



DESENVOLVIMENTO DE MOLAS TIPO PRATO EM IMPRESSÃO 3D FDM COM FILAMENTO PA6/C CONTÍNUO

Ancelotti, E. R.(1), Ancelotti Jr., A. C.(1), Assis, P. V. (1) Panzera, T.H. (2), Di Benedetto, R. M. (1)

(1) NTC – Núcleo de Tecnologia em Compósitos, UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

(2) UFSJ – Universidade Federal de São João Del Rei

Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá-MG ancelotti@unifei.edu.br

RESUMO

O desenvolvimento de molas em materiais compósitos tem ganho muita atenção, devido às suas características de baixo peso e elevada performance mecânica, particularmente quando aplicados na indústria automotiva. Molas em material compósito podem ser projetadas para o melhor desempenho, elevando a resistência à fadiga e resistência química como corrosão, quando comparadas às molas metálicas. A tecnologia de deposição de fibra de carbono contínua na impressão 3D permite a obtenção de molas de forma rápida e com propriedades comparáveis às molas metálicas, em termos de resistência mecânica. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo de mola tipo prato em impressão 3D com fibra de carbono contínua e avaliar suas características elásticas. Diversas configurações foram ensaiadas mecanicamente para determinação da constante de rigidez elástica e também da energia elástica. Os resultados mostraram que a constante e rigidez elástica e a energia elástica dependem da configuração da mola e da sequência de empilhamento, permitindo muita flexibilidade no projeto.

Palavras-chave: fibra de carbono, impressão 3D, molas prato, filamento contínuo, poliamida

INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia de manufatura aditiva, especialmente no ramo da impressão 3D, tem agilizado e impulsionado o desenvolvimento de novos produtos [1,2,3]. As impressoras 3D do tipo FDM - *Fused Deposition Modeling* mais modernas já conseguem depositar também o filamento contínuo de fibra de carbono, o que confere uma resistência muito maior ao produto em comparação

com as que depositam apenas o polímero fundido ou o polímero fundido previamente reforçado com fibras curtas de carbono ou nanopartículas [5,6].

Essa possibilidade faz com que os produtos impressos nesse material possam apresentar resistência mecânica comparável aos produtos usinados em materiais metálicos. A indústria automotiva tem se beneficiado dessa tecnologia no desenvolvimento de elementos mecânicos [7]. Um exemplo é o desenvolvimento de molas em materiais compósitos, especialmente os compósitos CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) e os FRP (*Fiberglass Reinforced Plastics*) [1,7]. Já é recorrente na literatura trabalhos envolvendo desenvolvimento de molas tipo helicoidal, feixo (*leaf spring*), mola plato (*disc plate spring*) em materiais compósitos [8,9]. As vantagens de se utilizar materiais compósitos são a redução de peso, elevada performance estrutural, bom amortecimento em vibrações, boa resistência à fadiga e a corrosão, o que certamente é muito interessante para o projeto de veículos automotivos por permitir uma redução do consumo de combustível, maior conforto e aumento da vida útil dos seus componentes, reduzindo custos de manutenção [7].

Dentre os diversos tipos de molas, as molas do tipo prato possuem muitas aplicações. Principalmente porque podem ser projetadas geometricamente para obter uma melhor distribuição de tensões durante a aplicação de esforços. Dada a sua geometria também é possível trabalhar diferentes configurações de empilhamento, conferindo assim, diferentes características com muita flexibilidade. Assim, estudar suas características mecânicas como a constante de rigidez elástica e as energias envolvidas no processo de carregamento e descarregamento é muito importante. O objetivo deste trabalho é obter uma mola prato em manufatura aditiva, utilizando impressão 3D com filamento contínuo de fibra de carbono como reforço local e avaliar suas propriedades elásticas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Projeto das Molas

O projeto da mola prato foi feito tomando como referência as geometrias mais comuns para este tipo de projeto, porém, com uma geometria diferenciada para permitir um encaixe no empilhamento, alternar a sequência de acordo com a necessidade do projeto e também manter o melhor equilíbrio na distribuição de

esforços possível. Assim, foi necessário estabelecer duas geometrias diferentes de mola tipo prato. A Figura 1 apresenta as molas nomeadas como tipo W e a tipo U.



