



Análise numérica de estruturas biomiméticas do tipo *brick-and-mortar* submetidas à compressão uniaxial

Numerical analyses of brick-and-mortar biomimetic structures submitted to uniaxial compression

Lucas Rodrigo de Souza¹ , Carlos Vinícios Opelt^{1,*} 

1. Centro Universitário Católica de Santa Catarina – Joinville (SC), Brasil.

Autor correspondente: cvopelt@gmail.com

Editor de Seção: Péricles Sant'Ana

Recebido: Mar. 31, 2022 **Aprovado:** Maio 05, 2022

RESUMO

Os materiais criados pela natureza possuem propriedades únicas, resultado de sucessivas iterações ao longo dos anos, sendo, portanto, uma rica fonte de inspiração para o desenvolvimento de novas soluções em materiais. Neste estudo, foram avaliadas diferentes estruturas inspiradas no conceito *brick-and-mortar*, que compõe a microestrutura da madrepérola. Para isso, blocos sólidos foram conectados por estruturas circulares, com o intuito de alcançar o mesmo efeito de dissipação de energia que as placas de aragonita e o material orgânico propiciam. Para essa avaliação, utilizou-se um *software finite elements analysis* (FEA) para a simulação de ensaios de compressão em amostras com diferentes geometrias de blocos internos, e analisou-se a absorção total de energia, bem como a energia absorvida específica de cada amostra. Os resultados demonstram que a estrutura sólida foi capaz de absorver 87 J/kg, enquanto as demais amostras com estruturas de ligação absorveram, em média, 91% menos energia. Analisando a distribuição de tensão nas amostras, estima-se que essa diferença ocorra por causa da concentração de tensões excessivas nos elementos de ligação, causando falhas prematuras em regiões críticas das estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: biomimética; método de elementos finitos; compressão.

ABSTRACT

Materials created by nature have unique properties, as the result of successive iterations over the years, being a rich source of inspiration for the development of new material solutions. In this study, different structures were evaluated, inspired by the brick-and-mortar concept, which makes up the microstructure of nacre. To do so, solid blocks were connected by circular structures, to achieve the same energy dissipation effect that aragonite plates and the organic material provide. For this evaluation, finite elements analysis (FEA) software was used to simulate compression tests on samples with different internal block geometries, and the total energy absorption was analyzed, as well as the specific absorbed energy of each sample. Results showed that the solid structure was able to absorb 87 J/kg, while the other samples with binding structures absorbed, on average, 91% less energy. Analyzing the stress distribution in simulated samples, it was estimated that this difference occurs due to the concentration of excessive stresses in the connecting elements, causing premature failures in critical regions of the structures.

KEYWORDS: biomimetics; finite element method; compression.

INTRODUÇÃO

A natureza passa por ininterruptas mudanças há mais de 3,8 bilhões de anos, período estimado do surgimento da vida na Terra¹. A evolução dos organismos vivos é resultado de milhares de iterações com seu hábitat, aperfeiçoando



características específicas para que a vida possa prosperar. Isso faz da Terra um grande laboratório de pesquisa e desenvolvimento, criando estruturas complexas, de alta *performance*, utilizando materiais e processos simples². A biomimética, segundo Benyus³, pode ser definida como a “inovação inspirada pela natureza”. Essa observação de sistemas biológicos tem como objetivo obter modelos para resolução de problemas nas diversas áreas da engenharia⁴.

Essa inspiração é utilizada há pelo menos três mil anos, quando povos chineses buscaram criar um tipo de seda artificial. Os avanços tecnológicos e industriais do século XX trouxeram necessidades cada vez maiores de se desenvolver novos materiais, estruturas e processos, visando ganhos em funcionalidade e eficiência⁵. Como exemplo, pode-se citar o trem-bala japonês Shinkansen, que teve como inspiração o formato do bico de aves da família *Alcedinidae* para torná-lo mais aerodinâmico e eliminar o som explosivo que ocorria nas saídas de túneis⁶. Texturas de superfícies que facilitam sua limpeza podem imitar a estrutura das folhas de lótus, que possui propriedades autolimpantes, efeito também já identificado nas asas de insetos⁷. A invenção do Velcro, tecido amplamente utilizado pela indústria têxtil, ocorreu após Georges de Mestral voltar de uma caça e observar sementes de bardana presas em seu cachorro. Essas sementes são cobertas de minúsculos ganchos que engatam em argolas microscópicas presentes em pelos e outros tecidos⁸.

Uma das estruturas biomiméticas que merecem destaque é a do tipo *brick-and-mortar* (tijolo e argamassa), composta normalmente de camadas de material rígido intercaladas com camadas de material macio. A fase rígida (tijolo) é encarregada de garantir alta resistência para a estrutura, enquanto a fase macia (argamassa) é responsável pela elasticidade⁹. Um exemplo comum dessa categoria de estrutura é responsável por preservar a vida de pilotos em autódromos e pistas de corridas. As barreiras de segurança são construídas usualmente com um material externo rígido, com a finalidade de defletir o movimento dos veículos em impactos que ocorrem em ângulos mais agudos. Uma segunda camada é construída com materiais capazes de absorver uma grande quantidade de energia, deformando-se rapidamente para reduzir a desaceleração no impacto¹⁰. Em uma escala menor, a madrepérola, encontrada nas conchas de moluscos gastrópodes e bivalves, é frequentemente classificada como um material de alta *performance* por unir uma elevada resistência e tenacidade¹¹. Segundo Barthelat et al.¹², a madrepérola tem em sua composição 95% de aragonita (uma estrutura cristalina do carbonato de cálcio) intercalada com uma fina camada (5%) de uma matriz orgânica macia, conhecida como biopolímero (composto formado sobretudo de quitina e proteínas).

