



# DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE SCAFFOLDS METÁLICOS DE TITÂNIO COM GRADIENTE DE POROSIDADE PARA APLICAÇÃO EM IMPLANTES

**Palavras-Chave:** Gradiente de Porosidade, Stress Shielding, Implantes Ortodônticos e Ortopédicos.

**Autores(as):**

**MARIANA NAMBA SZYCHOWSKI, FCA – UNICAMP**

**Prof. Dr. JAIME HIDEO IZUKA (orientador),**

**Prof. Dr. RODRIGO JOSÉ CONTIERI (coorientador), FCA - UNICAMP**

---

## INTRODUÇÃO:

Com o envelhecimento da população mundial e o aumento da expectativa de vida, as fraturas ósseas associadas à osteoporose e a outras doenças degenerativas tornaram-se uma das principais preocupações em saúde pública (LIU, 2019). Segundo dados, de 2019, da Fundação Internacional da Osteoporose (IOF), a osteoporose atinge cerca de 200 milhões de mulheres no mundo, sendo 40% das mulheres pós-menopáusicas e aumentando consideravelmente o risco de fraturas ósseas (LIU, 2019, TURBANI, 2019). Embora as fraturas por fragilidade sejam mais recorrentes entre as mulheres, as maiores taxas de mortalidade devido a possíveis complicações relacionadas à fratura do fêmur estão ligadas aos homens (TURBANI, 2019).

A osteoporose reduz a densidade e a qualidade do osso, levando a um risco elevado de fraturas, particularmente no quadril, coluna e punho (BEGUM, 2022). Assim, para tratar lesões e doenças ósseas associadas ao envelhecimento, o desenvolvimento de implantes ortodônticos e ortopédicos otimizados permite aplicações mais eficazes. Os implantes de titânio (Ti) e suas ligas têm sido amplamente utilizados devido às suas propriedades favoráveis, incluindo biocompatibilidade, baixo módulo de elasticidade e alta resistência mecânica (BEGUM, 2022). Dentre as ligas mais utilizadas, o Ti-6Al-4V tem se mostrado eficaz em diversas aplicações biomédicas (BEGUM, 2022). No entanto, para garantir a eficácia clínica, os implantes devem apresentar um módulo de elasticidade semelhante ao do osso humano e permitir uma integração eficiente com o tecido ósseo circundante. Além disso, essa estrutura deve ser capaz de reduzir os efeitos de *stress shielding*, que é um fenômeno mecânico em que o implante absorve muita carga, tornando o osso menos denso e mais fraco (KÖK, 2025). Surge, portanto, a necessidade do desenvolvimento de estruturas porosas com gradiente de porosidade que possam reproduzir a heterogeneidade natural do osso (LIU, 2019).

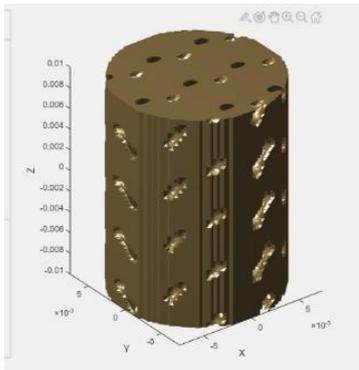
O osso humano apresenta um gradiente natural de porosidade, variando de uma densidade compacta na cortical a uma estrutura trabecular altamente porosa (LIU, 2019). Para o desenvolvimento dessas estruturas (*scaffolds*), a simulação pelo método dos elementos finitos (MEF) é fundamental para entender como os diferentes *scaffolds* com gradiente de porosidade se comportam mecanicamente, e comparar os resultados com o comportamento real do osso humano. Para realizar essa análise e simulações computacionais, utilizou-se um software comercial para replicar com precisão os testes mecânicos reais, validando a eficácia dos modelos computacionais (ZHOU, 2016).

