AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM GRAFENO EM PINOS INTRARRADICULARES PARA FELINOS DE GRANDE PORTE

Autores: Pietro Alvarez dos Santos, Virginia Klausner de Oliveira

Universidade do Vale do Paraíba/Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo, Engenharia Mecânica, São José dos Campos-SP, Brasil, pietros.alvarez@gmail.com; virginia@univap.br

Resumo

Fraturas e perdas dentárias, especialmente dos caninos, comprometem alimentação, comportamento e bem-estar de felinos de grande porte. Este trabalho avalia, por meio de revisão de literatura, a viabilidade técnica e científica de compósitos poliméricos reforçados com grafeno para próteses dentárias e pinos intrarradiculares customizados. Foram comparadas propriedades de PEEK, PEEK-GNP, PMMA, titânio e zircônia, além de tecnologias de fabricação e parâmetros para uma futura análise por elementos finitos. A literatura analisada indica que concentrações de 0,5% a 1,0% em massa de nanoplaquetas de grafeno em PEEK podem elevar propriedades mecânicas, enquanto concentrações superiores podem favorecer aglomeração e perda de desempenho. O PEEK-GNP apresenta potencial para combinar menor rigidez relativa, resistência, tenacidade e possibilidade de fabricação personalizada por CAD/CAM. Como resultado, propõe-se um macro-pino personalizado obtido a partir de TC/CBCT, com fabricação por FDM de alta temperatura e validação futura por FEA. Ressalta-se, entretanto, que a proposta ainda é conceitual e necessita de ensaios experimentais, validação biológica e avaliação clínica antes de qualquer aplicação em animais.

Palavras-chave: Grafeno. PEEK. Compósitos. Próteses dentárias. Felinos de grande porte.
Área do Conhecimento: Engenharias – Engenharia Mecânica.

Introdução

Os dentes caninos são estruturas essenciais para a alimentação e o comportamento de grandes felinos, como leões, tigres e onças-pintadas. Fraturas ou perdas dentárias podem ocorrer por trauma, interações agressivas, caça ou condições de manejo em cativeiro e podem comprometer a função oral e o bem-estar animal. A literatura analisada identifica limitações nas alternativas convencionais, principalmente quando materiais de elevada rigidez são submetidos às forças de mordida desses predadores.

A engenharia de materiais oferece uma possibilidade de ampliar o desempenho das reabilitações por meio de nanocompósitos poliméricos. O grafeno e seus derivados apresentam propriedades mecânicas e funcionais de interesse, enquanto o PEEK se destaca por sua biocompatibilidade, resistência química, radiolucidez e módulo elástico inferior ao de metais e cerâmicas. A combinação PEEK-GNP, portanto, pode oferecer uma relação mais equilibrada entre resistência e rigidez.

Neste contexto, o objetivo do trabalho é avaliar a viabilidade técnica e científica do uso de compósitos reforçados com grafeno na fabricação de próteses dentárias e pinos intrarradiculares customizados para felinos de grande porte, comparando materiais, métodos de fabricação e requisitos de projeto, além de propor um modelo conceitual para futura validação computacional.

Metodologia

Foi realizada revisão de literatura em bases interdisciplinares de Engenharia de Materiais, Biomedicina e Medicina Veterinária, incluindo Scopus, Web of Science, PubMed, SciELO e periódicos especializados. A estratégia de busca combinou termos referentes ao material (graphene, graphene oxide, graphene nanoplatelets e PEEK), à aplicação (dental prosthesis, biomaterial, dental implant e composite) e ao contexto (feline, veterinary, Panthera e wildlife). Foram priorizados artigos de pesquisa, revisões e relatos de caso, preferencialmente publicados nos últimos dez anos, excluindo-se duplicatas, editoriais e resumos de conferências.

Os estudos selecionados foram sintetizados de forma comparativa quanto às propriedades mecânicas e biológicas, aos métodos de fabricação e aos desafios clínicos. A partir dessa síntese, foi desenvolvido um modelo conceitual de macro-pino personalizado, sem fabricação de protótipo físico. A proposta considera a aquisição de TC/CBCT, modelagem CAD, fabricação via impressão 3D por

FDM de alta temperatura, pós-processamento e futura análise por elementos finitos. As limitações incluem a necessidade de controle da dispersão das GNPs, custos de processamento e ausência de validação in vivo.