Este estudo teve como objetivo investigar o comportamento mecânico em compressão de estruturas biomiméticas do tipo *brick-and-mortar*, inspiradas na madrepérola. As estruturas exploradas foram modeladas em *software* CAD e posteriormente avaliadas pelo método de elementos finitos (FEA), com o intuito de realizar uma análise de tensões, deslocamentos compressivos e forças resultantes, a fim de determinar o modelo com maior capacidade de absorção de energia. Com foco na manufatura aditiva, as estruturas foram desenhadas de forma que pudessem ser facilmente empregadas em peças para impressão tridimensional, e até mesmo como proposta de novos padrões de preenchimento de peças.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A madrepérola possui uma estrutura similar à de tijolos e argamassa, que, segundo Meyers et al.¹³, deve suas incríveis propriedades mecânicas a uma estrutura hierárquica. Em uma escala nanométrica, ela possui uma camada de matéria orgânica com espessura de 20 a 30 nm, que é responsável pela maior parte da absorção de impactos, alternando por blocos formados por cristais de aragonita, com 5 µm de espessura e microestrutura cristalina de 8 a 10 µm de diâmetro.

Segundo Barthelat et al.¹², os *platelets* de aragonita possuem ondulações e conexões capazes de promover um travamento na estrutura, aumentar a dureza e reduzir a propagação de deformações em torno de trincas. Pontes minerais de aragonita com diâmetros na ordem de 25 a 55 nm são dispostas de forma aleatória conectando demais *platelets*. Essa organização de sucessivas camadas orgânicas e inorgânicas, em diferentes escalas, configura uma estrutura hierárquica em que as camadas orgânicas são capazes de dissipar energia e, com alto poder de adesão, atuar como uma cola viscoelástica, enquanto as pontes minerais e ondulações do material auxiliam na resistência ao cisalhamento entre as camadas, redistribuindo as tensões na estrutura¹¹.

Estruturas hierárquicas como essa são definidas por Jia et al.⁹ como possuindo fases macias e fases rígidas em diferentes escalas e se dividem em cinco amplos grupos – *layered*, *brick-and-mortar*, *concentric hexagon*, *cross-lamellar* e *rotating plywood* –, que são encontrados em diversos materiais na natureza. As estruturas em camadas (*layered*) podem ser comumente encontradas em conjunto com outros tipos de estrutura, dando origem a

estruturas hierárquicas híbridas. Já os demais grupos de estrutura, conforme exemplificado por Studart¹⁴, podem ser comumente encontrados em:

- *Brick-and-mortar*: conchas de moluscos e escamas de peixes;
- *Concentric hexagon*: ossos e plantas;
- *Cross-lamellar*: conchas de moluscos;
- *Rotating plywood*: exoesqueletos de crustáceos e insetos.

O desenvolvimento de materiais biomiméticos tem como desafio replicar essas estruturas em novos *designs* de produtos e equipamentos. Segundo Du-Plessis et al.⁴, a manufatura aditiva pode ser uma grande aliada na fabricação de objetos com conceitos inovadores, capaz de reproduzir estruturas complexas com baixo custo, ampliando assim o campo de pesquisa de sistemas biomiméticos e auxiliando a compreensão dos mecanismos hierárquicos. Em seus trabalhos, Gu et al.¹⁵ e Zhang et al.¹⁶ mostram que é possível projetar e reproduzir estruturas biomiméticas utilizando diferentes tecnologias de impressão tridimensional, tais como *fused deposition modeling* (FDM), *selective laser sintering* (SLS), entre outras, assim como variados materiais de forma simultânea. Para este estudo, o material escolhido para o projeto das estruturas foi o ácido polilático (PLA), e seu comportamento mecânico foi aproximado por um modelo bilinear. Esse modelo consiste em duas linhas que resumem a relação entre tensão e deformação do material, sendo a primeira a representação da região elástica, e a segunda, a região plástica¹⁷.

A análise por elementos finitos (*finite elements analysis* – FEA) tornou-se uma importante ferramenta no desenvolvimento e pesquisa de novas estruturas e materiais, possibilitando a simulação do comportamento mecânico dos objetos projetados. Diversos estudos no campo da biomimética empregam esses recursos, como o de Hu et al.¹⁸, que analisou testes de compressão uniaxial em amostras com estruturas inspiradas no abeto norueguês (um tipo de pinheiro), avaliando a distribuição de tensões para diferentes configurações da estrutura sanduíche e seu mecanismo de fratura. Nos estudos realizados por Gu et al.¹⁵, uma estrutura do *brick-and-mortar* foi modelada e impressa usando materiais com diferentes propriedades para as fases rígidas e macias, para posteriormente analisar seu comportamento em ensaios de impacto. A utilização da FEA em conjunto com a impressão tridimensional possibilita inúmeras iterações de projeto, a fim de aperfeiçoar cada vez mais as propriedades desejadas para a estrutura.

METODOLOGIA

Conforme citado previamente, as estruturas analisadas neste estudo são variações do tipo tijolos e argamassa, que tem como inspiração a estrutura da madrepérola, a fim de obter um conjunto com maior capacidade de absorção de energia, com baixo peso. As amostras foram modeladas de forma que seguissem o conceito de célula unitária, com dimensões externas de 66,1 × 42,1 mm, conforme demonstrado na Fig. 1. Para representar as placas de aragonita da madrepérola, foi definido um bloco padrão de 30,1 × 18,1 mm, com espaçamentos horizontais entre si de 2,95 mm. Como modo de imitar a camada orgânica presente na madrepérola, responsável pela alta tenacidade da estrutura, foi escolhido um preenchimento de geometria circular entre os blocos. Esses elementos circulares foram dispostos de tal maneira que ocorresse uma sobreposição de 0,1 mm entre os círculos e os blocos para garantir um bom contato e evitar falhas. Os círculos possuem diâmetro externo de 6,1 mm, com 0,8 mm de espessura de parede.

