

DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO TIPO GANTRY PARA MANUFATURA ADITIVA POR FUSÃO-DEPOSIÇÃO A ARCO

Lucas Bassaco Nogueira, lucasnog1403@gmail.com^{1,2}
Marco Aurelio da Fontoura Gonçalves, marcoctism@gmail.com²
Miguel Guilherme Antonello, antonello@ctism.ufsm.br²
Cristiano José Scheuer, cristiano.scheuer@ufsm.br^{1,2}

¹Grupo de Tecnologia e Mecânica dos Materiais – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSM, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

²Grupo Integração de Sistemas CAx – Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, UFSM, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

Resumo. A manufatura aditiva (MA) é uma tecnologia em rápida evolução, revolucionando a abordagem tradicional de fabricação de produtos. Constituída por um conjunto de processos que utiliza uma abordagem de deposição camada sobre camada de material, para criar objetos com forma livre, possibilita a produção de peças na sua forma final ou próxima, com o mínimo de descarte de matéria-prima. Não obstante, sua transferência para o setor produtivo tem encontrado obstáculos, sendo o maior deles o elevado custo dos equipamentos destinados à produção de peças metálicas, mas também a baixa produtividade, e os elevados custos operacionais dificultam a sua consolidação. Buscando superar estas limitações e consolidar uma maior atratividade, a utilização de processos de soldagem a arco para MA de metais foi proposta, sendo intensivamente investigada ao longo dos últimos anos. Entretanto, a disponibilidade de equipamentos de deposição com flexibilidade para processar diferentes materiais e geometrias, dificulta o seu estabelecimento. Com objetivo de qualificar novos sistemas de deposição, este trabalho teve como objetivo desenvolver e fabricar um manipulador robótico tipo Gantry para MA de metais por fusão-deposição a arco. O equipamento desenvolvido é constituído por um envelope de trabalho 400x400x200 mm, e composto por um sistema de deposição (suporte para fixação da tocha de soldagem) e um sistema de usinagem (suporte para fixação de uma retificadora manual). Por fim, o resultado deste trabalho contribuiu o avanço no estado da arte dos dispositivos para MA de metais, fornecendo um dispositivo multifuncional de baixo custo para a comunidade científica e tecnológica.

Palavras chave: Manufatura aditiva, Sistemas de deposição a arco, Manipulador robótico, Desenvolvimento de produtos.

Abstract. Additive manufacturing (AM) is a rapidly evolving technology, revolutionizing the traditional approach to product manufacturing. Consisting of a set of processes that uses a layer-by-layer deposition approach to create free-form objects, it enables the production of parts in net shape or near net shape form, with minimal of raw material disposal. However, its transfer to the productive sector has encountered obstacles, the biggest of which is the excessive cost of equipment to produce metal parts, but also low productivity, high operating costs, make its consolidation difficult. Seeking to overcome these limitations and consolidate a greater attractiveness, the use of arc welding processes for AM of metals was proposed, being intensively investigated over the last few years. However, the availability of deposition equipment with flexibility to process varied materials and geometries makes its establishment difficult. In order to qualify new deposition systems, this work aims to develop and manufacture an robotic Gantry manipulator for AM. The developed equipment is constituted by a 400x400x200 mm work envelope, and composed by deposition (support for fixing the welding torch) and machining (support for fixing a manual grinding machine) systems. Finally, the result of this work contributed to the advancement in the state of the art of devices for metal AM, providing a low-cost multifunctional device for the scientific and technological community.

Keywords: Additive manufacturing, Arc deposition systems, Robotic manipulator, Product development.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA), ou impressão 3D, é um grupo de tecnologias que são usadas para construir protótipos, modelos físicos e peças acabadas a partir de dados tridimensionais (3D) obtidos por técnicas de desenho assistido por computador (CAD) (Udroiu e Nedelcu, 2011). A tecnologia da MA desenvolveu-se rapidamente e comprovou sua eficácia, principalmente para aplicações na produção de protótipos físicos nas etapas de desenvolvimento de produtos e

para a fabricação de peças funcionais em pequenos lotes (Galantucci *et al.*, 2008; Galantucci *et al.*, 2015; Kruth *et al.*, 2007).

