

## MANUFATURA ADITIVA POR FUSÃO-DEPOSIÇÃO A ARCO DE AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX: UMA REVISÃO

**Vinicius Almeida Mainardi**, [viniciusam40@gmail.com](mailto:viniciusam40@gmail.com)<sup>1</sup>

**Miguel Guilherme Antonello**, [antonello@ctism.ufsm.br](mailto:antonello@ctism.ufsm.br)<sup>2</sup>

**Leandro João da Silva**, [leandro.js@ufu.br](mailto:leandro.js@ufu.br)<sup>3</sup>

**Cristiano José Scheuer**, [cristiano.scheuer@ufsm.br](mailto:cristiano.scheuer@ufsm.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Tecnologia e Mecânica dos Materiais – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSM, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

<sup>2</sup> Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, UFSM, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

<sup>3</sup> Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (LAPROSOLDA) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, 38410-337, Uberlândia, MG, Brasil.

**Resumo.** Os aços inoxidáveis duplex (DSS) são amplamente empregados como matéria-prima para fabricação de componentes críticos, particularmente na indústria de óleo e gás, devido a sua combinação única entre propriedades mecânicas e eletroquímicas. No entanto, o custo e a disponibilidade são os principais desafios para a fabricação de peças com esse material. Nesse sentido, manufatura aditiva por fusão-deposição a arco (DED-Arco) é considerada uma tecnologia promissora para a fabricação eficiente e sob demanda de componentes grandes e com geometria moderada de DSS. Tendo em vista o potencial da referida tecnologia de fabricação e a grande aplicabilidade dos inoxidáveis duplex, este artigo revisa o status atual da aplicação da DED-Arco sobre a classe de aços inoxidáveis citada, cobrindo aspectos relacionados aos materiais, processos, microestrutura, propriedades e desempenho. Partindo-se das informações levantadas, verifica-se que um grande desafio à popularização do uso da DED-Arco para o processamento dos DSS, corresponde ao controle geométrico e dimensional, e da arquitetura microestrutural dos depósitos. Dessa forma, faz-se necessário um controle apurado das condições de processamento com base nas características específicas de cada DSS e processo de DED-Arco utilizados.

**Palavras chave:** Aço inoxidável duplex. Manufatura aditiva. Fusão-deposição a arco.

**Abstract.** Duplex stainless steels (DSS) are widely used as raw materials for the manufacture of critical components, particularly in the oil and gas industry, due to their unique combination of mechanical and electrochemical properties. However, cost and availability are the main challenges for manufacturing parts with this material. In this sense, Additive manufacturing by Directed Energy Deposition-Arc (DED-Arc) is considered a promising technology for efficient and on-demand manufacturing of large and moderate geometry components from DSS. In view of the potential of said manufacturing technology and the wide applicability of DSS, this article reviews the current status of DED-Arc application on the aforementioned stainless steel class, covering aspects related to materials, processes, microstructure, properties and performance. Based on the information gathered, it appears that a major challenge to the popularization of the use of DED-Arc for the processing of DSS, corresponds to the geometric and dimensional control, and the microstructural architecture of the deposits. Thus, it is necessary to have an accurate control of the processing conditions based on the specific characteristics of each DSS and DED-Arc process used.

**Keywords:** Duplex stainless steel. Additive manufacturing. Directed Energy Deposition-Arc.

### 1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA), comercialmente conhecida como impressão 3D, engloba um grupo de tecnologias de fabricação que produzem objetos tridimensionais a partir de modelos digitais (CAD/CAM), utilizando uma abordagem de deposição de material camada sobre camada. Baseando-se nas definições da norma ISO/ASTM 52900-15, os processos de manufatura aditiva incluem as tecnologias de fotopolimerização em cuba, jato de ligante, extrusão de material, jateamento de material, laminação de folhas/chapas, fusão em leito de pó e deposição por energia direcionada. Em comparação aos processos tradicionais de fabricação, as técnicas de manufatura aditiva têm a capacidade de produzir itens complexos com menor desperdício de matéria-prima, energia e ciclo de processamento (Chen e Mazumder, 2017).

No tocante a fabricação de componentes metálicos, há três tecnologias principais: jato de ligante, fusão em leito de pó e deposição com energia direcionada (Toyserkani et al. 2022). Os processos de deposição com energia direcionada (DED) são caracterizados por utilizarem como fonte de calor o arco elétrico, feixes de laser ou de elétrons; e a matéria-

prima na forma de pó, arame ou chapa. Tipicamente, os processos baseados em pós metálicos empregam feixes laser como fonte de calor, enquanto processos baseados em arame; feixe de elétrons e arco elétrico/plasma (ISO/ASTM 3187).

As técnicas de MA por DED-Arco apresentando aptidão para fabricação de componentes de grandes dimensões, em altas taxas de produção e a custos reduzidos (Syed *et al.*, 2005). Nestes processos, a matéria-prima na forma de arame é fundida e depositada sobre um substrato, camada sobre camada, produzindo a pré-forma de componentes (*near net shape*). Conforme reportado na literatura (Frazier, 2014), geralmente, o custo da matéria-prima na forma de arame é equivalente à, aproximadamente, 10% do valor da mesma na forma de pó. Além disso, as máquinas para DED-Arco podem ser facilmente adaptadas a partir de robôs e fontes para soldagem a arco, que apresentam custo de aquisição e manutenção significativamente inferiores aos sistemas assistidos por feixe de elétrons/laser (Frazier, 2014).

