

Insper

Plano de Trabalho:

**Estudo de caso: Otimização do processo de deposição de metais
com energia direcionada (DED)**

André Luis Silva Lopes

Orientadora: Profa. Dra. Joice Miagava

Coorientador: Prof. Dr. Raphael Galdino dos Santos

São Paulo

Maio/2021

Sumário

| | |
|-------------------------------------|----|
| 1. Introdução..... | 3 |
| 2. Objetivos..... | 4 |
| 3. Metodologia..... | 5 |
| 4. Cronograma e Conclusão | 8 |
| 5. Referências bibliográficas | 10 |

1. Introdução

A manufatura híbrida (*Hybrid Manufacturing – HM*) tem se destacado como uma tecnologia emergente para a fabricação de peças com alta complexidade geométrica [1]. Ela representa a união da usinagem com a manufatura aditiva (*Additive Manufacturing – AM*) e, desta forma, combina as vantagens de cada técnica.

A AM se caracteriza por produzir peças de alta complexidade geométrica com menor perda de material do que a usinagem. No entanto, é um processo lento e que resulta em um acabamento superficial de baixa qualidade. Esse acabamento é resultado da sobreposição de camadas com diferentes taxas de resfriamento, que causa um efeito de “escada” e acarreta a imprecisão da geometria.

A usinagem, em contraposição, apresenta um baixo tempo de ciclo, alta repetibilidade e ótimo acabamento superficial. No entanto, o volume de matéria-prima necessária é elevado, pois até 98% do material é removido até que seja obtida a peça final [2].

A HM permite, portanto, fabricar uma peça com alta complexidade geométrica por AM, com a minimização da perda de material, e o sobremetal pode ser removido em um passe de acabamento de usinagem para obter a geometria especificada no projeto, otimizando e por vezes reduzindo os custos do processo de manufatura subtrativa [3].

Diversos métodos compõem o espectro da AM. Dentre os quais, o processo por deposição com energia direcionada (*Direct Energy Deposition – DED*) se destaca pela possibilidade de trabalhar dentro de uma máquina ferramenta convencional e pela possibilidade de utilizar uma gama de materiais como matéria-prima [4, 5, 6]. A Figura 1 esquematiza o cabeçote utilizado no método que consiste em depositar o pó metálico juntamente ao laser e um gás de proteção à oxidação.

Contudo, o DED é uma tecnologia recente e, para o desenvolvimento de máquinas híbridas, é necessária uma caracterização completa das peças a serem fabricadas. Essa caracterização visa compreender quais parâmetros devem ser alterados no processo para a sua otimização.

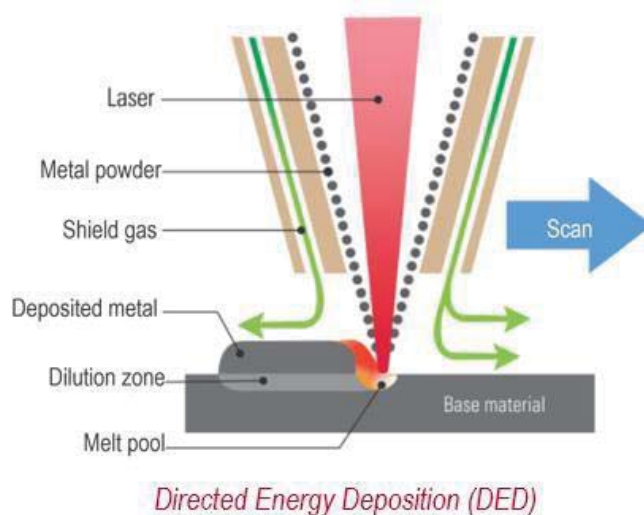


Figura 1: Esquemático da deposição de pó pelo método de energia direcionada (DED).

