



“Avanços dos materiais restauradores bioativos e suas aplicações em Dentisteria: Uma Revisão Sistemática

"Advances and applications of bioactive restorative materials in conservative dentistry: A Systematic Review"

Filipe Amável Matos de Castro Morais

Monografia de Mestrado Integrado em Medicina Dentária da Faculdade de Medicina Dentária da Universidade do Porto

Porto, 2025

RESUMO

Introdução: A evolução contínua dos biomateriais na medicina dentária conduziu ao desenvolvimento de materiais bioativos capazes de interagir benéficamente com os tecidos dentários. Inicialmente concebidos como materiais inertes, os avanços mais recentes permitiram uma mudança de paradigma, privilegiando materiais que promovem ativamente a reparação e regeneração tecidular. Entre estes, destacam-se os vidros bioativos e os cimentos à base de silicato de cálcio, pelo seu potencial de libertação iónica, capacidade remineralizante e propriedades antimicrobianas devido à libertação de iões que elevam o pH. Esta alcalinização do meio cria um ambiente hostil à sobrevivência de muitas bactérias cariogénicas, como *Streptococcus mutans*, dificultando a sua adesão e crescimento. Assim, esses materiais neutralizam os ácidos produzidos pelas bactérias, mas também afetam a viabilidade bacteriana em ambientes com pH suficientemente elevado, ou seja, há efeito bacteriostático ou até bactericida indireto, dependendo do material e do tempo de exposição.

Objetivo: O objetivo desta revisão sistemática é conhecer e compreender as utilizações e avanços dos materiais bioativos, na área da dentisteria operatória, de forma a mostrar o “estado da arte” destes materiais e dessa forma perceber as suas vantagens e desvantagens relativamente a outro tipo de materiais já usados na prática clínica, bem como as suas aplicações clínicas.

Materiais e métodos: Para a realização desta revisão sistemática foi efetuada uma pesquisa nas bases de dados *PubMed*, *SCOPUS* e *Web of Science* utilizando como estratégia de pesquisa o método PICO, seguindo as *guidelines* definidas pelo PRISMA. O espaço temporal empregue foram os últimos 5 anos (2019-2024). Para além disso, como critérios de inclusão, foram selecionados artigos disponíveis de forma integral, assim como escritos em português, inglês e espanhol.

Resultados: Foram incorporados 23 artigos nesta revisão sistemática. O campo de resultados foi dividido em 3 grupos principais: materiais restauradores, *liners cavitários* e adesivos dentários.

Discussão: A análise dos estudos incluídos evidenciou que os materiais bioativos, tanto materiais restauradores, como *liners* cavitários e adesivos dentários, apresentam um elevado potencial clínico, não só pela sua capacidade remineralizante e de libertação iónica, mas também pelo contributo na regeneração dos tecidos dentários e na prevenção da cárie secundária. Materiais como o *ACTIVA Bioactive*, o *Biodentine* e adesivos modificados com partículas bioativas demonstraram desempenho clínico promissor, conciliando eficácia funcional com bioatividade.

Conclusão: Os materiais bioativos representam uma abordagem promissora na medicina dentária restauradora, oferecendo propriedades terapêuticas adicionais que contribuem para a durabilidade e sucesso clínico das restaurações. No entanto, são necessários mais estudos clínicos de longo prazo para validar a sua eficácia e aplicabilidade em diferentes contextos clínicos.

Palavras-chave: “dentisteria”, “materiais bioativos”, “proteção pulpar”, “forramento cavitário”, “remineralização dentinária”

ABSTRACT

Introduction: The continuous evolution of biomaterials in dentistry has led to the development of bioactive materials capable of interacting beneficially with dental tissues. Initially designed as inert materials, recent advances have enabled a paradigm shift, favouring materials that actively promote tissue repair and regeneration. Among these, bioactive glasses and calcium silicate-based cements stand out due to their ion-releasing potential, remineralizing capacity, and antimicrobial properties due to the release of ions that raise the pH. This alkalinization of the environment creates a hostile setting for the survival of many cariogenic bacteria, such as *Streptococcus mutans*, hindering their adhesion and growth. Thus, these materials neutralize the acids produced by bacteria, but also affect bacterial viability in environments with sufficiently elevated pH. There is an indirect bacteriostatic or even bactericidal effect, depending on the material and the duration of exposure.

Objective: The aim of this systematic review is to identify and understand the uses and advancements of bioactive materials in dentistry, in order to assess their advantages and disadvantages compared to other materials already used in clinical practice, as well as their clinical applications.

Materials and Methods: To carry out this systematic review, a search was conducted in the PubMed, SCOPUS, and Web of Science databases using the PICO method, following the PRISMA guidelines. The time frame applied was the last five years (2019–2024). As inclusion criteria, only full-text articles written in Portuguese, English, or Spanish were selected.

Results: A total of 23 articles were included in this systematic review. The results were categorized into three main groups: restorative materials, cavity liners, and dental adhesives.

Discussion: The analysis of the included studies highlighted that bioactive materials—whether restorative materials, cavity liners, or dental adhesives show significant clinical potential, not only due to their ion-releasing and remineralizing capacities, but also their contribution to the regeneration of dental tissues and prevention of secondary caries. Materials such as ACTIVA Bioactive, Biodentine,

and adhesives modified with bioactive particles demonstrated promising clinical performance, combining functional efficacy with bioactivity.

Conclusion: Bioactive materials represent a promising approach in restorative dentistry, offering additional therapeutic properties that contribute to the durability and clinical success of restorations. However, further long-term clinical studies are needed to validate their effectiveness and applicability across different clinical scenarios.

Keywords: “Conservative dentistry”, “restorative dentistry”, “operative dentistry”, “bioactive materials”, “pulp protection”, “dental cavity lining”, “dentin remineralization”

LISTA DE ABREVIATURAS

BG	Vidro bioativo
MMPs	Metaloproteinases da matriz
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews
PICO	Problem; Intervention; Comparison; Outcome
RMGIC	Cimento de ionómero de vidro modificado por resina
EDX	Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios-X
PILP	Polymer-Induced Liquid-Precursor
pAsp	Ácido poli-aspártico
SEM	Microscopia eletrônica de varrimento
TEM	Microscopia eletrônica de transmissão
FE-SEM	Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo
FTIR	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier
μTBS	Resistência adesiva à microtração
GIC	Cimento de ionómero de vidro
SCA	Adesivo contendo sílica
BCA	Adesivo contendo vidro bioativo
PAMAM	Poliamidoamina
A-PMBG	Adesivo com PAMAM
PBS	Solução tampão salina fosfatada

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS:	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
LISTA DE ABREVIATURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
I. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo	18
II. MATERIAIS E MÉTODOS	20
2.1. Protocolo para a revisão	20
2.2 Critérios de elegibilidade	20
2.3. Fontes de informação/Estratégia de pesquisa	21
2.4 Critérios de inclusão e exclusão	22
2.5 Processo de recolha de dados	23
2.6 Risco de Viés	23
III. RESULTADOS	26
1. Materiais Restauradores	41
2. <i>Linings</i> Cavitários	42
3. Adesivos Dentários	43
IV. DISCUSSÃO	46
4.1. Materiais Restauradores	46
4.1.1. Capacidade de remineralização	46
4.1.2. Libertação de iões	48
4.1.3. Integridade marginal e microinfiltração	49
4.1.4 Desempenho mecânico	51
4.2. <i>Linings</i> Cavitários	53
4.2.1. Isolamento térmico e proteção pulpar	53
4.2.2. Regeneração pulpar	55
4.2.3. Compatibilidade com materiais restauradores	56
4.2.4. Aplicabilidade clínica	57
4.3. Adesivos Dentários	59
4.3.1. Resistência Adesiva	59
4.3.2. Nanoinfiltração e estabilidade da interface	61

4.3.3.	Deposição mineral e formação de apatite	62
4.3.4.	Atividade antimicrobiana	63
V.	CONCLUSÃO.....	66
VI.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
VII.	ANEXOS	74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Dados para a elaboração da questão científica que servirá de base à revisão sistemática, utilizando a estratégia PICO.....	20
Tabela 2. Bases de pesquisa utilizadas e respectivas equações booleanas	22
Tabela 3. Critérios de inclusão e exclusão de artigos	22
Tabela 4. Materiais Restauradores	28
Tabela 5. Continuação	30
Tabela 6. Continuação	31
Tabela 7. Continuação	32
Tabela 8. Continuação	33
Tabela 9. Liners Cavitários	34
Tabela 10. Continuação	35
Tabela 11. Continuação	36
Tabela 12. Adesivos Dentários	37
Tabela 13. Continuação	38
Tabela 14. Continuação	39
Tabela 15. Avaliação da qualidade dos estudos (risco de viés)	40
Tabela 16. Continuação	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma	26
Figura 2. Valores médios diários de iões de flúor libertados pelos materiais restauradores dentários (AB, TE, KM) e pelo controlo (C). Adaptado de Porenczuk A. et al. (18).....	74
Figura 3. Avaliação clínica com base nos critérios USPHS Ryge aos 6, 12, 18 e 24 meses. A pontuação A representa a situação clínica ideal, B representa uma situação clinicamente aceitável e C representa falha. Adaptado de Banon R. et. al (11).....	74
Figura 4. Variações de temperatura na parede pulpar durante a restauração com diferentes materiais: Activa (Pulpdent), TheraCal (Bisco), Fuji II LC (GC), Dycal (Dentsply). Temperaturas iniciais e picos durante ativações de luz sucessivas. Adaptado de Munhoz VD. et. al (2).....	75
Figura 5. Gráfico comparativo dos valores de resistência de união ao cisalhamento (MPa) entre os diferentes grupos de estudo (Dycal, TheraCal, Lime-Lite, BioActive, Biodentine, RMGIC e grupo controlo). Adaptado de Tohidkhah S. et. al (28).....	75
Figura 6. Diagrama de linhas representando a resistência de união à microtração (microtensile bond strength) das amostras após 1, 3 e 6 meses. As comparações entre os grupos incluem adesivo controlo, adesivo com 0,2% e 0,5% de nanopartículas em peso. Adaptado de Rao AC. et. al (34).....	76



INTRODUÇÃO

I. INTRODUÇÃO

Os materiais para reparação tecidual têm evoluído progressivamente ao longo do tempo. A descoberta do vidro bioativo (BAG) desempenhou um papel fundamental nesta evolução. A primeira geração de materiais para substituição tecidual exigia que os mesmos fossem bioinertes, ou seja, que não desencadeassem uma resposta inflamatória no hospedeiro. No entanto houve uma revolução na engenharia tecidual quando o professor Larry Hench introduziu o vidro bioativo (um vidro de fosfossilicato de sódio e cálcio), que foi o primeiro material a exibir capacidade de ligação óssea com excelente capacidade de ligação.⁽¹⁾ Desde então houve uma mudança no paradigma dos materiais para substituição tecidual, passando de bioinertes para bioativos.⁽¹⁾ Um material que pudesse interagir benéficamente com o tecido do hospedeiro para conduzir à sua reparação e regeneração tornou-se uma necessidade primordial. A partir deste ponto houve um crescimento dos materiais bioativos, incluindo vidro bioativo modificado, fosfato de cálcio, hidroxiapatite e silicatos de cálcio, entre outros.⁽¹⁾

A dentina atua como uma barreira protetora natural contra o calor, mas em preparações cavitárias profundas, onde a espessura da dentina é fina, o risco de lesão térmica aumenta significativamente.⁽²⁾ O aumento da temperatura durante os procedimentos dentários, tais como a fotopolimerização e o seu impacto no tecido pulpar têm sido uma preocupação crescente. O aumento de temperatura durante estes procedimentos pode resultar em danos térmicos à polpa, como necrose ou inflamação irreversível. Nesse sentido, materiais de forramento cavitário e bases protetoras são recomendados para substituírem a dentina como barreiras térmicas.^(2, 3)

Tradicionalmente, cimentos à base de hidróxido de cálcio têm sido usados para proteção pulpar. Embora sejam eficazes para estimular a formação de dentina reativa, eles têm alta solubilidade e fracas propriedades adesivas. Por esse motivo, novos materiais, como o cimento de silicato de cálcio (ex: *TheraCal*®, *Bisco, USA*), foram desenvolvidos, apresentando menor solubilidade e melhores propriedades adesivas. Além disso, os cimentos de ionômero de

vidro modificados por resina também são indicados devido à sua adesão química aos tecidos dentários e à capacidade de libertar flúor. ⁽³⁾

Apesar de serem os materiais restauradores dentários mais amplamente utilizados atualmente, os materiais à base de resina apresentam falhas conhecidas. Como indicam a maioria dos estudos de resinas compostas e adesivos dentários, a cárie secundária é a principal razão para a falha das restaurações com resina e a redução da sua vida útil. Em indivíduos com alto risco de cárie, a comunidade microbiana, dominada por bactérias acidogénicas, provoca a deterioração ácida da interface de adesão ou do material em si, além de causar perda mineral ao redor das restaurações. Além disso, os materiais à base de resina sofrem biodegradação na cavidade oral. ⁽⁴⁾

Como resultado, nas últimas décadas, houve um crescimento exponencial no desenvolvimento de materiais restauradores com propriedades antimicrobianas, focados na prevenção e controlo da cárie secundária.⁽⁴⁾ O principal desafio no desenvolvimento de resinas bioativas atualmente é a identificação de agentes com atividade anticariogénica eficientes e seguros, que não prejudiquem as propriedades finais do material e que apresentem bom desempenho a longo prazo assim como tenham uma aplicação clínica favorável. ^(4, 5)

Ainda não foi conclusivamente explicado se a cárie secundária está diretamente relacionada ao tipo de material restaurador, mas as falhas de restaurações devido à cárie secundária parecem estar associadas às resinas compostas. Uma abordagem para prevenir a cárie secundária, é a introdução de aditivos libertadores de iões. Esses aditivos têm o potencial de libertar iões de cálcio, fosfato e flúor, e são capazes de precipitar minerais de apatite na superfície do material. Existem várias possibilidades de modificar materiais dentários para que apresentem efeitos antimicrobianos e atuem na prevenção de cáries, sendo uma abordagem promissora a adição de vidros bioativos (BGs). Devido à sua capacidade de remineralizar esmalte e dentina, os BGs são um tema de pesquisa interessante para a prevenção de cáries. Compósitos modificados com BGs (giómeros) mostraram a capacidade de remineralizar a estrutura dentária, devido à libertação de iões como flúor, cálcio e fosfato, além de possuírem efeito antimicrobiano. Esse efeito baseia-se na libertação de iões dos BGs num ambiente aquoso e no aumento associado do valor de pH da

solução, ao contrário dos materiais compostos convencionais, que não têm capacidade de neutralizar ácidos e não podem influenciar o pH da placa. ⁽⁶⁾