Os processos DED-Arco podem ser realizados usando-se as técnicas de soldagem a arco com eletrodo consumível e proteção gasosa (*Gas Metal Arc Welding – GMA*), soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (*Gas-Shielded Tungsten Arc Welding – GTA*), soldagem a arco plasma (*Plasma Arc Welding – PA*). Destes processos, o único que admite a utilização de pó como matéria-prima, além do arame, é o processo a plasma (PTA-P – *Plasma Transferred Arc with Powder as filler material*) (Jin *et al.*, 2020). Destes processos, o DED-Arco GMA é limitado pela mínima espessura e acabamento grosseiro das paredes dos depósitos, devido à grande dimensão da sua poça de fusão e elevado aporte térmico (Spencer *et al.*, 1998). Para superar estas limitações, pode-se adotar o GMA com transferência controlada (*Cold Metal Transfer – CMT*), o qual é caracterizado por apresentar uma transferência metálica suave, regular e praticamente se respingos (Posch *et al.*, 2017). O DED-Arco GTA permite produzir depósitos com alta qualidade dimensional e de acabamento (Ma *et al.*, 2015, Ayarkwa *et al.*, 2017). O DED-Arco PA caracteriza-se por um menor aporte térmico que os processos GTA e GMA, e permite um melhor controle da taxa de deposição, tornando-se atrativo principalmente para a produção de grandes componentes (Alberti *et al.*, 2016). Comparativamente, o DED-Arco GMA apresenta maior taxa de deposição e a alimentação concêntrica do arame facilita a geração de trajetória de deposição, porém tem menor controle da poça de fusão. Já os processos DED-Arco GTA e DED-Arco PA, pelo fato de possuírem a alimentação independente da fonte de energia, permitem maior controle da poça de fusão. No entanto, a alimentação lateral dificulta a geração de trajetórias.

Os aços inoxidáveis apresentam grande potencial como matéria-prima para os processos de manufatura aditiva por DED-Arco, devido à sua excelente soldabilidade e à combinação entre propriedades mecânicas e resistência à corrosão (Zhang *et al.*, 2022). Estudos indicam que, para o aço inoxidável austenítico classe 316, a potência específica de deposição pelos processos assistidos por arco é cerca de 5 a 10 vezes superior àquela dos processos assistidos por laser, possibilitando maiores velocidades de deposição (Mukherjee e Debroy, 2019). No tocante à aplicação dos aços inoxidáveis duplex como matéria-prima em processos de manufatura aditiva por DED-Arco, recentemente vários estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de avaliar o efeito das condições de processamento sobre a macromorfologia, microestrutura, propriedades mecânicas e desempenho dos depósitos. Vale ressaltar que as características microestruturais e propriedades destes aços quando processados através dos processos de manufatura aditiva por DED-Arco são bastante diferentes quando comparadas àquelas resultantes da aplicação dos processos tradicionais de fabricação.

Embora existam muitos relatos na literatura sobre a aplicação exitosa das técnicas de manufatura aditiva por DED-Arco sobre os aços inoxidáveis duplex, a literatura carece de uma visão holística sobre esse tópico. Dessa forma, esse artigo tem como escopo fornecer uma revisão sistemática no assunto, cobrindo aspectos relacionados ao processamento e seus efeitos sobre a macro e microestrutura, e sobre as propriedades dos depósitos. Além disso, baseando-se nas informações mapeadas na literatura, ao final do artigo uma sumarização é realizada indicando o status atual e as perspectivas futuras de desenvolvimento no assunto.

## 2. CARACTERÍSTICAS MACROMORFOLÓGICAS DOS DEPÓSITOS

Os parâmetros e as condições de deposição dos processos de manufatura aditiva por DED-Arco determinam o aporte de calor e a acumulação térmica, impactando assim a macromorfologia dos depósitos. Zhang *et al.* (2003) mostraram que a eficiência no aproveitamento da matéria-prima e a precisão da pré-forma depositada podem ser melhoradas realizando a abertura e extinção do arco elétrico durante a impressão de cada camada, através de uma estratégia de varredura tipo 'vai-e-vem'. Em estudos envolvendo a impressão por DED-Arco GMA, Xiong *et al.* (2018) descobriram que uma maior taxa de alimentação do arame reduz a estabilidade da poça de fusão, e uma maior velocidade de deposição torna o arco menos estável. Ambos os parâmetros podem aumentar a ondulação da superfície lateral da pré-forma. No entanto, foi mostrado pelos autores que uma temperatura de interpasse mais baixa pode diminuir a ondulação de superfície.

Wu *et al.* (2019) estudaram a influência da modulação da corrente, velocidade de deposição e tempo de resfriamento interpasse sobre a macromorfologia de paredes de aço inoxidável depositadas pelo processo DED-Arco GMA. Os parâmetros de processo adotados durante as impressões estão compilados na Tabela 1. Uma parede fina, alta e uniforme é obtida empregando-se os parâmetros identificados pelo código G3010, conforme demonstrado na Figura 1a. Através da Figura 1b, verifica-se que uma redução gradual da corrente melhora a geometria das extremidades dos depósitos. Conforme pode-se identificar confrontando-se as Figura 1a e Figura 1c (amostras G3010 e G3510, respetivamente), o aumento da velocidade de deposição leva à uma diminuição na taxa de deposição, resultando no desnível na superfície externa dos depósitos impressos. Comparando-se a amostra G3000, cujo tempo de resfriamento é 0 s, com a G3005,

verifica-se que a morfologia desta última foi melhorada; porém, as extremidades das camadas em ambas as condições colapsaram devido à temperatura extremamente alta. Verifica-se, entretanto, que o acabamento das extremidades melhora com o aumento do tempo de resfriamento de 10 ou 15 s.