Essa estratégia de fabricação permite a produção direta de componentes com formas complexas a partir de seu modelo CAD 3D, usando uma abordagem de deposição de material camada sobre camada (Majid *et al.*, 2017; Nazan *et al.*, 2017; Mazlan *et al.*, 2018). Esta é uma das características mais atrativas do MA, pois permite a produção de componentes na forma final ou próxima, com um mínimo de descarte de matéria-prima (fator *buy-to-fly* – BTF de aproximadamente 1) (Silva, 2019). Além disso, em comparação com os processos de fabricação tradicionais que exigem gabaritos, moldes e ferramentas complexas para a fabricação de um produto, o uso de MA elimina esses requisitos, tornando a operação de fabricação menos complexa e onerosa (Nazan *et al.*, 2016).

Na última década, o desenvolvimento/adaptação de técnicas para MA de peças metálicas possibilitou a transferência desta tecnologia para o segmento industrial. Nesse sentido, os componentes metálicos podem atualmente ser fabricados por processos MA de sinterização seletiva ou deposição direta de metal usando laser ou feixe de elétrons e, a abordagem mais recentemente proposta, por fusão-deposição de metal usando processos assistidos por soldagem a arco (Alkahari *et al.*, 2014; Mazumder *et al.*, 1997; Baufeld *et al.*, 2010; Baufeld *et al.*, 2011; Brandl *et al.*, 2004; Marina *et al.*, 2012). Cada uma dessas diferentes técnicas de MA tem uma influência distinta nas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos componentes metálicos produzidos; e sua seleção depende principalmente da velocidade de produção necessária, das dimensões e forma do componente a ser produzido, do acabamento superficial desejado e do volume de produção (Horii *et al.*, 2009; Brandl *et al.*, 2010; Ghariblu and Rahmati 2014).

Embora a tecnologia MA tenha um papel de liderança na quarta revolução industrial, o alto custo dos equipamentos de processamento é uma limitação para sua consolidação no ambiente industrial. De acordo com a literatura, o custo relacionado ao equipamento representa cerca de 74% dos custos de produção das peças (Pushparaj *et al.*, 2019). Dentre as técnicas de MA de metais mencionadas anteriormente, aquelas que utilizam assistência de arco elétrico (GMA, GTA, PA e SA) correspondem ao menor custo (Silva, 2019). No entanto, mesmo com um custo reduzido em relação a outras técnicas de MA, os equipamentos para manufatura aditiva por fusão-deposição a arco ainda apresentam um custo maior quando comparados a alguns equipamentos utilizados por outras rotas de fabricação (usinagem, conformação, fundição, etc.). Como resultado, a adaptação de equipamentos comumente utilizados em operações de soldagem tem sido avaliada no meio acadêmico, para realizar operações de MA em metais. Nesses casos, os manipuladores robóticos do tipo “tartilope” e antropomórficos são comumente usados para realizar as deposições. Os “tartilopes” têm como principal limitação o número reduzido de graus de liberdade de movimento, limitando a geometria das peças a formas regulares. Para o caso dos robôs antropomórficos, há uma mudança na velocidade de deslocamento do robô e, conseqüentemente, uma mudança na taxa de deposição, em trajetórias curvas; levando a uma variação dimensional e geométrica do componente produzido. Neste último caso, o custo elevado do manipulador também é uma limitante.

Os problemas mencionados podem ser resolvidos com o uso de um manipulador robótico tipo Gantry acionado por motores de passo, que permitem um melhor controle da velocidade de deslocamento em trajetórias não lineares; e possibilitam o movimento em três eixos, garantindo a capacidade de produzir peças com simetria não regular. Além disso, tal sistema apresenta custo reduzido de aquisição e manutenção, e menor complexidade de produção e operação. Assim, visando qualificar novos sistemas de deposição para MA de metais, neste trabalho foi desenvolvido e fabricado um manipulador robótico Gantry para fabricação aditiva de peças metálicas pelo método de fusão-deposição a arco.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de projeto utilizada para orientar as atividades relacionadas ao desenvolvimento do equipamento é baseada no método de Pahl & Beitz (1996). Este método visa estruturar um problema de projeto em etapas, que orientam o desenvolvimento das atividades envolvidas de forma cronológica. As informações iniciais serão os requisitos dos usuários, que serão convertidos em especificações detalhadas que permitirão a proposição de conceitos de produtos que atendam às necessidades de seus usuários. O método adotado segmenta a macro fase de projeto (etapa de desenvolvimento do produto, que envolve a elaboração de seu projeto e plano de fabricação) em quatro fases: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado; que são brevemente descritas a seguir, indicando as ações que foram realizadas em cada uma delas durante esta pesquisa.

