

ANÁLISE DE UM SISTEMA DE DEPOSIÇÃO DE PÓ METÁLICO APLICÁVEL PARA OS PROCESSOS DE SLS/SLM

Wei Lin, azlinwei@gmail.com¹

Milton Pereira, milton.pereira@ufsc.br¹

Walter Lindolfo Weingaertner, w.l.weingaertner@ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Trindade – Florianópolis – SC CEP: 88040-900.

Resumo: *Manufatura Aditiva (AM) designa a técnica de fabricação da peça de camadas sucessivas, por exemplo, os processos de sinterização/fusão seletiva a laser (SLS/SLM), que constrói peças através da sinterização, ou fusão, da matéria-prima fornecida ao local de trabalho em forma de pó. Este processo permite a construção de peças com geometrias extremamente complexas, que não podem ser produzidas por processos de fabricações tradicionais. Nesta pesquisa, um sistema de deposição de pó metálico, a ser aplicado em processos de SLS/SLM, foi construído e analisado para buscar uma deposição uniforme e constante ao longo das etapas do processo. Com este desenvolvimento podemos estudar as formas de aplicação do pó metálico e verificar os processos preparativos necessários na fase anterior à aplicação da energia proveniente do sistema laser. Para desenvolvimento do protótipo utilizou-se as fases de Projeto Informacional e Conceitual do método PRODIP visando determinar a melhor solução do projeto. Para validar as soluções obtidas, o protótipo foi modelado e construído em: Parte mecânica, Parte eletroeletrônica, Software e Interface de controle. As análises e ensaios realizados no sistema buscam uma melhoria no processo e uma redução na variabilidade na deposição do material em pó. Os resultados obtidos nos ensaios mostram que o Software é capaz de obter as leituras dos transdutores e é capaz de implementar as funções para a parte mecânica através da eletroeletrônica e da interface de controle. Para validar o sistema, imagens obtidas dos ensaios de distribuição de material foram processadas no software Matlab e mostram que as camadas depositadas possuem características uniformes e satisfatórias para processos posteriores de sinterização ou de fusão.*

Palavras-chave: *Manufatura Aditiva, Fusão seletiva a Laser, deposição de camadas de pó*

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva é um processo de fabricação que se caracteriza pela união de um material para produzir objetos a partir de dados de um modelo 3D geralmente a partir de camadas sucessivas, ao contrário de metodologias de fabricação por subtração (ASTM F2792-12a, 2013).

Entre os principais processos de manufatura aditiva, destaca-se os processos de sinterização seletiva e o processo de fusão seletiva a LASER. Nestas tecnologias, a matéria-prima em pó ou de partículas pequenas é sinterizada ou fundida através da aplicação de energia proveniente de um feixe concentrado de laser de forma seletiva. Esta abordagem possibilita trabalhar com vários tipos de materiais; dispensa pós-processamento e pós-cura; não necessita de estrutura de suporte; possibilita a fabricação de mais de uma peça simultaneamente, ocupa de forma maximizada o volume de trabalho; há possibilidade de reutilização do pó não processado; e permite tanto a fabricação de protótipo para visualização quando a fabricação de peças funcionais (Volpato et al., 2007).

Neste contexto, um sistema de alimentação e distribuição de camadas de pó metálico a ser aplicado em uma máquina para processo de sinterização/fusão seletiva a LASER vem sendo desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Precisão da UFSC (LMP - UFSC), com o objetivo de estudar o processo, suas variantes e novas concepções de máquinas voltadas ao processo de Sinterização Seletiva a LASER (SLS – *Selective Laser Sintering*) e Fusão Seletiva a LASER (SLM – *Selective Laser Melting*).

O protótipo encontra-se em sua fase final de construção e este trabalho procura fazer análises sobre funcionalidade de equipamento e identificar as causas de eventuais falhas durante o processo, visando garantir a qualidade e repetitividade na deposição do pó metálico, diminuindo ou eliminando estas causas de falhas no processo.

2. METODOLOGIA

Este trabalho envolve diversas áreas de tecnologia. Devido às limitações para diferentes áreas, que podem influenciar na escolha das soluções para cada segmento e dificultar a decisão final para o desenvolvimento do protótipo, foi escolhido como método o Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP) para auxiliar as gerações das alternativas do desenvolvimento de protótipo. A sistemática oferece aos projetistas os procedimentos para comparar e combinar soluções das concepções alternativas e determinar a melhor opção para ser executada. As etapas de desenvolvimento são mostradas na Figura 1 (Back et al., 2008). As etapas clássicas da metodologia de projeto foram utilizadas neste desenvolvimento, mas levando em consideração as particularidades do protótipo desejado.