Tabela 1. Parâmetros de processo e respectivas codificações de amostras usadas por Wu *et al.* (2019).

Código amostras/ Parâmetros	T3010	G3010	G3510	G3000	G3005	G3015
Velocidade de dep. (cm·min <sup>-1</sup> )	30	30	35	30	30	30
Tempo de resfriamento (s)	10	10	10	0	5	15
Modulação da corrente	Redução transiente	Redução gradual				

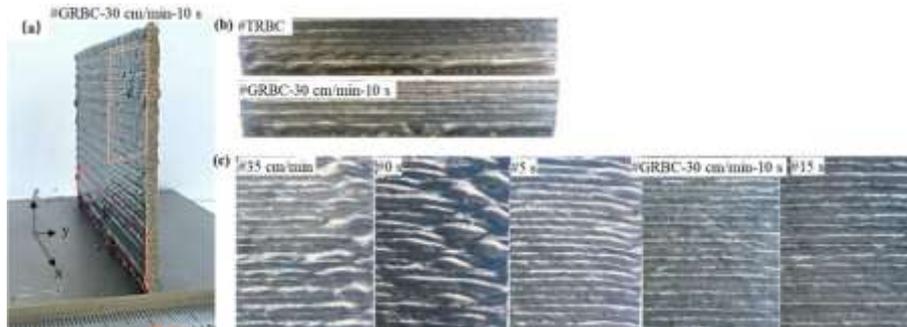


Figura 1. Morfologias de diferentes partes em amostras depositadas usando os parâmetros compilados na Tabela 1: (a) perfil da amostra G3010; (b) partes inferiores e (c) superiores das amostras depositadas sob as diferentes condições (as partes em (b) correspondem à região inferior de (a), e as partes em (c) correspondem à região superior direita de (a)) (Wu *et al.*, 2019).

Feng *et al.* (2018) avaliaram a macromorfologia de paredes depositadas a partir do consumível de aço inoxidável duplex empregando o processo DED-Arco PA com alimentação de arame único e duplo. Ao usar uma mesma corrente de deposição com valor de 130 A, um aumento na velocidade de deposição diminui a altura da camada das paredes depositadas, mas melhora a qualidade da sua superfície e reduz a ondulação conforme visualizado na Figura 2. Embora produzidas com a mesma corrente e velocidade de deposição, a ondulação lateral das paredes produzidas com arame único foi mais irregular que a das amostras produzidas com arame duplo.

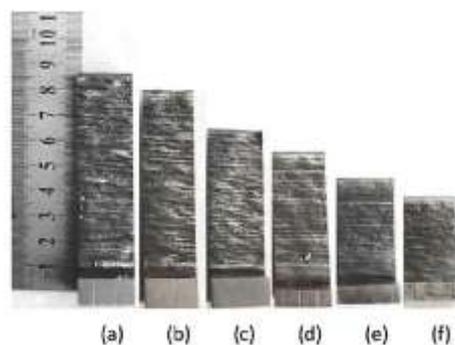


Figura 2. Fotografias das paredes de aço inoxidável duplex produzidas em DED-Arco PA: (a), (b) e (c) mostrando as paredes produzidas em arame único e (d), (e) e (f) em arame duplo, empregando-se velocidade de deposição de 30 cm/min, 50 cm/min e 60 cm/min, respectivamente (Feng *et al.*, 2018).

Knezovic *et al.* (2020) avaliaram o efeito do tempo interpasse sobre o acabamento de paredes depositadas em aço inoxidável duplex classe 2205 pelo processo DED-Arco GMA, utilizando perfilometria (Figura 3). Segundo afirmado pelos autores citados, os fatores mais importantes a serem utilizados na avaliação das paredes são  $S_q$  (raiz quadrada média da altura da superfície) e  $S_a$  (média aritmética da altura da superfície). Se o seu valor para determinada parede for significativamente maior do que para as outras, significa que a superfície é mais rugosa e é de se esperar uma usinagem adicional mais difícil (menor usinabilidade devido ao maior volume de material). Segundo esse raciocínio e considerando os resultados da Figura 3, W3 é a condição com menor rugosidade superficial e apresentará usinagem facilitada em função do menor volume de material à ser removido.

A macromorfologia de amostras produzidas empregando o processo CMT é bastante regular, como comprovado no trabalho de Pickin *et al.* (2011). Para investigar a capacidade do processo DED-Arco CMT em termos de acabamento das

paredes depositadas, Posch *et al.* (2017) adotaram o referido processo para produzir geometrias do tipo ‘lâmina’ a partir de aço inoxidável duplex. Com parâmetros de soldagem consistentes para todas as camadas, eles obtiveram uma superfície bastante lisa comparável à obtida por laminação a quente, corte por chama ou fundição em areia.

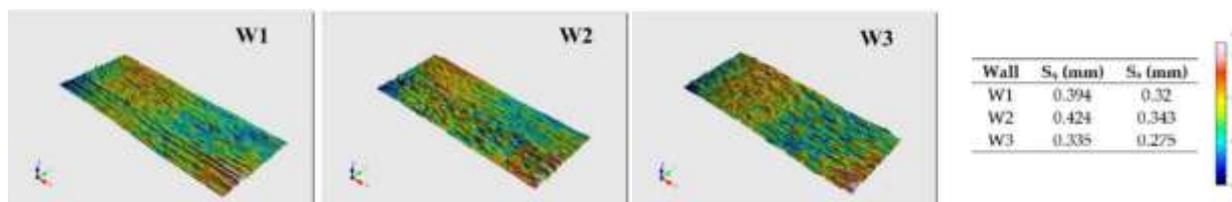


Figura 3. Resultados da análise 3-D da textura da superfície em função do tempo interpasse (W1: 132, W2: 69 e W3: 48 min).

