fim de precipitar fases γ'/γ'' .

Na análise microestrutural do material sem tratamento térmico, Figura 4, é observado grãos colunares que tendem a ser típicos em microestruturas de adição de material via processo CMT para inconel 718 (Van *et al.*, 2020). De forma similar, esta mesma configuração, segundo Li *et al.* (2019) e Kurzynowski *et al.* (2018), também é uma característica em ligas de aço inoxidável e titânio que foram depositadas por manufatura aditiva. Também é observado partículas de NbC e fases de TiN, por meio dos pontos escurecidos presentes nas Figuras 6c-e, devido a precipitação na zona de fusão das regiões interdendríticas, Figura 6a-b, e assim como no estudo de Senthil *et al.* (2021), esta microsegregação no processo de solidificação é a responsável pela presença da fase intermetálica Laves que influenciam diretamente nas propriedades mecânicas do material (Chen *et al.*, 2016).

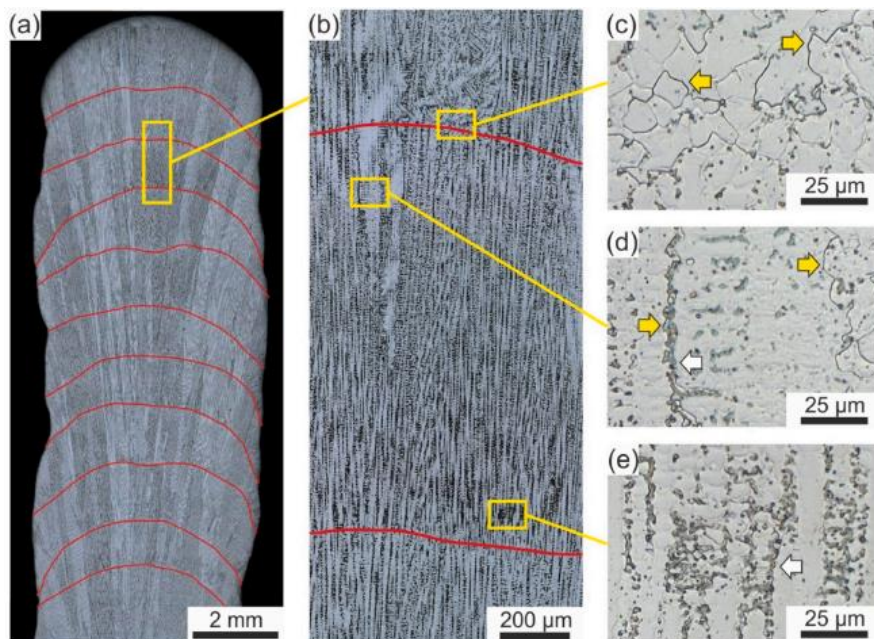


Figura 6. Microestrutura da amostra recém depositada de Inconel 718. a) Localização das fronteiras entre as camadas, b) localização dos grãos e c-e) demarcação dos grãos e presença de precipitados nas regiões interdendríticas (Kindermann *et al.*, 2022)

Ao comparar a microestrutura com a da amostra com tratamento do tipo AMS, para Kindermann *et al.* (2022), é notável o aumento na precipitação de fases aciculares ao redor da área interdendrítica. Enquanto ao comparar a amostra AMS com a amostra com tratamento do tipo API é observado redução de precipitados interdendríticos e uma parcial dissolução da estrutura dendrítica. Nas três amostras foram identificados defeitos como, em maior quantidade, microporos interdendríticos, poucas trincas devido ao processo de solidificação e poros gasosos nas zonas limites entre as camadas.

Quanto a microdureza, Figura 7, para a amostra 1, há picos de dureza nos limites entre as camadas com sua diminuição ao longo da altura de cada camada em contraste ao aumento significativo da propriedade para a amostra 2 devido a precipitação das fases γ'/γ'' mesmo que ainda tenha alguns picos de alta dureza nos limites entre as camadas. Já para a amostra 3, os valores de dureza foram ligeiramente abaixo do valor médio da amostra 2 devido ao crescimento de dendritos equiaxiais durante o tratamento térmico API nestas fronteiras entre camadas.