Nas últimas décadas, também os sistemas adesivos dentários têm evoluído significativamente, passando de soluções puramente mecânicas para abordagens mais integradas que visam preservar a integridade da interface adesiva ao longo do tempo. Um dos maiores desafios clínicos continua a ser a degradação da camada híbrida e a consequente falha da restauração, frequentemente associadas à ação de enzimas endógenas, como as metaloproteinases da matriz (MMPs), e à infiltração de fluidos e microrganismos.⁽⁷⁾ Perante estes obstáculos, tem surgido o interesse pelos sistemas adesivos dentários com propriedades bioativas, capazes não só de promover a adesão à estrutura dentária, mas também de interagir benéficamente com o substrato biológico. ^(7, 8)

Nesse sentido, a incorporação de partículas bioativas, como o vidro bioativo (BG) ou compostos à base de fosfato de cálcio, tem-se revelado uma estratégia promissora. Estes materiais, quando integrados nos sistemas adesivos, permitem a libertação sustentada de iões remineralizantes e podem contribuir para a estabilização química da dentina, reforçando a camada híbrida e reduzindo a sua degradação ao longo do tempo.⁽⁸⁾ Para além disso, alguns destes sistemas modificados têm demonstrado potencial antimicrobiano e capacidade de neutralização do pH, o que os torna particularmente úteis em contextos de risco elevado de cárie secundária. Assim, os adesivos bioativos representam uma nova geração de materiais restauradores, com um papel mais abrangente na prevenção e terapêutica da doença dentária. ^(7, 8)

Desta forma, os materiais restauradores bioativos assumem um papel central, não apenas pela sua função mecânica, mas pela sua capacidade de interagir com os tecidos dentários e promover fenómenos de reparação, regeneração e defesa local. Esta evolução surge como resposta à necessidade de controlar fatores como a cárie secundária, a degradação da interface adesiva e a perda mineral ao redor das restaurações, especialmente em indivíduos com risco cariogénico elevado. ^(9, 10)

A crescente diversidade de formulações disponíveis no mercado exige, no entanto, uma avaliação crítica das suas reais propriedades bioativas, da sua compatibilidade com os sistemas adesivos e resinas compostas convencionais e do seu impacto a longo prazo na durabilidade e integridade da restauração. ⁽¹¹⁾

1.1 Objetivo

O objetivo desta revisão sistemática é conhecer e compreender as utilizações e avanços dos materiais bioativos, na área da dentisteria operatória, de forma a demonstrar o “estado da arte” destes materiais e dessa forma perceber as suas vantagens e desvantagens relativamente a outro tipo de materiais já usados na prática clínica, bem como as suas aplicações clínicas.



MATERIAIS E MÉTODOS

II. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Protocolo para a revisão

A presente revisão sistemática foi elaborada segundo as *guidelines* definidas pelo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Diz respeito a um protocolo que se utiliza como orientação para revisões sistemáticas onde é descrito o racional, a hipótese e os métodos planeados. Foi também registada no site da PROSPERO com o respetivo código CRD420251058356.

2.2 Critérios de elegibilidade

Começou por ser elaborada uma questão científica, baseada no método PICO⁽¹²⁾ (*População, Intervenção, Comparação e Outcome*), pelo processo abaixo descrito (*Tabela 1*).

P (População)	Pacientes com necessidade de restaurações dentárias, proteções pulpares ou procedimentos de regeneração dentária
I (Intervenção)	Aplicação de materiais restauradores bioativos
C (Comparação)	Comparação entre os diferentes materiais restauradores bioativos e materiais restauradores tradicionais
O (Outcome)	Resultados relacionados com a eficácia clínica, com a longevidade das restaurações, proteção pulpar, remineralização e biocompatibilidade.

Tabela 1. Dados para a elaboração da questão científica que servirá de base à revisão sistemática, utilizando a estratégia PICO

Baseada nesta estratégia de pesquisa foi formulada a seguinte questão de investigação: “Em pacientes que necessitam de restaurações dentárias ou proteção pulpar, quais os materiais bioativos que apresentam melhor eficácia clínica em termos de longevidade da restauração, proteção pulpar e potencial de remineralização?” de forma a perceber quais são os materiais bioativos com melhores aplicações clínicas nas diferentes situações clínicas.

2.3. Fontes de informação/Estratégia de pesquisa

Para a elaboração desta revisão sistemática foi realizada uma pesquisa nas bases de dados *PubMed*, *Scopus* e *Web of Science* com as equações booleanas adaptadas a cada uma e descritas na tabela abaixo (*Tabela 2*).

Base de pesquisa	Equação booleana
<i>PubMed</i>	("dentistry, operative"[MeSH Terms] OR ("dentistry" AND "operative" OR "operative dentistry" OR ("operative" AND "dentistry") OR (("conservancies" OR "conservancy" OR "conservancy s" OR "conservation" OR "conservational" OR "conservations" OR "conservative" OR "conservatively" OR "conservatives" OR "conserve"[OR "conserved" OR "conserves" OR "conserving") AND ("dentistry"[MeSH Terms] OR "dentistry" OR "dentistry s")) OR ("restorative dent"[Journal] OR ("restorative"[All Fields] AND "dentistry"[All Fields]) OR "restorative dentistry"[All Fields])) AND ("bioact mater"[Journal] OR ("bioactive"[All Fields] AND "materials"[All Fields]) OR "bioactive materials"[All Fields]) AND (((("dental pulp"[MeSH Terms] OR ("dental"[All Fields] AND "pulp"[All Fields]) OR "dental pulp"[All Fields] OR "pulp"[All Fields]) AND ("protect"[All Fields] OR "protected"[All Fields] OR "protecting"[All Fields] OR "protection"[All Fields] OR "protections"[All Fields] OR "protective agents"[Pharmacological Action] OR "protective agents"[MeSH Terms] OR ("protective"[All Fields] AND "agents"[All Fields]) OR "protective agents"[All Fields] OR "protectant"[All Fields] OR "protectants"[All Fields] OR "protective"[All Fields] OR "protectively"[All Fields] OR "protectiveness"[All Fields] OR "protectives"[All Fields] OR "protects"[All Fields])) OR ("dental cavity lining"[MeSH Terms] OR ("dental"[All Fields] AND "cavity"[All Fields] AND "lining"[All Fields]) OR "dental cavity lining"[All Fields] OR ("cavity"[All Fields] AND "liner"[All Fields]) OR "cavity liner"[All Fields]) OR (("dentin"[MeSH Terms] OR "dentin"[All Fields] OR "dentine"[All Fields] OR "dentines"[All Fields] OR "dentins"[All Fields] OR "dentin s"[All Fields] OR "dentinal"[All Fields] OR "dentine s"[All Fields]) AND ("remineralization"[All Fields] OR "remineralize"[All Fields] OR

	"remineralized"[All Fields] OR "remineralizing"[All Fields]))))
<i>Scopus</i>	(TITLE-ABS-KEY (conservative AND dentistry) OR TITLE-ABS-KEY (operative AND dentistry) OR TITLE-ABS-KEY (restorative AND dentistry) AND TITLE-ABS-KEY (bioactive AND materials) AND TITLE-ABS-KEY (pulp AND protection) OR TITLE-ABS-KEY (cavity AND lining) OR TITLE- ABS-KEY (dentin AND remineralization))
<i>Web of science</i>	((ALL=(Conservative dentistry OR restorative dentistry OR operative dentistry)) AND ALL=(bioactive materials)) AND ALL=(Cavity lining OR pulp protection OR dentin remineralization)

Tabela 2. Bases de pesquisa utilizadas e respectivas equações booleanas

2.4 Critérios de inclusão e exclusão

Após a pesquisa, todas as referências foram extraídas para o *software EndNote*®²¹. De seguida, para auxiliar a seleção dos estudos foram definidos os critérios de inclusão e exclusão (*tabela 3*).

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
• Artigos publicados nos últimos 5 anos • Artigos em inglês, português ou espanhol • Artigos com acesso gratuito integral • Artigos que se foquem em forramento cavitário, proteção pulpar ou restauração dentária e remineralização de tecidos • Não é revisão sistemática, revisão, meta- análise, artigo de opinião, relato de caso	• Artigos publicados há mais de 5 anos • Artigos em línguas diferentes de inglês, português ou espanhol • Artigos sem acesso gratuito integral • Artigos que se foquem em capeamento pulpar direto, obturação canalar ou outra temática não pretendida nesta revisão • Revisões sistemáticas, revisões, meta- análises, artigos de opinião, relatos de casos

Tabela 3. Critérios de inclusão e exclusão de artigos

Numa primeira fase, foram eliminados todos os artigos duplicados. De seguida, através da leitura do título e *abstract*, foram excluídos os artigos que não cumprissem todos os critérios de inclusão ou que cumprissem algum dos critérios de exclusão. Por fim, com a leitura integral dos artigos foi feita a inclusão final. 9 artigos foram excluídos por não compararem materiais bioativos, 4 artigos por se focarem na hipersensibilidade dentária e 2 artigos por analisarem cimentos de obturação e selantes de fissuras. Foi de seguida extraída toda a informação relevante, de uma forma sintetizada e organizada, para uma tabela desenhada para responder à questão-base que esta revisão pretende ver respondida.

2.5 Processo de recolha de dados

Foi utilizado o *EndNote*®²¹ para a organização das respetivas referências, para a exclusão de todos os artigos duplicados e também para o armazenamento de estudos e respetivos textos completos.

Para cada estudo foi recolhida toda a informação necessária, tendo a extração dos dados dos estudos eleitos sido processada no *Microsoft Excel 2021*. Assim, em referência à abordagem proposta, de cada artigo foram retirados os seguintes dados: autores, ano de publicação, participantes /amostra, metodologia utilizada, tipo de material bioativo, tempo de *follow-up*, resultados e conclusões/comentários relevantes.

2.6 Risco de Viés

A avaliação da qualidade da metodologia dos artigos selecionados é essencial na elaboração de uma revisão sistemática.

Assim, a qualidade metodológica de cada estudo *in vitro* foi avaliada utilizando a ferramenta *Quin Tool* (13) e cada ensaio clínico randomizado foi avaliado utilizando a ferramenta *Risk of Bias 2 (RoB 2) tool* (14) da Cochrane, conforme se descreve na *Tabela 15* e na *Tabela 16* dos Resultados.

A ferramenta *Quin Tool* classifica os estudos com base em 12 critérios: objetivos claramente definidos, cálculo do tamanho amostral descrito, técnica de amostragem bem explicada, grupo de comparação definido, metodologia detalhada e padronizada, detalhes sobre os operadores (número, calibração), randomização (sequência, ocultação), método de mensuração dos desfechos, detalhes sobre os avaliadores dos desfechos, cegamento (de operadores, avaliadores, estatísticos), análise estatística (*software* e testes usados) e apresentação dos resultados (claros e coerentes com os objetivos). Posteriormente, classifica cada critério com 2 pontos (especificado adequadamente), 1 ponto (especificado de forma inadequada), 0 pontos (não especificado) e NA (o critério não se aplica ao estudo). De seguida, o score final é calculado através da fórmula $\{\text{Score final (\%)} = (\text{Total obtido} \times 100) \div (2 \times \text{número de critérios aplicáveis})\}$. Percentagens superiores a 70% indicam estudos com baixo risco de viés, entre 50 e 70% risco moderado e inferiores a 50% alto risco de viés.

A ferramenta *Risk of Bias 2 (RoB 2) tool* classifica os estudos com base em 5 critérios: viés do processo de randomização, viés devido a desvios da intervenção pretendida, viés devido a dados de desfecho ausentes, viés na mensuração do desfecho e viés na seleção dos resultados reportados. Cada critério é classificado como alto risco, alguma preocupação e baixo risco. O alto risco de viés equivale a uma classificação de baixa qualidade do estudo e vice-versa.



RESULTADOS

III. RESULTADOS

Através da pesquisa inicial foram obtidos um total de 145 artigos, 77 na *Pubmed*, 17 na *Scopus* e 51 na *Web Of Science*. Após a eliminação dos artigos duplicados foram obtidos 107 artigos. De seguida foram então aplicados os critérios de inclusão e exclusão, tendo restado 38 artigos para avaliar a elegibilidade tendo em conta a leitura integral dos artigos. Finalmente, foram incluídos para análise 23 artigos, dos quais foi extraída toda a informação relevante para as *Tabelas IV* dos “Resultados”. O fluxograma elaborado para pesquisa e seleção descrita encontra-se representado esquematicamente na *Figura 1*.

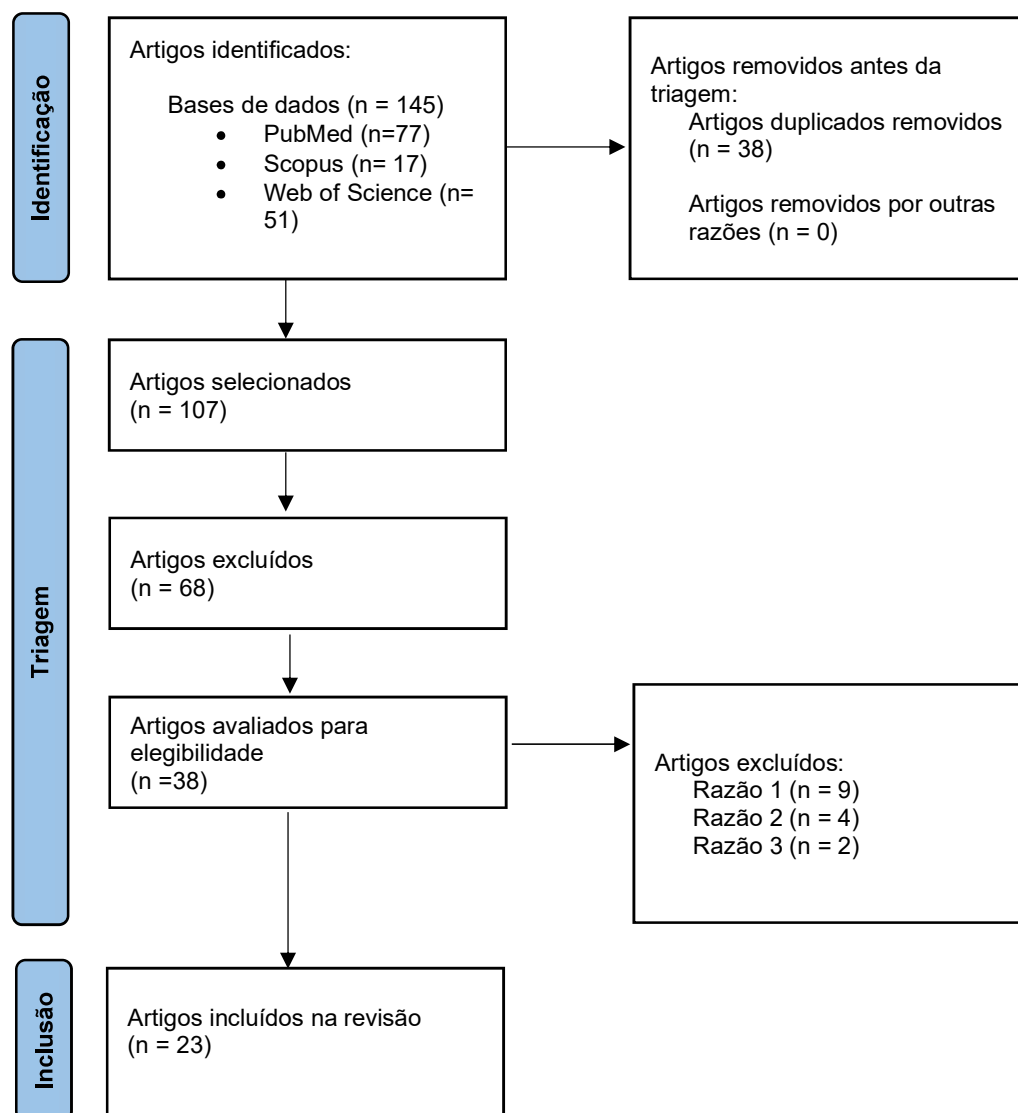


Figura 1. Fluxograma

Tendo em conta que se pretende avaliar os diferentes tipos de materiais bioativos com base em diferentes critérios de avaliação de forma a perceber que materiais podem oferecer uma melhor performance clínica, os estudos incluídos para análise dos “Resultados” apresentam uma variabilidade de materiais estudados e avaliados bem como diferentes critérios de avaliação. Desta forma e por razões de organização a abordagem ao tema proposto foi dividida em três grupos principais, os quais, por sua vez, subdivididos em subgrupos:

1. Materiais Restauradores

- Capacidade de remineralização;
- Libertação de iões;
- Integridade marginal e microinfiltração;
- Desempenho mecânico;

2. *Liners* Cavitários

- Isolamento térmico e proteção pulpar;
- Regeneração pulpar;
- Compatibilidade com materiais restauradores;
- Aplicabilidade clínica;

3. Sistemas Adesivos Dentários

- Resistência adesiva;
- Nanoinfiltração e estabilidade da interface;
- Deposição mineral e formação de apatite;
- Atividade antimicrobiana;

Assim, apesar de vários estudos poderem ser incluídos em mais do que um dos grupos e subgrupos, os mesmos foram atribuídos àquele que mais se aproximavam e/ou estavam direcionados.