2. Objetivos

Este trabalho será realizado em parceria com as Indústrias Romi S.A., tendo em vista que esta possui uma máquina para HM recentemente desenvolvida. Tal máquina, foi criada a partir da plataforma ROMI DCM 620-5X, um centro de usinagem capaz de trabalhar com cinco eixos, onde foi adicionado um cabeçote laser que torna possível o processo de AM [7]. Esse centro de usinagem foi disponibilizado pelo fabricante com o intuito de gerar amostras para a pesquisa descrita. Assim, os objetivos desse trabalho são:

- Fabricar novas amostras baseadas nos resultados obtidos em estudo anterior, buscando realizar alterações em parâmetros que permitam uma qualidade melhor na *feature* final, explorando principalmente o parâmetro avanço e suas implicações;
- Otimizar os parâmetros para a produção de *features* (pequenas peças) com os materiais Aço Inox 316L e Aço Ferramenta H13, para obter intervalos de potência e avanço que resultem em peças com a qualidade desejada;
- Consolidar uma matriz que contemple a relação entre variáveis qualitativas (característica da *feature* final) e aspectos quantitativos que se dizem respeito as receitas elaboradas para cada material utilizado; Avaliar as possibilidades de utilização de outros materiais como substrato, visando uma possível melhor viabilidade econômica.

Em suma, a problemática por trás do estudo é a otimização do processo de deposição de metais com energia direcionada. Ou seja, o estudo visa através de estratégias estudar, testar e comprovar meios de tornar o DED um método de fabricação ainda mais atraente para indústria e que se obtenha como resultado peças que pelo menos mantenham as propriedades mecânicas intrínsecas do material em questão. Ademais, ainda através da experimentação e teoria é possível determinar padrões a serem seguidos que envolvam todos os parâmetros envolvidos no processo. Com isso, é possível criar uma lógica entre material utilizado e parâmetros de manufatura; algo semelhante ao que já ocorre com o plano de processos na indústria. Dessa forma, o DED além de otimizado, adequando sua capacidade a cada demanda de trabalho, é também padronizado como qualquer outro processo de manufatura.

3. Metodologia

Os testes de deposição serão feitos com aço inoxidável 316 L e aço ferramenta H13, materiais de grande importância na engenharia em aplicações variadas em que exigem alta resiliência do material [2]. Testes com estes mesmos aços já foram realizados pelo presente grupo no período entre 2018 e 2021 [8], os quais geraram resultados importantes para a compreensão do método de manufatura DED.

Na atual proposta de trabalho, portanto, o objetivo é fabricar amostras com os mesmos parâmetros de deposição do último teste com exceção do avanço. A ideia consiste em selecionar, dentre as últimas receitas para cada material, *features* previamente classificadas como “Boa”, “Média” e “Fraca” (exemplos nas Figuras 2 à 4) e alterar o avanço para estudar o seu impacto no processo. Tal classificação foi definida com base em aspectos das peças, como a adesão entre camadas e quantidade de poros.

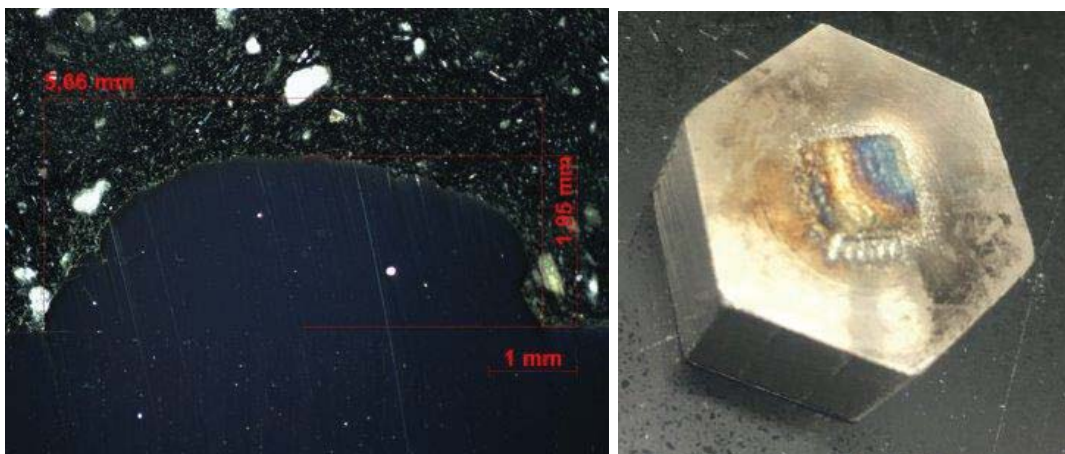


Figura 2: “Boa” - Potência: 320 W; Vazão: 3,3 g/min; Shield Gás: 7 L/min; Avanço: 6 mm/s.