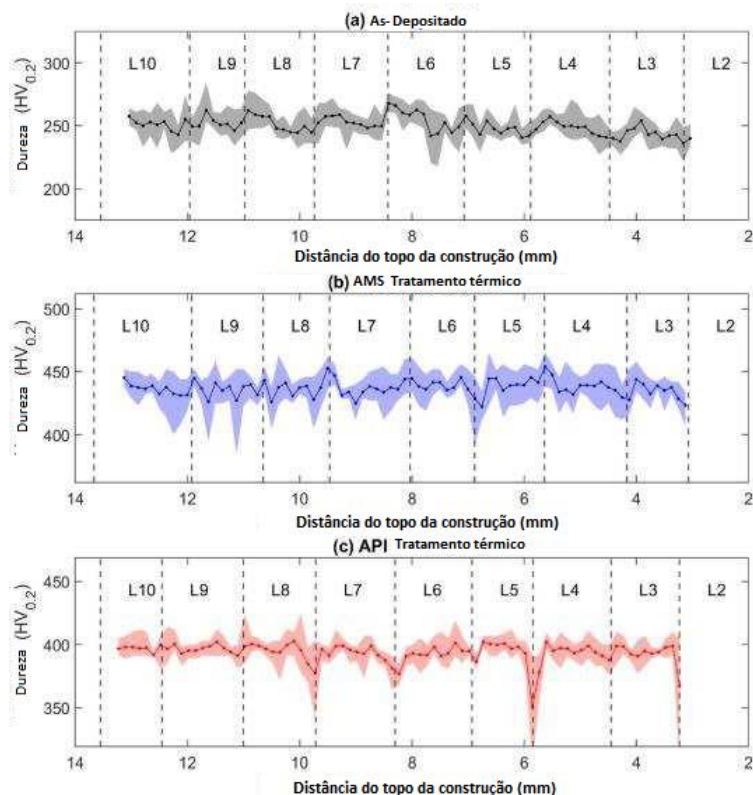


Figura 7. Distribuição de microdureza Vickers entre as camadas 3 e 10 para a) amostra sem tratamento térmico, b) amostra com tratamento AMS e c) amostra com tratamento API. (Kindermann *et al.*, 2022)

Dessa forma, Kindermann *et al.* (2022) concluem que o processo CMT com tratamento térmico API é o que possui maior semelhança das propriedades mecânicas como microdureza, ductilidade e resistência ao escoamento, em comparação com o material forjado, em consequência da maior dissolução da fase Laves.

2.3 Alumínio

Como as ligas de inconel e de aço Inoxidável, as ligas de alumínio são aplicáveis em diversos setores industriais como aeroespacial, automobilístico e naval, devido ao peso leve em comparação a outros metais, à resistência a corrosão e alta resistência mecânica (Engler e Miller-Jupp, 2016). Diante disso, Fang *et al.* (2018) analisaram o efeito do processo CMT, CMT+Advanced e CMT+Pulse na deposição da liga de alumínio 5183 com o objetivo de correlacionar microestrutura, porosidade e propriedades mecânicas do material. Ensaios metalográficos foram realizados de forma que, na Figura 8a e 8b, observa-se a presença de refinamento dos grãos na zona dendrítica colunar das amostras de CMT convencional e Advanced localizada nas camadas internas.

No entanto, a amostra Pulse possui grãos grosseiros na área dendrítica colunar, seguindo a direção de deposição, como é possível visualizar na Figura 8c, consequente da alta entrada de energia na técnica pulsada, o que eleva o gradiente de temperatura, associado à uma baixa taxa de solidificação (Benoit, 2014). Também é possível comparar o tamanho e quantidades de poros presentes na microestrutura em comparação aos demais métodos uma vez que o maior tamanho de poros e quantidade por área foram encontrados significativamente nas amostras depositadas por CMT+Pulse em comparação com os outros dois métodos, CMT convencional e Advanced, respectivamente.