A trajetória de impressão também afeta a condição da superfície depositada. Durante a fabricação de blocos de aço inoxidável duplex através do processo DED-Arco GMA, um caminho de direção alternada gerou uma altura uniforme da camada, enquanto um caminho de deposição em uma direção produziu lados irregulares devido ao acúmulo de calor no ponto de parada durante a deposição de cada camada (Hosseini *et al.*, 2019).

Em resumo, as características macromorfológicas dos depósitos impressos em DSS estão intimamente ligadas à velocidade de impressão, ao modo da corrente de soldagem, à temperatura de interpasse e à trajetória de impressão. A partir das informações levantadas, é possível inferir que mais estudos sobre a otimização dos parâmetros de processo mencionados acima são necessários para obter melhor precisão dimensional e qualidade superficial da superfície de paredes de DSS depositadas pelos processos DED-Arco.

### 3. CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DOS DEPÓSITOS

As características microestruturais das paredes de aços inoxidáveis duplex depositadas por DED-Arco são dependentes dos ciclos térmicos desenvolvidos durante a deposição. O ciclo térmico, incluindo aquecimento e resfriamento, gera microestruturas anisotrópicas nas partes depositadas (Herzog *et al.*, 2016).

As microestruturas de uma parede de aço inoxidável duplex depositada pelo processo DED-Arco PA duplo arame são ilustradas na Figura 4 (Feng *et al.*, 2018). Devido aos diferentes estados de aquecimento e ciclos térmicos em diferentes áreas das amostras depositadas, as microestruturas são caracterizadas por três regiões diferentes: as seções superior, intermediária e inferior Figura 4a. Conforme apresentado na Figura 4b, cada camada depositada, de baixo para cima, consiste em uma sequência de regiões com estrutura de grão equiaxial (A), colunar (B) e fino (C).

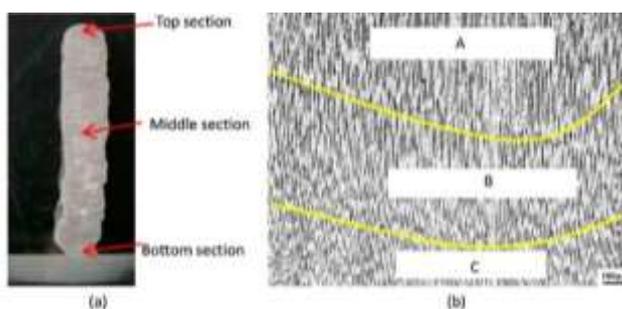


Figura 4. (a) Macroestrutura da seção transversal de uma peça de aço inoxidável duplex depositada pelo processo DED-Arco PA duplo arame e (b) as três regiões formada em cada camada depositada, indicando a região de grão equiaxial (A), de grão colunar (B), e de grão fino (C) (Feng *et al.*, 2018).

Na Figura 5 são mostrados os detalhes da microestrutura das camadas depositadas de aço inoxidável duplex depositadas pelo processo DED-Arco PA com arame único e duplo (Feng *et al.*, 2018). Os referidos autores apontaram que o aumento da velocidade de impressão resulta em uma estrutura de grãos equiaxiais mais finos, bem como quando emprega-se a alimentação dupla de arame, pois em ambos os casos as ações mencionadas aumentam a taxa de resfriamento das paredes depositadas. Conforme mostrado na Figura 5, à medida que a velocidade de impressão aumentou de 30 para 60 cm/min, o número de grãos de equiaxiais completos aumenta significativamente nas amostras depositadas com arame duplo. No entanto, nas paredes depositadas com arame único, verifica-se a ocorrência de grãos equiaxiais com crescimento incompleto quando a velocidade de varredura aumenta de 30 para 50 cm/min. À medida em que a velocidade de impressão aumenta para 60 cm/min, a quantidade de grãos equiaxiais incompletos diminui e observa-se somente grãos equiaxiais completos. Devido à presença de grãos equiaxiais completos distribuídos na região de interface adjacente entre as camadas, a resistência final das paredes depositadas com arame duplo é cerca de 10,2% maior do que daquelas produzidas com arame único. Em uma investigação para avaliar o ajuste da relação ferrita-austenita de componentes de

aço inoxidável duplex impressos pelo processo DED-Arco GMA, Stützer *et al.* (2019) misturaram dois metais de adição diferentes para diminuir o níquel equivalente, buscando aumentar assim o teor de ferrita nas amostras depositadas. A amostra fabricada com 100% do metal de adição G 229 3 N L (ver Figura 6a) contém grandes placas laterais austeníticas. Nas Figura 6a-f, à medida que a porcentagem do metal de adição GZ 22 5 3 aumenta, o teor de níquel diminui e as placas de austenita se tornam menores em tamanho e em conteúdo. A amostra fabricada com 100% do metal de adição GZ 22 5 3 (ver Figura 6f) contém plaquetas de austenita relativamente pequenas.