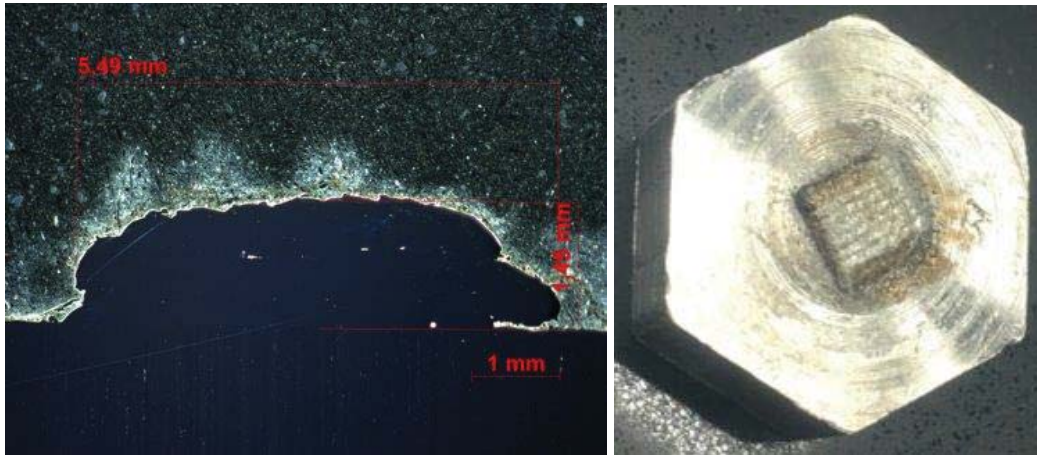


Figura 3: “Média” - Potência: 300 W; Vazão: 8 g/min; Shield Gás: 7 L/min; Avanço: 6 mm/s.

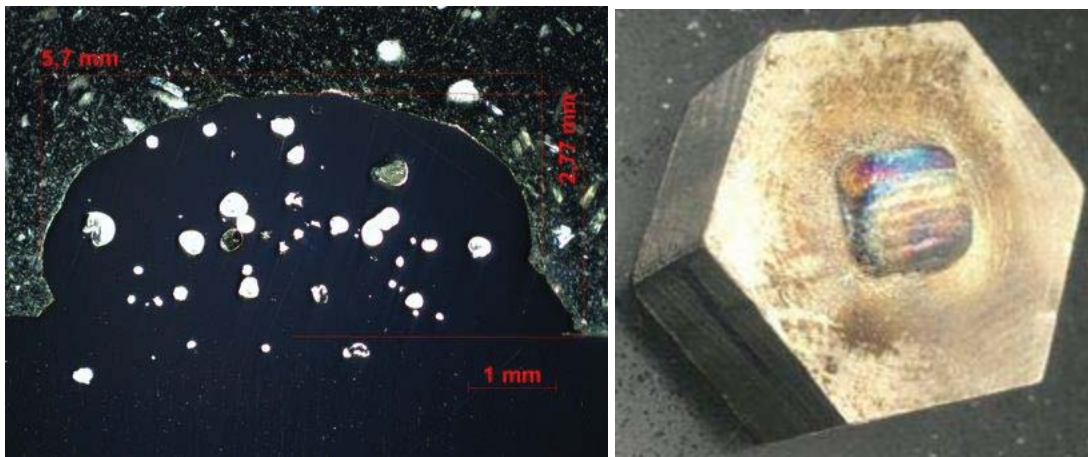


Figura 4: “Fraca” - Potência: 340 W; Vazão: 3,3 g/min; Shield Gás: 7 L/min; Avanço: 6 mm/s.

Essa avaliação do avanço é necessária para a consolidação de uma matriz formada pela conjuntura entre as receitas, compostas por parâmetros, e a classificação da peça final em “Boa”, “Média” e “Fraca”. Tal matriz está parcialmente consolidada, no entanto existem lacunas que necessitam ser preenchidas. Dessa forma, o processo exposto anteriormente visa justamente gerar os valores necessários para completar as lacunas referentes a este parâmetro (avanço).

