

# Desenvolvimento e Impressão de Estruturas Estocásticas para Implantes Porosos através do uso de Fabrico Aditivo: Processos DLP e SLM

Autores: Rui Rodrigues (Mestrado em Design Industrial e de Produto, Universidade do Porto), José N. Machado (INEGI), Pedro Lopes (INEGI), Luís Oliveira (INEGI) e Jorge Lino Alves (Mestrado em Design Industrial e de Produto, Universidade do Porto/INEGI)

## RESUMO

O design generativo é um método de design colaborativo entre humanos e computadores que produz múltiplas soluções para um mesmo problema. As estruturas celulares são desenvolvidas com este método com o objetivo de, por exemplo, reduzir a massa, tentando manter as restantes propriedades mecânicas. Este trabalho surgiu do objetivo de desenvolver estruturas celulares para implantes porosos biodegradáveis que promovam o processo de cura de tecido ósseo. Foram estudadas, desenvolvidas e impressas estruturas do tipo estocástico Voronoi, tendo-se utilizado amostras com 500, 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 pontos, mantendo uma espessura constante de 0,4 mm. As amostras foram produzidas numa impressora 3D DLP, que utiliza um Processamento Digital por Luz, e foram analisadas em relação à capacidade de impressão, massa e rigidez. Observou-se que as amostras de 500 pontos, fornecem uma redução de 94% e de 99,7% respetivamente em relação à massa e ao Módulo de Young, enquanto as de 5000 pontos, proporcionam uma redução de 61% e de 96%. Atualmente tem-se impresso amostras das estruturas e também de implantes porosos em aço inoxidável 316L.

## 1. INTRODUÇÃO

O design generativo explora e desenvolve de um modo automático várias soluções de design para um só problema, sendo necessário ter conhecimento dos parâmetros e objetivos que o integram (Di Filippo et al., 2021; McKnight, 2017). É um processo utilizado com o propósito de produzir soluções em função dos parâmetros e dos objetivos estabelecidos inicialmente pelo utilizador, podendo ser ainda utilizado para desenvolver uma solução em função da maximização de um determinado objetivo (Buonamici et al., 2020). Este segundo propósito pode

corresponder a, por exemplo, reduzir a massa de um determinado objeto enquanto se tentam manter as restantes características deste, como por exemplo geometria, resistência, rigidez, etc. As estruturas celulares foram desenvolvidas através deste processo, como meios para atingir estes objetivos, podendo ser definidas como objetos compostos por células, que se repetem no espaço e que se apresentam interconectadas umas às outras. Estas estruturas apenas conseguem ser produzidas através dos processos de fabrico tradicionais, nos casos em que as suas formas se apresentam simples e em escalas médias-grandes, sendo que aumentando a complexidade destas e/ou diminuindo a escala faz com que esses processos se tornem mais caros e limitados (Helou & Kara, 2018; Park et al., 2022). Existindo cada vez mais desenvolvimentos na área do fabrico aditivo, essas limitações têm sido ultrapassadas, fazendo com que estas estruturas ganhem ainda mais importância. A utilização e implementação de estruturas celulares possibilita uma redução de energia, de material e do tempo necessário de fabrico, fornecendo ainda a capacidade de otimizar a re-

sistência dos objetos produzidos, reduzindo a sua massa. Existem dois tipos de estruturas celulares: as periódicas e as estocásticas, podendo ser utilizadas em várias áreas, como por exemplo a médica, a automóvel, aeroespacial e aeronáutica e na engenharia estrutural e civil (Park et al., 2022). As estruturas do tipo periódico, apresentam normalmente uma única forma/geometria de célula, que é repetida ao longo dos 3 eixos, e são desenvolvidas dependendo de características como o tamanho das células, o ângulo, o número de repetições e a geometria do objeto onde serão inseridas. As do tipo estocástico apresentam uma distribuição aleatória das células e das suas formas, não podendo por esta razão ser previstas ou projetadas de um modo preciso. Os dois tipos de estruturas celulares encontram-se representadas na Figura 1.

