

USO DA ROBÓTICA COOPERATIVA PARA A MANUFATURA ADITIVA METÁLICA EM PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

Congresso Brasileiro De Manufatura Aditiva, 1ª edição, de 30/11/2020 a 01/12/2020
ISBN dos Anais: 978-65-86861-62-4

COELHO; Fagner Guilherme Ferreira ¹, BRACARENSE; Alexandre Queiroz ², II; Eduardo José Lima ³, CORRADI; Diego Raimundi ⁴, ARIAS; Ariel Rodrigues ⁵

RESUMO

RESUMO

A integração de sistemas de manufatura e robôs propiciam como resultado uma configuração padronizada de uma célula de manufatura, flexível e de baixo custo que pode ser rapidamente integrada ao sistema de produção existente. Isto nos leva a concluir que qualquer volume de produção pode ser efetivamente automatizado. Na criação de células de manufatura muitas vezes necessita-se da atuação em grupo, ou em rede dos robôs, a partir desta atuação podemos definir o termo “cooperativos” e defini-lo como sendo as ações coordenadas de forma a realizar uma tarefa ou atingir um objetivo comum, ou seja, os robôs devem cooperar para resolver um problema específico, principalmente quando um só robô não é capaz de resolver o problema sozinho. Um exemplo da necessidade de robôs que atuem de forma cooperativa é quando se quer soldar uma peça complexa e faz-se o uso de posicionadores para tal. Esta tarefa pode não ser muito complexa quando apenas um robô tem que executá-la, entretanto, se a peça a ser soldada for demasiado grande ou pesada para um único robô, justifica-se o uso de um segundo robô para a realização da tarefa de forma conjunta, ou seja, um cooperando com o outro para a realização da tarefa comum. Este é inclusive, um comportamento observado da vida animal, onde um grupo de formigas é capaz de transportar objetos pesados pelo movimento coordenado entre os membros do grupo. Este trabalho apresenta uma proposta de integração de dois manipuladores robóticos devido suas versatilidades em se adequarem a diversas situações em relação a outras máquinas, o torna um atrativo para proporcionar uma maior liberdade na confecção dos modelos 3D propostos.

INTRODUÇÃO

Em um mundo cada vez mais competitivo, a busca pela inovação com a preocupação na sustentabilidade reflete diretamente na necessidade da redução de desperdícios de insumos. Com isso a busca pelo aperfeiçoamento de produtos e processos visa respeitar os protocolos determinados contra a redução de resíduos e de poluentes. A Manufatura Aditiva é uma tecnologia revolucionária que ao contrário aos outros processos de fabricação convencionais, pois apresenta uma proposta em que realiza a deposição sucessiva de material durante a fabricação, portanto, a quantidade de resíduos gerados tende a ser muito menor, e é possível determinar de uma forma mais assertiva a quantidade de insumos a serem utilizados. A impressão 3D como hoje vem sendo chamada a Manufatura Aditiva, representa um conjunto de tecnologias de fabricação, em que o modelo é obtido a partir de um modelo digital 3D criado num software CAD.

O processo de manufatura aditiva vem obtendo diversos modos de aplicação, tanto como técnica como materiais, e o uso dos processos de soldagem convencionais, apresentam uma boa alternativa a ser estudada e desenvolvida. A deposição de metais na tecnologia de manufatura aditiva pode ocorrer através de diferentes processos de soldagem (Alberti *et al.*, 2014). Os processos por arco elétrico Plasma, MIG/MAG, TIG, podem ser destacados, por possuírem maior eficiência energética e ampla abrangência em relação à quantidade de material depositado, possibilitando a produção de peças maiores, com maior rapidez (Uziel, 2016).

Os sistemas utilizados para geração de trajetória e controle de deposição do material é através de CNC (*Computer Numeric Control*), ou manipuladores robóticos de modo individual ou integrado. Após o grande avanço na programação de manipuladores robóticos de acordo com tarefas pré-estabelecidas em modo aprendizado e repetição (manipuladores de 1ª geração), a robótica amplia sua pesquisa em robôs que são capazes de realizar tomadas de decisão, em tempo real, de acordo com sinais que são realimentados através de informações sobre o ambiente externo.

