

# INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE POISSON NO COLAPSO DE SÓLIDOS CELULARES NÃO-ESTOCÁSTICOS

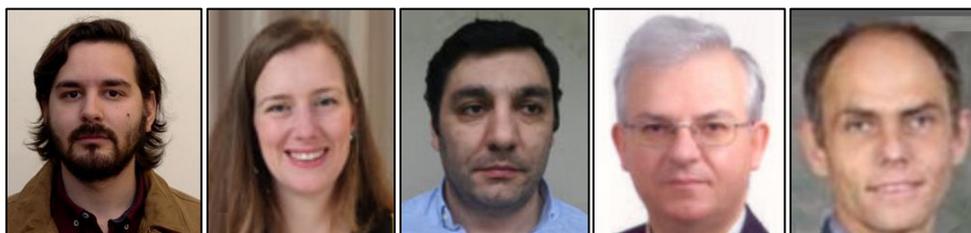
## INFLUENCE OF THE POISSON'S RATIO IN THE COLLAPSE OF NON-STOCHASTIC CELLULAR SOLIDS

V. H. Carneiro<sup>1</sup>, S. D. Rawson<sup>2</sup>, H. Puga<sup>3</sup>, J. Meireles<sup>1</sup>, P. J. Withers<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MEtRiCS-University of Minho;

<sup>2</sup>The Henry Royce Institute, Department of Materials, The University of Manchester;

<sup>3</sup>CMEMS-UMinho, University of Minho;



### ABSTRACT

*Cellular solids are materials with a high strength-density ratio. Current hybrid additive manufacturing investment casting techniques allow the manufacturing of non-stochastic geometries with tailored properties, e.g. negative Poisson's ratio. This study explores the collapse mechanism of cellular solids with negative, zero and positive Poisson's ratios. Compression testing and microcomputed tomography are used to compare the apparent stress-strain and in-situ deformations of these architectures. Cellular solids with a negative Poisson's ratio (i.e. auxetics) collapse with local deformation and dynamic densification, allowing the elevation of the Apparent Modulus and Collapse Strength relatively to samples with a positive Poisson's ratio.*

Keywords: Cellular solids; Collapse; Non-stochastic; Poisson's ratio; 4D  $\mu$ CT.

### RESUMO

*Sólidos celulares são materiais com elevado rácio entre resistência e densidade. O avanço em técnicas híbridas de fundição por modelo perdido assistida por manufatura aditiva permite fabricar configurações não-estocásticas com propriedades customizáveis, e.g. Coeficiente de Poisson negativo. Este estudo explora o mecanismo de colapso em sólidos celulares com Coeficiente de Poisson negativo, zero e positivo. Ensaios de compressão e microtomografia computadorizada são usados para comparar as curvas tensão-deformação aparente e determinar deformações in-situ. Sólidos celulares com Coeficientes de Poisson negativo (i.e. comportamento auxético) colapsam de forma localizada com uma densificação dinâmica, permitindo um aumento da resistência estrutural, refletido na elevação do Módulo e Tensão de Colapso Aparentes relativamente a configurações com Coeficiente de Poisson positivo.*

Palavras-chave: Sólido celular; Colapso; Não-estocástico; Coeficiente de Poisson; 4D  $\mu$ CT.

## 1. INTRODUÇÃO

Sólidos celulares são uma classe de materiais que tem despertado interesse na comunidade científica. Dada a sua

configuração de vigas/colunas interligadas, estas estruturas revelam alta resistência mecânica específica e uma baixa densidade (Ashby, 2000), sendo desejáveis numa vasta

gama de aplicações na indústria de transportes (*e.g.* ferrovia (Su, 2019) e aeronáutica/aeroespacial (Sairajan, 2016)), médica (*e.g.* *stents* e *scaffolds* (Hong, 2019)), entre outras. Ainda que o material base destes sólidos celulares possa ser composto por materiais de diferentes naturezas, quando estes são projetados para suporte de cargas são, geralmente, usados materiais metálicos.

Os sólidos celulares metálicos têm usualmente uma configuração estocástica, sendo fabricados pela introdução de agentes de insuflação em ligas no estado líquido ou semi-sólido e metalurgia dos pós (Banhart, 2013). São reportados avanços recentes no fabrico de sólidos celulares não-estocásticos por manufatura aditiva e técnicas híbridas de fundição por modelo perdido assistida por manufatura aditiva (Xue, 2018; Carneiro, 2020a). O controlo geométrico em tais técnicas permite uma customização ao nível das propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas.

Desde os anos 80 que é verificado um esforço para deduzir modelos analíticos que descrevem o comportamento elástico e elastoplástico destes sólidos celulares. Gibson (1982) deduziu um modelo teórico baseado na deformação de favos de mel dominados por flexão. Este modelo proveu ser eficaz em baixas densidades específicas (porosidade > 97%).

Nos anos 90, Masters (1996) apresenta uma evolução da teoria anterior, considerando não só os efeitos de flexão, mas também as componentes axiais e o efeito das rótulas que unem as diferentes vigas/colunas. Isto permitiu obter uma melhor correlação com resultados experimentais em sólidos celulares com maior densidade específica. Recentemente (Carneiro, 2020b) foi apresentada uma formulação que corrige o efeito da rigidez da rótula para sólidos celulares não-estocásticos auxéticos.

