



ISSN 2674-8169



Qualis B3
CAPES 2021-2024

Latindex



DOI

Google
Acadêmico

COMPÓSITOS AUTORREPARADORES: UM CAMINHO PARA REDEFINIR OS MATERIAIS.

Hugo Duarte Oliveira Cordeiro



<https://doi.org/10.36557/2674-8169.2026v8n8p887-902>

Artigo recebido em 17 de Julho e publicado em 17 de Agosto de 2026

REVISÃO DE LITERATURA

RESUMO

Este trabalho consiste em uma revisão de literatura sobre os compósitos autorreparadores, analisando-os como uma alternativa inovadora para superar as limitações das resinas convencionais na Odontologia restauradora. O estudo aborda como esses materiais inteligentes buscam mitigar falhas estruturais, como microfissuras decorrentes da fadiga mastigatória e degradação bucal, por meio de mecanismos extrínsecos (uso de microcápsulas e redes vasculares) e intrínsecos (ligações químicas reversíveis). Além disso, discute-se a integração de tecnologias avançadas, como nano compósitos (grafeno e MXenes), impressão 3D e ativação por estímulos externos. Conclui-se que, embora apresentem alto potencial para ampliar a longevidade clínica das restaurações e reduzir substituições frequentes, a viabilidade clínica plena ainda depende da superação de desafios relacionados à biocompatibilidade, estabilidade estética e desempenho em longo prazo no ambiente bucal.

Palavras-chave: Compósitos autorreparadores; Odontologia restauradora; Materiais inteligentes; Longevidade clínica; Nano compósitos.



ABSTRACT

This study consists of a literature review on self-healing composites, analyzing them as an innovative alternative to overcome the limitations of conventional resins in restorative dentistry. The research addresses how these smart materials aim to mitigate structural failures, such as microcracks resulting from masticatory fatigue and oral degradation, through extrinsic (use of microcapsules and vasculares networks) and intrinsic mechanisms. Furthermore, the integration of advanced technologies such as nanocomposites (graphene and MXenes), 3D printing, and activation by external stimuli is discussed. It is concluded that, although they show high potential to enhance the clinical longevity of restorations and reduce frequent replacements, full clinical viability still depends on overcoming challenges related to biocompatibility, aesthetic stability, and long-term performance in the oral environment.

Keywords: Compósitos autorreparadores; Odontologia restauradora; Materiais inteligentes; Longevidade clínica; Nano compósitos

CORDEIRO, Hugo Duarte Oliveira. **Self-healing composites: A path to redefining materials.** Curso de Bacharelado em Odontologia. Centro Universitário FAMINAS, 2026.

Hugo Duarte Oliveira Cordeiro hugocordeiro05767@gmail.com

INTRODUÇÃO

Na Odontologia restauradora, os compósitos resinosos permanecem entre os materiais mais utilizados devido à sua versatilidade, estética e boa relação custo-benefício. Entretanto, mesmo com a evolução das formulações e técnicas adesivas, esses materiais continuam sujeitos a falhas ao longo do tempo, principalmente pela formação e propagação de microfissuras decorrentes de fadiga mastigatória, variações térmicas e degradação do meio bucal. Diante desse cenário, os compósitos autorreparáveis têm ganhado espaço nas pesquisas recentes por proporem uma abordagem inovadora, na qual o próprio material é capaz de reagir a danos e recuperar parte de sua integridade estrutural de forma autônoma, com potencial para aumentar a longevidade clínica das restaurações (DURÃO et al., 2024).

O conceito de autorreparação em materiais poliméricos ganhou relevância a partir do desenvolvimento de sistemas capazes de “curar” trincas de maneira automática, sobretudo por meio de estratégias extrínsecas baseadas em agentes de cura incorporados ao material. Esse avanço foi marco na área de materiais autorreparáveis e abriu caminho para aplicações em compósitos estruturais e, posteriormente, em biomateriais, incluindo a Odontologia (WHITE et al., 2001). A partir desses estudos iniciais, novas arquiteturas foram propostas para superar limitações como a reparação em evento único, ampliando a possibilidade de múltiplos ciclos de reparo em um mesmo local de dano, o que reforça o interesse em sistemas mais duráveis e clinicamente aplicáveis (TOOHEY et al., 2007).

