

Fixação óssea com integração estética: avaliação experimental e computacional de placas de osteossíntese do calcâneo em filigrana

Bone fixation with aesthetic integration: experimental and computational evaluation of filigree calcaneal osteosynthesis plates

Olga Noronha¹ | Rafael Coelho¹ | Orlando Branco Simões^{1,2,3} | António Ramos⁴ | José Carlos Noronha⁵ | José Simões¹

¹esad.idea – Investigação em Design e Arte, Matosinhos, Portugal

²Unidade Local de Saúde Gaia e Espinho, Vila Nova de Gaia, Portugal

³Faculdade de Medicina da Universidade do Minho, Braga,, Portugal

⁴Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

⁵Hospital São Francisco, Porto, Portugal

<https://doi.org/10.82452/me20263703>

resumo

Este estudo apresenta uma nova placa de osteossíntese para o calcâneo. A sua caracterização biomecânica foi realizada por modelos computacionais e ensaios experimentais com osso sintético, comparando uma placa de filigrana (2 mm, cinco parafusos) com uma placa comercial equivalente, com boa concordância entre resultados numéricos e experimentais. A nova placa demonstrou comportamento biomecânico comparável ao da placa comercial, com tensões de von Mises da ordem dos 450 MPa e níveis semelhantes de estabilização, indicando adequação à consolidação óssea, sobretudo em ossos sujeitos a cargas baixas ou moderadas.

Keywords: Filigrana, Fratura óssea, Placa de osteossíntese, Prótese do calcâneo, Design centrado no paciente

abstract

This study presents a new osteosynthesis plate for the calcaneus. Its biomechanical characterization was carried out using computational models and experimental tests with synthetic bone, comparing a filigree plate (2 mm thickness, five screws) with a commercially available equivalent plate, showing good agreement between numerical and experimental results. The new plate demonstrated biomechanical behavior comparable to that of the commercial plate, with von Mises stresses of around 450 MPa and similar levels of stabilization, indicating its suitability for bone healing, particularly in bones subjected to low or moderate mechanical loads.

Keywords: Filigree, Bone fracture, Osteosynthesis plate, Calcaneal prosthesis, Patient centred design

1- INTRODUCTION

No trabalho de Noronha [1] é apresentado o conceito “joalheria medicamente prescrita”, que suscitou múltiplas reações, reflexões e formas de envolvimento, conduzindo à especulação sobre a superfície corporal, a psique, os limites interiores e exteriores do corpo e as formas como estas práticas renegociam discursos sobre o humano [1,2]. Ao articular práticas médicas e de joalheria, a sua investigação questiona o paradigma que historicamente tem marcado a joalheria, segundo o qual o adorno corporal é entendido como prática normativa. Esta normatividade revela-se, contudo, complexa: o adorno corporal não serve apenas para o embelezamento, a afirmação de estatuto social ou a marcação de eventos biográficos. Noronha procurou expandir a joalheria para além destes usos e entendimentos, ultrapassando a sua condição de mero adorno. A investigação baseada na prática evidencia, assim, a preocupação em alargar as possibilidades da joalheria na sua relação com o corpo, estendendo o adorno à modificação e ao melhoramento corporal, e estes, por sua vez, à reparação médica [1].

