

DESENVOLVIMENTO PRELIMINAR DE UM CAM PARA MANUFATURA ADITIVA PARA O PROCESSO LMD

Neri Volpato¹

Elis Cassiana Nakonetchnei²

Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), R. Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000 - Campo Comprido, Curitiba - PR, CEP: 81280-340

¹nvolpato@utfpr.edu.br, ²elisan@alunos.utfpr.edu.br

Adriano de Souza Pinto Pereira³

Milton Pereira⁴

Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Caixa Postal 476 - Campus Universitário Trindade, Florianópolis - SC, CEP 88040-900

³adriano.sppereira@gmail.com, ⁴milton.pereira@ufsc.br

Resumo. O princípio de Manufatura Aditiva (AM – Additive Manufacturing) denominado de Deposição por Energia Direcionada possibilita a produção de componentes metálicos. O Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) vem trabalhando nesta área em um processo denominado Laser Metal Deposition (LMD). Para seguir com os estudos, estabeleceu parceria com o Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER) para adequar o sistema RP3 para o planejamento de processo da tecnologia LMD. Este trabalho apresenta os primeiros resultados deste desenvolvimento conjunto. Os resultados obtidos indicam que a utilização do RP3 para o LMD é possível, sendo necessário ainda mais estudos relacionados aos efeitos dos parâmetros de processo sobre o componente fabricado por adição de camada e também novas adequações do sistema.

Palavras chave: Manufatura Aditiva, Planejamento de processo, LMD, Deposição de Metal

1. INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (AM – Additive Manufacturing) vem se consolidando como um processo de fabricação, sendo crescente o interesse nos processos de adição de materiais metálicos nos últimos anos. Entre os princípios de AM que contemplam materiais metálicos existe o de Deposição por Energia Direcionada, sendo que duas versões comerciais pioneiras deste processo são o *Laser Engineered Net Shaping* (LENS) e o *Direct Metal Deposition* (DMD) (Lima, 2017). Normalmente, estes processos são tratados pela descrição de *Laser Metal Deposition* (LMD) (Poprawe, 2011).

Neste contexto, o Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) vem estudando e desenvolvendo um processo LMD, adaptando um cabeçote de deposição em uma célula de processamento dedicada, desenvolvida no próprio laboratório (Gutjahr, 2016). Contudo, o LMP não dispunha de um *software* de planejamento de processo dedicado à tecnologia LMD, sendo assim, se associou ao Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER), que já vem trabalhando há algum tempo em um sistema de planejamento de processo genérico, denominado de RP3 (*Rapid Prototyping Process Planning*) (Volpato e Foggiatto, 2009). Este trabalho apresenta os resultados preliminares deste desenvolvimento conjunto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Definição dos requisitos iniciais da tecnologia LMD

Em termos de dados de trajetória de deposição, a estratégia mais básica utilizada na tecnologia LMD consiste na deposição do contorno das áreas a serem preenchidas, seguida de um preenchimento tipo ziguezague (*raster*) sem as ligações das linhas de *raster*. Neste desenvolvimento em particular, não houve a necessidade de limitar o comprimento dos vetores de varredura (linhas de *raster*), assim como as trajetórias foram limitadas a 2,5 eixos (incremental em Z, relativo a espessura da camada, e contínuo em XY, relativo ao preenchimento).

Uma necessidade inicial para ajustar o processo é a existência de um tempo de retardo/atraso (*delay*) entre o acionamento do laser e o início da movimentação dos eixos lineares. Sem esse ajuste, há uma tendência de geração de defeitos no início de cada nova linha de deposição. O sistema de processamento utilizado é controlado por um comando numérico Siemens Sinumerik 840D sl. Sendo assim, o código G deve ser gerado de acordo com a linguagem deste controle. Ao exportar um arquivo processado, a terminação do arquivo de código-G deve ser .MPF (*Main Program Function*), tornando-o compatível com o sistema Sinumerik. O programa gerado necessita incluir um comando para “ligar

laser”, quando é necessário depositar material, e “desligar laser”, ao final de cada linha de deposição. No sistema utilizado, que é baseado na alimentação de material na forma de pó, somente o laser é comandado durante a execução do componente, enquanto o pó é alimentado continuamente ao longo de todo o processo. Isto gera um grande desperdício de pó, fazendo com que se alcance níveis de aproveitamento de pó (eficiência de deposição mássica) na ordem de somente 20 a 30% em geral, o que se torna inadmissível quando se opera o processo com materiais mais nobres e, conseqüentemente, muito mais caros.