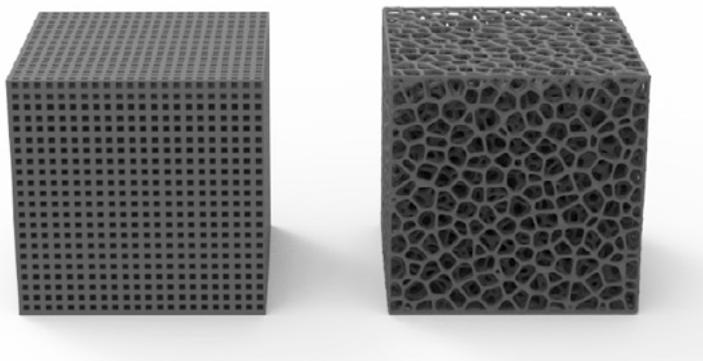


Figura 1 – Exemplos de uma estrutura celular periódica (esquerda) e de uma estrutura estocástica (direita).

Este trabalho pretende demonstrar os efeitos da aplicação de estruturas periódicas e do tipo estocástico nas propriedades mecânicas, na porosidade e na massa. Surgiu do propósito de desenvolver e produzir estruturas para serem implementadas em implantes temporários porosos a serem produzidos em ferro puro, através do processo de Fusão Seletiva por Laser, com o objetivo de promover o comportamento regenerativo do tecido ósseo. De acordo com a literatura, as estruturas com poros maiores de 500  $\mu\text{m}$  promovem a rápida vascularização do tecido fibrovascular e poros com diâmetros entre 120 e 350  $\mu\text{m}$  promovem os eventos necessários para o crescimento ósseo (Sartori et al., 2018). Será estudado o efeito dos parâmetros de modelação das estruturas celulares do tipo estocástico nas propriedades mecânicas de amostras impressas pelo Processamento Digital por Luz (DLP) utilizando uma resina comercial.

## 2. MÉTODOS E MATERIAIS

As estruturas celulares foram modeladas com o software *Rhinoceros 3D*® associado ao *plugin Grasshopper*. Escolheu-se este software devido ao facto de permitir a modelação e modificação 3D de geometrias complexas, permitindo a criação rápida de novos designs. Foram estudadas as estruturas do tipo estocásticos *Voronoi* devido à distribuição aleatória e produzir porosidade semelhante à existente nos ossos. O nome *Voronoi*

provém da função de modelação do software *Rhinoceros 3D*, utilizada para a criação das células. As amostras foram impressas na resina *Phrozen ABS-like matte grey*, utilizando a impressora DLP *Sonic Mighty 4K*, e foram limpas e curadas no equipamento *Creality UW-01*. Após esta fase foram pesadas (balança *HLD300* e *Mettler H31AR*) e finalmente ensaiadas em compressão numa máquina de ensaios *Instron 3387* e *Mecmezin Multitest 2.5 – dV* a uma velocidade de 2mm/min com uma célula de carga de 100 kN e 2500 N respetivamente.

Após o estudo das estruturas impressas em resina, produziram-se amostras através de tecnologia de Fusão Seletiva por Laser em aço inoxidável 316L, numa impressora *ConceptLaser M2 Cusing* com uma área de impressão de 245x245x245  $\text{mm}^3$ , que pode processar diversos tipos de pós metálicos, tais como, aço ferramentas, aço inoxidável, alumínio, ligas de níquel, cobalto, titânio, ferro, etc.

### 2.1 Software de Design

O software *Rhinoceros 3D*® permite o desenvolvimento de formas e geometrias de um modo mais refinado em comparação com os softwares tradicionais CAD. É um software normalmente utilizado nas áreas da arquitetura, engenharia naval, automotiva, entre outras. Tem uma interface de fácil utilização e interativa, possibilitando a modelação 2D e 3D, desenvolvimento de desenhos técnicos, importação e exportação de ficheiros em diversos formatos, entre outras funcionalidades. O que o faz destacar-se dos outros softwares de modelação é o facto de possibilitar a instalação de *plugins* para acrescentar mais funcionalidades. Através da utilização do *plugin Grasshopper* é possível tornar todo o processo de desenvolvimento das estruturas numa fórmula de modelação, tornando todo este processo automático e de fácil de modificação.