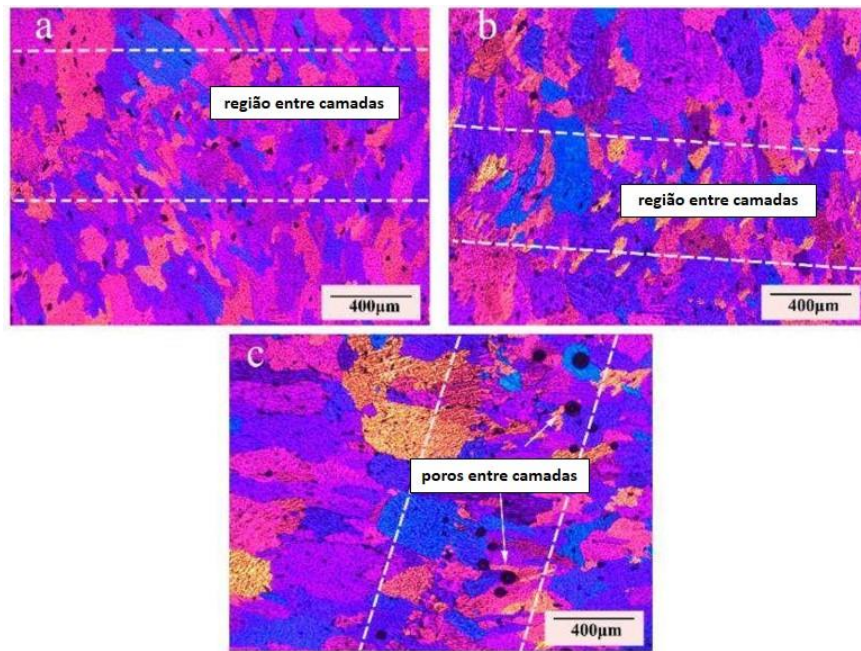


Figura 8. Metalografia das amostras a) CMT+A, b) CMT e c) CMT+P (Adaptado de Fang *et al.*, 2018)

Fang *et al.* (2018) evidencia a sensibilidade das propriedades mecânicas quanto a presença de poros em uma liga de alumínio e dessa forma associa os valores médios encontrados para resistência à tração de cada amostra, Figura 9, à quantidade e dimensão de poros e ao refinamento dos grãos conforme Figura 8a,b,c. Os autores também analisaram que as amostras possuem comportamento dúctil, contudo a deposição via CMT convencional e pulsada apresentaram, além de poros, microtrincas na superfície fraturada, indicando que, combinadas, podem levar a falha do material (Dutra *et al.*, 2015). Vászari *et al.* (2021) também utilizam o processo GMAW-CMT para a deposição de até 300 camadas da liga S-Al Mg 4.5 Mn com arame de 1,2 mm de diâmetro, inclusões e trincas também foram identificadas na superfície após ensaio de tração, no entanto, a superfície metalográfica aparente com configuração homogênea e não é identificada zonas de transição bem delimitadas ao longo das camadas, exceto pela interseção com o metal base.

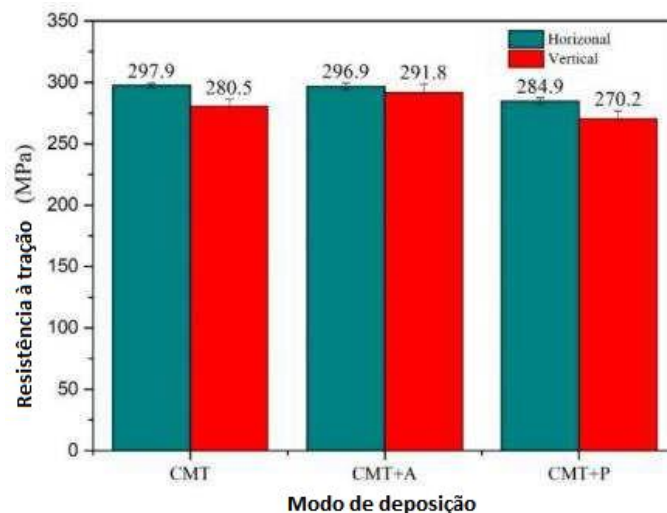


Figura 9. Resistência a tração para as amostras na horizontal e vertical (Adaptado de Fang *et al.*, 2018)