¹ UFMG, fgfcoelho@yahoo.com.br

² UFMG, queiroz@demec.ufmg.br

³ UFMG, ejlima2@gmail.com

⁴ UFSJ, diego.corradi@ufsj.edu.br

⁵ UFMG, ariela@demec.ufmg.br

Com a velocidade em que ocorre o avanço da tecnologia e a necessidade de melhoria e confiabilidade da produção, aliado a qualidade e a redução de custos, os dispositivos utilizados na automação de processos vem se tornando cada vez mais inteligentes, tornando a manufatura integrada. Porém, devido ao alto investimento necessário para aquisição de máquinas novas, as instituições adotam o uso de *retrofitting*, ou desenvolvimento de novos dispositivos com um custo mais reduzidos. Basicamente *retrofitting* é uma adequação tecnológica, de máquinas que se apresentam desatualizadas, baseando-se na troca dos comandos eletrônicos por outros de última geração e também de componentes e acionamentos antigos por modernos e mais confiáveis.

Com esse propósito, foi proposta a adequação de um robô antropomórfico de cinco eixos da marca ASEA, modelo IRB6 (atualmente ABB), que não oferece mais serviços de assistência técnica ou reposição de peças. O robô encontra-se em perfeito estado mecânico, e o sistema pode ser controlado tanto por *drivers* de controle G320 da Gecko, conforme apresentado na Fig. 1.1(a), (Bomfim, 2012), quanto por uma arquitetura baseada em micro controladores *open-source* Atmel, na plataforma do Arduino, representado na Fig. 1.1(b).



Figura 1: Arquiteturas de controle do Manipulador ASEA IRB6

Robôs cooperativos são aqueles em que suas ações são controladas de forma que seja possível realizar uma tarefa em conjunto. O uso desta técnica é comum na indústria quando se necessita soldar uma peça com geometria complexa, ou de dimensão e peso elevados, o que necessita utilizar um sistema de posicionamento, ou até mesmo robotização.

Devido a geometria, dimensões, peso, sequência de soldagem, entre outros fatores, que podem ser um limitante para a realização da tarefa com um único manipulador, justifica então a adoção de um outro robô.

A partir dos parâmetros geométricos da peça a ser confeccionada, que serão dados de entrada, e estabelecida as posições relativas da tocha em relação ao plano de deposição de material, é então estabelecida a cinemática do processo, e as coordenadas dos movimentos dos robôs.

Para permitir a possibilidade de integração dos manipuladores e ambos trabalhem de forma cooperativa, foi necessário promover a atualização do sistema de controle do robô ASEA, a partir das soluções viáveis, de acordo com ações relacionadas com operação, manutenção, confiabilidade, qualidade, custo, desempenho e funcionamento do robô.

Ao final dessa etapa foram obtidas as especificações do projeto e a validação e conclusão de que realizar o ARDUINO para o *retrofitting* é totalmente viável. Na fase do projeto conceitual, foram definidas as funções do produto e suas possíveis soluções, em que a principal solução escolhida foi a eliminação do software CNC Mach3, o que por consequência elimina o uso da interface através da porta paralela do computador adotando agora a USB, além de permitir uma interação imediata entre os controladores dos robôs.

METODOLOGIA

Com uso de dois manipuladores robóticos antropomórficos disponíveis no Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação (**LRSS**) da Universidade Federal de Minas Gerais, promover um estudo da viabilidade do processo no desenvolvimento de peças baseadas na manufatura aditiva por soldagem GMAW. A célula está apresentada na Figura 2 e, é composta basicamente por:

- Manipulador Robótico ASEA com 5 graus de liberdade (Rob1);
- Manipulador Motoman com 6 graus de liberdade (Rob2);
- Fonte de soldagem multiprocesso;

¹ UFMG, fgfcoelho@yahoo.com.br
² UFMG, queiroz@demec.ufmg.br
³ UFMG, ejlima2@gmail.com
⁴ UFSJ, diego.corradi@ufsj.edu.br
⁵ UFMG, ariela@demec.ufmg.br

Figura 2: Célula de robótica cooperativa



Figura 2: Célula de robótica cooperativa

O sistema de refrigeração é aplicado para tornar a troca térmica mais eficiente na peça, não deixando a cargo apenas da convecção natural, promovendo assim que os ciclos térmicos sucessivos sejam minimizados.

