

# Fabricação de superfícies via manufatura aditiva – deposição por energia direcionada (MA-DED) com pó de aço ferramenta H13 atomizado no Brasil

Rafael Ramos<sup>1</sup>, Naiara V. Le Sénéchal<sup>1</sup>, Helder P. Vicente<sup>2</sup>, Paulo P. O. L. Dyer<sup>2</sup>, Andersan S. Paula<sup>1</sup> e Getúlio Vasconcelos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia - IME, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>2</sup>Instituto de Estudos Avançados (IEAv), Divisão de Fotônica, São José dos Campos, SP, Brasil

\*ramos\_rr@ime.eb.br

**Resumo:** Pó de aço H13, pela primeira vez atomizado em água em uma empresa brasileira, foi depositado por manufatura aditiva (MA) via deposição por energia direcionada (DED), sobre chapa laminada de aço microligado. Este estudo objetivou avaliar os aspectos microestruturais, composicionais e mecânicos ao longo da seção transversal das camadas de depósitos formadas, como também na interface substrato-primeira camada, por meio de microscopia óptica e eletrônica de varredura, assim como análise da microdureza. As deposições resultaram em uma morfologia com grãos colunares próximo ao substrato (crescimento epitaxial) e uma redução da extensão colunar, acompanhada de mudanças na microdureza, em áreas reaquecidas nas interseções decorrentes do empilhamento de camadas, cuja sobreposição envolveu a refusão parcial, e o tratamento térmico in situ do volume adjacente às zonas refundidas. Adicionalmente, verificou-se uma diluição química e geométrica com profundidade adequada na interface primeira camada-substrato, garantindo a ancoragem do depósito no substrato.

**PALAVRAS-CHAVE:** Manufatura Aditiva; Deposição Por Energia Direcionada; Aço Ferramenta H13; Microestrutura; Diluição.

**Abstract:** H13 steel powder, for the first-time water atomized in a Brazilian company, was deposited through Direct Energy Deposition (DED) additive manufacturing (AM) over a microalloyed hot rolled steel sheet. This study aimed to evaluate microstructural, compositional, and mechanical aspects along deposited layers cross section, as well as at the substrate-first layer interface, using optical and scanning electron microscopy, as well as microhardness analysis. The depositions resulted in a morphology with columnar grains close to the substrate (epitaxial growth) and a reduction in columnar extension, accompanied by changes in microhardness, in reheated areas at the intersections derived from layers stacking, which overlap involved partial layer remelting, and the in-situ heat treatment of remelted zones adjacent volume. In addition, adequate geometric and chemical dilution depth at the first layer-substrate interface anchoring the deposit to the substrate was observed.

**KEYWORDS:** Additive Manufacturing; Direct Energy Deposition; H13 Tool Steel; Microstructure; Dilution.

## 1. Introdução

O aço H13, amplamente definido em normas internacionais AISI/SAE, cuja classificação e composição química (vide Tabela 1) foi recepcionado pela Norma ABNT NBR NM 122-1 [1], é muito útil na fabricação de mol-

des e matrizes para fundição e injeção, devido à estabilidade de suas propriedades em alta temperatura [2, 3, 4]. Porém, os métodos tradicionais de fabricação tomam bastante tempo, são caros [2] e dependem de uma sequência com diversos passos de fabricação mecânica e tratamentos térmicos [4].

**Tabela 1 – Composição química do aço H13**

	Elementos (% em peso)							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
Mín	0,32	0,20	0,80	4,75	1,10	0,80	-	-
Máx	0,45	0,50	1,20	5,50	1,75	1,20	0,03	0,03

**Fonte:** ABNT NBR NM 122-1 [1].

A manufatura aditiva (MA), aí incluída a deposição por energia direcionada (DED), está ganhando a atenção da indústria de ferramental em virtude de suas potencialidades para fabricar peças com geometrias customizadas, complexos sistemas de refrigeração e materiais com gradiente funcional (“*functionally graded materials*” – FGM) [2, 5]. Dentre as técnicas de MA, a DED é capaz de produzir peças de maior dimensão [6] com uso de braços robóticos que garantem liberdade de movimento em variadas direções [7]. Entretanto, compreender as peculiaridades do processo e suas relações com as propriedades das peças produzidas é um desafio [2, 7].

Partes produzidas por MA/DED normalmente apresentam uma estrutura celular, com grãos equiaxiais em áreas reaquecidas (interseção de camadas) e morfologia de grãos colunares nas porções inferiores (crescimento epitaxial), em função dos gradientes de temperatura e do fluxo de calor durante o processo, com diferentes propriedades associadas a cada uma dessas regiões [3].

