

MINERALIZAÇÃO E REPARO DOS TECIDOS APÓS O TRATAMENTO ENDODÔNTICO

Gabriela Leal Estevez dos Santos Silva, Instituto Militar de Engenharia, gabriela.silva@ime.eb.br, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9576-8678>. **Carlos Nelson Elias**, Instituto Militar de Engenharia, elias@ime.eb.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7560-6926>

DOI:

RESUMO

O tratamento endodôntico tem como objetivo eliminar microrganismos do sistema dos canais radiculares e preservar a estrutura dentária, criando um ambiente favorável ao reparo tecidual. A resposta tecidual após a intervenção endodôntica é um processo complexo que envolve a modulação da inflamação, a ativação de mecanismos de mineralização e a indução do reparo nos tecidos periapicais. Este trabalho apresenta evidências científicas sobre a resposta tecidual, os mecanismos de mineralização e o processo de reparo após o tratamento endodôntico, com ênfase na interação entre biomateriais e tecidos periapicais. Os objetivos desta revisão foram: (i) analisar como diferentes materiais endodônticos influenciam a resposta inflamatória inicial e o processo de cicatrização; (ii) discutir os efeitos dos cimentos bioativos e dos instrumentos de níquel-titânio na osseointegração e na regeneração dos tecidos periodontais; e (iii) avaliar o potencial clínico desses biomateriais na promoção de um reparo mais eficiente e duradouro. Os estudos revisados mostram que materiais bioativos, como cimentos à base de silicato de cálcio, têm capacidade de liberar íons que estimulam a formação de tecido mineralizado e favorecem a regeneração periodontal. Da mesma forma, instrumentos e implantes de níquel-titânio, devido às suas propriedades mecânicas e biocompatibilidade, podem modular positivamente as respostas celulares, reduzindo a inflamação e promovendo condições mais estáveis para o reparo. Além disso, estudos recentes reforçam que a escolha adequada dos biomateriais influencia diretamente a qualidade da resposta inflamatória inicial e o potencial de mineralização, impactando de forma decisiva a previsibilidade dos resultados do tratamento. Conclui-se que o uso de materiais bioativos e de ligas avançadas de níquel-titânio representa um avanço significativo na endodontia contemporânea, possibilitando um reparo tecidual mais eficiente e duradouro, com menor risco de complicações. A compreensão detalhada desses mecanismos contribui para o desenvolvimento de novas estratégias terapêuticas que visam não apenas à resolução da infecção, mas também à restauração funcional e biológica do dente tratado.

Palavras-chave: Reparo tecidual. Inflamação. Tratamento Endodôntico

1 Introdução

O sucesso do tratamento endodôntico depende da eliminação eficaz do tecido pulpar contaminado, da completa descontaminação do sistema de canais radiculares e do selamento adequado dos espaços anteriormente ocupados pela polpa. Após a remoção do agente etiológico e do tecido necrótico, inicia-se uma série de eventos biológicos que compõem o processo de reparo periapical, o qual envolve uma resposta inflamatória, formação de tecido de granulação, deposição de matriz extracelular, mineralização e, por fim, a regeneração do osso alveolar e dos tecidos moles adjacentes. Esse processo é complexo e multifatorial,

envolvendo interações entre células inflamatórias, mediadores químicos, matriz mineral e diversos tipos de biomateriais que podem ser utilizados durante o procedimento. A resposta inflamatória inicial, embora inevitável, deve ser controlada para que não se prolongue, prevenindo, assim, o desenvolvimento de inflamação crônica, reabsorção radicular ou comprometimento do reparo. Uma reação inflamatória bem modulada cria um microambiente favorável à regeneração, promovendo o recrutamento de células progenitoras e a ativação de vias de sinalização envolvidas na diferenciação osteoblástica e na deposição de matriz mineral.