No que respeita ao conceito “biofiligrana”, este inspira-se numa prática artística profundamente enraizada e num símbolo cultural da identidade portuguesa. A filigrana tradicional é amplamente reconhecida como uma das artes mais emblemáticas de Portugal a nível internacional [3,4], com origens que remontam aproximadamente a 2000 a.C. [5]. Esta técnica perdurou ao longo de milénios, preservada através de centros de produção artesanal no norte de Portugal, particularmente em municípios como Gondomar e Póvoa de Lanhoso. A filigrana constitui uma forma delicada e intrincada de trabalho em metal, frequentemente associada à joalheria fina e às artes decorativas, caracterizando-se por padrões semelhantes a rendas, obtidos através da torção, curvatura e soldadura de fios metálicos muito finos, geralmente em ouro ou prata, para a criação de desenhos, normalmente, muito elaborados. O conceito aqui proposto (figura 1) consiste na conceção, desenvolvimento e validação científica de placas de fixação óssea baseadas na técnica tradicional da filigrana, explorando placas em filigrana (figura 2) como dispositivos médicos fiáveis e adequados à osteossíntese. Após a consolidação óssea, a placa de fixação pode ser removida e transformada em joalheria usável. Para a prova de conceito, foi utilizada uma placa típica para fratura do calcâneo, em comparação com uma placa comercial idêntica. Estes ensaios constituem avaliações prelimi-

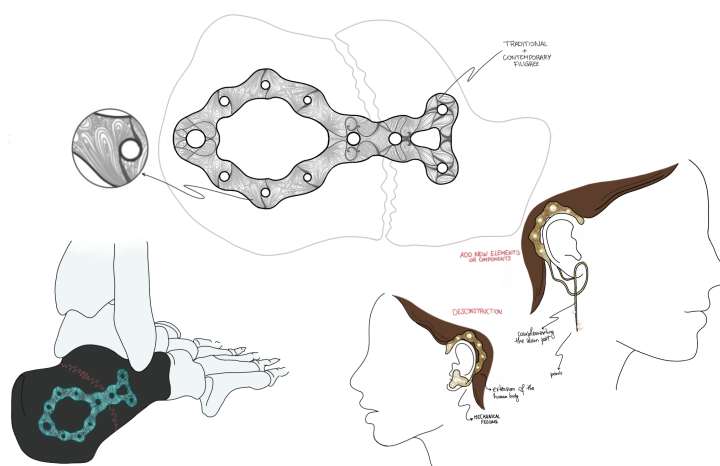


Fig. 1 | Ilustração de exemplo de conceito “biofiligrana” para a cicatrização de fraturas ósseas.



Fig. 2 | Exemplos de placas de fixação óssea no âmbito do conceito “biofiligrana”.

nares no âmbito da investigação em design, não configurando validação clínica, e destinam-se exclusivamente a demonstrar a viabilidade conceptual da proposta. Os resultados iniciais dos ensaios mecânicos respondem à principal questão de investigação: poderão as placas de fixação óssea em filigrana para osteossíntese ser prescritas clinicamente? A figura 3 apresenta uma proposta de alfinete resultante da transformação de uma placa de osteossíntese do calcâneo numa peça de joalharia.

O estudo envolveu o desenvolvimento de placas de fixação óssea em filigrana [6,7]. Estas placas de “joalharia médica” incorporam padrões geométricos intrincados, como espirais, escamas, rodilhões, caracóis e cornucópias, sendo fabricadas a partir de materiais biocompatíveis, incluindo aço inoxidável e prata (figura 4). A realização de ensaios mecânicos é fundamental para avaliar a viabilidade estrutural destes designs no contexto da fixação ortopédica, sendo particularmente relevante a identificação de configurações que otimizem a transferência de carga e minimizem as concentrações de tensões [8,9].

Após a conclusão da consolidação óssea, estas placas destinam-se a ser removidas e transformadas em joalharia usável como pulseiras, pendentes ou anéis, simbolizando o processo de recuperação e a resiliência pessoal do paciente [10]. Este paradigma introduz dimensões estéticas, emocionais e simbólicas nos dispositivos médicos, reinterpretando os implantes ortopédicos não apenas como elementos funcionais, mas também como objetos dotados de significado terapêutico e pós-terapêutico.



Fig. 3 | Proposta de alfinete resultante da transformação de uma placa de osteossíntese do calcâneo (simulação por raio-X) numa joia.



Fig. 4 | Exemplos de placas de fixação óssea do calcâneo em filigrana.

2- MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação experimental, foram concebidos e fabricadas placas de fixação óssea para o calcâneo (figura 5). Para efeitos de comparação, foi utilizada uma placa comercial (www.arthrex.com), de espessura e dimensões equivalentes, obtida por engenharia inversa.

2.1. Modelo computacional

Um modelo digital de um calcâneo fraturado foi desenvolvido utilizando a aplicação SolidWorks. Foram avaliadas duas placas de osteossíntese: uma placa com padrão de filigrana e uma placa comercial. O modelo incluiu cinco parafusos corticais (2 mm × 20 mm), representados de forma simplificada como cilindros, com o objetivo de aumentar a eficiência computacional, bem como dois parafusos percutâneos (5 mm × 45 mm) responsáveis pela compressão dos fragmentos anterior e posterior, de acordo com a recomendação do cirurgião. A fratura foi modelada como sendo do tipo Sanders II (figura 5).

Nas simulações por elementos finitos (FEM), os elementos decorativos da filigrana foram excluídos, uma vez que não influenciam de forma significativa a rigidez estrutural, mas aumentam substancialmente a complexidade computacional. Assumiu-se, assim, que o osso cortical se encontrava em contacto total com a placa, tendo sido aplicado um *offset* à superfície óssea para garantir um ajuste geométrico preciso (ideal). A fratura foi modelada com um afastamento de 1 mm, de modo a impedir o contacto direto entre os fragmentos ósseos após condição de carga.

As propriedades dos materiais foram definidas assumindo um comportamento linear elástico e isotrópico (tabela 1). Foi aplicada uma carga estática, de modo a reproduzir as condições experimentais, correspondente a uma força vertical de 350 N com uma inclinação de 20° no

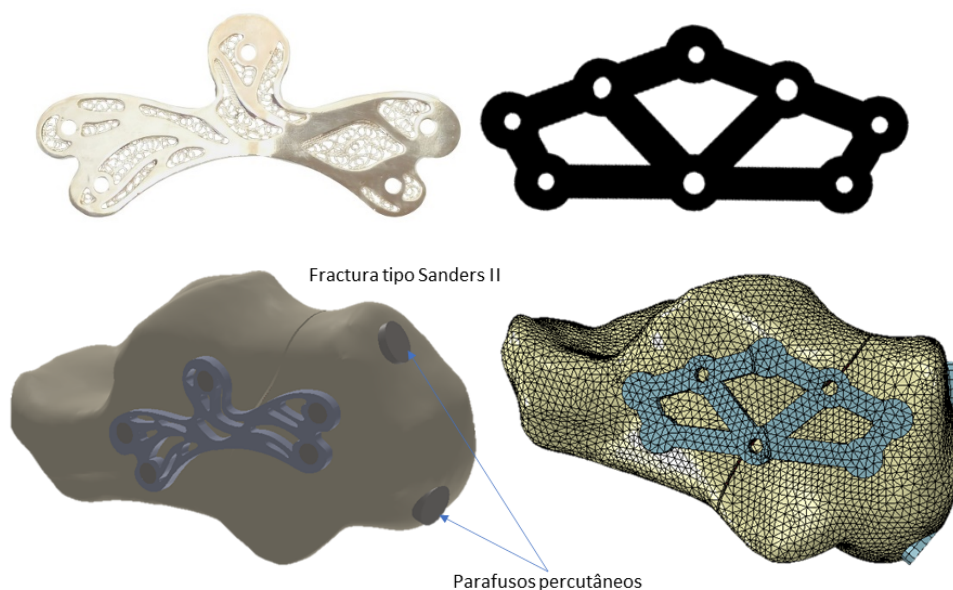


Fig. 5 | Modelo CAD do calcâneo com placa em filigrana e malha de elementos finitos com placa comercial.

plano frontal. As condições de contacto consideradas incluíram um coeficiente de atrito de 0,3 nas interfaces osso cortical-placa, contacto colado nas interações osso-parafuso e um coeficiente de atrito de 0,1 nos contactos entre parafusos e placa. As simulações numéricas foram realizadas utilizando o software ABAQUS de análise por elementos finitos.