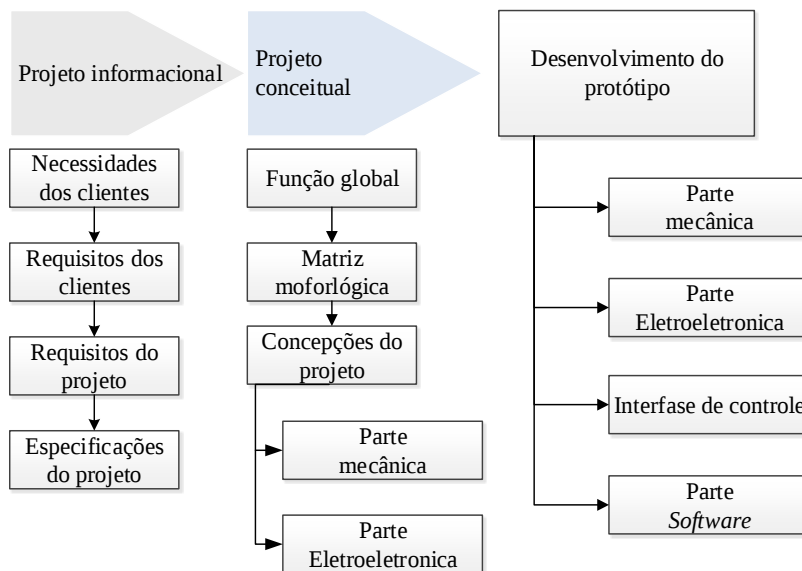


Figura 1. Etapas do processo de desenvolvimento de método PRODIP (adaptado de Back et al., 2008)

2.1. Protótipo

O distribuidor de pó utilizado no trabalho foi desenvolvido no LMP-Laser da UFSC. O desenvolvimento de protótipo foi dividido em quatro partes: mecânica, eletroeletrônica, interface de controle e *Software*, como ilustrado na Figura 2, que representa os principais elementos de desenvolvimento em cada parte do protótipo.

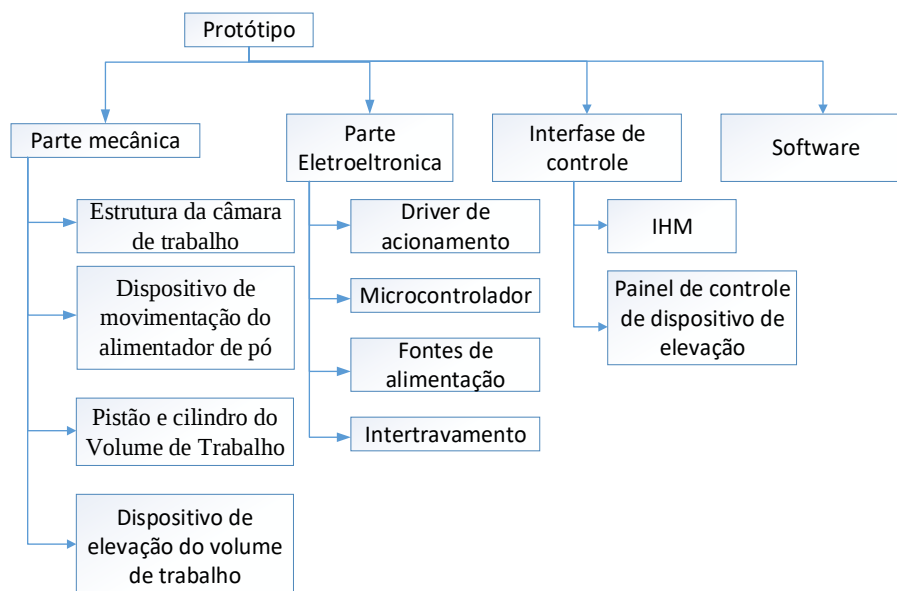


Figura 2. Desenvolvimento do protótipo

A parte mecânica de deposição de pó é composta por subsistemas que permitem a alimentação e distribuição do material metálico em pó, gerando as camadas sobre o volume de trabalho. A mesa de trabalho consiste numa placa de vidro *float* com 10 mm de espessura e uma abertura de 100 mm na região central. O dispositivo de movimentação tem a função de deslocar o distribuidor de pó entre os extremos da mesa de trabalho com velocidade uniforme, garantindo a distribuição também uniforme de material sobre o volume de trabalho.

O sistema mecânico foi projetado para servir como um módulo adaptável nas máquinas de processamento a LASER da empresa *Welle-LASER*. A dimensão da estrutura da câmara de trabalho é baseada no arquivo da modelagem da carenagem do modelo LS 2000 desta empresa. A Figura 3 mostra, de forma esquemática, a carenagem sem a mesa de trabalho e montagem com o protótipo (*Welle LASER*, 2015).