Autor/ Ano	Participantes (nº, idade) / Amostra	Tipo de material bioativo	Metodologia utilizada	Follow- up	Resultados	Comentários/ Conclusões
Bacino M et al, 2019⁽¹⁵⁾	Extraídos molares humanos; 3-5 amostras por grupo	Poli-ácido aspártico (pAsp) adicionado a cimento de ionômero de vidro modificado por resina (RMGI)	Estudo experimental com dentes molares humanos extraídos. Foram criadas lesões artificiais por desmineralização com solução de acetato a 0,05 M (pH 5,0) por 66 horas. Foram reidratados com solução PILP (25 mg/ml) ou modificados com pAsp (20% ou 40%) em cimento RMGI (BioCem). Após 2 semanas de inserção em fluido corpóreo simulado (SBF), foram analisados por SEM (microscopia eletrônica), EDS (Espectroscopia de Dispersão de Raios X por Energia) e nanoidentificação para avaliar a recuperação de propriedades mecânicas e mineralização. BC – BioCem sem modificações (controle) BC20 – BioCem com 20% de pAsp BC40 – BioCem com 40% de pAsp rh25BC – Reidratação com solução PILP (25 mg/ml de pAsp) seguida de restauração com BioCem	2 semanas	Após o tratamento de remineralização, todos os grupos tratados (BC, BC20, BC40 e rh25BC) apresentaram uma redução significativa no encolhimento da lesão em comparação com as amostras desmineralizadas. O grupo BC40 mostrou a menor taxa de encolhimento, reduzindo o colapso da matriz de colágeno em cerca de 50%. O grupo rh25BC, que envolveu a reidratação com solução PILP altamente concentrada, apresentou os maiores valores de módulo elástico e dureza na zona mais externa da lesão, aproximando-se dos valores normais de dentina em cerca de 70 µm de profundidade. A análise por SEM mostrou a formação de uma camada de reação rica em carbono na interface cimento-dentina, indicando interação entre pAsp e o cimento RMGI. O BC40 também apresentou porosidade aumentada devido à separação de fase de pAsp na matriz de cimento.	A adição de pAsp ao cimento RMGI (BioCem) demonstrou ser eficaz na remineralização funcional da dentina desmineralizada, promovendo a formação de cristais de apatite dentro das fibras de colágeno. A técnica de reidratação com solução PILP (rh25BC) mostrou o melhor desempenho, com uma recuperação substancial das propriedades nanomecânicas após apenas duas semanas de tratamento. A presença de uma camada de reação na interface cimento- dentina sugere que o pAsp atua como um agente de direcionamento de processo para promover a mineralização intrafibrilar. Esses resultados sugerem que a incorporação do processo PILP nos tratamentos restauradores pode ser uma abordagem viável para a reparação funcional da dentina em contexto clínico.
Bhadra D et al, 2019⁽¹⁶⁾	60 pacientes (18-50 anos), 30 em cada grupo	Activa™ bioactive composite	Estudo clínico randomizado, com 60 pacientes (18-50 anos) com lesões de cárie classe II. Os pacientes foram divididos em dois grupos: Grupo 1 (n = 30) com restauração em resina composta nano-híbrida e Grupo 2 (n = 30) com Activa™ bioactive composite. Após anestesia local e preparação cavitária, as cavidades foram restauradas com os respectivos materiais. As restaurações foram avaliadas após 1 semana, 6 meses e 1 ano	1 ano	Não houve diferença estatisticamente significativa entre os dois materiais em termos de adaptação marginal, descoloração marginal, forma anatômica, textura da superfície, retenção, cáries secundárias e sensibilidade pós-operatória após 1 semana, 6 meses e 1 ano. O Activa™ bioactive composite apresentou melhor resistência ao desgaste e capacidade de liberação de flúor.	Ambos os materiais demonstraram desempenho clínico semelhante após 1 ano. O Activa™ bioactive composite mostrou vantagem em termos de resistência ao desgaste e liberação de flúor. Ambos os materiais podem ser utilizados com sucesso para restaurar lesões de cárie classe II.

Tabela 4. Materiais Restauradores

Autor/ Ano	Participantes (nº, idade) / Amostra	Tipo de material bioativo	Metodologia utilizada	Follow- up	Resultados	Comentários/ Conclusões
Leon- Pineda C et al, 2019⁽¹⁷⁾	22 dentes permanentes extraídos (in vitro)	Tetric EvoCeram Bulk Fill (contém flúor)	Estudo in vitro com 22 dentes permanentes extraídos, submetidos a preparações de classe V. Dez dentes foram restaurados com Z100 (resina não fluoretada) – Grupo 1 – e dez com Tetric EvoCeram Bulk Fill (contém flúor) – Grupo 2. Os dentes foram imersos em solução de desafio cariogênico (pH 4,4) por 4 dias. Após esse período, os dentes foram seccionados e analisados com microscopia de luz polarizada para medir as áreas de desmineralização nas margens das restaurações.	4 dias	Tetric EvoCeram Bulk Fill apresentou significativamente menos desmineralização em esmalte ($1541,545 \pm 1167,027 \mu\text{m}^2$) e dentina ($3027,600 \pm 512,078 \mu\text{m}^2$) comparado ao Z100 (esmalte: $2781,889 \pm$ $1045,213 \mu\text{m}^2$; dentina: $3960,455 \pm 705,964$ μm^2). A inibição da desmineralização foi mais eficaz em esmalte do que em dentina para ambos os materiais.	Tetric EvoCeram Bulk Fill apresentou melhor desempenho na inibição da desmineralização nas margens das restaurações em comparação com Z100, especialmente em esmalte. Esses resultados sugerem que materiais contendo flúor oferecem maior proteção contra desmineralização em restaurações.
Porenczuk A et al, 2019⁽¹⁸⁾	15 amostras de cada material restaurador (in vitro)	ACTIVA BioActive- Restorative (RMGIC reforçado com biovidro), Ketac Molar Quick Aplicap (GIC)	Estudo in vitro com três grupos experimentais (n=15) de materiais restauradores: ACTIVA BioActive- Restorative, Ketac Molar Quick Aplicap (GIC) e Tetric EvoCeram (resina nano- híbrida). Os materiais foram moldados em discos de 8 mm de diâmetro e 3 mm de altura. Os discos foram incubados em água deionizada a 37°C por 14 dias. A liberação de flúor foi medida diariamente usando um eletrodo específico de íons de flúor. Foram realizadas análises microscópicas por SEM e XRD para avaliar a microestrutura e composição química.	14 dias	O Ketac Molar Quick Aplicap libertou a maior quantidade de flúor (20,698–54,118 ppm), seguido por ACTIVA BioActive-Restorative (1,236–15,552 ppm) e Tetric EvoCeram (0,370–1,148 ppm). A análise por SEM revelou que ACTIVA apresentava porosidade inicial, que diminuiu após o teste, mas surgiram microfissuras. A análise por XRD confirmou a presença de flúor, silício e cálcio em ACTIVA.	O ACTIVA BioActive-Restorative apresentou menor liberação de flúor em comparação com Ketac Molar Quick Aplicap, mas foi significativamente maior que Tetric EvoCeram. A presença de biovidro no ACTIVA favorece a liberação de íons e potencial de remineralização, sugerindo eficácia para prevenção de cáries secundárias.

Tabela 4. Continuação

Autor/ Ano	Participantes (nº, idade) / Amostra	Tipo de material bioativo	Metodologia utilizada	Follow- up	Resultados	Comentários/ Conclusões
Kim HJ et al, 2021⁽¹⁹⁾	87 pré-molares humanos (in vitro)	Bioactive Glass (BAG) incorporado em cimento de ionômero de vidro (GIC)	Estudo in vitro com quatro grupos experimentais (n=3 por grupo): - BG0 – Controle (GIC sem BAG) - BG5 – GIC com 5% de BAG - BG10 – GIC com 10% de BAG - BG20 – GIC com 20% de BAG Os dentes foram desmineralizados com EDTA a 17% por 6 horas e restaurados com os materiais experimentais. Os espécimes foram armazenados em saliva artificial por 2 semanas. Análises por FE-SEM e XRD foram realizadas para avaliar a formação de fluorapatite (FAP) na superfície da dentina. Foram também realizados testes de resistência ao cisalhamento (SBS).	2 semanas	Precipitados de fluorapatite (FAP) foram observados em BG5, BG10 e BG20 (análise por XRD). A formação de precipitados aumentou com o aumento da concentração de BAG. Não houve diferença estatisticamente significativa na resistência de união entre os grupos ($p > 0,05$). O grupo BG20 mostrou a maior formação de FAP e cobertura da superfície da dentina.	A incorporação de BAG em GIC promoveu a formação de fluorapatite na superfície da dentina sem comprometer a adesão. BAG a 10-20% mostrou o melhor desempenho em termos de remineralização. BAG pode ser um aditivo promissor para melhorar a bioatividade e durabilidade de restaurações à base de GIC.
Par M et al, 2021⁽²⁰⁾	128 amostras de dentina humana (in vitro)	Bioactive glass 45S5 e bioactive glass com flúor (F-BG) em resina composta	Estudo in vitro com quatro grupos experimentais (n=8 por grupo): - C-10 – Resina composta com 10% de bioactive glass 45S5 - C-20 – Resina composta com 20% de bioactive glass 45S5 - E-10 – Resina composta com 10% de bioactive glass com flúor (F-BG) - E-20 – Resina composta com 20% de bioactive glass com flúor (F-BG) Os dentes foram desmineralizados em solução de ácido láctico (pH = 4) por 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 e 32 dias. A dureza superficial (microdureza) da dentina foi avaliada após cada ciclo de imersão. Análises por microscopia eletrônica de varredura (SEM) foram realizadas para avaliar a integridade estrutural.	32 dias	As resinas com 20% de bioactive glass (C-20 e E-20) mantiveram a dureza da dentina após até 12 dias de exposição ao ácido. C-10 e E-10 mantiveram a dureza da dentina por até 4 dias. SEM revelou precipitação de apatita e fechamento parcial dos túbulos dentinários nos grupos com 20% de bioactive glass. Os materiais comerciais (Centron, Beautifil II e ChemFil Rock) mostraram menor efeito protetor em comparação com os materiais experimentais.	A incorporação de bioactive glass (45S5 e F-BG) em resinas compostas promoveu proteção contra desmineralização dentinária. A concentração de 20% de bioactive glass foi mais eficaz para manter a integridade estrutural e funcional da dentina. Materiais comerciais demonstraram efeito protetor limitado em comparação com materiais experimentais.

Tabela 5. Continuação

Autor/ Ano	Participantes (nº, idade) / Amostra	Tipo de material bioativo	Metodologia utilizada	Follow- up	Resultados	Comentários/ Conclusões
Neves P et al, 2022⁽²¹⁾	36 pré-molares e molares humanos extraídos (in vitro)	Surefill One™ (resina composta bioativa)	Estudo in vitro com quatro grupos experimentais (n=13 por grupo): - Grupo 1 – Surefill One™ (Dentsply-Sirona) - Grupo 2 – Spectra™ ST HV (resina composta nano-híbrida) - Grupo 3 – Grupo controle negativo (sem intervenção) - Grupo 4 – Grupo controle positivo (sem restauração) Cavidades de classe V foram preparadas em todos os dentes (4 mm mesio-distal, 3 mm ocluso-gingival e 3 mm de profundidade). Foram utilizadas técnicas de medicina nuclear com tecnécio-99m (99mTc) para avaliar microinfiltração. A radiação foi medida por uma câmara gama e analisada estatisticamente por Kruskal–Wallis e Games–Howell.	24 horas (in vitro)	O grupo Surefill One™ apresentou maior taxa de microinfiltração (3371 ± 1607 CPM) comparado ao grupo Spectra™ (1286 ± 751 CPM) ($p = 0,002$). Não houve diferença estatisticamente significativa entre o grupo Surefill One™ e o grupo controle positivo ($p = 0,553$). A taxa de microinfiltração foi significativamente menor no grupo controle negativo (140 ± 13 CPM) ($p < 0,001$).	Surefill One™ apresentou maior taxa de microinfiltração em comparação com a resina composta convencional (Spectra™). Apesar da elevada microinfiltração, Surefill One™ pode ser útil em restaurações temporárias e dentes deciduos devido à sua bioatividade e facilidade de aplicação.
Diniz AC et al, 2023⁽²²⁾	36 dentes bovinos (in vitro)	RMGIC (cimento de ionômero de vidro modificado por resina) bioactive glass 45S5 e niobium phosphate (NbG)	Estudo in vitro com três grupos experimentais (n=12 por grupo): - RMGIC – Cimento de ionômero de vidro modificado por resina - 45S5 – RMGIC + 10% de bioactive glass - NbG – RMGIC + 10% de niobium phosphate Os dentes foram desmineralizados em meio ácido (pH 4.0) e restaurados com os materiais testados. Análises de microdureza (KHN), liberação de flúor e cálcio, potencial de alcalinização e bioatividade foram realizadas após 24 horas, 7, 30 e 60 dias. Teste de crescimento de biofilme com Streptococcus mutans foi realizado por 120 horas para avaliação da acidogenicidade e viabilidade bacteriana (CFU/mL).	24 horas, 7, 30 e 60 dias (in vitro)	45S5 apresentou maior liberação de flúor e cálcio, bem como maior potencial de alcalinização em meio ácido ($p < 0,001$). Microdureza foi significativamente maior nos grupos 45S5 e NbG após 30 e 60 dias ($p < 0,001$). Não houve diferença significativa na viabilidade bacteriana entre os grupos ($p > 0,05$). 45S5 reduziu significativamente a acidogenicidade do biofilme após 5 dias ($p < 0,001$).	A incorporação de bioactive glass 45S5 e NbG em RMGIC promoveu maior remineralização e resistência da dentina. 45S5 mostrou melhor desempenho em termos de liberação de flúor, formação de hidroxiapatite e redução da acidogenicidade do biofilme. Materiais bioativos como 45S5 e NbG são promissores para melhorar a estabilidade e a longevidade de restaurações adesivas.