A deposição de trilhas lateral ou verticalmente superpostas pode levar a zonas refundidas ou ao menos termicamente afetadas (ZTA), nas quais tratamentos térmicos podem ocorrer [8]. Por sua vez, a fusão na deposição também gera uma profundidade de diluição camada-camada ou camada-substrato garantindo a ligação física entre estas, bem como sua interação química. Tal situação é influenciada pelos parâmetros de processo, pela convecção nas poças de fusão e pela solubilidade entre os elementos (principalmente na interface camada-substrato) [9].

Assim, o propósito deste estudo foi avaliar, a partir do seccionamento transversal de amostras fabricadas por MA/DED com densidade de energia fixa, as interações entre as primeiras camadas de um depósito e o substrato.

## 2. Material e Métodos

O material em estudo para a fabricação por MA/DED deste trabalho é um pó de aço H13 atomizado em água, até onde se sabe pela primeira vez produzido em uma empresa brasileira [10].

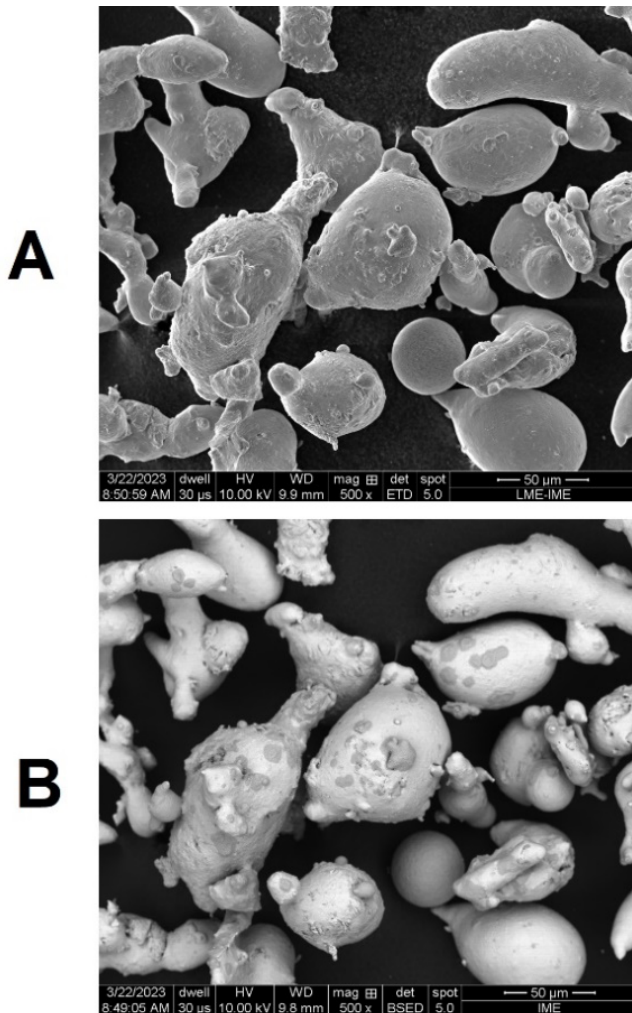
O material foi utilizado em uma tentativa de estimular a independência tecnológica nacional e reduzir custos, se considerados os altos preços envolvidos na importação de tal pó fabricado por atomização a gás em empresas no exterior.

Antes de ser processado no equipamento de MA/DED, tal pó foi peneirado para estar entre 53  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$  (peneiras Mesh #270 e #100) e teve suas partículas analisadas por meio de interpretação de micrografia com uso do ImageJ gerando resultados de  $D_{50} = 68 \mu\text{m}$  e  $D_{90} = 128 \mu\text{m}$ . Além disso, a morfologia do pó se mostrou irregular, com algumas partículas esféricas em meio a diversas outras com formato de pêra (“*pear like*”) [11], conforme ilustrado na Figura 1, aspectos que aparentemente não comprometeram o fluxo de alimentação ou mesmo a densificação da deposição no sistema MA/DED.

As deposições foram realizadas sobre substratos de aço com baixo carbono, com teor relevante de Manganês e microadição de Molibdênio, cuja composição pode ser vista na Tabela 2 [12], em um laboratório de fabricação do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), órgão do Centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA) e parceiro em projetos do Instituto Militar de Engenharia (IME). Utilizou-se um aparato produtivo não-proprietário, ilustrado na Figura 2, resultado da integração de diversos componentes cuja parametrização inicial foi discutida em outro trabalho [10], em mais uma tentativa de estímulo à independência tecnológica nacional.

O pó metálico foi conduzido por gás inerte Argônio (fluxo de 6 L/min, taxa de alimentação de 7,2 g/min) e fundido por um feixe de laser (1282,5 W de potência e 5 mm/s de velocidade de varredura) durante a deposição, gerando a superposição de diversas trilhas e permitindo a fabricação de amostras com superfícies de uma, duas e três camadas superpostas ao substrato, conforme ilustrado na Figura 3. Os parâmetros mencionados foram definidos após diversos testes com variadas combinações entre velocidades de varredura, potências do laser e taxas de alimentação de pó, entre outros [10].