Como o supracitado, as peças serão fabricadas a partir de alterações sistemáticas da velocidade de avanço, mantendo a potência constante. Serão então selecionadas receitas de *features* classificadas com a lógica “Boa”, “Média” e “Fraca” concebidas com a velocidade de avanço 6 mm/s. A estratégia de escolher as receitas com esse avanço deriva do fato de que os testes anteriores mostraram que as *features* com menos defeitos são resultantes de avanço em torno de 6 mm/s.

Sabe-se que, quanto maior avanço, menor é deposição de energia e de pó, os quais afetarão nas características das camadas bem como na adesão entre elas.

Contudo, não é conhecido o quanto cada uma dessas variáveis (energia e quantidade de pó) é afetada pelo avanço. Com isso, o intuito é responder as perguntas: “Como o avanço influencia no processo?” e “O avanço pode mudar a característica da *feature*, tornando uma peça antes classificada como “Fraca” em “Média”; ou ainda elevar a qualidade de uma peça “Boa”?”.

Para avaliar o processo de deposição, a macro e microestrutura serão avaliadas. Em relação a macroestrutura, sua análise deriva-se da visualização das *features* produzidas com o auxílio de uma lupa estereoscópica. Dessa forma, a porosidade e os cordões de deposição podem ser averiguados visto que esses aspectos traduzem de forma pragmática parte do que se diz respeito a qualidade da peça produzida. Ademais, a análise dimensional dos cordões tem a finalidade de otimizar a altura e largura destes frente a velocidade de avanço. Por sua vez, a análise da porosidade, objetiva entender os efeitos e a relação entre a potência do laser e o avanço no que tange a energia disponível por seção e sua consequência da fusão parcial ou completa do pó depositado.

Já em relação a microestrutura, será utilizada a difração de raios X (DRX) nas peças. Isso porque as fases cristalinas do material também são determinantes para as propriedades do material. Um aspecto que se visa detectar é o fato de que a temperatura combinada à atmosfera pode induzir a transformações de fases indesejadas [1, 9] no material, que por sua vez pode apresentar comportamento diferente devido à presença dessas na estrutura do material. Além disso, essa técnica permitirá, ainda, revelar possível anisotropia devido à extração direcional de calor.

A partir da análise com o DRX é possível ter indicações sobre alterações significativas na composição química do material. Se houver perdas de elementos determinantes para as propriedades da peça, as fases formadas serão diferentes das fases presentes no pó. Essa alteração pode ocorrer, principalmente, devido à oxidação passível de ocorrer ao longo do processo.

Além disso, também será possível analisar visualmente, com auxílio do microscópio, a microestrutura do material depositado fundido e compará-lo ao material do substrato. Ademais, será possível analisar a viabilidade de usar pós de materiais diferentes dos substratos. Um dos potenciais da manufatura híbrida é utilizar o material mais nobre apenas como uma camada de cobertura ou uma parte da peça que tenha a necessidade de ser desse material sobre um substrato mais barato, aferindo assim maior flexibilidade e menor custo a todo o processo de manufatura.

Por fim, a análise de microdureza Vickers será realizada de modo complementar para checar diferenças entre o substrato e o material depositado. Além

disso, dependendo da altura da *feature*, é possível averiguar eventuais mudanças conforme as camadas superiores vão sendo depositadas.

Em suma, a análise das *features* visa verificar e validar receitas bem-sucedidas, para consolidar uma metodologia padrão, com o auxílio da matriz, de fabricação pelo método DED. Isso posto, a análise mais profunda das propriedades mecânicas e a manufatura de peças mais complexas será feita quando tal metodologia for consolidada. Assim, nos meses finais desse projeto, um planejamento em relação a outros ensaios mecânicos será traçado. Esse planejamento inclui, por exemplo, a definição e fabricação de corpos de prova adequados para tais fins. Esses ensaios mecânicos, entretanto, serão realizados somente no próximo ciclo do projeto (segundo semestre de 2022).

