

METODOLOGIA DE FABRICAÇÃO POR PERFIS APLICADA A UM MANIPULADOR HIDRÁULICO COM ELEVADAS CARGAS

Marcelo Henrique Souza Bomfim, sgtbomfim@yahoo.com.br¹

Eduardo José Lima II, eduardo@ufmg.br¹

Alexandre Queiroz Bracarense, bracarense@ufmg.br¹

Fagner Ferreira Coelho, fgfcoelho@yahoo.com.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901

Resumo: O propósito deste trabalho é apresentar uma aplicação da metodologia de fabricação por perfis (MFP) aplicada à fabricação de manipuladores hidráulicos que irão operar em cargas elevadas e com alto impacto. A ideia é validar essa metodologia para aplicações severas. Ao final do artigo serão levantadas as características de desempenho e durabilidade do sistema de manipulação que associa baixo peso com cargas elevadas.

Palavras-chave: Metodologia de fabricação por Perfis (MFP), manipulador hidráulico, baixo peso e cargas elevadas

1. INTRODUÇÃO

Os métodos tradicionais de manufatura, tais como soldagem, usinagem e fundição estão sendo a cada dia substituídos por métodos inovadores, onde podem ser citados a prototipagem rápida, sinterização a laser entre outros. Tal mudança é fomentada pela necessidade de criação de geometrias complexas a custos e prazos cada vez menores para a fabricação de peças e equipamentos (Cunico, 2015).

Nesse contexto, foi proposto em Bomfim et al (2015) a Metodologia de Fabricação por Perfis ou MFP que visa à construção de um mecanismo robótico aplicado à inspeção de linhas de alta tensão. Tal metodologia apresenta características modulares de baixo peso e custo na construção de elos de mecanismos. Já no presente congresso essa metodologia é validada também para outros tipos de atuadores além do elétrico, onde serão verificadas as vantagens e desvantagens desse novo método de construção de mecanismos (Celani e Cancherini, 2009).

O ambiente da sala de fornos é altamente insalubre, tendo em vista as elevadas temperaturas de operação, cargas envolvidas e gases que possuem vapores metálicos muitas vezes tóxicos. Outro problema que justifica a criação de mecanismos hidráulicos é a elevada interferência magnética, o que inviabiliza a utilização de atuadores elétricos. A Figura (1) apresenta a sala de fornos utilizada para a produção de alumínio primário. A figura mostra dois operadores executando a tarefa de encostamento de carga. A corrente elétrica que passa pelas cubas eletrolíticas ultrapassa 100kA o que torna proibitivo a utilização de motores elétricos em tarefas de automação da operação de encostamento (Rodrigues, 2008).



Figura 1. Sala de fornos utilizada para a produção de alumínio primário. Fonte: Rodrigues, 2008.

1.1. Objetivos

Com a globalização dos mercados, a indústria sempre exigirá processos de manufatura que ocorrem em menor tempo de fabricação, com menor custo de mão-de-obra e a construção de sistemas que sejam confiáveis e que exijam baixa manutenibilidade. Assim, o presente trabalho tem por finalidade analisar, avaliar e validar a MFP aplicada a um manipulador hidráulico (MH-1) construído de forma modular, com baixo peso e capaz de suportar elevadas cargas. O

MH-1 será utilizado em tarefas de manipulação de cargas que podem chegar a um valor de 130kN e seu peso está limitado em 5kN, de acordo com premissas de projeto. A principal finalidade do manipulador hidráulico será substituir a forma manual de encostamento de carga por uma forma teleoperada, o que irá retirar o operador de condições insalubres de trabalho e aumentará a produtividade do processo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O nível de automação na indústria siderúrgica e metalúrgica nacional é baixo no que tange a utilização de mecanismos autônomos ou teleoperados para a execução de tarefas de transporte de material ou encostamento de carga em fornos, por exemplo. Tal afirmação é fundamentada na comparação com países tais como Alemanha e Estados Unidos, onde as atividades já estão em sintonia com a Indústria 4.0 (Brettel et al, 2014). Assim, em países atrasados tecnologicamente, é grande o número de pessoas que trabalham em condições insalubres, onde muitas vezes o operador está sujeito a condições que podem levar a morte. Dessa forma, torna-se interessante o desenvolvimento de metodologias de construção de mecanismos que possam ser teleoperados ou reprogramados para tarefas variadas (Forschungsunion Wirtschaft–Wissenschaft, 2013), retirando o trabalhador de atividades onerosas e insalubres. Desta forma, nessa seção, serão analisados artigos científicos e teses que são metodologias antecessoras a MFP.

