

MANUFATURA ADITIVA – PROJETO PRELIMINAR DE UMA IMPRESSORA 3D DE METAIS

Caio Nogueira Erbiste, caio.erbiste@acad.usfm.br¹

Lucas Lira Sasset, lucas.sasset@acad.ufsm.br¹

Vitória Pazeto Nolêto, vitoria.pazeto@acad.ufsm.br¹

Anderson Leonardo de Godoi Maboni, anderson.maboni@acad.ufsm.br¹

Bruno Fernandez Rodrigues de Sousa, bruno.sousa@acad.ufsm.br¹

¹Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Av. Roraima n° 1000, Cidade Universitária – Camobi, Santa Maria - RS.

Resumo. O aumento do uso de processos automatizados na fabricação, devido a introdução da indústria 4.0, demonstra a necessidade de obtenção de materiais que visem a diminuição de custos, aumento da eficiência, o desperdício mínimo e ocorra a diminuição de passos para a construção dessas estruturas. Assim, tem-se o crescimento da manufatura aditiva, a impressão 3D de metais destaca-se pela produção de peças com geometrias complexas e, portanto, mais leves. Contudo, quase não existem exemplos dessas tecnologias com origem nacional, neste contexto, este trabalho optou-se pela construção de uma impressora 3D, de baixo custo, que segue o modelo Binder Jetting, a fim de obter estruturas que se adéquem aos requisitos citados anteriormente. Tal modelo consiste na deposição do pó do metal escolhido, juntamente com um polímero aglutinante, capaz de imprimir a estrutura modelada previamente em software de modo a equilibrar a razão entre a precisão da peça e os custos de manufatura. Nesse projeto alcançou-se o projeto estrutural preliminar de uma impressora 3D utilizando guias lineares e servos para a realização do controle, por meio de Arduino.

Palavras chave: Indústria 4.0. Binder Jetting. Manufatura aditiva. Impressora 3D de metais. Sistema de baixo custo.

Abstract. The increase in the use of automated processes in manufacturing, due to the introduction of industry 4.0, demonstrates the need to obtain materials that aim to reduce the costs, increase efficiency, minimize waste and reduce manufacturing time. Thus, there is the growth of additive manufacturing, 3D printing of metal stands out for the production of parts with complex geometries and, therefore, lighter. However, there are almost no examples of these technologies with national origin, in this context, this work opted for the construction of a low-cost metal 3D printer, which follows the Binder Jetting model, in order to obtain structures that meet the aforementioned requirements. This model consists of the deposition of metal powder, binder with a liquid material, to be able to manufacture the structure previously modelled in software, with the objective to balance the ratio between precision and manufacturing costs. In this project, the preliminary structural design of a 3D printer was achieved using linear guides and servos to perform the control, through Arduino.

Keywords: Industry 4.0, Binder Jetting, additive manufacturing, metallic 3D printer, low-cost systems,

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as transformações recorrentes no setor industrial devem-se à recorrente introdução da indústria 4.0, a qual permite maior visibilidade, e, conseqüentemente, maior desenvolvimento de processos automatizados de fabricação. Dentre esses processos, a manufatura aditiva, a qual utiliza de sobreposição gradativa de camadas de um material, por meio de modelos digitais, cresce exponencialmente. A impressão 3D de metais destaca-se por permitir a produção de componentes com geometrias mais complexas e, portanto, mais leves e com um menor consumo de energia e matéria-prima.

De tal forma, a impressão da estrutura metálica pode utilizar dos seguintes possíveis métodos, conforme (Amir Mostafaei, et al., 2020):

- Modelagem de Deposição Fundida: utiliza filamentos de polímeros para produzir os objetos, por meio do processo de fusão, como: deposição de energia direcionada (DED), fusão de leito de inferior a laser (LPBF), fusão por feixe de elétrons (EBM);
- Métodos que não possuem como base o processo de fusão, como: extrusão, binder jetting, jato de material e laminação de chapas.

A tecnologia de *binder jetting* foi escolhida no presente projeto, devido o alcance de equilíbrio entre precisão e custo em comparação com o método de deposição de fio. Nesse método, ocorre a deposição de diversas camadas de metal em pó em um leito de pó através de um sistema de rolos ou facas, enquanto um cabeçote de impressão (do inglês *print head*) móvel deposita uma fina camada de material aglutinador, que agrega parte das partículas do metal para a formação da estrutura desejada, a qual foi previamente modelada em um software (CAD). Esse procedimento é repetido camada por camada, e, ao fim do processo, o material excedente do leito de pó é aspirado.