A fase de projeto informacional visa estabelecer as especificações de projeto, que irão orientar o desenvolvimento técnico do produto. As tarefas começarão com a definição dos usuários do produto e o estabelecimento de suas necessidades, ou seja, os requisitos dos usuários. Esses requisitos são então “traduzidos” para a linguagem de engenharia, na forma de requisitos de projeto (características que o produto deve possuir). Com a ajuda da ferramenta de Desdobramento de Função Qualidade (*Quality Function Deployment* – QFD), os requisitos dos clientes e do projeto serão correlacionados, categorizando-os por sua importância. Com a ajuda da ferramenta Desdobramento de Função Qualidade (QFD), os requisitos do cliente e do projeto foram correlacionados e categorizados por sua importância. Com a conversão dos requisitos do usuário em requisitos do produto, foram definidas as especificações de projeto, que correspondem às diretrizes para o estabelecimento do projeto do produto.

A fase de projeto conceitual tem como objetivo desdobrar a função técnica global (a função principal do produto) em subfunções parciais (condições para atender a função principal), estabelecendo a árvore de funções do produto. Essa

estrutura funcional permite a definição das funções elementares dos equipamentos (primeira e segunda ordem), e a proposição de princípios alternativos de solução para atender a cada uma delas, por meio do estabelecimento de uma matriz morfológica. A combinação de princípios de solução para cada subfunção parcial proposta na matriz morfológica, permite a geração de alternativas conceituais que atendem aos requisitos pré-estabelecidos pelos usuários. A alternativa conceitual escolhida (a que melhor atende às necessidades dos usuários) corresponde à solução conceitual.

Na fase de projeto preliminar, a alternativa conceitual escolhida foi desenvolvida em termos de sua arquitetura, com o estabelecimento da árvore genealógica do produto. Nesta etapa, foram dimensionados geometricamente os componentes do produto, bem como a seleção de materiais e processos para sua fabricação. Considerando que a metodologia de projeto de produto adotada não fornece parâmetros para a seleção de materiais e processos de fabricação, foram adotados os critérios estabelecidos por Ashby (2012) para a seleção de materiais e processos de fabricação. Após essas definições, a resistência dos componentes do produto foi verificada através de simulações. Finalmente, a alternativa conceitual foi analisada ao final desta fase, sendo julgada em sua otimização através dos testes realizados.

Por fim, a fase de projeto detalhado incluiu as descrições definitivas do produto (layout final, desenhos técnicos, manual com instruções de operação). Nesta fase, também foram definidos os fornecedores de matéria-prima/serviços, e o cronograma de produção, culminando com uma análise crítica do projeto visando avaliar se todas as etapas foram devidamente cumpridas. Nesta etapa, foi construído o protótipo e realizados testes funcionais, a fim de estabelecer as especificações técnicas do equipamento e fazer os ajustes necessários.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nas características do produto, foram definidas necessidades do cliente associadas ao equipamento de manufatura aditiva. Levando em consideração as condições em que o equipamento será utilizado, foi possível identificar as necessidades do cliente e os requisitos do cliente, apresentados na Tabela 1, utilizados então para a elaboração do Diagrama de Mudge, apresentado à frente na Figura 1, obtendo assim o maior entendimento dos requisitos.

	Necessidades do Cliente	Requisitos do Cliente
Projeto	Possuir longa vida útil com bom desempenho	Durabilidade
	Demandar menos espaço para armazenagem e operação	Compacto
	Possibilidade de usar mais de um tipo de equipamento para impressão	Compatibilidade entre bocais
	Possuir boa relação custo/benefício	Baixo custo de aquisição
	Garantir um bom acabamento na peça final	Boa resolução de impressão
	Ter capacidade espacial para produzir peças de maior dimensão	Grande volume de impressão
	Consumir energia de forma eficiente	Baixo consumo de energia
	Realizar a impressão de peças no menor tempo possível	Tempo de impressão
	Possibilitar o uso de diferentes softwares de fatiamento	Sistema de controle universal
	Apresentar interface de controle intuitiva	
Uso	Requerer conhecimentos menos complexos para a operação da máquina	Projeto simples
	Demandar conhecimentos menos específicos para realizar a manutenção	
	Emitir pouco ruído durante a operação	Mecanismos silenciosos

Tabela 1. Necessidades e requisitos dos clientes.

O Diagrama de Mudge é uma ferramenta que permite a comparação, em pares, entre um conjunto de requisitos de cliente a fim de determinar a importância relativa de cada um, dessa forma, direcionando o desenvolvimento do produto para o melhor atendimento das necessidades dos clientes. Com base nos requisitos de cliente listados na Tabela 1, foi atribuído um número a cada, para construção do referido diagrama. Os requisitos seguidos dos seus respectivos valores são explicitados na Tabela 2. É necessário também atribuir valores de importância para validar o diagrama, então atribuiu-se letras a um valor de importância do requisito para com os outros a ele comparados, e estima-se um valor que traduza a sua importância para o projeto, conforme mostrado na Tabela 3.