2.1. Impressoras 3D

Nos últimos anos, impressoras de prototipagem rápida ou impressoras 3D vêm sendo empregadas na construção de mecanismos em diversas aplicações que vão desde elementos de máquinas até robôs humanoides. A Figura (2) apresenta um robô humanoide, onde os elos que conectam as juntas são fabricados a partir de impressoras 3D. Os motivadores para a utilização desse tipo de tecnologia são o custo relativamente baixo desses equipamentos e o baixo custo dos materiais poliméricos. Também pode-se citar o fácil manuseio das impressoras utilizadas.

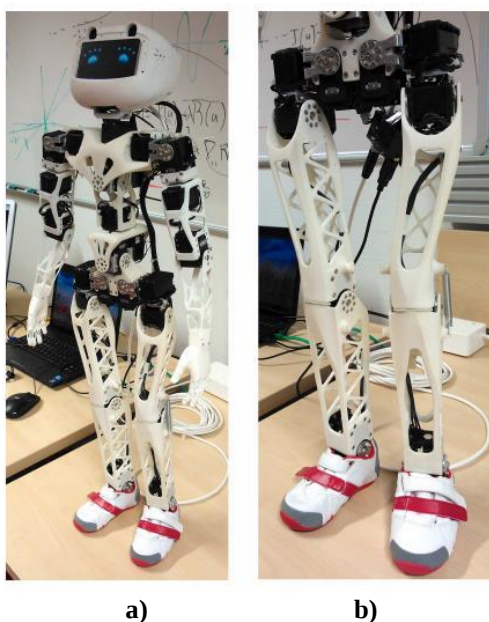


Figura 2. a) Visão geral da plataforma Poppy e b) projeto das pernas. Fonte: Lapeyre et al 2013.

Outras vantagens apresentadas por esse tipo de processo de fabricação estão na elevada precisão dimensional e no quase inexistente desperdício de material.

A grande limitação das impressoras 3D é que a produção de peças metálicas, através do processo de sinterização seletiva a laser, ainda é de elevado custo e pouco comum na fabricação de grandes lotes de peças (Macedo, 2000). Por este motivo, a utilização de impressoras 3D fica restrita a materiais poliméricos que devem operar em tarefas que exigem baixa carga e baixa rigidez (Esperto e Osório, 2008). Outra limitação diz respeito ao espaço de trabalho dessas máquinas, onde o volume do protótipo é geralmente limitado a $0,125m^3$, o que pode ser verificado em Gorn (2001). Dessa forma, sua aplicação é restrita à construção de pequenas peças de engrenagens, parafusos ou eixos em veículos de robótica móvel e mecanismos de dimensões e cargas reduzidas em robótica de manipulação.

2.2. Modelamento do objeto em lâminas (*Laminated Object Manufacturing - LOM*)

Em trabalhos realizados por Ramalho Filho et al (2007) apresentou-se o modelamento do objeto em lâminas ou *Laminated Object Manufacturing (LOM)*. Nessa metodologia de manufatura, chapas são cortadas pelo processo de corte a laser. Após o corte as estruturas são soldadas para formarem caixas. Com esse tipo de concepção pode ser analisado a redução do tempo de fabricação de um mecanismo aplicado a soldagem orbital de 15 para somente 2 dias. A Figura (3) ilustra um mecanismo robótico projeto a partir da metodologia *LOM* (Ramalho Filho, 2007).



Figura 3. Plataforma robótica criada a partir do modelamento do objeto em lâminas. a) Peças após o corte a laser e b) montagem com o processo TIG. Fonte: Ramalho filho et al, 2007.

2.3. Metodologia de Fabricação por Perfis (MFP)

A MFP surgiu em 2014 da necessidade de criação de uma metodologia de construção dos elos de sistemas robóticos que aliassem baixo custo, peso e baixa complexidade de manufatura (Bomfim et al, 2015). Dessa forma, foi possível a criação e montagem de estruturas que apresentassem baixo torque de juntas e consequentemente, baixo consumo energético, o que são características almejadas no projeto mecatrônico de robôs.