Figura 1 – Projeto da mola (a) tipo W e projeto da mola (b) tipo U.

As molas tipo W e U foram projetadas de forma que possam ser empilhadas em série ou em paralelo, em número de combinações necessárias para o projeto. O Figura 2 mostra um empilhamento paralelo, composto de uma mola W, seguido de uma mola U, de mola W e outra mola U. Neste trabalho vamos identificar as configurações utilizando as letras W e U na quantidade e sequência que aparecem nos ensaios.

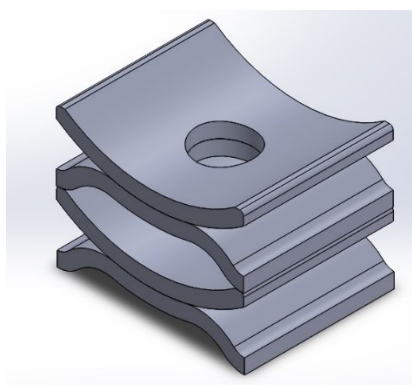


Figura 2 – Exemplo de sequência de empilhamento WUWU.

As molas contêm um furo guia central com diâmetro de 15mm para manter o alinhamento durante a aplicação da carga. As molas W e U possuem área projetada iguais, sendo a largura de 40mm e o comprimento de 50mm. A altura da mola tipo W é de 9,2mm enquanto a tipo U é de 11,2mm. Ambas foram projetadas com espessura de 4mm. As molas foram fabricadas em uma impressora Markforged Two. Os desenhos das molas em extensão STL foram importados para o software Eiger para que os modelos fossem trabalhados quanto as características de impressão.

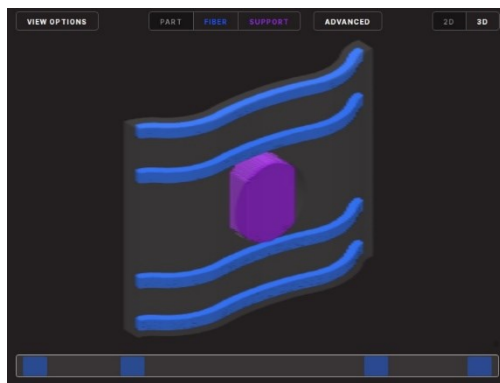
Materiais Utilizados

Os materiais utilizados na impressão das molas W e U foram os filamentos de PA6/FC da marca ONYX fornecidos pela Markforged [10]. E o reforço utilizado foi a fibra de carbono com 1500 filamentos, fornecida comercialmente pela Markforged com o nome de CF [10].

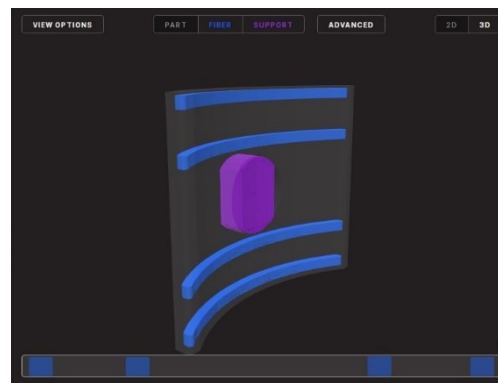
Projeto para Impressão 3D das molas

O material ONYX foi utilizado para a impressão da mola e o material CF nas áreas de reforço. As paredes e laterais das peças foram feitas com duas camadas de ONYX e as partes inferiores e superiores das molas com 4 camadas. A região central da peça foi preenchida com preenchimento do tipo triangular 37%.

O software Eiger permite selecionar as áreas em que o reforço contínuo de fibra de carbono deve ser depositado, como visto na Figura 3. No caso, os dois tipos de mola (W e U) foram reforçados com 4 faixas paralelas de reforço com largura de 2mm, mantendo-se o alinhamento, a disposição simétrica ao redor do orifício, e uma distância padronizada entre elas de aproximadamente 7mm. A grande vantagem desse tipo de impressora é que o reforço pode ser posicionado somente onde é necessário, gerando uma redução de custos considerável e otimizando a estrutura da peça em função da demanda de carregamento.



