

Análise do potencial de metamateriais mecânicos com milicanais para o desenvolvimento de robôs macios.

**Isabelle M. Ikuno^{1,2}, Marcília V. Guimarães¹, Leonardo M. Machado¹,
Pedro Y. Noritomi¹, Harrson S. Santana¹**

¹Laboratório Aberto de Impressão 3D – LAPRINT
CTI Renato Archer – Campinas/SP

²Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) – Campinas/SP

{imikuno, mvguimaraes, lmachado, pnoritom, hsantana}@cti.gov.br

Abstract. Prostheses and orthoses are artificial devices designed to partially or fully replace a limb, aiming to reintegrate the user into society and the workforce. Soft robotics, known for its flexibility, has gained prominence for offering greater comfort and versatility compared to rigid prostheses. This article explores the application of mechanical metamaterials in soft robots, utilizing millifluiddics to drive their movement in response to internal pressure. Finite Element Analysis (FEA) simulations were used to predict the mechanical behavior of these robots. The intention is to study and develop soft robots and, potentially, advanced prostheses that are adaptable in shape and stiffness, providing greater comfort and range of motion for users. The preliminary results indicate that the proposed approach is promising for the development of a soft robot, with the potential to enhance its functional characteristics.

Resumo. Próteses e órteses são dispositivos artificiais projetados para substituir parcial ou totalmente um membro, visando reintegrar o usuário na sociedade e no mercado de trabalho. A robótica macia, conhecida por sua flexibilidade, tem se destacado por oferecer maior conforto e versatilidade em comparação com próteses rígidas. Este artigo estuda a aplicação de metamateriais mecânicos em robôs macios, utilizando milifluídica para impulsionar seu movimento em resposta à pressão interna. Simulações por Análise de Elementos Finitos (FEA) foram usadas para prever o comportamento mecânico desses robôs. O objetivo é estudar e desenvolver robôs macios e, potencialmente, próteses avançadas, adaptáveis em forma e rigidez, para proporcionar maior conforto e amplitude de movimento aos usuários. Os resultados preliminares indicam que a abordagem proposta é promissora para o desenvolvimento de um robô macio, com potencial para aprimorar suas características funcionais.

Palavras-chave: Robô macio, Metamaterial, Elementos finitos, Milifluídica.

1. Introdução

As próteses e as órteses são dispositivos artificiais desenvolvidos para substituir totalmente ou parcialmente um membro do corpo, respectivamente (Dang et al. 2014). Esses instrumentos têm como objetivo proporcionar assistência e promover o bem-estar

do usuário, de modo a reinserir o mesmo na sociedade (Murray 2005) e no mercado de trabalho (Santosa e Lopesa 2021). Dentre as abordagens possíveis para o desenvolvimento de uma prótese ou órtese funcional, podemos citar o uso de mecanismos que atuam por ação de captura de sinais elétricos, dentre eles um novo conceito que vem se propagando, chamado de robô macio ou *soft robot*. O progresso no desenvolvimento desta tecnologia pode contribuir para a melhoria desses instrumentos, pois sua flexibilidade e adaptabilidade proporcionam um maior conforto e sugerem uma maior capacidade de atuar em tarefas diversificadas em comparação com as próteses rígidas (Capsi-Morales et al. 2021).

Assim, para melhorar a performance dos robôs macios, principalmente no quesito de se obter uma maior gama de movimentos, a aplicação de metamateriais nesses robôs pode ser promissora. De acordo com Bertoldi et al. 2017, metamateriais são materiais cuidadosamente estruturados e exibem propriedades e funcionalidades que diferem e superam aquelas de seus materiais constituintes. Neste caso, os metamateriais mecânicos podem diferir em movimento, deformações, tensões e energia mecânica (Bertoldi et al. 2017) em que podem ser úteis para obter diferentes comportamentos e trazer maior liberdade de movimentos e conforto para o indivíduo.

Essa abordagem ganha ainda mais relevância ao integrar o metamaterial aos robôs macios, explorando a aplicação da milifluídica nesse contexto. A introdução da milifluídica, ciência que envolve a manipulação de fluidos em canais milimétricos, no metamaterial abre a possibilidade de gerar pressão interna na estrutura, impulsionando seu movimento. Dessa maneira, torna-se viável a execução de aplicações de controle e automação, ampliando suas capacidades e usos de maneira inovadora.

Por fim, para estudar e aprimorar o potencial dos metamateriais nas aplicações em robôs macios, a análise de elementos finitos se destaca como uma ferramenta útil para prever o comportamento mecânico efetivo do *soft robot*, como o deslocamento e a distribuição de tensões (Zolfagharian et al. 2021; Ding et al. 2022). Em muitos casos, essa análise se revela fundamental para se obter um melhor entendimento dos fenômenos físicos (Ding et al. 2022). Além disso, devido à sua natureza computacional, ele proporciona a vantagem de realizar modelagem, simulação e análise do comportamento mecânico de diversos *designs* da estrutura em um período curto, em comparação com os métodos de fabricação aditiva e testes práticos. Isso resulta em uma aceleração do desenvolvimento e aprimoramento da funcionalidade do robô macio.