A geometria e a bioatividade dos materiais utilizados no tratamento, como cimentos endodônticos, seladores e materiais bioativos, influenciam significativamente esse processo. Esses materiais não apenas promovem o selamento tridimensional do canal, como também desempenham papel essencial na estimulação de respostas celulares e na formação de tecido mineralizado na região apical. Propriedades como biocompatibilidade, liberação de íons de cálcio, alcalinidade e adesão aos tecidos contribuem diretamente para a indução da mineralização e para a qualidade do reparo tecidual obtido. A estabilidade mecânica da região periapical também afeta a qualidade do reparo, especialmente em casos de destruição óssea significativa. A densidade e a integridade do osso que circunda a área tratada influenciam a capacidade do organismo de restaurar a arquitetura tecidual original. Além disso, fatores anatômicos, a técnica operatória e o manejo dos tecidos moles ao redor da região tratada impactam diretamente o resultado final, tanto funcional quanto estético. Em casos mais complexos, o uso de biomateriais para substituição óssea ou para estimulação pode ser indicado como recurso complementar. A seleção adequada desses materiais deve considerar sua composição, estrutura superficial, capacidade de integração tecidual e potencial de indução osteogênica. Da mesma forma, o reparo dos tecidos moles é essencial para o selamento biológico da região e para a manutenção de um ambiente estável, livre de infecções e de reativações inflamatórias.

Assim, compreender os mecanismos envolvidos na resposta tecidual, na mineralização e no reparo após o tratamento endodôntico é fundamental para o desenvolvimento de estratégias terapêuticas mais eficazes, o que se traduz em maiores taxas de sucesso no longo prazo. O avanço desse conhecimento contribui para a seleção racional de técnicas e materiais e reforça a importância de uma abordagem biologicamente integrada na tomada de decisão clínica, voltada não apenas à resolução da patologia, mas também à restauração da integridade funcional e estrutural dos tecidos periapicais.

2 Revisão de Literatura

O processo de cicatrização e reparo tecidual após o tratamento endodôntico é uma sequência coordenada de eventos biológicos que envolve resposta inflamatória, formação de tecido de granulação, deposição de matriz extracelular, mineralização e, por fim, a regeneração do osso alveolar e dos tecidos adjacentes. Esse processo é essencial para restaurar a função do dente tratado e garantir sua longevidade na cavidade oral. Contudo, para que o reparo ocorra adequadamente, diversos fatores devem estar equilibrados, incluindo a eliminação eficaz de microrganismos patogênicos, a ausência de irritantes contínuos, a seleção adequada dos materiais de obturação e o suporte a uma resposta imune favorável.

Após a instrumentação e desinfecção do canal radicular, o organismo inicia uma resposta inflamatória aguda. Embora frequentemente associada a processos destrutivos, essa inflamação inicial é, na verdade, crucial para o reparo, pois contribui para a remoção de detritos teciduais, células necróticas e resíduos bacterianos. A ativação de macrófagos, neutrófilos e células dendríticas promove a liberação de citocinas pró-inflamatórias e de

fatores de crescimento, como $\text{TNF-}\alpha$, $\text{IL-1}\beta$, IL-6 , VEGF e $\text{TGF-}\beta$, que orquestram a transição da inflamação para a regeneração. O recrutamento de células-tronco mesenquimais (MSCs) e a diferenciação de células osteogênicas são etapas fundamentais para a formação de novo osso na região periapical.

A mineralização, que ocorre nas fases subseqüentes, é promovida por células especializadas como osteoblastos e cementoblastos. Essas células sintetizam uma matriz rica em colágeno do tipo I e induzem a deposição de fosfato de cálcio na forma de hidroxiapatita. A presença de materiais bioativos, especialmente cimentos à base de silicato de cálcio, pode potencializar esse processo por meio da liberação de íons de cálcio e da estimulação da formação de apatita quando em contato com fluidos teciduais. Além disso, o aumento do pH local cria um ambiente hostil à atividade bacteriana e favorável à regeneração.

A composição química, a topografia de superfície e a energia superficial dos materiais utilizados na obturação influenciam diretamente o comportamento celular e a qualidade do reparo. Materiais bioativos têm se mostrado superiores aos convencionais na indução de formação de tecido mineralizado. A modificação superficial com aditivos antimicrobianos ou biofuncionais é uma estratégia promissora para aprimorar suas propriedades. Modificações com compostos, como óxidos metálicos (por exemplo, Cu_2O), e com nanomateriais, incluindo óxido de grafeno (GO), podem reduzir a adesão bacteriana, inibir biofilmes e modular a inflamação local. Esses materiais são amplamente utilizados na implantodontia, mas apresentam grande potencial de adaptação à endodontia, especialmente em seladores e materiais de preenchimento que permanecem em contato direto com tecidos vivos.