As estruturas analisadas foram modeladas idealizando sua posterior fabricação por meio de impressoras tridimensionais do tipo FDM. Esse tipo de fabricação possui restrições dimensionais que devem ser levadas em consideração, como espessura e altura mínima de camada. Em geral, os equipamentos disponíveis no mercado trabalham com bicos de 0,4 mm de espessura. Essa medida foi tomada como limitante para as dimensões mínimas das amostras, como tamanho do preenchimento interno e espessura de parede dos círculos, garantindo nestes a deposição de pelo menos duas camadas de filamento.

Diferentes amostras foram analisadas, variando entre elas a geometria dos blocos internos. A amostra 0 foi definida como apenas um bloco sólido (o qual foi referência em relação ao comportamento do material), seguida pela amostra constituída do bloco padrão mencionado previamente. Na amostra 2 foi realizado um corte côncavo nas laterais dos blocos, visando reproduzir o intertravamento da estrutura da madrepérola. Para a amostra 3 o corte côncavo permaneceu, porém com um retângulo alongado, na tentativa de manter a área do bloco padrão. A amostra 4 possui os blocos com laterais convexas, com as mesmas dimensões externas do bloco padrão. Por fim, na amostra 5, cortes côncavos foram feitos na base e no topo dos blocos, com o objetivo de aumentar a quantidade de elementos de ligação verticalmente. Essas amostras, bem como suas propriedades, são apresentadas na Tabela 1.

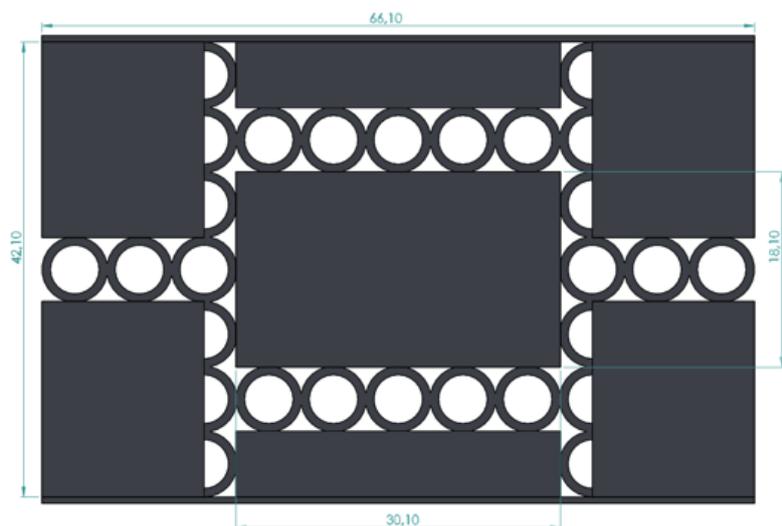


Figura 1: Estrutura de tijolos padrão (dimensões em milímetros).

Tabela 1: Dados das amostras.

N	Seção transversal	Massa (kg)	Volume (m ³)	Volume aparente (kg/m ³)	Área bloco (mm ²)
Amostra 0		$3,48 \cdot 10^{-3}$	$2,78 \cdot 10^{-6}$	1.250	2.782
Amostra 1		$2,86 \cdot 10^{-3}$	$2,29 \cdot 10^{-6}$	1.028	545
Amostra 2		$2,49 \cdot 10^{-3}$	$1,99 \cdot 10^{-6}$	895	414
Amostra 3		$2,81 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-6}$	1.008	523
Amostra 4		$2,64 \cdot 10^{-3}$	$2,11 \cdot 10^{-6}$	947	475
Amostra 5		$2,45 \cdot 10^{-3}$	$1,96 \cdot 10^{-6}$	882	375

O material escolhido para as amostras foi o PLA, amplamente utilizado na impressão tridimensional por FDM. Ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma American Society for Testing and Materials (ASTM) D638, utilizando amostras modeladas seguindo as dimensões do tipo IV da norma supracitada. Tais amostras foram fabricadas com uma impressora tridimensional FDM, modelo Creality Ender-3, na orientação horizontal. Pelo diagrama tensão-deformação obtido dos dados de um dos ensaios, foi possível aproximar o comportamento do material usando um modelo bilinear, que consiste em duas retas, em que a primeira representa a região elástica, e a segunda reta aproxima a região plástica. A porção elástica do modelo foi obtida com base no comportamento linear elástico do material, enquanto a parcela plástica foi obtida de um ajuste linear da região plástica do diagrama tensão-deformação. Nesse caso, a origem da parcela plástica foi determinada pelo limite de escoamento com $\eta = 0,002$. Dessa forma, o modelo bilinear empregado acabou abstraindo a região no diagrama tensão-deformação localizada entre o limite de proporcionalidade e o limite de escoamento, como é possível observar na Fig. 2. As propriedades obtidas da análise do material estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades do ácido polilático.