Para o modelo de elementos finitos, considerou-se elementos tetraédricos de segunda ordem, adequados à representação de geometrias anatómicas complexas [11]. A malha era composta por 107 200 elementos, tendo-se, através de testes de convergência, identificado um tamanho ótimo de elemento de 1,2 mm.

Tab. 1 | Propriedades dos materiais utilizadas nas simulações.

Material	Módulo de elasticidade (MPa)	Poisson ratio
Osso cortical	16000	0,30
Osso trabecular	205	0,26
Aço inoxidável 316L	200 000	0,30
Titânio	110 000	0,30

2.2. Modelo experimental do calcâneo

Foi utilizado um modelo composto de calcâneo Sawbones® (Absolute™ 4th Gen., núcleo sólido em espuma de 17 PCF, tamanho grande), no qual foi criada cirurgicamente uma fratura na região média, posteriormente estabilizada por um cirurgião experiente. As placas de osteossíntese foram fabricadas em aço inoxidável 316L, com espessura de 2 mm, e fixadas com cinco parafusos de titânio, complementados por dois parafusos percutâneos, como identificado na figura 5. A figura 6 apresenta a configuração da montagem experimental.

O calcâneo foi suportado por uma base em poliuretano, posicionada com uma inclinação de 20° em relação à horizontal, garantindo condições de ensaio reprodutíveis. Uma haste de carregamento com 20 mm de diâmetro foi utilizada e para coincidir com a superfície do calcâneo, permitindo uma distribuição uniforme da carga aplicada.

As extensões foram medidas através de rosetas (modelo KFG-1-120-D17-11 L3M2S, Kyowa Electronic Instruments). Duas rosetas foram posicionadas no osso cortical, em proximidade com a placa e outra na zona interna do calcâneo junto à fratura, e um extensômetro adicional foi colocado diretamente na placa (figura 6). Esta instrumentação permitiu a comparação direta entre os resultados experimentais e as previsões do modelo computacional. A aplicação da carga foi realizada numa máquina universal de ensaios Shimadzu com capacidade de 10 kN, utilizando cargas verticais de 200, 300 e 350 N, aplicadas a uma velocidade de 5 mm/min. Cada nível de carga foi mantido durante 10 segundos, de forma a assegurar medições estáveis e repetíveis.

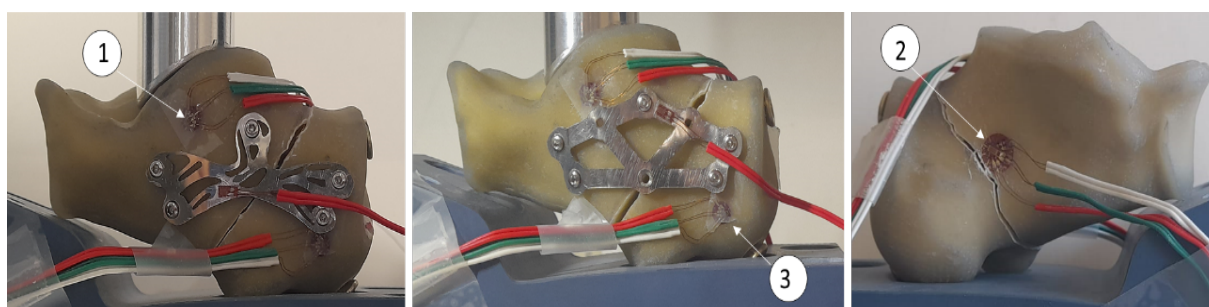


Fig. 6 | Modelos experimentais utilizados.

3- RESULTADOS

Os resultados são apresentados de acordo com o procedimento experimental, seguidos da comparação com as previsões do modelo de elementos finitos nas regiões correspondentes. A validação desse modelo permitiu estimar as extensões/deformações em regiões ósseas adicionais e as tensões no interior das placas de fixação, verificando assim a integridade estrutural global do sistema.