## 2.2. Tecnologia DLP e SLM

Processamento Digital por Luz (DLP) é uma tecnologia do tipo de fotopolimerização em cuba que utiliza máscaras para realizar a filtragem da luz. Essas máscaras correspondem a cada camada do objeto a imprimir e desta forma, é curada toda uma camada simultaneamente. O tempo de impressão é influenciado pela altura do objeto a imprimir, sendo possível imprimir várias peças simultaneamente que apresentem a mesma altura, sem que o tempo aumente. A DLP *Sonic Mighty 4K* permite imprimir cada camada em cerca de 2 segundos. A Fusão Seletiva por Laser, ou SLM, é um processo de fabrico aditivo, no qual um laser de alta intensidade é utilizado para fundir pós metálicos, sendo o objeto fabricado através dessa fusão localizada do pó metálico, camada a camada. É capaz de produzir peças com densidade relativa de até 99,9%, não necessitando de pós-processamento. Comparado com outros de processos de fabrico aditivo metálico, o processo SLM é capaz de produzir componentes com melhor qualidade e resolução, necessitando de menos tempo e apresentando maior fiabilidade (C. Y. Yap et al.).

## 2.3 Estruturas celulares do tipo estocástico Voronoi

Como mencionado, existem dois tipos de estruturas celulares, periódicas e estocásticas.

Neste trabalho serão apenas estudadas as do tipo estocástico *Voronoi*. A principal vantagem destas estruturas é o facto da forma e distribuição das células se apresentar aleatória, gerando estruturas com uma aparência mais orgânica, similar à porosidade encontrada no tecido ósseo. Estas estruturas apresentam normalmente um comportamento similar a um objeto isotrópico, quando o número de células inseridas dentro de um determinado volume é suficientemente grande (Liu et al., 2023)

## 2.4. Processo de desenvolvimento das amostras

As estruturas celulares do tipo *Voronoi* foram desenvolvidas e inseridas em amostras com o formato de um cubo de 20x20x20 mm<sup>3</sup>.

Foi desenvolvida uma fórmula de modelação (Figura 2) que permite modificar de um modo fácil e eficaz os parâmetros e, por consequência, o modelo 3D, possibilitando ajustes de uma forma célere.

Começa-se por modelar o cubo que representará o volume das amostras, e depois insere-se de uma forma aleatória dentro deste, vários pontos. Estes pontos servirão de centros para a criação de células com volumes semelhantes. Depois do volume da amostra se encontrar dividido nas células, realiza-se a extração das arestas que as compõem, para serem usadas como guia para a produção da espessura, passando um perfil redondo que será, posteriormente, suavizado com o intuito de tornar toda a estrutura mais orgânica. Após todo este processo observou-se que o ficheiro se apresentava demasiado pesado para ser processado pelas impressoras e pelo *software* de fatiamento (*slicer*), *Chitubox 64 1.8.1.*, que trata da preparação do ficheiro STL para impressão. Por isso, decidiu-se reduzir a qualidade da malha em 80%, restringindo o número de triângulos que a compõem, permitindo assim reduzir o tamanho do ficheiro. Os parâmetros de modelação identificados que poderiam ser variados, são o número de pontos, que corresponde ao número de células a serem produzidas dentro do volume, e a espessura da parede.

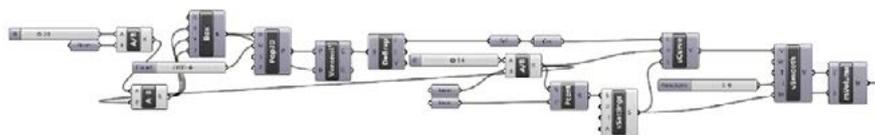


Figura 2 – Fórmula de modelação das estruturas celulares do tipo Voronoi.