Ademais, a peça final, a fim de alcançar todos os pré-requisitos relacionado às propriedades mecânicas e estrutura interna, quanto a complexidade geométrica, passa por um pós-processamento, como cura, *depowdering* (retirada do excesso de pó), sinterização (tratamentos térmicos), infiltração (fechamento total ou parcial dos poros, dependendo da densidade da peça final almejada), recozimento e acabamento.

No Brasil, esta transformação da indústria ocorre de modo mais lento uma vez que praticamente toda a tecnologia utilizada é importada. Entretanto, é fundamental para tornar a indústria brasileira mais competitiva que as novas tecnologias sejam produzidas no país. Neste contexto, este trabalho propõe o projeto e fabricação de uma impressora 3D de metais de baixo custo usando a tecnologia de jato de ligante (do inglês *binder jetting*), a fim da produção de estruturas metálicas com precisão geométrica e custo benefício adequados. A impressora deverá ser passível de utilização em projetos de engenharia, em parceria com o Grupo de Tecnologia e Mecânica dos Materiais (GMat) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

2. METODOLOGIA

O presente trabalho tem-se a descrição do processo preliminar do projeto da impressora 3D para metais, contendo o planejamento do sistema de impressão propriamente dito, que possui como principal pré-requisito a precisão do sistema de deposição do pó e do aglutinante. Assim, o sistema de impressão foi dividido em três setores, sendo eles: estrutura, que consiste no planejamento geral da impressora 3D; sistema de deposição, que consiste no planejamento específico para a deposição do pó e do aglutinante, ocorrendo de modo separado inicialmente e depois interligados; e sistema de controle, setor responsável pelo desenvolvimento da programação do projeto, decidindo as linguagens utilizadas e os caminhos a serem seguidos para a automação e o controle da cabeça de impressão (no inglês: *print head*).

Além da divisão de setores, tem-se a análise dos materiais que formarão a peça final e os componentes da estrutura. De tal modo que o aglutinante deve possuir reologia adequada para que haja o preenchimento dos espaços vazios entre as partículas de pó metálico, assim como estabilidade, a fim de garantir que estas estejam conectadas entre si até o tratamento térmico. De modo a ser realizado um estudo sobre as deformações e fluxo do aglutinante para atingir os parâmetros exigidos no projeto.

Ademais a estabilidade e da reologia serem adequadas, outros fatores, diretamente ligados ao polímero aglutinante deve ser analisado, conforme (Amir Mostafaei, et al., 2020), a deposição de modo suficiente para a penetração do aglutinante ser adequada; a força de ligação química deve fornecer uma integridade estrutural para a peça final impressa; e que a sua queima resulte em vestígios químicos nocivos e mínimos.

Em suma, o aglutinante deve ser quimicamente estável e a deposição deve ocorrer de modo a ser suficiente para que haja a integração com o pó de metálico, no caso do presente trabalho alumínio. A deposição do polímero aglutinador é realizada por meio da integração entre os setores de sistema de deposição de pó e a *print head*.

Outros fatores que influenciam a escolha do aglutinante são: a viscosidade, tensão de superfície e a temperatura de processamento (o aglutinante deverá estar fluído durante a impressão e garantir que não se solidifique para evitar a interrupção no processo de impressão). A temperatura de impressão do aglutinante deve ser superior à temperatura ambiente, contudo, a mesma deve ser inferior a temperatura de fusão do elemento principal (no caso o pó metálico), para que este não seja fundido durante o processamento causando deformações na peça impressa.

Em conjunto com a análise do componente aglutinante, o setor de estrutura realizou o planejamento do formato geral da impressora, considerando as dimensões e disposição para cada componente que será necessário, de modo a utilizar o método de *binder jetting*. Assim, foram estabelecidos pré-requisitos para tomar as decisões relacionadas à estrutura, sendo os seguintes tópicos:

- Tamanho máximo de impressão sendo suficiente para impressão de um corpo de prova padrão para ensaios de tração (aproximadamente 5 X 10 X 5 cm);
- Impressão inicial de componentes geometria simples e densos;
- Deposição de pó em toda a caixa de impressão;
- Nivelar e compactar o pó;
- Suportar a carga de todos os componentes;
- Deposição uniforme ao longo da caixa de impressão;
- Sistema de controle e automação simples;
- Guias lineares, de forma que ambas possuam um recuo suficiente para o trabalho de ambas;
- Sistema de aquecimento;
- Espaço suficiente para caixa de impressão e suportes de componentes, porém compacto;
- Print head de fácil controle, baixo custo e precisão inicial de 200 micrômetros