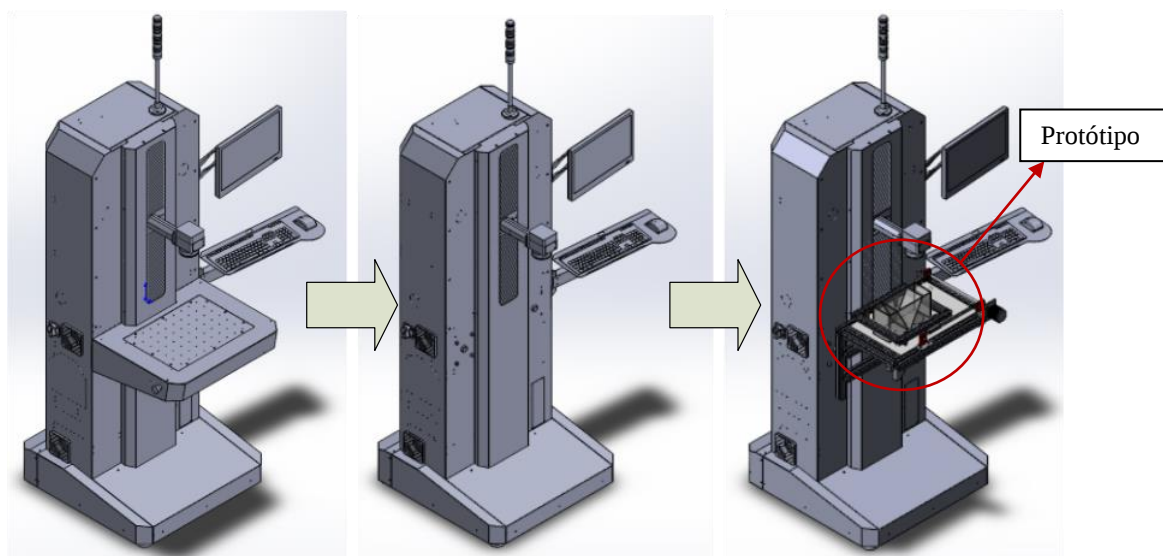


Figura 3. Carenagem da máquina de gravação a LASER LS 2000 e montagem com protótipo (adaptado de Welle LASER, 2015)

O acionamento do alimentador de pó é baseado em um anel (frame) de seção retangular que envolve o alimentador de pó, e é acionado transversalmente por um motor de passo e correia dentada. O alimentador de pó é arrastado pelo anel, sem um acoplamento rígido. Para o deslocamento vertical do pistão do volume de trabalho, responsável por definir a espessura de cada camada de pó depositada, foi empregado de um atuador linear de modelo M410DG, da empresa PI (*Physiki Instrumente*), que possui desvios tolerados no movimento de descida em torno de 10 μm e curso de deslocamento de 100mm. O módulo é mostrado na Figura 4.

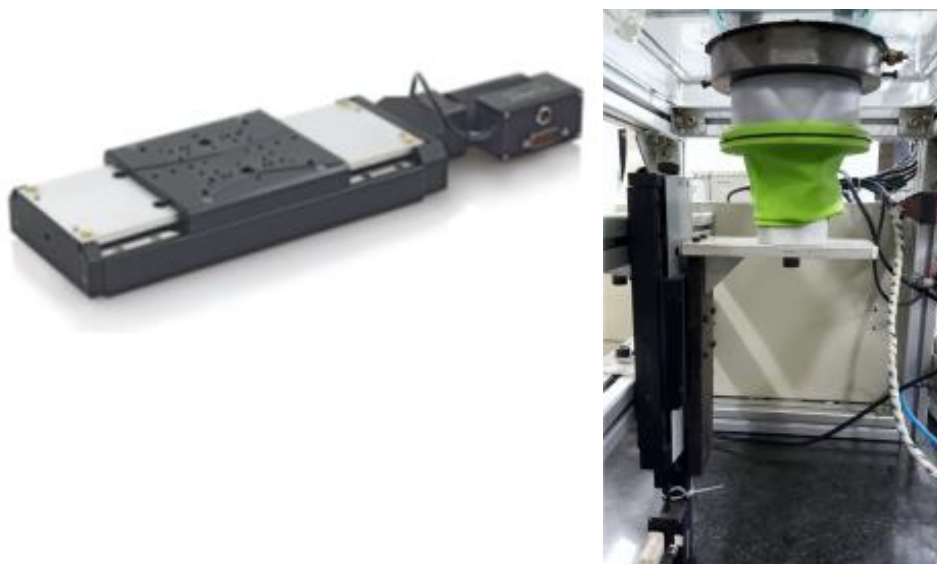


Figura 4. Atuador linear modelo M410DG e montagem do dispositivo de elevação do volume de trabalho

Um dos principais componentes que isola a área de trabalho e distribui o gás de proteção para ambiente é o conjunto do Pistão e Cilindro do volume de trabalho, constituído por cinco peças cilíndricas e uma camisa elástica, conforme ilustrado na Figura 5.