Tabela 6. Continuação

Autor/ Ano	Participantes (nº, idade) / Amostra	Tipo de material bioativo	Metodologia utilizada	Follow- up	Resultados	Comentários/ Conclusões
Al-Wakeel R et al, 2024⁽²³⁾	60 molares humanos (40 cariados + 20 hígidos) (in vitro)	Activa Bioactive (Pulpdent) e Equia Forte Fil (GC Corp)	Estudo in vitro com três grupos experimentais (n=20 por grupo): - Grupo 1 – Molares hígidos restaurados com Activa Bioactive - Grupo 2 – Molares cariados tratados com CMCR (Papacarie) + Activa Bioactive - Grupo 3 – Molares cariados tratados com CMCR + Equia Forte Fil (GIC híbrido) Os dentes foram submetidos a escavação químico-mecânica com Papacarie (30–60 s) e restaurados com os materiais testados. Foram realizados testes de microdureza (Vickers), análise de elementos (EDX) e análise química (Micro-Raman) após 24 horas.	24 horas (in vitro)	Activa Bioactive apresentou valores de microdureza significativamente mais elevados que o Equia Forte Fil (p < 0,05). EDX revelou maior concentração de sílica e alumínio na interface entre Activa Bioactive e dentina. Micro-Raman mostrou maior frequência de fosfato (PO4 ³⁻) nos grupos tratados com Activa Bioactive, sugerindo maior remineralização. Não foram observadas diferenças significativas na concentração de cálcio e fósforo entre os grupos (p > 0,05).	Activa Bioactive apresentou melhor desempenho em termos de dureza e remineralização em comparação com Equia Forte Fil. Papacarie (CMCR) foi eficaz para remoção de cáries sem comprometer a integridade da dentina. Materiais bioativos como Activa Bioactive podem melhorar a longevidade das restaurações em lesões profundas.
Kuru E et al, 2024⁽²⁴⁾	34 terceiros molares humanos extraídos (in vitro)	Biodentine (cimento de silicato de cálcio) e Fuji IX (cimento de ionômero de vidro)	Estudo in vitro com quatro grupos experimentais (n=34 por grupo): - Grupo 1 – Controle positivo (dentina hígida) - Grupo 2 – Biodentine - Grupo 3 – Fuji IX (GIC) - Grupo 4 – Controle negativo (dentina não restaurada) Cavidades padronizadas (2 mm de diâmetro e 1 mm de profundidade) foram preparadas em discos de dentina. Lesões artificiais foram criadas por imersão em solução desmineralizante (pH 5,3) por 96 horas. Os materiais foram aplicados e os espécimes foram armazenados em fluido corpóreo simulado (SBF) por 21 dias. Foram realizados testes de análise de Ca/P por EDX, avaliação morfológica por SEM e análise estatística por ANOVA.	21 dias (in vitro)	Biodentine apresentou uma razão Ca/P significativamente maior em comparação com o Fuji IX (p < 0,001). SEM revelou uma camada de remineralização e oclusão dos túbulos dentinários nos grupos com Biodentine. Fuji IX apresentou uma estrutura granular, enquanto Biodentine mostrou uma estrutura globular com maior deposição de apatita. Não foram observadas diferenças significativas entre o grupo Fuji IX e o grupo controle positivo (p > 0,05).	Biodentine apresentou maior capacidade de remineralização em comparação com Fuji IX. A formação de cristais de hidroxiapatite e o fechamento dos túbulos dentinários sugerem maior potencial de proteção contra cáries secundárias. Materiais à base de silicato de cálcio como Biodentine podem ser mais eficazes na preservação da integridade dentinária em lesões profundas.

Tabela 7. Continuação

Autor/ Ano	Participantes (nº, idade) / Amostra	Tipo de material bioativo	Metodologia utilizada	Follow- up	Resultados	Comentários/ Conclusões
Mohn N et al, 2024⁽⁶⁾	48 molares humanos extraídos (in vitro)	Composto experimental com bioactive glass 45S5 (C-20) e bioactive glass com fluor (F-20)	Estudo in vitro com seis grupos experimentais (n=8 por grupo): - Grupo 1 – Filtek Supreme XTE sem adesivo - Grupo 2 – Filtek Supreme XTE com adesivo - Grupo 3 – C-20 sem adesivo (20% bioactive glass 45S5) - Grupo 4 – C-20 com adesivo - Grupo 5 – F-20 sem adesivo (20% bioactive glass com fluor) - Grupo 6 – F-20 com adesivo Os dentes foram preparados com cavidades classe II MOD, restaurados e submetidos a termociclagem (10.000 ciclos entre 5°C e 55°C). Foram realizadas análises de integridade marginal (SEM), percentagem de margens contínuas (PCM) e resistência ao envelhecimento em saliva artificial por 8 semanas.	8 semanas	F-20 com adesivo apresentou maior PCM após 8 semanas ($p = 0,005$) em comparação ao material de referência. C-20 sem adesivo apresentou menor PCM em comparação ao material de referência ($p = 0,034$). SEM mostrou formação de fluorapatite nos grupos F-20 e deposição de hidroxiapatite nos grupos C-20 após 8 semanas. PCM foi maior em esmalte do que em dentina para todos os grupos ($p < 0,05$).	Materiais experimentais com bioactive glass promoveram melhor integridade marginal e deposição mineral após 8 semanas. F-20 com bioactive glass contendo flúor apresentou maior capacidade de selamento marginal e formação de fluorapatite. Materiais bioativos contendo bioactive glass podem melhorar a estabilidade e longevidade de restaurações em cavidades classe II.

Tabela 8. Continuação

Autor/ Ano	Participantes (nº, idade) / Amostra	Tipo de material bioativo	Metodologia utilizada	Follow- up	Resultados	Comentários/ Conclusões
Schwendicke F et al, 2019⁽²⁵⁾	40 dentes molares humanos extraídos (in vitro)	Biodentine (BIO), ProRoot MTA (MTA), Riva LC (GIC), e um adesivo experimental à base de biovidro com flúor (EXP)	Estudo in vitro com 40 dentes molares humanos submetidos a três tipos de lesões: - **D1** – Cárie química superficial (14 dias de desmineralização) - **D2** – Cárie química profunda (28 dias de desmineralização) - **D3** – Cárie bacteriana profunda (desmineralização química + biofilme de *Lactobacillus rhamnosus*) Os dentes foram divididos em quatro grupos e restaurados com Riva LC (GIC), ProRoot MTA, Biodentine ou adesivo experimental à base de biovidro com flúor (EXP). Após 3 meses em saliva artificial, foram realizados testes de microdureza, microradiografia, microscopia confocal e TEM para avaliação da mineralização e integridade estrutural.	3 meses	Todos os materiais promoveram ganhos de mineralização, mas apenas BIO e MTA aumentaram a microdureza em todos os tipos de lesão. EXP promoveu mineralização de "dentro para fora" (intrafibrilar) na dentina desmineralizada, especialmente em lesões D3. GIC aumentou o conteúdo mineral, mas sem ganhos significativos de microdureza.	Biodentine e MTA mostraram melhor desempenho na recuperação da dureza e mineralização da dentina. O adesivo EXP promoveu remineralização biomimética intrafibrilar, sugerindo um potencial para recuperar a funcionalidade da dentina desmineralizada.
Daneshpoor N et al, 2020⁽²⁶⁾	6 discos de cada material (in vitro)	Theracal (cimento de silicato de cálcio modificado por resina), Biodentine (cimento de silicato de cálcio), CPP-ACP (fosfato de cálcio amorfo)	Estudo in vitro com discos de Theracal, Biodentine e CPP-ACP (n=6) preparados em moldes de Teflon (5 mm de diâmetro x 2 mm de espessura). Os discos foram mantidos em contato direto com fatias de dentina desmineralizada (17% EDTA por 2 horas) e imersos em PBS (Phosphate Buffered Saline) por 7 dias a 37°C. A atividade bioativa e a capacidade de remineralização foram avaliadas por FTIR (espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier) e SEM-EDX (microscopia eletrônica de varredura com análise de dispersão de raios X). Foram medidos os picos de Ca/P na superfície dos discos e na dentina após o tratamento.	7 dias	Biodentine apresentou a maior razão Ca/P (187,5), seguido por Theracal (10,10) e CPP-ACP (0,37). Os três materiais formaram depósitos de apatite na superfície dos discos e na dentina desmineralizada após 7 dias. SEM mostrou formação de esferas finas de apatite em Theracal e Biodentine; CPP-ACP mostrou deposição em menor quantidade.	Biodentine apresentou a maior bioatividade, com formação rápida de apatite e maior razão Ca/P. Theracal apresentou bioatividade moderada, enquanto CPP-ACP mostrou baixa bioatividade. Todos os materiais foram capazes de remineralizar a dentina desmineralizada após 7 dias.

Tabela 9. Liners Cavitários

Autor/ Ano	Participantes (nº, idade) / Amostra	Tipo de material bioativo	Metodologia utilizada	Follow-up	Resultados	Comentários/ Conclusões
Abbassy MA et al, 2021⁽²⁷⁾	60 pré-molares e 30 terceiros molares extraídos (in vitro)	Pasta de vidro bioativo com flúor (BioMinF®)	- Pré-molares foram usados para testes de resistência à acidez, trans-microradiografia (TMR) e resistência de união (SBS). - Terceiros molares foram utilizados para o controle da pressão pulpar. - Os dentes foram desmineralizados por 4 dias e tratados com: - BioMinF® (grupo experimental) - Grupo controle positivo → Tratamento com gel de flúor acidulado a 1,23% Grupo controle negativo → Tratamento com material de preenchimento temporário (sem efeito bioativo ou remineralizante) Após 24 horas de armazenamento em água destilada, foram realizados testes de TMR, SBS e resistência à acidez. Foram também analisados a nanoinfiltração e a pressão pulpar simulada na interface adesiva.	24 horas	BioMinF® promoveu remineralização significativa do esmalte e da dentina desmineralizados ($p < 0,05$). A resistência de união foi mantida após o tratamento com BioMinF®. A expressão de nanoinfiltração foi menor nos grupos tratados com BioMinF® em comparação com os outros grupos. BioMinF® também reduziu a pressão pulpar simulada, melhorando a estabilidade da interface adesiva.	A pasta de vidro bioativo com flúor (BioMinF®) mostrou eficácia em remineralizar o esmalte e a dentina, melhorar a resistência à acidez e reduzir a nanoinfiltração na interface adesiva. BioMinF® pode melhorar a durabilidade das restaurações adesivas e proteger contra desafios erosivos e cáries secundárias.
Tohidkhah S et al, 2022⁽²⁸⁾	70 molares humanos extraídos (in vitro)	TheraCal LC, Biodentine, Activa BioActive, Lime-Lite, Dycal, e RMGIC (cimento de ionômero de vidro modificado por resina)	Estudo in vitro com sete grupos experimentais (n=10 por grupo): - Dycal – Material à base de hidróxido de cálcio - TheraCal LC – Cimento de silicato de cálcio fotopolimerizável - Lime-Lite – Hidróxido de cálcio fotopolimerizável - Activa BioActive – Cimento bioativo à base de vidro - Biodentine – Cimento de silicato de cálcio biocompatível - RMGIC – Cimento de ionômero de vidro modificado por resina - Controle – Sem liner Os dentes foram tratados com os materiais restauradores e submetidos a termociclagem. Foram realizados testes de resistência ao cisalhamento (SBS) e análise de falha por microscopia eletrônica (SEM).	Após termociclagem (5000 ciclos)	TheraCal LC mostrou maior resistência ao cisalhamento ($11,29 \pm 1,89$ MPa), seguida por RMGIC ($8,19 \pm 4,71$ MPa). Biodentine e Dycal apresentaram os menores valores de resistência ao cisalhamento ($2,32 \pm 1,29$ MPa e $3,37 \pm 2,02$ MPa, respectivamente). TheraCal LC apresentou principalmente falhas coesivas, enquanto Activa e Lime-Lite apresentaram falhas adesivas. RMGIC mostrou falhas mistas, sugerindo melhor adesão ao substrato dentário.	TheraCal LC e RMGIC demonstraram maior resistência de união ao substrato dentário. Biodentine e Dycal apresentaram desempenho inferior devido à baixa resistência e maior solubilidade. Materiais bioativos como TheraCal e Activa têm potencial para melhorar a longevidade das restaurações por promoverem remineralização e melhor vedação marginal.

Tabela 10. Continuação

Autor/ Ano	Participantes (nº, idade) / Amostra	Tipo de material bioativo	Metodologia utilizada	Follow-up	Resultados	Comentários/ Conclusões
Ahmed B et al, 2024⁽²⁹⁾	20 pacientes (20–35 anos) com 2 lesões profundas de cárie cada (RCT)	Activa Bioactive Base/Liner (Pulpdent) e Riva Light Cure (SDI)	Ensaio clínico randomizado (RCT) com desenho em boca dividida (split-mouth) em 20 pacientes: - Grupo 1 – Activa Bioactive (n=20) - Grupo 2 – Riva Light Cure (n=20) Cada paciente recebeu dois tratamentos em dentes com lesões profundas de cárie após escavação seletiva com broca de polímero. Os materiais foram aplicados como liners antes da restauração com Filtek Z350XT (3M). As restaurações foram avaliadas com os critérios da FDI após 6 meses, 1 ano, 2 anos e 3 anos.	3 anos (avaliações em 6 meses, 1 ano, 2 anos e 3 anos)	A taxa de sucesso clínico foi de 100% para ambos os grupos após 3 anos ($p > 0,05$). Não houve diferença significativa entre Activa Bioactive e Riva Light Cure em termos de retenção, adaptação marginal, forma anatômica, cor ou integridade da restauração. Ambos os materiais mostraram capacidade de liberar íons e promover remineralização ao longo do tempo.	Activa Bioactive e Riva Light Cure mostraram desempenho clínico semelhante e alta eficácia na preservação da vitalidade pulpar e na proteção contra cáries secundárias após 3 anos. Os liners bioativos melhoraram a estabilidade das restaurações de resina composta em lesões profundas de cárie.
Munhoz VDB et al, 2024⁽²⁾	32 terceiros molares humanos extraídos (in vitro)	TheraCal LC, Activa BioActive (Pulpdent), Dycal e Fuji II LC	Estudo in vitro com quatro grupos experimentais (n=8 por grupo): - Grupo 1 – TheraCal LC (cimento de silicato de cálcio fotopolimerizável) - Grupo 2 – Activa BioActive (cimento bioativo à base de vidro) - Grupo 3 – Dycal (cimento de hidróxido de cálcio) - Grupo 4 – Fuji II LC (cimento de ionômero de vidro modificado por resina) Foram preparadas cavidades de classe I em terceiros molares (5 mm de comprimento x 4 mm de largura x 4 mm de profundidade). Os materiais foram aplicados e fotopolimerizados seguindo as instruções dos fabricantes. A temperatura na câmara pulpar foi monitorizada com uma câmara térmica infravermelha (FLIR ONE Pro). Foram realizadas análises de variação de temperatura e resistência mecânica após 24 horas.	24 horas (in vitro)	Todos os materiais causaram um aumento da temperatura pulpar acima do limite seguro de 5,5°C. TheraCal LC apresentou o maior aumento de temperatura ($53,66 \pm 0,73^\circ\text{C}$), seguido de Activa BioActive ($52,59 \pm 1,84^\circ\text{C}$) e Dycal ($52,41 \pm 1,43^\circ\text{C}$). Fuji II LC apresentou o menor aumento de temperatura ($46,58 \pm 2,34^\circ\text{C}$), mas ainda acima do limite seguro. A resistência à compressão foi maior com Activa BioActive e TheraCal LC em comparação com Dycal ($p < 0,05$).	Nenhum dos materiais testados forneceu isolamento térmico adequado durante a fotopolimerização. Activa BioActive e TheraCal LC apresentaram maior resistência à compressão, mas também causaram maior elevação de temperatura na câmara pulpar. Fuji II LC apresentou o menor aumento de temperatura, sugerindo melhor potencial para proteger a polpa contra danos térmicos.