No caso do sistema de deposição de pó, foram definidos como pré-requisitos:

- Capacidade de depositar camadas de 1 mm ou menos;
- Controle simples e confiável;
- Capacidade de armazenamento mínima;
- Sistema de carregamento e descarregamento;
- Uniformização da superfície;

3. RESULTADO

A impressora foi projetada de acordo com o princípio do método *binder jetting*, processo este que não envolve fusão do metal. Assim, é prevista uma etapa de pós-processamento na qual os componentes passarão por uma remoção térmica do aglutinante e sinterização. A matéria prima prevista para impressão dos corpos-de-prova neste estudo é o pó de alumínio, com formato esférico e diâmetro médio de partícula de 30 a 40 micrômetros. O aglutinante, será uma mistura de monômeros e polímeros em um solvente, no qual a base será decidida posteriormente, podendo ela ser água ou solvente.

3.1. Estrutura

Seguindo os pré-requisitos, foi necessário idealizar como iria ocorrer o processo de impressão. Assim, foi modelada uma caixa de fundo móvel, com volume aproximado de 1728 cm³ (12 cm x 12 cm x 12 cm). Nesta caixa, o pó metálico será depositado ao longo de toda a sua largura, além disso o pó metálico será compactado e nivelado usando um componente único para todos os trabalhos similar ao sistema *doctor blade* usado para deposição de filmes.

Posteriormente, definiu-se um sistema de *print head* para depositar o aglutinante, sendo um componente que se move em três eixos (x, y, z) com alta precisão, sendo possível escolher em quais partes da caixa de impressão irá ocorrer a impressão (jateamento do aglutinante). Por fim, definiu-se o uso de duas guias lineares, com largura e altura diferentes, dessa forma, ambos os componentes de deposição podem operar sem a necessidade de muitos movimentos do componente de deposição de polímero no eixo vertical.

Além disso, ambos os componentes podem recuar espaço suficiente para a operação do outro, acelerando assim o processo. Dessa forma, foi feito o modelamento 3D da base da impressora no software SolidWorks. Nesse CAD, estão montados os principais componentes da impressora, sendo eles:

- Estrutura base: Bloco plano retangular, no qual estão dispostos os pilares para acoplamento das guias lineares e a caixa de impressão. Podendo ser alterado para um sistema mais compacto e com os encaixes para a estrutura externa (ainda não modelada);
- Pilar para impressão: Um pilar com uma área plana quadriculada no topo, que será responsável por suportar a impressão. Essa área irá possuir sistema de movimentação no eixo vertical, de forma que se desloque conforme ocorra a impressão. O sistema de movimentação se baseia no uso de uma cremalheira, movimentada por um servo, por ser um movimento que requer alta precisão e suavidade;
- Guia linear para o sistema de deposição de pó: Guia linear projetada para se encaixar nos pilares da estrutura base. Nessa guia, irá correr o dispositivo utilizado para deposição de pó. Possui estrutura reforçada para suportar maior carga;
- Guia linear para sistema de deposição do aglutinante (*print head*): Guia linear projetada para encaixar nos pilares da estrutura base. Nessa guia, irá correr o dispositivo utilizado para liberação do aglutinante. Possui estrutura reforçada para suportar maior carga, além de ser maior do que a guia anterior. O sistema de guia linear foi escolhido pois possui maior precisão e necessita de menos força para ser controlado do que outros sistemas;
- Estrutura de movimento da guia linear: Componente no qual será acoplado o sistema de deposição do aglutinante, que pode se mover pelo eixo da guia linear;
- Componentes para liberação do aglutinante: São dois componentes que se unem na montagem e servem para movimento nos dois eixos restantes nos quais a guia linear não pode se mover. Posteriormente, serão substituídos pela *print head* escolhida;
- Componente para deposição de pó: Possui formato que se adequa a largura da caixa de impressão, de forma que seja possível cobrir todo o comprimento da caixa com o pó metálico. Junto dessa estrutura, temos a estrutura de movimento pela guia linear e também a estrutura utilizada para nivelar o pó dentro da caixa.

Para o subsistema da *print head*, foi desenvolvido de um subsistema próprio. Esse sistema consiste de uma seringa, disposta fora das guias lineares, conectada por um tubo até o ejetor da *print head*, com a velocidade de extrusão controlada por um servo motor. Para garantir a precisão necessária desse subsistema, testes serão realizados utilizando diferentes tipos de aglutinante, além de diferentes velocidades do servo motor para extrusão, tamanhos do tubo e do bico injetor e volume disponível para impressão.