Sendo assim, o objetivo da pesquisa tem como enfoque realizar uma análise estrutural na incorporação de canais milimétricos em metamateriais mecânicos para modificar sua rigidez em resposta à pressão, visando desenvolver robôs macios com funcionalidades inovadoras e, potencialmente, próteses avançadas adaptáveis em forma e rigidez para maior conforto e amplitude de movimentos dos usuários.

2. Metodologia

Para o primeiro *design*, optou-se pelo metamaterial apresentado na Figura 1a devido à sua familiaridade em usos anteriores no laboratório e pelas suas propriedades de curvatura sinclástica e comportamento auxético. A curvatura sinclástica refere-se à capacidade de um material assumir curvatura composta ao longo de duas direções, frequentemente ortogonais, sem a necessidade de dobrar a superfície. Já o comportamento auxético refere-se ao material que tem a razão de Poisson negativa, ou seja, quando o material é

esticado, ele aumenta sua espessura e quando comprimido a reduz.

Esse metamaterial foi obtido no site Ultimaker Thingiverse, um repositório popular de modelos 3D, e disponibilizado por AndreasBastian 2014. A partir disso, exploraremos a sua célula metamaterial (Figura 1b) para aplicações com robô macio.

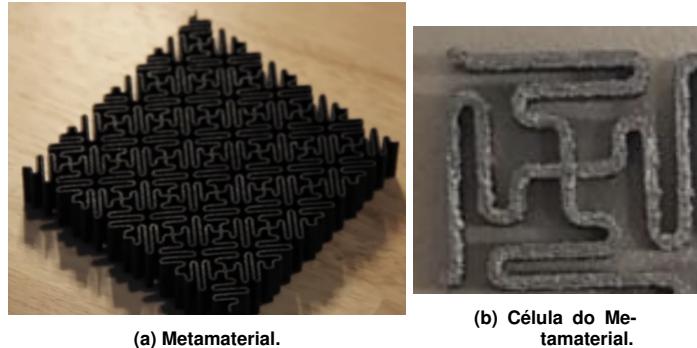


Figura 1. Metamaterial de referência de AndreasBastian 2014.

Para comparar seu resultado com outro tipo de robô macio em que utiliza materiais elásticos como o silicone Ecoflex, foi utilizada a célula metamaterial para formar uma estrutura semelhante com a do artigo de Zhang et al. 2017(Figuras 2a e 2b). A partir dessa base foram feitas algumas variações geométricas a fim de estudar seu comportamento mecânico.

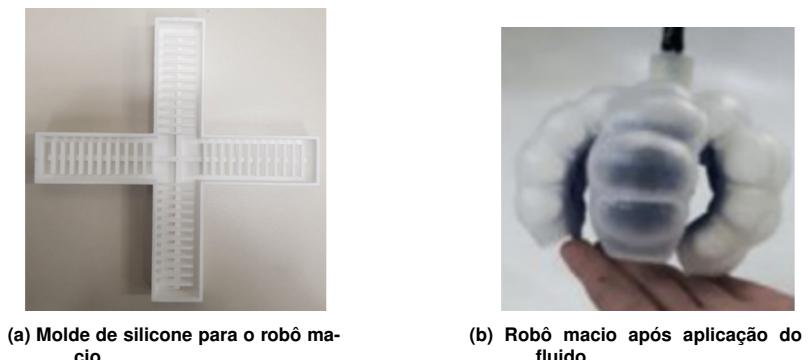


Figura 2. Robô macio de Zhang et al. 2017.

Para analisar seus comportamentos iniciais, foi feita a modelagem somente da célula metamaterial (Figura 3) no *software* Rhinoceros 3D 7 (Robert McNeel & Associates, Seattle, USA). O círculo central é a entrada do fluido e em azul será a passagem dele dentro da estrutura.

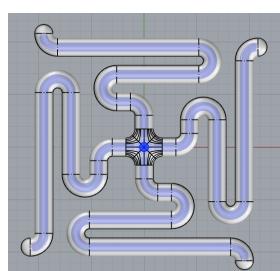


Figura 3. Robô macio de uma célula modelada em 3D, visão superior.

Com este modelo, foram testadas 2 tipos diferentes de canais internos, um com dois canais internos na horizontal (Figura 4a) e outro com apenas um canal porém com sua extremidade tendo uma angulação de 45° (Figura 4b). Todos os canais têm 1.4 mm de diâmetro.

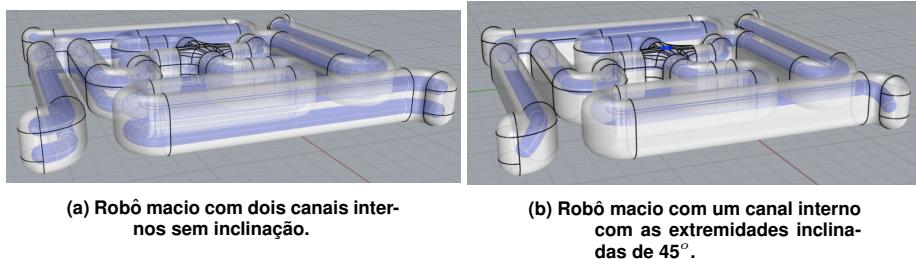


Figura 4. Robô macio de 1 célula com diferentes configurações de canal interno para teste.