Pode-se afirmar que a MFP foi um divisor de águas e um grande avanço tecnológico, pois reduziu em uma escala de grandeza o peso de robôs aplicados em operações de inspeção de linhas de transmissão de alta tensão. Dessa forma, foi possível criar a plataforma **POLIBOT** (**P**ower **L**ines **I**nspection **R**o**B**OT) com massa de 9kg, sendo que os sistemas robóticos criados até então possuíam massa em torno de 120kg, representando grande redução dos motores e aumento da durabilidade de baterias. A Figura (4) a) apresenta o sistema robótico **POLIBOT** com suas principais unidades e a Fig. (4) b) apresenta a mensuração de massa do veículo.



Figura 4. Plataforma POLIBOT: a) sistema robótico fabricado a partir da metodologia MFP e b) massa de aproximadamente 9kg do robô. Fonte: Bomfim et al 2015.

Em seu artigo, Bomfim et al (2015) informam que para a seleção de materiais devem ser avaliadas todas as vantagens e desvantagens que este material possa ter tais como custo, rigidez, resistência à corrosão dentre outros e propõem a criação de um índice de desempenho robótico (PR), de forma a fornecer uma análise mais criteriosa em projeto de mecanismos robóticos, pois também leva em consideração o custo relativo (cr), facilidade de operação (F) e densidade (ρ) do material, o que pode ser verificado pela Tab. (1). A facilidade de operação diz respeito à facilidade de encontrar o material no mercado e sua facilidade de manuseio, juntamente com características de resistência à corrosão. Já a densidade, foi levada em consideração, devido ao fato do consumo energético dos mecanismos robóticos estarem diretamente relacionados com a massa específica do material. Desta forma, ρ passa ser uma variável crucial no

desenvolvimento de mecanismos, pois tem influência direta na autonomia do robô, bem como no torque, peso, custo dos atuadores e no valor final do projeto (Bomfim et al, 2015). Assim, a MFP foi proposta para a construção do MH-1.

Tabela 1. Índice de desempenho robótico (PR) para diferentes materiais. Fonte: Bomfim et al 2015.

Material	$\frac{\tau_f \frac{2}{3}}{\rho} = P$	cr	ρ (Mg/ m ³)	F	$PR = \frac{P}{cr \cdot \rho \cdot F}$
Fibra de carbono reforçada	72.8	80	1.5	4	0,15
Fibra de vidro reforçada	52.0	40	2.0	3	0,21
Liga de alumínio 2024-T6	16.0	15	2.8	1	0,38
Liga de titânio Ti-6Al-4V	14.8	110	4.4	5	0,0061
Aço liga 4340	10.9	5	7.8	2	0,14

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Devido ao seu elevado índice de desempenho (Callister, 2001) e índice de desempenho robótico (Bomfim et al, 2015) é natural que o alumínio seja selecionado para construção de mecanismos. Entretanto, devido a limitações no trabalho, o aço SAE 1020 foi selecionado como material para a construção do manipulador. Por outro lado, destaca-se que o aço SAE 1020 possui baixo custo e facilidade de ser encontrado comercialmente e pelo fato de possuir o valor de PR próximo ao valor de ligas de alumínio, o mesmo foi selecionado. Como método de construção o braço foi construído através de seções tubulares quadradas em dimensões que são apresentados em catálogos comerciais, a fim de facilitar a construção do sistema.

3.1. MFP aplicada a mecanismos hidráulicos

Como pré-requisitos de projeto para o MH-1, foi previsto um peso máximo de 5kN para sua estrutura mecânica e o mesmo deveria suportar 130kN o que corresponde a 26 vezes o seu peso. O comprimento do braço teria que ser de 4750mm e na condição recuado o comprimento é de 1200mm. Dentre as metodologias para a manufatura do sistema a MFP foi selecionada por apresentar maior facilidade de construção. As impressoras 3D que trabalham com aço SAE 1020 possuem custo elevado, além de o comprimento das peças serem limitados. Já a metodologia LOM exige o corte a laser das chapas e operações de soldagem, após o corte. Essas tarefas também tornariam o processo mais oneroso e exigiriam trabalhos de soldadores e de inspetores para verificação da integridade dos cordões de solda. Dessa forma, a MFP foi utilizada. Nessa metodologia os perfis de cada seção da estrutura foram selecionados de acordo com padrões comerciais, consequentemente, praticamente nenhum processo de fabricação foi exigido para construção da estrutura telescópica. A Figura (5) apresenta o MH-1, onde a metodologia MFP foi analisada e validada.