Requisitos do cliente	Numeração	Requisitos do cliente	Numeração
Resolução de impressão	1	Projeto simples	7
Tempo de impressão	2	Mecanismos silenciosos	8
Custo de aquisição	3	Produto Compacto	9
Durabilidade	4	Compatibilidade entre bocais	10
Volume de impressão	5	Baixo consumo de energia	11
Sistema de controle universal	6		

Tabela 2. Relação requisitos do cliente com seus respectivos valores.

Letra	Valor	Número
A	Pouco mais importante	1
B	Medianamente mais importante	3
C	Muito mais importante	5

Tabela 3: Letras e valores considerados no Diagrama de Mudge.

Os resultados desta análise são mostrados na Figura 1, onde o Diagrama de Mudge indica as comparações realizadas entre os requisitos em questão e os respectivos resultados.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TOTAL	TOTAL(%)
1	1A	1A	1A	1A	1B	1B	1C	1C	1B	1C	28	22,76%
	2	2B	2A	5A	2B	2B	2C	2C	2A	2C	26	21,14%
		3	4A	5A	3A	3A	3B	3B	3B	3A	12	9,76%
			4	5A	4A	4A	4C	4B	4A	4B	15	12,20%
				5	6A	5A	5B	5C	5A	5B	16	13,01%
					6	7B	6B	6B	10A	11A	7	5,69%
						7	8A	7A	10A	11A	4	3,25%
							8	9B	10A	11A	1	0,81%
								9	10B	11A	3	2,44%
									10	10A	7	5,69%
										11	4	3,25%
											123	100,00%

Figura 1. Diagrama de Mudge dos requisitos de cliente.

Com isso é possível verificar a importância de cada requisito de cliente para então realizar as demais etapas. Pode-se observar, por exemplo, que o item de maior importância para o cliente é o Item 1, com 22,76% do valor total. Esse item se refere a resolução da impressão, o que é esperado de um cliente que pretenda reduzir o número de processos e desperdício de material, esperando lucro como retorno. Analogamente, é possível verificar os demais itens na ordem de importância, que são, em segundo lugar o tempo de impressão, em terceiro lugar o volume de impressão, em quarto lugar a durabilidade do produto, em quinto lugar o custo de aquisição, empatados em sexto e sétimo lugar o sistema de controle universal e a compatibilidade entre bocais, empatados em oitavo e nono lugar temos um projeto simples e baixo consumo de energia, em décimo lugar uma máquina compacta e em décimo primeiro lugar, sendo o último item na ordem de importância, temos um mecanismo silencioso.

Afim de que as principais necessidades do cliente sejam incorporadas no desenvolvimento do produto, foi elaborada a matriz de QFD para o manipulador robótico. Foram utilizados os requisitos de cliente do diagrama de Mudge, com seus devidos pesos de importância e os requisitos de projeto mostrados na Tabela 4, que mostra como os requisitos de projeto foram definidos com base na quantificação dos requisitos de cliente.

Requisitos do cliente	Requisitos de Projeto	Numeração
Boa resolução de impressão	Resolução dos motores de passo (°/passo) ↓	1
Tempo de impressão	Velocidade dos motores (passo/s) ↑	2
Grande volume de impressão	Dimensão dos eixos (mm) ↑	3
Durabilidade	Vida útil (anos) ↑	4
Baixo custo de aquisição	Custo dos materiais ↓	5
Sistema de controle universal	Linguagens de comandos suportadas ↑	6
Compatibilidade entre bocais	Amplitude do suporte de bocal (cm) ↑	7
Projeto simples	Quantidade de peças ↓	8
Baixo consumo de energia	Consumo da máquina (kW/h) ↓	9
Compacto	Volume da máquina (cm³) ↑	10
Mecanismos silenciosos	Tolerância de ruído (dB) ↓	11

Tabela 4. Requisitos de cliente e requisitos de projeto

Realizada então a comparação entre os requisitos de cliente e de projeto, considerando e avaliando os números obtidos em cada requisito, conforme a Tabela 5 e com uma visualização mais simples e precisa das necessidades a serem avaliadas, foi construído a diagrama QFD (Tabela 6), que compara o que foi indicado pelos possíveis clientes do produto com o valor de importância para o projeto.