A seguir, com o intuito de analisar o comportamento estrutural das geometrias, foram construídas suas malhas 2D e 3D no *software* de simulação HyperMesh (Altair Engineering, Troy, USA). Para simplificar o processamento computacional, uma força foi distribuída nas quatro extremidades do canal, reproduzindo o movimento resultante da pressão fluídica interna.

Assim, foram realizadas três simulações distintas na primeira geometria (Figura 4a), as forças foram aplicadas em ambos os canais e, em outra variação, em apenas um dos canais horizontais. Na segunda geometria (Figura 4b), a força foi aplicada somente no canal disponível. Essas simulações podem ser visualizadas na Figura 6. Além disso, elas foram lineares, com forças de 0,25 N aplicadas em cada extremidade, perpendiculares à cavidade, e a condição de contorno foi definida como a restrição total de movimento na região da entrada do fluido. A Figura 5a destaca, em rosa, a força aplicada em um dos canais com extremidades inclinadas a 45°, enquanto, em azul claro, é indicado o local onde a força será distribuída e aplicada. Por fim, a Figura 5b mostra a cavidade engastada.

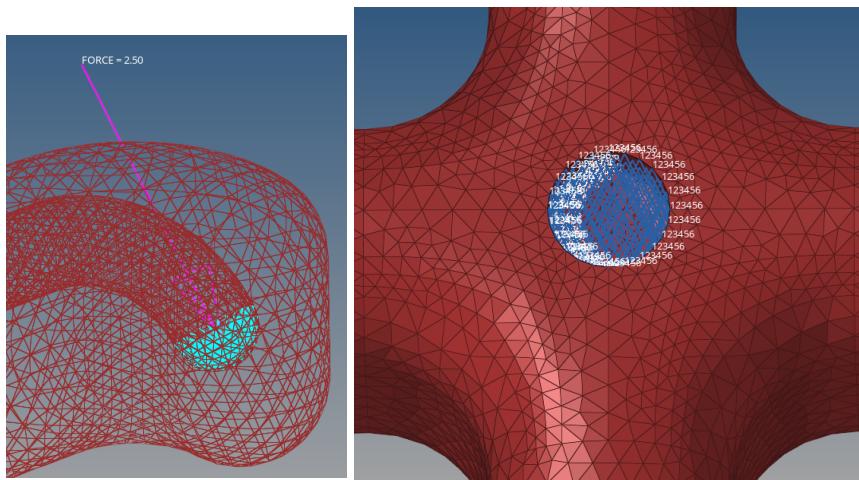


Figura 5. Configuração de simulação do robô macio - Malha 3D

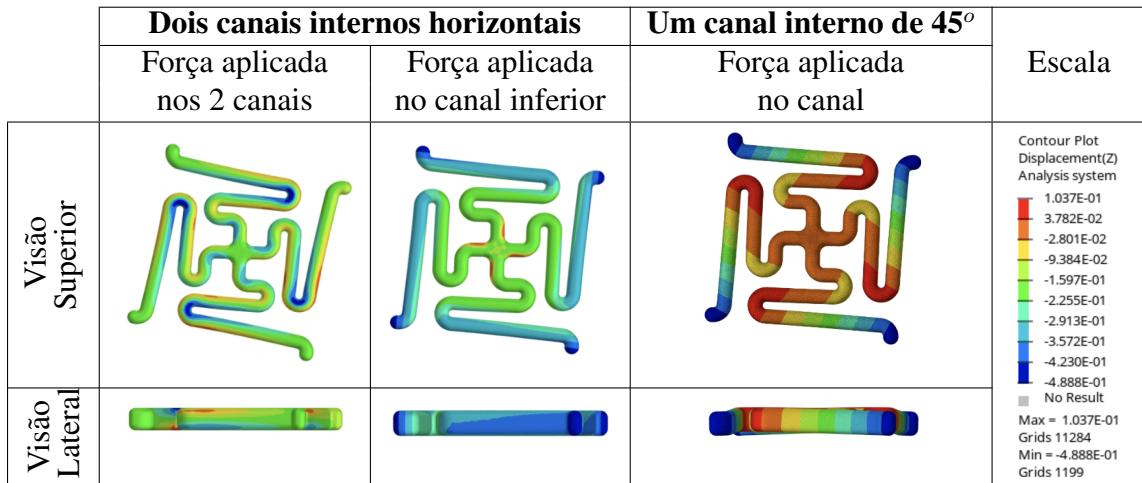


Figura 6. Resultado da simulação do Robô macio com uma célula - Deslocamento em Z.

A partir disso, foi visto que os canais que estavam inclinados em 45° foram os que mais se deslocaram para baixo, sendo o modelo mais próximo do desejado do comportamento de uma garra.

Dessa forma, foi feita uma estrutura análoga ao molde da Figura 2a, em formato de cruz. E como isso, também foram aplicadas algumas diferenças na configuração da estrutura como a presença ou não de conexões entre as células como nas Figuras 7a e 7b respectivamente (Em azul é onde passa os canais internos e em laranja são as conexões), e também de variação na angulação do canal, como angulação de 45° e de 90° em cada extremidade da cruz, essas extremidades estão destacadas em vermelho e podem ser visualizadas na Figura 8.