(a) Mola W



(b) Mola U

Figura 3 – Raio-X das molas W (a) e U (b) mostrando o posicionamento do reforço CF150 ao longo da peça (azul), suportes para impressão (roxo) e o material Onyx (cinza).

O reforço CF150 foi aplicado ao longo da seção em 4 faixas paralelas, no sentido do comprimento da peça, sendo este o sistema de referência tomado como 0° . A Figura 4 apresenta em detalhes o posicionamento e a orientação das fibras nas seções das molas W e U. Ao todo são 16 camadas, cada uma com 0,125mm, perfazendo o total de 2mm para cada faixa de reforço.

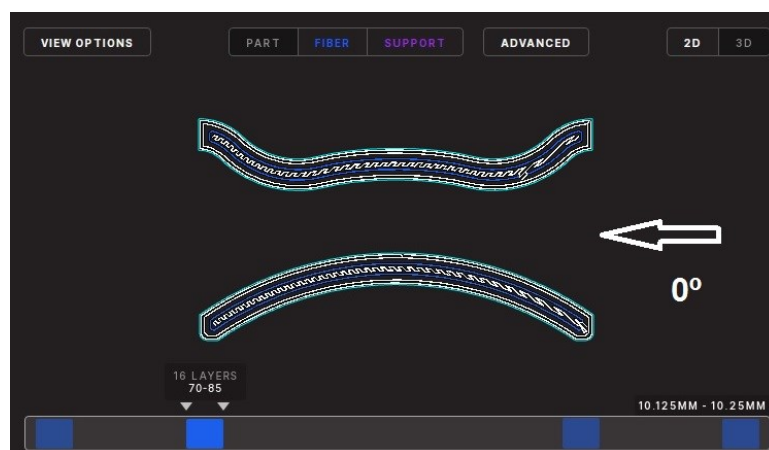


Figura 4 – Posição e orientação do reforço nas molas W e U. Legenda: em azul reforço CF150, em branco ONYX, em verde as paredes externas em ONYX.

Os reforços foram posicionados da forma como mostrado na Figura 3 porque a impressora permite apenas depositar fibra contínua no plano, sendo então necessário posicionar a peça adequadamente na mesa para que o reforço possa ser inserido na direção desejada.

O software Eiger faz uma estimativa de custo e peso das peças durante a fase de projeto da impressão. As molas tipo W apresentaram custo destinado de US\$5,71 e peso 7,29g enquanto as molas tipo U, US\$5,21 e 7,51g, respectivamente. O tempo de impressão para cada peça foi de 2h53m para o tipo W e 2h51m para o tipo U.

Ensaio mecânicos para determinação da carga limite

As molas tipo W e U foram submetidas individualmente a um ensaio de compressão para determinação da carga limite na região elástica. Cada mola foi posicionada centralmente em um dispositivo de pratos paralelos e a força de compressão foi aplicada até a ruptura da mola. A velocidade de aplicação da força foi de 1mm/min.

Para execução do ensaio foi utilizada uma máquina servo hidráulica da marca Instron 8801. O ensaio foi feito a temperatura ambiente 24°C. Um dispositivo de ensaio específico foi desenvolvido para permitir aplicação de carga compressiva mantendo o alinhamento correto do empilhamento.

Com o objetivo de caracterizar as molas quanto a constante de rigidez elástica e também a energia elástica no carregamento, descarregamento e a energia consumida no processo foram feitos ensaios de compressão conforme a matriz de ensaio apresentada na Tabela 1, com as respectivas quantidades de amostras necessárias. A matriz foi feita de forma a buscar um entendimento sobre essas características para diferentes tipos de empilhamento.

Tabela 1 - Matriz de Ensaio para molas empilhadas em série, paralelo e em quantidades diferentes.

Ensaio Mecânico			
#	Configuração	Resistência Compressão Ruptura	Constante Rigidez/Energia Elástica
1	W	1	
2	U	1	
3	W		1
4	U		1
5	WU		1
6	WUWU		1
7	WUWUWU		1
8	WWUU		1
9	WWWUUU		1
Total Ensaio			7
Total Amostras		2	20

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as molas impressas resultaram em peças com boa qualidade, com ótimo aspecto superficial, sem apresentar qualquer tipo de defeito detectado visualmente. A Figura 5 mostra o resultado das impressões das molas tipo W e U.