## 2.5. Amostras desenvolvidas

Durante o processo de desenvolvimento foi possível concluir que aumentando o número de pontos dentro de um mesmo volume, ou a espessura, os tamanhos dos poros seriam reduzidos. O aumento da espessura está relacionado com um aumento da resistência, no entanto, a redução do tamanho de poro associado ao seu aumento provoca a retenção de resina dentro da matriz das estruturas e uma maior dificuldade em retirá-la após a impressão das peças. Como tal, e com o objetivo de reduzir o número de variáveis, o valor da espessura foi pré-definido em 0.4 mm, sendo apenas estudada a influência do número de pontos nas propriedades mecânicas. Foram escolhidos os valores de 500, 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 para o número de pontos a serem testados na produção das amostras (Figura 3). Observou-se que, aumentando o número de pontos provoca um maior esforço computacional e de *software*, provocando perdas dos ficheiros de modelação.

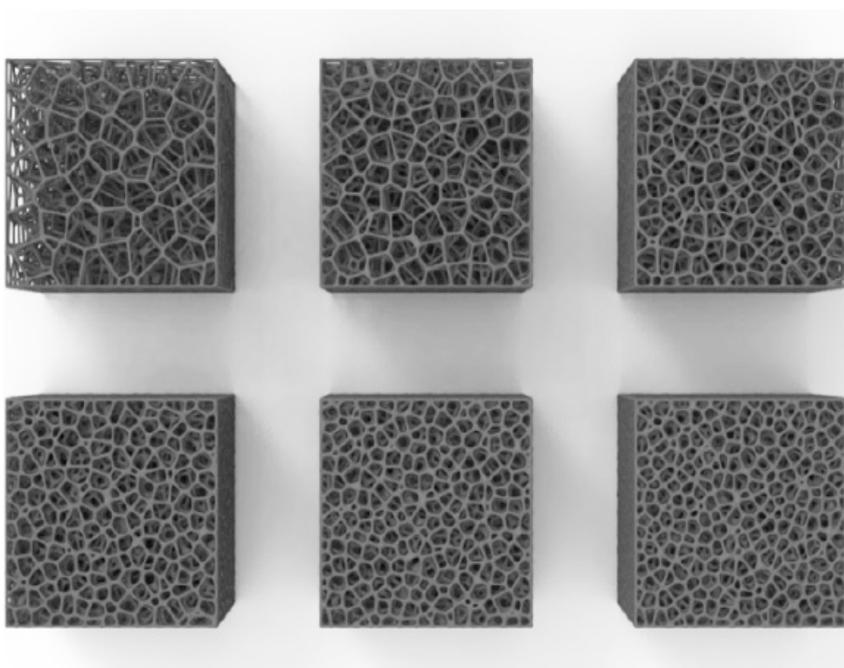


Figura 3 – Amostras desenvolvidas: 500, 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 pontos, respectivamente.

## 2.6. Impressão 3D e processos de tratamento

Para o processo de impressão (três cubos de cada configuração) utilizou-se a impressora *Phrozen Sonic Mighty 4K*, sendo os suportes colocados automaticamente no programa de preparação do modelo. As amostras foram impressas com um ângulo de 45° em relação a cada plano. Foram também impressos três cubos densos, para que fosse possível efetuar comparações entre os resultados obtidos.