Módulo de Young (GPa)	Tensão de escoamento (Mpa)	Limite de resistência (MPa)	Módulo tangente (GPa)	Coefficiente de Poisson (mm/mm)	Massa Específica (kg/m ³)
2,64	43,5	51,3	0,84	0,39	1.250

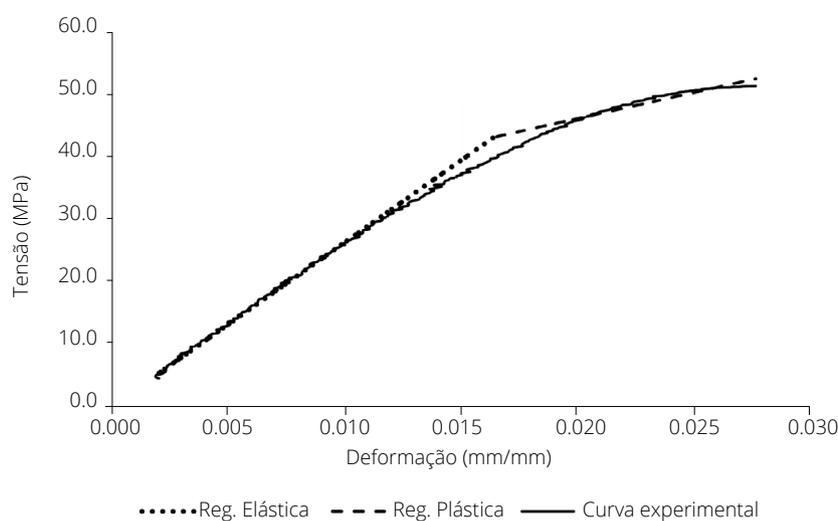


Figura 2: Relação tensão-deformação do ácido polilático.

As amostras passaram por simulações de um ensaio compressivo no Ansys 2019, um *software* de análise de elementos finitos, utilizando o módulo Static Structural. Foi habilitado o modo de “grandes deformações”, para que fosse possível levar em conta a região de deformação plástica do material. Essa opção de simulação demanda recursos de processamento computacional mais avançados. Portanto, uma versão bidimensional de cada amostra foi considerada para as simulações, reduzindo consideravelmente o tempo de convergência dos resultados.

Foi realizada uma análise de sensibilidade de malha na amostra 1 para a escolha do tamanho de elemento, e o tamanho de 0,20 mm resultou em um bom balanço entre variação percentual da energia absorvida pela amostra e o tempo de simulação, visto que a malha de 0,15 mm traria um resultado apenas 0,5% mais preciso, consumindo um tempo 209% maior em relação à malha de 0,20 mm, como visto nas Figs. 3 e 4.

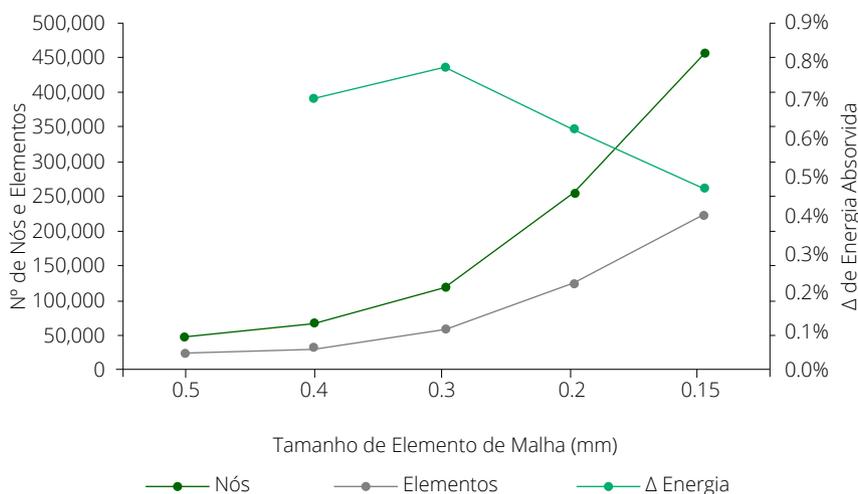


Figura 3: Relação entre número de nós e elementos de malha com a variação da energia de deformação.

Como condição de contorno, foram utilizados um suporte fixo na base das amostras e um deslocamento vertical para baixo, indo de 0 a 0,4 mm, aplicado nas barras superiores de cada modelo, conforme representado na Fig. 5. Tais condições visaram emular as condições de um ensaio de compressão quase-estático, realizado entre placas planas. Dessa forma, como o deslocamento aumenta continuamente até o valor limite de 0,4 mm, pôde-se obter a resposta de cada uma das estruturas à carga crescente, verificando também o momento em que cada estrutura iniciou o regime plástico.

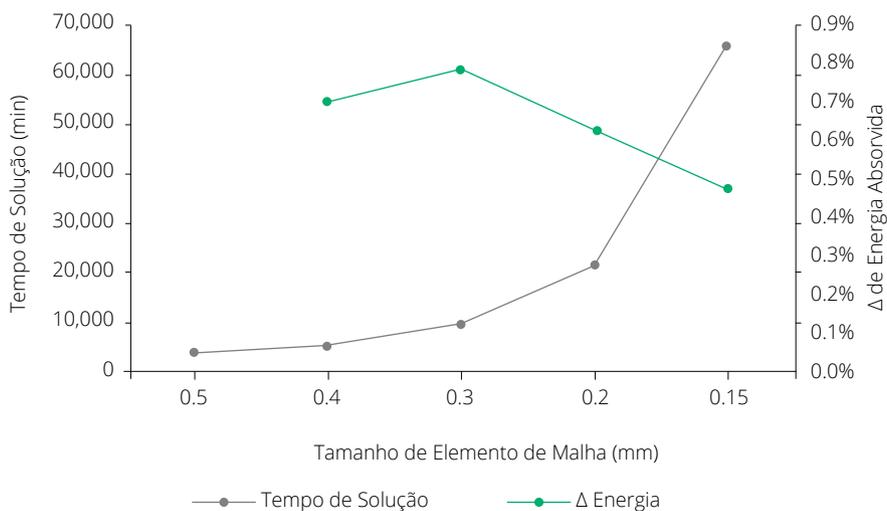


Figura 4: Relação do tempo total de simulação com a variação da energia de deformação.