Quanto as propriedades mecânicas, os autores (Vászari *et al.*, 2021) afirmam que a tecnologia CMT é superior a outros métodos de deposição devido a combinação de quantidade de material depositado e rapidez de deposição com a manutenção das propriedades mecânicas do material base atribuído ao maior aporte térmico nas primeiras camadas e alterar os parâmetros de deposição para as demais camadas com valores inferiores para assegurar maior controle do arco elétrico. Além disso, também é explorado neste estudo a relação entre a produtividade e os custos de investimento e operação comparados com os métodos DMLS e EBM, demonstrando como a deposição a frio se destaca significativamente mesmo necessitando de acabamento após a impressão.

3. CONCLUSÕES

A análise da literatura sobre a microestrutura de diferentes materiais como Aço Inoxidável, Inconel e Alumínio depositados por manufatura aditiva por deposição a arco via processo CMT identificou semelhanças no comportamento dos três materiais:

- Há a predominância de grãos colunares na morfologia das camadas internas das paredes depositadas, exceto pelas camadas superiores que apresentaram grãos equiaxiais, isto é, um refinamento de grãos pode ser esperado devido ao acúmulo de calor associado ao aumento rápido da taxa de resfriamento devido a interrupção da adição de material e contato com a temperatura ambiente.
- Mesmo com o aporte térmico reduzido, há a presença de microporos gasosos e precipitados relacionados a respectiva composição química, o que está relacionado aos processos de nova solidificação que prejudica a dissolução total de alguns elementos e suas fases. Na liga de alumínio também é encontrado microtrincas provenientes do acúmulo de microporos.
- É identificada redução de dureza no aço inoxidável e no Inconel e redução da resistência mecânica do alumínio nas áreas de interface das camadas quando comparada com os valores encontrados para as camadas superiores o que sugere que as amostras apresentam comportamento dúctil, após os testes de dureza e de resistência a tração.
- Os efeitos nas propriedades mecânicas destes três materiais seguem o que é esperado quanto ao processo CMT para diferentes ligas metálicas, isto, adicionalmente contribui para a sugestão de que são configurações microestruturais inerentes ao processo de manufatura aditiva por deposição a arco.
- Em geral, o processo CMT apresentou excelente desempenho como técnica de manufatura aditiva do aço inoxidável, Inconel e alumínio, inclusive quanto a penetração dos materiais, como no caso do aumento de altura do aço inoxidável e na uniformidade da solidificação da liga combinada com inconel, contudo, estratégias para aperfeiçoar os efeitos na microestrutura do método de deposição abordado são necessários.
- Para contribuir para as resolidificações e diminuir o acúmulo de calor entre as camadas, é indicado aumentar o tempo de intervalo de interpasses.
- O uso de tratamentos térmicos como AMS 5663 e API 6ACRA mostraram-se eficientes para a melhora da microdureza em comparação a amostra sem tratamento térmico para o Inconel e ligas combinadas com aço inoxidável.
- O uso do processo CMT+Advanced, ao utilizar ciclos com polaridades positivas e negativas, apresentou melhores resultados quanto a resistência a tração, porosidade e presença de precipitados em comparação ao processo convencional e pulsado.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento da Engenharia Mecânica (ENM), Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB) pelo apoio e suporte laboratorial/financeiro. CNPq (processo 405499/2022-1).