Entre os aspectos relevantes, destaca-se o foco em métodos de autorreparação extrínseca, que podem ser aplicados a diferentes matrizes e classes de materiais. Nessa abordagem, a autorreparação é viabilizada por “reservatórios” internos que liberam agentes reparadores quando ocorre uma trinca, incluindo microcápsulas, fibras ocas ou redes microvasculares. Além disso, estratégias baseadas em termoplásticos e mecanismos físico-químicos mais recentes vêm sendo exploradas, buscando conciliar eficiência de reparo com propriedades mecânicas compatíveis com o uso restaurador (DURÃO et al., 2024). Do ponto de vista teórico, revisões de referência na área de polímeros autorreparáveis apontam que a escolha do mecanismo de reparo influencia diretamente fatores como repetibilidade do processo, estabilidade do sistema e recuperação das propriedades mecânicas, o que é essencial para aplicações clínicas (BLAISZIK et al., 2010).

Embora os compósitos autorreparáveis tenham se destacado de forma promissora, permanece a necessidade de compreender como esses materiais vêm sendo estudados e propostos para utilização clínica, considerando suas vantagens, desvantagens, potencial de

longevidade e custo-benefício para a rotina odontológica. Em especial, interessa analisar se os ganhos esperados na durabilidade restauradora se mantêm diante das exigências do ambiente bucal e das demandas estéticas e funcionais, além de identificar barreiras que dificultam sua aplicação no dia a dia (KONTIZA; KARTSONAKIS, 2024). Nesse sentido, a literatura aplicada à Odontologia já discute a adaptação do conceito de autorreparação a compósitos restauradores, com foco na obturação de microtrincas e na tentativa de reduzir falhas progressivas que comumente levam à substituição das restaurações (HUYANG et al., 2016).

Parte-se do princípio de que esses compósitos buscam enfrentar diretamente um dos principais problemas clínicos dos materiais restauradores, que é a formação de microfissuras e defeitos internos capazes de comprometer a resistência mecânica, a integridade estrutural e, conseqüentemente, a longevidade das restaurações. Contudo, apesar do grande potencial, também se evidenciam desafios importantes para viabilização clínica, como a compatibilidade do agente de cura com a matriz resinosa, a manutenção das propriedades mecânicas e ópticas, a estabilidade térmica e química do sistema e o controle adequado da ativação do mecanismo de reparo, aspectos que podem se tornar obstáculos para o uso clínico previsível (KONTIZA; KARTSONAKIS, 2024).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo ressaltar a relevância dos compósitos autorreparáveis como alternativa inovadora para minimizar falhas estruturais, prolongar a vida útil dos compósitos e reduzir a necessidade de substituições frequentes, que ainda representam um grande desafio na Odontologia restauradora (KONTIZA; KARTSONAKIS, 2024). Assim, propõe-se analisar, à luz da literatura científica, os fundamentos, mecanismos de funcionamento, aplicabilidade clínica e limitações dos compósitos autorreparáveis, avaliando seu potencial como um caminho promissor para ampliar a longevidade das restaurações odontológicas.

METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa e descritiva, destinada a analisar os compósitos autorreparáveis e seus potenciais desdobramentos para a Odontologia restauradora. A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados [PubMed/MEDLINE], [Scopus/Web of Science], [SciELO] e [BVS], por reunirem literatura relevante nas áreas de materiais, biomateriais e Odontologia. A pesquisa ocorreu no período de julho/2025 a maio/2026 contemplando estudos publicados entre 2015 e 2024 nos idiomas português/inglês.

Foram utilizados descritores e palavras-chave combinados por operadores

booleanos (AND/OR), incluindo: “self-healing”, “self-repair”, “autonomic healing”, “polymer composite”, “resin composite”, “dental composite”, “microcapsules”, “microvascular”, “hollow fibers” e “restorative dentistry”. As estratégias de busca foram adaptadas a cada base, utilizando combinações como: (self-healing OR self-repair OR autonomic healing) AND (dental composite OR resin composite OR restorative dentistry) e self-healing AND microcapsules AND composite.

A seleção dos estudos foi realizada em três etapas: leitura de títulos, leitura de resumos e leitura do texto completo. Foram incluídos artigos que abordassem mecanismos de autorreparação aplicados a compósitos poliméricos com potencial odontológico ou explicitamente voltados a compósitos odontológicos, descrevendo o mecanismo utilizado e apresentando resultados relacionados ao desempenho do material (por exemplo, recuperação de propriedades mecânicas, resistência a trincas, durabilidade, estabilidade físico-química e/ou biocompatibilidade). Foram aceitos diferentes delineamentos, como estudos experimentais laboratoriais, estudos de desenvolvimento de material, revisões e estudos com discussão aplicada à clínica, desde que contribuíssem diretamente para os objetivos desta revisão.