Técnicas de manufatura aditiva, especialmente a fusão em leito de pó a laser (L-PBF), revolucionaram a fabricação de implantes personalizados com estruturas complexas e porosas (LIU, 2019). A L-PBF permite a produção de *scaffolds* com gradiente de porosidade e geometrias personalizadas, que seriam impossíveis de fabricar por métodos convencionais (WU et al, 2020). A combinação de simulação computacional e fabricação aditiva oferece um potencial significativo para melhorar os implantes ortopédicos. Para obter resultados mais precisos dessa pesquisa, será ainda estudada a anisotropia mecânica do material impresso, que impacta em efeitos direcionais na propagação de fraturas e trincas (YU, 2017), visto que muitos dos estudos recentes consideraram a estrutura com comportamento isotrópico (YANG, 2019).

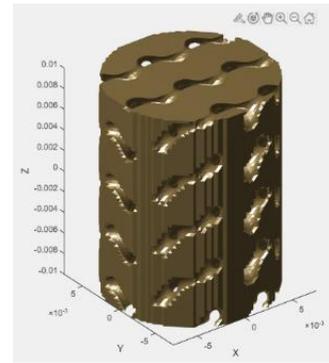
Apesar dos avanços no design e fabricação de *scaffolds* porosos, ainda há lacunas no conhecimento sobre o desenvolvimento de peças com gradiente de porosidade, partindo de uma região densa para uma menos densa, e sua relação com as propriedades mecânicas dos implantes. Além disso, a falta de métodos de simulação e validação abrangentes limita a otimização dessas estruturas. Esta proposta visa investigar teoricamente e computacionalmente como diferentes geometrias de *scaffolds* influenciam as propriedades mecânicas e a distribuição de tensões em implantes ortodônticos e ortopédicos. A proposta deste trabalho é utilizar simulações numéricas MEF para otimizar a distribuição de gradiente de porosidade e validar os modelos computacionais dentro de um projeto de escopo maior (TEMATICO FAPESP), com testes experimentais futuros para validar as observações feitas na simulação, desenvolvendo *scaffolds* personalizados utilizando L-PBF e explorando estruturas inovadoras que melhorem a integração óssea e reduzam os efeitos do *stress shielding*.

## **METODOLOGIA:**

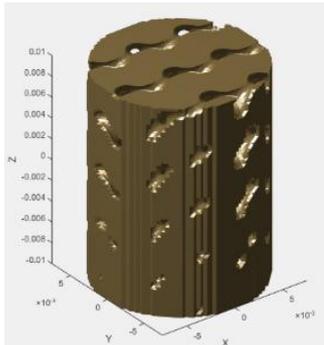
Neste trabalho, foram geradas computacionalmente quatro geometrias para fins de comparação das propriedades mecânicas, sendo elas, três apresentando algum tipo de porosidade na estrutura, e uma de corpo sólido. A dimensão das geometrias seguiu o padrão de formato cilíndrico, sendo 20 mm de altura e 15 mm de base. Para a geração das estruturas porosas, foi utilizado o MSLattice, software focado na geração de diversos tipos de porosidade, incluindo estruturas uniformes e com gradiente. Dessa forma, para essa pesquisa, foram geradas geometrias com porosidade do tipo *Gyroid* e com tamanho da célula unitária de 5 mm, considerando que o software segue o sistema de medição Metro-Tonne-Segundo (MTS) (Figuras 1, 2 e 3). Já o corpo sólido, foi gerado diretamente pelo Ansys SpaceClaim, através de modelagem 3D (Figura 4).



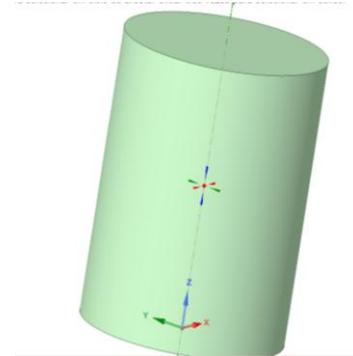
**Figura 1.** Geometria uniforme com 10% de porosidade – fonte: Autoria própria.