A analogia com os processos de osseointegração na implantodontia é pertinente, uma vez que muitos dos fenômenos celulares envolvidos são semelhantes. A formação de tecido conjuntivo rico em colágeno, seguida da deposição de tecido mineralizado, caracteriza tanto a integração de implantes quanto a recuperação tecidual após a obturação dos canais radiculares. A estabilidade da interface entre o biomaterial e o tecido é fundamental em ambas as situações. Sob essa perspectiva, o estudo da biocompatibilidade, da bioatividade e da funcionalização superficial torna-se central para o desenvolvimento de novos materiais endodônticos. Além disso, a integridade do osso periapical desempenha papel decisivo na estabilidade e no reparo. Em situações clínicas de reabsorção óssea significativa ou de lesões periapicais extensas, a cicatrização pode ser comprometida. A densidade óssea, a vascularização e a presença de uma estrutura que sirva de arcabouço são condições essenciais para a osteogênese e o remodelamento ósseo adequados. Pesquisas que analisam a distribuição de tensões ao redor de implantes demonstram que o estresse mecânico local influencia diretamente a adaptação óssea e a capacidade de suportar cargas funcionais. Na endodontia, a anatomia óssea do ápice radicular e a integridade do ligamento periodontal também afetam o comportamento biomecânico da região, influenciando tanto a absorção das forças mastigatórias quanto a suscetibilidade a fraturas verticais. A regeneração óssea pode ser aprimorada, em casos selecionados, por meio do uso de biomateriais enxertados. Substitutos ósseos aloplásticos, xenógenos e compósitos são utilizados na cirurgia oral e na implantodontia para induzir ou guiar o crescimento ósseo. A aplicação desses materiais no contexto endodôntico, especialmente após a remoção cirúrgica de lesões periapicais ou em retratamentos com grandes defeitos ósseos, pode acelerar a cicatrização e prevenir recorrências.

A interação entre esses biomateriais e o tecido ósseo do hospedeiro depende de fatores como a porosidade, o tamanho dos grânulos, a taxa de reabsorção e a capacidade de integração biológica. Os tecidos moles, por outro lado, também merecem atenção no processo de reparo. O selamento biológico, proporcionado pela mucosa gengival e pelo ligamento periodontal, protege a região apical contra a recontaminação. Alterações na

arquitetura gengival ou falhas na regeneração dos tecidos moles podem comprometer a integridade do reparo, mesmo que o tecido ósseo subjacente esteja adequadamente cicatrizado. Estudos que avaliam substitutos teciduais para o aumento do volume gengival demonstram que a estabilidade dos tecidos moles é essencial para o sucesso clínico a longo prazo. Aplicações semelhantes podem ser consideradas em procedimentos endodônticos cirúrgicos, especialmente em casos de exposição radicular ou de perda de suporte gengival.

Com os avanços recentes na odontologia regenerativa, há crescente interesse no desenvolvimento de materiais e protocolos que não apenas restabeleçam a função, mas também participem ativamente da regeneração. Novas abordagens incluem o uso de scaffolds bioativos, sistemas de liberação controlada de fármacos, adesivos dentinários antimicrobianos e terapias baseadas em células-tronco. Essas inovações visam um reparo mais previsível, com menor risco de falhas e maior biocompatibilidade com os tecidos periapicais. O uso da microtomografia computadorizada (micro-CT) como ferramenta de análise tridimensional do reparo também representa um avanço significativo. Essa técnica permite uma avaliação não destrutiva de volumes, densidades e estruturas internas, possibilitando medições precisas da formação de tecido mineralizado, do volume de preenchimento do canal e de possíveis defeitos de obturação. Em estudos que investigam a capacidade de corte ou o comportamento mecânico de instrumentos endodônticos, o micro-CT também tem sido utilizado para correlacionar desempenho clínico com características estruturais e morfológicas dos canais tratados.

Assim, a literatura destaca que o reparo tecidual após o tratamento endodôntico é determinado por um conjunto integrado de fatores: a resposta inflamatória inicial, a seleção de materiais, o ambiente biológico local, a estabilidade óssea e a regeneração dos tecidos moles. Uma compreensão mais profunda dos mecanismos biológicos envolvidos nesse processo permite o refinamento de técnicas clínicas e o desenvolvimento de soluções inovadoras que ampliam as possibilidades terapêuticas da endodontia contemporânea. A tendência atual é avançar de abordagens puramente mecânicas ou antibacterianas para estratégias bioativas e regenerativas capazes de interagir com o tecido vivo e promover uma cicatrização funcional e biologicamente integrada.