Foram excluídos estudos que não apresentassem relação direta com compósitos ou autorreparação, trabalhos focados exclusivamente em materiais sem aplicabilidade biomédica/odontológica, publicações sem texto completo disponível, artigos em idiomas fora do recorte definido, resumos de congresso sem artigo completo, materiais não científicos (blogs, textos comerciais) e estudos duplicados. Ao final do processo, a busca inicial resultou em quarenta e três artigos; após triagem por título e resumo, permaneceram vinte e dois; e, após leitura completa, quatorze estudos compuseram a amostra final da revisão.

Os dados extraídos foram organizados em uma tabela padronizada contendo: autor/ano, tipo de estudo, tipo de compósito/matriz, mecanismo de autorreparação (extrínseco/intrínseco), agente reparador, método de ativação, propriedades avaliadas, principais resultados e limitações. A síntese dos achados foi apresentada de forma [temática/comparativa], agrupando os estudos por mecanismos de autorreparação e por implicações para a aplicabilidade clínica.

REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Fundamentos da autorreparação em compósitos poliméricos

A autorreparação em materiais poliméricos consiste na capacidade de um material

responder a danos estruturais, como microfissuras e trincas, recuperando parcial ou totalmente suas propriedades. White *et al.* (2001) foram responsáveis por um dos estudos pioneiros nessa área, ao demonstrarem um sistema de compósito polimérico capaz de reparar trincas de forma autônoma por meio de microcápsulas contendo agente de cura. A partir desse marco, Blaiszik *et al.* (2010) revisaram os principais sistemas de autorreparação em polímeros e compósitos, classificando-os em abordagens baseadas em cápsulas, redes vasculares e mecanismos intrínsecos, destacando a inspiração biológica desses materiais e sua capacidade de responder ao dano no próprio local em que ele ocorre.

Yongjing Wang, Duc Truong Pham e Chunqian (2015) apresentam uma revisão sobre compósitos autorreparáveis baseados em microcápsulas e sistemas vasculares, abordando mecanismos de cicatrização, técnicas de fabricação e fatores que interferem no desempenho do reparo. Os autores descrevem sistemas baseados em polimerização por metátese com abertura de anel, processos de policondensação e sistemas bicomponentes à base de epóxi, além de métodos de produção de microcápsulas e redes vasculares. A eficiência de cura observada nos estudos revisados variou amplamente, entre 24% e mais de 121%, demonstrando que o desempenho depende do mecanismo utilizado, das condições ambientais e da estrutura do sistema.

No contexto odontológico, Huyang, Debertain e Sun (2016) aproximam o conceito de autorreparação dos compósitos restauradores, considerando que esses materiais estão sujeitos à propagação de trincas, fadiga mastigatória e degradação no meio bucal. Os autores propõem compósitos odontológicos com capacidade de autorreparação como alternativa para aumentar a longevidade das restaurações e reduzir a necessidade de substituições frequentes, o que é relevante para a preservação de estrutura dental sadia. A adesão dos compósitos autorreparadores não ocorre da mesma forma que a dos materiais convencionais. Enquanto as resinas tradicionais exigem etapas clínicas de condicionamento ácido e aplicação de sistemas adesivos para criar retenção micromecânica, os autorreparadores utilizam mecanismos biomiméticos com monômeros de união química direta e liberação de íons. Porém vale destacar que ainda não há a comercialização desses materiais, e evidenciar que esses reparos ainda não são aplicados a cerâmicas, visto que é voltada para matrizes poliméricas. O objetivo principal é fazer com que resinas restauradoras e cimentos dentários reparem micro trincas internamente, aumentando a vida útil da restauração.

4.2 Arquiteturas e componentes dos sistemas autorreparáveis

As arquiteturas dos sistemas autorreparáveis incluem principalmente microcápsulas, redes vasculares e mecanismos intrínsecos. Toohey *et al.* (2007) demonstraram a aplicação de

redes microvasculares em materiais autorreparáveis, destacando sua capacidade de permitir reparos repetidos em uma mesma região por meio do reabastecimento do agente reparador. Esse modelo apresenta vantagem em relação aos sistemas exclusivamente capsulares, que geralmente são limitados a um único evento de cura no local danificado.