2.2. Descrição do equipamento LMD

O cabeçote de LMD, de configuração coaxial e anelar, se trata do modelo COAX-50-S, fabricado pelo Fraunhofer ILT. A nomenclatura anular se deve à forma da fresta por onde o pó é expelido, gerando assim a deposição coaxial (Toyserkani, 2005). O tamanho máximo de partícula permitido por este sistema é de 108 μm , de modo que todo o pó necessita ser peneirado e qualificado para satisfazer essa condição. Uma fotografia do cabeçote se encontra na Figura 1. Este cabeçote permite um ajuste de aproximadamente 40mm entre o ponto focal do pó e o ponto focal do feixe de laser, se constituindo numa variável adicional importante de otimização do processo. O sistema de alimentação de pó para o cabeçote é baseado em um alimentador de pó sobre disco, modelo PF LC 2/1, da empresa GTV. Como fonte de energia é utilizada uma fonte laser de fibra IPG – YLS 10000, com potência de saída máxima nominal de 10 kW. A óptica utilizada permite concentrar essa energia em um ponto focal de aproximadamente 0,9 mm de diâmetro. O ponto focal do feixe de pó possui pouco mais de um milímetro de diâmetro. Para o processamento, a posição relativa entre o foco do laser e o foco do fluxo de pó pode ser ajustada, bem como sua relação à superfície do substrato.

O conjunto óptico de condicionamento e focagem do feixe de laser, juntamente com o cabeçote de LMD (Figura 1), estão acoplados em um sistema cartesiano de coordenadas, onde o cabeçote se movimenta verticalmente no eixo Z e o corpo de prova se movimenta no plano XY. Esta configuração permite maior estabilidade do fluxo de pó, uma vez que o cabeçote não sofre os deslocamentos bruscos relacionados com a velocidade de processamento. Uma câmera acoplada paralelamente ao cabeçote e alinhada com o eixo óptico de processamento, permite o monitoramento do processo de um ponto de visão coaxial ao feixe de laser. Através dela, o operador consegue inferir sobre as condições decorrentes na poça fundida que é formada pelo laser, dentre outros aspectos e condições relacionadas ao processo.

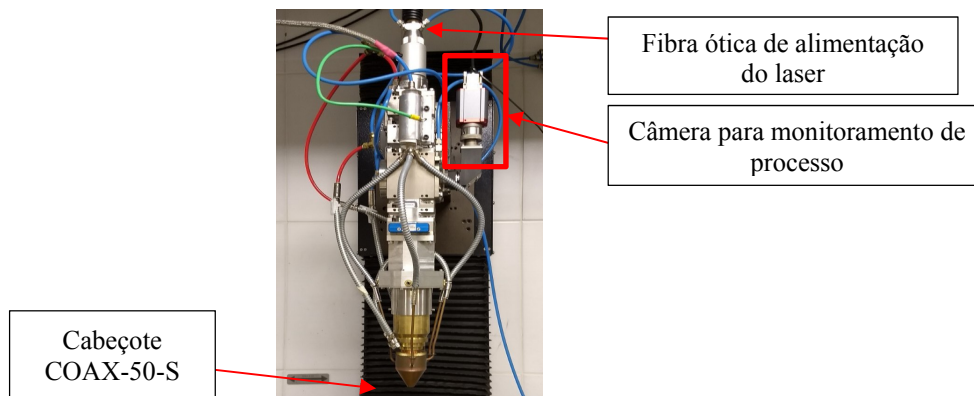


Figura 1. Cabeçote coaxial contínuo anular utilizado

Com intuito de melhorar o controle durante o processo, o laboratório está trabalhando no desenvolvimento de um sistema de monitoramento da temperatura de trabalho na região de deposição do laser. A ideia é utilizar esta informação para realimentar o sistema e fazer o ajuste apropriado da potência do laser ou da taxa de alimentação de material durante a execução do processo. Isto é importante, uma vez que os primeiros cordões e primeiras camadas geralmente são depositados sobre um substrato que possui uma capacidade de transferência de calor muito mais alta do que a encontrada em camadas superiores, que estão sobre camadas prévias já aquecidas pelo processamento e que possuem muito menos volume de material para condução do calor. Desta forma, este gerenciamento térmico vai variando à medida em que mais camadas sucessivas são depositadas. Com isto, o desenvolvimento de um sistema de planejamento de processo próprio e com flexibilidade para implementação de ações de controle de processo é de grande importância para as pesquisas.