**Figura 2.** Geometria uniforme com 20% de porosidade – fonte: Autoria própria.

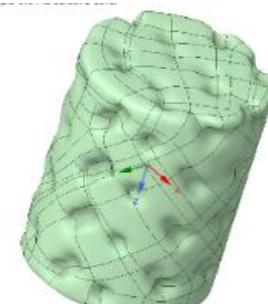


**Figura 3.** Geometria com gradiente de porosidade, varando de 0% a 20% de porosidade – fonte: Autoria própria.



**Figura 4.** Geometria maciça – fonte: Autoria própria.

Um desafio encontrado durante a preparação das estruturas para a simulação, foi o fato do software MSLattice gerar apenas arquivos no formato STL. Esse tipo de arquivo é amplamente utilizado em impressão 3D, no entanto, não é compatível com as simulações computacionais desejadas. Assim, foi necessário buscar alternativas para converter o arquivo de STL para objeto 3D, sem alterar as características das peças. Após muitas tentativas, obteve-se sucesso na conversão utilizando próprio espaço do Ansys SpaceClaim (Figura 5).



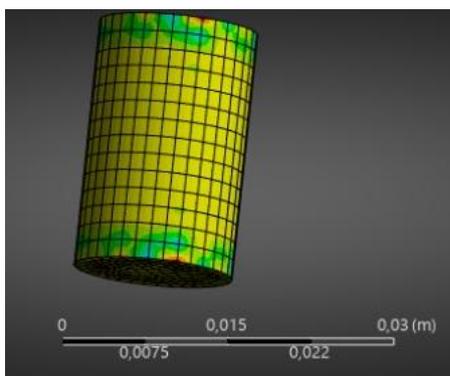
**Figura 5.** Geometria com porosidade convertida em sólido 3D – fonte: Autoria

Tendo-se as estruturas preparadas, foram realizadas as simulações de tração, nos ambientes do Ansys. No Ansys Workbench os projetos foram integrados e gerenciados, sendo selecionada a geometria desejada, o tipo de simulação, propriedades dos materiais, entre outros parâmetros. O material utilizado para as simulações é o titânio. Em sequência, no Ansys Mechanical foram realizadas as simulações de carga estática de tração e a visualização dos resultados.

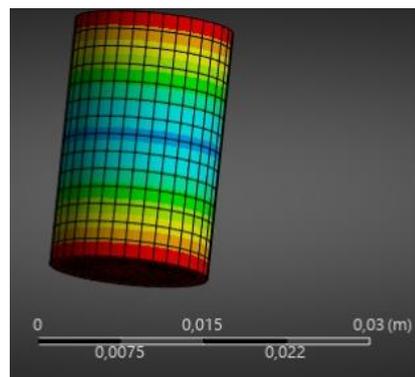
Para simular condições mecânicas às quais a estrutura óssea é submetida, foram considerados pesos médios de adultos homens e mulheres de 66,2 kg e 57,3 kg, respectivamente, para calcular a força que uma prótese femoral suporta durante atividades diárias, que é de 1400 N (KONG, 2023). Assim, este valor foi utilizado como referência para as simulações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Foram realizadas simulações de tração, analisando as tensões normal e as deformações totais de cada estrutura (Figura 7 e 8, respectivamente).



**Figura 7.** Resultados da tensão normal quando aplicada a força de 1,4 kN – fonte: Autoria própria.



**Figura 8.** Resultados da deformação total quando aplicada a força de 1,4 kN – fonte: Autoria própria.

### Teste de Convergência da Malha

Vale ressaltar que, o número de nós e elementos da malha influenciam na precisão dos resultados, já que, quanto menor o tamanho do *element size*, maior vai ser a precisão. Por isso, para cada simulação foi coletada cerca de 10 amostras com diferentes tamanhos de malha para coletarmos os resultados mais próximos do real possível, como é possível ver na Tabela 1 e na Figura 9.