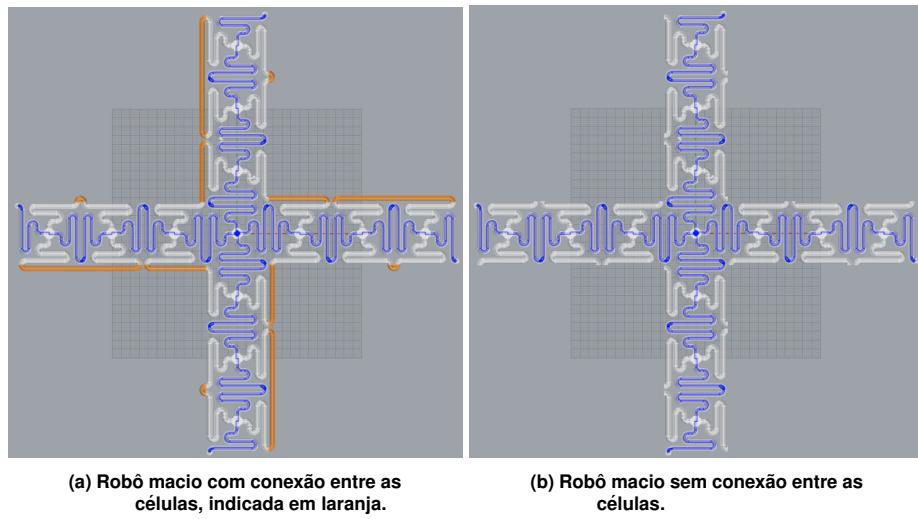


Figura 7. Duas configurações de conexão entre as células do robô macio.

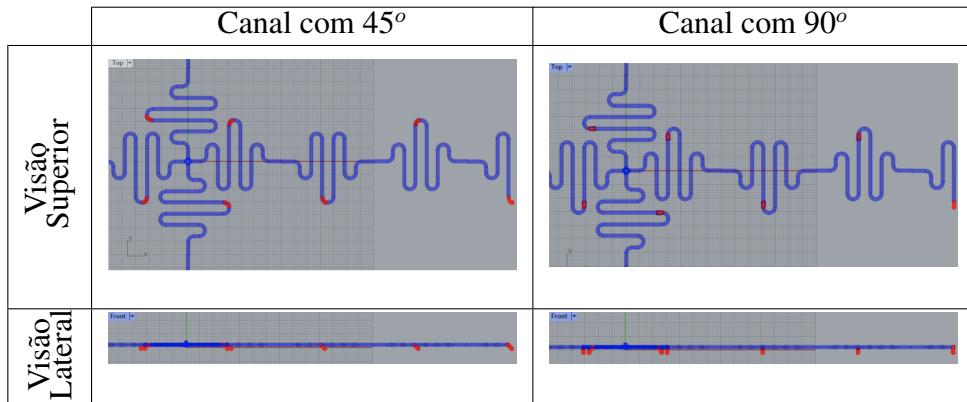


Figura 8. Comparação dos canais internos do robô macio, na coluna esquerda tem o canal com suas extremidades com angulação de 45° e na direita com 90° . Elas estão indicadas em vermelho.

Por fim, foram feitas suas respectivas simulações não lineares, variando se tem ou não a conexão entre as células e variando as angulações (45° e 90°). Em suma, foram feitas 4 simulações no total. Todos os modelos eram do mesmo tamanho (25 cm de comprimento) e as forças aplicadas a cada extremidade do canal foram todas de 0,25 N, além disso foi utilizada a configuração FLLWFORCE para que a força seguisse o movimento feito pela estrutura. As propriedades do material configurado na simulação foram da poliamida 12 (PA12), uma vez que no laboratório aberto de impressão 3D (LAPRINT) do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer há uma impressora 3D SLS (Selective Laser Sintering) de PA12, permitindo, em trabalhos futuros, imprimir o modelo e compará-lo melhor com as simulações.

3. Resultados

As Figuras 9 e 10 mostram os resultados qualitativos de cada uma das simulações para a análise do deslocamento em Z e dos esforços, respectivamente, enquanto a tabela 1 mostra um resumo quantitativo, sendo "CC" o modelo Com Conexão entre as células e "SC" o modelo Sem Conexão.

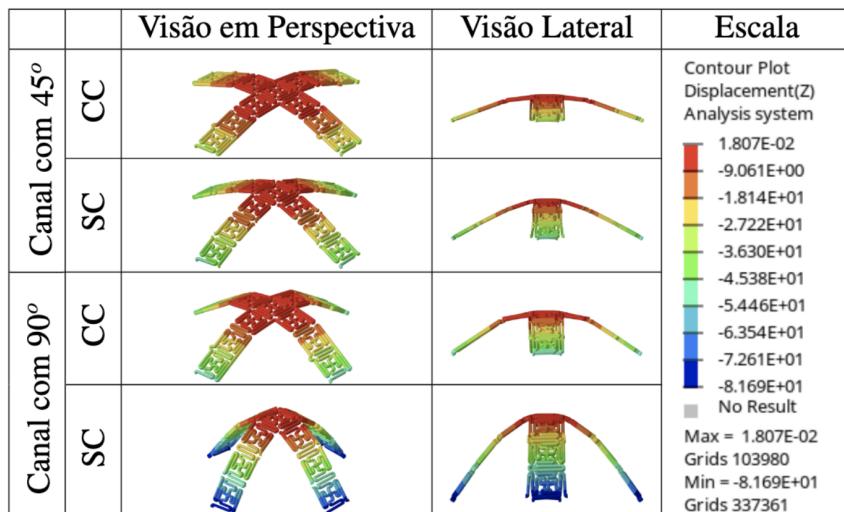


Figura 9. Comparação dos resultados das simulações do robô macio em formato de cruz para diferentes configurações da angulação do canal e da conexão ou não entre células - Deslocamento em Z..