Desde a sintetização dos primeiros sólidos celulares auxéticos (Lakes, 1987), que estes materiais têm demonstrado propriedades específicas superiores aos materiais regulares (Dagdelen, 2017). Os desenvolvi-

mentos contemporâneos deste tipo de sólidos celulares compreendem o seu design para aumento da dureza específica (Hu, 2019), resistência ao impacto (Madke, 2020) e amortecimento de vibração (Ma, 2018). Contudo, dado o seu comportamento contraintuitivo (expansão/contração em tração/compressão), ainda não existe uma análise do impacto deste comportamento no seu colapso.

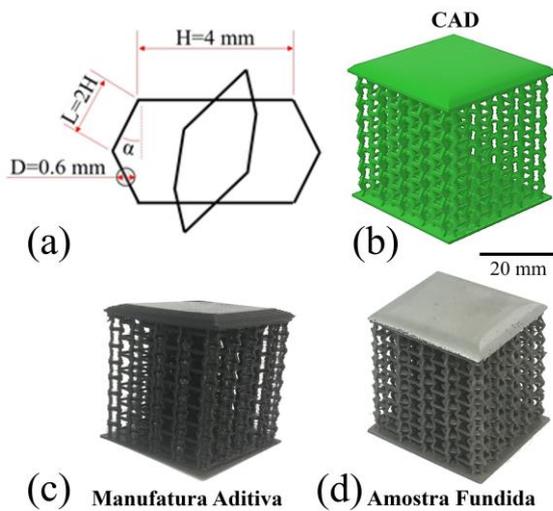
Considerando a importância que a rigidez (*i.e.* Módulo Aparente) e a resistência mecânica (*i.e.* Tensão de Colapso Aparente) têm na performance deste tipo de materiais, este estudo explora o impacto do Coeficiente de *Poisson* macroscópico de sólidos celulares nessas propriedades. Assim, foram projetadas diferentes arquiteturas de sólidos celulares não-estocásticos para gerar valores de Coeficiente de *Poisson* negativos (*i.e.* auxéticos), zero e positivos. Amostras com as arquiteturas projetadas foram submetidas a ensaios de compressão para detalhar a sua forma de colapso e correlacionar estes efeitos nas suas propriedades mecânicas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Produção de sólidos celulares

Foram projetadas sólidos celulares baseados em células unitárias não-estocásticas com a forma de favo-de-mel tridimensional (Figura 1 (a)). Estas geometrias são compostas por quatro vigas ( $h=4\text{mm}$ ), oito colunas ( $l=2\text{ mm}$ ) e diferentes ângulos internos ( $\alpha=\{-30^\circ, 0^\circ, 30^\circ\}$ ), com uma secção circular ( $d=0.6\text{ mm}$ ). Estas células periódicas individuais foram ensambladas pelas suas arestas comuns numa configuração matricial de  $9\times 9\times 8$ , sendo acrescentadas placas nos seus topos, conforme o modelo *CAD* da Figura 1 (b).

O modelo *CAD* foi impresso em ácido poliláctico (*PLA*) segundo a técnica de fusão de filamento fundido (*FFF*) usando uma impressora *BCN3D Sigma* com um bico extrusor de 0.4 mm. Estabeleceu-se uma temperatura de extrusão de  $210^\circ\text{C}$ , velocidade de impressão de 10 mm/s e uma espessura de camada de 0.4 mm. O modelo impresso foi usado como sacrifício para o fa-

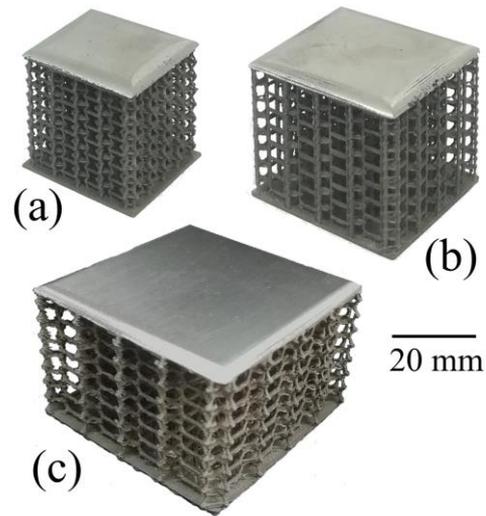


**Fig 1** - Descrição das etapas de fabricação dos sólidos celulares: (a) projeto de célula unitária; (b) modelo CAD; (c) modelo impresso; e (d) modelo fundido.

brico de um molde em gesso, seguindo um ciclo de cura que elimina o *PLA* e endurece o molde (300°C–3h, 300°C até 730 ° C–5h, 730 ° C–6h e 730°C até 250°C-12h). O molde foi pré-aquecido (250°C) e colocado num forno de indução *Indutherm MC15+* em atmosfera de vácuo (-1 bar), onde a carga (24g *A356*, 0.05g *Al5Ti1B* e 0.07g *Al10Sr*) foi fundida num cadinho de SiC. Após a sua fusão, o banho foi mantido à temperatura de 700±2°C por 3 min para homogeneização por indução magnética. O metal foi vazado no molde, sendo este mergulhado em água após solidificação e arrefecimento (10 min) para remover o gesso. As peças fundidas foram sujeitas a um tratamento térmico T6 (solubilização - 540°C, 8h e envelhecimento artificial - 160°C, 8.5h). O aspeto final de amostras, nas diferentes arquiteturas, pode ser observada na Figura 2.