**Tabela 1.** Resultados da simulação do cilindro maciço de Aço.

RESULTADOS SIMULAÇÃO CILINDRO MACIÇO DE AÇO ESTRUTURAL					
Amostra	Nós	Elementos	Tensão Máx (Pa)	Deformação Máx (m)	Element Size
1	2475	2072	7,97E+06	4,06E-07	Default
2	2895	2492	7,97E+06	4,09E-07	0,00150
3	4199	3648	7,96E+06	4,08E-07	0,00130
4	4592	4095	7,97E+06	4,08E-07	0,00140
5	5984	5376	7,96E+06	4,08E-07	0,00125
6	7074	6409	7,96E+06	4,08E-07	0,00120
7	8113	7344	7,95E+06	4,08E-07	0,00115
8	9380	8569	7,95E+06	4,08E-07	0,00110
9	10416	9500	7,95E+06	4,07E-07	0,00100
10	12627	11550	7,94E+06	4,07E-07	0,00095
11	15072	13892	7,94E+06	4,07E-07	0,00090

Fonte: Autoria própria.

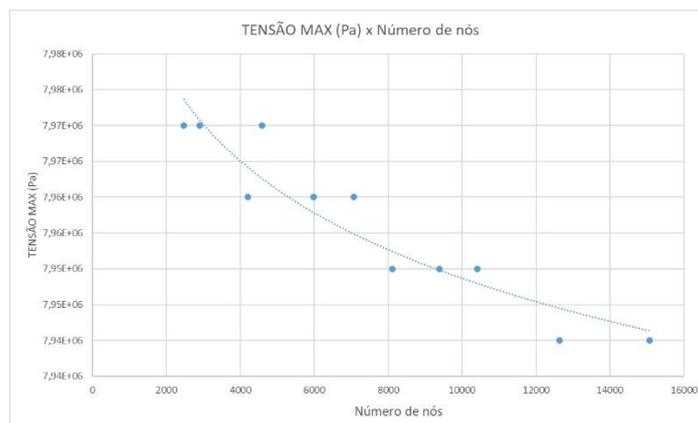


Figura 9. Gráfico de tendência da Tensão Máx (Pa) x Número de nós e elementos – fonte: Autoria própria.

## CONCLUSÕES:

É possível analisar o comportamento de *scaffolds* porosos de titânio sob condições que simulem às do osso. A partir dos resultados da tensão normal e deformação total, encontra-se o módulo de elasticidade (E) do material, que deve ser similar ao do osso. Portanto, adaptando os parâmetros para alcançá-lo, essa pesquisa permite a viabilidade da manufatura aditiva dessas estruturas.

## BIBLIOGRAFIA

- BEGUM, S. Rashia et al. Revealing the compressive and flow properties of novel bone scaffold structure manufactured by selective laser sintering technique. *Proc IMechE Part H: J Engineering in Medicine*, v. 236, n. 4, p. 526–538, 2022.
- KÖK, HÜRDAY ILAYDA et al. Reduction of stress shielding and fatigue-resistant dental implant design through topology optimization and tpms lattices. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 165, p. 1, 2025.
- KONG, DEYIN et al. Design and manufacturing of biomimetic scaffolds for bone repair inspired by bone trabeculae. *Computers in Biology and Medicine*, v. 165, p. 6, 2023.
- LIU, Pan et al. Decoupled effects of bone mass, microarchitecture and tissue property on the mechanical deterioration of osteoporotic bones. *Composites Part B*, v. 177, 2019.
- LIU, Xinwei et al. Evaluation of the mechanical characteristics of Ti64 cubic and body-centered-cubic porous structures: A finite element study validated with physical testing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 94, p. 201-213, 2019.
- TURBIANI, RENATA. Osteoporose, a silenciosa doença incapacitante que pode ser fatal. *BBC News*, 2019.
- WU, Liang et al. Additively manufactured porous scaffolds of Ti-6Al-4V for biomedical applications: Surface modification, mechanical performance and biological response. *Materials Science and Engineering: C*, v. 114, 2020.
- YANG, LEI et al. Continuous graded Gyroid cellular structures fabricated by selective laser melting: Design, manufacturing and mechanical properties, v. 162, p. 398, 2019.
- YU, HANCHEN et al. Comparison on mechanical anisotropies of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy and 304 stainless steel, v. 695, p. 92-100, 2017.
- ZHOU, Chi et al. Design and mechanical properties of functionally graded porous titanium with high-strength and low-modulus for load-bearing implant applications. *Materials Science and Engineering: A*, v. 661, p. 80-90, 2016.