

# Análise Numérica Aplicada à Compressão Elasto-Plástica de Estruturas Biomiméticas do Tipo Brick-and-Mortar

Lucas Rodrigo de Souza<sup>1</sup>, Carlos Vinícios Opelt<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitário - Católica de Santa Catarina (CatólicaSC) – Joinville/SC - Brasil

**Resumo** – Materiais criados pela natureza possuem propriedades únicas, 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 efeito similar de dissipação de energia. Para essa avaliação, utilizou-se de um software MEF (Método de Elementos Finitos) para a simulação de ensaios de compressão em amostras com diferentes geometrias de blocos internos, e analisada 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. Esta diferença parece ser resultado de concentração de tensões excessivas nos elementos de ligação provocaram falhas prematuras em regiões críticas das estruturas.

**Palavras-Chave** – Biomimética, Madrepérola, Método de Elementos Finitos.

## I. INTRODUÇÃO

A natureza passa por ininterruptas mudanças a mais de 3,8 bilhões de anos, período estimado do surgimento da vida na Terra [1]. A evolução dos organismos vivos é resultado de milhares de iterações com seu habitat, 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 simples [2]. A biomimética, segundo Benyus [3], 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 engenharia [4].

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 eficiência [5]. 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 túneis [6]. Texturas de superfícies que facilitam sua limpeza podem imitar a estrutura das folhas de lótus, que possuem propriedades autolimpantes, efeito também já identificado nas asas de insetos [7]. A invenção do Velcro, tecido amplamente utilizado pela indústria têxtil, ocorreu após George de Mestral voltar de uma caça e observar sementes de bardana presas em seu cachorro. Estas sementes são cobertas de minúsculos ganchos que engatam em argolas microscópicas presentes em pelos e outros tecidos [8].

Uma das estruturas biomiméticas que merece destaque é a do tipo brick-and-mortar (tijolo e argamassa), composta normalmente por 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 elasticidade [9].

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 impacto [10]. 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 tenacidade [11]. 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 principalmente por quitina e proteínas).

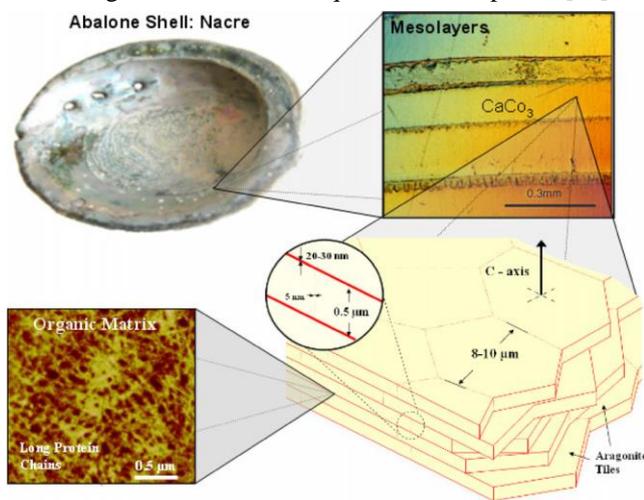
Este estudo tem como objetivo investigar o comportamento mecânico em compressão de estruturas biomiméticas que são variações do tipo tijolos-argamassa, inspiradas na estrutura da madrepérola, a fim de obter um conjunto com maior capacidade de absorção de energia com baixo peso. As amostras foram modeladas de forma que sigam o conceito de célula unitária, com dimensões externas de 66,1mm X 42,1mm. As estruturas exploradas serão modeladas em software CAD e posteriormente avaliadas pelo método de elementos finitos (MEF), 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 serão desenhadas de forma que possam ser facilmente empregadas em peças para impressão 3D, e até mesmo como proposta de novos padrões de preenchimento de peças.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A madrepérola possui uma estrutura similar à “tijolos-argamassa” que, segundo Meyers et al. [13], deve suas incríveis propriedades mecânicas à uma estrutura hierárquica. Em uma escala nanométrica, esta 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  $\mu\text{m}$  de espessura e microestrutura cristalina de 8 a 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro, como representado na Fig. 1. Segundo Barthelat et al. [12], os plateletes 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 plateletes. 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, atua como uma cola viscoelástica, enquanto as pontes minerais e ondulações do material auxiliam na resistência ao cisalhamento entre as camadas, redistribuindo as tensões na estrutura [11].

Fig. 1. Estrutura hierárquica da madrepérola [13].