5. REFERÊNCIAS

- Benoit, A., Paillard, P., Baudin, T., Klosek, V. and Mottin, J.B., 2014. Comparison of four arc welding processes used for aluminium alloy cladding. *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 20, p. 75-81.
- Chen, F., Yang, Y. and Feng, H., 2021. Regional control and optimization of heat input during CMT by wire arc additive manufacturing: modeling and microstructure effects. *Materials*, Vol. 14, 1061.
- Chen, Y., Lu, F., Zhang, K., Nie, P., Elmi Hosseini, S.R., Feng, K. and Li, Z., 2016. Dendritic microstructure and hot cracking of laser additive manufactured Inconel 718 under improved base cooling. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 670, p. 312-321.
- Cong, B., Ding, J. and Williams, S., 2015. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, p. 1593-1606.
- Costa, A.L.S. e Ziberov, M., 2022. Influência dos parâmetros de deposição nas propriedades mecânicas de peças fabricadas pelo processo WAAM: uma revisão. *XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM2022*. Teresina-PI, Brasil.
- Dutra, J.C., Silva, R.H.G., Savi, B.M., Marques, C. and Alarcon, O.E., 2015. Metallurgical characterization of the 5083H116 aluminum alloy welded with the cold metal transfer process and two different wire-electrodes (5183 and 5087). *Welding in the World*, Vol. 59, p. 797-807.
- Engler, O. and Miller-Jupp, S., 2016. Control of second-phase particles in the Al-Mg-Mn alloy AA 5083. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 689, p. 998-1010.

- Fang, X., Zhang, L., Chen, G., Dang, X., Huang, K., Wang, L. and Lu, B., 2018. Correlations between microstructure characteristics and mechanical properties in 5183 aluminium alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing with different arc modes. *Materials*, Vol. 11, 2075.
- Kindermann, R.M., Roy, M.J., Morana, R. and Francis, J.A., 2022. Effects of microstructural heterogeneity and structural defects on the mechanical behaviour of wire + arc additively manufactured Inconel 718 components. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 839, 142826.
- Kurzynowski, T., Gruber, K., Stopyra, W., Kuznicka, B. and Chlebus, E., 2018. Correlation between process parameters, microstructure and properties of 316 L stainless steel processed by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 718, p. 64-73.
- Lee, S.H., 2020. CMT-based wire arc additive manufacturing using 316L stainless steel: effect of heat accumulation on the multi-layer deposits. *Metals*, Vol. 10, 278.
- Lehmann, T., Jain, A., Jain, Y., Stainer, H., Wolfe, T., Henein, H. and Qureshi, A.J., 2020. Concurrent geometry- and material-based process identification and optimization for robotic CMT-based wire arc additive manufacturing. *Materials & Design*, Vol. 194, 108841.
- Li, Z., Liu, C., Xu, T., Ji, L., Wang, D., Lu, J., Ma, S. and Fan, H., 2019. Reducing arc heat input and obtaining equiaxed grains by hot-wire method during arc additive manufacturing titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 742, p. 287-294.
- Liu, Z.Q., Zhang, P.L., Li, S.W., Wu, D. and Yu, Z.S., 2020. Wire and arc additive manufacturing of 4043 Al alloy using a cold metal transfer method. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 27, p. 783-791.
- Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A. and Campatelli, G., 2018. Heat accumulation prevention in wire-arc-additive-manufacturing using air jet impingement. *Manufacturing Letters*, Vol. 17, p. 14-18.
- Naotake, N., 1999. Thermal stresses in functionally graded materials. *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 22, p. 477-512.
- Park, J. and Lee, S.H., 2021. CMT-based wire arc additive manufacturing using 316L stainless steel (2): solidification map of the multilayer deposit. *Metals*, Vol 11, 1725.
- Qin, W., Li, J., Liu, Y., Kang, J., Zhu, L., Shu, D., Peng, P., She, D., Meng, D. and Li, Y., 2019. Effects of grain size on tensile property and fracture morphology of 316L stainless steel. *Materials Letters*. Vol. 254, p. 116-119.
- Reddy, J. N., 2000. Analysis of functionally graded plates. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 47, p. 663-684.
- Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M., Santos, T.G. and Oliveira, J.P., 2019. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, Vol. 12, 1121.
- Selvi, S., Rajasekar, E. and Vishvakshan, A., 2018, Cold Metal Transfer (CMT) technology - an overview. *Defense Technology*. Vol. 14, p. 28-44.
- Senthil, T.S., S. Ramesh, S.B., Puviyarasan, M. and Dhinakaran, V., 2021. Mechanical and microstructural characterization of functionally graded Inconel 825 - SS316L fabricated using wire arc additive manufacturing, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 15, p. 661-669.
- Singh, S., Ramakrishna, S. and Singh, R., 2017. Material issues in additive manufacturing: a review. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 25, p. 185-200.
- Teram, R., Santos, G., Nascimento, M.S., Couto, A.A., Santos, V.T. and Silva, M., 2019. Influência do espaçamento dendrítico secundário na dureza da liga Cu-14Al-5Ni-5Fe obtida por solidificação. *XIV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica - 14º CIBIM*, Cartagena, Colômbia.
- Van, D., Dinda, G.P., Park, J., Mazumder, J. and Lee, S.H., 2020. Enhancing hardness of Inconel 718 deposits using the aging effects of cold metal transfer-based additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 776, 139005.
- Vasvári, G.F., Csonka, D., Zsebe, T., Schiffer, Á., Samardžić, I., Told, R., Péntek, A. and Maróti, P., 2021. CMT additive manufacturing parameters defining aluminium alloy object geometry and mechanical properties. *Materials*, Vol. 14, 1545.
- Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J., Pardal, G. and Colegrove, P., 2016. Wire + arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, Vol. 32, p. 641-647.
- Xie, B., Xue, J., Ren, X., Wu, W. and Lin, Z., 2020. A comparative study of the CMT+P process on 316L stainless steel additive manufacturing. *Applied Sciences*, Vol. 10, 3284.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