**Figura 1** - Micrografias MEV de partículas do pó de H13: (A) detector SE; (B) detector BSE



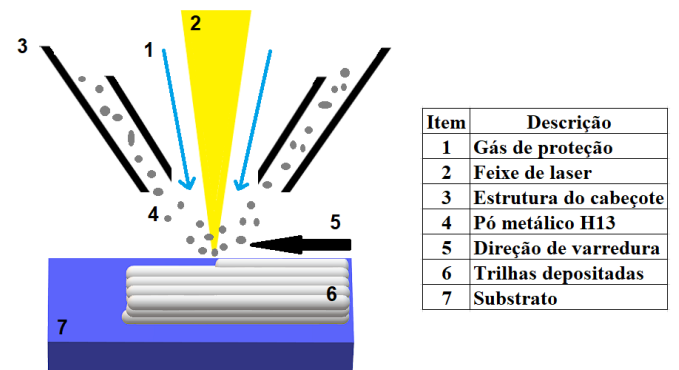
Fonte: O autor.

**Figura 2** - Visão geral do equipamento de deposição: (A) Braço robótico; e (B) Cabeçote com laser e alimentadores de pó



Fonte: O autor.

**Figura 3** - Diagrama esquemático das deposições realizadas



Fonte: O autor.

**Tabela 2** - Composição Química do aço utilizado como substrato

Elementos (% em peso)							
C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
0,082	1,606	0,016	0,008	0,005	0,014	0,009	0,020
Mo	Sn	Al	N	Ti	Nb	V	B
0,155	0,003	0,028	0,006	0,002	0,014	0,005	0,000

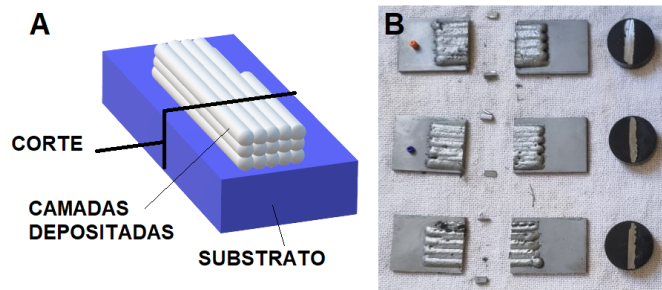
Fonte: Souza (2011) [12].

As amostras foram transversalmente seccionadas, conforme ilustrado na Figura 4, preparadas (lixadas, polidas e quimicamente atacadas com reagentes

Villela e Nital 5%) e avaliadas por meio de microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV), esta última associada ao uso de detectores de elétrons

secundários (SE) e retroespalhados (BSE), além da espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS). Também foram realizados ensaios de microdureza Vickers (Hv, 200 gf de carga, 3 a 5 indentações por linha horizontal). As imagens oriundas dos registros micrográficos no MEV do pó metálico e das seções transversais das deposições foram analisadas no software ImageJ quanto à distribuição de tamanho de partícula e a sua espessura, respectivamente.

**Figura 4** - Visão do corte realizado nas amostras depositadas: (A) Desenho esquemático; e (B) Amostras com uma, duas e três camadas após corte e embutimento



Fonte: O autor.

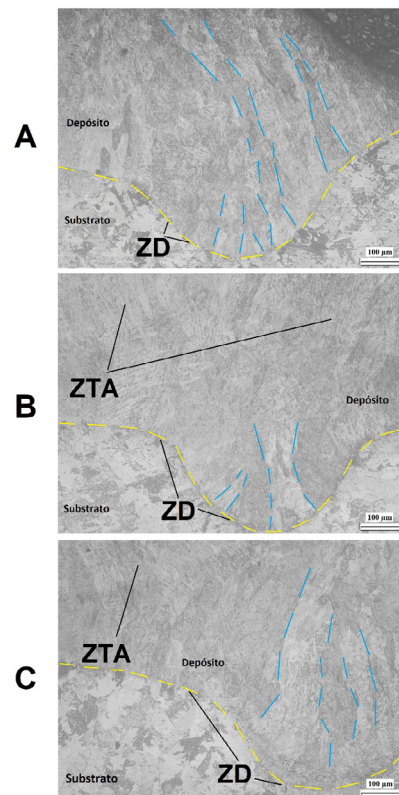
### 3. Resultados

Micrografias resultantes da análise no MO da seção transversal das deposições com uma, duas e três camadas foram avaliadas. São três deposições distintas, conforme se vê na Figura 4B, nas quais escolheram-se para análise micrográfica áreas em que a interação entre depósito e substrato ou entre camadas fosse nítida.