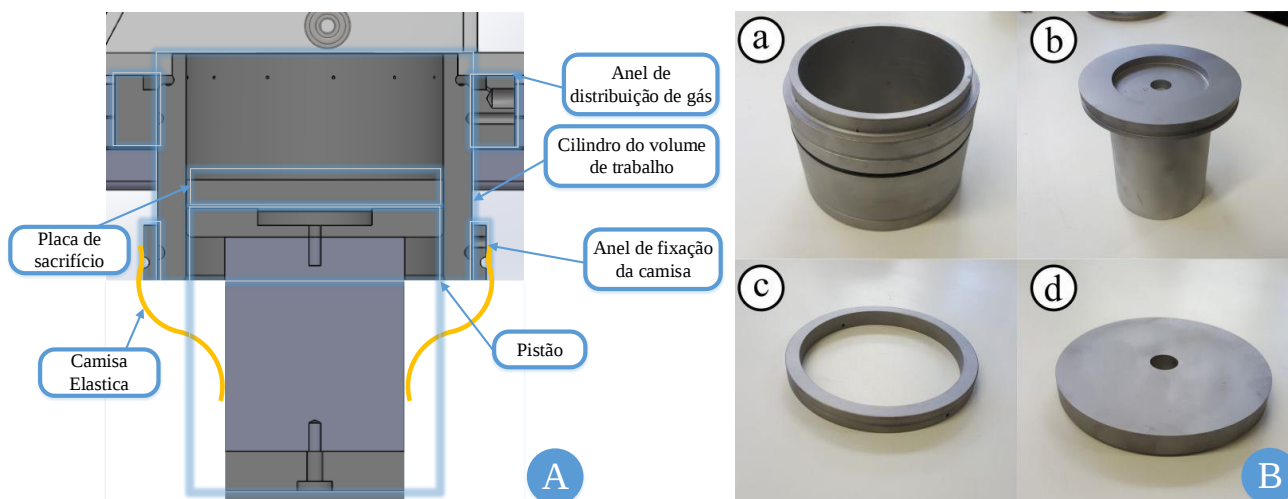


Figura 5. (A) Representação esquemática e (B) Imagem dos componentes do pistão e cilindro do volume de trabalho: Cilindro do volume de trabalho (a); Pistão (b); Anel de fixação da camisa (c); Placa de sacrifício (d)

A parte eletroeletrônica do sistema é constituída principalmente pelo subsistema de comando/controle, formado com os elementos elétricos e eletrônicos, montados no gabinete do sistema e na IHM, que permite realizar as funções de comunicação e transferência das informações entre usuário e equipamento. Conforme ilustrado na Figura 6, os sistemas de movimentação do sistema mecânico, citados anteriormente, estão apresentados no esquema como uma das saídas para o sistema eletroeletrônica, onde o recebimento do sinal é controlado pelo drivers. Os periféricos com transdutores, botão de emergência, CLP e IHM estão associados no bloco de intertravamento e placa de controle. Estes são responsáveis pela entrada de sinais para o equipamento, que executa funções referentes a cada evento ocorrido. A rede elétrica fornece a energia para os blocos dos componentes do gabinete.

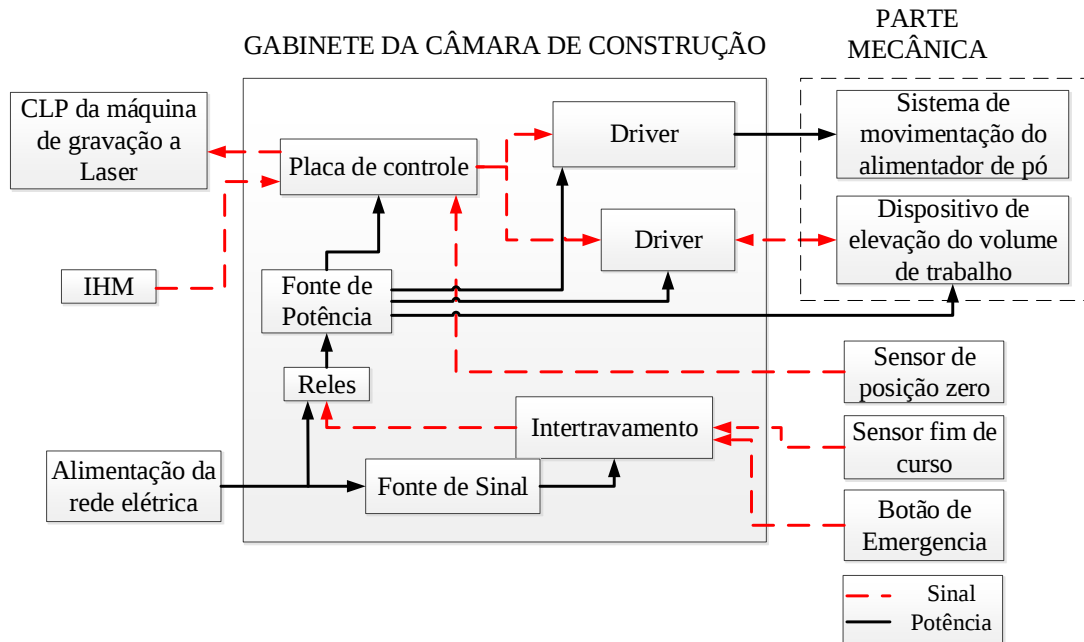


Figura 6. Esquema simplificado do gabinete elétrico

A interface de controle foi projetada para o usuário realizar a função de gerenciamento e comando do sistema. A interface é composta por duas partes: A Interface Homem Máquina (IHM) e um painel de controle de eixo vertical do software PIMikroMove. O painel de IHM é um dos principais elementos que permite ao usuário estabelecer comunicação com a parte de controle do equipamento. A base deste elemento é formada por uma Placa de Circuito Impresso (PCI) de controle, uma chave de acionamento geral e um botão de ajuste, conforme apresentado na Figura 7.

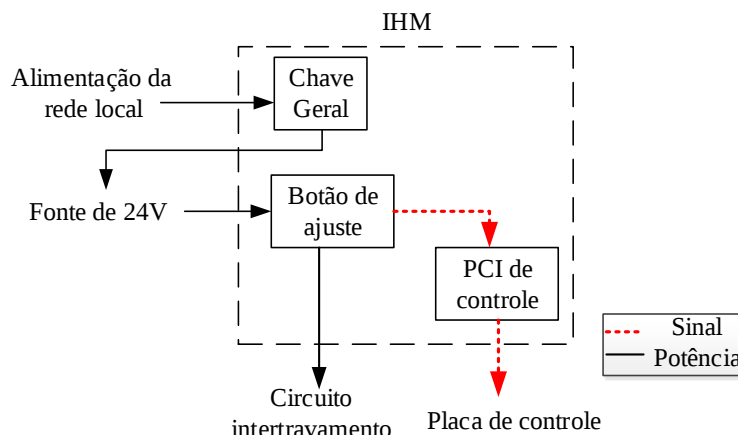


Figura 7. Interface Homem Máquina (IHM)

A empresa *PhisikInstrument* fornece, no próprio programa, um painel de controle para que os usuários visualizem a posição do eixo e ajustem os parâmetros de movimento, como velocidade e quantidade de deslocamento para cada incremento. O painel de controle da mesa de elevação é ilustrado na Figura 8.



