

COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO-MECÂNICO DO ESTROMA CORNEAL

Luísa M. Santos¹ e Fernando M.F. Simões²

¹Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

²CERIS e Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

luisa.m.santos@tecnico.ulisboa.pt; fernando.simoes@tecnico.ulisboa.pt

PALAVRAS-CHAVE: Córnea, Interação eletroquímico-mecânica

1 INTRODUÇÃO

O olho, órgão vital do corpo humano, possui tecidos transparentes essenciais para a transmissão da luz. Entre estes, a córnea, localizada na sua região anterior, é composta por 5 camadas distintas: epitélio (na sua zona mais anterior), a camada de Bowman, o estroma (que constitui 90% da córnea), a membrana de Descemet e o endotélio (na sua zona mais posterior). Caracterizada pela sua forma convexa, espessura não uniforme, natureza avascular e reduzido número de células, a córnea, além de transmitir a luz, proporciona estabilidade mecânica e protege o olho [1].

Uma das suas principais características é a transparência que está diretamente relacionada com a hidratação do estroma (cerca de 80% de sua massa é composta por água) e com a presença de uma distribuição organizada de macromoléculas de colagénio e proteoglicanos [2]. O colagénio representa quase 10% da massa da córnea e está organizado em cerca de 250 lamelas, nas quais as fibras se dispõem paralelamente entre si, mas em direções ortogonais de lamela para lamela, contribuindo assim para a transparência da córnea à luz. Os proteoglicanos, que consistem numa proteína central à qual se ligam cadeias de glicosaminoglicanos, organizam a estrutura do tecido, regulam o crescimento celular, influenciam a atividade dos fatores de crescimento e retêm água, mantendo assim a hidratação do estroma [1].

Na água presente no interior do estroma, podem ser encontradas diversas espécies iónicas, principalmente iões sódio e cloreto. Em condições de pH neutro, os proteoglicanos possuem carga elétrica negativa. Tal facto resulta num excesso de catiões presentes no fluido existente no interior do estroma por forma a manter a neutralidade elétrica global do tecido [2]. As cargas fixas conferem ao estroma propriedades semelhantes aos de uma membrana semipermeável, permitindo a passagem seletiva de água e de iões entre o estroma e o fluido circundante até que os respetivos potenciais eletroquímicos se equilibrem em ambos os lados da membrana [2] e criando condições para que quantidades como a pressão da água, as concentrações iónicas e o potencial elétrico difiram entre o estroma e o fluido circundante [2].

Por outro lado, como acontece noutros tecidos moles eletricamente carregados como a cartilagem articular, o estroma pode mudar de tamanho dependendo da relação entre as concentrações iónicas no fluido presente no seu interior e no fluido circundante. No caso de a concentração salina no fluido circundante ser superior, a água tende a sair do estroma por efeito osmótico e o tecido diminui de volume. O oposto ocorre quando a concentração salina é superior no fluido presente no interior do estroma; nesse caso, a água tende a entrar no tecido e este aumenta de volume.

A patologia corneal mais prevalente é o queratocone, que afeta aproximadamente 1 em cada 2000 indivíduos [2]. Esta patologia é reconhecida por perturbar a arquitetura do colagénio, reduzindo

o espaçamento intermolecular e alterando a orientação das fibrilas, resultando no adelgaçamento e afinamento da córnea que induz astigmatismo e diminui a acuidade visual [3].

2 MÉTODOS

A lei constitutiva utilizada neste trabalho foi inicialmente formulada em [4] e aplicada na modelação do comportamento da cartilagem articular. Baseando-se nas leis da termodinâmica e incorporando as restrições de eletroneutralidade e incompressibilidade do tecido, descreve o estroma corneal como um meio poroso elástico linear no qual ocorrem interações eletroquímico-mecânicas. Foi tido em conta o aumento da carga elétrica fixa negativa do estroma devido ao facto de os iões cloreto não permanecerem livres, ligando-se a determinados recetores presentes nas macromoléculas do tecido [2].

3 RESULTADOS E CONCLUSÕES

A lei constitutiva foi validada efetuando simulações numéricas e comparando os seus resultados com dados experimentais disponíveis na literatura em ensaios de compressão confinada [5, 6]. A lei constitutiva (Eq. 1) relaciona a tensão normal (σ) na direção da compressão confinada com a correspondente extensão (ε) e com a pressão osmótica (π_{osm}) através de três parâmetros materiais:

$$\sigma = -\pi_{\text{osm}} (1 + \alpha_p) + E_{\text{sat}} (1 + \alpha_w \pi_{\text{osm}}) \varepsilon. \quad (1)$$

Após a determinação dos parâmetros do modelo, verificou-se que os resultados numéricos reproduzem bem o comportamento experimental, especialmente quando o efeito da ligação dos iões cloreto é considerado.

Ao formular uma lei constitutiva capaz de descrever o comportamento do estroma corneal, relacionando tensões e deformações resultantes de ações químicas e mecânicas, este estudo visa contribuir para a compreensão da biomecânica da córnea, particularmente no que diz respeito ao aumento da hidratação e à redução da transparência devido ao enfraquecimento das fibras de colagénio. Compreender a resposta do tecido sob várias condições pode ser útil no diagnóstico médico e tratamento do queratocone e de outras patologias e, por outro lado, permite apoiar o desenvolvimento de tecidos artificiais que possam imitar as funções da córnea.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através de financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

- [1] E.M. Espana and D.E. Birk, "Composition, structure and function of the corneal stroma", *Experimental Eye Research*, vol. 198, 108137, 2020.
- [2] B. Loret and F.M. F. Simões, *Biomechanical Aspects of Soft Tissues*. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [3] J. Santodomingo-Rubido, G. Carracedo, A. Suzaki, C. Villa-Collar, S.J. Vincent and J.S. Wolffsohn. "Keratoconus: An updated review," *Journal of Optometry*, vol. 12, pp. 23–142, 2019.
- [4] M. Bento, F.M. F. Simões and B. Loret, "Finite element simulations of the electro-chemo-mechanical behavior of articular cartilage. Part I: theoretical formulation", *Journal of Computation and Artificial Intelligence in Mechanics and Biomechanics*, vol. 2, pp. 1-16, 2022.
- [5] S.R. Eisenberg and A.J. Grodzinsky. "Swelling of articular cartilage and other connective tissues: Electromechanochemical forces", *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 3, pp. 148–159, 1985.
- [6] S. Hodson, D. Kaila, S. Hammond, G. Rebello and Y. Al-Omari. "Transient chloride binding as a contributory factor to corneal stromal swelling in the ox", *Journal of Physiology*, vol. 450, pp. 89–103, 1992.