Figura 3: Detalhe do sistema de refrigeração na placa base



Figura 3: Detalhe do sistema de refrigeração na placa base

O sistema de controle desenvolvido para o manipulador retrofitado, é composto basicamente pelos itens abaixo, e características como exatidão, repetibilidade e estabilidade foram garantidos, para sua aplicabilidade:

- Algoritmo desenvolvido em MATLAB[®], para geração da trajetória;
- 5 motores CC
- 5 Drivers para acionamento dos motores;
- 5 *Encoders* para controle de posição dos motores;
- 1 Circuito de acionamento da abertura/fechamento do arco;
- 1 Circuito DIO para *interface* com o outro manipulador, e demais periféricos;
- 1 Circuito de emergência;

Os parâmetros foram desenvolvidos e otimizados utilizando regras de regressão linear, e foram utilizadas para compor um banco de dados (Allen *et al.*, 2002), conforme a Figura 4, que será utilizado para fornecer os valores a serem imputados durante o processo de soldagem de modo a obter uma peça o mais próximo do modelo desenvolvido em ambiente CAD.

Figura 4: Metodologia proposta da integração



Figura 4: Metodologia proposta da integração

Desenvolvimento da Arquitetura Cooperativa

Os robôs são aliados no desenvolvimento da automação industrial de processos, pois são capazes de dar resposta aos mais exigentes padrões de qualidade dos mercados aumentando, significativamente, a produtividade e qualidade.

O desenvolvimento da arquitetura está baseado na geometria da peça a ser produzida, para o planejamento do movimento e posicionamento relativo entre os robôs, de forma independente, já que cada manipulador possui seu próprio controlador.

Considerando a relação entre as matrizes de transformação homogênea de cada manipulador, o programa gerará as trajetórias cartesianas da extremidade dos robôs, de soldagem e de posicionamento, baseado nas restrições cinemáticas impostas pela geometria da peça e pelo procedimento de soldagem adotado. A trajetória cartesiana dos robôs é convertida para ângulos de junta usando o procedimento de cinemática inversa. O uso de funções de penalidade baseadas em algoritmos genéticos, foram adotadas para evitar que restrições de movimentos fossem alcançadas durante o processo de minimização das mesmas.

O modelo do robô retrofitado é baseado nos parâmetros de Denavit-Hartenberg para sua representação e o planejamento da trajetória é através de B-splines cúbicas, para o controle do grau de continuidade das juntas. Diversas são as técnicas de interpolação polinomial, e a adotada aqui é baseada em splines, que permitem a análise e configuração não só do posicionamento/orientação, mas também apresenta informações sobre o deslocamento.

Para este manipulador com 5 graus de liberdade, em que j representa a quantidade de juntas e m a quantidade de nós utilizados para construir as splines cúbicas, a trajetória se dá como representado pela Eq. (1) e Eq. (2):



Esta trajetória desenvolvida, remete a movimentos suaves, de modo a garantir deslocamentos com velocidades constantes, o que não irá comprometer o resultado da peça a ser produzida, garantindo assim que sua qualidade não seja influenciada por essa variável (Lin *et al.*, 1995).

O modelo proposto para os movimentos cooperativos entre os manipuladores está baseado em um controle descentralizado (Sun *et al.*, 2002), em que cada robô é controlado separadamente por seu próprio controlador local, com troca de informações através de meios físicos entre eles para interfaces.

A sincronização dos movimentos dos robôs baseado na técnica de controle mantém as relações cinemáticas, a partir da otimização de erros de posicionamentos, de modo a correlacionar o problema de coordenação com a cinemática dos manipuladores.