Símbolo	Valor	Valor Numérico
Δ	Pouco relacionado	1
○	Medianamente relacionado	3
∅	Muito relacionado	5
X	Não relacionado	0

Tabela 5. Simbologia do método QFD

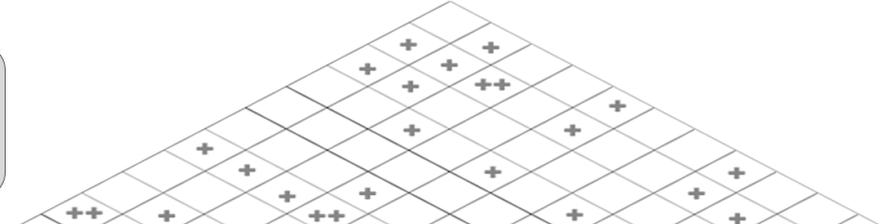
Correlação

++ Muito Positiva

+ Positiva

- Negativa

-- Muito Negativa



Importância Relativa	Ordem de Importância	Requisitos de Projeto / Necessidades do Cliente	Precisão dos motores de passo (°/passo) ↓	Velocidade dos motores (passo/s) ↑	Dimensão dos eixos (mm) ↑	Vida útil (anos) ↑	Custo dos materiais ↓	Linguagens de comandos suportadas ↑	Amplitude do suporte de bocal (cm) ↑	Quantidade de peças ↓	Consumo da máquina (kW/h) ↓	Volume da máquina (cm³) ↑	Tolerância de ruído (dB) ↓
			22,76%	1	Boa resolução de impressão	∅	○	X	X	Δ	Δ	X	X
21,14%	2	Tempo de impressão	○	∅	○	X	Δ	X	X	X	Δ	X	Δ
13,01%	3	Grande volume de impressão	X	Δ	∅	X	Δ	X	X	X	Δ	○	X
12,20%	4	Durabilidade	X	X	X	∅	∅	Δ	X	Δ	X	X	X
9,76%	5	Baixo custo de aquisição	Δ	Δ	Δ	○	∅	Δ	X	∅	○	X	Δ
5,69%	6	Sistema de controle universal	X	X	X	X	X	∅	X	X	X	X	X
5,69%	7	Compatibilidade entre bocais	X	X	X	Δ	Δ	X	∅	Δ	X	X	X
3,25%	8	Projeto simples	X	X	Δ	Δ	○	X	X	∅	Δ	X	Δ
3,25%	9	Baixo consumo de energia	X	○	Δ	X	X	X	X	X	∅	X	Δ
2,44%	10	Compacto	X	X	∅	X	Δ	X	Δ	Δ	X	∅	X
0,81%	11	Mecanismos silenciosos	X	○	X	X	○	X	X	Δ	Δ	X	∅
Prioridade			204,84	338,24	208,16	122,00	204,96	45,52	34,14	45,50	42,25	19,52	7,29
Ordem de atuação			4	1	2	5	3	6	9	7	8	10	11
Prioridade relativa			16,1%	26,6%	16,4%	9,6%	16,1%	3,6%	2,7%	3,6%	3,3%	1,5%	0,6%

Tabela 6. Desdobramento da Função de Qualidade (QFD)

Para determinar o peso de cada requisito de projeto foram somados os valores correspondentes da matriz QFD e multiplicado pelos respectivos valores encontrados pelo diagrama de Mudge, representado na Tabela 6 por V_c , resultando em um valor de importância para cada requisito de projeto pré-estabelecido.

O requisito de maior prioridade é o item 2, que corresponde à velocidade dos motores de passo, o que está diretamente relacionado ao requisito do cliente que faz menção justamente a resolução de impressão, o que influencia em diversos outros aspectos, como custo da produção, consumo de energia. Analogamente, é possível verificar a ordem de prioridade dos demais itens. O item 3 ocupa a segunda posição e está relacionado a dimensão dos eixos. O item 5 ocupa a terceira posição e está relacionado ao custo dos materiais do manipulador robótico. O item 1 ocupa a quarta posição e está relacionado a resolução dos motores de passo. O item 4 ocupa a quinta posição e está relacionado a vida útil do produto. O item 6 ocupa a sexta posição e está relacionado as linguagens de comandos suportadas pelo software. O item 8 ocupa a sétima posição e está relacionado a quantidade de peças presentes no projeto. O item 9 ocupa a oitava posição e está relacionado ao consumo de energia da máquina. O item 7 ocupa a nona posição e está relacionado a amplitude de abertura do suporte de bocal para fixação da ferramenta de deposição. O item 10 ocupa a décima posição e está relacionado ao volume externo da máquina. O item 11 ocupa a décima primeira e última posição e está relacionado a tolerância de ruído dos mecanismos.