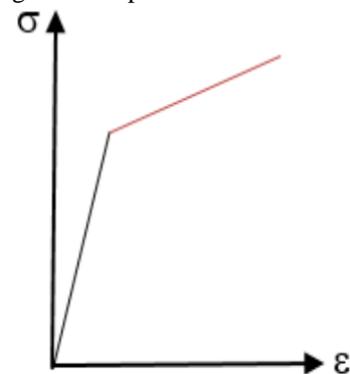


Estruturas hierárquicas como essa são definidas por Jia, Yu e Wang [9] como possuindo fases macias e fases rígidas em diferentes escalas, e dividem-se em 5 amplos grupos (layered, brick-and-mortar, concentric hexagon, cross-lamellar, rotating plywood) que são encontrados em diversos materiais na natureza. Como exemplo, as estruturas em camadas (layered) são encontradas em esponjas do mar e anéis internos do caule de árvores, enquanto as estruturas do tipo cross-lamellar encontram-se nas conchas de alguns moluscos. A partir deste conjunto de estruturas hierárquicas é possível desenvolver materiais arquitetados, nos quais a formação da microestrutura é controlada de modo a obter propriedades de interesse para aplicações específicas. Como exemplo pode-se citar o trabalho de Portela et al. [14], o qual apresenta o desenvolvimento de nanoestruturas de carbono para absorção de impactos de elevada energia. Tais materiais são promissores para aplicação em proteção contra impactos balísticos, principalmente no caso de estruturas leves.

O desenvolvimento de materiais biomiméticos tem como desafio replicar estas 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 através de diferentes tecnologias de impressão 3D, como deposição de material (FDM), sinterização a laser (SLS), entre outras, assim como a utilização de diferentes materiais de forma simultânea. Para este estudo, o material escolhido para o projeto das estruturas foi o PLA (ácido polilático), e seu comportamento mecânico aproximado por um modelo bilinear. Este modelo consiste em duas linhas que resumem a relação de tensão vs deformação do material, como apresentado na Fig. 2, sendo a primeira a representação da região elástica, e a segunda a região plástica [17].

Fig. 2. Exemplo de modelo bilinear [17]



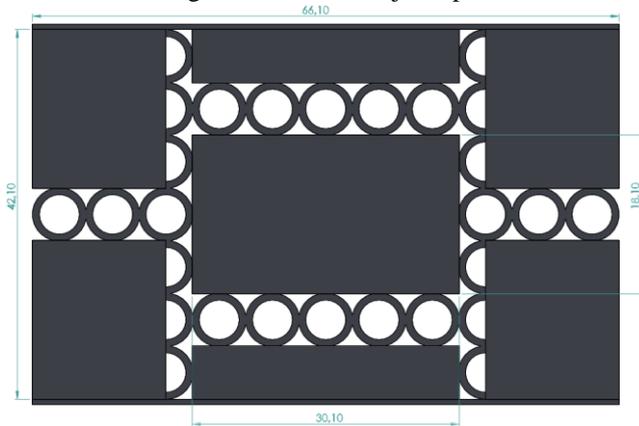
A análise por elementos finitos (FEA – finite elements analysis) se tornou uma importante ferramenta no desenvolvimento e pesquisa de novas estruturas e materiais, possibilitando a simulação do comportamento mecânico dos objetos projetados. Diversos estudos no campo da biomimética utilizam estes recursos, como 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 sanduiche e seu mecanismo de fratura. Nos estudos realizados por Gu et al. [15], uma estrutura do tipo brick-and-mortar foi modelada e impressa utilizando 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 3D possibilita inúmeras iterações de projeto, a fim de aperfeiçoar cada vez mais as propriedades desejadas para a estrutura.

### III. METODOLOGIA

Conforme citado previamente, as amostras seguem o conceito de célula unitária, conforme demonstrado na Fig. 3. Para representar as placas de aragonita da madrepérola, foi definido um bloco padrão de 30,1mm x 18,1mm, com espaçamentos horizontais entre si de 2,95mm. Como forma de imitar a camada orgânica presente na madrepérola,

responsável pela alta tenacidade da estrutura, foi escolhido um preenchimento de geometria circular entre os blocos. Estes elementos circulares foram dispostos de tal maneira que ocorra uma sobreposição de 0,1mm entre os círculos e os blocos para garantir um bom contato e evitar falhas. Os círculos possuem diâmetro externo de 6,1mm, com 0,8mm de espessura de parede.