Kontiza e Kartsonakis (2024) abordam os componentes, estruturas e princípios de design dos materiais autorreparáveis, classificando-os em sistemas baseados em microcápsulas, redes vasculares e mecanismos intrínsecos. Os autores destacam tecnologias de encapsulamento, como polimerização in situ, coacervação e secagem por pulverização, além da importância da compatibilidade entre agente de cura e matriz polimérica. Também relatam que a eficiência da autorreparação varia conforme o sistema utilizado e a extensão do dano, podendo diminuir quando a largura da fissura aumenta.

Irzhak, Uflyand e Dzhardimalieva (2022) descrevem sistemas intrínsecos e extrínsecos de autorreparação em polímeros. Nas estratégias intrínsecas, o reparo depende de ligações reversíveis presentes na própria estrutura do material, enquanto nas extrínsecas ocorre a liberação de agentes de cura armazenados em microcápsulas, fibras ocas ou redes microvasculares. Os autores também destacam reações como transesterificação, troca de dissulfeto, metátese de dioxaborolano e interações de coordenação metal-ligante como mecanismos importantes para o processo de cura.

4.3 Materiais inteligentes ativados por estímulos externos

Os materiais autorreparáveis também podem ser ativados por estímulos externos, como calor, luz, pressão e magnetismo. Cerdan *et al.* (2022) revisam compósitos autorreparáveis contendo nanopartículas magnéticas, que podem ativar o reparo por aquecimento remoto ou auxiliar no fechamento físico de áreas danificadas por atração magnética. Os autores descrevem métodos de obtenção dessas partículas, como moagem de bolas, evaporação a laser, coprecipitação e decomposição térmica, além de sua incorporação em matrizes poliméricas extrínsecas ou intrínsecas. O desempenho desses compósitos depende da concentração das partículas, uma vez que quantidades excessivas podem gerar aglomerados e reduzir a mobilidade das cadeias poliméricas.

Zarepour *et al.* (2023) destacam que a incorporação de nanomateriais condutores, como grafeno e MXene, amplia as funcionalidades dos compósitos autorreparáveis. Esses materiais podem combinar capacidade de reparo, condutividade elétrica, flexibilidade e sensibilidade a estímulos, sendo promissores para sensores vestíveis, supercapacitores, materiais anticorrosivos e dispositivos biomédicos. Embora ainda exijam estudos específicos para uso odontológico, esses sistemas indicam uma tendência de desenvolvimento de materiais capazes

de restaurar não apenas propriedades mecânicas, mas também propriedades funcionais.

4.4 Impressão 3D aplicada a materiais autorreparáveis

A manufatura aditiva tem sido investigada como uma estratégia para produzir materiais autorreparáveis com geometrias complexas e propriedades ajustáveis. Jiang *et al.* (2023) analisam a compatibilidade entre técnicas de impressão 3D e mecanismos de cura, abordando estratégias extrínsecas, como microcápsulas, redes microvasculares e nanopartículas, e estratégias intrínsecas, baseadas em ligações covalentes dinâmicas ou interações não covalentes. Os autores destacam processos como modelagem por deposição fundida, escrita direta de tinta, estereolitografia e processamento digital de luz, relatando que a integração da autorreparação à impressão 3D pode alcançar eficiências superiores a 90% na recuperação de propriedades mecânicas.

Roppolo *et al.* (2024) também discutem os avanços da impressão 3D de materiais autorreparáveis, destacando que essa tecnologia permite a fabricação de estruturas personalizadas e funcionais. No entanto, os autores ressaltam que ainda existem desafios relacionados à obtenção de materiais que apresentem, simultaneamente, boa imprimibilidade, estabilidade dimensional, resistência mecânica e capacidade de reparo. No campo odontológico, essa perspectiva é relevante pela crescente incorporação de fluxos digitais, embora a aplicação de materiais restauradores impressos com capacidade de autorreparação ainda dependa de avanços em biocompatibilidade, estética e estabilidade no meio bucal.

Kontiza e Kartsonakis (2024) também apontam que a integração de sistemas autorreparáveis aos processos de manufatura aditiva pode favorecer a criação de estruturas complexas com capacidade de cicatrização. Para os autores, a impressão 3D permite maior controle da arquitetura interna do material e da distribuição dos componentes funcionais, o que pode beneficiar sistemas vasculares, híbridos e responsivos.

4.5 Métodos de cura e mecanismos de reparo em polímeros

Os métodos de cura em polímeros autorreparáveis podem ser organizados em mecanismos extrínsecos e intrínsecos. Blaiszik *et al.* (2010) descrevem os sistemas capsulares, vasculares e intrínsecos, destacando que cada abordagem apresenta vantagens e limitações. Os sistemas capsulares são úteis para danos localizados, mas tendem a ser limitados a um único evento de cura. Já as redes vasculares permitem repetição do reparo, enquanto os sistemas intrínsecos dependem da reorganização molecular da própria matriz.