A partir dessas informações, foi possível construir um projeto de robô Gantry para manufatura aditiva metálica por arco elétrico. Portanto, na Figura 2 é mostrada uma representação gráfica em CAD 3D do robô Gantry projetado. Este equipamento é composto por um envelope de trabalho com dimensões de 400×400×200 mm. Da mesma forma, é constituído por cinco conjuntos, nomeados: estrutural, sistema de movimento do eixo X, sistema de movimento do eixo Y, sistema de movimento do eixo Z e controle; que são brevemente descritos a seguir. Os eixos X e Y estão dispostos em uma configuração em série para mover o carro da impressora em um plano, que corresponde à placa de deposição. O eixo Z permite o movimento em uma direção normal ao plano da placa de deposição.

Atendendo aos requisitos funcionais, a impressora possui motores de passo como atuadores em todos os seus eixos. Os motores de passo são de longe a opção de menor custo e são capazes de fornecer a funcionalidade desejada. Motores

de passo de alto torque (20 kgf·cm) acionam os fusos de fusos de acionamento dos eixos X e Y diretamente, permitindo que a impressora execute os movimentos de alta velocidade necessários para a impressão. O eixo Z, por sua vez, é composto por um motor de passo de 8 kgf·cm. Cada motor é emparelhado com um GRBL Electronics (sistema de controle) baseado em firmware, que opera no modo micro passos 16× para fornecer uma resolução de posicionamento melhor que 2000 DPI. Além disso, o uso de fuso de esferas permite maior precisão na posição dos sistemas de deposição/remoção. Os motores de passo são acoplados aos fusos de esferas por meio de acoplamento flexível em alumínio, especificado para torques de até 20 kgf·cm. O sistema de movimento também é composto por eixos retificados e cromados.

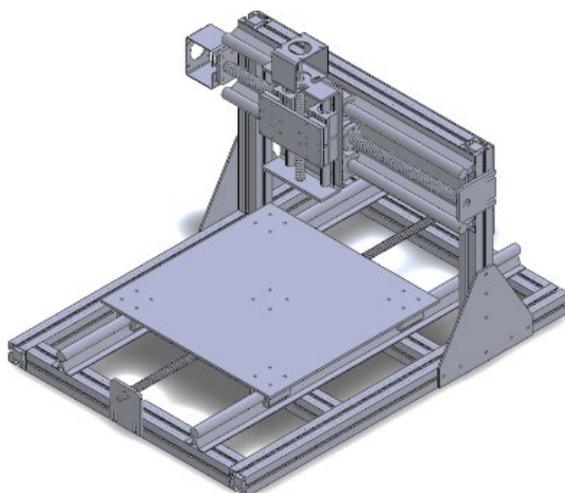


Figura 2. Layout geral em CAD 3D do robô Gantry desenvolvido para MA pelo método de fusão-deposição a arco.

O conjunto estrutural (Figura 3) suporta os elementos que permitem ao equipamento projetado conter os demais conjuntos que o compõem, capacitando-o a desempenhar sua função técnica global. Este conjunto suporta os eixos de movimentação do equipamento, abriga os componentes eletrônicos e isola seu interior do ambiente circundante. Como o equipamento é destinado à pesquisa, é importante que a estrutura e o invólucro sejam simples de montar e modificar e permitam uma fácil inspeção dos elementos mecânicos constituintes. A estrutura do equipamento é composta por perfis estruturais de alumínio anodizado com ranhura em T (6063-T5) com seção de 40×40 mm, que proporcionam a resistência estrutural necessária. Devido à disposição dos *slots* em T, os subsistemas de equipamentos podem ser montados em qualquer ponto ao longo do comprimento de um elemento de sua estrutura. Suportes estruturais em aço carbono ABNT 1045 reforçam a estrutura e permitem a fixação dos eixos, sendo fixados aos perfis estruturais por meio de parafusos allen de centragem e porcas martelo.