Dentre os tipos de juntas de mecanismos têm-se as juntas prismáticas e rotativas. Para o MH-1 foram selecionadas as juntas prismáticas, onde um junta desliza por dentro da outra. Esse tipo de junta garante maior rigidez a estrutura, apesar de reduzir seu espaço de trabalho. E entre as seções foi instalado o Politetrafluoretileno ou teflon, desta forma, o atrito entre as seções foi praticamente anulado.

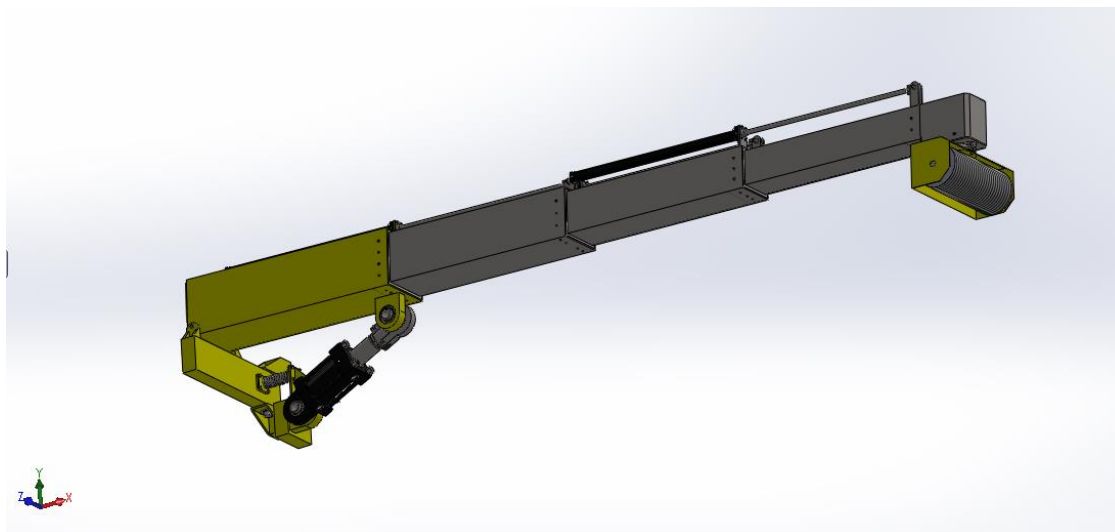


Figura 5. Manipulador hidráulico MH-1, construído a partir da metodologia MFP.

A Figura (6) apresenta um fluxograma com as etapas de fabricação e construção do MH-1. Pela figura, pode ser analisado que após o modelamento 3D do veículo, são realizadas análises cinemáticas com o intuito de verificar o correto funcionamento do veículo. Para tanto, foi utilizado o estudo do movimento via SolidWorks®, tal estudo tem a finalidade de analisar o comportamento do veículo na sala de fornos e ver a probabilidade de colisões e procedimentos de operação que otimizem a operação do MH-1. A próxima etapa é a análise por elementos finitos via software CAE. A análise tem a finalidade de verificar se o sistema suporta as cargas envolvidas no processo. Como quarta e quinta etapas têm-se a fabricação de peças e montagem física do manipulador. Na sexta etapa são realizados testes nas condições de operação e após uma semana de ensaios experimentais sem a presença de falhas o veículo é colocado em turnos de operação.