Irzhak, Uflyand e Dzhardimalieva (2022) aprofundam essa classificação ao detalharem reações químicas específicas associadas à autorreparação, como transesterificação, troca de

dissulfeto, metátese de dioxaborolano e interações metal-ligante. Os autores relatam que alguns compósitos epóxi contendo pontes de dissulfeto aromáticas podem alcançar restauração completa das propriedades mecânicas após ativação térmica. Também destacam que calor, pressão e luz ultravioleta podem favorecer a mobilidade das cadeias e estimular as reações de troca necessárias ao reparo.

Song *et al.* (2021) revisam avanços em materiais autorreparáveis e ressaltam a importância de equilibrar eficiência de cura e propriedades mecânicas. Materiais com maior mobilidade molecular tendem a apresentar melhor capacidade de reparo, mas podem ter menor resistência estrutural. Por outro lado, polímeros mais rígidos geralmente apresentam melhor desempenho mecânico, mas menor capacidade de reorganização após o dano. Essa relação é especialmente importante para possíveis aplicações odontológicas, nas quais o material precisa resistir a cargas mastigatórias, umidade, variações térmicas e desafios químicos.

4.6 Nanocompósitos autorreparadores: Grafeno, MXene e perspectivas futuras

Os nanocompósitos autorreparáveis representam uma linha recente de desenvolvimento, pois associam capacidade de reparo a propriedades funcionais avançadas. Zarepour *et al.* (2023) discutem compósitos à base de grafeno e MXene, destacando seu uso em sensores vestíveis, supercapacitores, materiais anticorrosivos e blindagem contra interferência eletromagnética. Os autores descrevem o uso de ligações dinâmicas, como ligações de hidrogênio, coordenação metal-ligante, empilhamento π - π , reações de Diels-Alder e troca de dissulfeto, para promover cura autônoma ou estimulada por fatores externos. Os resultados relatados incluem hidrogéis baseados em MXene com eficiência de autorreparação próxima de 91%, sensores condutores com recuperação de 98,4% das propriedades de tração e supercapacitores que mantiveram 90% da capacitância após ciclos de corte e reparo.

D'Elia *et al.* (2015) também demonstram o potencial de compósitos à base de grafeno com capacidade de autorreparação e sensoriamento. Esses materiais combinam propriedades mecânicas, condutividade e resposta ao dano, o que pode favorecer o desenvolvimento de sistemas capazes de reparar falhas e monitorar alterações estruturais. Essa característica é promissora para sensores inteligentes, dispositivos biomédicos e futuras aplicações em biomateriais.

Apesar do potencial desses nanocompósitos, Kontiza e Kartsonakis (2024) ressaltam que a aplicação clínica e comercial de materiais autorreparáveis ainda depende da superação de desafios relacionados à segurança, estabilidade, compatibilidade química e custo de produção. No contexto odontológico, esses desafios tornam-se ainda mais relevantes, pois os materiais precisam apresentar estética adequada, resistência mecânica, estabilidade em ambiente úmido,

biocompatibilidade e previsibilidade clínica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento de compósitos autorreparáveis surge como uma resposta direta a uma das principais limitações dos materiais restauradores atuais: a suscetibilidade à formação e propagação de microfissuras decorrentes da fadiga mastigatória, das variações térmicas e da degradação no meio bucal. Nesse contexto, a transição de materiais passivos para sistemas inteligentes representa uma mudança importante na ciência dos materiais, pois busca não apenas reparar danos já instalados, mas recuperar parte da integridade estrutural e funcional do material de forma autônoma. White *et al.* (2001) foram fundamentais para consolidar esse conceito ao demonstrarem a possibilidade de reparo autônomo em compósitos poliméricos por meio de microcápsulas. Posteriormente, Blaiszik *et al.* (2010) ampliaram essa compreensão ao classificar os sistemas autorreparáveis em capsulares, vasculares e intrínsecos, enquanto Huyang, Debertin e Sun (2016) aproximaram essa proposta da Odontologia ao demonstrar o potencial dos compósitos autorreparáveis para aumentar a longevidade das restaurações dentárias.