3.1. Validação do modelo de elementos finitos

As deformações experimentais obtidas para três níveis de carga foram comparadas com as deformações calculadas numericamente nas localizações correspondentes às rosetas dos extensômetros. No modelo computacional, os valores de cinco nós dentro de cada região do sensor foram comparados com as medições experimentais. A figura 7 apresenta a correlação entre os resultados experimentais e numéricos para o calcâneo intacto, bem como para as placas comercial e de filigrana. Observou-se uma forte concordância, com um coeficiente de correlação (R) de 0,95 e uma inclinação de 0,88. As deformações previstas pelo modelo

numérico foram sistematicamente ligeiramente superiores às experimentais, com um desvio médio de aproximadamente $\sim 12 \mu\epsilon$ na origem.

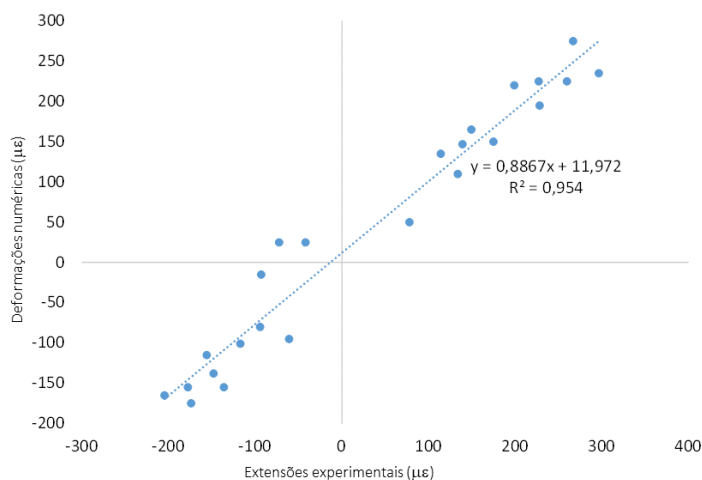


Fig. 7 | Validação do modelo (experimental vs. computacional).

3.2. Rigidez experimental da fixação

A rigidez da fixação foi determinada a partir da relação entre a força aplicada e o deslocamento registado. Em comparação com o calcâneo intacto, ambos os sistemas de fixação apresentaram uma redução da rigidez global. A resposta mecânica evidenciou uma fase inicial de acomodação, mais pronunciada no caso da placa em filigrana, seguida de recuperação após o descarregamento. O modelo intacto apresentou uma rigidez de 1445 N/mm, enquanto a fixação comercial atingiu 1065 N/mm e a placa em filigrana atingiu 725 N/mm.

3.3. Comparação das extensões experimentais nas rosetas

A tabela 2 sintetiza os principais resultados experimentais. As medições de extensão apresentaram elevada repetibilidade, com desvios inferiores a 5% ao longo de cinco ensaios consecutivos. Os dados obtidos através dos extensómetros indicaram um aumento das extensões corticais quando a placa de filigrana foi ensaiada sob condições de carga idênticas às aplicadas à placa comercial. Na roseta 1, localizada em proximidade com a placa, as extensões na superfície cortical foram as mais reduzidas em todos os modelos analisados. Em contraste, a roseta 2 registou valores mais elevados, tendo

Tab. 2 | Comparação das extensões experimentais no osso e na placa.