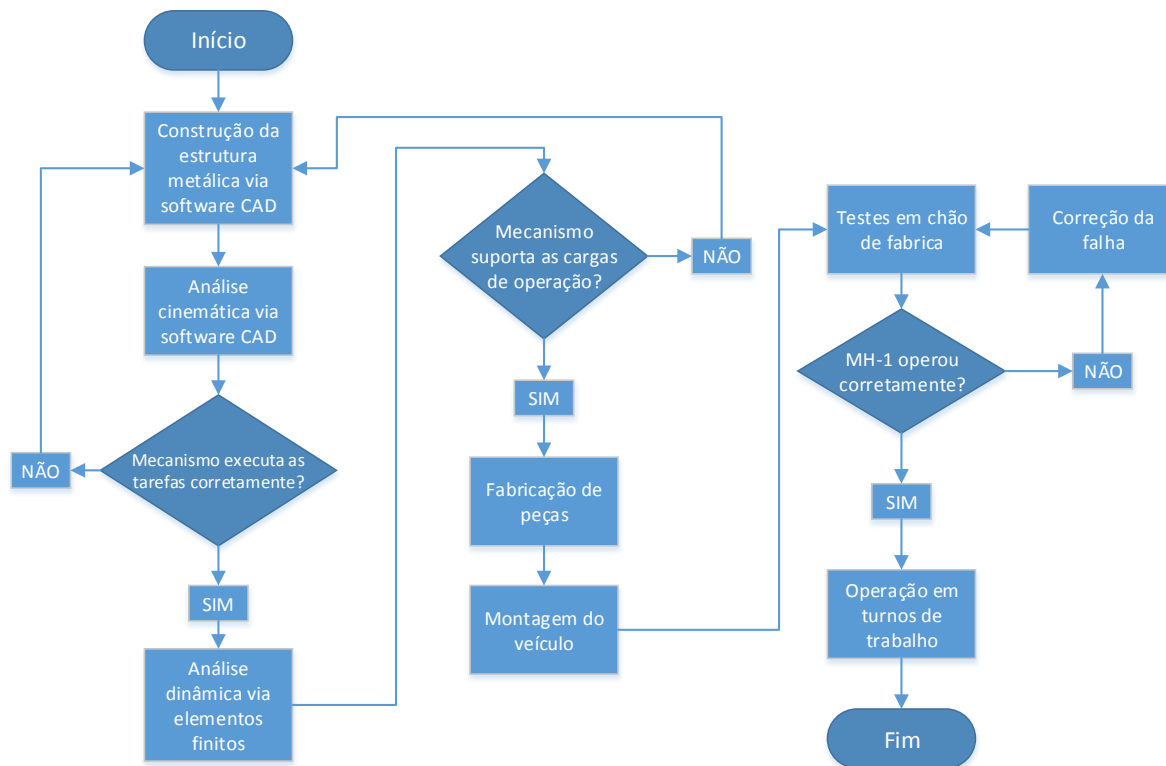


Figura 6. Fluxograma com a metodologia proposta para a construção e validação da MFP aplicada ao MH-1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão serão divididos basicamente em dois tópicos. No primeiro tópico, análise e avaliação da MFP, serão feitas, para cada uma das quatro seções do MH-1, análises de rigidez via equações analíticas e simulações através de análise por elementos finitos. Finalizando, o MH-1 será validado em condições de operação, o que também servirá para validar a MFP aplicada a mecanismos hidráulicos de cadeia cinemática aberta.

4.1. Simulações, análise e avaliação da MFP

Após a seleção de seções retangulares para cada um dos quatro perfis da estrutura mecânica e hora de analisar qual seria a espessura ótima para cada uma das seções. Sabe-se que a tensão devida ao momento fletor depende do momento de inércia de acordo com a Eq. (1) abaixo:

$$\sigma_{\max} = \frac{Mc}{I} \quad (1)$$

Onde: $\sigma_{\max}$ = tensão normal máxima, M = momento interno, c = distância perpendicular do eixo neutro ao ponto mais afastado desse eixo, I = momento de inércia da área da seção transversal calculado em torno do eixo neutro.

A primeira vista, a rigidez da estrutura é maior, quando a parede da estrutura tem sua dimensão aumentada. Isto está correto, mas vale lembrar que o momento de inércia é uma função de quarta ordem. Dessa forma, existe uma espessura a partir da qual iremos adicionar material ao sistema e sua rigidez não será aumentada significativamente, apesar do aumento do peso (Bomfim et al, 2015). A Figura (7) apresenta a relação entre o momento de inércia e a espessura do tubo quadrado de 300, 260, 220 e 180mm. Pelas figuras, pode ser visto que espessuras acima de 50mm não aumentam consideravelmente o momento de inércia das estruturas. Assim, para espessuras acima de 50mm não ocorrerá variações da tensão normal máxima sofrida pela estrutura telescópica.