2.3. Sistema de planejamento de processo RP3

O NUFER vem desenvolvendo um sistema CAM para AM, denominado RP3 (*Rapid Prototyping Process Planning*) (Volpato e Foggiatto, 2009), com o objetivo de realizar pesquisas nas várias etapas de planejamento de processo,

independente da tecnologia AM sendo utilizada. Algumas das pesquisas sendo realizadas em planejamento do processo envolvem métodos otimizados de fatiamento, otimização de estratégias de preenchimento, novas estratégias de preenchimento, entre outras (Volpato e Silva, 2017). O sistema vem sendo desenvolvido em C++, com a abordagem de programação orientada a objeto, utilizando o compilador Visual C++ e rodando em ambiente Windows.

Para alcançar seu objetivo, o RP3 está estruturado em módulos, com a maior independência (“desagregados”) possível, permitindo assim a alteração de um módulo sem afetar nenhum outro. Com isto, sua adaptação para uma nova tecnologia exige algumas adequações em termos de estratégias de preenchimento, parâmetros de processo e adequação da saída (código G, dxf, outra). Até recentemente o sistema dispunha de opções de planejamento para tecnologias de extrusão de material e fusão de leito de pó. Porém, com este projeto, iniciou-se a adaptação do sistema também para a tecnologia LMD.

2.4. Peças para os ensaios iniciais

Para a realização de ensaios preliminares, as peças da Figura 2 foram escolhidas, sendo estas de geometrias relativamente simples. Elas podem ser descritas como um paralelepípedo ortogonal (ortóedro, ou, popularmente, uma bolacha quadrada) com as dimensões 25 x 25 x 10 mm e um tronco de cone furado (diâmetro externo de 25 mm na base e o interno de 10 mm) com sua face cônica formando um ângulo de 80° com a base. A orientação desta última foi definida com a face plana de menor diâmetro para baixo, com o intuito de testar os parâmetros de processo e a estratégia de processamento inicial em um corpo com estruturas suspensas. Em outras palavras, analisar o processo LMD admitindo-se este ângulo como sendo de auto suporte.

O pó metálico utilizado para deposição foi o AHC100.29, fabricado por atomização pela empresa Höganäs AB, composto 99,98% de ferro e beneficiado antes dos ensaios para se inserir dentro da faixa granulométrica de 45 - 108 µm. Uma chapa de aço ASTM A516 gr.70 com 25 mm de espessura foi utilizada como substrato. Os principais parâmetros de processo utilizados estão listados na Tabela 1. O paralelepípedo foi fabricado com o conjunto de parâmetros P1 e o tronco de cone com o P1 e P2. A fim de evitar risco de colisão do cabeçote ou outro mal funcionamento, os códigos G gerados para as peças foram inicialmente executado em vazio (sem a adição de pó e laser).

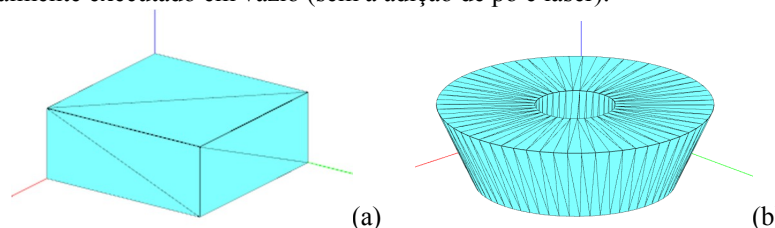


Figura 2. Geometrias das peças testes: paralelepípedo ortogonal (a) e tronco de cone (b)

Tabela 1. Parâmetros de processos utilizados nos testes

Descrição	P1	P2
Potência do laser	1050 W	1050 W
Largura de cordão	2,3 mm	1,98 mm
Espessura de camada	1,3 mm	0,6 mm
Sobreposição entre linhas de raster	15% (gap -0,345mm)	10% (gap -0,198mm)
Sobreposição entre linhas de raster e perímetros	15% (gap -0,345mm)	10% (gap -0,198mm)
Velocidade com laser on	300 mm/min	800 mm/min
Velocidade sem laser off	1500 mm/min	1500 mm/min
Qtd. de perímetros externos e internos	1	1
Preenchimento	Linear e após os perímetros	Linear e após os perímetros

3. RESULTADO E DISCUSSÕES

Um exemplo do resultado da etapa de fatiamento para a peça tronco de cone realizado pelo RP3 é apresentado na Figura 3(a). A Figura 3(b) mostra as trajetórias de contorno e preenchimento geradas para as camadas desta peça. Essas informações são utilizadas pelo sistema para gerar o código G, que foi enviado para o equipamento.