Após testes e interações com diferentes modelos de componentes e disposição dos mesmos, foi projetado o modelo em CAD da impressora levando em conta os fatores de eficiência, custo-benefício e praticidade.

3.2. Sistema de Deposição

3.2.1. *Print head*: Sistema de Deposição do Aglutinante

O sistema de aplicação do aglutinante sofreu algumas iterações conceituais, sendo a ideia inicial a utilização de um extrusor disponível no mercado, entretanto, os requisitos de projeto não foram atendidos pelos sistemas encontrados, logo chegou-se à conclusão da necessidade de desenvolvimento de um modelo próprio para o projeto.

Para o projeto do subsistema, baseou-se no Sistema de Extrusora de bomba de seringa e sistema de cura para impressão 3D de fotopolímeros (no inglês *Syringe Pump Extruder and cure - SPECS*) (Darlin e Smith, 2020), sendo um dos fatores determinantes para a escolha, a validação empírica no trabalho supracitado, onde já existe um protótipo construído. A confiabilidade do subsistema é fator primordial do projeto. Ademais, o baixo custo e facilidade de aquisição dos componentes foram também determinantes para a utilização de uma seringa no sistema de deposição do aglutinante.

Portanto, o sistema da *print head* projetado será composto de três partes principais, a cabeça de extrusão montada sobre o eixo de impressão, o sistema de controle da seringa adjacente a estrutura principal da impressora e, por fim, o sistema de transporte do aglutinante entre ambas partes.

A cabeça de extrusão será projetada de maneira que a massa sobre o eixo de controle seja reduzida e permaneça relativamente constante, minimizando desta maneira possíveis imprecisões nas peças impressas e o esforço necessário para o movimento do sistema. Além disso, prevê-se a utilização de um sistema de clampeamento da agulha, que permitirá sua troca de maneira rápida, se necessário, para alterar os parâmetros de impressão.

O sistema de controle da seringa, será composto de várias partes integrantes, de tal maneira que seja possível a utilização de seringas com volumes variados, possibilitando a troca com facilidade. Desta maneira, será construída uma base móvel com grampos na parte superior da mesma, de forma que possa prender o êmbolo da seringa. Essa base móvel, será movimentada através de duas guias lineares e controlada por um motor de passo, conectado a um fuso rolamentado (barra roscada), possibilitando assim o movimento vertical desta base bem como, conseqüentemente, o controle do volume do aglutinante enviado até a área de impressão. A Figura 1 ilustra este mecanismo.

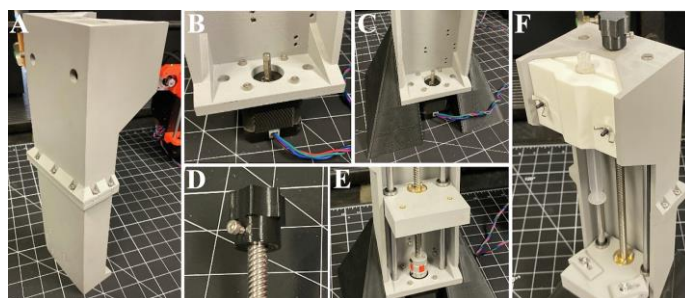


Figura 1. Protótipo da extrusora de seringa (Darlin e Smith, 2020)

Por fim, o método de transporte do aglutinante fará uso de um tubo flexível de material polimérico, conectando o bico da seringa à agulha, que estará afixada no eixo dedicado à impressão (deposição do aglutinador).

3.2.2. Sistema de Deposição do Pó

O sistema tem como objetivo simplificar os processos de controle, sendo assim seu desenvolvimento foi baseado na utilização do G-code, de modo que foi concebido apenas um eixo de movimentação, simplificando a implementação do controle e sua utilização durante a utilização da impressora. Assim, com base no volume de impressão máximo, sendo igual à: $(12\text{cm})^3 = 1728 \text{ cm}^3$, obtém-se a quantidade mínima de pó para uma única impressão. Tendo como objetivo uma impressão por carga, adicionado um fator de segurança de 15%, o sistema de armazenamento deve conter 2000cm^3 de pó por impressão. Utilizando o mesmo raciocínio, cada camada de pó, com 1mm de espessura, possui $14,4\text{cm}^3$, acarretando um máximo de 120 camadas por peça impressa. Uma impressão com 1mm de resolução resulta em estruturas pouco refinadas, incapaz de reproduzir peças com detalhes com ordem de grandeza menor, contudo, para um projeto preliminar de primeira geração, o principal objetivo é o desenvolvimento de um sistema confiável, capaz de reproduzir a mesma tarefa com mesma precisão em vários ciclos, sendo o foco em otimização e aumento da resolução em 2 à 10 vezes da camada de impressão objetivos futuros do projeto.