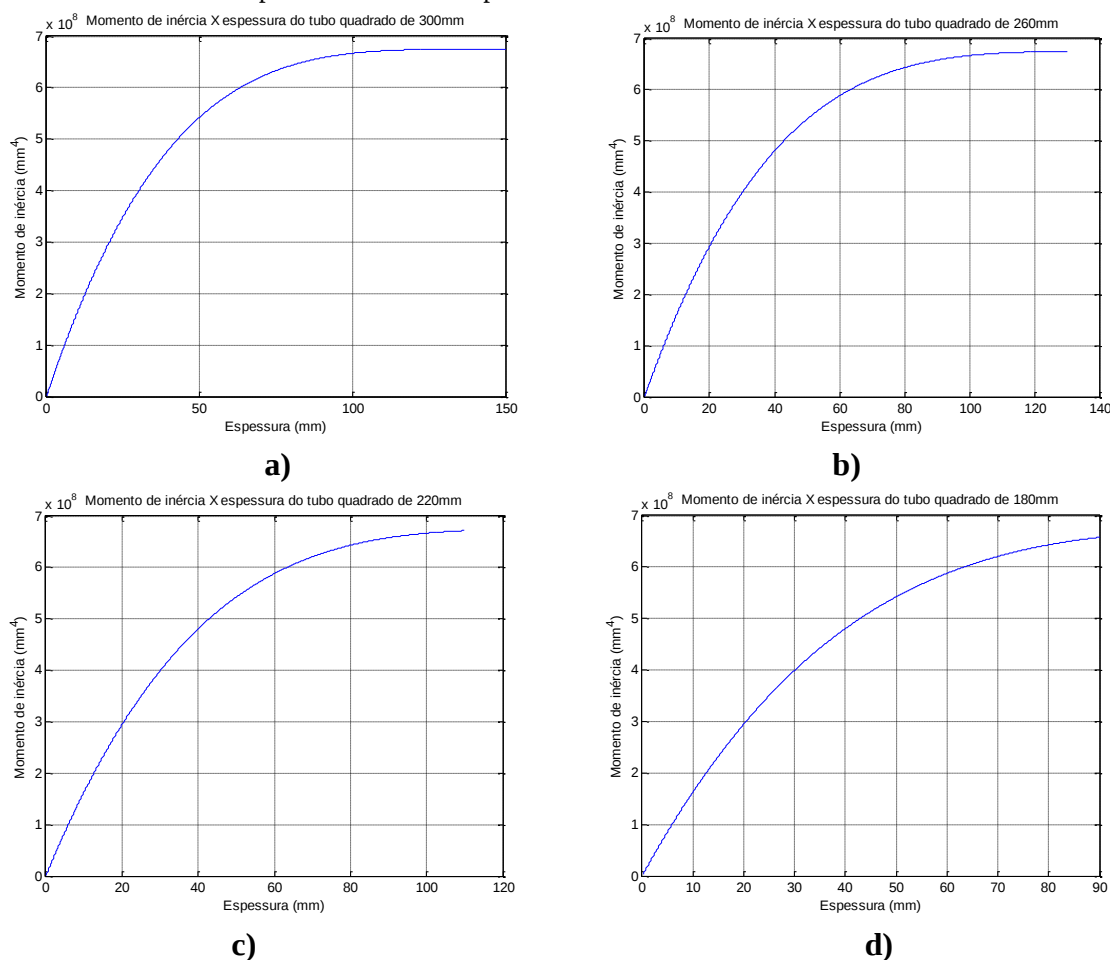


Figura 7. Variação do momento de inércia com a espessura de um tubo quadrado de a) 300, b) 260, c) 220 e d) 180mm.

À medida que o lado da seção transversal do tubo é reduzido a curva de momento de inércia pela espessura passa a se comportar de forma linear, o que pode ser analisado pela Figura (7) d). Isso ocorre devido ao fato da redução das alturas das seções, pois são termos que são elevados ao cubo no cálculo do momento de inércia.

Com o cálculo de uma carga de 130kN com a lança telescópica estendida chegou-se a uma espessura de 10mm das seções. Assim, esse valor foi selecionado para as espessuras das seções de 300, 260, 220 e 180mm, tendo em vista que são espessuras comerciais e que apresentam um momento de inércia que varia entre $10^8 mm^4$ e $2 \times 10^8 mm^4$. A Figura (8) apresenta a análise por elementos finitos, onde a tensão máxima foi de 62MPa, representando um fator de segurança igual a 4 para o aço SAE 1020, tendo em vista sua tensão de escoamento de 250MPa.

