

MONTAGEM E TESTES PRELIMINARES DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO TIPO GANTRY PARA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO-FUSÃO A ARCO

Lucas Bassaco Nogueira, lucas.bassaco@acad.ufsm.br^{1,2}

Marco Aurelio da Fontoura Gonçalves, marcoctism@gmail.com²

Cristiano José Scheuer, cristiano.scheuer@ufsm.br¹

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Grupo de Tecnologia e Mecânica dos Materiais - GMAT. Prédio 10 - Sala 407, Bairro Camobi, CEP 97105-900 - Santa Maria, RS

² Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Grupo Integração de Sistemas CAx. Prédio 5A - Sala 106, Bairro Camobi, CEP 97105-900 - Santa Maria, RS

Resumo. A manufatura aditiva (MA) é uma tecnologia em rápida evolução que está revolucionando a abordagem tradicional de fabricação de produtos, sendo constituída por um conjunto de processos que utiliza uma abordagem de deposição camada por camada de material, para criar objetos com forma livre. Essa característica faz com que a MA possibilite a produção de peças na sua forma final ou próxima à final, com o mínimo de descarte de matéria-prima. A transferência dessa tecnologia para o setor produtivo tem encontrado alguns obstáculos, sendo o maior deles o elevado custo dos equipamentos dedicados à produção de peças metálicas. Este projeto de pesquisa tem como propósito desenvolver, fabricar e validar um equipamento para MA de metais por deposição a arco, utilizando um manipulador robótico tipo Gantry. Sua área de trabalho possui dimensões de 400x400x200 mm e conta com uma retífica acoplada ao eixo de deposição para realizar uma etapa de acabamento após os processos de deposição. As peças são separadas em quatro principais conjuntos (eixos e estrutura), simplificando a logística e montagem do produto. 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 produto.

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). 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).

Com a difusão desses processos na indústria, 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).

O alto custo dos equipamentos de processamento é uma limitação para sua consolidação no ambiente industrial. 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). A adaptação de equipamentos comumente utilizados em operações de soldagem tem sido avaliada no meio acadêmico, para realizar operações de MA em metais. 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. ABORDAGEM METODOLÓGICA ADOTADA

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.

A fase de projeto informacional visa estabelecer as especificações de projeto, que irão orientar o desenvolvimento técnico do produto. Com a ajuda da ferramenta de Desdobramento de Função Qualidade (*Quality Function Deployment – QFD*), requisitos dos clientes e do projeto obtidos serão correlacionados, categorizando-os por sua importância.

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.

Na fase de projeto preliminar, a alternativa conceitual escolhida foi desenvolvida em termos de sua arquitetura, com o estabelecimento da árvore genealógica do produto. 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, utilizados então para a elaboração do Diagrama de Mudge, apresentado à frente na Figura 1, obtendo assim o maior entendimento dos requisitos.

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. É necessário também atribuir valores de importância para validar o diagrama, então atribui-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 1.

Tabela 1. Letras e valores considerados no Diagrama de Mudge.

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

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	2C	2C	2A	2C	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. Em segundo lugar o tempo de impressão, em terceiro lugar o volume de impressão e assim sucessivamente.

A fim 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 2, que mostra como os requisitos de projeto foram definidos com base na quantificação dos requisitos de cliente.

Utilizando símbolos associados a valores, conforme a Tabela 3, foi construído o diagrama QFD (Figura 2) que compara o que foi indicado pelos possíveis clientes do produto com o valor de importância para o projeto. Para determinar o peso de cada requisito de projeto foram somados os valores correspondentes da matriz QFD e multiplicado pelos valores encontrados pelo diagrama de Mudge, resultando em um valor de importância para cada requisito de projeto pré-estabelecido.

Tabela 2. Requisitos de cliente e requisitos de projeto

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 (cm ³) ↑	10
Mecanismos silenciosos	Tolerância de ruído (dB) ↓	11

Tabela 3. Símbolos e valores utilizados na matriz QFD.