Figura 8. Painel de controle da mesa de elevação (eixo vertical).

A composição do *Software* é formada pelo programa de controle *PIMikroMove* da empresa *PhisikInstrument* e pelo *Arduino Software*. Este último é o ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development Environment, IDE*) da plataforma de Arduino (Arduíno, 2015). O *PIMikroMove* é a interface principal para utilização do atuador linear da empresa *PhisikInstrument*, que permite monitorar, ajustar e programar o equipamento em tempo real.

O processo de deposição de pó pode ser dividido em uma sequência de função parciais que segue uma ordem lógica, conforme ilustrado na Figura 9. O processo deve iniciar com a alimentação de material em pó antes de energizar o sistema. Por questão de segurança, a área de trabalho é isolada e o gás de proteção é injetado no ambiente para evitar a oxidação dos componentes. Após receber o acionamento da máquina de LASER, o sistema irá iniciar o processo com nivelamento da mesa de trabalho. O distribuidor de pó é acionado para depositar matéria-prima na área de trabalho e seu movimento é cessado quando os sensores limitantes de trajetória são ativados. Depois desta etapa, finaliza-se o ciclo, mandando o sinal para acionar a aplicação do feixe de LASER e esperando a máquina de LASER confirmar a finalização do trabalho. Em seguida, a mesa de trabalho é baixada por um incremento e o distribuidor de pó aplica uma nova camada de pó na área de trabalho. Este esquema de funcionamento sequencial é apresentado na Figura 10.