Na Figura 5, verifica-se a zona de diluição (ZD) entre as camadas depositadas e o substrato, região delimitada por linhas tracejadas com orientação próxima à horizontal, defletindo para acompanhar o contorno do cordão de depósito observado, revelando um bom nível de ancoragem e densificação. Além disso, o surgimento de zonas de transição microestrutural é visível nas Figuras 5B e 5C, em comparação à 5A. Estas zonas termicamente afetadas (ZTA) se dão em virtude do fornecimento de calor decorrente da deposição de trilhas lateralmente adjacentes ou superpostas, nas quais o aspecto colunar é reduzido em virtude dos tratamentos térmicos *in situ* [5, 8].

Na Figura 6, com um aumento um pouco maior, o aspecto colunar dos grãos próximos à interface depósito-substrato, decorrente do crescimento epitaxial, se torna ainda mais claro do que na Figura 5. Em ambos os casos, com linhas de orientação tendendo à vertical para sua indicação, sem a intenção de tais linhas demarcarem todos os contornos existentes. Ademais, ao se comparar as três deposições, é possível notar a redução da morfologia colunar dos grãos, assim como seu coalescimento nas amostras com mais camadas de depósitos, bem como a predominância do aspecto colunar em posições superiores (como na Figura 6C), em que novas camadas se depositaram. Atribuem-se tais mudanças ao maior fluxo de calor nas deposições com mais camadas ao fato de nesses casos as camadas inferiores já estarem depositadas e suscetíveis à ação térmica das deposições posteriores e, finalmente, por tal ação térmica gerar microestruturas localmente heterogêneas na MA, a depender do ciclo térmico desenvolvido em cada posição [13].

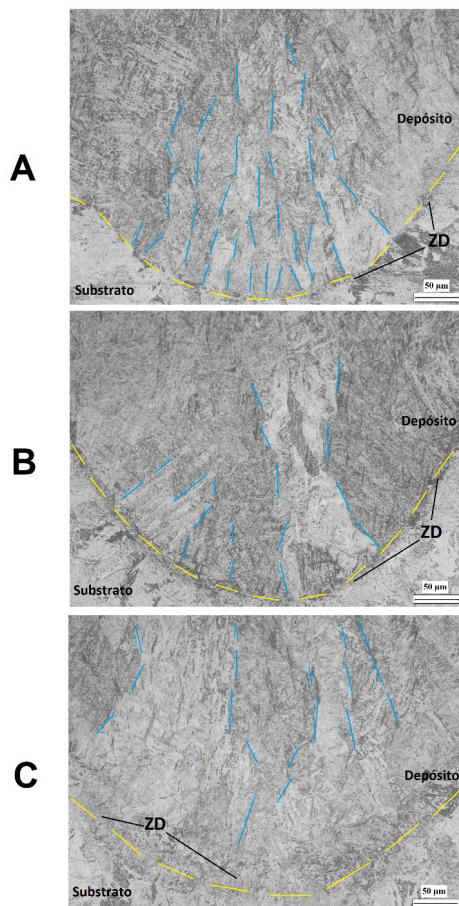
**Figura 5** - Micrografias obtidas via MO, campo claro. Camadas depositadas: A, uma; B, duas; e C, três



Fonte: O autor.