Fig. 3. Estrutura de tijolos padrão.



As estruturas analisadas foram modeladas idealizando sua posterior fabricação através de impressoras 3D do tipo FDM (fused deposition modeling). 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 0,4mm de espessura, esta 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 primeira amostra foi definida como apenas um bloco sólido (o qual será referência em relação ao comportamento do material), seguida pela amostra constituída pelo bloco padrão mencionado previamente. Na terceira amostra foi realizado um corte côncavo nas laterais dos blocos, visando reproduzir o intertravamento da estrutura da madrepérola. Para a quarta amostra o corte côncavo permanece, porém com um retângulo alongado, na tentativa de manter a área do bloco padrão. A amostra número 5 possui os blocos com laterais convexas, com as mesmas dimensões externas do bloco padrão. Por fim, na sexta amostra, cortes côncavos foram feitos na base e topo dos blocos, com o objetivo de aumentar a quantidade de elementos de ligação verticalmente. Estas amostras, bem como suas propriedades, são apresentadas na Tabela 01.

O material escolhido para as amostras foi o PLA, amplamente utilizado na impressão 3D por FDM. Ensaios de tração foram realizados por acadêmicos do curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Católica de Santa Catarina – Joinville, de acordo com a norma ASTM

D638, utilizando amostras modeladas seguindo as dimensões do tipo IV da norma supracitada. Tais amostras foram fabricadas com uma impressora 3D FDM, modelo Creality Ender 3, na orientação horizontal. A partir do diagrama tensão-deformação obtido dos dados de um dos ensaios, foi possível aproximar o comportamento do material utilizando 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 a partir de um ajuste linear da região plástica do diagrama tensão-deformação. Neste caso, a origem da parcela plástica foi determinada a partir do limite de escoamento com  $\eta = 0,002$ . Desta forma, o modelo bilinear utilizado acaba abstraído a região no diagrama tensão-deformação localizada entre o limite de proporcionalidade e o limite de escoamento, como é possível observar na Fig. 4. As propriedades obtidas da análise do material estão listadas na Tabela 02.

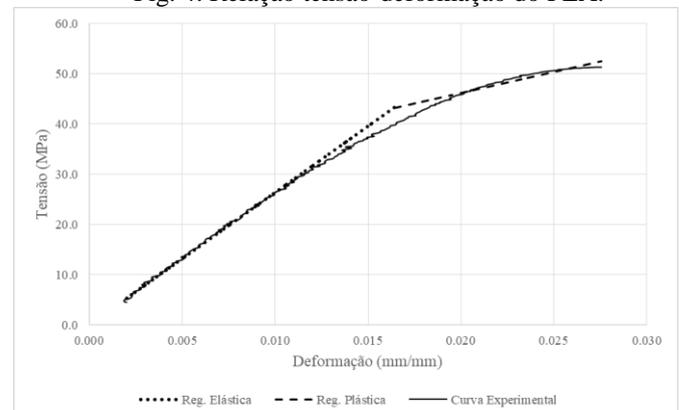
Tabela 01 – Dados das amostras.

Nº	Seção Transversal	Massa (Kg)	Volume (m³)	Densidade Aparente (kg/m³)	Área Bloco (mm²)
Amostra 0		3,479E-03	2,783E-06	1.250,0	2782,81
Amostra 1		2,861E-03	2,289E-06	1.028,1	544,81
Amostra 2		2,490E-03	1,992E-06	894,9	413,717
Amostra 3		2,805E-03	2,244E-06	1.008,0	523,312
Amostra 4		2,635E-03	2,108E-06	947,0	474,504
Amostra 5		2,453E-03	1,963E-06	881,6	374,638

Tabela 02 – Propriedades do PLA.

Módulo de Young (GPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Módulo Tangente (GPa)
2,64	43,5	51,3	0,84

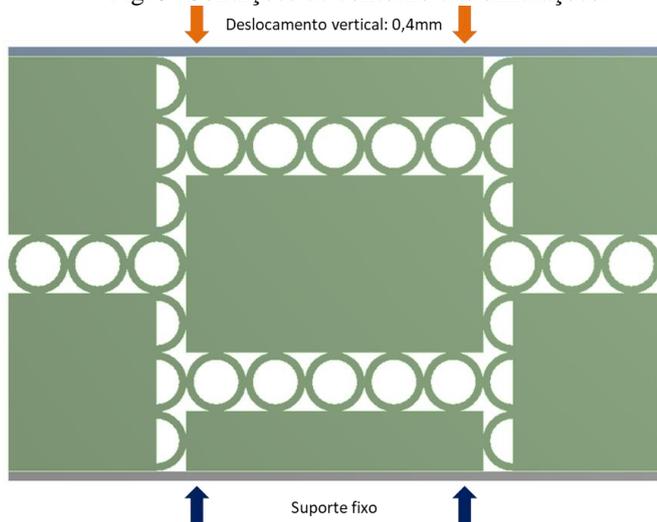
Fig. 4. Relação tensão-deformação do PLA.