## 2.2. Análise microestrutural

Foi realizada análise microestrutural a amostras polidas (abrasivos de SiC até 11µm e acabamento com solução de diamante de 1 µm) de amostras retiradas de peças fundidas por microscopia ótica (*Leica DM2500M*), para avaliar a sanidade do fundido, presença de porosidade e a morfologia/dimensão do Grão Alfa/Silício Eutético. O software *Fiji* foi usado para quantificar a dimensão média do Grão alfa nos diversos tipos de peça fundida, segundo a norma ASTM E112. O



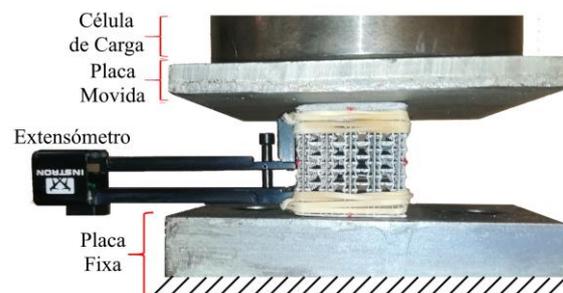
**Fig 2** - Aspeto final das amostras produzidas: (a)  $\alpha=-30^\circ$ ; (b)  $\alpha=0^\circ$ ; e (c)  $\alpha=30^\circ$ .

software foi utilizado para obter o contraste do Grão Alfa e o Silício Eutético para auxiliar a visualização da sua forma.

## 2.3. Compressão uniaxial

As amostras fundidas foram colocadas num equipamento de ensaios universal em compressão (*INSTRON 8874*, Figura 3). No total, foram testadas cinco amostras por cada arquitetura (*i.e.*  $\alpha=\{30^\circ, 0^\circ \text{ e } 30^\circ\}$ ), sendo inicialmente fixas com uma pré-carga de 50N entre duas placas de aço inox. Após um período de 5 min para o equilíbrio da pré-tensões nas amostras, estas foram comprimidas pela aplicação de uma taxa de deslocamento na placa movida de 0.01 mm/s, enquanto a placa inferior permanece fixa. Os testes foram parados após um deslocamento de 2 mm.

Enquanto o deslocamento da placa movida foi controlado pelo *LVDT* do equipamento, o deslocamento axial macroscópico nas amostras



**Fig 3** - Aparato experimental para ensaios de compressão uniaxial.

foi medido por um extensômetro mecânico, colocado de acordo com as Figuras 3 e 4. Adicionalmente, de acordo com a Figura 4, foi colocado um extensômetro mecânico para monitorizar os deslocamentos transversais nas amostras e permitir o cálculo do seu Coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ). As forças envolvidas foram monitorizadas pela célula de carga do equipamento, sendo os valores instantâneos de força e deslocamento macroscópico usados para gerar a curva tensão-deformação aparente.

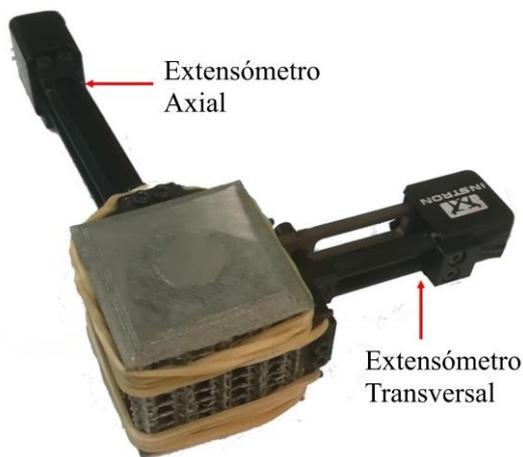


Fig 4 - Aparato experimental para ensaios de compressão uniaxial.

## 2.4. Microtomografia computadorizada 4D

Foram também realizados testes de compressão combinados com técnicas de microtomografia computadorizada de Raios-X ( $4D \mu CT$ , Figura 5 (a)) recorrendo a um scanner *High-Flux Nikon XTEK*. As diferentes amostras foram inseridas num aparato de compressão em acrílico (Figura 5 (b)) com uma célula de carga de 10kN, permitindo a análise de radiografias de Raios-X enquanto a amostra é comprimida em estágios de deformação macroscópica ( $\epsilon^*=0.01$  e  $\epsilon^*=0.04$ ). As amostras foram também caracterizadas em repouso para obter um contraste de deformações enquanto comprimidas e executar uma análise metrológica às amostras fundidas. Todas as análises foram executadas com um voltagem de 160kV e uma intensidade de corrente de 262  $\mu A$ . As distâncias de amostra-fonte e amostra-detector de Raios-X foram, respetivamente, 222 mm e 989 mm. Esta configuração resulta na resolução de 45  $\mu m$



Fig 5 -  $4D \mu CT$ : (a) amostra em repouso no scanner; e (b) em compressão dentro do aparato.