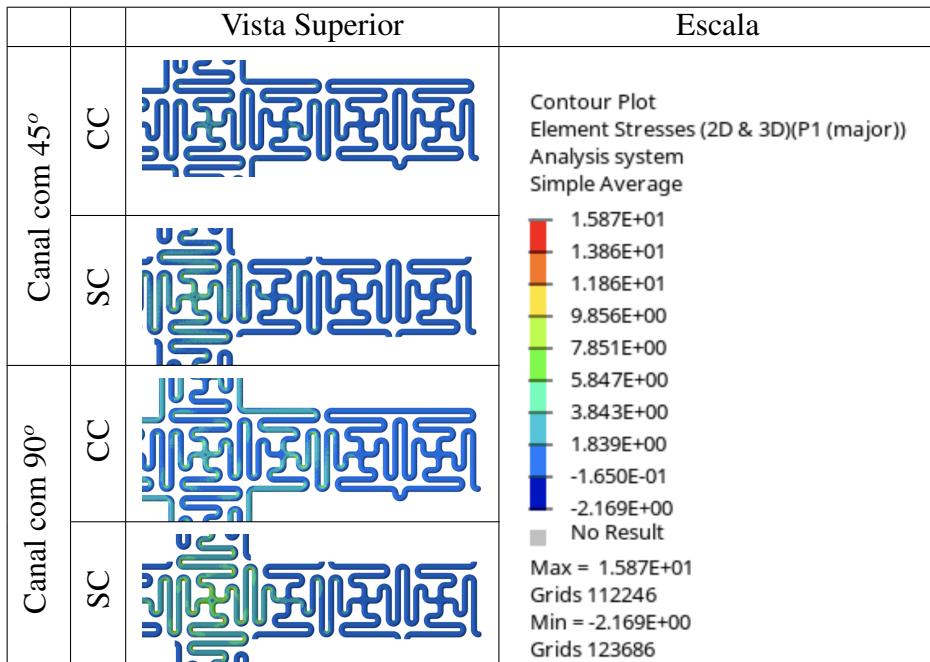


Figura 10. Comparação dos resultados das simulações do robô macio em formato de cruz para diferentes configurações da angulação do canal e da conexão ou não entre células - Tensão mecânica.

Tipo de Configuração		Deslocamento Máx em Z (mm)	Tração Máxima (MPa)	Compressão Máx (MPa)
Canal com 45°	Com Conexão	31,47	8,1280	0,7060
	Sem Conexão	47,83	11,6900	0,8655
Canal com 90°	Com Conexão	52,12	11,74	1,432
	Sem Conexão	88,06	15,87	2,169

Tabela 1. Resumo quantitativo das simulações do robô macio em formato de cruz.

Pela Figura 9 pode se observar que a presença das conexões entre as células restringem o movimento do robô como um todo, sendo mais perceptível no robô com canal de 90°. Além disso, pela Figura 10, é possível observar que quando há conexão há uma maior distribuição da tensão e por consequência sua menor magnitude, que também pode ser evidenciado pela tabela 1.

Por fim, em relação à angulação do canal interno, conforme aumentou-se o ângulo, aumentou-se o deslocamento e os esforços. Nos robôs que não possuíam conexão entre as células, o incremento de 45° resultou em quase o dobro do deslocamento.

Em seguida, a fim de analisar o comportamento mecânico do robô macio em relação a outros parâmetros, foi realizada uma análise prévia utilizando apenas um de seus membros, devido a sua simetria. O objetivo foi comparar os resultados obtidos com os do robô completo. Se os resultados forem semelhantes, a intenção é utilizar essa topologia para reduzir o tempo e o processamento computacional.

Para tal comparação, a estrutura simulada corresponde ao robô macio sem conexão entre as células e com um ângulo interno de 90°. A configuração para a simulação pode ser visualizada na Figura 11. Na Figura 11a, o corpo do modelo está em destaque, sendo

os elementos em rosa posicionados ao longo do modelo, as forças em 90° aplicadas no canal interno.

Além disso, na Figura 11a circulado em verde e em vermelho está as restrições de movimento e um dos locais em que a força é aplicada, respectivamente. Elas podem ser visualizadas com mais clareza, por sua vez, nas Figuras 11b e 11c. Na Figura 11b, as restrições de movimento de simetria, destacadas em laranja, indicam que o objeto não pode se mover transladando nos eixos X e Y, enquanto as restrições em azul representam a área onde o robô está engastado. Por fim, na Figura 11c, analogamente ao robô de apenas uma célula, o local em que a força está sendo aplicada é indicada em azul claro.