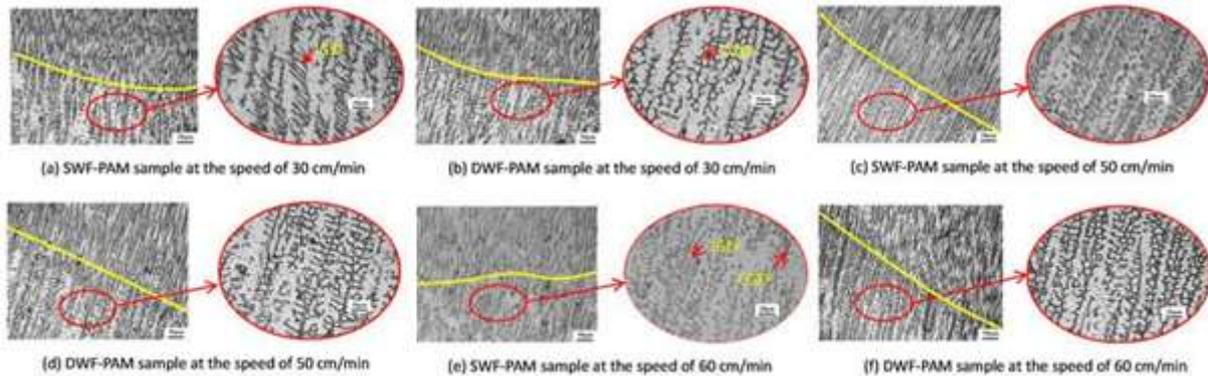


Figura 5. Microestruturas da seção intermediária das paredes de aço inoxidável duplex depositadas pelo processo DED-Arco PA utilizando arame simples (a), (c) e (e) e duplo (b), (d) e (f) (Feng *et al.*, 2018).

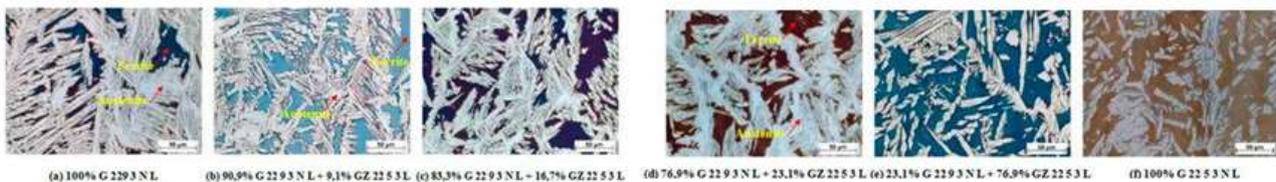


Figura 6. Micrografias das estruturas fabricadas com diferentes proporções de mistura entre os metais de adição. (Stützer *et al.*, 2019).

Hejripour *et al.* (2019) utilizaram o processo DED-Arco GMA para imprimir paredes e tubos de aço inoxidável duplex classe 2209, e mostraram que o cálculo das taxas de resfriamento nas camadas depositadas pode ajudar a prever a formação das fases. Os resultados numéricos e experimentais obtidos pelos autores citados revelaram que a formação de austenita pode ser significativamente promovida por baixas taxas de resfriamento.

Em resumo, o histórico térmico nos processos DED-Arco desempenha um papel importante no controle da microestrutura dos aços inoxidáveis duplex, como a proporção entre as fases austenita e ferrita formadas. Modificar as composições do material de adição, como por exemplo utilizando fios duplos, é uma abordagem eficaz para alcançar microestruturas finais desejáveis. Para alcançar a formação de microestruturas mais isotrópicas em peças de aços inoxidáveis duplex pelos processos DED-Arco, é necessário entender completamente o comportamento de solidificação e transformações de fase durante os complexos ciclos térmicos desenvolvidos durante o processo, e o efeito dos parâmetros de impressão sobre os ciclos térmicos.

#### 4. DEFEITOS RECORRENTES NOS DEPÓSITOS

Parâmetros de processo, como a trajetória de deposição e o aporte térmico, são as principais causas de defeitos em peças depositadas (Wu *et al.*, 2018). Neste sentido, porosidade, trincas e falta de fusão são os defeitos típicos encontrados em peças de aço inoxidável duplex depositadas pelos processos DED-Arco, segundo Hosseini *et al.* (2020). Segundo Wu *et al.* (2018), uma trajetória de deposição complexa leva à uma maior produção e ejeção de respingos ou fusão insuficiente, criando vazios e inclusões no volume do sólido impresso. Comparando-se os processos DED-Arco baseados nas técnicas GTA, PA e GMA, a aplicação desta última gera mais defeitos relacionados ao aquecimento excessivo, respingos ou porosidade, devido a corrente elétrica ser aplicada diretamente sobre a matéria-prima (Rodríguez *et al.*, 2018). Algumas porosidades e falta de fusão aparecem na seção transversal de amostras de aço inoxidável duplex depositadas em DED-Arco GMA, como mostrado na Figura 7. O fator matéria-prima, como a contaminação do substrato e do metal de adição, é outra causa de defeitos. Sujeira, umidade e graxa na superfície do substrato e do metal de adição podem ser facilmente absorvidos pela poça de fusão, produzindo porosidade após a solidificação (Wu *et al.*, 2018).

Em resumo, defeitos como falta de fusão, rachaduras e porosidade precisam ser reduzidos a um nível mínimo para que as peças depositadas tenham resistência suficiente para aplicações de engenharia. O controle preciso do aporte e do histórico térmico, a seleção adequada do gás de proteção, o uso de matérias-primas de alta qualidade e a limpeza das

superfícies de substrato são ações a serem tomadas para reduzir os defeitos em peças de aços inoxidáveis duplex depositadas pelos processos DED-Arco.



Figura 7. Seção transversal típica de paredes de aço inoxidável duplex tipo 2205 depositadas em DED-Arco GMA. A área mais clara contém mais austenita e a mais escura mais ferrita. Um padrão pode ser visto na amostra depositada, onde as linhas 1 e 2 representam as regiões gravadas mais claras e mais escuras, respectivamente (Hosseini *et al.*, 2020).