(*voxel*). Foram coletadas 3141 radiografias por amostra, a uma taxa de 205 ms/frame enquanto o aparato e amostra são rodados em 360°. Os dados resultantes foram reconstruídos usando o software *Nikon Metris CTPro*, sendo segmentados, visualizados e analisados nos softwares *Avizo standard* e *Fiji*.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Caracterização macro e microestrutural

Na Figura 6 estão representados exemplos da segmentação das radiografias obtidas por microtomografia computadorizada ( $\mu CT$ ) nas amostras iniciais. Nestas imagens podem ser observadas as dimensões iniciais (Tabela 1) para efeitos de comparação com amostras em compressão. Pode ser concluído que as amostras fundidas tendem a ter dimensões ligeiramente inferiores às previstas pelo modelo *CAD*.

Exemplos das células periódicas que compõem as diferentes arquiteturas das amostras fundidas podem ser observados na Figura 7.

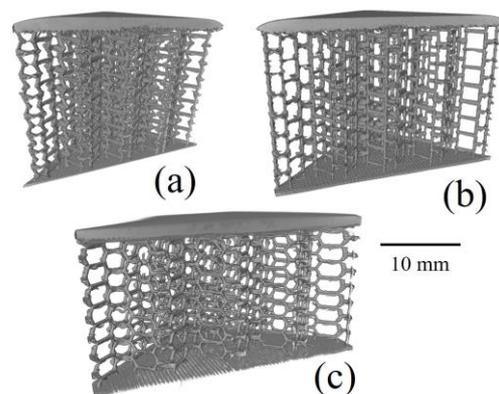
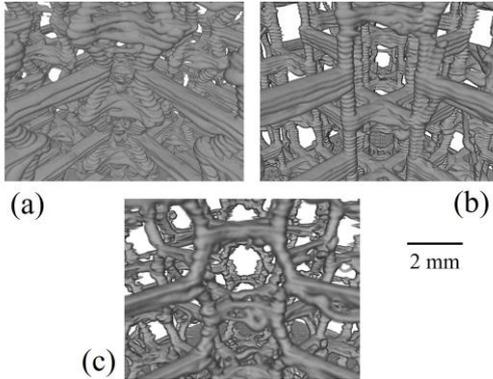


Fig 6 -  $\mu CT$  do interior das amostras produzidas ( $\epsilon^*=0.00$ ): (a)  $\alpha=-30^\circ$ ; (b)  $\alpha=0^\circ$ ; e (c)  $\alpha=30^\circ$ .

**Tabela 1** - Comparação das dimensões teóricas do CAD com as amostras fundidas.

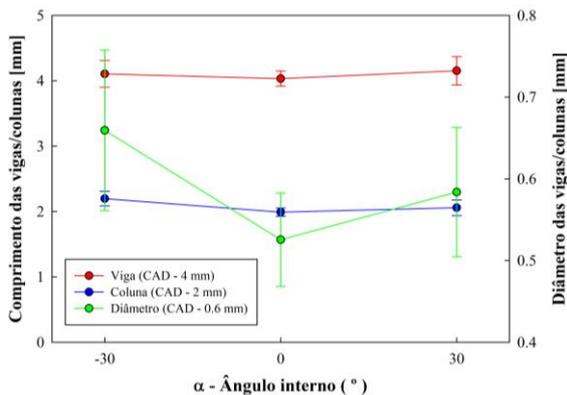
$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	Altura (mm)		Largura (mm)	
	CAD	Fundido	CAD	Fundido
-30	26.5	26.1 $\pm$ 0.3	28.7	28.2 $\pm$ 0.2
0	30.8	30.4 $\pm$ 0.1	36.6	36.4 $\pm$ 0.2
30	26.5	26.4 $\pm$ 0.1	44.6	46.2 $\pm$ 0.1



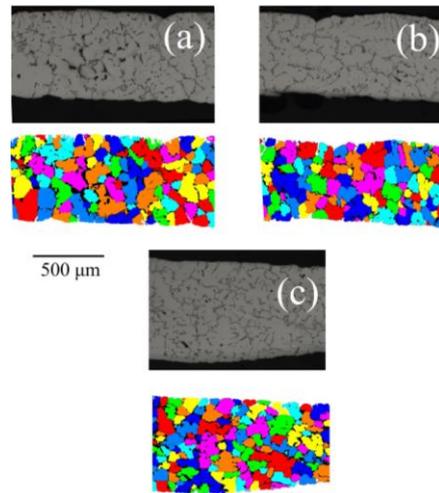
**Fig 7** -  $\mu$ CT de células produzidas ( $\epsilon^*=0.00$ ): (a)  $\alpha=-30^{\circ}$ ; (b)  $\alpha=0^{\circ}$ ; e (c)  $\alpha=30^{\circ}$ .

De acordo com os resultados da segmentação das radiografias provenientes dos dados de  $\mu$ CT, podem proceder-se a uma análise metrológica às vigas/colunas que compõem as células periódicas. Na Figura 8 pode ser observado que o comprimento das vigas e colunas tende a ser superior ao definido pelo modelo CAD. Contudo, modelos com ângulos internos negativos ( $\alpha=-30^{\circ}$ ) tendem a ter espessuras mais elevadas que o modelo CAD, contrariamente a arquiteturas com células quadradas ( $\alpha=0^{\circ}$ ).