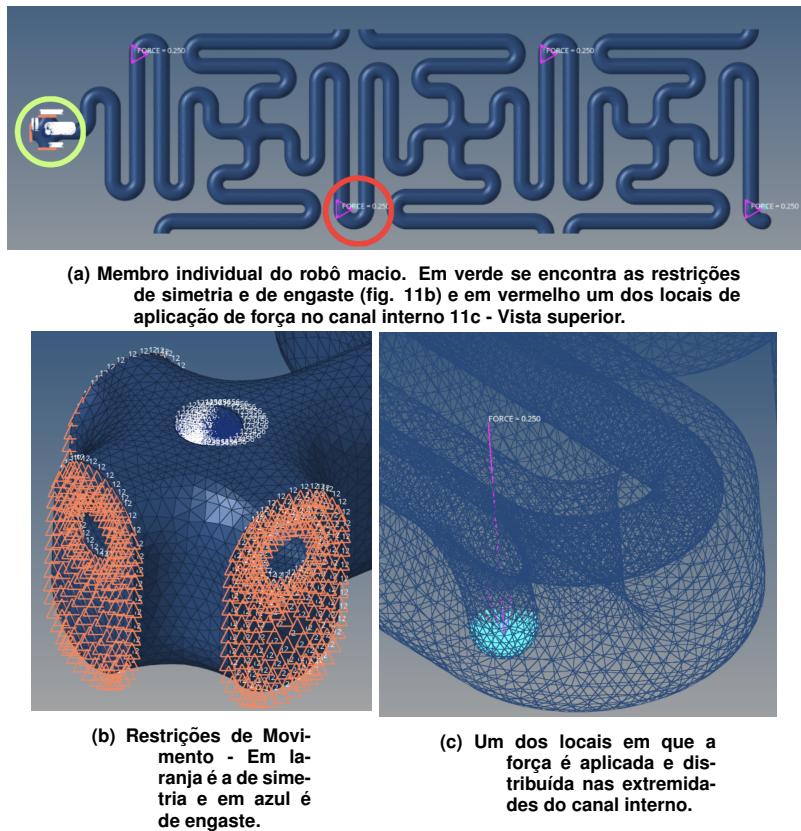


Figura 11. Configuração de forças e restrição para simulação de um membro do robô macio.

A comparação quantitativa dos resultados entre os formatos robô macio completo e o simplificado podem ser visualizados na tabela 2.

Tipo de Geometria	deslocamento Máx em Z (mm)	Tração Máxima (MPa)	Compressão Máx (MPa)
Robô macio completo (formato de cruz)	88,06	15,87	2,169
Robô macio simplificado (apenas um membro)	88,1	17,01	2,064

Tabela 2. Comparação quantitativa das simulações do robô macio em formato de cruz e formato simplificado (apenas com um dos membros.)

Pode se notar que os resultados foram bem próximos, sendo o maior deles com

uma variação de 7,18%. Sendo assim, foi utilizado essa topologia para simular os demais modelos que vem a seguir.

Além disso, para aumentar o deslocamento máximo em Z do robô macio e torná-lo mais semelhante ao comportamento de uma garra, foi testada uma nova configuração. A principal alteração consistiu na colocação da entrada do fluido no centro das últimas células de cada membro, mantendo o engaste na posição central. Dessa forma, simplificando o modelo para a simulação, haveria uma força maior no centro de cada última célula, equivalente a soma das forças internas em cada canal interno de cada membro, simulando a força gerada pela injeção do fluido. A Figura 12 mostra como é essa nova configuração. Em azul claro é o local em que a força está sendo igualmente distribuída e aplicada e em rosa são as forças.



Figura 12. Configuração de forças e restrição para simulação de um membro do robô macio com mudança da entrada de fluido.

Na tabela 3 pode ser visualizado os resultados quantitativos resumidos.

Tipo de Geometria	deslocamento Máx em Z (mm)	Tração Máxima (MPa)	Compressão Máx (MPa)
Robô macio simplificado com mudança de entrada	107,8	31,0	3,6

Tabela 3. Resultado quantitativo da simulação do robô macio em formato simplificado (apenas com um dos membros) e com mudança do local de força

Comparando o resultado da tabela 2 com a tabela 3, nota-se que o deslocamento dado pela troca da localização de entrada do fluido (tabela 3) foi mais de 20 mm a mais que a entrada que estava no centro. Sendo assim, o modelo mais próximo do desejado.

Em suma, a partir dos resultados obtidos, a fim de obter um modelo que se comporta mais próximo de uma garra, ou seja, que desloca mais em Z, temos que o melhor modelo para simular é do robô macio sem conexão e com a localização da entrada do fluido na última célula de cada membro.

Assim, para obter um entendimento geral do comportamento mecânico (deslocamento em Z máxima, tração máxima e compressão máxima) desse robô macio em relação a variação de outros parâmetros de entrada, como o valor da força aplicada, quantidade de células de metamaterial em cada membro do robô e o ângulo interno, foram feitas mais sete simulações, resultando em nove gráficos, sempre com dois parâmetros constantes e um variando. O intervalo dos parâmetros estão presentes na tabela 4.

Vale ressaltar que o valor da força apresentado na tabela refere-se apenas à força

aplicada no canal de entrada. Nas simulações, também foi considerada as forças aplicadas em cada uma das extremidades internas, que são equivalentes à força de entrada dividida pelo número total de extremidades.