	Roseta 1		Roseta 2		Roseta 3		Ext.
	Extensão principal ($\mu\epsilon$)		Extensão principal ($\mu\epsilon$)		Extensão principal ($\mu\epsilon$)		($\mu\epsilon$)
	máxima	mínima	máxima	mínima	máxima	mínima	
Calcâneo intacto	206,3 \pm 1	-156,6 \pm 2	550,3 \pm 3	-980,3 \pm 2	285,2 \pm 4	-202,0 \pm 2	

Filigrana	230,9 ± 2	-213,9 ± 2	1310,0 ± 5	-2211,0 ± 1	636,3 ± 4	-420,7 ± 2	-27,1 ± 5
Comercial	201,5 ± 4	-208,6 ± 5	595,4 ± 9	-438,1 ± 2	649,3 ± 1	-509,4 ± 6	-160,0 ± 5

sido identificada como a região crítica no contexto pós-fratura. Ambas as placas induziram um aumento das extensões corticais nas regiões monitorizadas; contudo, a placa de filigrana apresentou o efeito mais pronunciado, com incrementos das extensões corticais de 126% em compressão e de 138% em tração, quando comparada com a condição intacta.

3.4. Resultados computacionais

A integridade estrutural das placas de fixação foi avaliada através da análise das tensões de von Mises sob a carga experimental máxima de 350 N (figura 8). Ambos os modelos apresentaram valores máximos de tensão concentrados nas proximidades dos orifícios dos parafusos, em concordância com as regiões de concentração de tensões tipicamente esperadas nestes dispositivos. A tensão máxima de von Mises atingiu aproximadamente 450 MPa na placa em filigrana e 435 MPa na placa comercial. Esta diferença, da ordem dos 3%, indica que a placa em filigrana apresenta um desempenho estrutural comparável ao da placa convencional.

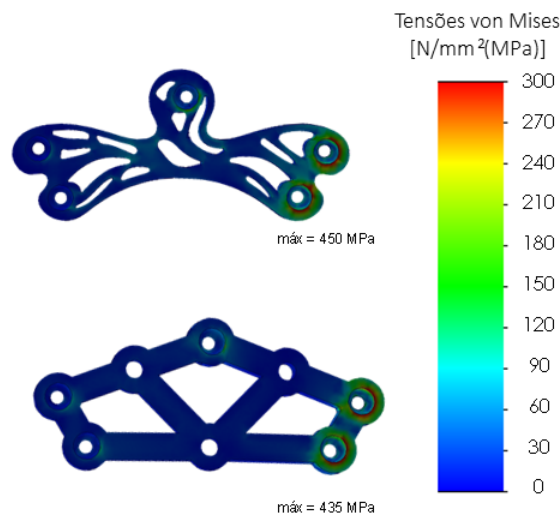


Fig. 8 | Distribuição das tensões de von Mises nas placas comercial e de filigrana sob carregamento de 350 N.

A estabilidade da fratura foi avaliada através da medição do deslocamento ao longo da linha de fratura nos modelos de elementos finitos. A comparação direta entre a placa comercial e a placa em filigrana revelou padrões de deslocamento praticamente idênticos. Ambos os sistemas de fixação proporcionaram uma estabilidade comparável, sendo a diferença máxima de deslocamento inferior a 5% entre as duas placas estudadas. Estes resultados confirmam que a placa em filigrana mantém um desempenho de estabilização da fratura equivalente ao da solução comercial.

A distribuição das extensões principais mínimas no osso do calcâneo é apresentada na figura 9. Tanto o modelo com placa em filigrana como o modelo com placa comercial exibiram padrões de extensões semelhantes, com valores máximos consistentemente localizados nas

regiões de fixação dos parafusos. Não foram observadas diferenças significativas entre as duas placas, indicando que a geometria em filigrana não altera de forma adversa o ambiente fisiológico de deformações do osso.