RESULTADOS

A avaliação do desempenho das estruturas deste estudo foi realizada com base nos dados das simulações com o *software* de análise de elementos finitos. Adotando o modelo bilinear de comportamento mecânico do material, foi assumida a premissa de início de falha das amostras no limite de resistência de 51,3 MPa, sendo este o ponto de corte dos dados para todas as simulações. No gráfico de tensão × deslocamento apresentado na Fig. 6, é possível notar uma sutil alteração de inclinação das retas a partir da tensão de escoamento, indicando a transição para a região de deformação plástica das amostras.

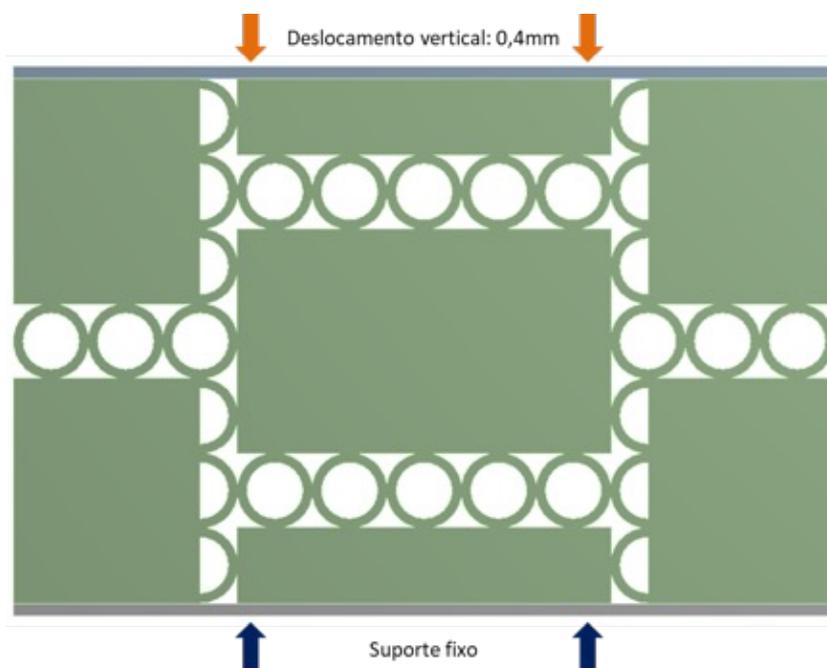


Figura 5: Condições de contorno das simulações.

Pelos dados de deslocamento e tensão, pôde-se observar que a amostra 0 (estrutura sólida) teve o maior deslocamento antes de atingir o limite de resistência, em 0,373 mm. As demais amostras tiveram deslocamentos significativamente menores, ficando a amostra 5 em segundo lugar, com 0,274 mm, representando redução de 27% em relação à estrutura sólida, enquanto as estruturas de 1 a 4 tiveram reduções entre 41 e 43%.

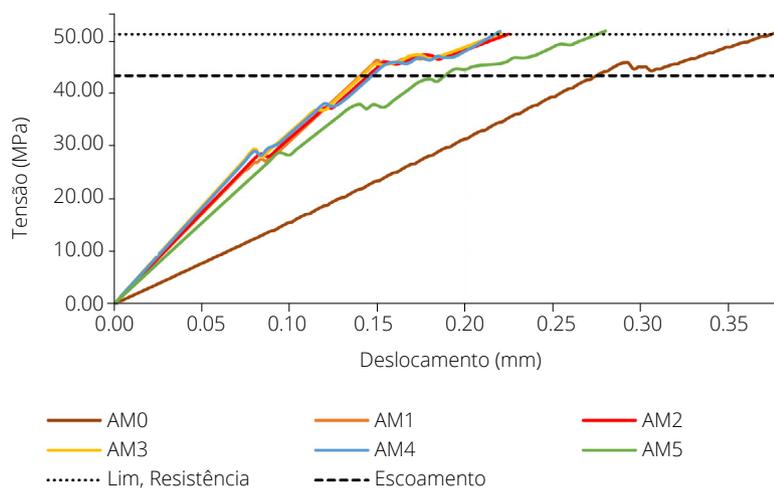


Figura 6: Relação tensão-deslocamento obtida numericamente. A linha pontilhada indica o limite de resistência, e a linha tracejada, o limite de escoamento obtidos para o material.

Visto que o estudo considera a deformação plástica do material após sua tensão de escoamento, foi analisada a proporção de deslocamento em que ocorre a deformação plástica. Dessa forma, a amostra 1 teve a maior proporção de deslocamento plástico (36%), e as demais variaram entre 27 e 35%. A Fig. 7 mostra a proporção do deslocamento em que ocorreram deformação elástica e deformação plástica em relação ao deslocamento total até o limite de resistência.

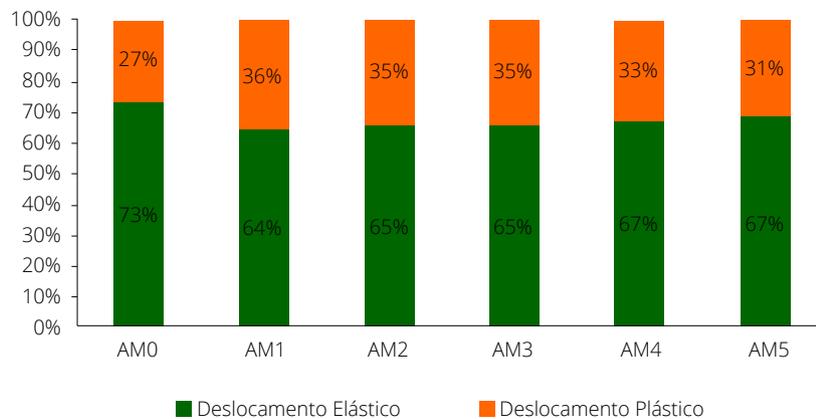


Figura 7: Deslocamento compressivo no limite de resistência.