Força do canal de entrada (N)	0,5	1	1,5
Número de Células	3	5	7
Ângulo Canal Interno (°)	45,0	67,5	90,0

Tabela 4. Variação de parâmetros para simulação.

Por fim, cabe destacar a obtenção de cada valor máximo apresentado na tabela 4. O maior valor da força foi alcançado ao iniciar com valores elevados e reduzi-los gradualmente até que a simulação atingisse a convergência. Já o número de células foi escolhido a fim de que não adicionasse muito mais células para que não sobrecarregasse o computador, já que apenas uma célula tem aproximadamente 640.000 elementos. Finalmente, o ângulo do canal interno foi definido até o ponto em que resultasse apenas em uma componente em Z.

Os resultados quantitativos das simulações referentes a tabela 4, para o modelo do robô macio sem conexão e com a localização da entrada do fluido na última célula de cada membro, estão presentes na tabela 5 em forma de gráficos. Vale ressaltar que a curva em vermelho refere-se apenas a uma tendência de proporcionalidade do comportamento, uma vez que há poucos dados e as simulações não são lineares.

Assim, a tabela 5, indica alguns comportamentos mecânicos. A primeira delas é que, com o aumento da força, todos os resultados (deslocamento, tração e compressão) também se elevaram, com a variação das tensões sendo a mais significativa. Em segundo lugar, ao variar o ângulo interno, assim como ocorreu com a força, houve um aumento em todos os parâmetros, com a compressão apresentando um crescimento mais acentuado em comparação às outras variáveis, embora o valor absoluto ainda seja relativamente pequeno. Por último, ao variar o número de células, foi observado um grande aumento no deslocamento, enquanto a tração e a compressão mostraram até uma ligeira redução. Isso pode ser explicado pelo aumento da estrutura com a adição de novas células, o que resulta em um maior deslocamento apesar do uso da mesma força. Vale destacar que, apesar da obtenção de grandes deslocamentos, em todas as tentativas, foi observada uma lacuna que impedi o fechamento completo da garra.

Portanto, podemos concluir que o melhor modelo, com maior deslocamento e menor tensão, seria possivelmente aquele que combina, em primeiro lugar, o maior número de células, seguido pelo maior ângulo interno, que aumenta o deslocamento sem elevar significativamente as tensões, e, por fim, a maior força aplicada, que contribui para o deslocamento, mas é o fator que mais intensifica as tensões.

É importante destacar que, entre as sete simulações realizadas, a maior tensão de von Mises calculada foi de 20,83 MPa, correspondente ao modelo com 5 células, ângulo de 90° e força na entrada de 1 N. Felizmente, conforme indicado por Lammens et al. 2016, o menor limite de escoamento da poliamida 12 (PA12) nas orientações em que a peça pode ser tensionada é de 31,6 MPa, valor superior ao calculado. Ou seja, o modelo não apresentaria deformação plástica ou ruptura.