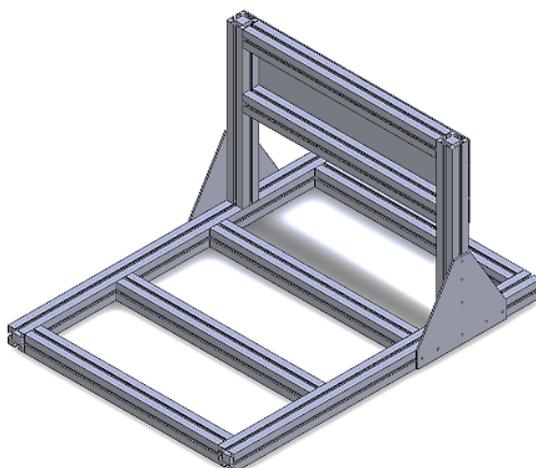


Figura 3. Conjunto estrutural do robô Gantry desenvolvido para MA pelo método de fusão-deposição a arco.

A guia linear para o eixo X é um par de eixos de aço temperado cromado e retificado com precisão de 5/8" apoiados em cada extremidade por suportes de aço ABNT 1045 (Figura 4a). Os suportes de aço ABNT 1045 também são empregados para suportar o motor de passo. Dois eixos são necessários para restringir o carro a um movimento em linha

reta. Para garantir que os eixos sejam paralelos, foram usados 'Pillow Blocks' para acoplar o eixo X à placa de deposição. Um fuso de esferas de 400 mm de comprimento garante um comprimento amplo de movimento neste eixo. A placa de deposição é fabricada em aço carbono ABNT 1045 com dimensões de 300x300 mm e 8 mm de espessura.

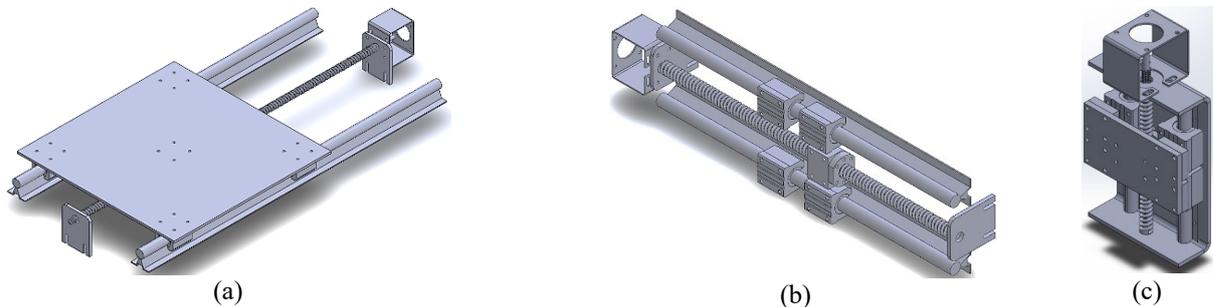


Figura 4. (a) Eixo X, (b) eixo Y e (c) do robô Gantry desenvolvido para MA pelo método de fusão-deposição a arco.

O eixo Y consiste em um fuso de esferas de 400 mm de comprimento (Figura 4b). Assim como no eixo X, a carga do eixo Y é transportada em quatro rolamentos lineares de esferas montados em um par de eixos de aço temperado e cromado de 5/8". Os eixos, fuso de esferas e motor de passo também são fixados à estrutura de alumínio por meio de suportes de aço ABNT 1045 por meio de parafusos allen de centragem e porcas de martelo.

Em contraste com os eixos X e Y, o eixo Z (Figura 4c) só precisa fazer pequenos movimentos esporádicos, ou seja, cada vez que uma camada é finalizada, ela deve deslocar-se ao equivalente à uma camada de altura, que normalmente constitui alguns mm. Assim, a baixa velocidade de movimento não é uma preocupação. Entretanto, como deve suportar o peso da plataforma de construção (sistemas de deposição e usinagem) na direção do movimento, a rigidez e a resistência são de importância crítica. O acionamento do fuso de esferas empregado fornece exatamente a combinação necessária de recursos exigidos para esta tarefa. A grande vantagem mecânica do acionamento de parafuso significa que mesmo um motor de tamanho modesto será capaz de mover o peso da plataforma de construção. A principal desvantagem de um parafuso de avanço, a folga, é eliminada porque o peso da plataforma de construção pré-carrega a porca de acionamento contra o parafuso de avanço. Assim como nos eixos X e Y, a guia linear em cada parafusadeira do eixo Z é feita de um par de eixos de aço temperado de precisão de 5/8 de polegada.

Por fim, uma fotografia do equipamento parcialmente montado é mostrada na Figura 5.



Figura 5. Imagem geral do *layout* do robô Gantry desenvolvido para MA através do método de fusão-deposição a arco.