Figura 5 – Molas tipo W (a) e tipo U (b) após o processo de impressão 3D.

Os resultados dos ensaios de compressão para determinação do limite de carga compressiva das molas W e U são apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

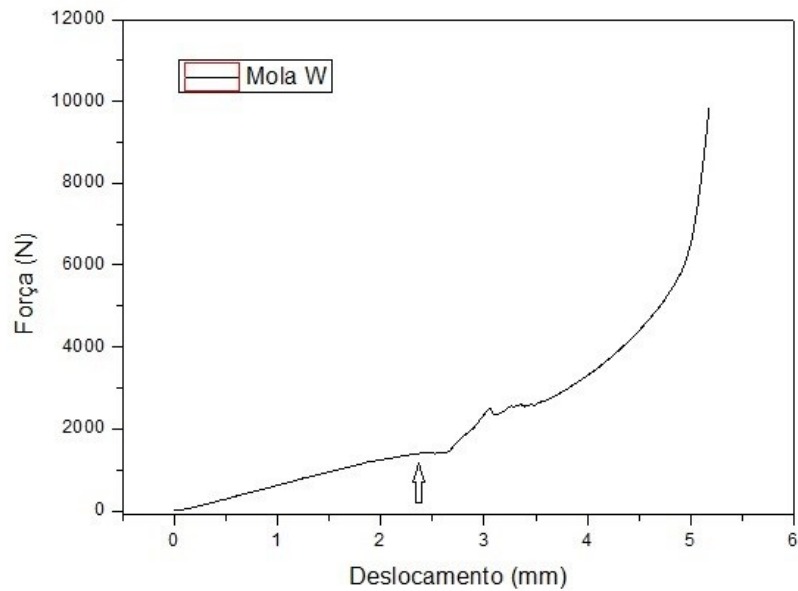


Figura 6 – Resultado do ensaio de resistência à compressão da mola (individual) tipo W - A seta indica o limite da região puramente elástica

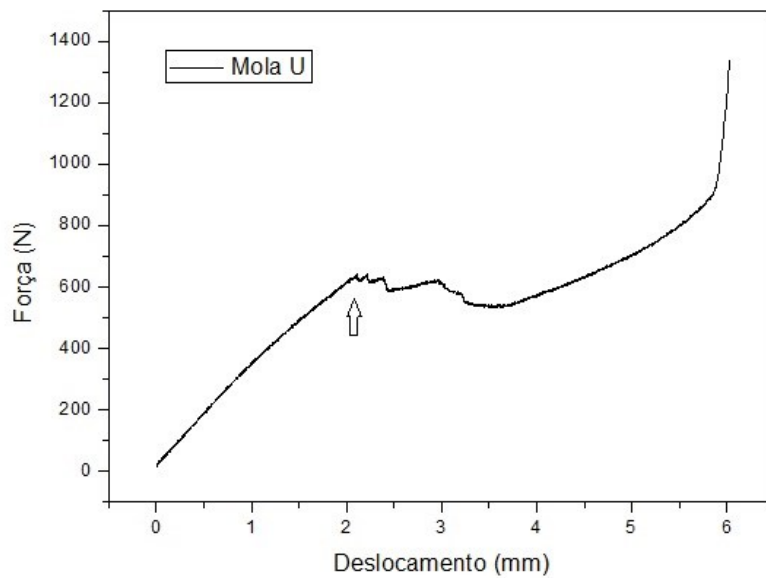


Figura 7 - Resultado do ensaio de resistência à compressão da mola (individual) tipo W – A seta indica o limite da região puramente elástica.

Os resultados mostram que a resposta à compressão das molas tipo W e tipo U são diferentes, sendo a mola tipo W muito mais resistente que a tipo U. Para fins de determinação do limite de carga a ser aplicado nos conjuntos, considerou-se apenas a porção linear da curva força versus deslocamento de ambas as molas. A mola tipo W apresenta uma região linear limitada pela força de 1452N a um deslocamento de 2,65mm, já a mola tipo U apresentou um limite de 640,8N a um deslocamento de 2,11mm.