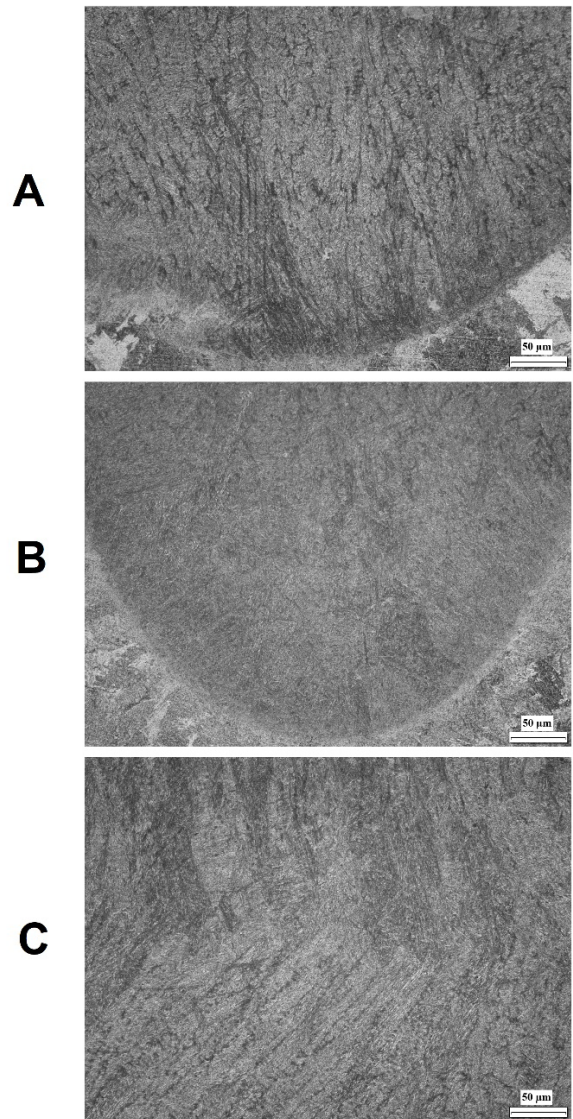
Por sua vez, a observação por meio de MO, em campo escuro, é mostrada na Figura 7, reforçando a visualização da microestrutura colunar dos grãos já mencionada (A) e a ocorrência de efeitos térmicos entre camadas adjacentes; em (B), a porção superior do cordão da primeira camada apresenta algumas mudanças morfológicas; em (C), apresenta-se a zona de transição entre a segunda e a terceira camadas, na amostra em que foram depositadas três camadas. Na Figura 7C, também é notável a mudança da direção de crescimento dos grãos na microestrutura, fruto das mudanças no fluxo de calor por ocasião da deposição de camadas superiores à previamente depositada, já que os grãos crescem na direção oposta ao gradiente térmico presente na poça de fusão em solidificação [14].

**Figura 6** - Micrografias obtidas via MO, campo claro, aumento superior. Camadas depositadas: A, uma; B, duas; e C, três



**Fonte:** O autor.

**Figura 7** - Micrografias obtidas via MO, campo escuro. Camadas depositadas: A, uma; B, duas; e C, três



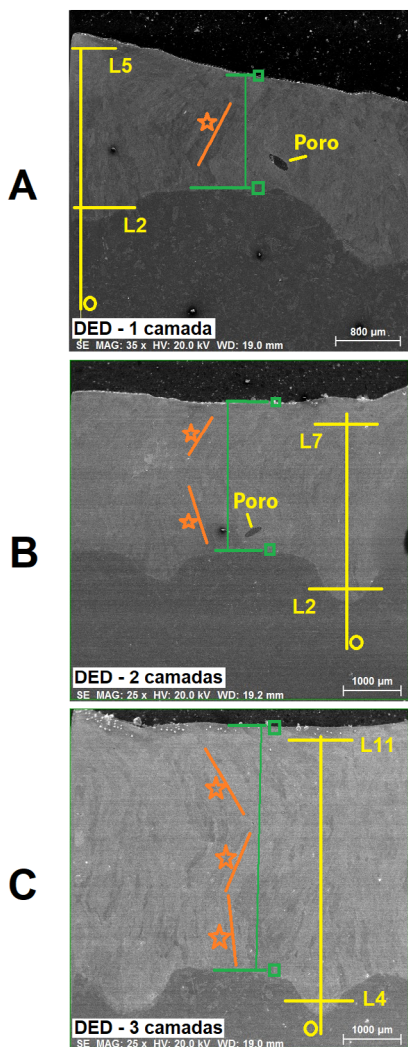
**Fonte:** O autor.

Já nas micrografias obtidas via MEV com baixo aumento (Figura 8), é possível confirmar o fato de a solidificação ser guiada pelo fluxo de calor [14] e assim ser modificada pelo número de camadas e estratégia de deposição, conforme indicam linhas auxiliares marcadas com estrelas, desenhadas sobre as imagens acompanhando o direcionamento da frente de solidificação na microestrutura. Ademais, um bom nível de densificação e ancoragem no substrato são confirmados, apesar da presença de alguns poucos vazios

(Figuras 8A e 8B). Também não se verifica qualquer evidência do defeito de “balling” [6], o qual havia sido observado em trabalhos anteriores com o pó metálico e o aparato produtivo utilizado, porém em outras configurações [10], indicando uma melhora na seleção dos parâmetros produtivos utilizados.

Outro aspecto visível na Figura 8 é a existência de regiões de maior penetração do depósito sobre o substrato formando os já mencionados cordões, regiões relacionadas à porção central do feixe de laser durante a varredura, cuja ação térmica gradualmente diminui em posições que se distanciam desta linha central.

**Figura 8** - Micrografias obtidas via MEV, baixo aumento. Camadas depositadas: A, uma; B, duas; e C, três



Fonte: O autor.