A execução em vazio dos códigos G gerado pelo RP3 ocorreu sem maiores problemas, demonstrando que o mesmo não possuía nenhum erro de sintaxe. Seguiu-se então para a fabricação das peças (Figura 4a). As Figuras 4b, 4c e 4d mostram as peças produzidas conforme os parâmetros de processo P1 e P2.

Para o paralelepípedo (Figura 4b), o resultado quanto à parede a 90° se mostrou parcialmente satisfatório, com deposição perpendicular ao substrato e a clara identificação dos limites de cada camada. Contudo, o material depositado na borda não formou cordões com a mesma altura (espessura) dos que foram depositados no preenchimento ou no

substrato plano. Pode se observar na Figura 4c que a espessura reduzida dos perímetros resultou em uma condição na qual não se formaram camadas planas, gerando, ao final, um topo com a superfície bastante abaulada. O centro da peça apresentou uma altura de aproximadamente 10,5 mm, enquanto sua borda apresentou aproximadamente 8 mm de altura. Assim, um maior refino de parâmetros se torna necessário para essa região, podendo-se utilizar parâmetros de processo diferenciados entre perímetro e preenchimento. Ainda sobre este aspecto, observou-se que a distância entre o cabeçote e os perímetros não se manteve constante (aumentou) ao longo do processo, o que contribuiu ainda mais para a redução da espessura.

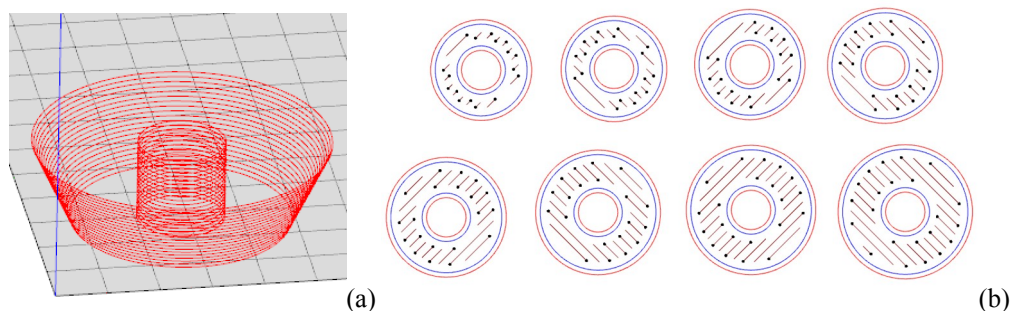


Figura 3. Fatiamento (a) e preenchimento (b) realizados pelo RP3

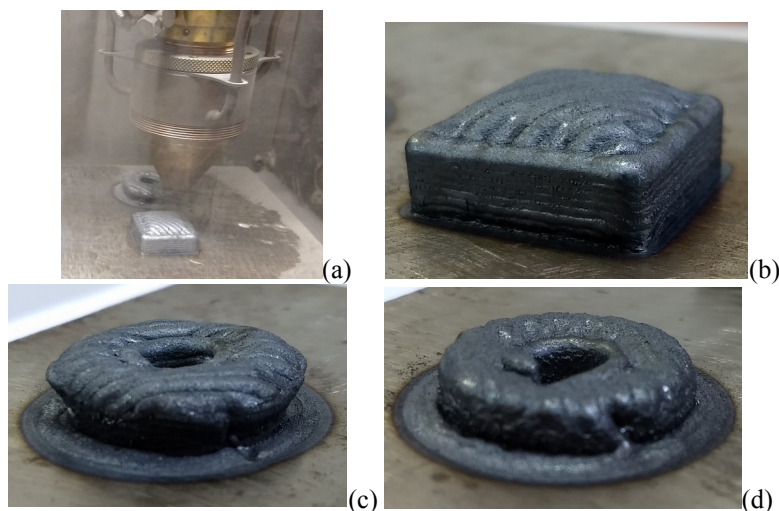


Figura 4. Fabricação das peças (a), paralelepípedo (b) e tronco de cone com os parâmetros P1(c) e P2(d)