Tabela 11. Continuação

Autor/ Ano	Participantes (nº, idade) / Amostra	Tipo de material bioativo	Metodologia utilizada	Follow- up	Resultados	Comentários/ Conclusões
Li Y et al, 2019⁽³⁰⁾	50 dentes molares humanos extraídos (in vitro)	DMAHDM (dimethylaminohexadecyl methacrylate) + NACP (nanopartículas de fosfato de cálcio amorfo)	Estudo in vitro com 50 dentes molares humanos extraídos, restaurados com adesivo Scotchbond Multi-Purpose (SBMP) contendo DMAHDM (5%) e NACP (10%, 20% e 30%) – **Grupos experimentais** – e um grupo controle com SBMP sem aditivos. Após armazenamento em saliva artificial por 6 meses, os dentes foram submetidos a testes de resistência de união (microtensão), análise antibacteriana contra biofilme de *Streptococcus mutans*, análise de liberação de íons de cálcio e fosfato e medição do pH do biofilme.	6 meses	DMAHDM + NACP manteve alta resistência de união após 6 meses (sem perda significativa). A atividade antibacteriana foi mantida, com redução de 4 ordens de magnitude na contagem de UFC. Houve liberação sustentada de íons Ca e P e aumento do pH do biofilme para 6,8 (comparado ao controle com pH 4,5). Os melhores resultados foram obtidos com 20% NACP.	A incorporação de DMAHDM + NACP em adesivos dentários proporcionou alta resistência de união após 6 meses, efeito antibacteriano duradouro e capacidade de remineralização. O adesivo aumentou o pH do biofilme e reduziu significativamente a contagem de bactérias, sugerindo potencial para reduzir cáries secundárias e prolongar a durabilidade das restaurações.
Kim HJ et al, 2021⁽³¹⁾	36 terceiros molares humanos extraídos (in vitro)	Adesivo dentário contendo bioactive glass (BAG)	Estudo in vitro com dois grupos experimentais (n=18 por grupo): - SCA – Adesivo contendo 3% de sílica (grupo controle) - BCA – Adesivo contendo 3% de bioactive glass (BAG) As superfícies dentinárias foram desmineralizadas com ácido fosfórico a 37% durante 60 segundos. Os adesivos foram aplicados, fotoativados e armazenados em fluido corpóreo simulado (SBF) por 2 semanas. Foram realizadas análises de microtração (µTBS), FE-SEM, Raman Confocal e fluxo de fluido dentinário (DFF) após 24 horas e após 2 semanas.	2 semanas	BCA reduziu a permeabilidade dentinária em 50,10%, enquanto o grupo SCA apresentou um aumento de 6,54% (P<0,05). FE-SEM mostrou precipitados na superfície dentinária e obstrução parcial dos túbulos dentinários no grupo BCA. Análise Raman Confocal revelou aumento na intensidade dos picos de hidroxipatite (HA) após tratamento com BCA. Não houve diferença estatisticamente significativa nos valores de µTBS entre os grupos SCA e BCA (P>0,05).	O adesivo contendo BAG mostrou potencial para remineralizar dentina desmineralizada e reduzir a permeabilidade dentinária. A formação de cristais de hidroxipatite e a obstrução dos túbulos dentinários sugerem uma melhor estabilidade e proteção da interface adesiva. A incorporação de BAG em adesivos dentinários pode melhorar a longevidade das restaurações adesivas.

Tabela 12. Adesivos Dentários

Autor/ Ano	Participantes (nº, idade) / Amostra	Tipo de material bioativo	Metodologia utilizada	Follow- up	Resultados	Comentários/ Conclusões
Daoud U et al, 2023⁽³²⁾	160 molares extraídos humanos (in vitro)	Adesivo universal experimental modificado com cristais de hidroxiapatite dopada com magnésio (HAp/Mg2+)	Estudo in vitro com quatro grupos experimentais (n=40 por grupo): - Controlo – Adesivo sem modificação - 0,5% – Adesivo com 0,5% de HAp/Mg2+ - 1% – Adesivo com 1% de HAp/Mg2+ - 2% – Adesivo com 2% de HAp/Mg2+ Os dentes foram preparados e restaurados com os adesivos testados. Foram realizados testes de resistência de união (microtração), análise por SEM/TEM, nanoinfiltração e análise Raman após 24 horas, 6 meses e 12 meses. Análises de biofilme com Streptococcus mutans foram realizadas usando microscopia confocal a laser (CLSM). Foram também avaliadas a mineralização e a expressão gênica de osteoblastos usando PCR quantitativo (q-PCR).	24 horas, 6 meses e 12 meses (in vitro)	O grupo com 0,5% de HAp/Mg2+ apresentou maior resistência de união após 6 meses e 12 meses (p < 0,05). Nanoinfiltração foi significativamente menor no grupo 0,5% em comparação com o controlo e os grupos com 1% e 2%. Biofilme de S. mutans foi reduzido em 81,8% no grupo com 2% de HAp/Mg2+. Formação de cristais de hidroxiapatite intrafrililar foi observada por TEM nos grupos com 0,5% e 1% de HAp/Mg2+.	O adesivo modificado com 0,5% de HAp/Mg2+ apresentou melhor desempenho em termos de resistência de união e redução de nanoinfiltração. A formação de hidroxiapatite intrafrililar e a atividade antibiofilme sugerem potencial para aumento da longevidade das restaurações adesivas. A incorporação de HAp/Mg2+ pode melhorar a estabilidade e a biatividade dos adesivos universais.
Mousavinasab SM et al, 2023⁽³³⁾	80 terceiros molares extraídos humanos (in vitro)	Adesivos dentinários com diferentes concentrações de bioactive glass (BAG) (0% 0,2%, 0,5% e 2%)	Estudo in vitro com cinco grupos experimentais (n=16 por grupo): - A – Adesivo com 0% de BAG - B – Adesivo com 0,2% de BAG - C – Adesivo com 0,5% de BAG - D – Adesivo com 2% de BAG - E – Adesivo comercial (Adper Single Bond) Os dentes foram divididos em dois subgrupos: - S – Dentes hígidos - D – Dentes desmineralizados Após aplicação dos adesivos, metade dos espécimes foram submetidos a termociclagem (2000 ciclos entre 5°C e 55°C). Foram realizados testes de resistência ao cisalhamento (μ-SBS) e análise de fratura por microscopia estereoscópica (50x).	Após termociclagem (2000 ciclos)	A adição de BAG não afetou significativamente a resistência ao cisalhamento (p > 0,05). μ-SBS foi maior nos dentes hígidos (13,53 ± 5,58 MPa) comparado aos desmineralizados (6,25 ± 4,98 MPa) (p < 0,05). Adesivo com 2% BAG (Grupo D) apresentou desempenho semelhante ao adesivo comercial (Grupo E) em todos os cenários (p > 0,05). A fratura adesiva foi o tipo predominante em todos os grupos.	A incorporação de até 2% de BAG em adesivos dentinários não afetou significativamente a resistência ao cisalhamento. O adesivo com 2% BAG apresentou desempenho comparável ao adesivo comercial. Adesivos com BAG podem melhorar a remineralização sem comprometer a adesão.

Tabela 13. Continuação

Autor/ Ano	Participantes (nº, idade) / Amostra	Tipo de material bioativo	Metodologia utilizada	Follow-up	Resultados	Comentários/ Conclusões
Rao AC et al, 2023⁽³⁴⁾	50 molares humanos extraídos (in vitro)	Adesivo universal modificado com nanopartículas de bioactive glass tratadas com PAMAM (A-PMBG)	Estudo in vitro com três grupos experimentais (n=15 por grupo): - Grupo A – Adesivo comercial (controle) - Grupo B – Adesivo com 0,2% de A-PMBG - Grupo C – Adesivo com 0,5% de A-PMBG Os dentes foram submetidos a um ciclo de pH para induzir cárie artificial (pH 4,5 por 8 horas; pH 7 por 16 horas) durante 14 dias. Foram realizados testes de microtração (MTBS) e análise de dureza (Vickers) após 1, 3 e 6 meses. Análises por SEM foram realizadas para avaliar a morfologia e deposição de minerais.	1, 3 e 6 meses (in vitro)	Grupo B (0,2% A-PMBG) mostrou maior resistência de união após 6 meses (24,29 ± 2,90 MPa) comparado ao controle (15,82 ± 1,91 MPa) (p < 0,05). Grupo C (0,5% A-PMBG) apresentou maior dureza e deposição mineral após 6 meses (p < 0,05). SEM revelou cristais de hidroxiapatite e obstrução dos túbulos dentinários nos grupos B e C após 3 meses. Falha adesiva foi o tipo mais comum de fratura em todos os grupos.	A incorporação de nanopartículas de bioactive glass tratadas com PAMAM em adesivos universais melhorou a remineralização e a resistência de união. O grupo com 0,2% de A-PMBG apresentou melhor desempenho em termos de resistência de união, enquanto o grupo com 0,5% mostrou maior deposição mineral. Os adesivos modificados com BAG podem melhorar a estabilidade e longevidade das restaurações adesivas em dentina afetada por cárie.
Rifane TO et al, 2023⁽³⁵⁾	30 terceiros molares humanos extraídos (in vitro)	Adesivo universal modificado bioactive glass 45S5 e Sr-45S5 (com e sem silanização)	Estudo in vitro com cinco grupos experimentais (n=6 por grupo): - Controle – Adesivo sem bioactive glass - 45S5 – Adesivo com bioglass 45S5 sem silanização - Sr-45S5 – Adesivo com bioglass Sr-45S5 sem silanização - Sil-45S5 – Adesivo com bioglass 45S5 silanizado - Sil-Sr-45S5 – Adesivo com bioglass Sr-45S5 silanizado Os dentes foram preparados, restaurados e armazenados em solução de PBS por 6 meses. Foram realizados testes de resistência à microtração (µTBS), avaliação de nanofiltração (SEM), grau de conversão (micro-Raman) e ensaio de liberação de hidroxiaprolina (HYP).	24 horas e 6 meses (in vitro)	Após 6 meses, 45S5 e Sr-45S5 mantiveram resistência de união estável (p > 0,05), enquanto Sil-Sr-45S5 apresentou redução significativa (p < 0,001). Sil-45S5 mostrou aumento significativo na resistência de união após 6 meses (p = 0,028). FTIR confirmou deposição de hidroxiapatite nos grupos Sil-45S5 e Sil-Sr-45S5 após 6 meses. HYP foi significativamente maior no grupo Sil-Sr-45S5, indicando maior degradação de colágeno (p = 0,002).	A incorporação de bioglass 45S5 e Sr-45S5 em adesivos universais promoveu remineralização e melhor adesão dentinária. A silanização de 45S5 melhorou a resistência de união e a estabilidade após 6 meses. A silanização de Sr-45S5 reduziu a resistência de união e aumentou a degradação de colágeno.

Tabela 14. Continuação

Tabela 15. Avaliação da qualidade dos estudos (risco de viés)

Referência /Critério	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Pontuação	Classificação
Bacino M et al, 2019 ⁽¹⁵⁾	2	0	1	2	2	1	0	2	1	0	2	2	15	62,5% Risco moderado
Leon-Pineda C, Donly K., 2019 ⁽¹⁷⁾	2	0	1	2	2	0	1	2	0	0	2	2	14	58,3% Risco moderado
Li YC et al, 2019 ⁽³⁰⁾	2	1	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	18	75% Baixo risco
Porenczuk A et al, 2019 ⁽¹⁸⁾	2	1	2	2	2	0	0	2	1	0	2	2	16	66,7% Risco moderado
Schwendicke F et al, 2019 ⁽²⁵⁾	2	0	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	17	70,8% Baixo risco
Daneshpoor N, Pishevar L., 2020 ⁽²⁶⁾	2	0	2	2	2	0	1	2	1	0	2	2	16	66,7% Risco moderado
Abbassy MA et al, 2021 ⁽²⁷⁾	2	1	2	2	2	1	2	1	1	0	2	2	19	79,2% Baixo risco
Kim HJ et al, 2021 ⁽¹⁹⁾	2	0	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	17	70,8% Baixo risco
Kim HJ et al, 2021 ⁽³¹⁾	2	1	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	18	75% Baixo risco
Par M et al, 2021 ⁽²⁰⁾	2	1	2	2	2	0	1	2	1	0	2	2	17	70,8% Baixo risco
Neves P et al, 2022 ⁽²¹⁾	2	1	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	18	75% Baixo risco
Tohidkhah S et al, 2022 ⁽²⁸⁾	2	2	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	19	79,2% Baixo risco
Daood U, Fawzy A., 2023 ⁽³²⁾	2	2	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	19	79,2% Baixo risco
Diniz AC et al, 2023 ⁽²²⁾	2	0	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	17	70,8% Baixo risco
Mousavinasab SM et al, 2023 ⁽³³⁾	2	2	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	19	79,2% Baixo risco
Rao AC et al, 2023 ⁽³⁴⁾	2	2	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	19	79,2% Baixo risco
Rifane TO et al, 2023 ⁽³⁵⁾	2	1	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	18	75% Baixo risco
Al-Wakeel RE et al, 2024 ⁽²³⁾	2	2	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	19	79,2% Baixo risco
Kuru E et al, 2024 ⁽²⁴⁾	2	2	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	19	79,2% Baixo risco
Mohn N et al, 2024 ⁽⁶⁾	2	2	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	19	79,2% Baixo risco
Munhoz VD et al, 2024 ⁽²⁾	2	2	2	2	2	1	2	2	1	0	2	2	20	83,3% Baixo risco

Tabela 16. Continuação

Referência/Critério	1	2	3	4	5	Classificação
Bhadra D et al, 2019 ⁽¹⁶⁾	Baixo risco	Baixo risco	Alguma preocupação	Baixo risco	Baixo risco	Alguma preocupação
Ahmed B et al, 2024 ⁽²⁹⁾	Baixo risco	Baixo risco	Baixo risco	Baixo risco	Baixo risco	Baixo risco

1. Materiais Restauradores

Conforme referido anteriormente, foram abordados três tipos de materiais dentários. Relativamente aos materiais restauradores foram encontrados 11 artigos que comparavam diferentes tipos de materiais bioativos entre si e também com outros tipos de materiais convencionais.