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 habilitando o modo de “grandes deformações” para que fosse possível considerar a região de deformação plástica do material. Esta opção de simulação demanda recursos de processamento computacional mais avançados, portanto uma versão 2D 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, em que 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 0,15mm traria um resultado apenas 0,5% mais preciso, consumindo um tempo 209% maior em relação à malha de 0,20mm. Como condição de contorno foi utilizado um suporte fixo na base das amostras, e um deslocamento vertical para baixo, indo de 0mm a 0,4mm, aplicado nas barras superiores de cada modelo, conforme representado na Fig. 5.

Fig. 5. Condições de contorno das simulações.



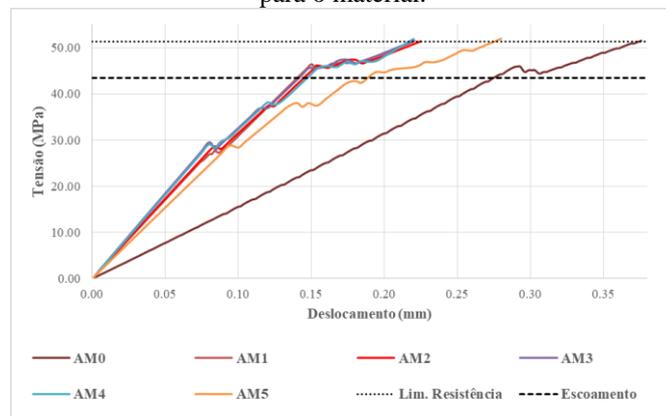
#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação do desempenho das estruturas deste estudo foi realizada a partir dos 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 x 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.

A partir dos dados de deslocamento e tensão, pode-se observar que a Amostra 0 (estrutura sólida) teve o maior deslocamento antes de atingir o limite de resistência, em

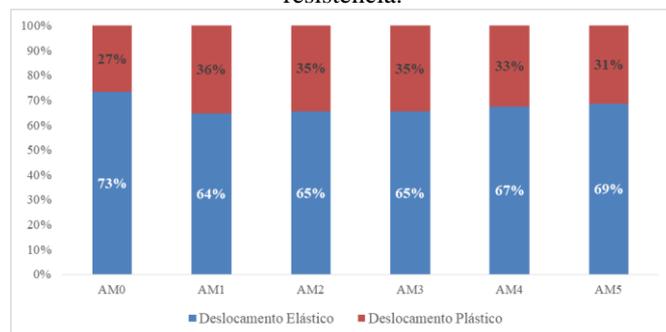
0,373mm. As demais amostras tiveram deslocamentos significativamente menores, sendo a Amostra 5 em segundo lugar com 0,274mm, representando uma redução de 27% em relação à estrutura sólida, enquanto as estruturas de 1 a 4 tiveram reduções entre 41% e 43%.

Fig. 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.



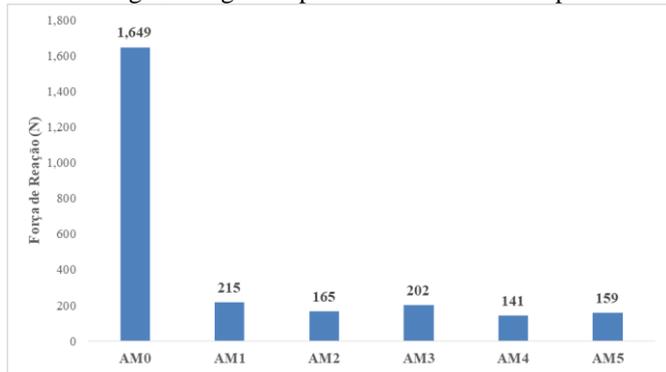
Visto que o estudo considera a deformação plástica do material após sua tensão de escoamento, foi analisada a proporção de deslocamento em que ocorre a deformação plástica, dessa forma, a Amostra 1 teve a maior proporção de deslocamento plástico (36%), e as demais variaram entre 35% e 27%. A Fig. 7 mostra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

Fig. 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, 1.648,8N, valor 666% maior que a Amostra 1 com a segunda maior carga compressiva, de 215,36N, conforme representado na Fig. 8. Esta significativa diferença era esperada, em virtude da maior rigidez da estrutura sólida em comparação com as demais estruturas, que, devido aos elementos de ligação internos, possuem maior elasticidade.