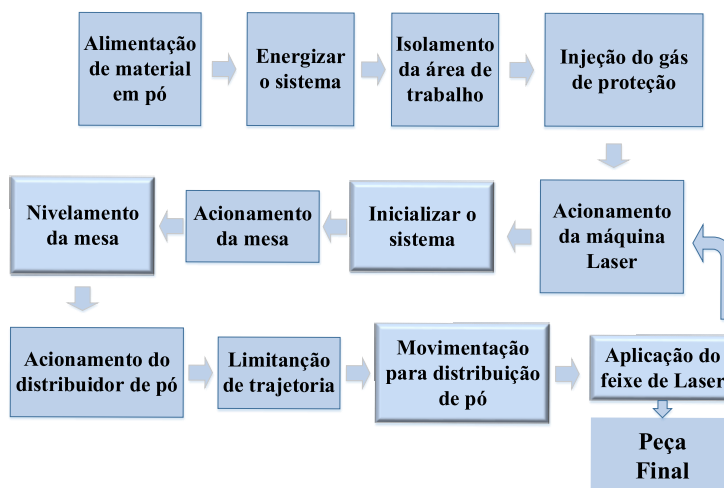


Figura 9. Sequência do processo de deposição de pó

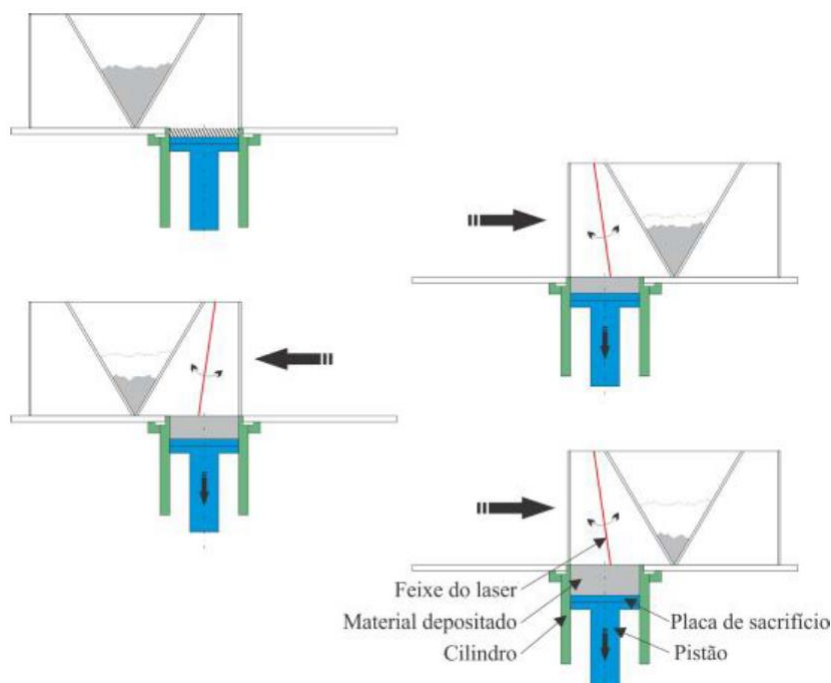


Figura 10. Processo de distribuição do pó metálico

2.2. Características dos ensaios

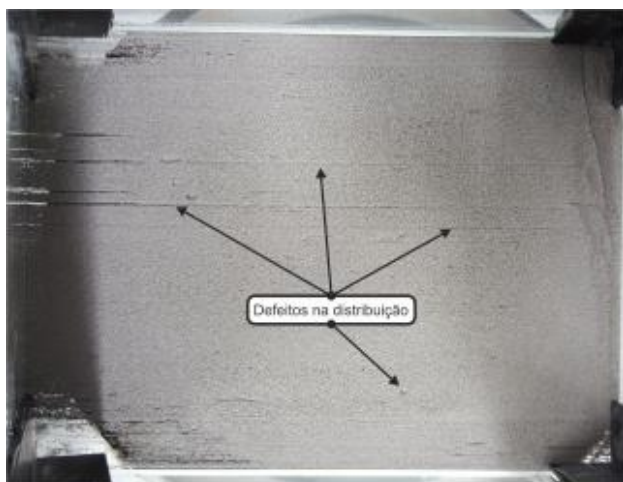
O pó usado em todos os ensaios foi o *Ferro AHC 100.29* do fabricante *Höganäs*, cuja composição é de 99,94% de ferro puro (*Fe*). Nos ensaios realizados foram utilizados um microscópio digital para captura das imagens e uma balança com capacidade de medição de 1000 g com resolução de 0,1 g para as medidas de massa. Como o sistema de distribuição de pó não está integrado à máquina LASER LS200 da *Welle LASER*, o funcionamento do protótipo foi simulado através de um LED e um botão no painel. O LED sinaliza o termino da deposição da camada de pó, simulando o sinal que acionaria a varredura do feixe de LASER. Ao finalizar a varredura, a máquina LASER deve enviar um sinal ao sistema de deposição, indicando a finalização da camada. Esse segundo sinal é comandado pelo operador, que acionando manualmente o botão e indicando o início de um novo ciclo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para verificar a qualidade da superfície de pó depositada na área de trabalho, foi realizada uma análise de detecção da existência de defeitos através da verificação da planeza da camada depositada e da qualidade da distribuição de pó em função da granulometria. Os ensaios consistem em aplicar sucessivas camadas de pó metálico na área de trabalho.

3.1. Detecção da existência de defeitos

Esta verificação foi feita através uma inspeção visual, com o intuito de verificar o comportamento da distribuição da camada e a existência de defeitos na deposição. A Figura 11(A) mostra o resultado da distribuição de material sem granulometria controlada, um exemplo onde houve uma distribuição com defeitos causada pela presença de grão excessivamente grandes, que quando arrastados pelo alimentador de pó, deixam marcas visíveis na superfície. Na Figura 11(B) está a imagem da camada feita por pó metálico de diâmetro médio de 60,2 μm , onde pode-se perceber que houve uma deposição uniforme de material, embora apresente uma falha no canto inferior direito, causada pela entrada do gás de proteção. Esta região localiza-se fora da área de trabalho. Sendo assim, não interfere na produção da peça.



(A)



(B)

Figura 11. (A) Imagens da camada depositada de pó de ferro com material não peneirado e (B) pós metálicos de diâmetro médio 60,2 μm

3.2. Análise da qualidade da distribuição de pó em função da granulometria

Para verificar as variações das camadas depositadas sob influência dos pós metálicos de características diferentes, foram preparadas amostras de pó de quatro faixas granulométricas devidamente peneiradas: 35 - 63 μm , 63 - 90 μm , 25 - 90 μm e 90 - 120 μm . Na realização dos experimentos, foram empregadas amostras de pós metálicos de 200g. O fluxo de gás de proteção foi controlado numa vazão de 1L/min. O protótipo depositou, no processo, as camadas de 100 μm por trintas repetições e velocidade de 565,2 mm/min em cada sequência de deposição para cada material. Dentre estas faixas granulométricas, o pó de 35 a 63 μm foi analisado isoladamente por não se dispor a mesma quantidade de material. Este experimento foi conduzido com apenas 100g de material. Como os grãos das partículas são reduzidos, foi necessário diminuir a vazão do gás de proteção para 0,5l/min. A Tabela 1 mostra os dados dos experimentos realizados.

Tabela 1. Dados dos experimentos

Granulometria (μm)	Massa adicionada	Vazão de gás(l/min)	Passadas
38-63	100,00	0,5	15
63-90	200,46	1	30
90-125	200,97	1	30
25-90	200,88	1	30

A densidade das amostras de pós foi calculada conforme a norma ISO 3923-1:2008. Neste procedimento, toma-se um volume conhecido através de uma proveta graduada e, com relativa acomodação por vibração, mede-se a massa ocupante dentro daquele volume. A massa dividida pelo volume ocupado da amostra nos fornece a densidade aparente. Os resultados desse experimento podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2. Cálculo das densidades aparentes

Granulometria (μm)	Volume (ml)	Massa (g)	Densidade (g/ml)	Densidade (g/mm^3)
38-63	40	138,4	3,4600	0,003460
63-90	50	170	3,4000	0,003400
90-125	50	170,18	3,4036	0,003404
25-90	50	151,99	3,0398	0,003040

O volume depositado foi estimado com base do número de passagens do distribuidor sobre a superfície de trabalho, considerando a espessura de cada camada e a área de trabalho. A massa depositada pode ser estimada multiplicando este volume pela densidade aparente do pó, obtida nos experimentos realizados anteriormente.