A programação dos movimentos dos dois manipuladores que possuem características de serem antropomórficos, é através da posição relativa entre a tocha e a peça, de modo a manter sempre uma relação de posição perpendicular para garantir cordões homogêneos e de boa qualidade, e é

¹ UFMG, fgfcoelho@yahoo.com.br

² UFMG, queiroz@demec.ufmg.br

³ UFMG, ejlima2@gmail.com

⁴ UFSJ, diego.corradi@ufsj.edu.br

⁵ UFMG, ariela@demec.ufmg.br

baseado na relação entre as matrizes de transformação homogênea, as trajetórias cartesianas serão convertidas nos ângulos das juntas de cada manipulador. Estes ângulos são obtidos através da cinemática inversa. A relação posição/orientação entre os TCP's (*Tool Center Point*) de cada manipulador pode ser modelada através da clássica formulação proposta por Paul (1982), conforme a Eq. (3):

Onde, as variáveis, *Base*, *T6WT*, *ToolWT*, *T6p*, *Toolp*, e *WCM*, são representados por matrizes de transformação homogênea.

A tocha está montada no robô ASEA que possui 5 graus de liberdade, enquanto que o substrato é manipulado pelo robô Motoman que possui 1 grau de liberdade a mais que o primeiro robô.

A diferença entre a posição e orientação dos dois robôs deve permanecer constante para que no caso da soldagem seja mantido os parâmetros, como *stickout*, velocidade de soldagem, e as restrições de posicionamento da peça e da cinemática dos manipuladores. Suas posições são representadas por $XRob1(t)$ e $XRob2(t)$, estarão sujeitas as funções de sincronismo dada pela Eq. (4).

Sendo *A* um vetor constante (Henriques; Bracarense, 2003), e os erros devem satisfazer a Eq. (5).

O que remete a uma convergência dos erros, ou seja, tenda a zero, de modo a manter a coordenação entre os robôs bem definida.

Para que a geração da trajetória da deposição das sucessivas camadas seja possível um modelo simples 3D foi elaborado através de um software CAD, e de modo a utilizar o manipulador robótico retrofitado por Bomfim (2013) e adicionado sistema de visão por Coelho (2016), uma vez que todo o controle cinemático e programação é através de linguagem não proprietária desenvolvida em Matlab[®] o que permite uma integração com outros programas.

RESULTADOS

A Figura 5, mostra representações de alguns modelos desenvolvidos, em (a) tem-se uma semicircunferência, de raio interno de 40mm, espessura de 2,5mm e altura de 50mm, e em (b) duas condições em que se desenvolve uma geometria com 50mm de comprimento e altura, e 5 mm de largura, sendo uma parede totalmente perpendicular e outra com inclinação de 45°, e para a confecção desta é necessário o movimento de inclinação da tocha realizado pelo Rob1, enquanto que o Rob2 mantém a peça sempre na horizontal.

Figura 5: Exemplos de desenvolvimento

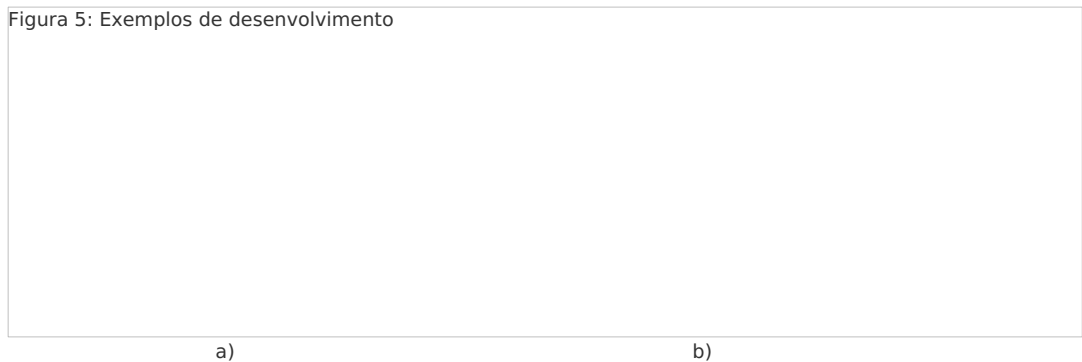


Figura 5: Exemplos de desenvolvimento

A partir da figura gerada no software CAD, a mesma foi convertida para a linguagem STL (*Stereolithography*), que em manufatura aditiva é o formato de arquivo interpretado pelas máquinas para construir o modelo 3D, este formato STL utiliza os dados de forma binária ou ASCII para as facetas triangulares para aproximar a forma do objeto (ASTM, 2011).