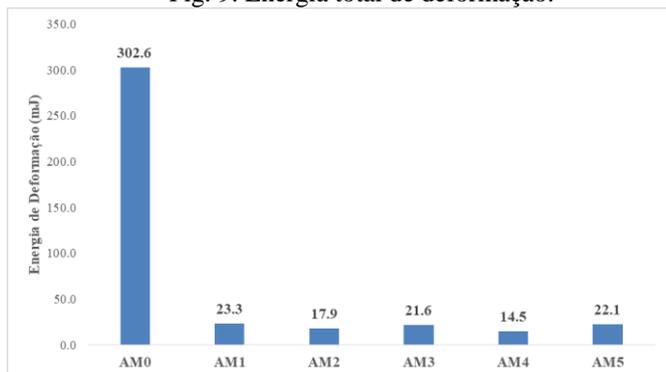
Fig. 8. Carga compressiva na tensão de ruptura.



A partir das relações entre a carga compressiva e deslocamento das amostras até o limite de resistência do material, é possível estabelecer dois critérios importantes para a avaliação do desempenho mecânico das estruturas, sendo estes a energia absorvida (EA) e a energia específica absorvida (SEA). Conforme apresentado por Hu et al. [18], a energia absorvida representa a capacidade da estrutura em absorver energia durante a deformação, podendo ser estimada através da integral da curva na relação carga-deslocamento. Já 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.

Conforme representado na Fig. 9, a Amostra 0 apresentou a maior capacidade de absorção de energia, com 302,6mJ, 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, 23,3mJ, valor 92% menor em comparação com a estrutura sólida (AM0), enquanto a Amostra 4 teve a menor capacidade de absorção, 14,5mJ, 38% menor que a Amostra 1.

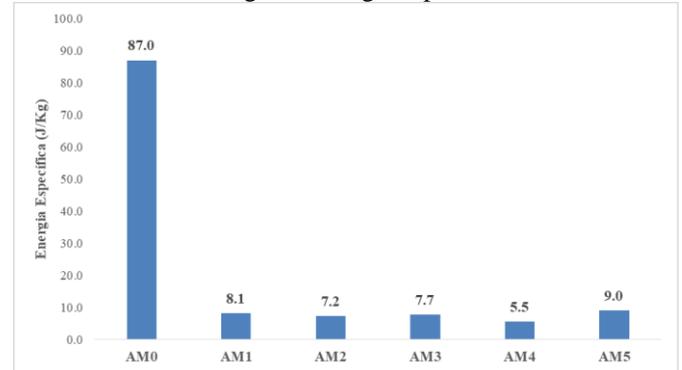
Fig. 9. Energia total de deformação.



A análise da energia específica absorvida traz uma visão qualitativa do desempenho 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

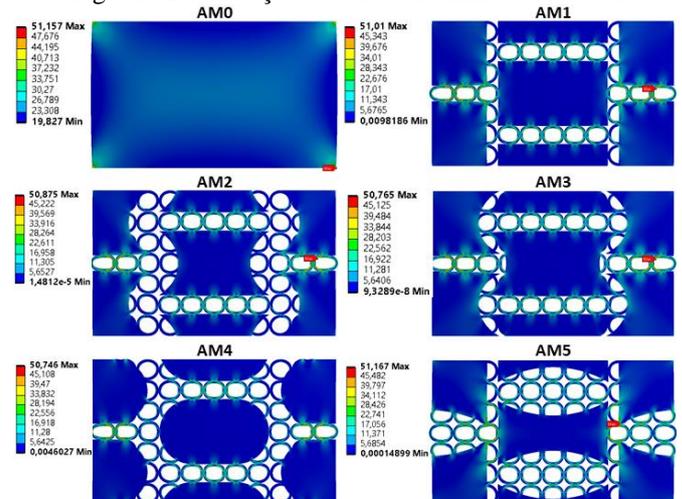
destacar a Amostra 5, com o segundo melhor desempenho. Essa ligeira vantagem da estrutura 5 ocorre, possivelmente, devido a maior quantidade de elementos circulares de ligação entre os blocos internos, portanto um maior espaçamento horizontal entre os blocos poderia prevenir a concentração de tensão nos anéis que ligam o bloco central aos das extremidades.