## 5. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS DEPÓSITOS

Componentes de alta qualidade podem ser produzidos pelos processos DED-Arco quando se tem uma compreensão abrangente do efeito dos parâmetros de processamento sobre os fenômenos envolvidos durante a solidificação do material (Hejripour *et al.*, 2019). Thompson *et al.* (2015) mostraram que a geometria da peça final, o ciclo térmico e os fenômenos de solidificações têm uma influência marcante na microestrutura, que por sua vez afeta as propriedades mecânicas das peças depositadas. Nesse sentido, os estudos realizados no tema concentram-se na avaliação do efeito dos referidos parâmetros de influência sobre a dureza e resistência à tração de peças de DSS depositadas usando DED-Arco.

No que se refere à dureza, Hejripour *et al.* (2019) mostraram por meio de medidas de nanodureza que a dureza na estrutura ferrítica (3,7 GPa) é maior do que aquela da estrutura austenítica (3 GPa), em peças de DSS produzidas por DED-Arco GMA. Por meio de medidas de microdureza na escala Vickers, os referidos autores também verificaram que a dureza na primeira e última camada depositada apresentam valores, em média, maiores (~ 325 HV) quando comparados aos valores medidos nas camadas intermediárias (~ 289 HV). Esse comportamento foi justificado devido ao maior teor da fase ferrita junto à primeira e última camada depositadas. Além disso, os autores concluíram que, em média, as paredes depositadas apresentam dureza inferior ao material equivalente produzido por outros processos de fabricação, sendo esse comportamento creditado à menor fração de ferrita formada nas amostras produzidas por DED-Arco.

Knezovic *et al.* (2020), por sua vez, mostraram que o tempo interpasse no processo DED-Arco CMT não influencia sobre a dureza das paredes depositadas, e que os valores medidos nas diferentes camadas depositadas são estatisticamente equivalentes, e que estas apresentam dureza similar ao material equivalente produzido por outros processos de fabricação. Resultado similar foi relatado por Posch *et al.* (2017), também adotando o processo DED-Arco CMT.

Cabe destacar que a dureza das peças utilizando os processos DED é inferior àquelas produzidas em mesmo material pelos processos assistidos por laser, devido à estrutura de grão refinada na forma como depositada obtida neste último caso, dado o menor aporte térmico (Zhang *et al.*, 2022). Para amostras depositadas em DSS utilizando processos assistidos por laser, Nigon *et al.* (2021) mostraram que a aplicação de um tratamento térmico de recozimento após deposição promove um decréscimo na dureza do material impresso, e um aumento em sua isotropia. Esse comportamento é creditado ao efeito de relaxação, durante tratamento térmico, das tensões resultantes do ciclo térmico de deposição.

No que se refere à resistência à tração, Zhang *et al.* (2019) demonstraram excelentes propriedades (tensão limite de escoamento de 530 MPa, tensão limite de resistência a tração de 852 MPa, e alongamento de 35%), em peças de DSS depositadas pelo processo DED-Arco GTA (TOP-TIG), sendo estas superiores àquelas obtidas pelo mesmo material processado por processos de fundição, resultado também confirmado por Hejripour *et al.* (2019) em amostras produzidas por DED-Arco GMA. Zhang *et al.* (2019) também evidenciaram uma grande anisotropia nos valores da tensão limite de resistência à tração e alongamento, em relação ao eixo (horizontal ou vertical) de confecção dos corpos de prova.

Eriksson *et al.* (2018), estudando o efeito do aporte térmico sobre a resistência à tração de corpos de prova de DSS produzidos pelo processo DED-Arco GMA, mostraram que tanto o limite de escoamento quanto o de resistência à tração têm seus valores reduzidos com o aumento do aporte térmico, ao passo que a ductilidade cresce. Resultado similar foi reportado por Lervåg *et al.* (2020) ao avaliar a resistência à tração de DSS produzidos pelo processo DED-Arco CMT. Embora os autores citados não discorram a respeito, acredita-se que esse comportamento esteja relacionado ao crescimento de grão com o incremento do aporte de calor.

Posch *et al.* (2017), por sua vez, mostraram que os valores de tensão de escoamento e limite de resistência à tração obtidos são bastante semelhantes aos valores descritos na ficha técnica do consumível utilizado na impressão pelo processo DED-Arco CMT, apresentando estas grandezas valores moderados de desvio padrão. As diferenças nos valores obtidos para as grandezas medidas foram creditadas às diferenças nas direções de medição (transversal versus longitudinal) causadas por uma orientação de grão diferente em cada uma delas.

Vale frisar que a anisotropia tem um efeito importante no desempenho mecânico de componentes metálicos produzidos por manufatura aditiva. Embora alguns estudos tenham sido executados abordando a avaliação do seu efeito

sobre as propriedades mecânicas das peças de aço depositadas pelos processos DED-Arco, estudos complementares são necessários para obter um melhor entendimento sobre os mecanismos envolvidos, e a forma de controlá-los/ajustá-los adequadamente. A combinação dos processos de impressão com laminação “*in-situ*” ou a aplicação ulterior de ciclos de tratamentos térmicos, constituem abordagens eficazes para reduzir a anisotropia das peças depositadas (Jin *et al.*, 2020).

Em resumo, a parametrização dos processos DED-Arco, bem como a aplicação de tratamentos térmicos pós-impressão e de laminação durante a deposição, exerce efeito sobre a microestrutura dos DSS impressos, influenciando significativamente as suas propriedades mecânicas. O maior entendimento da correlação entre estes fatores é mandatório para um melhor controle das propriedades mecânicas das peças produzidas em DSS pelos processos em questão.