O pós-processamento foi realizado com uma pré-limpeza de 45 minutos com álcool isopropílico (concentração de 96%) na *Creality UW-01*. As amostras foram então pesadas, limpas com papel absorvente e pesadas novamente, ficando a secar durante 48 horas numa caixa de cartão, cujo interior se encontrava coberto com papel absorvente e um saco de sílica. Esta etapa destinou-se a promover a desumidificação, num ambiente controlado e sem luz, para evitar a cura não planeada. Após este período de secagem, as amostras foram de novo pesadas, e de seguida limpas numa tina de ultrassons *Solttec 1200 M*, com álcool isopropílico (concentração de 96%), durante 2 minutos. As amostras foram então pesadas e novamente secas durante 48 horas, nas mesmas condições anteriores, sendo mais uma vez pesadas no final. Após a conclusão de todo este processo de limpeza da resina não curada, as amostras foram curadas por raios ultravioletas durante 1 hora na máquina *Creality UW-01*, sendo depois removidos os suportes.

As amostras foram pesadas numa balança *HLD300* (capacidade máxima de 300 gramas e sensibilidade de 0,5 mg). As medições dimensionais foram efetuadas com um paquímetro *Mitutoyo Absolute Digimatic Calliper 500* com uma resolução de 0,02 mm.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após as medições, testes e análise dos resultados, percebeu-se que os cubos densos tinham uma massa de 9,12 gramas e um Módulo de Young (em compressão) de cerca de 0,74 GPa.

Observou-se que, tanto a massa como o módulo têm tendência a aumentar em função do aumento do número de pontos, podendo-se dizer que, um menor tamanho do poro e porosidade, origina um aumento das propriedades mecânicas (Figuras 4 a 6). Comparando com os dados das amostras densas, percebe-se que as estruturas de 500 pontos, têm uma redução de 94% e de 99,7% respetivamente em relação à massa e ao Módulo de Young, enquanto as de 5000 pontos, proporcionam uma redução de 61% e de 96%. As propriedades mecânicas das amostras de 1000 pontos têm resultados diferentes dos esperados, por essa razão serão efetuados mais testes de modo a compreender a sua veracidade.

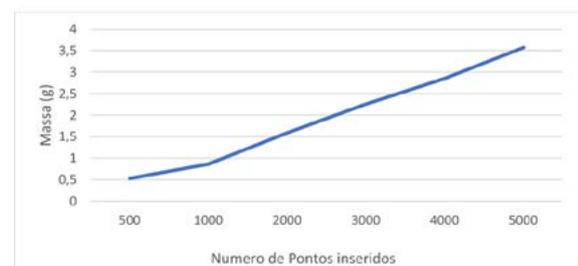


Figura 4 – Variação da massa em função

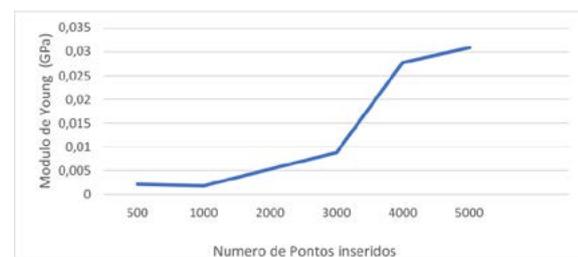


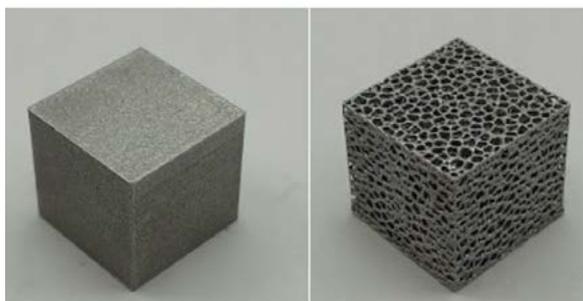
Figura 5 – Variação do módulo de Young (em compressão) em função do número de pontos.



Figura 6 – Variação da tensão de cedência em função do número de pontos.

### Trabalho em curso

Com o intuito de começar a analisar as capacidades das estruturas para serem impressas pela tecnologia SLM com material metálico, imprimiram-se na *ConceptLaser M2 Cusing*, cubos em aço inoxidável 316L. Foram impressas 6 amostras de geometrias idênticas às impressas em resina, tendo-se selecionado a impressão nesta primeira fase das amostras densas e com configuração de 4000 pontos (Figura 7), e ainda uma amostra com três geometrias Voronoi de 2000, 4000 e 6000 pontos (Figura 8), de modo a verificar a fiabilidade de impressão destas geometrias.



a)

b)

Figura – Amostras impressas em aço inoxidável 316L através da técnica de SLM; a) amostra 100% densa, b) amostra com 4000 pontos.