De uma forma geral, foram encontrados 4 artigos que avaliavam a capacidade de remineralização dos materiais (15, 20, 23, 24) destacando-se aqueles que incorporam biovidro ou ionómero de vidro modificado. Foram encontrados resultados que evidenciam que alguns destes materiais têm potencial para promover a remineralização de dentina desmineralizada e também prevenir cáries secundárias contribuindo para a maior longevidade das restaurações.

Para avaliar a libertação de iões destes materiais foram encontrados 4 artigos(18, 19, 22, 23) onde se avaliaram a libertação de iões com efeito remineralizante tais como cálcio, fosfato e flúor. Os materiais com biovidro, assim como os híbridos baseados em RMGIC, evidenciaram superior desempenho iónico, destacando-se o *ACTIVA BioActive™* e os materiais modificados com biovidro 45S5.

Foram encontrados 3 artigos que avaliavam a integridade marginal e microinfiltração dos materiais (6, 17, 21). Os resultados sugerem que alguns materiais restauradores bioativos, como o *Activa Bioactive™* e resinas compostas com biovidro fluoretado, são capazes de manter uma boa integridade marginal e reduzir a microinfiltração.

O desempenho mecânico dos materiais foi ainda avaliado em 5 artigos (16, 20, 21, 23, 36). Os materiais restauradores bioativos avaliados demonstraram comportamento mecânico compatível com as exigências clínicas, em aspetos como a dureza, resistência à compressão e capacidade de preservar a integridade dentinária. Compósitos experimentais com biovidro e materiais híbridos como o *Activa Bioactive™* mostraram potencial para conjugar bioatividade e resistência funcional.

2. *Liniers* Cavitários

Relativamente aos *liniers* cavitários bioativos foram encontrados 6 artigos que comparavam os diferentes tipos de *liniers* cavitários, de forma a perceber quais têm melhor bioatividade, proteção pulpar e isolamento térmico, propriedades clínicas e também avaliar a interação com os materiais restauradores.

Para avaliar a capacidade de isolamento térmico e proteção pulpar foram encontrados 3 artigos (2, 28, 29) onde se obtiveram resultados que demonstravam que apesar de *liniers* cavitários bioativos terem propriedades remineralizantes e de libertação iónica favoráveis, a sua capacidade de isolamento térmico ainda é limitada. O *Fuji II LC* mostrou o melhor desempenho neste parâmetro, mas sem atingir níveis totalmente seguros.

Para avaliar a formação de dentina reparadora e potencial de regeneração pulpar dos *liniers* bioativos foram encontrados 3 artigos (25, 26) (27) que evidenciaram que os *liniers* cavitários bioativos têm capacidade de preservar a vitalidade pulpar e de induzir processos de reparação da dentina, seja através da libertação de iões, seja por via da formação de cristais de apatite. Materiais como o *TheraCal LC*®, o *Biodentine*® e o *Activa Bioactive*TM mostram-se promissores no contexto da dentisteria minimamente invasiva, ao favorecerem a regeneração dos tecidos dentários sem necessidade de intervenções mais invasivas.

A compatibilidade dos *liniers* com os materiais restauradores e também a adesão dentinária foi avaliada em 4 artigos (2, 26, 28, 29). Os *liniers* cavitários bioativos demonstraram níveis variáveis de compatibilidade com materiais restauradores, dependendo da sua composição química e das condições de aplicação. Materiais como o *TheraCal LC*®, o *Activa Bioactive*TM e o RMGIC revelaram melhor integração adesiva, enquanto outros, como o *Dycal*® ou o *Biodentine*®, exigem maior atenção quanto ao protocolo clínico para garantir adesão eficaz.

A aplicabilidade e propriedades clínicas foram avaliadas em artigos (26, 28, 29). A maioria dos *liniers* cavitários bioativos testados revelou-se fácil de aplicar em contexto clínico, com destaque para os materiais fotopolimerizáveis como o

TheraCal LC e o *Activa Bioactive*, que oferecem praticidade e eficiência operatória. Materiais com tempo de presa mais prolongado, como o *Biodentine*, exigem maior controle clínico.

3. Adesivos Dentários

Para avaliar a incorporação de materiais bioativos nos adesivos dentários em comparação com os adesivos dentários universais foram encontrados 6 artigos. Estes artigos comparavam a resistência adesiva ao longo do tempo, avaliavam a redução de nanoinfiltração e estabilidade da adesão, a deposição mineral e formação de apatite bem como a atividade antimicrobiana.

De forma a avaliar então a resistência adesiva ao longo do tempo foram encontrados 5 artigos (30, 32-35). A incorporação de materiais bioativos em adesivos dentários mostrou-se promissora para melhorar a resistência adesiva ao longo do tempo, especialmente em substratos desmineralizados. Adesivos modificados com HAp/Mg²⁺ ou biovidro demonstraram menor degradação da interface adesiva, formação de depósitos minerais estáveis e redução da nanoinfiltração. Estas propriedades poderão contribuir para aumento da longevidade das restaurações adesivas e maior preservação da estrutura dentária.

A redução da nanoinfiltração e estabilidade da interface adesiva foi avaliada em 3 artigos (31, 32, 34). A modificação de adesivos com partículas bioativas (SCA, BCA, A-PMBG) como biovidro ou hidroxiapatite com magnésio revelou-se eficaz na redução da nanoinfiltração e na preservação da integridade da camada híbrida. Estes materiais parecem o selamento da interface adesiva, quer por deposição mineral quer por inibição enzimática, contribuindo para maior longevidade das restaurações adesivas em substratos dentinários.

Relativamente à deposição mineral e formação de apatite na interface adesiva foram encontrados 4 artigos que comparavam os diferentes adesivos com diferentes incorporações de partículas bioativas e também os adesivos convencionais (31, 32, 34, 35). Neste critério de avaliação os adesivos dentários

modificados com partículas bioativas demonstraram capacidade para induzir deposição mineral na interface adesiva, promovendo a formação de hidroxiapatite ou fluorapatite. Esta propriedade confere um carácter reparador à camada híbrida, potencializando a vedação biológica dos túbulos dentinários e a regeneração da dentina. A incorporação de bioactivos como HAp/Mg²⁺, biovidro 45S5 e PAMAM-funcionalizado revelou-se eficaz na indução desta mineralização funcional.

Para avaliar a atividade antimicrobiana e o impacto sobre o biofilme e psH foram encontrados 3 artigos (31, 32, 34). Os adesivos dentários bioativos demonstraram atividade antibacteriana significativa, associada à libertação de iões alcalinizantes, redução do pH ácido local e inibição da formação de biofilme. Estes efeitos foram particularmente evidentes em adesivos enriquecidos com HAp/Mg²⁺ e biovidro, que promoveram não apenas a mineralização da interface, mas também a criação de um ambiente hostil à colonização microbiana. Estes resultados sugerem um potencial terapêutico adicional para a prevenção da cárie secundária e a manutenção da integridade adesiva a longo prazo.



DISCUSSÃO

IV. DISCUSSÃO

A presente revisão sistemática resume as evidências científicas de 23 artigos científicos, sendo eles estudos *in vitro* e ensaios clínicos randomizados.

Desta forma, foram identificados e sintetizados os resultados destes estudos, com o objetivo de saber quais materiais bioativos têm melhores aplicações e propriedades clínicas, bem como aqueles que têm melhor potencial para serem utilizados no futuro.

Vários materiais bioativos, de entre os quais materiais restauradores, *liners* cavitários e adesivos, ionómero de vidro modificado com resina (*Fuji II LC*[®], *Vitrebond*[™]), o *ACTIVA Bioactive*[™], o *Theracal LC*[®], *Biodentine*[®], e também adesivos modificados por partículas bioativas (SCA, BCA, A-PMBG) demonstraram excelentes aplicações clínicas e potencial de desenvolvimento para o futuro.

4.1. Materiais Restauradores

4.1.1. Capacidade de remineralização

A capacidade de remineralização dos materiais restauradores bioativos constitui uma das suas principais vantagens em contextos de cárie profunda e terapias minimamente invasivas. Esta propriedade relaciona-se com a libertação controlada de iões com potencial remineralizante, como cálcio, fosfato e flúor, capazes de promover a reformação parcial da matriz dentinária e o reforço da interface material-dente. ⁽²⁰⁾

Num estudo *in vitro* de **Kuru et al. (2024)**, comparou-se a bioatividade de dois materiais restauradores utilizados sobre dentina artificialmente desmineralizada: o *Biodentine*[™] (*Septodont*), um cimento de silicato de cálcio, e o *Fuji IX* (GC), um cimento de ionómero de vidro de alta viscosidade. Os autores observaram que o *Biodentine*[™] apresentou uma razão cálcio/fósforo significativamente mais elevada do que o *Fuji IX*, bem como uma morfologia mais

favorável à formação de apatite, evidenciada por microscopia eletrônica. Esta maior capacidade de remineralização foi ainda acompanhada pela oclusão dos túbulos dentinários e formação de uma camada rica em cristais de hidroxiapatite, indicando um elevado potencial selador e terapêutico.⁽²⁴⁾

De forma semelhante, **Al-Wakeel et al. (2024)** investigaram o desempenho do *Activa Bioactive™ (Pulpdent)* (resina composta bioativa híbrida com ionómero de vidro) e do *Equia Forte Fil™, GC* (cimento de ionómero de vidro de alta resistência) em dentes tratados com escavação químico-mecânica com *Papacarie* (gel químico usado para a remoção seletiva de dentina cariada). O grupo restaurado com *Activa* demonstrou valores superiores de microdureza e maior intensidade de picos de fosfato (PO_4^{3-}) na espectroscopia *Raman*, sugerindo uma maior deposição de minerais na zona adjacente à restauração. A análise por EDX confirmou ainda uma maior concentração de sílica e alumínio na interface, o que poderá contribuir para a estabilização química da estrutura dentinária envolvente.⁽²³⁾

Complementarmente, **Bacino et al. (2019)** investigaram a integração do processo de mineralização biomimética PILP numa abordagem restauradora com cimento de ionómero de vidro modificado por resina (*BioCem - NuSmile*). O estudo explorou a adição de poliácido aspártico (pAsp), quer diretamente no cimento, quer aplicado topicamente na dentina antes da restauração. Os resultados revelaram que a aplicação tópica de pAsp promoveu uma remineralização intrafibrilar funcional da dentina desmineralizada, com melhoria significativa das propriedades mecânicas, como a dureza e o módulo de elasticidade. A análise por nanoindentação e microscopia eletrônica (SEM) demonstrou formação de cristais de hidroxiapatite ao longo da matriz colagénica, reforçando a estrutura dentinária e a interface dentina-cimento. Estes achados sugerem que a incorporação de estratégias biomiméticas baseadas em polímeros funcionalizados pode potenciar a ação remineralizante de materiais restauradores convencionais.⁽¹⁵⁾

Em conjunto, estes estudos demonstram que os materiais restauradores bioativos como o *Biodentine™* e o *Activa Bioactive™* são eficazes na promoção da remineralização dentinária, através da libertação de iões com função

mineralizante, da formação de cristais de apatite e da estabilização da microestrutura dentinária. Estas características tornam-nos particularmente indicados para abordagens conservadoras, nas quais a preservação da estrutura dentária é prioritária. (15, 20, 23, 24)

4.1.2. Liberação de íons

A liberação controlada de íons bioativos constitui um dos mecanismos fundamentais através dos quais os materiais restauradores bioativos exercem a sua ação terapêutica. Esta propriedade está diretamente relacionada com a capacidade de remineralização, neutralização do pH ácido e potencial antibacteriano da interface restauradora. Íons como cálcio (Ca^{2+}), fosfato (PO_4^{3-}), flúor (F^-), estrôncio (Sr^{2+}) e sílica (Si^{4+}) têm sido consistentemente identificados como agentes ativos no reforço da dentina e no controlo da progressão da cárie.⁽¹⁸⁾

O estudo de **Al-Wakeel et al. (2024)** verificou que a resina composta *Activa Bioactive*[™] (Pulpdent) foi capaz de libertar íons como cálcio, alumínio e sílica para o substrato dentinário. Esta liberação contribuiu para o aumento da dureza da dentina subjacente e para a presença de picos de fosfato identificados por espectroscopia Raman, sugerindo interação química ativa com o tecido dentário e potencial remineralizador prolongado.⁽²³⁾

A adição de biovidro a materiais restauradores tem sido amplamente estudada como forma de potenciar esta liberação iónica. **Kim et al. (2021)** testaram a incorporação de diferentes percentagens de biovidro (5%, 10% e 20%) num cimento de ionómero de vidro e observaram que a liberação de íons cálcio e fosfato aumentava proporcionalmente com a concentração de biovidro. Além disso, houve evidência de formação de fluorapatite e de obliteração dos túbulos dentinários.⁽¹⁹⁾

Resultados semelhantes foram obtidos por **Diniz et al. (2023)**, que integraram biovidro 45S5 e fosfato de nióbio (NbOPO_4) em cimentos de ionómero de vidro modificados por resina. Ambos os aditivos promoveram um aumento significativo da liberação de íons cálcio e flúor, com elevação do pH em ambiente ácido,

resultando numa melhoria da microdureza da dentina adjacente. Estes dados sugerem um efeito protetor contra desmineralização ácida e um potencial antibacteriano indireto. ⁽²²⁾

O artigo de **Porenczuk et al. (2019)**, comparou a libertação de iões flúor a partir de três materiais restauradores: um GIC convencional, o *ACTIVA BioActive* (RMGIC com biovidro) e uma resina composta nanohíbrida. Os resultados revelaram que, embora o GIC tenha libertado a maior quantidade de flúor (até 54,1 ppm), o *ACTIVA* registou libertações elevadas nas primeiras 48 horas (até 15,5 ppm), mantendo valores estáveis nos dias seguintes. Em contraste, o compósito nanohíbrido libertou quantidades residuais de flúor, não compatíveis com um efeito remineralizante clinicamente relevante. (*Figura 2*)

Este estudo reforça que a estrutura porosa e a presença de biovidro no *ACTIVA* permitem uma libertação inicial intensa, seguida de estabilização, o que é compatível com o conceito de bioatividade controlada. Apesar de libertar menos flúor do que os GICs convencionais, o *ACTIVA* apresentou maior estabilidade dimensional e resistência mecânica, características essenciais para a sua aplicação clínica em cavidades de *stress* funcional. ⁽¹⁸⁾

4.1.3. Integridade marginal e microinfiltração

A integridade marginal dos materiais restauradores representa um dos principais fatores que influenciam a longevidade clínica das restaurações, sendo determinante na prevenção de infiltrações marginais, recorrência de cáries e sensibilidade pós-operatória.