Na Figura 9 são apresentadas as microestruturas representativas para cada arquitetura de amostra produzida. Para cada um dos casos, o Grão Alfa é delimitado e destacado



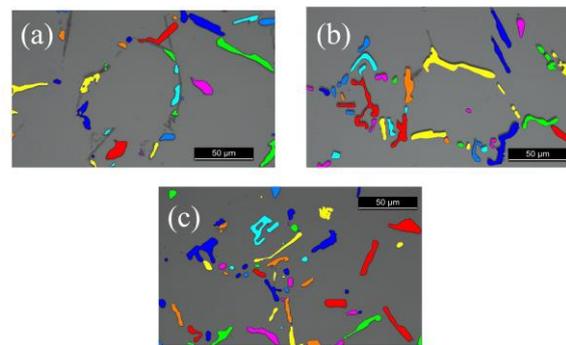
**Fig 8** - Análise metrológica às vigas/colunas por  $\mu$ CT.



**Fig 9** - Detalhe de Grão Alfa nas amostras fundidas: (a)  $\alpha=-30^{\circ}$ ; (b)  $\alpha=0^{\circ}$ ; e (c)  $\alpha=30^{\circ}$ .

para facilitar a percepção do seu diâmetro e morfologia. Foi determinado que o Grão Alfa é predominantemente globular, apesar de se poderem observar pequenos braços de dendrites secundárias. Pela aplicação da norma ASTM E112 determinou-se que o diâmetro médio para amostras com  $\alpha=-30^{\circ}$ ,  $\alpha=0^{\circ}$  e  $\alpha=30^{\circ}$  é, respectivamente,  $73\pm 39 \mu\text{m}$ ,  $74\pm 28 \mu\text{m}$  e  $73\pm 58 \mu\text{m}$ . Adicionalmente, pode ser observada alguns poros de pequena dimensão, sendo sugerido que estes não desempenham um papel relevante nas propriedades mecânicas do fundido.

De acordo com a Figura 10, verifica-se que o Silício Eutético tem uma configuração alongada/esferoidal, não sendo visível qualquer morfologia fibrosas. Este último facto, e a ausência de  $Mg_2Si$  não dissolvido, corroboram o sucesso do tratamento de solubilização. Relativamente a compostos intermetálicos, são apenas observados compostos do tipo  $\beta-Al_5FeSi$  com uma morfologia de agulhas delgadas (e.g. Figura 10 (a)).



**Fig 10** - Detalhe de Silício Eutético nas amostras fundidas: (a)  $\alpha=-30^{\circ}$ ; (b)  $\alpha=0^{\circ}$ ; e (c)  $\alpha=30^{\circ}$ .

### 3.2. Comportamento elástico e colapso

De acordo com a Figura 11, a arquitetura das células periódicas tem um impacto significativo no comportamento mecânico de sólidos celulares. É visível que a variação do ângulo interno das amostras gera uma variação profunda ao nível da rigidez e tensão de colapso aparentes.

Na Figura 12, é evidenciado que a amostra com um ângulo interno  $\alpha=0^\circ$  tem um Módulo Aparente mais elevado, relativamente às restantes arquiteturas ( $\alpha=-30^\circ$  e  $\alpha=30^\circ$ ). Relativamente à Tensão de Colapso Aparente, pode ser observado que uma redução do ângulo interno, especialmente para valores negativos, promove uma elevação da resistência mecânica destes sólidos celulares.

As deformações macroscópicas nas nas diferentes arquiteturas e o cálculo do Coeficiente de *Poisson* (Figura 13) das amostras mostra que o uso de ângulos internos negativos, zero e positivos é capaz de gerar comportamento auxético ( $\nu=-1.89$ ), de transição ( $\nu=0.04$ ) e não-auxético ( $\nu=0.96$ ).

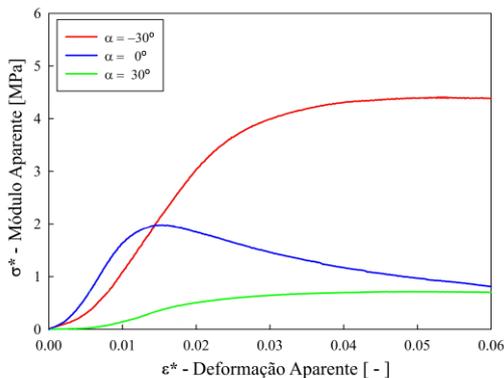


Fig 11 - Curvas tensão-deformação aparente das amostras testadas.

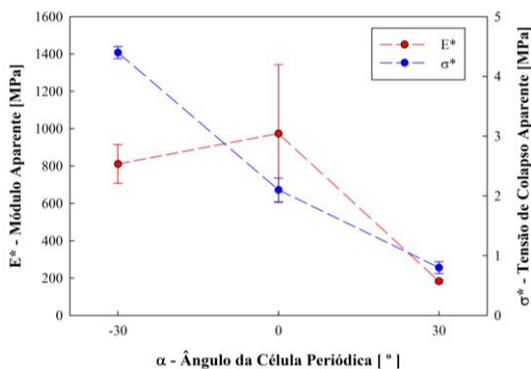


Fig 12 - Resumo da rigidez (i.e. Módulo Aparente) e resistência mecânica (i.e. Tensão de Colapso Aparente) nas amostras testadas.