Figura 8 – Amostra 316L de geometrias Voronoi com 2000, 4000 e 6000 pontos, respetivamente.

Estas amostras serão sujeitas a ensaios de compressão de modo a determinar as suas propriedades mecânicas; resistência à compressão, módulo de Young e tensões de cedência. Esta primeira impressão também serviu para verificar a qualidade da impressão e remoção do pó metálico das regiões porosas, sendo que numa segunda impressão serão impressas amostras para ensaio com a configuração de 6000 e 2000 pontos.

A caracterização mecânica das estruturas celulares Voronoi em aço inox 316L e os estudos que se seguirão em termos de crescimento celular, darão importantes recomendações para o fabrico de estruturas porosas biodegradáveis em ferro puro, a ser utilizado na próxima fase.

Também foram realizadas as impressões de alguns implantes ortopédicos tanto em aço 316L (Figura 9) como em resina Phrozen ABS-like matte grey (Figura 10), com o intuito de visualizar a capacidade de impressão e qualidade das superfícies e estruturas. Observou-se que seria necessário estudar a orientação das impressões para melhorar a qualidade das amostras.



Figura 9 – Placa ortopédica densa e porosa impressa em aço 316L.



Figura 10 – Placas ortopédicas porosas impressas em resina.

## 4. CONCLUSÕES

O trabalho realizado demonstrou os efeitos nas propriedades mecânicas e na massa de estruturas celulares do tipo estocástico Voronoi, que foram projetadas por design generativo. A produção destas estruturas permite reduzir o peso e as propriedades mecânicas, com o objetivo de aproximar o

seu comportamento ao do osso humano. Demonstrou-se que reduzir o número de pontos inseridos no design destas estruturas, com poros de dimensão semelhante aos detetados no corpo humano, decresce as propriedades mecânicas e torna as peças mais leves, podendo as suas estruturas serem desenhadas para serem impressas em ferro poroso biodegradável com a máxima compatibilidade com o osso humano.

## 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia), no âmbito do projeto PTDC/CT-CTM/3354/2021 “Biodegradable implants in porous iron obtained by additive manufacturing”.

## REFERÊNCIAS

- Buonamici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Volpe, Y., & Governi, L. (2020). Generative design: An explorative study. *Computer-Aided Design and Applications*, 18(1), 144–155.
- C. Y. Yap et al., ‘Review of selective laser melting: Materials and applications’, *Applied Physics Reviews*, vol. 2, p. 041101, Dec. 2015.
- Di Filippo, A., Lombardi, M., Marongiu, F., Lorusso, A., & Santaniello, D. (2021). Generative design for project optimization. *Proceedings - DMSVIVA 2021: 27th International DMS Conference on Visualization and Visual Languages*, 110–115.
- Helou, M., & Kara, S. (2018). Design, analysis and manufacturing of lattice structures: An overview. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(3), 243–261.
- Liu, H., Chen, L., Jiang, Y., Zhu, D., Zhou, Y., & Wang, X. (2023). Multiscale optimization of additively manufactured graded non-stochastic and stochastic lattice structures. *Composite Structures*, 305(July 2022), 116546.
- McKnight, M. (2017). Generative Design: What it is? How is it being used? Why it’s a game changer. *KnE Engineering*, 2(2), 176.
- Park, K. M., Min, K. S., & Roh, Y. S. (2022). Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements. *Materials*, 15(1).
- Sartori, T. A. I. da C., Ferreira, J. A., Osiro, D., Colnago, L. A., & Pallone, E. M. de J. A. (2018). Formation of different calcium phosphate phases on the surface of porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> nanocomposites. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(2), 743–751.