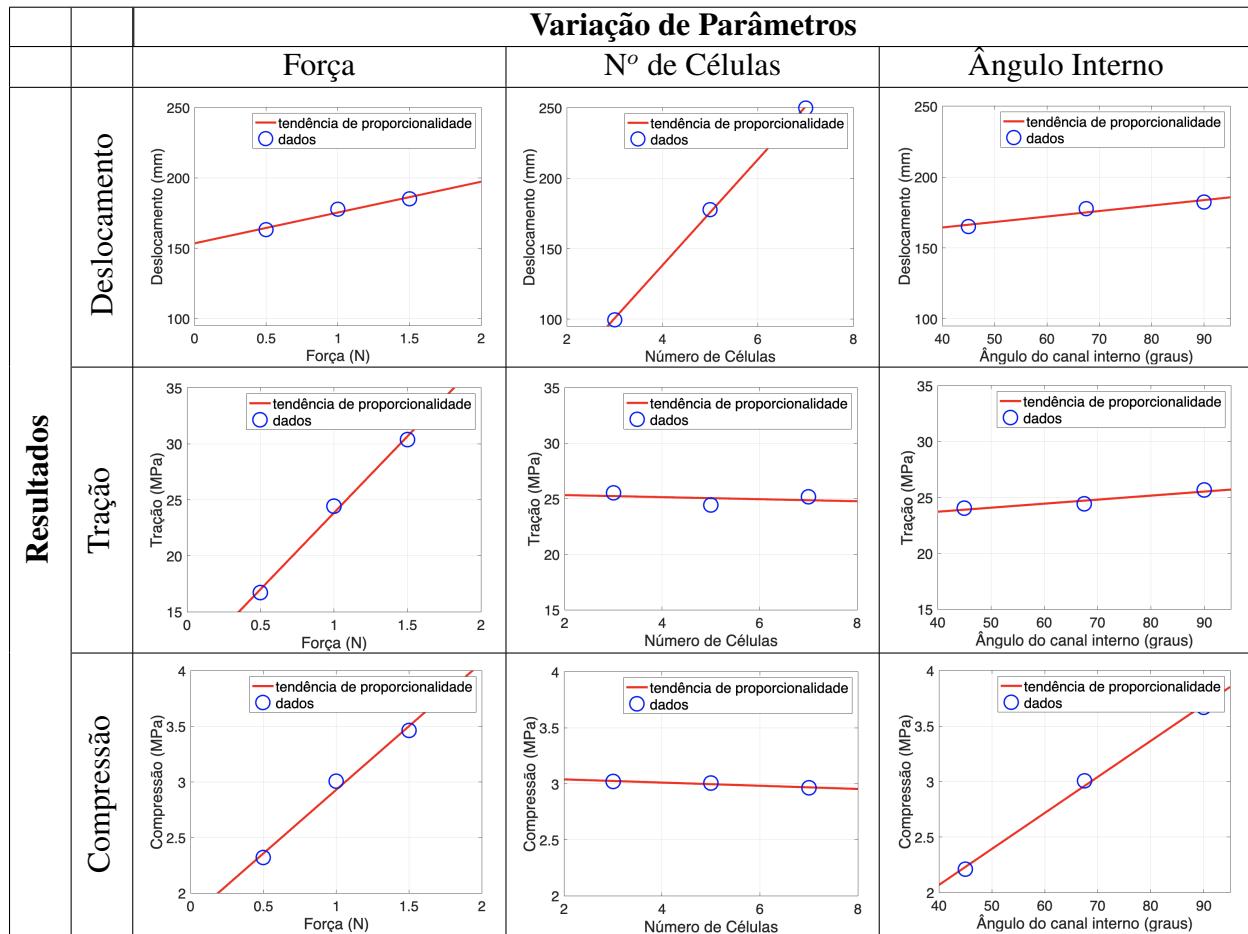


Tabela 5. Comparação quantitativa dos resultado das simulações do robô macio simplificado para diferentes configurações e resultados.

4. Conclusão

A utilização do *software* de desenho computacional e de simulação permitiu iniciar o desenvolvimento e adquirir uma compreensão geral do comportamento mecânico de um modelo de robô macio composto por células metamateriais e milifluídica.

Além disso, a metodologia proporciona o aprimoramento e o desenvolvimento do robô macio ao testar diferentes versões, com potencial de melhorar suas características funcionais. As simulações computacionais realizadas também indicam que, em comparação com o processo manual de imprimir e testar vários modelos, a abordagem computacional se mostra mais eficiente e menos custosa.

Para futuros trabalhos poderá ser feito um estudo mais aprofundado sobre a milifluídica juntamente com a utilização de *software* de simulação de mecânica dos fluidos, além de testes com impressão do modelo atual ou até mesmo o desenvolvimento de robôs macios com outras topologias de metamateriais.

5. Agradecimentos

Agradeço ao orientador Harrson S. Santana pela oportunidade e pelos ensinamentos. Aos coorientadores Pedro Y. Noritomi, Marcília V. Guimarães e Leonardo

M. Machado pelos treinamentos, direcionamentos e aconselhamento durante a pesquisa. Agradeço também à equipe LAPRINT por proporcionar um ambiente de trabalho agradável e produtivo e a todos os envolvidos na pesquisa, pelo apoio contínuo e pela contribuição do meu desenvolvimento pessoal e profissional. Por fim, também agradeço ao CNPQ e ao PIBIC pela bolsa e o fomento à pesquisa.

Referências

- ANDREASBASTIAN. *Mesostructured Cellular Materials: Early Prototypes*. 2014. <<https://www.thingiverse.com/thing:289650>>. Acessado em: 09/08/2024.
- BERTOLDI, K. et al. Flexible mechanical metamaterials. *Nature Portfolio*, v. 2, n. 11, p. 17066, 2017. DOI: 10.1038/natrevmats.2017.66.
- CAPSI-MORALES, P. et al. Comparison between rigid and soft poly-articulated prosthetic hands in non-expert myo-electric users shows advantages of soft robotics. *Nature*, v. 11, n. 23952, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-02562-y.
- DANG, T. T. et al. Polymeric biomaterials for implantable prostheses. *Natural and Synthetic Biomedical Polymers*, p. 309–331, 2014. DOI: 10.1016/B978-0-12-396983-5.00020-X.
- DING, L. et al. Dynamic finite element modeling and simulation of soft robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, v. 35, n. 24, 2022.
- LAMMENS, N. et al. On the visco-elasto-plastic response of additively manufactured polyamide-12 (pa-12) through selective laser sintering. *Polymer Testing*, v. 57, p. 149–155, 2016. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.11.032.
- MURRAY, C. D. The social meanings of prosthesis use. *Journal of Health Psychology*, v. 10, n. 3, p. 425–441, 2005. DOI: 10.1177/1359105305051431.
- SANTOSA, G. de Souza Henrique dos; LOPESA, R. E. The inss professional rehabilitation program and the reinsertion of workers into the job market. *Cadernos Brasileiros de Terapia Ocupacional*, v. 29, 2021. DOI: 10.1590/2526-8910.ctoAO2100.
- ZHANG, J. et al. A modular, reconfigurable mold for a soft robotic gripper design activity. *Frontiers in Robotics and AI*, v. 4, 2017. DOI: 10.3389/frobt.2017.00046.
- ZOLFAGHARIAN, A. et al. 4d printing soft robots guided by machine learning and finite element models. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 328, 2021. DOI: 10.1016/j.sna.2021.112774.