cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Fosfato e Carbonato na Biomineralização da Casca do Ovo de Galinha e Crescimento em Espessura da Casca por Deposição Aditiva de Nanogotas

Antonio Valadão Cardoso [1], Rodrigo Novaes Ferreira [2], Maria Sylvia Dantas [3], Leonardo H. R. Dos Santos [4], Ana Paula Gomes [5], Lara Luz de Assis [4], Rosana A. M. Souto [1]

[1] Escola de Design, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), [2] Centro de Microscopia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), [3] Depto. Engenharia Metalúrgica, (UFMG), [4] Departamento de Química (UFMG), [5] LCPNano-Física (UFMG), Belo Horizonte, MG.

Introdução

Dentro do útero da galinha poedeira, em menos de um dia, partículas microscópicas de minerais contendo cálcio [1,2], sob a ação de substâncias presentes no fluido uterino, dissolvem-se e, na forma de nanogotas, precipitam sobre a membrana interna do ovo (aquela que vemos quando quebramos um ovo). Assim, elas nucleiam uma casca sólida que protegerá a clara e a gema e, posteriormente, um embrião em desenvolvimento [3].

Imagine toda a superfície do útero da galinha expelindo continuamente essas vesículas, que reagem e se combinam com substâncias presentes no fluido uterino para formar nanogotas contendo minerais de cálcio. Essas nanogotas são produzidas continuamente até que o ovo atinja espessura suficiente para formar um sólido muito poroso, mas também muito resistente.

Este trabalho indicou que fibras de carbonato de cálcio surgem a partir das nanogotas e, incorporadas a uma matriz orgânica, formam um compósito. Essa construção de um sólido dentro do fluido uterino difere de qualquer processo de engenharia conhecido ou desenvolvido por nós.

Ao combinar componentes minerais e orgânicos e utilizar sofisticadas nanogotas, os ovos das aves mostram que a evolução aprendeu a utilizar fenômenos básicos que ocorrem nos minerais de cálcio para construir ovos e conchas, bem como esqueletos de seres complexos, como os seres humanos.

Nossa hipótese foi de que a hidroxiapatita está envolvida na formação da casca do ovo de galinha e está associada aos estágios iniciais da mineralização da calcita.

Objetivo

O objetivo deste estudo foi investigar a organização estrutural e composicional das diferentes camadas da casca do ovo, com ênfase particular na cutícula e em sua relação com a mineralização da calcita.

Metodologia

1. Ovos de galinha adquiridos em supermercado → 2. Quebra dos ovos,limpeza com água e secagem a 60ºC →

3. Abordagem multimodal combinando: MEV/SE/BSE (Thermo Fisher APREO-2C, FEI Quanta 3D FEG) e espectroscopias EDS (Oxford), micro-FTIR-ATR (Shimadzu), Raman (Horiba LabRAM e Witec Alpha 300 RA).

→ Três questões de pesquisa: (i) Qual é a morfologia e a composição da Cutícula e de sua interface com a Camada Vertical (CV)? (ii) Como o crescimento da calcita evolui de estruturas unidimensionais (1D, fibras) para bidimensionais (2D, placas) e tridimensionais (3D, volume)? e (iii) O aumento da espessura da casca do ovo envolve um processo sequencial de formação do compósito, no qual as fibras de calcita se formam primeiro e a matriz orgânica é posteriormente depositada ao redor delas?