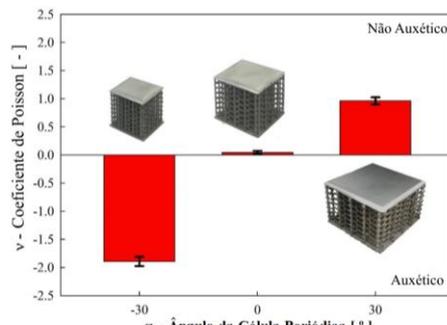


Fig 13 - Coeficiente de *Poisson* das amostras.

### 3.3. Detalhe de deformação em compressão

As Figuras 14 a 16 apresentam a evolução das deformações macroscópicas no plano médio das amostras com diferentes arquiteturas. Desta forma, recorrendo à caracterização por 4D  $\mu CT$  é possível observar que os diferentes ângulos internos, e consequentemente Coeficiente de *Poisson*, das amostras geram uma resposta em deformação bastante distinta.

As arquiteturas auxéticas (i.e. ângulo internos negativos, Figura 14) geram um efeito de densificação localizada após colapso, onde a estrutura celular tem uma deformação macroscópica para o interior do sólido celular.

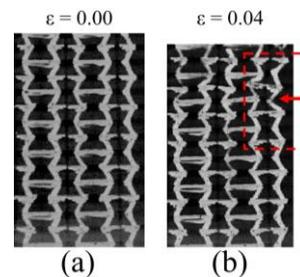


Fig 14 - Detalhe do plano médio da amostra com  $\alpha=-30^\circ$  para detalhe de deformação macroscópica: (a) estado inicial -  $\epsilon^*=0.00$ ; e (b) compressão após tensão de colapso -  $\epsilon^*=0.04$ .

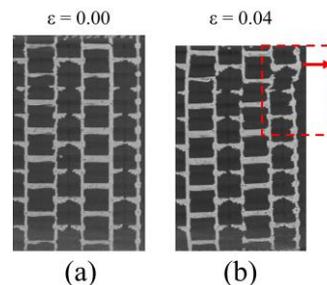
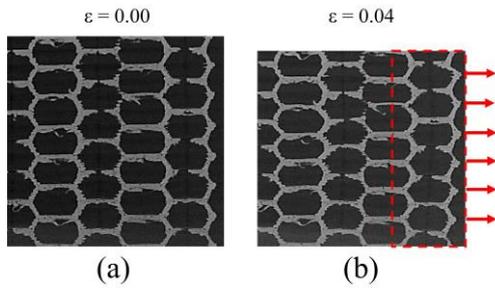


Fig 15 - Radiografia no plano médio da amostra com  $\alpha=0^\circ$  para detalhe de deformação macroscópica: (a) estado inicial -  $\epsilon^*=0.00$ ; e (b) compressão após tensão de colapso -  $\epsilon^*=0.04$ .



**Fig 16** - Detalhe do plano médio da amostra com  $\alpha=30^\circ$  para detalhe de deformação macroscópica: (a) estado inicial –  $\varepsilon^*=0.00$ ; e (b) compressão após tensão de colapso –  $\varepsilon^*=0.04$

A configuração com um Coeficiente de *Poisson* de transição ( $\nu \sim 0$ ) gera colapso localizado e estratificado (Figura 15), conduzindo a uma falha por encurvadura na direção oposta ao interior do sólido celular. Arquiteturas com um Coeficiente de *Poisson* positivo (Figura 16) geram um colapso distribuído ao longo da face da amostra na direção oposta à do interior do sólido celular.

#### 4. INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE *POISSON* NA RIGIDEZ E COLAPSO DE SÓLIDOS CELULARES

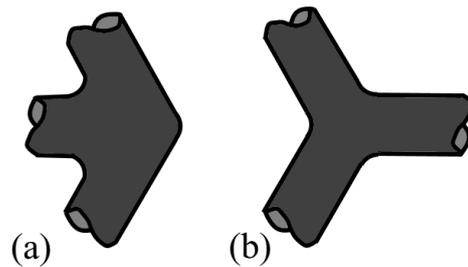
O processo de fabrico utilizado foi capaz de reproduzir os modelos *CAD* com rigor e não apresenta desvios de dimensões lineares significativos. De acordo com a ausência de porosidade significativa, e a ausência de variações significativas no Grão Alfa e morfologia alongada/esferoidal do Silício Eutético nas diferentes arquiteturas, é sugerido que a influência do material de base na diferença do comportamento mecânico das amostras não é significativo. Desta forma, as variações observadas na rigidez (i.e. Módulo aparente) e na resistência estrutural (i.e. Tensão de Colapso Aparente) são atribuídas à geometria e, por consequência, ao Coeficiente de *Poisson* das amostras.