3 Discussão

O reparo tecidual após o tratamento endodôntico representa um equilíbrio sofisticado entre a eliminação de patógenos, a modulação da inflamação, a indução da mineralização e a restauração dos tecidos periapicais. Embora envolva instrumentação mecânica, o verdadeiro sucesso depende da resposta biológica do hospedeiro, diretamente influenciada pelos materiais utilizados e pelas condições do microambiente biológico.

A fase inflamatória inicial, muitas vezes negligenciada em abordagens puramente mecânicas, é o ponto de partida para um reparo bem-sucedido. Citocinas como TNF- α , IL-1 β e TGF- β são liberadas em resposta à remoção da polpa e ativam células fagocitárias que eliminam detritos celulares e bactérias. Essa fase inflamatória é, portanto, fisiológica e necessária; no entanto, sua persistência favorece a reabsorção radicular e o fracasso do tratamento. Essa complexa modulação imunológica é semelhante à que ocorre na osseointegração de implantes de titânio, em que o equilíbrio entre as respostas dos macrófagos M1 (pró-inflamatórios) e M2 (anti-inflamatórios) determina o desfecho entre inflamação e regeneração óssea. Como demonstrado por Elias et al. (2024), implantes com superfícies otimizadas modulam a resposta imune, promovendo polarização para o fenótipo M2 e estimulando a osteogênese. Isso evidencia que materiais com superfícies bioativas têm potencial para reproduzir esse equilíbrio em seladores endodônticos, promovendo um reparo mais eficiente.

A prevenção da recontaminação é fundamental para a regeneração periapical. Estudos recentes, como o de Rocha et al. (2023), demonstraram que a funcionalização de superfícies de titânio com nanopartículas antimicrobianas, como óxido de grafeno (GO) e óxido cuproso (Cu_2O), reduz significativamente a formação de biofilme bacteriano e modula positivamente a resposta inflamatória local. Adaptar esses princípios para uso endodôntico — em cimentos ou seladores que permanecem em íntimo contato com o tecido periapical — pode estabelecer um ambiente mais favorável ao reparo, combinando ação antimicrobiana com estímulo à regeneração mineral.

A fase de mineralização do reparo caracteriza-se pela deposição de matriz colágena, seguida de calcificação. Cimentos à base de silicato de cálcio desempenham papel importante nesse processo ao liberar íons Ca^{2+} , elevar o pH local e promover a nucleação de hidroxiapatita. Esse mecanismo é análogo ao observado na osseointegração de implantes, em que superfícies de titânio modificadas atraem osteoblastos, promovem calcificação direta e facilitam a formação de um contato ósseo estável. A literatura indica que superfícies bioativas, tanto em materiais endodônticos quanto em implantes, têm potencial para induzir respostas celulares favoráveis, promovendo deposição mineral e acelerando o reparo periapical.

A integridade estrutural do osso periapical também influencia significativamente o sucesso do reparo. Estudos de Nascimento et al. (2023) sobre estabilidade mecânica de implantes, utilizando extensômetros e torquímetros, demonstraram que o estresse ósseo e a estabilidade primária estão diretamente relacionados ao sucesso da osseointegração. Da mesma forma, a qualidade do osso ao redor de uma raiz tratada influencia a dissipação das forças mastigatórias, a manutenção da arquitetura periapical e a eficiência do processo de remodelação. Em casos de perda óssea significativa, o uso de biomateriais substitutos torna-se uma alternativa válida. Gross et al. (2023), ao comparar materiais aloplásticos e xenógenos, observaram que ambos podem promover regeneração óssea, mas a combinação com matriz autógena frequentemente resulta em maior vascularização e melhor integração tecidual. A adoção dessa estratégia na endodontia cirúrgica amplia a capacidade de reconstrução óssea em casos de retratamento ou de lesões periapicais extensas.