Da mesma forma que foi definido o sistema de guias lineares para o controle da *print head*, o subsistema de pó também será composto por guias lineares controladas por um servo. Contudo, como ambos os subsistemas são controlados de forma independente, se torna necessário a utilização de dois sistemas de guias lineares, para maior facilidade de implementação, foi definida que as guias lineares de ambos sistemas serão orientadas no eixo X, com as guias do subsistema de pó rente à superfície de impressão, como demonstrado na Figura 1 as guias do sistema da *print head*.

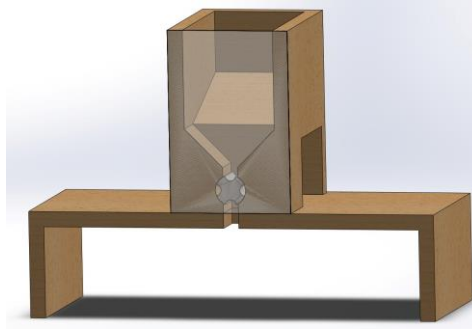


Figura 2. Corte do Sistema de Deposição Rotativo (Autores)

Por fim, com o pó sobre a superfície, o último passo é a sua dispersão correta sobre a base de impressão, o sistema móvel se torna mais simples, necessitando de uma estrutura capaz de coletar e direcionar o pó para dentro da base de impressão, utilizando de uma estrutura de chapa de metal com formato de U, com rodos adicionais de silicone, rentes à superfície externa da base, que tem como objetivo movimentar e depositar a quantidade de pó liberada, de modo a gerar uma nova camada uniformemente depositada pronta para impressão. Também pode ser considerado que esse sistema não distribua corretamente o pó na camada nova, podendo ser utilizado de uma vedação de silicone atrás do nivelador para garantir que todo o pó passe sobre a base de impressão e o excesso seja despejado do outro lado, onde será colocado um sistema para recolher esse pó excedente.

Ademais, a utilização do sistema rotativo implica em restrições extras para seu funcionamento, necessitando de uma folga mínima entre o cilindro rotativo e as paredes do armazenamento, para que o pó não escoe pelas folgas e seja depositado em excesso ou resulte no entupimento do sistema e restringindo o movimento dos servos motores próximos. Para evitar também o entupimento, se torna necessário que esse sistema seja desmontável, para que possa ser limpo entre as impressões e assim evitar danos. Com esse objetivo, o conceito prevê a instalação de um painel de acrílico removível para poder ser visualizado o processo e permitir a limpeza do subsistema.

3.3. Sistema de Controle

Para a realização da impressão, é necessário traduzir a informação do modelo a ser impresso para sinais capazes de serem executados pela impressora, esse feito é realizado com a implementação de uma cadeia de softwares descritos a seguir.

O primeiro software empregado é denominado *Slicer*, este programa é responsável por traduzir a peça vetorizada do ambiente CAD para uma linguagem de impressão. Essa “tradução” dá-se por dividir o sólido em várias camadas finas, na qual é descrito um caminho no qual passa-se por todos os pontos maciços do modelo, para que ela possa ser entendida pelo *print head* da impressora. Com isso, o sistema entende onde deve dispor o material em cada pequena área da região de impressão e em que altura. Existem várias opções livres e *open-source* de *slicers* no mercado.

Na sequência, é preciso comunicar-se com a impressora a fim de detalhar cada comando na ordem especificada, utilizado um programa de controle, que permite a integração entre o *Slicer* e a impressora utilizando as linguagens de programação: *G-code* e *M-code*. Essas linguagens são um sistema de comandos específicos. O primeiro, *G-code*, determina todos os movimentos do cabeçote de impressão. Já o *M-code* possui comandos que ditam miscelâneas do processo de impressão como aquecer o extrusor, região de impressão, velocidade de comunicação, parar de aquecer e afins. Como o objetivo deste trabalho é produzir uma impressão 3D de metais, planeja-se empregar o *Software RepetierHost*, pois este integra *slicers* capazes de enviar *G-Code* direto à impressora e um ambiente de controle.