##### 4.1. Coeficiente de Poisson vs Módulo Elástico Aparente

Os modelos analíticas para a previsão de propriedades elásticas de sólidos celulares não-estocásticos correlacionam a teoria clássica de Euler-Bernoulli para vigas

espessas com os efeitos das rótulas que unem as diversas vigas/columnas. Desta forma, Masters (1996) define que o comportamento elástico destas estruturas está relacionado com três componentes de rigidez: axial ( $K_a$ ), flexão ( $K_b$ ) e de rótula ( $K_h$ ).

Um estudo recente (Carneiro, 2020b) afirma que uma melhor correlação entre resultados experimentais e teóricos pode ser obtida pela modificação do cálculo da rigidez de rótula (Equação 1, onde  $G_0$  é o módulo de corte do material de base) com um coeficiente de correção de correção ( $q$ , Equação 2). A variação de forma da rótula conforme o ângulo interno da célula periódica (Figura 17), e consequentemente o seu Coeficiente de *Poisson*, demonstra que a rigidez varia significativamente quando o ângulo interno é negativo (Figura 17 (a) –  $\nu < 0$ ) ou positivo (Figura 17 (b) –  $\nu > 0$ ).



**Fig 17** - Comparação da morfologia de rótulas em células periódicas com ângulos: (a) negativos e (b) positivos.

$$K_h = \frac{2t^2 \cdot G_0}{h \cdot q} \quad (1)$$

$$q = \tan(\alpha) \quad (2)$$

Desta forma, o Módulo Aparente teórico deste tipo de estruturas, em função do seu ângulo interno, pode ser determinado pela soma algébrica de todas as formas de rigidez ( $K_T$ , Equação 3). O valor final desta constante elástica pode ser determinado pela aplicação da Equação 4 ( $L^*$  e  $A^*$  são, respetivamente, a altura e área aparente inicial da amostra).

$$K_T = \frac{1}{\frac{1}{K_a} + \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_h}} \quad (3)$$

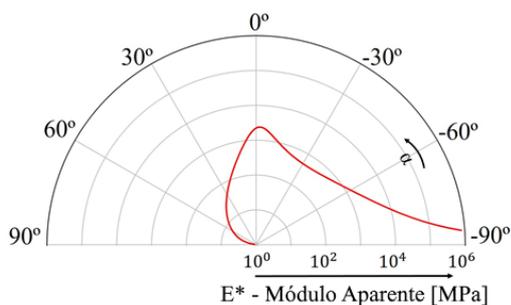
$$E^* = \frac{K_T \cdot L^*}{A^*} \quad (4)$$

A representação gráfica (Figura 18) deste modelo analítico demonstra que é previsto um pico de rigidez para ângulos internos próximos de 0° devido à preponderância da componente axial neste tipo de arquitetura (Figura 6 (b) e 7 (b)). Contudo, na gama de valores de ângulo interno analisada (*i.e.* -30° a 30°), verifica-se que para valores de ângulos simétricos (e.g. -30° e 30), as amostras com ângulos negativos (*i.e.* comportamento auxético) têm uma rigidez mais elevada.

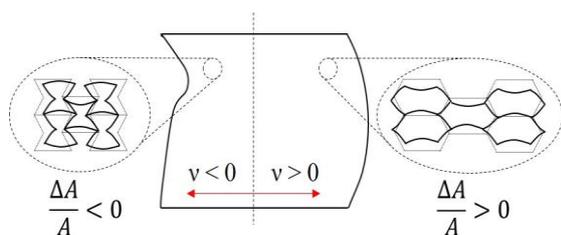
#### 4.2. Coeficiente de Poisson vs Tensão de Colapso

De acordo com os resultados dos testes de 4D  $\mu CT$  (Figuras 14 a 16), pode ser observado que o Coeficiente de *Poisson* gera uma resposta em deformação macroscópica bastante distinta.

O colapso em sólidos celulares com um Coeficiente de *Poisson* negativo ( $\nu < 0$ , *i.e.* auxéticas) faz com que o sólido celular tenha uma deformação macroscópica de encontro à solicitação de compressão. Assim, de acordo com o modelo de deformação da Figura 19, há uma diminuição localizada na área resistente e uma densificação na amostra. Este aumento dinâmico na densidade estimula o aumento da Tensão de Colapso Aparente.



**Fig 18** - Representação gráfica do modelo analítico para previsão do Módulo Aparente em função do ângulo interno da célula periódica.



**Fig 19** - Modelo de colapso em sólidos celulares dependentes do Coeficiente de *Poisson* negativo ou positivo.

Este efeito é perdido na transição do Coeficiente de *Poisson* de valores negativos para positivos. Como pode ser observado na Figura 15, em sólidos celulares de transição (*i.e.*  $\nu \sim 0$ ), o efeito de densificação é perdido. Desta forma, em sólidos celulares com um Coeficiente de *Poisson* positivo, o colapso e a consequente deformação das amostras, acontece numa morfologia distribuída ao longo das faces da amostra (Figura 16).

De acordo com o modelo de deformação da Figura 19, os sólidos celulares não-auxéticos (*i.e.*  $\nu > 0$ ) são caracterizados por um colapso distribuído que não contribui para o aumento da Tensão de Colapso Aparente.