Igualmente importante é a participação dos tecidos moles no processo de reparo. A regeneração do ligamento periodontal e da mucosa adjacente ao ápice radicular é essencial para o selamento biológico, pois atua como barreira protetora contra a recontaminação. Santos et al. (2023) demonstraram, por meio de análises *in vitro*, que substitutos teciduais podem promover a estabilidade dos tecidos moles, mantendo o contorno gengival e protegendo a área em cicatrização. No contexto endodôntico, o papel desses tecidos é igualmente relevante, especialmente em casos cirúrgicos, em que a exposição radicular e a cicatrização gengival afetam diretamente os resultados clínicos.

Outro ponto essencial é a resposta do hospedeiro a materiais estranhos. Estudos sobre implantes dentários mostram que partículas metálicas liberadas pelo desgaste superficial podem ativar o inflamassoma NLRP3, desencadeando inflamação crônica que compromete a osseointegração. Embora materiais endodônticos não sejam submetidos às mesmas cargas funcionais que os implantes, é fundamental garantir sua estabilidade química e biológica. Bioinércia e resistência à corrosão tornam-se cruciais para evitar reações a corpo estranho que possam interferir no reparo ou causar complicações tardias.

A análise tridimensional do reparo por meio de microtomografia computadorizada (micro-CT) vem emergindo como uma ferramenta poderosa para compreender e quantificar a regeneração em tempo real, de forma não destrutiva. Essa técnica, já bem estabelecida na implantodontia, permite avaliar o volume ósseo, a densidade mineral e a arquitetura trabecular. Na endodontia, sua aplicação permite medir a formação de tecido mineralizado, avaliar a conformidade da obturação com as paredes do canal e identificar áreas com falhas

ou com extrusão. Essa abordagem analítica aprimora a interpretação dos resultados e oferece uma base mais objetiva para comparar o desempenho de diferentes materiais e técnicas.

A tendência atual na endodontia é integrar estratégias biológicas avançadas à prática clínica convencional. Funcionalização antimicrobiana de materiais, liberação controlada de íons bioativos, uso de *scaffolds* osteoindutivos e avaliação tridimensional do reparo são inovações que visam promover regeneração completa e funcional do tecido periapical, e não apenas a resolução da infecção. Essa abordagem multidisciplinar, apoiada por estudos como os de Elias e colaboradores, reposiciona a endodontia como uma ciência biológica e regenerativa, capaz de integrar princípios de engenharia tecidual, imunologia e biomateriais.

Em resumo, a discussão evidencia que o reparo após o tratamento endodôntico é um fenômeno biológico complexo, dependente de uma sequência organizada de eventos celulares e moleculares. A interação entre o material de obturação, o tecido do hospedeiro e o ambiente imune local é determinante para o sucesso clínico a longo prazo. As lições aprendidas com a implantodontia — especialmente sobre a osseointegração, a funcionalização de superfícies, a estabilidade mecânica e a bioatividade — oferecem uma perspectiva ampla e promissora para o avanço da endodontia regenerativa. A integração entre biologia, tecnologia e prática clínica surge como o caminho mais promissor para tratamentos mais seguros, eficazes e duradouros.

4 Conclusão

A interação entre biomateriais e tecidos após o tratamento endodôntico desempenha um papel crucial na qualidade do reparo tecidual. Materiais bioativos e superfícies funcionalizadas são promissores, pois induzem uma resposta inflamatória reduzida e estimulam a mineralização. Uma compreensão detalhada desses mecanismos sustenta a seleção de estratégias mais eficazes para alcançar sucesso clínico e biológico no tratamento endodôntico.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi apoiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio de uma bolsa concedida em 2024 (Processo nº 88887.9503112/2024-00), no âmbito do Instituto Militar de Engenharia (IME). Agradeço à CAPES e ao IME pelo incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento acadêmico.

Referências

1. Elias CN et al. Osseointegration, inflammatory process, and foreign body reaction of dental titanium implants. 2024.
2. Gross JM, Elias CN et al. Comparative Study of Alloplastic and Xenogeneic Biomaterials Used in Dentistry. 2023.
3. Nascimento LRXC, Torelly G, Elias CN. Analysis of Bone Stress and Primary Stability of a Dental Implant Using Strain and Torque Measurements. 2023.
4. Rocha AML, Elias CN et al. Functionalization of titanium dental prostheses surface with antimicrobials GO and Cu₂O. 2023.
5. Santos TC dos, Elias CN et al. In Vitro Evaluation of Two Tissue Substitutes for Gingival Augmentation. 2023.