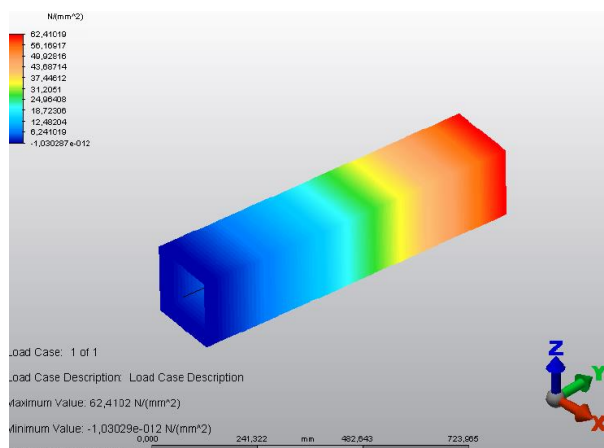


Figura 8. Análise por elementos finitos da seção de 300mm do MH-1.

4.2. Testes experimentais e validação em campo

As salas de fornos de indústrias metalúrgicas são ambientes agressivos, onde as temperaturas estão em torno de 70 graus Celsius com a presença de vapores metálicos. Como procedimentos experimentais foram adotados diferentes velocidades de deslocamento do veículo e diferentes velocidades de rotação da escova para o encostamento da bauxita para dentro dos fornos. A Tabela (2) apresenta as diferentes velocidades do veículo e as rotações da escova adotadas para a parte experimental.

Tabela 2. Dados experimentais para ensaios em campo.

Experimento	Velocidade do veículo (km/h)	Velocidade de rotação da escova (RPM)
1	2	20
2	4	20
3	6	20
4	2	40
5	4	40
6	6	40
7	2	60
8	4	60
9	6	60
10	2	80
11	4	80
12	6	80

A velocidade de deslocamento do veículo é ajustada pelo operador da fabrica que agora executa as tarefas de encostamento de carga dentro de uma cabine com ar condicionado e não da forma vista na Figura 1. As velocidades foram de 2, 4 e 6km/h devido ao fato da velocidade máxima permitida ser de 10km/h dentro da sala de fornos. Já a velocidade de rotação da escova foi selecionada entre 20, 40, 60 e 80 rotações por minuto (RPM). O ajuste foi realizado através da regulagem de uma válvula de controle de fluxo e a mensuração da velocidade de rotação foi realizada através de um tacômetro digital modelo MDT-2238B.

Dentre todos os experimentos o de número 9 apresentou a melhor eficiência no encostamento de carga. Esperava-se que o experimento doze apresentasse maior produtividade, mas a velocidade de rotação de 80RPM faz com que seja levantada muita poeira, o que reduz a taxa de material que está sendo encostada para dentro do forno.

Desta forma, em testes realizados em campo na Empresa X o MH-1 não apresentou falhas em sua estrutura metálica. Ocorreram problemas de queda de eficiência devido ao nível de limpeza do óleo e houve a necessidade de engraxamento entre as seções, mesmo com a utilização do teflon.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a MFP foi possível a construção de um manipulador hidráulico que tivesse baixo peso, 5kN, e que suportasse elevadas cargas, 130kN. Desta forma, o MH-1 suportou 26 vezes a carga de seu peso. Esse resultado é interessante pelo fato de manipuladores robóticos industriais suportarem cargas que geralmente são de 5 a 10% o valor de seu peso. Para o MH-1 pode-se ver a inversão dessa equação, onde foi erguida uma carga 2500% maior que o peso do manipulador. Assim, os manipuladores hidráulicos concebidos a partir da MFP e atuados hidráulicamente podem ser aplicados em situações de elevadas cargas e baixo espaço de trabalho. Outro fator que motiva a utilização de atuadores hidráulicos é o fato de robôs industriais terem sua carga ou *payload* limitada em 1.300kg.

Comercialmente os atuadores telescópicos encontrados, apesar de atenderem o peso de 5kN, não suportavam cargas de 130kN laterais o que forçou a construção de estrutura telescópica própria. Tal informação é fundamentada no fato de cilindros telescópicos comerciais serem fabricados apenas para suportarem cargas normais ao seu deslocamento, invalidando sua utilização no presente experimento.