#### 5. CONCLUSÕES

Neste estudo é explorada a influência do Coeficiente de *Poisson* na rigidez e colapso de sólidos celulares não-estocásticos. Foram produzidas amostras por um processo híbrido de fundição por modelo perdido assistido por manufatura aditiva recorrendo a arquiteturas distintas, pela variação de ângulos internos. Desta forma são obtidos comportamentos auxéticos, não auxéticos e de transição. Estas amostras foram testadas em compressão uniaxial, sendo a sua deformação macroscópica capturada em microtomografia computadorizada ( $\mu CT$ ) 4D. Foram obtidas as seguintes conclusões:

- (i) O processo de fabrico das amostras foi capaz de reproduzir os modelos CAD sem desvios dimensionais significativos. A análise microestrutural não apresenta diferenças significativas entre o tamanho e morfologia do Grão Alfa e Silício Eutético. Assim, é sugerido que a variação nas propriedades mecânicas das amostras é originada pelas arquitetura das células periódicas.
- (ii) As amostras com Coeficiente de *Poisson* de transição ( $\nu \sim 0$ ) apresentam os valores mais elevados de Módulo Aparente devido à significativa componente de rigidez axial. Contudo, para ângulos internos simétricos, os sólidos celulares

auxéticos ( $\nu < 0$ ) revelam um Módulo Aparente mais elevado que os sólidos celulares não-auxéticos ( $\nu > 0$ ) devido à morfologia das suas rótulas.

- (iii) Devido à estimulação de um efeito de densificação, os sólidos celulares com comportamento auxético ( $\nu < 0$ ), têm uma Tensão de Colapso Aparente mais elevada. Este efeito é perdido em sólidos celulares de transição ( $\nu \sim 0$ ). Assim, sólidos celulares não-auxéticos ( $\nu > 0$ ) demonstram um colapso distribuído ao longo das faces da amostra, que não contribui para o aumento da Tensão de Colapso Aparente.
- (iv) Sólidos celulares auxéticos ( $\nu < 0$ ) são sugeridos como uma configuração desejável para obter um bom compromisso entre rigidez (*i.e.* Módulo Aparente) e resistência mecânica (*i.e.* Tensão de Colapso Aparente).

## REFERÊNCIAS

- Ashby, MF; Evans, T; Fleck, NA; Hutchinson, J; Wadley, H; Gibson, L. Metal foams: a design guide. Elsevier; 2000
- Banhart, J. Light-Metal Foams—History of Innovation and Technological Challenges. *Advanced Engineering Materials* vol.15 pp.88-111, 2013.
- Carneiro, VH; Rawson, SD; Puga, H; Meireles, J; Withers, PJ. Additive manufacturing assisted investment casting: A low-cost method to fabricate periodic metallic cellular lattices. *Additive Manufacturing* vol.33 pp.10185, 2020a.
- Carneiro, VH. On the elastic properties of three-dimensional honeycomb lattices. *Composites Communications* vol.17 pp.14-17, 2020b.
- Dagdelen, J; Montoya, J; Jong, M; Persson, K. Computational prediction of new auxetic materials. *Nature Communications* vol.8 pp.323, 2017.
- Gibson, LJ; Ashby, M; Farries, SG; Robertson, C. The mechanics of two-dimensional cellular materials. *Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences* vol.382 pp.25-42, 1982.
- Hong, K; Park, H; Kim, Y; Knappek, M; Minárik, P; Máthis, K; Minárik, P; Máthis, K; Yamamoto, A; Choe, H. Mechanical and biocorrosive properties of magnesium-aluminum alloy scaffold for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* vol.98 pp.213-224, 2019.
- Hu, LL; Zhou, MZ; Deng, H. Dynamic indentation of auxetic and non-auxetic honeycombs under large deformation. *Composite Structures* vol.207 pp.323-330, 2019.
- Lakes, RS. Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio. *Science* vol.235 pp.1038-1040, 1987.
- Ma, L; Chen, Y-L; Yang, J-S; Wang, X-T; Ma, G-L; Schmidt, R; Schröder, K.-U. Modal characteristics and damping enhancement of carbon fiber composite auxetic double-arrow corrugated sandwich panels. *Composite Structures* vol.203 pp.539-550, 2018.
- Madke, RR; Chowdhury, R. Anti-impact behavior of auxetic sandwich structure with braided face sheets and 3D re-entrant cores. *Composite Structures* vol.236 pp.111838, 2020.
- Masters, I; Evans, K. Models for the elastic deformation of honeycombs. *Composite Structures* vol.35 pp.403-422, 1996.
- Sairajan, KK; Aglietti, GS; Mani, KM. A review of multifunctional structure technology for aerospace applications. *Acta Astronautica* vol.120 pp.30-42, 2016.
- Su, L; Liu, H; Yao, G; Zhang, J. Experimental study on the closed-cell aluminum foam shock absorption layer of a high-speed railway tunnel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* vol.119 pp.331-345, 2019.
- Xue, Y; Wang, X; Wang, W; Zhong, X; Han, F. Compressive property of Al-based auxetic lattice structures fabricated by 3-D printing combined with investment casting. *Materials Science and Engineering: A* vol.722 pp.255-262, 2018.