## 6. DESEMPENHO TRIBOLÓGICO E À CORROSÃO DOS DEPÓSITOS

No que se refere à avaliação de desempenho de amostras de DSS depositadas pelos processos DED Arco, as pesquisas ainda são incipientes. Neste contexto, é importante esclarecer que não foram encontrados trabalhos na literatura avaliando o desempenho tribológico da referida classe de material quando processada pelo grupo de técnicas em questão. Vale ressaltar que, conforme demonstrado por Handen *et al.* (2017) para peças de aços inoxidáveis austeníticos produzidas por DED-Arco GMA, as taxas de desgaste na direção da deposição são graduadas ao longo do caminho de deposição.

Em relação ao comportamento à corrosão, a resistência à corrosão por pite das amostras de DSS depositadas pelo processo DED-Arco GMA é similar àquelas demonstradas por amostras laminadas, segundo Zhang *et al.* (2017). Estes autores também mostraram que a aplicação de tratamentos térmicos após a impressão, tem um impacto positivo sobre a resistência à corrosão por pite do material.

## 7. STATUS ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS

Estudos recentes foram executados com o intuito de avaliar o efeito das condições de processamento sobre a macromorfologia, microestrutura, propriedades mecânicas e desempenho dos depósitos produzidos de aços inoxidáveis duplex produzidos por manufatura aditiva por fusão-deposição a arco. Os principais resultados destas pesquisas podem ser resumidos:

- As características macroscópicas das peças de DSS depositadas pelos processos DED-Arco estão relacionadas às velocidades de alimentação do arame e de impressão, ao modo de corrente de soldagem adotado, ao tempo de resfriamento e à temperatura interpasse. Mais estudos sobre a otimização dos parâmetros de processo mencionados são necessários para obter melhor precisão dimensional e qualidade superficial das peças depositadas;
- O ciclo térmico derivado dos processos DED-Arco desempenha um papel importante no controle da microestrutura dos DSS, como a proporção entre as fases austenita e ferrita. Assim, é viável controlar a constituição de fases do material impresso controlando os parâmetros do processo. Modificar as composições do material, fazendo uso de alimentação dupla de arame, é outra abordagem que se mostrou eficaz para obter microestruturas finais e propriedades desejáveis. As operações de tratamento térmico após impressão também alteram significativamente a microestrutura final. Portanto, para obter microestruturas desejáveis em peças de DSS produzidas pelos processos de DED-Arco é necessário entender plenamente o comportamento de solidificação e transformações de fase durante os complexos ciclos térmicos desenvolvidos nestes processos, e o efeito dos parâmetros de impressão sobre estes ciclos térmicos;
- Defeitos, tais como falta de fusão, trincas e porosidade, precisam ser controlados a um nível mínimo para que as peças depositadas tenham desempenho satisfatório. O controle preciso aporte e ciclo térmico, a utilização de gás de proteção (ou mistura de gases) adequado, o uso de matéria-prima de alta qualidade são ações úteis para reduzir a incidência de defeitos em peças de DSS depositadas pelos processos DED-Arco;
- Os parâmetros de processamento, as operações de tratamento térmico após impressão, bem como os defeitos existentes nas peças depositadas afetam significativamente as propriedades mecânicas dos DSS produzidos pelos processos DED-Arco. O maior entendimento da correlação entre esses fatores e o seu controle preciso, são importantes para um melhor controle das propriedades mecânicas das peças depositadas;
- Peças produzidas a partir de DSS por meio dos processos DED-Arco mostram considerável anisotropia em termos de resistência mecânica, em função da direcionalidade do processo de deposição em camadas. Neste sentido, é útil desenvolver uniões de processos, como impressão + laminação “*in situ*”, ou aplicação de tratamentos térmicos após, amenizando a anisotropia gerada pelos grãos colunares grosseiros formados na direção de deposição;
- Para viabilizar a aplicação industrial de peças de DSS produzidas por DED-Arco, é necessária uma caracterização do desempenho ao desgaste, fadiga e corrosão das peças depositadas, com o intento de ajustar os parâmetros de processamento e pós-processamento de modo a obter uma melhor performance;
- Além disso, esforços adicionais devem ser feitos para melhorar os processos DED-Arco de modo a obter taxas de deposição mais rápidas e melhor controle de qualidade das peças depositadas.