A medida que o reservatório transfere o pó para o volume de trabalho, o nível superior de pó no reservatório não abaixa de forma regular, e o fim do experimento é ditado pelo fim do fornecimento de pó em alguma região ao longo da largura da fenda de distribuição. O rendimento de deposição é calculado pela relação entre e a massa adicionada ao reservatório e a massa depositada no volume de trabalho no final do experimento (começo de falhas na deposição), conforme mostrada na Tabela 3.

Tabela 3. Teste de rendimento

Granulometria (μm)	Volume Depositado (mm^3)	Densidade (g/mm^3)	Massa Adicionada (g)	Massa depositada (g)	Rendimento para amostras de (100 e 200g) (%)
38-63	9537,75	0,0034	100	33,00	33,00
63-90	19075,5	0,0034	200,46	64,86	32,35
90-125	19075,5	0,0034	200,97	64,93	32,31
25-90	19075,5	0,0030	200,88	57,99	28,87

Os resultados obtidos na distribuição de pó de aço na faixa da granulometria de 25 a 125 μm não apresentaram problemas significativos em termos da qualidade da superfície da camada depositada. Verificou-se também que uma contaminação do pó metálico por partículas maiores leva à formação de riscos na superfície da camada depositada. Desta forma, se necessário, o pó deve ser peneirado para evitar a presença de grãos maiores do que a faixa especificada.

Além da aquisição de dados, foram avaliadas as qualidades das camadas depositadas pela visualização da imagem, como ilustrado na Figura 12. Por meio destes dados, é possível afirmar que a distribuição dos pós metálicos utilizado sofreram pouca influência quando o protótipo trabalha com os pós metálicos na faixa da granulometria de 25 a 125 μm .

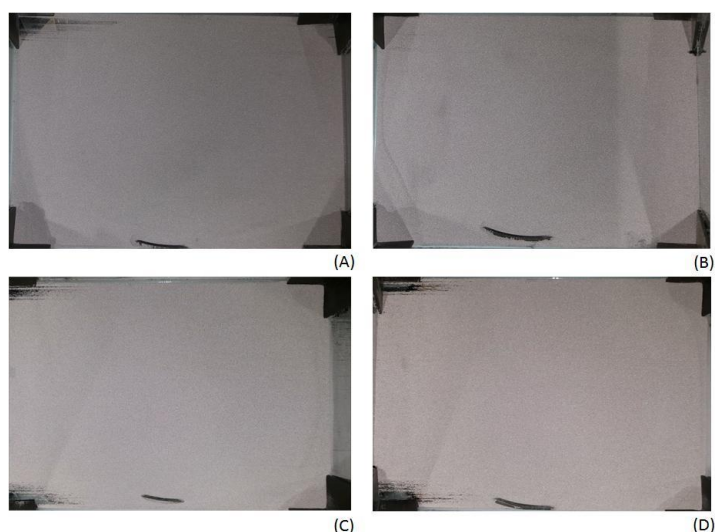


Figura 12. Comparação das camadas distribuídas com material de (A) 35 a 63 μm , (B) 63 a 90 μm , (C) 25 a 90 μm e (D) 90 a 120 μm

3.3. Análise da planeza da camada depositada

Para verificar a qualidade da camada depositada de material pelo distribuidor e a qualidade da camada de pó, foi empregado um microscópio digital para capturar as imagens das camadas. Este equipamento possui como

especificações uma resolução de 2 megapixels e ampliação de 500 vezes. O objetivo deste método é observar o comportamento dos pós depositados na visão microscópica. Segundo Gao et al. (2008), a diferença da distância entre os objetos capturados e a câmera pode ser detectada através das desfocagens apresentadas nas imagens. Nesse caso, comparou-se qualitativamente as imagens obtidas pelo microscópio nos diferentes pontos na área de trabalho.

Posteriormente, as imagens foram processadas no *Matlab*, conforme sequência ilustrada na Figura 13. Primeiramente são eliminados os elementos estruturais de baixa nitidez através dos comandos *imopen* e *imsubtract*, ou seja, o processo filtra os pixels das imagens em forma de disco acima de 30 pixels. A seguir, estas imagens são convertidas para uma matriz em escala de cinza pela função *rgb2gray*. O método de análise é finalizado com o processo de transformação da matriz em um gráfico de escala 1:8 e a conversão da imagem em preto e branco. Nesta etapa, pode ser observada a uniformidade da distribuição de material através da representação tridimensional apresentada nos gráficos e da distribuição de pixels na imagem em preto e branco. As superfícies dos grãos metálicos possuem forma e tamanho irregulares, e as imagens capturadas pelo microscópio são construídas pelos feixes de luz refletidos dessas superfícies. Pela observação da nitidez nas imagens geradas no processo obtém-se o resultado qualitativo sobre as camadas depositadas (Gao et al., 2008; The Mathworks, 2016).