De modo complementar, mas muito importante, um levantamento da literatura será realizado por todo o período do projeto visando principalmente uma verificação teórica de todas as análises feitas nesse período e o embasamento técnico científico de possíveis técnicas ainda não exploradas pelo grupo caso sejam convenientes e necessárias.

4. Cronograma e Conclusão

Para executar todos os processos apresentados nas seções anteriores foi concebido um cronograma (Tabela I) que condensa em atividades macros, o ciclo de trabalho que será desempenhado pelo grupo ao longo de 12 meses para dar continuidade ao estudo da metodologia DED de manufatura aditiva de metais.

Tabela I. Cronograma de trabalho indicando as atividades ao longo dos doze meses.

| Atividade | Mês | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Preparação das peças por deposição | ■ | | | | | ■ | | | | | | |
| Caracterização das peças | | ■ | ■ | ■ | | | ■ | ■ | ■ | | | |
| Planejamento dos Ensaios Mecânicos | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | |
| Ajuste de parâmetros do processo | | | | | ■ | | | | | | | |
| Pesquisa bibliográfica | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | |
| Redação de artigos e relatório | | | | ■ | ■ | | | | | ■ | ■ | ■ |

Assim, a aprovação da bolsa permitirá que todo o processo citado seja realizado dando mais um passo adiante no conhecimento e domínio dessa tecnologia que já muda o paradigma da manufatura na indústria em âmbito mundial. Em suma, o estudo para otimização desse processo pode agregar muito valor na indústria tendo um impacto muito forte em produtividade e custos em toda uma linha de produção que utilize ou possa beneficiar-se desse método de manufatura.

5. Referências bibliográficas

- [1] DU, Wei; BAI, Qian; ZHANG, Bi. **A Novel Method for Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of Metallic Parts**, *Procedia Manufacturing*, 2016, Volume 5, p. 1018 – 1030.
- [2] ALLEN, Jeff. **An Investigation into the Comparative Costs of Additive Manufacture vs. Machine from Solid for Aero Engine Parts**.
- [3] SHIM, Do-Sik; BAEK, Gyeong-Yun; SEO, Jin-Seon; SHIN, Gwang-Yong; KIM, Kee- Poong; LEE, Ki-Yong. **Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process**, *Optics & Laser Technology*, 2016, Volume 86, p.69-78.
- [4] LIU, Junyan; WANG, Xinjian; WANG, Yang. **A complete study on satellite thruster structure (STS) manufactured by a hybrid manufacturing (HM) process with integration of additive and subtractive manufacture**
- [5] KOIKE, Ryo; ASHIDA, Ryo; YAMAZAKI, Keiichi; KAKINUMA, Yasuhiro; AOYAMA, Tojiro; ODA, Yohei; KURIYA, Tatsuhiko; FUJISHIMA, Makoto. **Graphical evaluation method for void distribution in direct energy deposition**, *Procedia Manufacturing*, 2016, Volume 6, p. 105-112.
- [6] CAROLL, Beth E.; OTIS, Richard A.; BORGONIA, John Paul; SUH, Jong-ook; DILLON, R. Peter; SHAPIRO, Andrew A.; HOFMANN, Douglas C.; LIU, Zi-Kui; BEESE, Allison M. **Functionally graded material of 304L stainless steel and inconel 625 fabricated by directed energy deposition: Characterization and thermodynamic modeling**, *Acta Materialia*, 2016, Volume 108, p. 46-54.
- [7] Centro de usinagem DCM 620-5X HYBRID. ROMI. Disponível em: <<http://www.romi.com/produtos/romi-hybrid/>>. Acesso em: 04 jun. 2018.
- [8] HENRIQUES; Ana B. B.; DOS SANTOS, Raphael G.; MIAGAVA, Joice. Relatório final de iniciação tecnológica: Caracterização de materiais para otimização do processo de deposição de metais com energia direcionada (DED), Insper, 2021.
- [9] FUJISHIMA, Makoto; ODA, Yohei; ASHIDA, Ryo; TAKEZAWA, Kotaro; KONDO, Masaki. **Study on factors for pores and cladding shape in the deposition processes of Inconel 625 by the directed energy deposition (DED) method**, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017, Volume 19, p. 200-204.