Utilizando as potencialidades de uma linguagem de programação orientada a objeto, foi possível criar um banco de dados que compõe as coordenadas da peça baseada em suas vistas ortogonais. Dessa forma, é possível interpretar as informações geométricas modeladas por qualquer *software* CAD. A Figura 6 apresenta o resultado da conversão do STL para coordenadas

¹ UFMG, fgfcoelho@yahoo.com.br

² UFMG, queiroz@demec.ufmg.br

³ UFMG, ejlima2@gmail.com

⁴ UFSJ, diego.corradi@ufsj.edu.br

⁵ UFMG, ariela@demec.ufmg.br

Figura 6: Interpretação do modelo CAD no Matlab®



a)

b)

Figura 6: Interpretação do modelo CAD no Matlab®

Através dos resultados proporcionados pelo algoritmo desenvolvido é possível obter as coordenadas desta peça e importar estes valores para uma planilha, como mostra a Figura 7. Os dados obtidos pelo algoritmo são organizados, e discretizados indicando a quantidade de passes a serem depositados para obter a altura de acordo com o desenho desenvolvido para a proposta da peça. A proposta de deposição das camadas é considerando o modo *raster* (Voltapo *et al.*,2017). Como resultado, na planilha são apresentadas as coordenadas (x, y e z) de cada uma das faces, e é possível obter os valores cartesianos também das quinas e vértices que são utilizados para programar a trajetória dos manipuladores.

Figura 7 - Algoritmo em Matlab® e valores listados pós conversão do modelo CAD

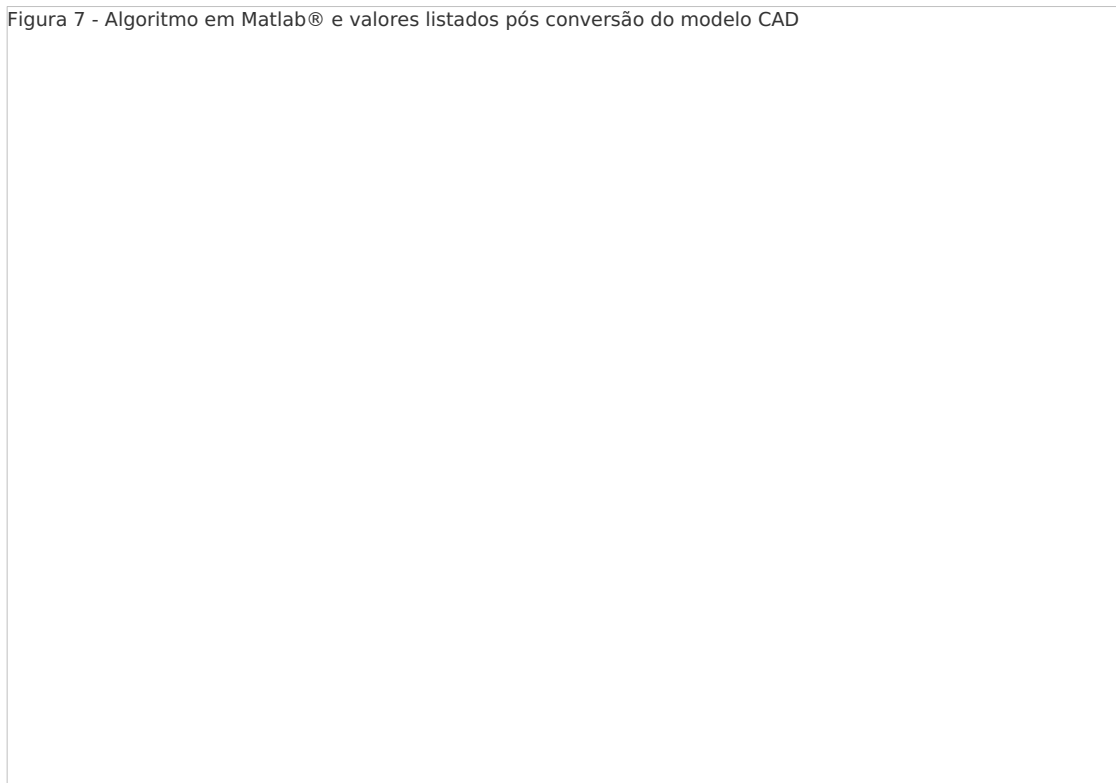
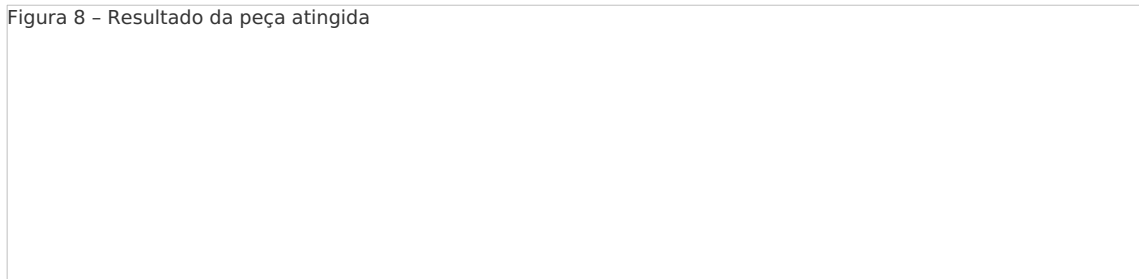