O aspecto modular da MFP faz com que o sistema seja de fácil montagem, onde, em apenas 7 dias, foi possível a fabricação de toda a estrutura, utilizando poucas operações de soldagem e usinagem, quando comparado a outras metodologias de construção, como a LOM, por exemplo.

Em testes executados em campo a MFP pode ser validada atingindo os objetivos do artigo. O MH-1 operou em chão de fábrica e o sistema telescópico não apresentou falhas.

Outra consideração importante foi a retirada de operadores de tarefas insalubres, alienantes e de locais onde ocorre o risco de morte, reduzindo drasticamente os índices de acidente de trabalho.

Como sugestões de trabalhos futuros os autores propõem a avaliação de tubos de seção circular e a utilização de outros materiais, tais como as ligas de alumínio, por exemplo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Senai Cimatec/BA por fornecer a estrutura física para fabricação e montagem do manipulador, bem como execução dos experimentos.

7. REFERÊNCIAS

- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, 8(1), 37-44.
- Bomfim, M.H.S., Lima II, E.J., Bracarense, A.Q., Peixoto, M.C.L., Nascimento, S.M., 2015. “Metodologia de Fabricação por perfis aplicada à Fabricação de mecanismos robóticos”, 8º Congresso Brasileiro de Fabricação, Salvador, Brasil.
- Callister, W.D., 2001, “Fundamentals of Materials Science and Engineering”, Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc., Stanford University, USA, 920 p.
- Celani, G.; Cancherini, L. Digitalização tridimensional de objetos: um estudo de caso. *Anais do Sigradi*, p. 309-311, 2009.
- Cunico, M. W. M. Impressoras 3D: O novo Meio Produtivo. *Pesquisas Científicas*, 2015.
- der Forschungsunion Wirtschaft-Wissenschaft, P. K. (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. *Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie, 4*.
- Esperto, L., & Osório, A. (2008). RAPID TOOLING SINTERIZAÇÃO DIRECTA POR LASER DE METAIS. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões ISSN, 1646, 7078*.
- Gorn, A. A., 2001, “Introdução à Prototipagem Rápida e Seus Processos”, *Revista Plástico Industrial*, Editora Aranda, São Paulo, Brasil, pp. 230-239.
- Koch, V., Kuge, S., Geissbauer, R., & Schrauf, S. (2014). Industry 4.0: opportunities and challenges of the industrial internet. *PwC and Strategy&*.
- Lapeyre, M., Rouanet, P. and Oudeyer, P., 2013, “The Poppy Humanoid Robot: Leg Design for Biped Locomotion”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, pp. 349-356.
- Rodrigues, P. M. M. (2008). *Análise e projecto estrutural de sistemas de alumínio* (Master's thesis, Universidade de Aveiro).

Macedo, Z. S., & Hernandez, A. C. (2000). Ultra-fast laser sintering of ceramic materials. *Cerâmica*, 46(300), 196-199.
Ramalho Filho, F. A., Kienitz, K., Cordeiro, J. F., Lima II, E. J., Bracarense, A. Q, 2011, "Laminated Object Design: A Design Technique for Rapid Prototyping and Manufacturing". Proceedings of the 21th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Vol.1, São Paulo, Brazil, pp. 1-9.

PROFILES MANUFACTURING METHODOLOGY APPLIED TO HYDRAULIC MECHANISM WITH HIGH LOADS

Marcelo Henrique Souza Bomfim, sgtbomfim@yahoo.com.br¹

Eduardo José Lima II, eduardo@demec.ufmg.br¹

Fagner Guilherme Ferreira Coelho, fgfcoelho@yahoo.com.br¹

Alexandre Queiroz Bracarense, bracarense@ufmg.br¹

¹Federal University of Minas Gerais, Mechanical Engineering Department, Belo Horizonte, MG, Brazil

Abstract. *This paper presents an application for Profiles Manufacturing Methodology (PMM) applied to the manufacture of hydraulic manipulators that will operate at high loads and high impact. The idea is validate this methodology for severe applications through a case study applied to the metal industry, which was developed Jamback vehicle with manipulator. At the end of the article are raised the performance characteristics and durability of the hydraulic system that combines low weight of the arm with high loads.*

Keywords: *Profiles Manufacturing Methodology (PMM), hydraulic manipulator, low weight and high loads.*

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.