A fim de comparar a força de reação máxima suportada entre as amostras, foram considerados os pontos de deslocamento na iminência do limite de resistência das estruturas. Indo ao encontro dos resultados de deslocamento, a amostra 0 registrou a maior força necessária para atingir o limite do material, 1.648,8 N, valor 666% maior que a amostra 1 com a segunda maior carga compressiva, de 215,36 N, conforme representado na Fig. 8. Essa significativa diferença era esperada, em virtude da maior rigidez da estrutura sólida em comparação com as demais estruturas, que, por causa dos elementos de ligação internos, possuem maior elasticidade.

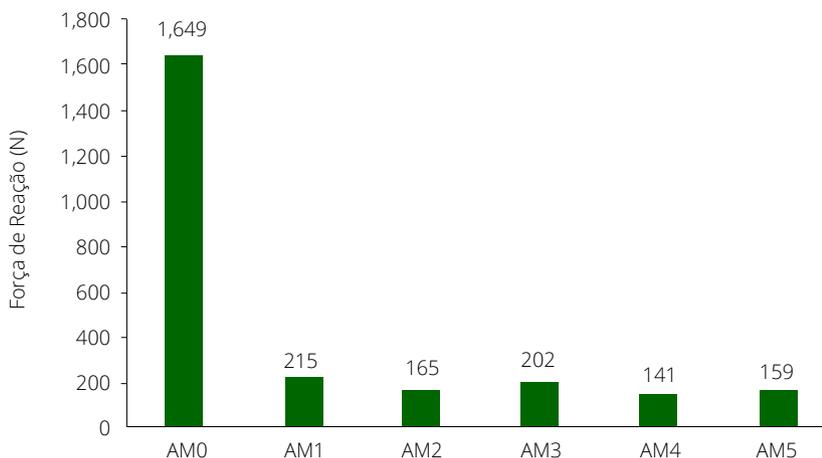


Figura 8: Carga compressiva aplicada quando a estrutura atinge a tensão de ruptura.

Com base nas relações entre a carga compressiva e o deslocamento das amostras até o limite de resistência do material, é possível estabelecer dois critérios importantes para a avaliação do desempenho mecânico das estruturas: a energia absorvida e a energia específica absorvida. Conforme apresentado por Hu et al.¹⁸, a energia absorvida representa a capacidade da estrutura de absorver energia durante a deformação, podendo ser estimada pela integral da curva na relação carga-deslocamento, de acordo com a Eq. 1:

$$EA(d) = \int_0^d F(x)dx \tag{1}$$

em que: EA(d): a energia absorvida; F(x): a carga máxima suportada; d: o deslocamento total da estrutura.

A energia específica absorvida avalia a capacidade de absorção de energia por unidade de massa da estrutura, sendo um importante fator para avaliação da eficiência entre as diferentes amostras, podendo ser determinada pela Eq. 2:

$$SEA(d) = \frac{EA(d)}{m} \quad (2)$$

em que: SEA(d): a energia específica absorvida; EA(d): a energia absorvida calculada na Eq. 1; m: a massa total da estrutura.

Utilizando as Eqs. 1 e 2, obtiveram-se resultados muito próximos dos calculados diretamente pelo *software* de simulação, com diferenças menores que 4%. Para as análises a seguir, portanto, optou-se pelos dados obtidos do *software*. Conforme representado na Fig. 9, a amostra 0 apresentou a maior capacidade de absorção de energia, 302,6 mJ, resultado esperado diante da maior resistência da estrutura. Entre as amostras que possuem elementos de ligação, a amostra 1 absorveu a maior quantidade de energia de deformação, 23,3 mJ, valor 92% menor em comparação com a estrutura sólida (AM0), enquanto a amostra 4 teve a menor capacidade de absorção, 14,5 mJ, 38% menor que a amostra 1.

A análise da energia específica absorvida traz uma visão qualitativa da *performance* das estruturas, permitindo selecionar configurações que absorvam a maior quantidade de energia com a menor massa necessária. A Fig. 10 traz essa relação para as amostras deste estudo, e pode-se constatar que a amostra 0 apresenta a maior absorção de energia por unidade de massa, 87 J/kg. Entre as demais amostras, pode-se destacar a amostra 5, com o segundo melhor desempenho. Essa ligeira vantagem da estrutura 5 ocorre, possivelmente, pela maior quantidade de elementos circulares de ligação entre os blocos internos. Portanto, um maior espaçamento horizontal entre os blocos poderia prevenir a concentração de tensão nos anéis que ligam o bloco central aos das extremidades.

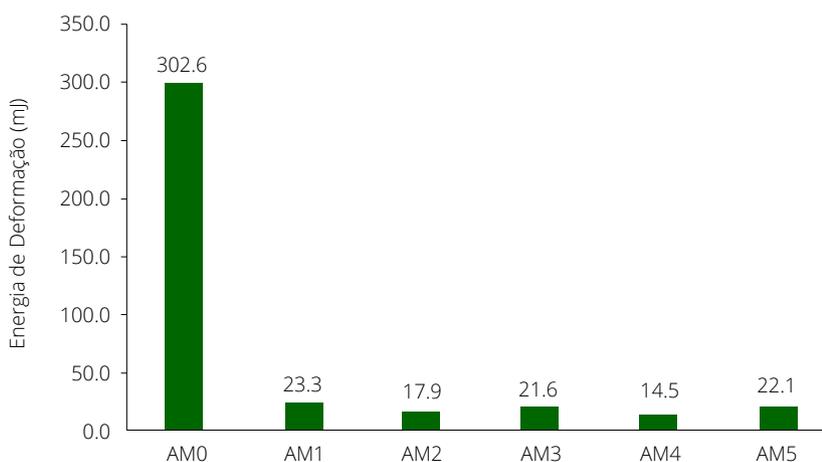


Figura 9: Energia total de deformação.