Assim, para os ensaios para determinação da constante de rigidez elástica e das energias envolvidas no processo de compressão, foi utilizada uma carga correspondente a 85% da menor carga entre as molas W e U, ou seja, 545N. É evidente que as molas podem suportar cargas e deslocamentos maiores, contudo, após a região elástica, as variações de força indicam a possibilidade de falhas relacionadas a adesão fibra matriz e possível ruptura de fibras, o que não é desejável em operação.

A constante de rigidez elástica obtidas para as molas W e U foram respectivamente: 654,7 N/mm e 407,3 N/mm, indicando que a mola tipo W é mais rígida que a mola tipo U. Estes são apenas valores de referência pois as molas não devem trabalhar individualmente e as condições de engaste são totalmente diferentes em operação. Essas condições de engaste alteram significativamente a constante de rigidez e fazem por exemplo, que a mola tipo U apresente uma constante muito inferior que a W porque ensaiada individualmente não apresenta a mesma distribuição de carga como ensaiada em conjunto com a mola W.

As constantes de rigidez elástica para cada configuração de conjunto de molas foram obtidas a partir dos ensaios de compressão com a carga limitada a 545N. A Figura 8 mostra o ensaio de compressão referente ao ensaio 5, com a configuração WU, ou seja, uma mola W posicionada na base e uma mola U sobre a mola W. O ensaio de compressão foi registrado na fase de carregamento e também de descarregamento, permitindo assim o cálculo das energias elásticas envolvidas no processo.

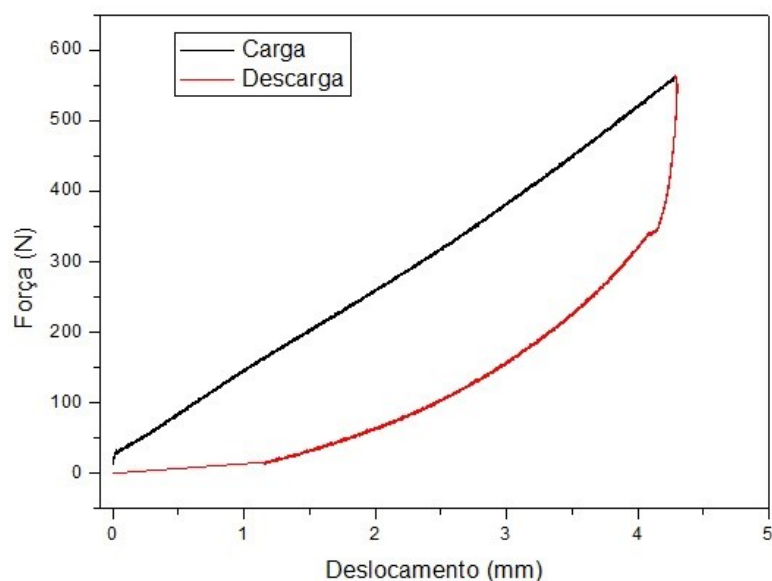


Figura 8 – Exemplo de curvas de carregamento e descarregamento para a o ensaio #5 e configuração WU.

A área abaixo da curva de carregamento é a energia consumida na compressão do conjunto de molas, ou seja, a energia armazenada. A área abaixo da curva de descarregamento é a energia consumida na descompressão do conjunto de molas, ou seja, a energia de retorno. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para cada configuração em termos de energia no carregamento, energia no descarregamento e energia consumida no processo.

Tabela 2 – Resultados referentes à energia elástica das diferentes configurações

Ensaio - Configuração	$E_{\text{carregamento}}$ (J)	$E_{\text{descarregamento}}$ (J)	$E_{\text{consumida}}$ (J)
#3 - W	0,259	0,140	0,119
#4 - U	0,387	0,140	0,247
#5 - WU	1,208	0,478	0,729
#6 - WUWU	1,729	1,009	0,720
#7 - WUWUWU	2,350	1,665	0,685
#8 - WWUU	1,815	1,099	0,716
#9 - WWWUUU	3,190	1,632	1,557

As configurações W e U são apresentadas apenas como referência nos resultados, já que nunca serão utilizadas individualmente. Uma análise dos resultados permite observar que as configurações em paralelo (WU, WUWU e WUWUWU) apresentam valores muito próximos, porém decrescentes em relação a energia consumida no processo, o que indica que o aumento no número de conjunto de molas WU no empilhamento causa uma discreta redução na energia consumida pelo conjunto.