Para o tronco de cone furado com os parâmetros P1 (Figura 4c), o preenchimento se comportou de forma similar ao paralelepípedo (superfície abaulada). Contudo, a inclinação negativa de 80° acrescentou uma dificuldade maior. Apesar de ser possível verificar uma inclinação na parede externa, observa-se também que o excesso de material do contorno foi projetado para a base da plataforma. Isto é um indicativo que o limite de ângulo de auto suporte para os dois conjuntos de parâmetros P1 e P2, combinado com a estratégia de processamento utilizada, é acima dos 80° . Quando os parâmetros de processo foram alterados para P2 (Figura 4d), os resultados tenderam a reduzir o efeito de superfície abaulada, mas o contorno da peça ficou seriamente prejudicado. A inclinação da parede externa praticamente não pode ser notada e a deposição da base da peça ficou pronunciada. Não foi realizada análise dimensional das peças em função dos problemas relatados.

Com base nestes testes preliminares, foi identificada a necessidade de concentrar os estudos em algumas frentes, entre elas refinar a identificação da janela de processamento do processo LMD, identificação de ângulo de auto suporte, bem como explorar parâmetros de controle de trajetória, tais como espaçamento entre preenchimento-preenchimento e entre preenchimento-perímetro. Após estas adequações, novos ensaios serão realizados.

4. CONCLUSÕES

Os resultados iniciais demonstraram a importância de dispor de um *software* de planejamento de processo que permita controlar todos os parâmetros de forma a adequar a tecnologia em questão. O sistema RP3 demonstrou que é capaz de gerar o código G para o processo LMD, podendo ser adequado a este processo, desde que os ajustes iniciais sejam

implementados. Os resultados experimentais iniciais são encorajadores, e demonstraram que mais estudos sobre os efeitos dos parâmetros de processo sobre a geometria do cordão e, consequentemente, das camadas, precisam ser realizados. A junção RP3 – LMD deve prosperar, com novos resultados sendo apresentados em breve.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação Araucária do Paraná, pelo apoio financeiro ao desenvolvimento do *software* RP3, e ao CNPq e a CAPES (Código de Financiamento 001), pelos recursos utilizados para o processamento/desenvolvimento do processo LMD.

6. REFERÊNCIAS

- Gutjahr, J., 2016. “Desenvolvimento e implementação de um sistema CNC, modular e reconfigurável, para processos LASER”. *Dissertação* – POSMEC/UFSC, Florianópolis.
- Lima, M.S.F. de, 2017. “Processos 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*. Edgard Blücher, p. 371-292.
- Poprawe, R., 2011. *Tailored Light 2: Laser Application Technology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Toyserkani, E.; Khajepour, A.; Corbin, S., 2005. *Laser Cladding*. Washington, D.C.: CRC Press.
- Volpato, N. e Silva, J.V.L. da., 2017. “Planejamento de processo para tecnologias de AM”. In: Volpato, N. (Org.). *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. Edgard Blücher, p. 97-127.
- Volpato, N e Foggiatto, J.A., 2009. “The Development of a Generic Rapid Prototyping Process Planning System”, *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (VRAP)*, Leiria – Portugal.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

PRELIMINARY DEVELOPMENT OF A CAM FOR ADDITIVE MANUFACTURING FOR THE LMD PROCESS

Neri Volpato¹

Elis Cassiana Nakonetchnei²

Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), R. Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000 - Campo Comprido, Curitiba - PR, CEP: 81280-340

¹nvolpato@utfpr.edu.br, ²elisan@alunos.utfpr.edu.br

Adriano de Souza Pinto Pereira³

Milton Pereira⁴

Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Caixa Postal 476 - Campus Universitário Trindade, Florianópolis - SC, CEP 88040-900

³adriano.sppereira@gmail.com, ⁴milton.pereira@ufsc.br

Abstract. *The Additive Manufacturing (AM) principle known as Direct Energy Deposition allows manufacturing metal components. The Precision Engineering Laboratory (LMP) is working in this area in a process called Laser Metal Deposition (LMD). To keep on the studies, LMP has established a partnership with the Additive Manufacturing and Tooling Group (NUFER) in order to use the RP3 system to perform the process planning. This work presents some preliminaries results of this joint development. The results show that RP3 can be used with this technology, but new studies related to the effects of processing parameters on the part built by layer manufacturing and new improvements in the system are required.*

Keywords: *Additive Manufacturing, Process Planning, LMD, Metal Deposition*

RESPONSIBILITY NOTICE

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