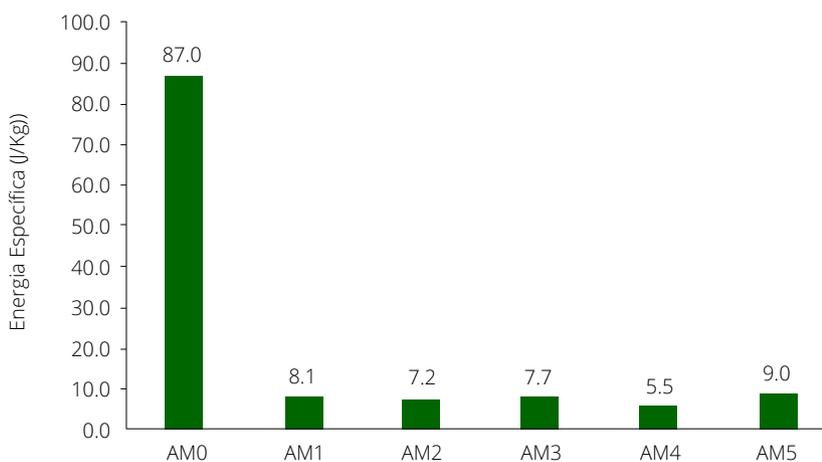


Figura 10: Energia específica.

De forma geral, as estruturas otimizadas (AM1 à AM5) tiveram energia absorvida específica 91% menor que a estrutura sólida. Esse comportamento possivelmente se deve às concentrações de tensão nos elementos de ligação entre os blocos, como observado na Fig. 11, que compara a localização das tensões máximas no limite de resistência do material. Observa-se, então, que os elementos circulares possuem regiões críticas para concentração de tensões que causam a falha precoce, quando comparados à estrutura sólida. Algumas formas de prevenir essa ocorrência, além do espaçamento horizontal dos blocos já citado, seriam aumentar a espessura de parede dos anéis e reduzir a área dos blocos, conferindo maior rigidez ao sistema com menor peso. Além disso, podem-se testar diferentes geometrias de ligação para a estrutura 5, a fim de obter uma configuração que absorva mais energia por unidade de massa.

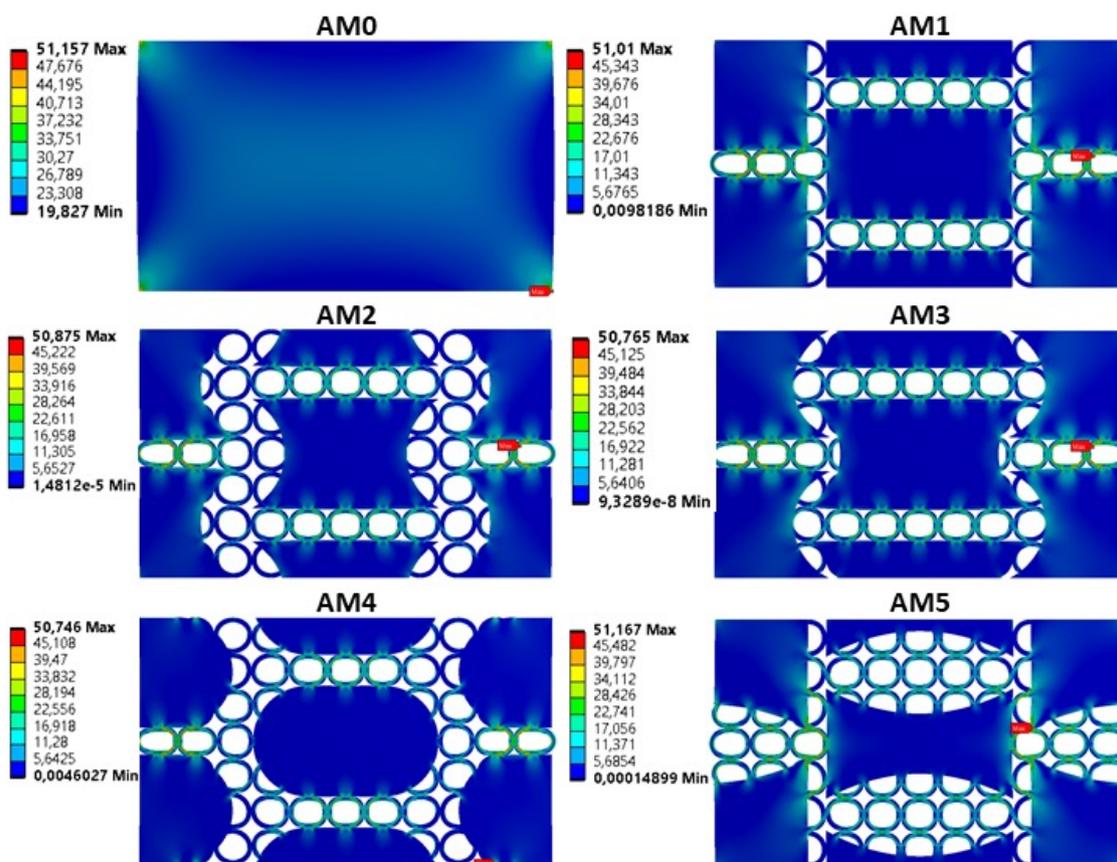


Figura 11: Distribuição de tensão no limite de resistência.

CONCLUSÃO

Este estudo utilizou o conceito de estruturas biomiméticas para o desenvolvimento de novas estruturas inspiradas na madrepérola, em que a diferenciação das amostras se deu pela variação geométrica dos blocos, mantendo o padrão circular de ligação entre os elementos.