O mesmo não ocorre com as configurações em série (WWUU e WWWUUU), cuja energia consumida aumentou significativamente mostrando que esse tipo de empilhamento não é ideal para esse modelo de mola. Uma comparação direta entre os empilhamentos em série e paralelo, ou seja, nas configurações WUWU e WWUU mostram que a energia consumida é um pouco menor na configuração paralelo, porém o aumento do número de molas no empilhamento resulta em aumento significativo das perdas, assim não é indicado o uso do empilhamento em série com mais de 2 molas.

Outra observação importante é que a o retorno elástico nas configurações em paralelo tiveram um aumento do retorno elástico de 39% na configuração WU, para 58% na configuração WUWU e 70% na configuração WUWUWU.

A Tabela 3 apresenta os resultados referentes às constantes de rigidez elásticas e o deslocamento das diferentes configurações ensaiadas, quando sujeitas à carga de 545N. Novamente, os valores apresentados para as molas W e U são apenas referenciais.

Tabela 3 – Resultados referentes à constante de rigidez elástica e deslocamento das configurações à 545N.

Ensaio - Configuração	Constante de Rigidez Elástica k (N/mm)	Deslocamento à 545 N (mm)
#3 - W	654,71	0,88
#4 - U	407,29	1,38
#5 - WU	129,33	4,30
#6 - WUWU	95,66	5,92
#7 - WUWUWU	64,48	8,50
#8 - WWUU	82,00	6,64
#9 - WWWUUU	49,15	11,40

Os resultados mostram que a constante de rigidez elástica diminui tanto para o empilhamento paralelo quanto para o empilhamento série quando o número de conjunto de molas aumenta, ou seja, os conjuntos tendem a aumentar o deslocamento, como é de fato observado na tabela. Nas configurações em paralelo, a constante diminui 26% da WU para WUWU e 50% da WU para WUWUWU. Já para as configurações em série, a redução da constante é aproximadamente 40% da WWUU para WWWUUU.

A Figura 9 mostra o comportamento das molas em paralelo em função do deslocamento e constante de rigidez para 1, 2 e 3 conjuntos de molas WU empilhadas sequencialmente.

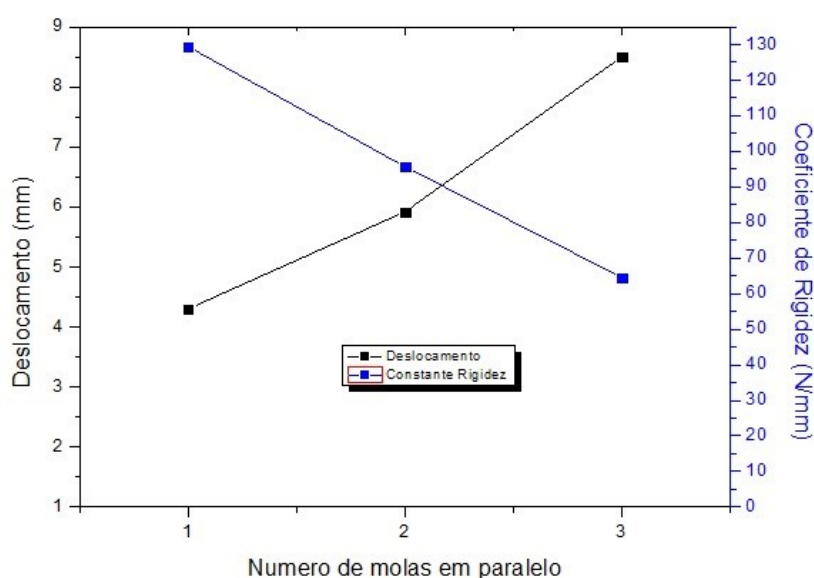


Figura 9 – Deslocamento e constante de rigidez elástica em função do número de molas em paralelo.