Resultados e Discussão

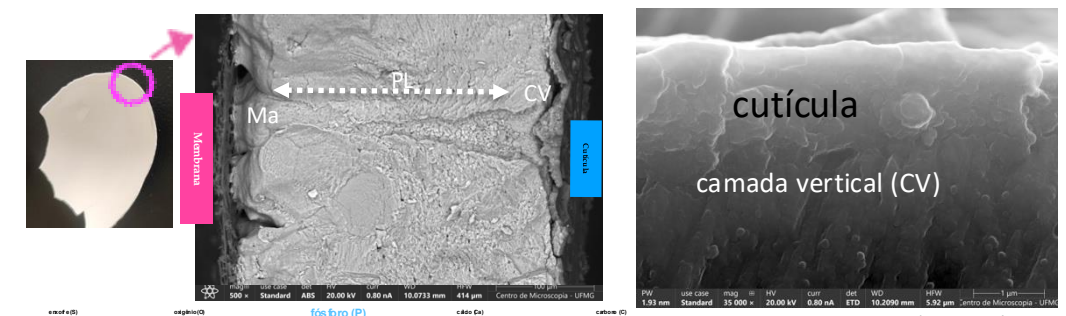


Figura 1- A casca de ovos de (aves, quelônios, dinossauros, etc) tem a mesma sequência de camadas micrométricas: Cutícula (C), camada vertical (CV), camada paliçada (PL) e camada mamilar (Ma) [4]. A membrana interna contém o ovo e é o sítio da nucleação heterogênea do polimorfo de $CaCO_3$ (calcita nas aves, aragonita nos quelônios).

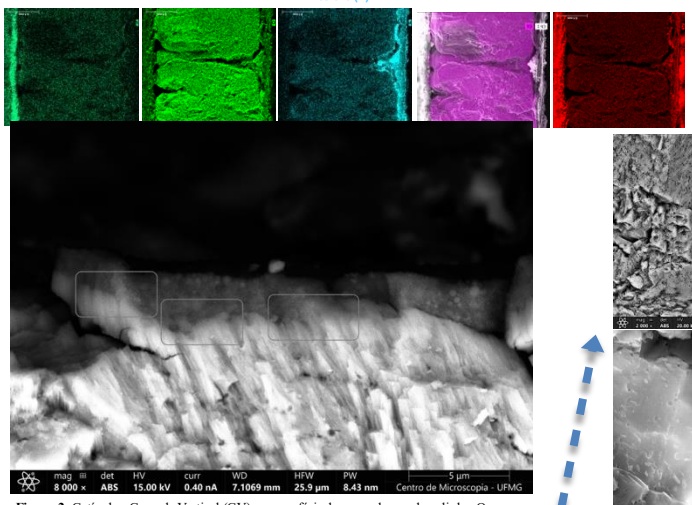


Figura 2- Cutícula e Camada Vertical (CV) na superfície da casca de ovo de galinha. Os retângulos cinzas sugerem continuidade entre estas camadas. Parte inferior da cuticula -->nanoesferas atribuídas à hidroxiapatita. Fibras claras -> Camada Vertical.

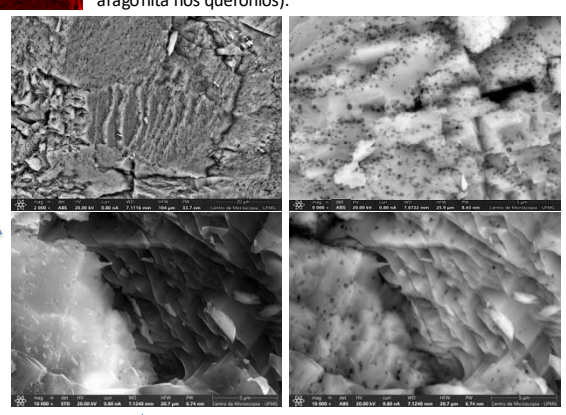


Figura 3- Quatro imagens da camada Paliçada (PL) que corresponde a quase 80% da espessura da casca. Imagem da direita com detector SE (contraste topográfico) e da esquerda com detector BSE (contraste de elétrons retroespalhados) do MEV (microscópio eletrônico de varredura). Observar grande quantidade de poros.



Figura 4- Detalhe da camada Paliçada (PL) mostrando nano-hemisférios que parecem constituir unidades de deposição responsáveis pelo crescimento em espessura da casca. Observar os detalhes dos poros. Imagem da direita e do centro detector SE, imagem da esquerda detector BSE do MEV.