Figura 7 - Algoritmo em Matlab® e valores listados pós conversão do modelo CAD

A Figura 8, traz o resultado das peças obtidas pela técnica de robôs cooperativos, em (a) tem-se a parede totalmente perpendicular, e em (b) é apresentada a parede que foi confeccionada com a inclinação da tocha foi em 45° da perpendicular, e este valor foi atingido com precisão.

¹ UFMG, fgfcoelho@yahoo.com.br
² UFMG, queiroz@demec.ufmg.br
³ UFMG, ejlima2@gmail.com
⁴ UFSJ, diego.corradi@ufsj.edu.br
⁵ UFMG, ariela@demec.ufmg.br

Figura 8 - Resultado da peça atingida



a)

b)

Figura 8 - Resultado da peça atingida

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O controle de coordenação direto e simples para a implementação da proposta para uso de manipuladores robóticos para que possam ser utilizados em processos de soldagem para promover a aplicação em manufatura aditiva de peças com as mais diversas geometrias e complexidades, se demonstra favorável frente ao desafio.

Para que se obtenha cordões que são depositados em múltiplas camadas em uma geometria mais regular possível, é interessante que se mantenha o posicionamento da tocha em relação a peça, na posição plana controle de coordenação direto e simples para a implementação da proposta para uso de manipuladores robóticos para que possam ser utilizados em construção de peças baseado na técnica de Manufatura Aditiva Metálica, por meio de processos de soldagem convencionais.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, é possível dizer que o uso de manipuladores robóticos de forma cooperativa, apresenta como uma alternativa viável para a automação e produção através de processo de soldagem, principalmente para a manufatura aditiva de peças com elevado nível de complexidade.

O uso dos manipuladores robóticos, sendo que um utiliza linguagem proprietária e o outro foi retrofitado, e com seu sistema de controle desenvolvido, apresentou resultados satisfatórios, permitindo assim seu uso, mesmo com o robô apresentando um grau de liberdade a menos em relação ao seu "parceiro".

Este trabalho não tem o intuito de se tornar exaustivo o assunto, com isso, estudos ainda estão sendo desenvolvidos para estudar uma otimização na escolha dos parâmetros e um maior entendimento de suas influencias durante o processo. É sabido que de posse de conhecimentos sólidos sobre, cinemática, manufatura aditiva metálica aplicada por processos de soldagem convencional, e simulações, será possível contribuir no desenvolvimento.