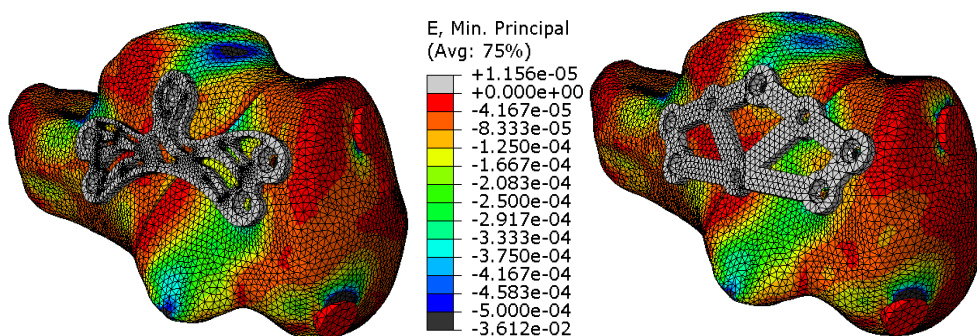


Fig. 9 | Distribuição das deformações principais mínimas no osso para as placas de filigrana e comercial.

4- DISCUSSÃO

A integração de padrões de filigrana em placas de osteossíntese representa uma interseção inovadora entre a engenharia biomédica, o património cultural e o design centrado no paciente. Este estudo avaliou o desempenho mecânico e a viabilidade clínica de uma placa de fixação do calcâneo com padrão de filigrana, em comparação com uma placa comercial convencional. Ambos os dispositivos suportaram as cargas aplicadas sem evidência de rotura do material. As análises por elementos finitos e as medições experimentais de extensão demonstraram que a placa em filigrana apresentou valores ligeiramente superiores, bem como um deslocamento relativo ao longo da linha de fratura aproximadamente 5% superior ao da placa comercial. Ambas as placas proporcionaram uma estabilidade estrutural comparável, sugerindo que o design em filigrana não compromete a integridade mecânica necessária para uma fixação eficaz da fratura.

Estes resultados estão em consonância com estudos anteriores que demonstram que padrões decorativos ou geometrias não convencionais podem ser integrados em dispositivos de fixação óssea sem comprometer significativamente o desempenho mecânico. Trabalhos prévios (por exemplo, [6]) indicaram igualmente que placas de fixação óssea em filigrana permitem alcançar um desempenho comparável ao de soluções convencionais, desde que adequadamente concebidas. Os resultados obtidos também corroboram conclusões de investigações recentes sobre a influência da configuração dos parafusos: estudos biomecânicos demonstram que a orientação, o número e o posicionamento dos parafusos afetam de forma significativa a rigidez primária e a transferência de carga nos sistemas de fixação do calcâneo [12]. No presente estudo, as concentrações máximas de tensão ocorreram, consistentemente, em torno dos orifícios dos parafusos, reforçando o papel crítico da interação parafuso-placa no comportamento mecânico do implante.

Os resultados clínicos e a tomada de decisão dependem, assim, de uma criteriosa seleção do paciente e da fratura. A fixação percutânea é particularmente indicada quando técnicas fechadas ou minimamente invasivas permitem restaurar de forma fiável a faceta posterior e as dimensões globais do calcâneo, e quando possível alcançar uma compressão interfragmentar estável. Para fraturas Sanders II que preenchem estes critérios, as técnicas percutâneas podem reduzir o tempo operatório, a duração da hospitalização e as taxas de possíveis complicações, mantendo resultados funcionais comparáveis a médio prazo.

Algumas limitações deste estudo devem ser reconhecidas. Os modelos ósseos sintéticos, embora adequados para ensaios mecânicos iniciais, não reproduzem integralmente a complexidade do osso humano, incluindo a heterogeneidade estrutural, a anisotropia e as respostas biológicas. Estudos *in vivo* a longo prazo serão necessários para avaliar o comportamento à fadiga, a corrosão, a osseointegração e a segurança das placas em filigrana. Adicionalmente, investigações de carácter psicológico e cultural serão importantes para compreender as preferências dos pacientes, a aceitabilidade clínica e o impacto da dimensão estética na adesão ao tratamento proposto. Por fim, trabalhos futuros deverão explorar a otimização das geometrias decorativas, de modo a equilibrar o desempenho mecânico com o valor estético e emocional

5- CONCLUSÕES

A transformação de placas de osteossíntese em biojoalheria, artefactos usáveis preservados após a consolidação da fratura, introduz uma nova dimensão nos cuidados ortopédicos. Este paradigma expande o papel dos dispositivos de fixação para além da estabilização mecânica, integrando dimensões relacionadas com o bem-estar psicológico e emocional dos pacientes. Ao permitir que os indivíduos preservem um símbolo tangível e significativo do seu processo de recuperação, a placa em filigrana promove resiliência, identidade e uma ligação pessoal à experiência de cura da fratura.