CONCLUSÃO

O presente estudo mostra que as molas prato desenvolvidas por meio de manufatura aditiva em impressão 3D usando filamento contínuo de fibra de carbono como reforço podem substituir molas prato metálicas e se adequar com maior flexibilidade aos requisitos de projeto, uma vez que é possível alterar facilmente suas características mecânicas, como a constante de rigidez elástica,

a energia elástica e parâmetros geométricos facilmente. A possibilidade de utilizar reforço contínuo de fibra de carbono em locais específicos ao longo da mola permite obter uma estrutura otimizada em termos de resistência e também de massa. Além disso, trabalhar a sequência de empilhamento com montagens em série e paralelo e/ou o número de conjunto de molas no sistema pode auxiliar muito na definição do projeto. Os resultados mostraram que o deslocamento e a constante de rigidez elástica podem ser alterados em função dessas configurações, sendo preferencial o uso de molas em paralelo, por permitir maior robustez em geral. Por exemplo, o aumento do número de molas em paralelo de 1 para 3 conjuntos pode reduzir 50% a constante de rigidez elástica com uma redução pequena da energia consumida no processo de compressão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico ao projeto 407431/2022-5 e a FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais ao projeto APQ-01846-18.

REFERÊNCIAS

- [1] Randbaran E, Dayang L, Zahari R, Sultan M, Mazlan N. Advantages and Disadvantages of Using Composite Laminates in The Industries. *Mod Approaches Mater Sci* 2020;3:349–52. 21 <https://doi.org/10.32474/mams.2020.03.000158>.
- [2] Bhuvanesh Kumar M, Sathiya P. Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on and challenges. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107228>.
- [3] Alghamdi SS, John S, Choudhury NR, Dutta NK. Additive manufacturing of polymer materials: Progress, and challenges. <https://doi.org/10.3390/polym13050753>.

- [4] Kabir SMF, Mathur K, Seyam AFM. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. *Compos Struct* 2020;232. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476>.
- [5] Struzziero G, Barbezat M, Skordos AA. Consolidation of continuous fibre reinforced composites in additive *Addit Manuf* 2021;48:102458 A review. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102458>.
- [6] Chacón JM, Caminero MA, Núñez PJ, García-Plaza E, García-Moreno I, Reverte JM. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties. *Compos Sci Technol* 2019;181:107688. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107688>.
- [7] Fardin Khan, Nayem Hossain, Juhi Jannat Mim, SM Maksudur Rahman, Md. Jayed Iqbal, Mostakim Billah, Mohammad Asaduzzaman Chowdhury, *Advances of composite materials in automobile applications – A review*, *Journal of Engineering Research*, 2024, ISSN 2307-1877, <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.017>.
- [8] Peng Yang, Stacy Van Dyke and Rani F. Elhajjar, An investigation into the mechanics of fiber reinforced composite disk springs. *Steel and Composite Structures* 18(3):775-791 DOI:[10.12989/scs.2015.18.3.775](https://doi.org/10.12989/scs.2015.18.3.775)
- [9] Nazir, A., Ali, M., Hsieh, CH. *et al.* Investigation of stiffness and energy absorption of variable dimension helical springs fabricated using multijet fusion technology. *Int J Adv Manuf Technol* 110, 2591–2602 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06061-8>
- [10] Markforged. Composites Data Sheet 2021:0–1.
- [11] Khosravani MR, Zolfagharian A, Jennings M, Reinicke T. Structural performance of 3D-printed composites under various loads and environmental conditions. *Polym Test* 2020;91:106770. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106770>.

DEVELOPMENT OF PLATE SPRINGS IN FDM 3D PRINTING WITH CONTINUOUS CARBON FIBER PA6/C

ABSTRACT

The development plate springs in composite materials has gained a lot of attention due to their characteristics related to low weight and high mechanical performance, particularly in the automotive industry. Composite material springs can be designed for the best performance, are more resistant to fatigue and do not suffer from corrosion like the one metal springs. The continuous carbon fiber deposition technology in 3D printing allows springs to be obtained quickly and comparable to metallic ones in terms of mechanical resistance. This work aims to develop a 3D printed plate spring model with continuous carbon fiber and evaluate its elastic characteristics. Several configurations were mechanically tested to determine the elastic stiffness constant and the elastic energy. The results showed that the elastic stiffness constant and elastic energy depend on the spring configuration and stacking sequence, allowing a lot of flexibility in the design.

Keywords: carbon fiber, 3D print, plate springs, continuous filament, polyamid