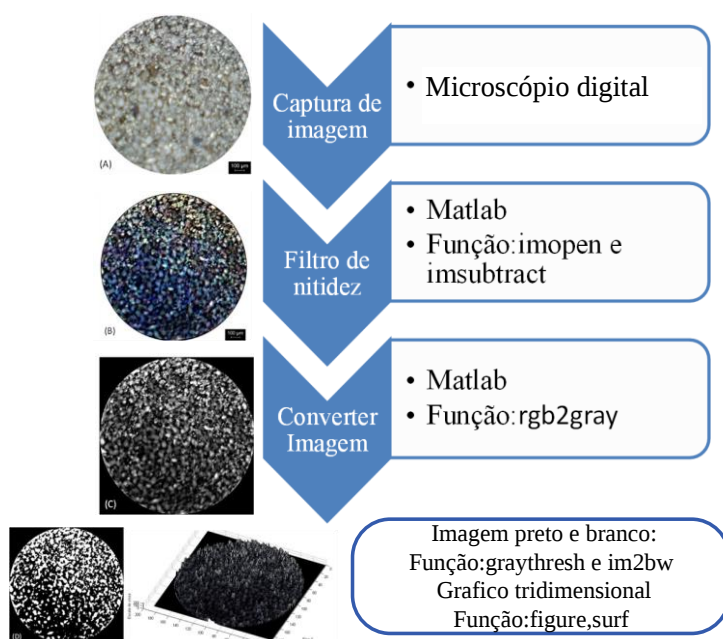


Figura 13. Análise qualitativa as camadas depositadas

4. CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi analisar um protótipo de deposição de pó para aplicação em processo de SLS/SLM. A metodologia PRODIP se mostrou adequada para a organização das informações e na busca de soluções de problemas. O desenvolvimento de projeto foi baseado nos princípios de soluções encontrados. Após a conclusão da bancada de ensaios foram testadas as funcionalidades do distribuidor de pó e da mesa de elevação, avaliando as características de camadas de pó metálico aplicadas.

Nos experimentos feitos com o protótipo e análise da superfície depositada dos materiais com características conhecidas e distintas, observou-se que as camadas distribuídas pelo protótipo possuem qualidade uniforme e satisfatória para os processos posteriores.

Os resultados alcançados confirmaram que o protótipo cumpre o seu papel de depositar camadas de pó com uniformidade aceitável e está apto a realizar experimentos com um sistema de LASER junto com o protótipo.

5. REFERÊNCIAS

- Arduino LLC, 2015, “Arduino Nano”. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>>. Acesso em: 31 de outubro de 2015
- ASTM International, 2013, “F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies”. Disponível em: <<http://www.ciri.org.nz/nzrma/technologies.html>>. Acesso em: 20 de maio de 2016.
- Back, N.; Ogliari, A.; Dias, A.; Silva, J. C., 2008, “Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem”, Barueri, Ed. Manole, 601p.
- Gao, Y.; Xing, J.; Zhang, J.; Luo, N.; Zheng, H., 2008, “Research on measurement method of selective laser sintering (SLS) transient temperature”, Optik - International Journal for Light and Electron Optics, Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/B7GVT-4P4FSYR-1/2/85877d004dd50cb5860a61569bda89ba>>.
Acesso em 6 de junho de 2016.

ISO, 2008, “ISO 3923-1 Metallic powders — Determination of apparent density — Part 1: Funnel method”, Switzerland, 5p.

The Mathworks, 2016, “Mathworks imopen”. Disponível em:
<<http://www.mathworks.com/help/images/ref/imopen.html>>. Acesso em 14 de março de 2016.

Volpato, N.; Ahrens, C. H.; Petrusch, G.; Carvalho, J.; Santos, J. R. L.; Silva, J. V. L., 2007, “Prototipagem rápida - tecnologias e aplicações”. São Paulo: Edgard Blucher, 272p.

Welle LASER, 2015, “LS2000”. Disponível em: <<http://wellelaser.com/en/ls2000/>>. Acesso em: 8 de julho de 2015.

ANALYSIS OF A METALLIC POWDER DEPOSITION SYSTEM APPLICABLE TO SLS / SLM PROCESSES

Wei Lin, azlinwei@gmail.com¹

Milton Pereira, milton.pereira@ufsc.br¹

Walter Lindolfo Weingaertner, w.l.weingaertner@ufsc.br¹

¹Federal University of Santa catarina, Trindade – Florianópolis – SC. CEP: 88040-900.

Abstract: Additive Manufacturing (AM) designates the part manufacturing technique of successive layers, for example, the Selective Laser sintering/Melting (SLS/SLM) process, which builds components by sintering or melting the raw material supplied to the workplace in the form of powder. This process allows the construction of parts with extremely complex geometries that cannot be produced by traditional fabrication processes. In this research, a metal powder deposition system, to be applied in SLS/SLM processes, was constructed and analyzed to obtain uniform and constant deposition throughout the process steps. With this development, we can study the application forms of the metal powder and verify the necessary preparations in processes previous to implementation of energy from the laser system. For the prototype development was used Informational and Conceptual phases of PRODIP method to determine the optimal design solution. To validate the solutions obtained, the prototype was patterned and built in: mechanical part, electronics part, Software and control interface parts. The analyzes and tests, performed in the system seeking an improvement in the process and a reduced variability in deposition of powder material. The result obtained in the experiments show that the software is able to get the readings of transducers and is capable of implementing the functions for the mechanical part, through electronics and control interface. To validate the system, images obtained from the material distribution assays were processed using the Matlab software and show that the deposited layers have uniform characteristics and satisfactory for subsequent processes sintering or melting.

Keywords: Additive Manufacturing, Selective Laser Melting, powder layer deposited