A placa em filigrana avaliada neste estudo demonstrou um desempenho biomecânico comparável ao dos sistemas de fixação convencionais, incorporando simultaneamente uma filosofia de design inovadora e centrada no paciente. Através da integração da funcionalidade biomédica com o património cultural e a expressão estética, esta abordagem enriquece a experiência do paciente e propõe uma redefinição do papel dos dispositivos médicos, evidenciando o seu potencial para contribuir de forma integrada para a recuperação física e emocional.

AGRADECIMENTOS

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento do estudo através do projeto 2023.15616.PEX; <https://doi.org/10.54499/2023.15616.PEX> e do projeto UID/05237/2025 (esad.idea); <https://doi.org/10.54499/UID/05237/2025>.

REFERÊNCIAS

- [1] Noronha, O. (2018). *Becoming The Body': An investigation into the possibilities and affordances of "Medical Jewellery"* (Doctoral dissertation, Goldsmiths, University of London).
- [2] Ferrara, N. (Ed.). (2006). *Angiogenesis: from basic science to clinical applications*. CRC Press.
- [3] Rodrigues, R. (2022). *The social life of filigree objects* (Doctoral dissertation, University of Birmingham).
- [4] Ratten, V., & Braga, V. (2024). Internationalization through digital empowerment for women filigree jewelry artisan entrepreneurs in Portugal. *Thunderbird international business review*, 66(5), 419–427.
- [5] Soares, T. (2024, January 16). The history of filigree – a symbol of Portuguese love. *Mar d'Estórias*. <https://www.mardestorias.com/en/the-history-of-filigree-a-symbol-of-portuguese-love/>
- [6] Noronha, O., Miranda, C., Coelho, R., Ramos, A., Simões, J., & Noronha, J. C. (2023). A new concept of bone biofiligree fixation plate for cubital fractures. In *Congress of the Portuguese Society of Biomechanics* (pp. 131–141). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [7] Noronha, O., Coelho, R., Ramos, A., Simões, J. A., & Noronha, J. C. (2025). The Biofiligree® concept: innovative approach to bone fracture healing, 2025 Annual Meeting of the European Orthopaedic Research Society (EORS2025), Davos, Switzerland, 15 june–19 july.
- [8] Yao, X., Ding, P., Wang, C., Miao, H., Chao, Y., Wang, J., Hu, M., & Tang, J. (2024). Finite element analysis of restoring length with multiple internal fixations in calcaneal body fracture. *Scientific reports*, 14(1), 23734.
- [9] Lv, M. L., Ni, M., Sun, W., Wong, D. W. C., Zhou, S., Jia, Y., & Zhang, M. (2022). Biomechanical analysis of a novel double-point fixation method for displaced intra-articular calcaneal fractures. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 10, 791554.
- [10] Miranda, C. (2023). *Biofiligrana. Estudo de padrões em filigrana para aplicações em joalheria biomédica*. (Dissertation thesis). Escola Superior de Artes e Design, Matosinhos.
- [11] Ramos, A., & Simões, J. A. (2006). Tetrahedral versus hexahedral finite elements in numerical modelling of the proximal femur. *Medical engineering & physics*, 28(9), 916–924.
- [12] Baba, V., Capek, L., Kopp, L., & Bittner, V. (2025). Biomechanical comparison of screw position in variable angle locking plate in intra-articular calcaneal fractures: Cadaveric and radiologic study. *Clinical biomechanics*, 106534.