Resultados

A revisão mostrou diferenças relevantes entre os materiais considerados. O PMMA apresenta baixo custo e facilidade de processamento, mas menor resistência à fadiga e ao desgaste. O PEEK médico apresenta módulo elástico aproximado de 3–4 GPa, radiolucidez e elevada resistência química. A incorporação de GNPs em PEEK, em concentrações de 0,5% a 1,0% em massa, é apontada na literatura como uma faixa promissora para reforço mecânico, com aumento de propriedades relatado para 1,0% em massa e risco de aglomeração em concentrações superiores.

Tabela 1 – Comparação dos biomateriais considerados.

Material	Módulo elástico	Principal vantagem	Limitação
PMMA	2–3 GPa	Baixo custo e processamento simples	Menor resistência a fadiga e desgaste
PEEK médico	3–4 GPa	Biocompatibilidade e radiolucidez	Adesão depende do tratamento
PEEK-GNP	6–12 GPa*	Reforço e dissipação de trincas	Dispersão das GNPs é crítica
Titânio Grau 5	110–114 GPa	Alta resistência	Rigidez elevada
Zircônia	~200 GPa	Dureza e estabilidade	Fragilidade relativa

Fonte: elaborado pelo autor com base na literatura.

Para o macro-pino, a proposta utiliza geometria personalizada obtida a partir de TC/CBCT, com comprimento intrarradicular de até dois terços do comprimento radicular útil, diâmetro preferencialmente limitado a um terço do diâmetro externo da raiz e formato levemente cônico e anatômico. Também são considerados ferrule remanescente, camada uniforme de cimento e avaliação das tensões por Von Mises. O PEEK-GNP é indicado como a opção conceitual mais equilibrada para o núcleo, devido à combinação de rigidez intermediária, tenacidade e menor transferência de tensão para a raiz.

Figura 1 – Fluxo conceitual CAD/CAM e FEA para desenvolvimento do macro-pino.



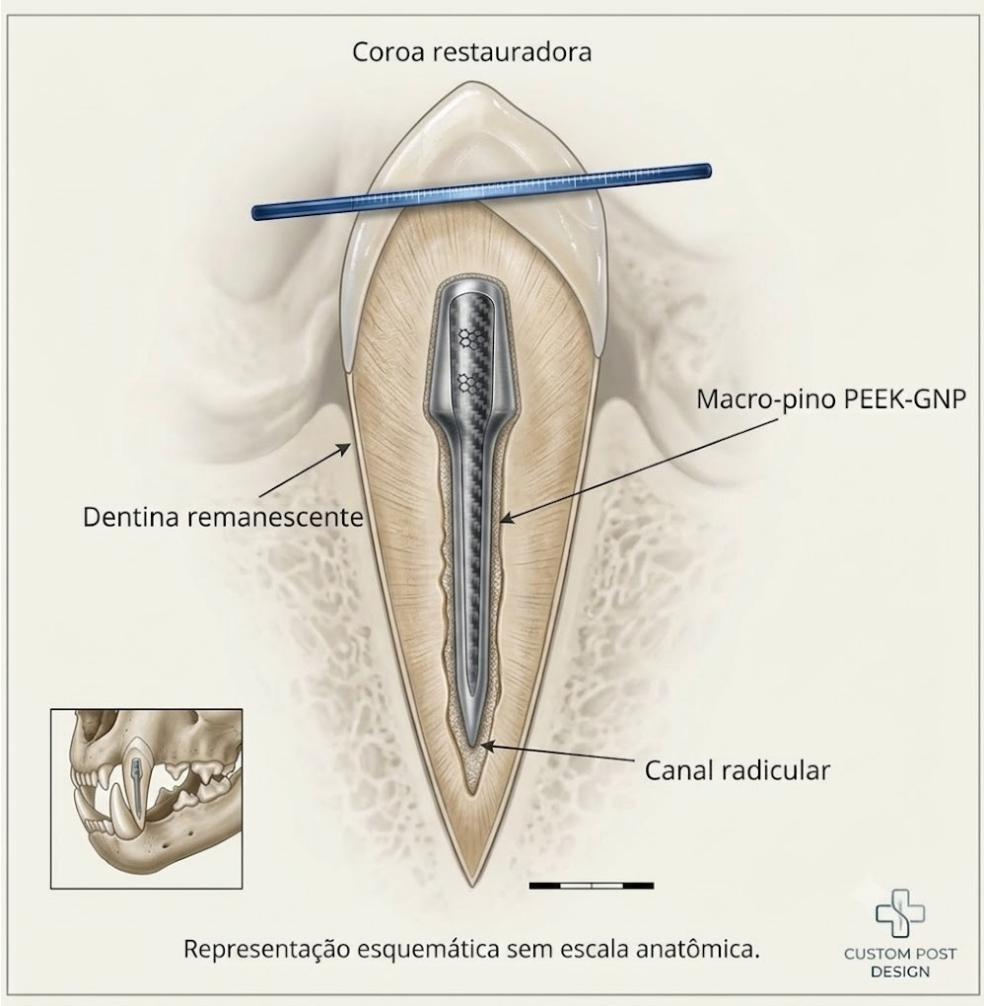
Fonte: *Elaborado pelo autor com auxílio de inteligência artificial (2026).*