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

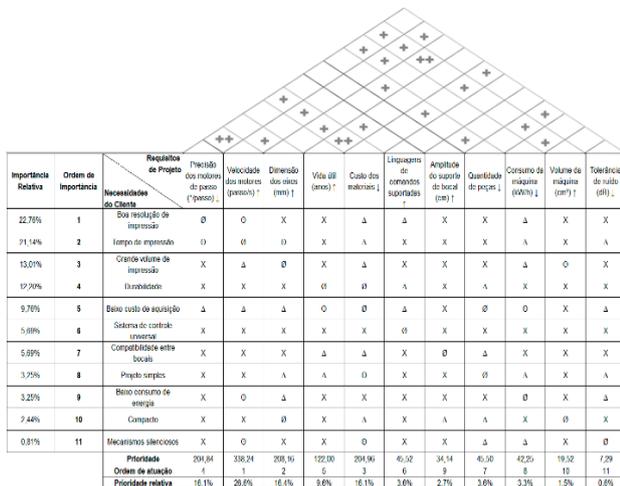


Figura 2. Matriz QFD.

O requisito de maior prioridade é o item 2, que corresponde à velocidade dos motores de passo, o que está fazendo menção justamente a resolução de impressão. 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 e os demais itens assim seguem sucessivamente.

A partir dessas informações, foi possível construir um projeto de robô Gantry para manufatura aditiva metálica por arco elétrico. Portanto, na Figura 3 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. 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 uso de fuso de esferas permite maior precisão na posição dos sistemas e o sistema de movimento é composto por eixos retificados e cromados.

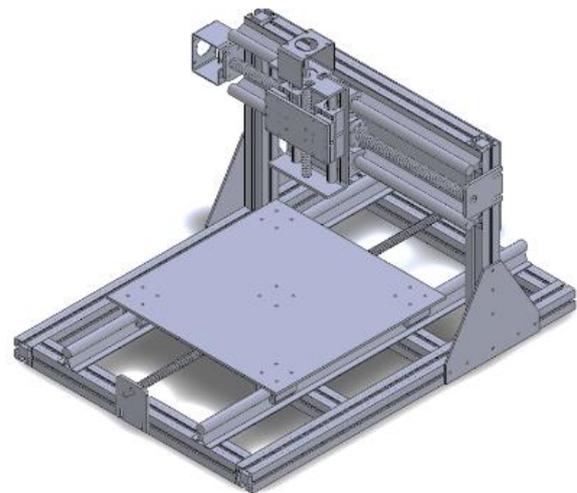


Figura 3. Layout geral em CAD 3D do robô Gantry

O conjunto estrutural (Figura 4) 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. 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.

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.

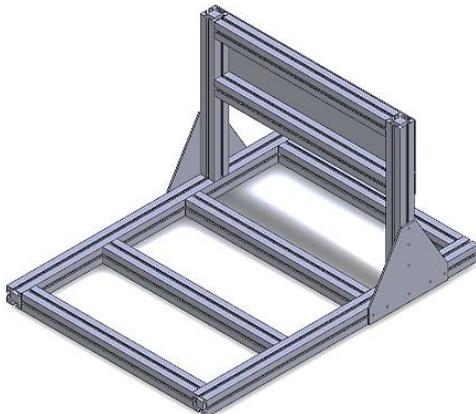


Figura 4. Conjunto estrutural do robô Gantry desenvolvido

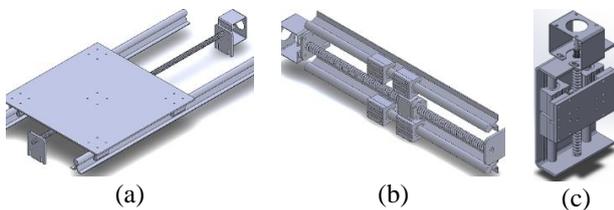


Figura 4. (a) Eixo X, (b) eixo Y e (c) eixo Z do robô Gantry

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. 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. 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 robô Gantry desenvolvido.

4. CONCLUSÃO

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 contribuirão 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. REFERÊNCIAS

- Alkahari, M.R., *et al*, 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.
- BACK, N. et al. *Projeto Integrado de Produto: planejamento, concepção e modelagem*, 1ª ed. Barueri, Editora Manole, 2008.
- Majid, S.N.A. *et al*, 2017. Influence of Integrated Pressing during Fused Filament Fabrication on Tensile Strength and Porosity, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 2, p. 185-195.
- PAHL, G.; BEITZ, W. *Engineering Design a systematic approach*. Londres: The Design Council, 1988.
- Silva, L.J. 2019. Near-immersion active cooling for wire arc additive manufacturing: from concept to

application. PhD Thesis. Federal University of
Uberlandia, Uberlandia.

Udroiu, R., Nedelcu, A., 2011. Optimization of Additive
Manufacturing Process Focused on 3D Printing,
INTECH Open Access Publisher.