O estudo de **Neves et al. (2022)** utilizou um modelo *in vitro* com isótopos radioativos para avaliar a microinfiltração de uma resina bioativa (*Surefil One™*, *Dentsply-Sirona*) em restaurações de Classe V, comparando-a com uma resina composta nanohíbrida convencional (*Ceram X Spectra™ ST HV*, *Dentsply Sirona*). Os resultados revelaram uma taxa significativamente superior de microinfiltração na resina bioativa, sugerindo uma menor eficácia no selamento marginal. Apesar das suas propriedades bioativas e de auto-adesividade, o *Surefill One™* apresentou maior contração de polimerização, o que poderá

comprometer a sua adaptação marginal e favorecer a formação de microfendas entre o material restaurador e a estrutura dentária.⁽²¹⁾

Um contributo importante foi trazido por **Mohn et al. (2024)**, que investigaram a integridade marginal de compósitos experimentais com vidro bioativo 45S5 (C-20) e vidro bioativo fluoretado de baixo teor de sódio (F-20), tendo sido comparados com o Filtek Supreme XTE, 3M-Solventum (grupo de controlo). Os compósitos foram aplicados com ou sem adesivo em cavidades classe II e sujeitos a envelhecimento artificial com termociclagem e imersão em saliva artificial. Foram realizados 10 mil ciclos em saliva artificial e após a termociclagem foram armazenados por mais 8 semanas em saliva artificial a 37°. Os resultados mostraram que, quando usados com adesivo, ambos os compósitos bioativos apresentaram maior percentagem de margens contínuas do que o compósito convencional (*Filtek Supreme XTE, 3M - Solventum*) após o envelhecimento. Em particular, o grupo F-20 com adesivo mostrou uma melhoria estatisticamente significativa da continuidade marginal entre o segundo e o terceiro momento de avaliação, sugerindo uma possível capacidade de re-selagem espontânea atribuída à formação de apatite.

A formação de fluorapatite pela libertação controlada de iões (Ca^{2+} , PO_4^{3-} , F^-) foi apontada como o mecanismo responsável por essa re-selagem, tendo sido observada sobretudo em margens localizadas em dentina — região particularmente suscetível à degradação adesiva.⁽⁶⁾

Outro estudo, conduzido por **Leon-Pineda e Donly (2019)**, avaliou in vitro a capacidade de dois compósitos restauradores - Z100™ (3M-Solventum) e Tetric EvoCeram® Bulk Fill (Ivoclar Vivadent) — em inibir a desmineralização das estruturas dentárias adjacentes às margens da restauração. As preparações classe V permitiram comparar os efeitos em esmalte e dentina, e as amostras foram submersas numa solução de ácido acético durante quatro dias. Os resultados revelaram que o Tetric EvoCeram Bulk Fill, contendo flúor e partículas bioativas, apresentou significativamente menor área de desmineralização marginal, tanto em esmalte como em dentina, quando comparado com o compósito convencional. Além disso, observou-se a presença de zonas de inibição da desmineralização em 45% das amostras em esmalte e 40% em

dentina restauradas com *Tetric EvoCeram* — fenómeno ausente no grupo Z100.
(17)

Assim, pode concluir-se que os materiais restauradores bioativos, especialmente quando combinados com sistemas adesivos eficazes, têm o potencial de melhorar a integridade marginal e, em alguns casos, até de reparar lacunas marginais iniciais por meio da precipitação mineral ativa.

4.1.4 Desempenho mecânico

Num estudo recente, **Al-Wakeel et al. (2024)** avaliaram o comportamento de dois materiais restauradores— um cimento de ionómero de vidro híbrido (*Equia Forte®*, GC) e um material bioativo à base de resina (*Activa BioActive®*, *Pulpdent*). Os testes de microdureza *Vickers* demonstraram que o material bioativo proporcionou valores significativamente superiores, tanto em dentina sã como em dentina afetada pela cárie, quando comparado com o ionómero híbrido. A maior dureza na interface material/dente no grupo bioativo sugere uma maior capacidade de remineralização e reforço da estrutura dentinária, atribuída à libertação de iões como cálcio, fósforo e fluoreto, bem como à presença de sílica na matriz do material. Complementarmente, a análise elementar por dispersão de energia de raios-X (EDX) revelou níveis significativamente superiores de sílica e alumínio na interface dos espécimes restaurados com o material bioativo, o que pode estar relacionado com a maior microdureza observada. A sílica, em particular, desempenha um papel essencial na bioatividade, promovendo a formação de hidroxiapatite e aumentando a resistência à abrasão. (23)

Num estudo de **Par et al. (2021)** demonstra que resinas compostas experimentais contendo vidro bioativo foram eficazes na proteção da dentina contra a desmineralização induzida por ácido láctico ($C_3H_6O_3$). Em especial, a incorporação de 10 a 20% de vidro bioativo na matriz resinosa permitiu preservar a microdureza dentinária por mais tempo comparativamente a materiais comerciais convencionais. Este efeito protetor é atribuído à libertação de iões remineralizantes, à elevação do pH local e à formação de uma camada de apatite na superfície do material. (20)

Já um estudo de **Neves et al. (2022)** investigou o comportamento mecânico e bioativo de três materiais restauradores com propriedades bioativas: *Activa BioActive*®, um giômero (*Beautifil II*®, *Shofu*) e um ionômero de vidro convencional (*Fuji IX GP*, GC). Através de ensaios de microdureza, difração de raios X (XRD) e microscopia eletrônica de varrimento (SEM), os autores avaliaram a resposta dos materiais após 30 dias de imersão em solução de fosfato simulando o ambiente oral. ⁽²¹⁾

Os resultados de microdureza *Vickers* indicaram que o giômero *Beautifil II* apresentou os valores mais elevados tanto no estado inicial como após imersão, sugerindo uma superior resistência mecânica. O *Activa BioActive*®, embora tenha apresentado valores inferiores ao giômero, demonstrou uma estabilidade mecânica significativa ao longo do tempo, sem perdas relevantes de dureza, o que reforça o seu desempenho clínico consistente. Já o *Fuji IX GP*® apresentou os valores de dureza mais baixos, o que limita a sua indicação para zonas de maior carga mastigatória. ⁽²¹⁾

Num ensaio clínico randomizado de **Bhadra D. et al. (2019)**, foi comparado o desempenho do compósito *Activa*™ *Bioactive* com uma resina composta nanohíbrida convencional na restauração de lesões classe II em molares. Após um ano de acompanhamento, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre os dois materiais quanto à retenção, adaptação marginal, descoloração marginal, forma anatômica, textura superficial, sensibilidade pós-operatória ou ocorrência de cárie secundária. ⁽¹⁶⁾

Estes resultados demonstram que, clinicamente, o *Activa*™ apresenta desempenho comparável ao compósito nanohíbrido, considerado o padrão de referência atual para restaurações posteriores devido à sua elevada resistência à compressão e desgaste. ⁽¹⁶⁾

De forma semelhante, **Essa et al. (2022)** realizaram um estudo clínico comparativo com duração de um ano, avaliando o desempenho do compósito *Activa*™ *Bioactive* e da resina composta nanohíbrida *Tetric EvoCeram*™ em restaurações classe V de lesões cervicais não cariosas. Os resultados, avaliados segundo os critérios modificados da USPHS (sistema de avaliação clínica desenvolvido pelo Serviço de Saúde Pública dos EUA para avaliar o

desempenho de restaurações ao longo do tempo), mostraram não haver diferenças estatisticamente significativas entre os dois materiais em parâmetros como retenção, adaptação marginal, descoloração, textura superficial, forma anatômica, cárie secundária e sensibilidade pós-operatória. Importa destacar que, apesar da ausência de superioridade estatística, o *Activa*TM demonstrou zero casos de sensibilidade pós-operatória ao longo de 12 meses, ao contrário do grupo controle, que registou dois casos. Estes dados reforçam a evidência de que materiais bioativos como o *Activa*TM, além de apresentarem propriedades físico-mecânicas satisfatórias, podem oferecer vantagens adicionais em termos de conforto pós-operatório e estabilidade clínica, mesmo em contextos de elevado desafio adesivo como as restaurações cervicais. ⁽³⁶⁾

Um contributo relevante para a avaliação do desempenho mecânico dos materiais restauradores bioativos vem do estudo clínico de **Banon et al. (2024)**, que comparou o compósito bioativo *ACTIVA BioACTIVE*TM com o *compómero Dyract[®] eXtra (Dentsply-Sirona)* em restaurações classe II em dentes decíduos, ao longo de 24 meses. Os resultados indicaram que ambos os materiais apresentaram elevada taxa de sucesso clínico e radiográfico, sem diferenças estatisticamente significativas quanto à fratura da restauração, forma anatômica ou ocorrência de cárie secundária. Apesar do *ACTIVA* ter demonstrado melhor correspondência de cor e tempo de aplicação significativamente mais curto, verificou-se maior descoloração marginal, o que poderá estar associado ao seu comportamento físico a longo prazo. No entanto, a sua capacidade de aplicação em incrementos únicos de 4–5 mm e a sua composição tripla de cura permitem concluir que o *ACTIVA* oferece um desempenho mecânico adequado, sobretudo em contextos clínicos que requerem rapidez e simplicidade operatória (*Figura 3*) ⁽¹¹⁾

4.2. Liners Cavitários

4.2.1. Isolamento térmico e proteção pulpar

O isolamento térmico e a proteção da polpa dentária são funções primordiais dos *liners* cavitários, especialmente em restaurações profundas. Em situações clínicas onde a espessura remanescente de dentina é reduzida, a transmissão

de calor provocada pela fotopolimerização de materiais restauradores pode levar a alterações inflamatórias irreversíveis na polpa, justificando a necessidade de uma barreira protetora.

No estudo de **Munhoz et al. (2024)**, foi avaliado o impacto de diferentes materiais de proteção pulpar — incluindo *Dycal*® (*Dentsply Sirona*), *TheraCal LC*® (*Bisco*), *Activa BioActive*TM (*Pulpdent*) e *Fuji II LC*® (*GC*) — sobre a temperatura intrapulpar durante a fotopolimerização. Nenhum dos materiais testados foi capaz de evitar um aumento de temperatura superior ao limiar crítico de 5,5 °C. Ainda assim, os autores destacaram que o uso de *liners* contribuiu para reduzir parcialmente a transferência de calor, em comparação com a ausência de qualquer material intermediário. O *Fuji II LC* e o *Activa* foram os que apresentaram menor variação térmica, sugerindo melhor desempenho isolante dentro dos limites avaliados (*Figura 4*).⁽²⁾

Por outro lado, **Tohidkhah et al. (2022)**, ao investigarem a resistência adesiva de materiais como *TheraCal*, *Biodentine*, *Activa* e *Dycal*, também destacaram a importância da estabilidade dimensional e integridade coesiva dos *liners* como fator crucial para a proteção da estrutura pulpar a longo prazo. O *TheraCal* apresentou os melhores valores enquanto o *Biodentine* apresentou a menor coesão. *Liners* com comportamento mecânico mais consistente tendem a oferecer não só suporte adesivo adequado, como também barreiras mais estáveis à condução térmica e microinfiltração marginal — fatores diretamente implicados na proteção da vitalidade pulpar. Além disso, o estudo destacou que *liners* com menor coesão podem favorecer a infiltração de fluidos e o aumento da condutividade térmica, comprometendo a sua eficácia protetora.⁽²⁸⁾

Adicionalmente, **Ahmed et al. (2024)**, avaliaram a performance de restaurações em dentes posteriores com resina composta realizadas após escavação seletiva e aplicação de *liners* bioativos — *Activa Bioactive* e *Riva Light Cure* (*SDS*). Ambos os grupos demonstraram preservação da vitalidade pulpar, ausência de sensibilidade pós-operatória e elevada estabilidade clínica, confirmando que os *liners* utilizados oferecem proteção biológica e física adequada em situações clínicas de risco.⁽²⁹⁾

4.2.2. Regeneração pulpar

A regeneração pulpar constitui um dos principais objetivos terapêuticos em tratamentos conservadores de lesões cariosas profundas, sendo fundamental que os *liners* cavitários apresentem propriedades capazes de estimular a resposta reparadora da polpa dentária.

No estudo de **Daneshpoor & Pischevar (2020)**, foi investigada a bioatividade de diferentes materiais à base de silicato de cálcio — nomeadamente *TheraCal LC*™, *Biodentine*™ e um cimento de fosfato de cálcio amorfo (CPP-ACP) - GC Tooth Mousse®, com foco na capacidade de promover deposição mineral e interação com a dentina desmineralizada, como base para processos de regeneração pulpar. Através de espectroscopia de infravermelho com transformada de *Fourier* (FTIR) e microscopia electrónica de varrimento (SEM) associada à dispersão de energia (EDS), os autores analisaram a formação de cristais de apatite após imersão dos materiais em fluido artificial (PBS) durante 28 dias. ⁽²⁶⁾

Os resultados mostraram que tanto o *Biodentine*™ como o *TheraCal LC* promoveram a formação de estruturas ricas em cálcio na interface com a dentina, compatíveis com hidroxiapatite. No caso do *Biodentine*™, observou-se uma cobertura contínua de cristais esféricos, indicando uma forte atividade mineralizante e sugerindo que o material pode criar um microambiente propício à diferenciação de células da polpa, facilitando assim a deposição de dentina reparadora. Embora o *TheraCal LC* também tenha demonstrado formação de cristais, esta foi menos homogênea, provavelmente devido à sua matriz resinosa, que limita a libertação iónica e a difusão dos componentes bioativos. Este estudo fornece evidência laboratorial de que os materiais bioativos, especialmente o *Biodentine*™, apresentam uma atividade remineralizante significativa, crucial para os processos de regeneração pulpar. ⁽²⁶⁾

O artigo de **Schwendicke F et. Al. (2019)** avaliou ainda o *Biodentine* (BIO), *ProRoot MTA* (MTA) e o *Riva LC* (GIC) quanto à sua **capacidade de remineralizar lesões artificiais de cárie em dentina** evidenciando que todos os materiais promoveram ganhos de mineralização, mas apenas BIO e MTA aumentaram a microdureza em todos os tipos de lesão. GIC aumentou o

conteúdo mineral, mas sem ganhos significativos de microdureza. O Biodentine e o MTA mostraram melhor desempenho na recuperação da dureza e mineralização da dentina. ⁽²⁵⁾

Complementarmente, o artigo de **Abbassy MA et al. (2021)** avaliou uma pasta de vidro bioativo (bioMinF) utilizada com *liner e posterior restauração com Tetric N-Ceram® (Ivoclar Vivadent)*. *BioMinF® (BioMin)* promoveu remineralização significativa do esmalte e da dentina desmineralizados ($p < 0,05$). A resistência de união foi mantida após o tratamento com *BioMinF®*. A expressão de nanoinfiltração foi menor nos grupos tratados com *BioMinF®* em comparação com os outros grupos. *BioMinF®* também reduziu a pressão pulpar simulada, melhorando a estabilidade da interface adesiva. ⁽²⁷⁾

4.2.3. Compatibilidade com materiais restauradores

A compatibilidade entre os materiais restauradores e os *liners* cavitários é um fator essencial para o sucesso clínico das restaurações dentárias, especialmente em cavidades profundas, onde a adesão e a resistência mecânica da interface influenciam diretamente na longevidade da restauração.