4. CONCLUSÕES

O equipamento produzido possui um envelope de trabalho com dimensões de 400x400x200 mm, composto por um sistema de deposição (suporte para fixação da tocha de soldagem) e um sistema de usinagem (suporte para fixação de uma retífica manual). Os resultados deste trabalho contribuíram para o avanço no estado da arte dos dispositivos para MA de metais, fornecendo um dispositivo multifuncional de baixo custo para a comunidade científica e tecnológica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Fundo de Incentivo à Pesquisa (FIPE) da UFSM, pela bolsa de iniciação científica concedida a Lucas Bassaco Nogueira; e por dispor da infraestrutura necessária para a realização desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Alkahari, M.R., Furumoto, T., Ueda, T., Hosokawa, A., 2014. Melt Pool and Single Track Formation in Selective Laser Sintering/Selective Laser Melting, *Advanced Materials Research*, Vol. 933, p. 196-201.
- Ashby, M., 2012. *Seleção de materiais no projeto mecânico (in Portuguese)*. 4ª ed. Editora Elsevier, Rio de Janeiro.
- Baufeld, B., Van der Biest, O., Gault, R., 2010. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V component by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties, *Material and Design*, Vol. 32, p. 106-111.
- Baufeld, B., Van der Biest, O., Gault, R., Ridgway, K., 2011. Manufacturing Ti-6Al-4V component by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties, *IOP conference series: Material science and engineering*, Vol. 26, p. 012001.
- Brandl, E., Baufeld, B., Leyens, C., Gault, R., 2010. Additive manufacturing Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications, *Physics Procedia*, Vol. 5, p. 595-606.
- Brandl, E., Leyens, C., Palm, F., Schoberth, A., Onteniente, P., 2004. Mechanical properties of additive manufacturing Ti-6Al-4V using wire and powder-based process, *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, Vol. 26, p. 012004.
- Galantucci, L.M., Lavecchia, F., Percoco, G., 2008. Study the compression properties of topologically optimized FDM made structured parts, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57, p. 243-246.
- Galantucci, L.M., Bodi, I., Kacani, J., Lavecchia, F., 2015. Analysis of dimensional performance for a 3D open-source printer based on fused deposition modelling technique, *Procedia CIRP*, Vol. 8, p. 82-87.
- Ghariblu, H., Rahmati, S., 2014. New process and machine for layered manufacturing of metal parts, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 136, p. 041004.
- Horii, T., Kiriwara, T.S., Miyamoto, Y., 2009. Freeform fabrication of superalloy objects by 3D micro welding, *Material and Design*, Vol. 30, p. 1093-1097.
- Kruth, J.P., Levy, G., Klocke, F., Childs, T.H.C., 2007. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 56, p. 730-759.
- Marina, F., Mehnen, F.J., Williams, J.S.W., Colegrove, P., Wang, F., 2012. Investigation the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 212, p. 1377-1386.
- Majid, S.N.A., Alkahari, M.R., Ramli, F.R., Maidin, S., Fai, T.C., Sudin, M.N., 2017. Influence of Integrated Pressing during Fused Filament Fabrication on Tensile Strength and Porosity, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 2, p. 185-195.
- Mazlan, S.N.H., Alkahari, M.R., Ramli, F.R., Sudin, M.N., Maidin, N.A., Oii, K.S., 2018. Manufacturability of Mechanical Structure Fabricated using Entry Level 3D Printer, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 5, p. 98-122.
- Mazumder, J., Choi, J., Nagarathnam, K., Koch, J., Hetzned, D., 1997. The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D componenets, *Journal of the Minerals, Metals, and Materials Society*, Vol. 49, p. 55-60.
- Nazan, M.N., Ramli, F.R., Alkahari, M.R., Sudin, M.N., Abdullah, M.A., 2016. Optimization of warping deformation in open source 3D printer using response surface method, in *Proceedings of Mechanical Engineering Research Day*, p. 71-72.
- Nazan, M.A., Ramli, F.R., Alkahari, M.R., Sudin, M.N., Abdullah, M.A., 2017. Process Parameter Optimization of 3D Printer using Response Surface Method, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol 12, p. 2291-2296.
- Pahl, G.; Beitz, W., 1996. *Engineering design: a systematic approach*. 3rd edition. ed. Springer Verlag, Germany.
- Silva, L.J. 2019. Near-immersion active cooling for wire arc additive manufacturing: from concept to application. PhD Thesis. Graduate Program in Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia, Uberlandia.
- Udroiu, R., Nedelcu, A., 2011. Optimization of Additive Manufacturing Process Focused on 3D Printing, INTECH Open Access Publisher.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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