Fig. 10. Energia específica.



De forma geral, as estruturas otimizadas (AM1 à AM5) tiveram uma 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, portanto, que os elementos circulares possuem regiões críticas para concentração de tensões que causam a falha precoce, quando comparado 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 menos peso. Além disso, pode-se testar diferentes geometrias de ligação para a estrutura 5, a fim de obter uma configuração que absorva mais energia por unidade de massa.

Fig. 11. Distribuição de tensão no limite de resistência.



## V. CONCLUSÕES

A partir de simulações numéricas utilizando FEA, verificou-se que a estrutura sólida (AM0) teve a maior energia absorvida, 302,6mJ, enquanto as estruturas com ligações internas tiveram uma energia absorvida máxima de 23,3mJ. A análise de energia específica absorvida, porém, foi o que determinou o desempenho 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 as demais estruturas. Essa diferença se deve possivelmente à alta concentração de tensões 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 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 no estudo.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam a FAPESC e ao Centro Universitário – Católica de Santa Catarina, pelo inestimável apoio na realização deste estudo. Os autores gostariam ainda de agradecer aos acadêmicos Rodrigo Keller e Fernando Figueiredo, do curso de Eng. Mecânica, os quais foram responsáveis pelos ensaios de tração utilizados neste estudo.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. E. Gordon, *The new science of strong materials: or why you don't fall through the floor*. Penguin UK, 1991.
- [2] Y. Bar-Cohen, Yoseph. *Biomimetics: biologically inspired technology*. JPL Technical Report Server, p. 1-10, 2006.
- [3] J. M. Benyus, *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. New York: Morrow, 1997.
- [4] A; du Plessis et al., *Beautiful and functional: a review of biomimetic design in additive manufacturing*. *Additive Manufacturing*, v. 27, p. 408-427, 2019.
- [5] B. Bhushan, *Biomimetics: lessons from nature—an overview*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 367, n. 1893, p. 1445-1486, 2009.
- [6] C. T. Foo, B. Omar, I. Taib, *Shape optimization of high-speed rail by biomimetic*. In: *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2017. p. 00019.
- [7] J. F. V. Vincent et al., *Biomimetics: its practice and theory*. *Journal of the Royal Society Interface*, v. 3, n. 9, p. 471-482, 2006.
- [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] Z. JIA, Y. YU, L. WANG, *Learning from nature: Use material architecture to break the performance tradeoffs*. *Materials & Design*, v. 168, p. 107650, 2019.

- [10] D. Leslie-Pelecky, *NASCAR: the science of racing safely*. 2020. Disponível em: <https://physicsworld.com/a/nascar-the-science-of-racing-safely/>. Acesso em: 30 mar. 2021.
- [11] M. M. Porter, J. McKittrick, *It's tough to be strong: Advances*. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, v. 93, p. 18-24, 2014.
- [12] F. Barthelat, J. E. Rim, H. D. Espinosa, *A review on the structure and mechanical properties of mollusk shells—perspectives on synthetic biomimetic materials*. In: *Applied scanning probe methods XIII*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. p. 17-44.
- [13] M. A. Meyers et al., *Biological materials: structure and mechanical properties*. *Progress in Materials Science*, v. 53, n. 1, p. 1-206, 2008.
- [14] C. M. Portela et al., *Supersonic impact resilience of nanoarchitected carbon*. *Nature Materials*, 2021.
- [15] G. X. Gu et al., *Biomimetic additive manufactured polymer composites for improved impact resistance*. *Extreme Mechanics Letters*, v. 9, p. 317-323, 2016.
- [16] W. Zhang et al., *Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb*. *International Journal of Impact Engineering*, v. 125, p. 163-172, 2019.
- [17] H. Torkaman et al., *Modeling and analysis of the shot peening process*. 2018. Tese de Doutorado. Masters Thesis, Mechanical Engineering, Linnaeus University, Kalmar, Sweden, 30 August 2018.
- [18] K. Hu et al., *Mechanical properties and deformation behavior under compressive loading of selective laser melting processed bio-inspired sandwich structures*. *Materials Science and Engineering: A*, v. 762, p. 138089, 2019.