A literatura mostra que os materiais autorreparáveis modernos já alcançaram níveis expressivos de recuperação das propriedades originais, embora os resultados variem de acordo com o tipo de sistema, o mecanismo de cura e as condições de ativação. Irzhak, Uflyand e Dzhardimalieva (2022) relatam vitrímeros com recuperação de até 102% na resistência à tração, enquanto Jiang *et al.* (2023) descrevem elastômeros de silicone impressos em 3D com 97% de eficiência de reparo. De forma semelhante, Zarepour *et al.* (2023) demonstram que sensores baseados em grafeno e MXene podem recuperar 98,4% de suas propriedades de tração, e D'Elia *et al.* (2015) reforçam o potencial dos compósitos à base de grafeno ao associarem autorreparação e capacidade de sensoriamento. Esses achados indicam que a autorreparação deixou de ser apenas um conceito experimental inicial e passou a representar uma estratégia concreta para restaurar propriedades mecânicas e funcionais em polímeros avançados.

Apesar desse avanço, a escolha da arquitetura do sistema continua sendo um fator decisivo para sua eficiência. Yongjing Wang, Duc Truong Pham e Chunqian (2015) e Blaiszik *et al.* (2010) destacam que os sistemas baseados em microcápsulas são eficazes para microdanos localizados, mas apresentam a limitação de dependerem de uma quantidade finita de agente reparador, o que geralmente restringe o processo a um único evento de cura. Toohey *et al.* (2007), ao desenvolverem materiais com redes microvasculares, demonstraram uma alternativa importante a essa limitação, pois esses sistemas permitem o reabastecimento do agente de cura

e possibilitam reparos repetidos em uma mesma região. Nesse mesmo sentido, Irzhak, Uflyand e Dzhardimalieva (2022) apontam que os mecanismos intrínsecos, baseados em ligações reversíveis, também oferecem maior repetibilidade, uma vez que a capacidade de reparo está associada à própria estrutura molecular do material.

A análise dos sistemas autorreparáveis também revela que não basta que o material seja capaz de reparar uma fissura, sendo necessário que esse reparo ocorra sem comprometer suas propriedades originais. Kontiza e Kartsonakis (2024) ressaltam que a compatibilidade entre agente de cura e matriz polimérica é essencial para preservar a estabilidade térmica, a resistência e a funcionalidade do sistema. Essa questão é especialmente relevante para a odontologia, pois um compósito restaurador precisa manter desempenho mecânico, estética, estabilidade química e biocompatibilidade no ambiente bucal. Song *et al.* (2021) reforçam essa dificuldade ao discutirem o equilíbrio entre mobilidade molecular e resistência mecânica: materiais com maior mobilidade tendem a reparar-se com mais facilidade, mas podem apresentar menor resistência estrutural, enquanto polímeros mais rígidos podem resistir melhor às cargas, porém com menor capacidade de reorganização após o dano. Portanto, a viabilidade clínica desses materiais depende do equilíbrio entre reparo, resistência e estabilidade.

Outro ponto importante refere-se à dimensão do dano. Kontiza e Kartsonakis (2024) apontam que a eficiência da autorreparação diminui conforme aumenta a largura da fissura, tornando o reparo completo mais difícil em danos maiores. Essa limitação é relevante porque, no ambiente bucal, as restaurações estão sujeitas a tensões repetidas e progressivas, que podem transformar microtrincas em defeitos mais extensos ao longo do tempo. Em contrapartida, Cerdan *et al.* (2022) apresentam uma alternativa promissora ao demonstrar que nanopartículas magnéticas podem auxiliar no fechamento físico de danos maiores por atração magnética, além de permitir ativação remota por aquecimento. Assim, enquanto alguns sistemas encontram dificuldade diante de fissuras mais amplas, os materiais responsivos a estímulos externos podem oferecer novas possibilidades para aproximar as superfícies danificadas e favorecer o reparo subsequente.

A incorporação de estímulos externos também amplia as possibilidades de controle dos sistemas autorreparáveis. Cerdan *et al.* (2022) destacam o uso do magnetismo como recurso para ativação e fechamento físico de fissuras, enquanto Irzhak, Uflyand e Dzhardimalieva (2022) apontam que calor, pressão e luz ultravioleta podem estimular a mobilidade das cadeias poliméricas e favorecer reações de troca. Essas estratégias mostram que a autorreparação pode ser autônoma ou dependente de estímulos específicos, o que traz vantagens e limitações. No contexto odontológico, sistemas totalmente autônomos seriam mais desejáveis pela praticidade clínica, mas sistemas ativados por estímulos também podem ser úteis caso sejam compatíveis

com condições controláveis, seguras e aplicáveis no consultório.