A espectroscopia micro-Raman (Figuras 5 a 7) realizada na borda externa da casca do ovo de galinha sugere uma transição de CHAp (hidroxiapatita carbonatada) para calcita.

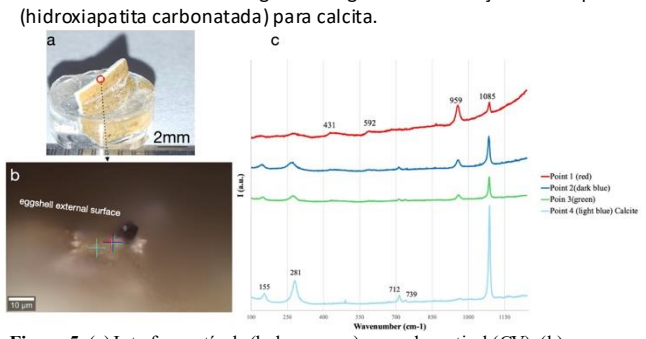


Figura 5- (a) Interface cutícula (lado marrom)–camada vertical (CV); (b) Quatro pontos marcados na imagem — vermelho (1), azul-escuro (2), verde (3) e azul-claro (4) — correspondem às posições investigadas na região cutícula (C)–camada vertical (CV), e seus espectros Raman são apresentados em (c).

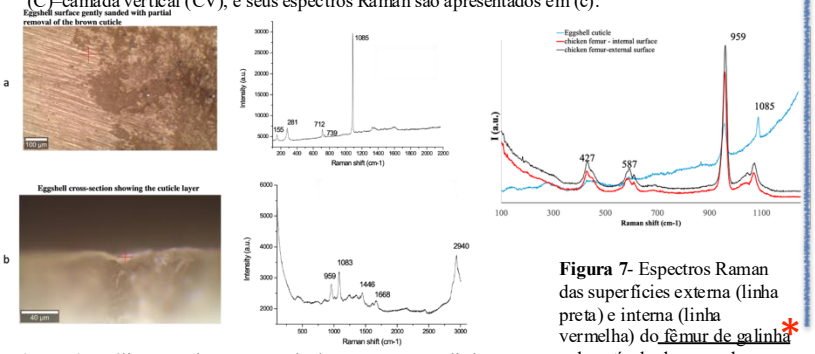


Figura 6- Análise por micro-Raman de duas preparações distintas de amostras: (a) superfície da casca do ovo suavemente lixada, com remoção parcial da cutícula marrom. O espectro à direita foi obtido no ponto indicado pela cruz vermelha e corresponde à calcita. (b) Imagem da seção transversal da casca do ovo na região da cutícula. O espectro à direita corresponde à hidroxiapatita.

Figura 7- Espectros Raman das superfícies externa (linha preta) e interna (linha vermelha) do fêmur de galinha* e da cutícula da casca do ovo (linha azul-clara). Os três espectros apresentam os principais picos característicos da hidroxiapatita carbonatada (CHAp).

Espectroscopia micro-FTIR (fig. 8 abaixo) na borda externa de ovo de galinha (cutícula) comparado com osso medular no fêmur de galinha (a) e com a calcita da casca de ovo (região chamada de paliçada (PL, veja fig. 1)