Discussão

Os resultados indicam que a principal vantagem potencial do PEEK-GNP não é simplesmente aumentar a resistência, mas ajustar a relação de rigidez entre o pino e os tecidos dentários. Estudos apontam que titânio e zircônia possuem módulos elásticos muito superiores aos do PEEK, podendo aumentar a concentração de tensões no remanescente dentário. Em contrapartida, o PEEK puro pode necessitar de reforço para cargas extremas. A incorporação controlada de GNPs surge, portanto, como estratégia para elevar o desempenho mecânico sem aproximar excessivamente a rigidez do material à dos metais. Os mecanismos de reforço descritos na literatura incluem ponteamento e deflexão de trincas. A Espectroscopia Raman é proposta para avaliar a integridade e a distribuição do grafeno, enquanto MEV pode auxiliar na análise das superfícies de fratura. Para a interface de cimentação, estudos reunidos demonstram evidências de que o tratamento superficial por abrasão pode melhorar a adesão ao PEEK. Para envelhecimento, recomenda-se que futuras validações utilizem saliva artificial e fluido fisiológico simulado, em vez de interpretar diretamente ensaios químicos agressivos como equivalentes ao ambiente oral.

Em relação à fabricação, a impressão 3D por FDM é apontada como alternativa para produzir geometrias individualizadas. Entretanto, o processamento de PEEK exige temperaturas elevadas e controle térmico, e a presença de GNPs pode alterar a reologia e aumentar a abrasividade. A aplicação clínica, portanto, depende não apenas da escolha do material, mas também do controle de processamento, da esterilização, da estabilidade da interface e da validação mecânica e biológica.

Figura 2 – Representação conceitual do macro-pino intrarradicular personalizado.



Fonte: *Elaborado pelo autor com auxílio de inteligência artificial (2026).*

Conclusão

Com base na literatura analisada, o PEEK reforçado com nanoplaquetas de grafeno apresenta potencial como material para próteses dentárias e macro-pinos intrarradiculares customizados destinados a felinos de grande porte. A proposta reúne menor rigidez relativa que metais e cerâmicas, possibilidade de reforço mecânico e fabricação personalizada por CAD/CAM. A faixa de 0,5% a 1,0% em massa de GNPs é apresentada como tecnicamente promissora, desde que seja assegurada dispersão homogênea.

O principal resultado do trabalho é a proposta conceitual de um macro-pino personalizado, desenvolvido a partir de TC/CBCT e fabricado potencialmente por FDM de alta temperatura, com posterior avaliação por FEA. Essa análise deverá comparar titânio, PEEK e PEEK-GNP quanto às tensões de Von Mises, deslocamentos, concentrações de tensão cervical e comportamento de falha. Entretanto, como o estudo é baseado em revisão e proposta conceitual, os resultados não devem ser interpretados como comprovação clínica. Ensaios experimentais, caracterização físico-química, avaliação biológica, testes de fadiga, esterilização e validação in vivo sob aprovação ética são necessários antes de qualquer aplicação veterinária.

Referências

Abaixo estão as suas referências bibliográficas organizadas rigorosamente de acordo com as especificações da NBR 6023/2018 e o modelo fornecido (ordem alfabética, alinhamento à esquerda e padronização do formato dos autores e periódicos):

ABDELMOHSEN, N. et al. Mode of failure and finite element analysis of custom-made PEEK post-core (milled and pressed). Odontology, 2025. DOI: 10.1007/s10266-025-01084-7.

AL-RABEEAAH, A. et al. Surface roughness and biocompatibility of PEEK as a dental material. The Journal of Prosthetic Dentistry, v. 126, n. 2, p. 250-258, 2021.