## 8. REFERÊNCIAS

- ASTM-International, 2015. "ISO/ASTM52900-15 Standard Terminology for Additive Manufacturing - General Principles – Terminology"; ASTM-International: West Conshohocken, PA, USA, 2015; Volume 3, p. 5.
- Alberti, E.A.; Bueno, B.M.P.; D'Oliveira, A.S.C.M., 2016. "Additive manufacturing using plasma transferred arc". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 83, p. 1861–1871.
- Ayarkwa, K.; Williams, S.; Ding, J., 2017. "Assessing the effect of TIG alternating current time cycle on aluminium wire + arc additive manufacture". *Additive Manufacturing*. Vol. 18, p. 186–193.
- Chen, B.; Mazumder, J., 2017. "Role of process parameters during additive manufacturing by direct metal deposition of Inconel 718". *Rapid Prototyping Journal*. Vol. 23, p. 919–929.
- Eriksson, M.; Lervåg, M.; Sørensen, C.; Robertstad, A.; Brønstad, B.M.; Nyhus, B.; Aune, R.; Ren, X.; Akselsen, O.M., 2018. "Additive manufacture of superduplex stainless steel using WAAM." In: *5<sup>th</sup> International Conference of Engineering Against Failure*. Vol. 18, p. 03014.
- Feng, Y.; Zhan, B.; He, J.; Wang, K., 2018. "The double-wire feed and plasma arc additive manufacturing process for deposition in Cr-Ni stainless steel". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 259, p. 206–215.
- Frazier, W.E., 2014. "Metal Additive Manufacturing: A Review". *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 23, p. 1917–1928.
- Hejripour, F.; Binesh, F.; Hebel, M.; Aidun, D.K., 2019. "Thermal modeling and characterization of wire arc additive manufactured duplex stainless steel". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 272, p. 58–71.
- Herzog, D.; Seyda, V.; Wycisk, E.; Emmelmann, C., 2016. "Additive manufacturing of metals". *Acta Materialia*. Vol. 117, p. 371–392.
- Hosseini, V.A. Hogstrom, M; Hurtig, K.; Bermejo, M.A.V.; Stridh, L.E.; Karlsson, L.; 2019. "Wire-arc additive manufacturing of a duplex stainless steel: thermal cycle analysis and microstructure characterization. *Welding in the World*. Vol. 63(4), p. 75–87.
- Jin, W.; Zhang, C.; Jin, S.; Tian, Y.; Wellmann, D.; Liu, W., 2020. "Wire Arc Additive Manufacturing of Stainless Steels: A Review". *Applied Sciences*. Vol 10(5), p. 1563.
- Knezovic, N.; Garasic, I.; Juric, I., 2020. "Influence of the interlayer temperature on structure and properties of wire and arc additive manufactured duplex stainless steel product". *Materials*, Vol. 13(24), p. 5795.
- Lervåg, M.; Sørensen, C.; Robertstad, A.; Brønstad, B.M.; Nyhus, B.; Eriksson, M.; Aune, R.; Ren, X.; Akselsen, O.M.; Bunaziv, I., 2020. "Additive Manufacturing with Superduplex Stainless Steel Wire by CMT Process". *Metals*. Vol. 10, p. 272.
- Ma, Y.; Cuiuri, D.; Hoye, N.; Li, H.; Pan, Z., 2015. "The effect of location on the microstructure and mechanical properties of titanium aluminides produced by additive layer manufacturing using in-situ alloying and gas tungsten arc welding". *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 631, p. 230–240.
- Mukherjee, T.; Debroy, T., 2019. "Printability of 316 stainless steel". *Science and Technology of Welding and Joining*. Vol. 24, p. 412–419.
- Nigon, G.N.; Isgor, O.B.; Pasebani, S., 2021. "The effect of annealing on the selective laser melting of 2205 duplex stainless steel: Microstructure, grain orientation, and manufacturing challenges" *Optics & Laser Technology*. Vol. 134, p. 106643.
- Pickin, C.; Williams, S.; Lunt, M., 2011. "Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 211, p. 496–502.
- Posch, G.; Chladil, K.; Chladil, H., 2017. "Material properties of CMT—Metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries". *Welding in the World*. Vol 61, p. 873–882.
- Rodriguez, N.; Vázquez, L.; Huarte, I.; Arruti, E.; Tabernero, I.; Álvarez, P., 2018. "Wire and arc additive manufacturing: A comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel". *Welding in the World*. Vol. 62, p. 1083–1096.
- Spencer, J.D.; Dickens, P.M.; Wykes, C.M., 1998. "Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B - Journal of Engineering Manufacture*. Vol. 212, p. 175–182.
- Syed, W.U.H.; Pinkerton, A.; Li, L., 2005. "A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping". *Applied Surface Science*. Vol. 247, p. 268–276.
- Stützer, J.; Totzauer, T.; Wittig, B.; Zinke, M.; Jüttner, S., 2019. "GMA Cold Wire Technology for Adjusting the Ferrite–Austenite Ratio of Wire and Arc Additive Manufactured Duplex Stainless Steel Components". *Metals*, Vol 9, p. 564.
- Thompson, S.M.; Bian, L.; Shamsaei, N.; Yadollahi, 2015. "An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics". *Additive Manufacturing*. Vol 8, p. 36–62.
- Zhang, Y.M.; Chen, Y.; Li, P.; Male, A.T., 2003. "Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 135, p. 347–357.
- Zhang, Y.; Cheng, F.; Wu, S., 2021. "Improvement of pitting corrosion resistance of wire arc additive manufactured duplex stainless steel through post-manufacturing heat-treatment". *Materials Characterization*. Vol. 171, p. 110743.
- Zhang, D.; Liu, A.; Yin, B.; Wen, P., 2022. "Additive manufacturing of duplex stainless steels - A critical review". *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 73, p. 496-517.
- Zhang, X.; Wang, K.; Zhou, Q.; Ding, J.; Ganguly, S.; Marzio, G.; Yang, D.; Xu, X.; Dirisu, P.; Williams, S.W., 2019. "Microstructure and mechanical properties of TOP-TIG-wire and arc additive manufactured super duplex stainless steel (ER2594)". *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 762, p. 138097.
- Xiong, J.; Li, Y.; Li, R.; Yin, Z., 2018. "Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMA-based additive manufacturing". *Journal of Materials Processing Technology*, v. 252, p. 128–136.
- Wu, B.; Pan, Z.; Ding, D.; Cuiuri, D.; Li, H.; Xu, J.; Norrish, J., 2018. "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement". *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 35, p. 127–139.
- Wu, W.; Xue, J.; Wang, L.; Zhang, Z.; Hu, Y.; Dong, C., 2019. "Forming Process, Microstructure, and Mechanical Properties of Thin-Walled 316L Stainless Steel Using Speed-Cold-Welding Additive Manufacturing". *Metals*. Vol. 9, p. 109.

## 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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