DEPOSITION OF STAINLESS STEEL, INCONEL AND ALUMINIUM FOR ADDITIVE MANUFACTURING THROUGH CMT PROCESS: A REVIEW OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

Catarina Claudino Fernandes de Oliveira

André Luis Silva da Costa

Alysson Martins Almeida Silva

Maksym Ziberov

University of Brasilia, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Zip Code 70910-900, Brasília-DF, Brazil.

catarinaclaudino@hotmail.com

andr.luis27@hotmail.com

alyssonmartins@unb.br

mziberov@unb.br

Abstract. As an alternative to conventional methods of manufacturing metallic components, Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) stands out due to its ability to reproduce parts with complex geometries and greater use of raw material, compared to conventional manufacturing methods, in addition to having a competitive aspect in terms of deposition rates compared to other deposition processes in additive manufacturing itself. Due to the high heat input associated with this heat source, the variant of the Gas Metal Arc Welding deposition process called Cold Metal Transfer (CMT) stands out as an excellent alternative, since it maintains the benefits associated with WAAM, and it also controls the stability of the arc and mitigates the effects of thermal cycles on the microstructure of different metallic materials, whose demand in the industry requires that the mechanical properties are not impaired, guaranteeing the efficiency similar of the raw material, just like the manufacturing methods already disseminated. Thus, this study aims to carry out a literature review on the analysis of the microstructure of different materials deposited via the CMT process and, consequently, how their mechanical properties are affected. Through literary analysis, it was possible to note, in addition to a certain porosity in the microstructure, the columnar character of the grains is present in the crystallization zones in comparison to the equiaxed grains in the top layers and, in addition, how this configuration affects the hardness, mechanical resistance and susceptibility to fracture. Strategies to mitigate these effects were also identified, among them the CMT process proved to be a satisfactory alternative for the additive manufacturing of industrial metallic components. Thus, the microstructure of different materials such as stainless steel, Inconel and aluminum showed a greater predominance of more elongated grains in the inner layers of the walls deposited according to the direction of successive thermal cycles, thus evidencing the anisotropy of these alloys. Furthermore, even with reduced thermal input, there may be micro pores, micro cracks and intermetallic precipitates due to the re-solidification process, which may reduce mechanical properties such as, for example, hardness and mechanical strength and characterize the studied samples as ductile. Therefore, to mitigate these irregularities, it is possible to increase the interpass interval time, perform thermal treatments or use variations of the CMT process that have greater current control at the time of deposition.

Keywords: *Additive Manufacturing; WAAM; CMT; Mechanical Properties; Microstructure.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.