As próximas etapas a serem realizadas são contemplar os processos de *Binder Jetting* em *G-code* e *M-code*, e configurar corretamente no software as dimensões da área de impressão e dos passos dos controladores da impressora.

Convencionou-se a utilização de um microcontrolador baseado em Arduino para a confecção da parte eletrônica do sistema, sendo assim, a se torna necessária a escolha de um controlador capaz de receber os comandos de impressão em *G-Code*, interpretá-los e enviar os sinais de controle os servos de todos os eixos, além de prover as conexões necessárias para comunicação e controle dos elementos eletrônicos do sistema. Sendo assim, foi escolhido o sistema Arduino Mega, que se acredita ser capaz de lidar com todos os requisitos de projeto, entretanto, é necessário maior pesquisa e validação desse sistema para garantir o funcionamento da impressora.

A partir disso, será possível configurar detalhadamente o circuito elétrico da máquina a partir da plataforma Arduino. Enquanto isso, o ambiente *Repetier-Host* é integrado com configurações prontas para códigos conhecidos de operação em impressão 3D.

3.4. Resultados Preliminares

A Figura 3 e 4 mostram o modelamento atual da estrutura da impressora 3D.

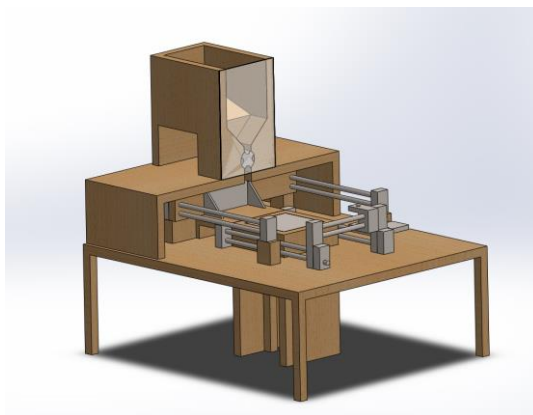


Figura 3. Modelagem completa da impressora (Autores)

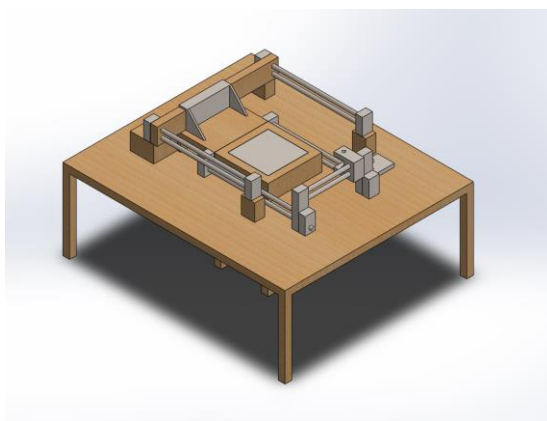


Figura 4. Modelagem detalhada das guias lineares (Autores)

4. CONCLUSÃO

Em suma, a realização do projeto discorreu num maior entendimento sobre as atuais condições da indústria de manufatura aditiva, tendo sido encontradas lacunas quanto à sua utilização para estruturas metálicas, por meio dessa pesquisa foi possível o desenvolvimento de subsistemas essenciais de uma impressora 3D para metais, de forma que as próximas competências a serem descritas sobre o projeto já possuem um direcionamento. Dentre os conceitos descritos, destaca-se o desenvolvimento dos componentes estruturais de uma impressora 3D, no qual foi apresentado modelagens dos componentes estruturais, os eixos de movimentação da *print head* e do sistema de deposição de pó, alcançando a simplicidade de controle objetivada.

Por fim, foram demonstrados alguns aspectos dos sistemas para a extrusão do polímero, o sistema elétrico e a implementação do código na plataforma Arduino, os quais serão melhor detalhadas na sequência desse projeto. Além disso, a partir de dados encontrados na literatura e no setor industrial constatou a importância do desenvolvimento de sistemas de impressão de metais nacionais que colaborem para no futuro próximo tornar a indústria brasileira mais competitiva.

5. REFERÊNCIAS

- Mostafei, A.; Elliot, A.M.; Barnes J.E.; Li, F.; Tan, W.; Cramer, C.L.; Nandwana, P. e Chmielus, M., 2020. “Binder jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges”. In *Progress in Materials Science – Elsevier Ltd*. Estados Unidos.
- Darling, C.; Smith, D. A. 2020. “Syringe pump extruder and curing system for 3D printing of photopolymers”. In *Elsevier Journal*. New Orleans.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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