ALAM, P. et al. Additively manufactured polyetheretherketone (PEEK) with carbon nanostructure reinforcement for biomedical structural applications. Advanced Engineering Materials, v. 22, n. 10, e2000483, 2020.

FECCHIO, R. S. et al. Clinical evaluation of metal dental prostheses in captive wild felids. Journal of Veterinary Dentistry, v. 42, n. 5, p. 349-353, 2025.

FERRARI, A. C. et al. Raman spectrum of graphene and graphene layers. Physical Review Letters, v. 97, n. 18, e187401, 2006.

GREEN, S. et al. Chemical resistance and chemical aging of polyetheretherketone (PEEK) in aggressive media. Polymer Degradation and Stability, v. 115, p. 34-42, 2015.

HALLMANN, L. et al. Effect of various airborne particle abrasion conditions on bonding between PEEK and dental resin cement. Polymers, v. 15, n. 7, e1830, 2023.

HIREMATH, P. et al. Mode II fracture analysis of GNP/epoxy nanocomposite film on a substrate. Nanomaterials, v. 11, n. 8, e2096, 2021.

HONG, M. H. et al. Three-dimensional finite element analysis of stress distribution in dental implant prosthesis and surrounding bone using PEEK abutments. Biomimetics, v. 9, n. 8, e472, 2024.

KOPP, E. et al. Evaluation of dental and oral pathologies of 36 captive lions and tigers. Journal of Veterinary Dentistry, v. 40, n. 4, p. 318-328, 2023.

KURTZ, S. M. (ed.). PEEK Biomaterials Handbook. Oxford: William Andrew, 2012.

LI, Y. et al. Mechanical properties and osteogenesis of CFR-PEEK composite with interface strengthening by graphene oxide for implant application. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, v. 148, e106222, 2023.

MARTINI, C. et al. Antimicrobial and antibiofilm properties of graphene oxide on Enterococcus faecalis. Antibiotics, v. 9, n. 10, e692, 2020.

ROTTA, G. et al. PEEK for oral applications: recent advances in mechanical and adhesive properties. Polymers, v. 15, n. 1, e236, 2023.

SIDDIQUI, M. et al. Graphene/epoxy nanocomposites for improved fracture toughness: a focused review on toughening mechanism. Composites Part C: Open Access, v. 12, e100402, 2023.

SILVEIRA, S. R. et al. Osseointegration, antimicrobial capacity and cytotoxicity of implant materials coated with graphene compounds: a systematic review. Japanese Dental Science Review, v. 59, p. 303-311, 2023.

UPADHYAYA, V. et al. A finite element study of teeth restored with post and core: effect of design, material, and ferrule. Dental Research Journal, v. 13, n. 3, p. 233-238, 2016.

WILLIAMS, A. G. et al. Graphene-based materials in dental applications: antibacterial, biocompatible, and bone regenerative properties. International Journal of Biomaterials, v. 2023, e8803283, 2023.

WROE, S. et al. Comparative bite forces and canine bending strength in feline and sabretooth felids. Journal of Zoology, v. 266, n. 2, p. 151-159, 2005.

YILDIZ, S. et al. Comparative stress analysis of custom-made PEEK dental post-cores versus conventional post-cores in incisor restorations: a finite element study. Medical Science Monitor, v. 29, e940887, 2023.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por guiar a minha jornada, concedendo-me forças e sabedoria em cada etapa percorrida.

À minha mãe, meu porto seguro, que faz o possível e o impossível para me apoiar, oferecendo amor incondicional e sacrifícios sem medida para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Ao meu pai, pelo apoio constante e presença contínua, sempre ao meu lado da maneira que pode.

À minha avó, pela presença acolhedora e por estar sempre pronta para me oferecer palavras de incentivo e suporte em todos os momentos. Às minhas tias, pelo carinho, torcida e incentivo ao longo dessa caminhada.

No âmbito acadêmico e profissional, expresso minha profunda gratidão à minha orientadora e coordenadora, Prof.ª Dra. Virginia Klausner, pela orientação exemplar, paciência, sabedoria e por conduzir este trabalho com tamanha dedicação.

À Dra. Catherine Armando, por me direcionar e despertar meu interesse na aplicação deste estudo no campo da medicina veterinária, abrindo novos horizontes para a minha formação.

Ao Dr. Roberto Fecchio, pela valiosa contribuição e disponibilidade em me ajudar a compreender em profundidade a anatomia dos felinos, ensinamentos fundamentais para o desenvolvimento e precisão desta pesquisa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste projeto, o meu sincero muito obrigado.