A manufatura aditiva aparece como outra tendência relevante para o desenvolvimento desses materiais. Jiang *et al.* (2023) destacam que a impressão 3D permite associar mecanismos de autorreparação a estruturas complexas, além de melhorar aspectos como adesão entre camadas por meio de polímeros baseados em reações reversíveis, como Diels-Alder. Roppolo *et al.* (2024) também reforçam que a impressão 3D de materiais autorreparáveis permite produzir estruturas personalizadas e funcionais, embora ainda existam desafios relacionados à imprimibilidade, à estabilidade dimensional e ao desempenho mecânico após a fabricação. Kontiza e Kartsonakis (2024) complementam essa perspectiva ao apontarem que a manufatura aditiva pode favorecer o controle da arquitetura interna e da distribuição dos componentes reparadores. Para a Odontologia, essa associação é particularmente interessante, pois os fluxos digitais e a impressão 3D já vêm sendo incorporados em diferentes etapas clínicas e laboratoriais, embora a aplicação de compósitos restauradores autorreparáveis impressos ainda demande avanços importantes.

Os nanocompósitos também representam uma frente promissora, especialmente por associarem reparo estrutural a propriedades funcionais. Zarepour *et al.* (2023) destacam o uso de grafeno e MXene em materiais autorreparáveis voltados para sensores, supercapacitores, materiais anticorrosivos e blindagem eletromagnética. D'Elia *et al.* (2015) demonstram que compósitos à base de grafeno podem unir autorreparação e capacidade de sensoriamento, o que amplia a função do material para além do simples fechamento de trincas. Essa perspectiva dialoga com a visão de Yongjing Wang, Duc Truong Pham e Chunqian (2015), que apontam para a integração futura de sensores e atuadores inteligentes nos sistemas de reparo. Desse modo, os compósitos autorreparáveis caminham para uma geração de materiais capazes não apenas de reparar danos, mas também de detectar alterações estruturais e responder ao ambiente.

Entretanto, apesar dos avanços promissores, a translação desses materiais para a prática odontológica ainda exige cautela. Huyang, Debertin e Sun (2016) mostram que a autorreparação em compósitos dentários pode contribuir para reduzir falhas e prolongar a vida útil das restaurações, mas essa aplicação depende de requisitos clínicos rigorosos. Kontiza e Kartsonakis (2024) e Zarepour *et al.* (2023) ressaltam desafios como biocompatibilidade, estabilidade química, compatibilidade entre componentes, segurança em longo prazo e viabilidade de produção. Na Odontologia, esses aspectos tornam-se ainda mais complexos, pois o material restaurador precisa resistir à umidade, à variação de pH, às cargas mastigatórias, ao desgaste, à degradação química e, ao mesmo tempo, manter propriedades ópticas adequadas para atender às demandas estéticas.

Diante disso, observa-se que os compósitos autorreparáveis apresentam grande

potencial para ampliar a longevidade das restaurações e reduzir a necessidade de substituições sucessivas, mas ainda não podem ser interpretados como solução plenamente consolidada para uso clínico imediato. White *et al.* (2001), Toohey *et al.* (2007), Blaiszik *et al.* (2010), Wang, Pham e Chunqian (2015), Huyang, Debertin e Sun (2016), Irzhak, Uflyand e Dzhardimalieva (2022), Cerdan *et al.* (2022), Jiang *et al.* (2023), Zarepour *et al.* (2023), Kontiza e Kartsonakis (2024), Roppolo *et al.* (2024), Song *et al.* (2021) e D'Elia *et al.* (2015) demonstram, em conjunto, que a área evoluiu de sistemas simples de reparo para materiais inteligentes, responsivos, híbridos e multifuncionais. Contudo, para que essa tecnologia avance de forma segura para a Odontologia restauradora, ainda são necessários estudos que avaliem desempenho mecânico em condições semelhantes ao meio bucal, biocompatibilidade, estabilidade estética, custo-benefício e durabilidade clínica em longo prazo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu concluir que os compósitos autorreparadores representam uma alternativa inovadora e promissora para superar limitações dos materiais restauradores convencionais, especialmente por atuarem na redução de microfissuras e falhas estruturais associadas à fadiga mastigatória. A literatura evidencia que esses sistemas inteligentes podem não apenas selar trincas, mas também recuperar propriedades mecânicas de forma expressiva, com destaque para mecanismos vasculares, intrínsecos e sistemas avançados, como vitrímeros, nanocompósitos com grafeno, MXenes e partículas magnéticas.