Também foram identificadas na Figura 8, por meio da marcação de um pequeno círculo na base, linhas verticais cortadas por linhas horizontais com indicações de números e letras (L2 e L5 em 8A; L2 e L7 em 8B; e L4 e L11 em 8C). Elas servem de referencial para um estudo de microdureza Vickers ao longo do perfil vertical de cada amostra em estudo, o qual será apresentado adiante, destacando-se que foram feitas medidas em patamares horizontais distantes 0,5 mm uns dos outros, iniciando-se na linha 1, em posição totalmente pertencente ao substrato (L1, não apresentada). As linhas representadas na Figura 8 referem-se aos perfis horizontais nos quais as indentações passaram a ocorrer em regiões dos depósitos (L2 em A e B e L4 em C), bem como às posições finais de maior altura avaliada na região dos depósitos (L5 em A; L7 em B; e L11 em C).

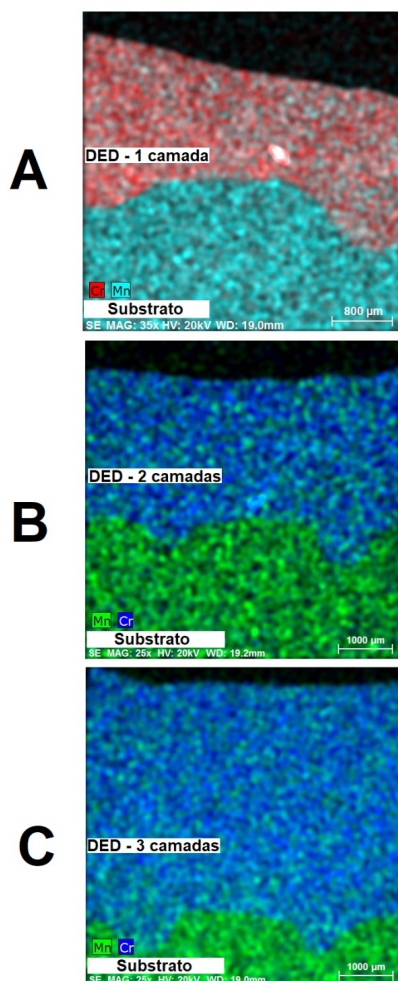
Além disso, foi feito tratamento das micrografias apresentadas na Figura 8 com uso do software ImageJ, permitindo estimar o crescimento das camadas como tendo 1,51 mm na amostra com uma camada, 2,55 mm na amostra com duas e 4,22 mm na deposição com três camadas (respectivamente nas Figuras 8A, 8B e 8C). Tais medidas foram feitas da região entre dois cordões até a superfície superior do depósito, as quais estão identificadas por linhas horizontais, acompanhadas de quadrados, representadas nas imagens da Figura 8. Destaca-se que o objetivo foi avaliar a estimativa do crescimento do depósito e evidenciar que o aumento do número de camadas depositadas, com os parâmetros utilizados, resultava em um crescimento efetivo do depósito. A definição de um valor mais representativo da espessura total de depósito exigiria a realização de um número maior de medidas, com imagens de regiões variadas, haja vista a possibilidade de variação na espessura do depósito em regiões diferentes, aspectos que não foram objeto do presente estudo.

Um mapeamento químico elementar em uma micro-área por EDS/MEV foi realizado com o objetivo de distinguir as regiões do substrato e do depósito, bem como para identificar a extensão da zona de diluição, região na qual se espera a mistura de elementos de liga do substrato e do depósito. Diante desses objetivos, apesar de existirem outros elementos de liga nessas duas porções de investigação, foram escolhidos para observação

os elementos de liga Cr e Mn, por suas composições se destacarem, em termos percentuais, no depósito (Cr, aproximadamente 5%) e no substrato (Mn, aproximadamente 1,6%), sendo sua participação pequena na outra parte (Cr 0,02% no substrato; Mn esperado de aproximadamente 0,35% no depósito), conforme pode ser verificado nas Tabelas 1 e 2, contraste este que permitiu uma melhor distinção entre depósito e substrato.

Os resultados do mapeamento químico por EDS estão apresentados na Figura 9, indicando a existência de domínios bem definidos para as duas porções do material (substrato e depósito) e mostrando que a região de diluição não era extensa, bem como confirmando uma adequada penetração do depósito sobre o substrato.