Por meio de simulações numéricas utilizando FEA, verificou-se que a estrutura sólida (AM0) teve a maior energia absorvida, 302,6 mj, enquanto as estruturas com ligações internas tiveram energia absorvida máxima de 23,3 mj. A análise de energia específica absorvida, porém, foi o que determinou a *performance* em absorção de energia por massa de cada estrutura, evidenciando assim o superior desempenho da amostra 0, capaz de absorver 87 J/kg, valor 91% maior, em média, quando comparado com o das demais estruturas. Essa diferença deve-se possivelmente à alta concentração de tensão nos elementos de ligação, ocasionando falha precoce em relação à estrutura sólida. Apesar do desenvolvimento das estruturas a fim de otimizar a relação massa-energia, a concentração de tensões supracitadas teve maior relevância no comportamento das amostras, reduzindo a parcela de energia absorvida pelos blocos e, por consequência, a energia total absorvida pela estrutura.

Como possibilidade de estudos futuros, podem ser realizadas novas simulações adequando-se os elementos de ligação com maior espessura de parede e área de contato com os blocos, a fim de aumentar a rigidez geral das estruturas, além de executar ensaios práticos de compressão nas amostras fabricadas por impressão FDM para validação das condições de contorno utilizadas aqui.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceptualização: Opelt CV, de Souza LR; **Curadoria de Dados:** Opelt CV, de Souza LR; **Análise Formal:** de Souza LR; **Aquisição de Financiamento:** Opelt CV; **Metodologia:** Opelt CV, de Souza LR; **Administração do Projeto:** Opelt CV; **Supervisão:** Opelt CV; **Validação:** de Souza LR; **Escrita – rascunho original:** de Souza LR; **Escrita – análise e edição:** Opelt CV, de Souza LR.

DISPONIBILIDADE DE DADOS DE PESQUISA

Todos os dados foram gerados/analísados no presente artigo.

FINANCIAMENTO

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Santa Catarina

<https://doi.org/10.13039/501100005667>

Grant No: 2021TR001307

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos acadêmicos Rodrigo Keller e Fernando Figueiredo, do curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário – Católica de Santa Catarina, a realização dos ensaios de tração cujos dados foram utilizados neste trabalho. Além disso, os autores gostariam de agradecer ao Centro Universitário – Católica de Santa Catarina, em Joinville.

REFERÊNCIAS

1. Gordon JE. The new science of strong materials: or why you don't fall through the floor. United Kingdom: Penguin; 1991.
2. Bar-Cohen Y. Biomimetics: biologically inspired technology. JPL Technical Report Server. 2006.
3. Benyus JM. Biomimicry: innovation inspired by nature. New York: Morrow; 1997.
4. Du Plessis A, Broeckhoven C, Yadroitsava I, Yadroitsev I, Hands CH, Kunju R, et al. Beautiful and functional: a review of biomimetic design in additive manufacturing. *Addit Manuf.* 2019;27:408-27. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.033>
5. Bhushan B. Biomimetics: lessons from nature—an overview. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci.* 2009;367(1893):1445-86. <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0011>
6. Foo CT, Omar B, Taib I. Shape optimization of high-speed rail by biomimetic. In: *MATEC Web of Conferences.* EDP Sciences; 2017. p. 00019.
7. Vincent JFV, Bofatyrev OA, Bofatyrev NR, Bowyer A, Pahl A-K. Biomimetics: its practice and theory. *J R Soc Interface.* 2006;3(9):471-82. <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>

8. Velcro S.A. Improvements in or relating to a method and a device for producing a velvet type fabric. Swiss Patent, n. 721338; 1955.
9. Jia Z, Yu Y, Wang L. Learning from nature: Use material architecture to break the performance tradeoffs. *Mater Des.* 2019;168:107650. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107650>
10. Leslie-Pelecky Diandra. NASCAR: the science of racing safely [Internet]. 2020 [acessado em 30 mar. 2021]. Disponível em: <https://physicsworld.com/a/nascar-the-science-of-racing-safely/>
11. Porter MM, Mckittrick J. It's tough to be strong: Advances. *Am Ceram Soc Bull.* 2014;93(5):18-24.
12. Barthelat F, Rim JE, Espinosa HD. A review on the structure and mechanical properties of mollusk shells—perspectives on synthetic biomimetic materials. In: Bhushan B, Fuchs H (eds.). *Applied scanning probe methods XIII.* Berlin, Heidelberg: Springer; 2009. p. 17-44.
13. Meyers MA, Chen P-Y, Lin AY-M, Seki Y. Biological materials: structure and mechanical properties. *Prog Mater Sci.* 2008;53(1):1-206. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2007.05.002>
14. Studart AR. Additive manufacturing of biologically inspired materials. *Chem Soc Rev.* 2016;45(2):359-76. <https://doi.org/10.1039/C5CS00836K>
15. Gu GX, Takaffoli M, Hsieh AJ, Buehler MJ. Biomimetic additive manufactured polymer composites for improved impact resistance. *Extreme Mech Lett.* 2016;9(2):317-23. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2016.09.006>
16. Zhang W, Yin S, Yu TX, Xu J. Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb. *Int J Impact Eng.* 2019;125:163-72. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.11.014>
17. Torkaman H. Modeling and analysis of the shot peening process (masters thesis). Kalmar: Mechanical Engineering, Linnaeus University; 2018.
18. Hu K, Lin K, Gu D, Yang J, Wang H, Yuan L. Mechanical properties and deformation behavior under compressive loading of selective laser melting processed bio-inspired sandwich structures. *Materials Science and Engineering: A.* 2019;762:138089. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138089>