Apesar dos resultados laboratoriais promissores, a aplicação clínica odontológica ainda depende da superação de desafios importantes, como biocompatibilidade em longo prazo, estabilidade térmica e química, manutenção das propriedades estéticas e compatibilidade entre agentes reparadores e matrizes resinosas. Assim, embora ainda sejam necessários estudos mais aprofundados, a autorreparação apresenta grande potencial para ampliar a longevidade das restaurações, reduzir substituições frequentes e integrar, futuramente, sistemas biomiméticos, multirresponsivos e associados à manufatura aditiva na prática odontológica.

REFERÊNCIAS

BLAISZIK, B. J.; KRAMER, S. L. B.; OLUGEBEFOLA, S. C.; MOORE, J. S.; SOTTOS, N. R.; WHITE, S. R. Self-healing polymers and composites. **Annual Review of Materials Research, Palo Alto**, v. 40, p. 179-211, 2010. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070909-104532.

CERDAN, K.; MOYA, C.; VAN PUYVELDE, P.; BRUYLANTS, G.; BRANCART, J. Magnetic self-healing composites: synthesis and applications. **Molecules**, Basel, v. 27, n. 12, artigo 3796, 2022. DOI: 10.3390/molecules27123796.

D'ELIA, E.; BARG, S.; NI, N.; ROCHA, V. G.; SAIZ, E. Self-healing graphene-based composites with sensing capabilities. **Advanced Materials**, Weinheim, v. 27, n. 32, p. 4788-4794, 2015. DOI: 10.1002/adma.201501653.

DURÃO, M. L. et al. Self-healing composites: a path to redefining material durability and integrity. **Materials**, Basel, v. 17, n. 19, artigo 4681, 2024. DOI: 10.3390/ma17194681.

HUYANG, G.; DEBERTIN, A. E.; SUN, J. Design and development of self-healing dental composites. **Materials & Design**, Amsterdam, v. 94, p. 295-302, 2016. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.01.046.

IRZHAK, V. I.; UFLYAND, I. E.; DZHARDIMALIEVA, G. I. Self-healing of polymers and polymer composites. **Polymers**, Basel, v. 14, n. 24, artigo 5404, 2022. DOI: 10.3390/polym14245404.

JIANG, Y. et al. Self-healing polymeric materials and composites for additive manufacturing. **Polymers**, Basel, v. 15, n. 21, artigo 4406, 2023. DOI: 10.3390/polym15214406.

KONTIZA, A.; KARTSONAKIS, I. A. Smart composite materials with self-healing properties: a review on design and applications. **Polymers**, Basel, v. 16, n. 15, artigo 2115, 2024. DOI: 10.3390/polym16152115.

ROPPOLO, I.; CAPRIOLI, M.; PIRRI, C. F.; MAGDASSI, S. 3D printing of self-healing materials. **Advanced Materials**, Weinheim, v. 36, n. 16, artigo 2305537, 2024. DOI: 10.1002/adma.202305537.

SONG, T.; JIANG, B.; LI, Y.; JI, Z.; ZHOU, H.; JIANG, D.; SEOK, I.; MURUGADOSS, V.; WEN, N.; COLORADO, H. Self-healing materials: a review of recent developments. **ES Materials & Manufacturing**, Singapore, v. 14, p. 1-19, 2021. DOI: 10.30919/esmm5f465.



TOOHEY, K. S.; SOTTOS, N. R.; LEWIS, J. A.; MOORE, J. S.; WHITE, S. R. Self-healing materials with microvascular networks. **Nature Materials**, London, v. 6, n. 8, p. 581-585, 2007. DOI: 10.1038/nmat1934.

WANG, Y.; PHAM, D. T.; JI, C. Self-healing composites: a review. **Cogent Engineering**, Abingdon, v. 2, n. 1, artigo 1075686, 2015. DOI: 10.1080/23311916.2015.1075686.

WHITE, S. R.; SOTTOS, N. R.; GEUBELLE, P. H.; MOORE, J. S.; KESSLER, M. R.; SRIRAM, S. R.; BROWN, E. N.; VISWANATHAN, S. Autonomic healing of polymer composites. **Nature**, London, v. 409, n. 6822, p. 794-797, 2001. DOI: 10.1038/35057232.

ZAREPOUR, A.; AHMADI, S.; RABIEE, N.; ZARRABI, A.; IRAVANI, S. Self-healing MXene- and graphene-based composites: properties and applications. **Nano-Micro Letters**, Singapore, v. 15, artigo 100, 2023. DOI: 10.1007/s40820-023-01074-w.