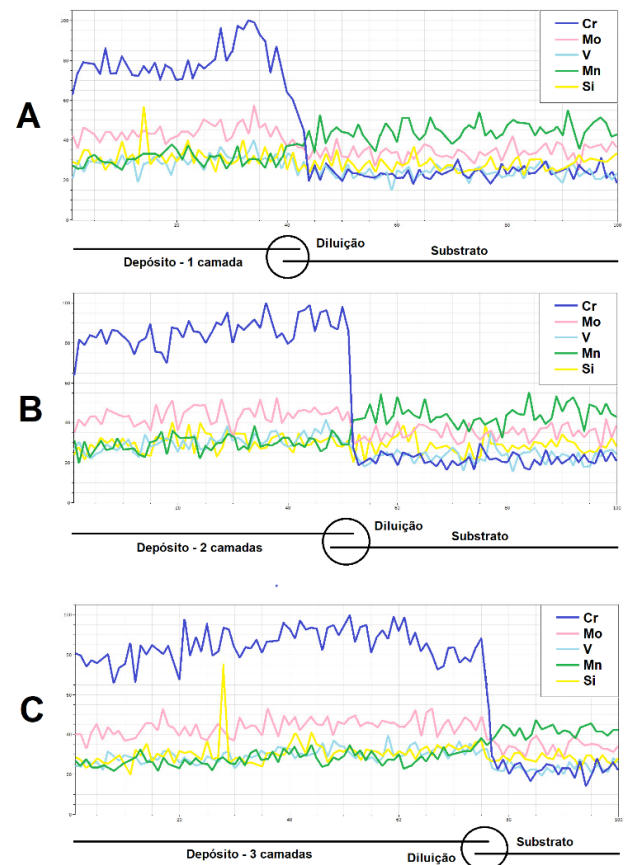
**Figura 9** - Mapeamento de áreas por EDS. Camadas depositadas: A, uma; B, duas; e C, três



Fonte: O autor.

Também foi realizado um mapeamento químico elementar em linha por EDS/MEV (Figura 10), partindo-se do depósito em sentido ao substrato, o que confirmou a existência de dois domínios com composição química relativamente homogênea (depósito e substrato), separados por uma porção de transição em que a composição química suavemente mudou. Isso revelou um bom nível de diluição química, além de ter confirmado que tal mistura química ocorreu em uma extensão limitada [15], tendo esse padrão sido observado em todas as três condições em estudo. Ademais, os mapeamentos em linha (Figura 10) revelaram a evolução dos demais elementos de liga não selecionados nos mapeamentos de microáreas da Figura 9, além de corroborarem a ideia já mencionada de que o Cr e o Mn se prestavam a indicar as regiões de cada um dos domínios (depósito e substrato) e a zona de transição entre eles.

**Figura 10** - Mapeamento de linha por EDS. Camadas depositadas: A, uma; B, duas; e C, três



Fonte: O autor.

Finalmente, a investigação com ensaio de microdureza Vickers (Hv), seguindo os perfis verticais já mencionados, identificados na Figura 8 por meio das linhas verticais com marcação de círculo em sua base, pode ser verificada na Figura 11, na qual estão apresentados os valores médios Hv e os desvios padrão (DP) para cada uma das linhas horizontais ao longo dos perfis verticais já mencionados. Verifica-se um aumento de Hv no sentido a partir do substrato em direção às porções superiores do depósito de H13, apesar de uma leve redução nos valores da dureza Hv em algumas linhas de medida, sendo o DP uma ferramenta para observar como as propriedades se diferenciam em regiões adjacentes devido à influência térmica da deposição sequencial de trilhas [2, 3], acima ou lateralmente, assim como as regiões influenciadas pela diluição. Além disso, grandes valores de DP marcaram a linha em que os depósitos se iniciavam, pois se referiam às linhas em que havia indentações na região de penetração do depósito no substrato (cordões, já mencionados), assim como nas porções de substrato adjacentes aos cordões (L2, L2 e L4, respectivamente, nas Figuras 11A, 11B e 11C, também ilustradas na Figura 8).

## 4. Conclusões

Os depósitos de H13 contendo uma, duas e três camadas apresentaram um bom nível de ancoragem e interação com o substrato, assim como regiões de diluição espacialmente limitadas e com transição suave de composição química na interface substrato-depósito.

Além disso, ocorreu um desenvolvimento direcional da microestrutura após a solidificação, relacionado ao crescimento epitaxial dos grãos colunares e ao fluxo de calor ao longo da solidificação das camadas. Ademais, a influência térmica de trilhas lateralmente adjacentes ou superpostas ficou retratada na variação dos valores de microdureza ao longo do perfil vertical e também em uma mesma linha horizontal, assim como nas mudanças de morfologia da microestrutura, confirmando um padrão heterogêneo de microestrutura e propriedades em amostras “como fabricadas” por MA.