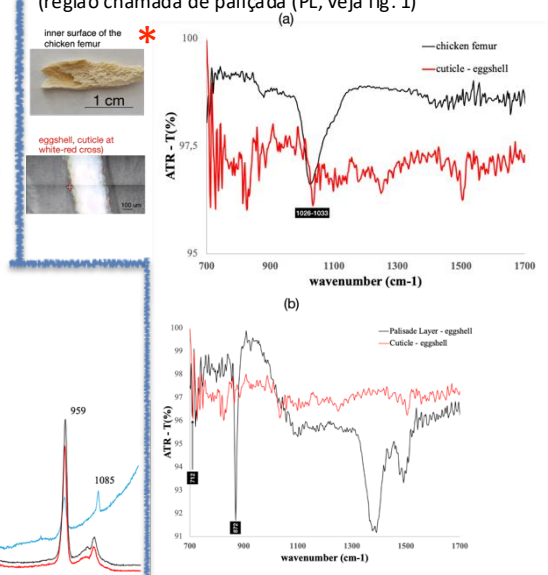


Figura 8- Espectros de ATR-FTIR (700–1700 cm^{-1}, % de transmitância) de: (a) superfície interna do fêmur de galinha e cutícula da casca do ovo (ver imagens acima); (b) camada paliçada e cutícula da casca do ovo. Em (a), a principal banda de absorção da hidroxiapatita (1026–1033 cm^{-1}) é observada tanto no fêmur quanto na cutícula. Em (b), as duas bandas características da calcita (712 e 872 cm^{-1}) estão claramente presentes na camada paliçada e apresentam intensidade muito menor na cutícula.

Conclusões

A presença de hidroxiapatita (HAp) na cutícula da casca de ovos de galinhas poedeiras foi investigada por técnicas de caracterização morfológica e espectroscópica. A comparação com a HAp de origem óssea revelou semelhanças entre as fases minerais. As imagens de microscopia sugerem que o crescimento em espessura da casca ocorre por um mecanismo aditivo, envolvendo a deposição sucessiva de nanogotas contendo, segundo nossa hipótese, minerais, água e componentes orgânicos. A incorporação dessas nanogotas poderia promover o crescimento de lamelas e contribuir para a formação dos microporos observados. A presença de nano-hemisférios aderidos às lamelas e a continuidade estrutural entre a cutícula e a camada vertical sustentam essa interpretação. Propomos que o processo envolva o fornecimento contínuo de fosfato de cálcio, possivelmente na forma de HAp, seguido de dissolução e precipitação de carbonato de cálcio, contribuindo para a formação das nanofibras de calcita.

Referências e Agradecimentos

1-GAO, L. B.; FU, Y.; GUO, Y. T.; ZHANG, H. J.; QI, G. H.; WANG, J. Proteomic changes in extracellular vesicle and uterine fluid proteins correlated with eggshell quality in aged laying hens. Poultry Science, v. 104, artigo 105939, 2025; 2-STAPANE, L.; LE ROY, N.; EZAGAL, J.; RODRIGUEZ-NAVARRO, A. B.; LABAS, V.; COMBES-SOIA, L.; HINCKE, M. T.; GAUTRON, J. Avian eggshell formation reveals a new paradigm for vertebrate mineralization via vesicular amorphous calcium carbonate. Journal of Biological Chemistry, v. 295, p. 15853–15869, 2020; 3-CARDOSO, Antonio Valadão; FERREIRA, Rodrigo Novaes; DANTAS, Maria Sylvia; DOS SANTOS, Leonardo H. R.; GOMES, Ana Paula; DE ASSIS, Lara Luz. Phosphate and carbonate in the biomineralization of chicken eggshells and the increase in eggshell thickness through nanodroplet addition. Animals, v. 16, n. 19, artigo 3023, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/ani16193023; 4-DENNIS, J. E.; XIAO, S.; AGARWAL, M.; FINK, D. J.; HEUER, A. H.; CAPLAN, A. I. Microstructure of matrix and mineral components of eggshells from white leghorn chickens (Gallus gallus). Journal of Morphology, v. 228, p. 287–306, 1996.

Os autores Antonio Valadão Cardoso e Rosana A. M. Souto agradecem à FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo financiamento APQ-04741-24 e Antonio Valadão Cardoso pela bolsa FAPEMIG BIP-00140-23; Antonio Valadão Cardoso também agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (projeto 404383/2023-8), pelo apoio financeiro.