Apesar de não ter sido abordado neste trabalho sobre a produtividade, estudos serão realizados de modo a obter uma melhor eficiência da célula robotizada, uma vez que, o tempo gasto na execução na fabricação de uma peça pode ser influenciada pelos tempos gastos de reposicionamento do TCP. Para o caso da manufatura aditiva metálica que sobre da imposição sucessivo de calor, isso pode se tornar um fator que não permite a redução do tempo de ciclo, mas uma vez tratado o fluxo de calor imposto na peça, um aumento da produtividade pode ser obtido apenas com as reduções dos tempos de posicionamento da ferramenta, que no caso deste artigo proposto seria a peça.

Com os resultados obtidos de forma inicial, é possível considerar que a utilização da proposta para aplicação na Manufatura Aditiva, apresenta uma possibilidade de aproveitamento e melhoria da qualidade, baseado nos parâmetros de soldagem (otimização) e estratégia de controle e posicionamento dos manipuladores.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao apoio recebido pelo Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação da Universidade Federal de Minas Gerais, por disponibilizarem os recursos necessários para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Alberti, E. A.; Silva, L.; D'oliveira, A. S. C. M.; Manufatura Aditiva: O Papel da Soldagem Nesta Janela

¹ UFMG, fgfcoelho@yahoo.com.br

² UFMG, queiroz@demec.ufmg.br

³ UFMG, ejlima2@gmail.com

⁴ UFSJ, diego.corradi@ufsj.edu.br

⁵ UFMG, ariela@demec.ufmg.br

de Oportunidade. Soldagem e Inspeção, v.19, n.2, p. 190-198,2014.

Allen, T. T.; Richardson, R. W.; Tagliabue, D. P. ; Maul, G. P. Statistical Process Design for Robotic GMAW Welding of Sheet Metal. Welding Journal, pages 69--S to 77--S, May 2002.

ASTM. (2011). Designation: F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.

Bomfim, M. H. S.; Remanufatura de Manipuladores Robóticos Industriais Utilizando Arquitetura Aberta, Dissertação de Mestrado, UFMG, 2013.

Coelho, F. G. C.; Desenvolvimento de um Sistema de Visão de Baixo Custo Utilizando um Manipulador Robótico Industrial Visando a Automatização de Processo de Soldagem, Dissertação de Mestrado, UFMG, 2016.

Henriques, R. V. B.; Bracarense, A. Q., Cooperação de Robôs na Soldagem de Peças com Geometria Complexa, 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, UFU, 2003

Lin, Rong-Ho Lin, Fischer, G. W.. An On-line Arc Welding Quality Monitor and Process Control System. In International IEEE/IAS Conference on Industrial Automation and Control: Emerging Technologies, pages 22--29, May 1995.

Paul, R. P. Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control. M.I.T Press, Cambridge, MA., 1982.

Sun, D.; Mill, J. K.. Adaptive Synchronized Control for Coordination of Two Robot Manipulators. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '02, 1:976 --981, 2002.

Uziel, A. Looking at Large-Scale, Arc-Based Additive Manufacturing, Welding Journal, April 2016.

Volpato, N.; Foggiatto, J.A.; Lima, M. V. A.; Manczak, T.; Uma Otimização da Estratégia de Preenchimento do Processo FDM. Núcleo de Prototipagem e Ferramental (NUFER), Av. Sete de Setembro, 3165, CEP.80230-901 Curitiba-PR

PALAVRAS-CHAVE: Robótica Cooperativa, Manufatura Aditiva Metálica, Modelos Complexos, Soldagem GMAW, CAD.

¹ UFMG, fgfcoelho@yahoo.com.br

² UFMG, queiroz@demec.ufmg.br

³ UFMG, ejlima2@gmail.com

⁴ UFSJ, diego.corradi@ufs.edu.br

⁵ UFMG, ariela@demec.ufmg.br