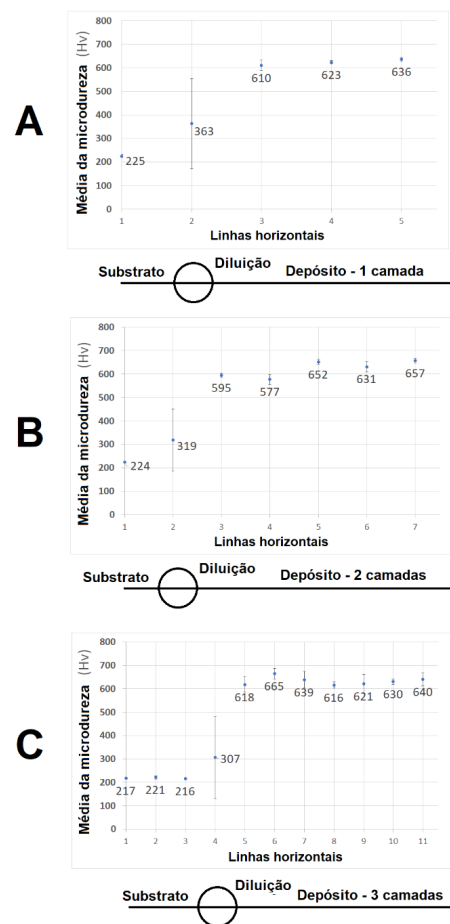
Avalia-se que o estudo abre espaço para uma continuação por meio de análise similar, mas com amostras

submetidas a rotas de tratamento térmico, buscando homogeneizar microestrutura e propriedades ao longo do material depositado.

## Agradecimentos

Os autores agradecem: a Villares Metals, pelo oferecimento de aço H13 convencional, o qual foi atomizado; o IEAv e o IME, pela estrutura produtiva e de caracterização de materiais; o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), pelo apoio no corte e preparação dos substratos; a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (Pró-Defesa IV e PROEX), pelo suporte financeiro.

**Figura 11** - Resultados médios de microdureza Vickers (Hv) e seus desvios padrão (DP). Camadas depositadas: A, uma; B, duas; e C, três



Fonte: O autor.

## Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 122-1**: Aços ferramentas – parte 1: Classificação, designação e composição química. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [2] ZHAO, X. *et al.* The effect of thermal cycling on direct laser-deposited gradient H13 tool steel: Microstructure evolution, nanoprecipitation behavior, and mechanical properties. **Materials Today Communications**, [s. l.], v. 25, 101390, 2020.
- [3] JOSHI, S. *et al.* Solidification and microstructure evolution in additively manufactured H13 steel via directed energy deposition: Integrated experimental and computational approach. **Journal of Manufacturing Processes**, Amsterdam, v. 68, p. 852-866, 2021.
- [4] KANG, M. *et al.* The effects of annealing temperature and cooling rate on carbide precipitation behavior in H13 hot-work tool steel. **Journal of Alloys and Compounds**, Amsterdam, v. 627, p. 359-366, 2015.
- [5] BOHLEN, A. *et al.* Additive manufacturing of tool steel by laser metal deposition. **Procedia Cirp**, Amsterdam, v. 74, p. 192-195, 2018.
- [6] DEBROY, T. *et al.* Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, Amsterdam, v. 92, p. 112-224, 2018.
- [7] LIMA, M. S. F. Processo de AM por adição de lâminas, por deposição com energia direcionada e híbridos. In: VOLPATO, N. (org.). **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. São Paulo: Blücher, 2017. p. 271-287.
- [8] AMIRABDOLLAHIAN, S. *et al.* Tempering behavior of a direct laser deposited hot work tool steel: Influence of quenching on secondary hardening and microstructure. **Materials Science and Engineering: A**, Amsterdam, v. 814, 141126, 2021.
- [9] PELLIZZARI, M. *et al.* Optimizing direct laser metal deposition of H13 cladding on CuBe alloy substrate. **Surface & Coatings Technology**, Amsterdam, v. 432, 128084, 2022.
- [10] RAMOS, R. *et al.* Parametrização de equipamento de deposição por energia direcionada utilizando pó de aço ferramenta H13 atomizado em água. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 76., 2023, São Paulo. **Anais [...]**. [S. l.]: ABM, 2023. p. 2473-2483. DOI: 10.5151/2594-5327-39934.
- [11] BRAGA, V. *et al.* Microstructural and mechanical aspects of laser metal deposited H13 powder for die repair. **Materials Today Communications**, Amsterdam, v. 29, 102945, 2021.
- [12] SOUZA, A. C. A. **Produtos de transformações de fases obtidos sobre distintas condições de resfriamento em aço baixo carbono com microadição de molibdênio laminado a quente**. 2011. Projeto de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2011.
- [13] GE, J. *et al.* Investigation on H13 buildups produced with wire arc additive manufacturing: Deposition strategies-induced microstructural evolution and mechanical performances. **Journal of Alloys and Compounds**, Amsterdam, v. 860, 157893, 2021.
- [14] YANG, X. *et al.* Microstructure evolution and mechanical properties of H13 steel produced by Selective Electron Beam Melting. **Materials Characterization**, Amsterdam, v. 203, 113053, 2023.
- [15] DASS, A.; MORIDI, A. State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. **Coatings**, Basel, v. 9, n. 7, n. 418, 2019.