No estudo de **Tohidkhah et al. (2022)**, avaliou-se a resistência adesiva ao cisalhamento (SBS) entre diversos *liners* bioativos (Theracal®-Pulpdent, Biodentine®-Septodont, Dycal®-Dentsply, Activa Bioactive™-Pulpdent, Lime-Lite™-Pulpdent, Fuji II LC®-GC) uma resina composta (*Filtek™ Z350 XT*, 3M-Solventum), demonstrando que o tipo de *liner* influencia significativamente esta adesão. *TheraCal* e o cimento de ionômero de vidro modificado por resina (RMGIC) apresentaram os melhores resultados em termos de resistência adesiva ao compósito, sendo significativamente superiores ao *Biodentine* e ao *Dycal*, que registaram os valores mais baixos. Esta variação pode ser explicada pela composição química dos materiais: *TheraCal LC*, por ser um material fotopolimerizável com monômeros de metacrilato, oferece uma melhor integração química com os adesivos e compósitos à base de resina (*Figura 5*). ⁽²⁸⁾

Resultados semelhantes foram encontrados por **Munhoz et al. (2022)**, que observaram melhor adesão entre o *TheraCal LC* e compósitos do que entre estes

e o *Biodentine*. Este último, apesar da sua bioatividade superior, apresentou menor compatibilidade adesiva quando o compósito era aplicado após o tempo inicial de presa (12 minutos). A menor resistência adesiva é atribuída à natureza hidrofílica e à solubilidade do *Biodentine*, bem como à sua estrutura porosa e não resinosa, que dificulta a interação eficaz com materiais restauradores baseados em resina.⁽²⁾

O ensaio clínico de **Ahmed et al. (2024)** reforça a importância da compatibilidade funcional entre *liners* e resinas compostas. Após três anos de seguimento clínico, restaurações realizadas com *Activa Bioactive Base/Liner* e *Riva Light Cure* apresentaram elevada estabilidade, ausência de falhas marginais e preservação da vitalidade pulpar, sugerindo uma boa integração entre o *liner* e o material restaurador nanohíbrido (*Filtek Z350 XT*, 3M - *Solventum*).⁽²⁹⁾

Em síntese, a compatibilidade entre *liners* e materiais restauradores depende de múltiplos fatores, incluindo composição química, adesividade, tempo de presa, solubilidade e interação com adesivos. Enquanto materiais como *TheraCal LC* e RMGIC se revelam mais compatíveis com compósitos à base de resina, o uso de materiais como o *Biodentine* requer protocolos específicos para garantir uma adesão eficaz tais como esperar pelo menos 12 minutos após a mistura para que o *Biodentine* atinja a sua presa inicial, tal como recomendado pelo fabricante e também evitar forças de polimerização excessivas nos primeiros minutos pois a contração de polimerização do compósito pode comprometer a interface se o *Biodentine* ainda não tiver resistência suficiente.⁽²⁶⁾

4.2.4. Aplicabilidade clínica

A escolha do *liner* cavitário ideal, particularmente em situações de lesões profundas, desempenha um papel crucial na preservação da vitalidade pulpar e no sucesso clínico das restaurações. A aplicabilidade clínica dos materiais de revestimento deve considerar não apenas as suas propriedades físico-químicas, mas também o seu desempenho a longo prazo em contexto intraoral.

Ahmed et al. (2024) avaliaram o desempenho do *Activa Bioactive* e o *Riva Light Cure*. Ambos os materiais demonstraram desempenho clínico satisfatório em termos estéticos, funcionais e biológicos, com taxas de sucesso de 100% ao fim dos três anos. Este estudo reforça a viabilidade clínica destes materiais enquanto *liners* em restaurações em resina composta, sugerindo que a sua libertação de iões contribui para a manutenção da integridade dentária e prevenção de recidiva de cárie. ⁽²⁹⁾

No mesmo sentido, **Tohidkhah et al. (2022)** conduziram um estudo *in vitro* para avaliar a resistência adesiva ao cisalhamento (*shear bond strength* - SBS) entre diferentes *liners* e resina composta, demonstrando que materiais como o *TheraCal LC* e o RMGIC apresentaram resistência significativamente superior quando comparados ao Dycal e ao *Biodentine*. Esta evidência sugere que, em ambiente clínico, estes materiais podem proporcionar melhor integração entre o substrato dentinário e a restauração, refletindo-se em maior durabilidade das restaurações. ⁽²⁸⁾

Por outro lado, **Daneshpoor e Pishavar (2020)** exploraram a capacidade de remineralização biomimética de diferentes cimentos bioativos — *Biodentine*[®], *Theracal LC*[®] e *CPP-ACP* (*GC Tooth Mousse*[®]- *GC*) em dentina desmineralizada. Embora o estudo tenha sido em ambiente laboratorial, os seus resultados fornecem importantes implicações clínicas. Após sete dias de contacto direto entre os materiais e a dentina, observou-se a formação de apatite na superfície dos espécimes, o que demonstra a capacidade destes materiais de estimular a deposição de cristais de fosfato de cálcio nas regiões afetadas. Apesar de não existir diferença estatisticamente significativa entre os grupos na dentina remineralizada, o *Biodentine*[™] evidenciou maior bioatividade global, com uma deposição mais espessa e homogênea. ⁽²⁶⁾

Complementarmente, o estudo de **S. A. A. de Freitas, P. et al. (2022)** analisou o comportamento de pastas experimentais contendo vidros bioativos de niobofosfato (NbG) e 45S5 no tratamento da hipersensibilidade dentinária, oferecendo evidências relevantes para a sua aplicação potencial como *liners* cavitários. Os resultados revelaram que ambas as formulações foram eficazes na redução da permeabilidade dentinária e na obliteração dos túbulos dentinários, com formação de precipitados ricos em cálcio e fósforo compatíveis

com hidroxiapatite. O vidro NbG, em particular, demonstrou maior estabilidade química ao longo do tempo, proporcionando uma obliteração mais duradoura.⁽³⁷⁾

4.3. Adesivos Dentários

4.3.1. Resistência Adesiva

A resistência adesiva entre adesivos dentários e substratos dentinários representa um dos pilares fundamentais para o sucesso clínico das restaurações adesivas, estando fortemente relacionada à longevidade da interface adesiva e à prevenção de microinfiltrações e falhas restauradoras.

No estudo de **Rao et al. (2023)**, avaliou-se a eficácia da incorporação de nanopartículas de vidro bioativo mesoporoso que é um tipo de vidro bioativo fabricado com estrutura porosa nanométrica altamente ordenada, geralmente obtido por método sol-gel tratadas com dendrímeros de poliamidoamina (PAMAM) num adesivo universal comercial (Prime & Bond Universal®- Dentsply Sirona) aplicado a dentina afetada por cárie induzida artificialmente. Os resultados demonstraram que a adição de 0,2% destas nanopartículas aumentou significativamente a resistência adesiva à microtração (μ TBS) após 6 meses de armazenamento em fluido salivar simulado. Esta melhoria foi atribuída à capacidade remineralizante das nanopartículas, que promoveram a deposição intrafibrilar de cristais e reforçaram mecanicamente a matriz de colagénio desmineralizada (*Figura 7*).⁽³⁴⁾

Por outro lado, **Mousavinasab et al. (2023)** exploraram a incorporação de diferentes concentrações de vidro bioativo (BAG) num adesivo experimental e o seu efeito na resistência adesiva ao microcisalhamento (μ -SBS). Os resultados indicaram que a adição de até 2% de BAG não comprometeu significativamente a resistência adesiva em nenhuma das condições testadas. Curiosamente, mesmo em dentes desmineralizados, os adesivos modificados apresentaram desempenho semelhante ao do adesivo comercial de controlo (*Adper Single*

Bond, 3M - Solventum), o que evidencia a estabilidade mecânica dos sistemas adesivos bioativos mesmo após desafios térmicos e estruturais simulados.⁽³³⁾

De forma complementar, **Li et al. (2019)** testaram um adesivo experimental contendo um monômero antibacteriano (DMAHDM) associado a nanopartículas de fosfato de cálcio amorfo (NACP), submetendo os espécimes a imersão em saliva artificial durante 6 meses. O grupo com 20% de NACP demonstrou preservação da resistência adesiva à microtração (μ TBS) à dentina ao longo do tempo, sem perdas estatisticamente significativas, ao contrário do grupo controle que apresentou uma redução de 25% na resistência adesiva. Este efeito foi atribuído à liberação sustentada de íons cálcio e fosfato, que favoreceu a remineralização do substrato dentinário e à ação antimicrobiana duradoura do DMAHDM, que poderá ter prevenido a degradação enzimática da camada híbrida.⁽³⁰⁾

Rifane et al. (2023) investigaram o efeito da incorporação de diferentes vidros bioativos (45S5 e Sr-45S5), silanizados ou não, num adesivo universal experimental, avaliando a sua influência na resistência adesiva à dentina (μ TBS), grau de conversão, nanoinfiltração e capacidade de remineralização. Os resultados demonstraram que os adesivos contendo biovidro silanizado com cálcio (Sil-45S5) apresentaram aumento significativo da resistência de união após 6 meses de envelhecimento, associado a uma menor nanoinfiltração e maior depósito de hidroxiapatite na interface. Em contraste, os adesivos com biovidro de estrôncio silanizado (Sil-Sr-45S5) revelaram pior desempenho adesivo e maior degradação do colagénio dentinário, provavelmente devido à interferência dos íons Sr^{2+} na organização cristalina da camada híbrida. Estes dados sugerem que a silanização de vidro bioativo, quando corretamente formulada, pode melhorar a estabilidade e durabilidade da adesão dentinária, desde que não comprometa a liberação iônica essencial à bioatividade do material.⁽³⁵⁾

De forma complementar, **Daood & Fawzy (2023)** desenvolveram um adesivo dentário experimental com cristais de hidroxiapatite sintética dopados com magnésio (HAp/Mg^{2+}), com o objetivo de melhorar a estabilidade da união resina-dentina. Após 12 meses de imersão em saliva artificial, os adesivos com 0,5% de

HAp/Mg²⁺ apresentaram valores significativamente superiores de resistência adesiva à microtração, sem perdas estatisticamente relevantes em relação aos valores iniciais. Esta estabilidade foi atribuída à formação de uma camada híbrida uniforme, sem expressão de nanoinfiltração, e à deposição intrafibrilar de cristais de hidroxiapatite dentro das fibras de colagénio, conforme demonstrado por imagens de TEM e análise Raman. Além disso, o adesivo demonstrou propriedades antibiofilme e aumento da rigidez interfacial, sugerindo que a incorporação controlada de HAp/Mg²⁺ pode simultaneamente promover remineralização, proteção contra degradação enzimática e manutenção da resistência adesiva ao longo do tempo. ⁽³²⁾

4.3.2. Nanoinfiltração e estabilidade da interface

A durabilidade da união adesiva entre resina e dentina é altamente dependente da integridade e qualidade da camada híbrida. A nanoinfiltração, caracterizada pela penetração de fluidos ou partículas nanométricas ao longo da interface adesiva, é frequentemente observada em interfaces desprotegidas ou degradadas, sendo um marcador precoce da deterioração da união adesiva. Foi descoberta por Sano et al em 1995.

O estudo de **Daood e Fawzy (2023)** demonstrou que a adição de 0,5% de cristais de hidroxiapatite com magnésio promoveu a formação de uma camada híbrida homogênea e sem sinais de nanoinfiltração após 12 meses de imersão em saliva artificial. Observações por microscopia eletrônica (SEM e TEM) revelaram depósitos densos de cristais de hidroxiapatite ao longo da interface, o que se traduziu numa maior resistência mecânica e integridade da interface. Estes resultados apontam para uma potencial capacidade deste adesivo modificado em estabilizar a interface resina-dentina a longo prazo, minimizando o risco de falhas adesivas. ⁽³²⁾

Por outro lado, **Rao et al. (2023)** verificaram que, após 6 meses, houve uma redução significativa na infiltração e maior remineralização da dentina artificialmente afetada por cárie. A presença das nanopartículas facilitou a

deposição intrafibrilar de minerais, reforçando a matriz de colagénio e conferindo maior resistência à degradação hidrolítica da interface adesiva.⁽³⁴⁾

O estudo de **Kim et al. (2021)** também demonstrou que um adesivo contendo vidro bioativo (BAG) levou à redução de 50% do fluxo de fluido dentinário após duas semanas de contacto indireto com dentina desmineralizada. As análises por espectroscopia *Raman* e microscopia eletrónica (FE-SEM) confirmaram a formação de cristais de hidroxiapatite e a oclusão parcial dos túbulos dentinários, evidenciando a estabilização da interface.⁽³¹⁾

Desta forma, os adesivos modificados com componentes bioativos como HAp/Mg²⁺, biovidros silanizados ou combinados com PAMAM demonstram uma capacidade promissora de reduzir a nanoinfiltração e melhorar a estabilidade da interface resina-dentina. Esta evidência apoia a incorporação destes agentes nos sistemas adesivos como estratégia eficaz para prolongar a longevidade clínica das restaurações dentárias.^(31, 32)

4.3.3. Deposição mineral e formação de apatite

No estudo de **Daood & Fawzy (2023)**, a incorporação de 0,5% de cristais de hidroxiapatite dopados com magnésio (HAp/Mg²⁺) num adesivo universal. Os cristais sintéticos de hidroxiapatite dopada com magnésio (HAp/Mg²⁺) foram preparados por método de precipitação química e depois incorporados diretamente na fase solvente do adesivo, numa concentração de 0,5% em peso. Resultou na formação de uma camada híbrida contínua, com depósitos minerais visíveis dentro da matriz colagénica após 12 meses de imersão em saliva artificial. A formação de apatite foi confirmada por espectroscopia *Raman* e microscopia electrónica de transmissão (TEM), com cristais orientados intrafibrilarmente ao longo das fibras colagénicas, demonstrando um processo de remineralização biomimética com elevada integração estrutural.⁽³²⁾

De forma semelhante, **Rifane et al. (2023)** relataram a formação de hidroxiapatite ao longo da interface adesiva após a incorporação de biovidro 45S5 silanizado em um adesivo experimental. Após 6 meses de envelhecimento, observou-se uma mineralização progressiva na interface, acompanhada por um

aumento da resistência de união e redução significativa da nanoinfiltração. A presença de bandas de fosfato (PO_4^{3-}) na espectroscopia FTIR e micro-*Raman*, associadas à deposição de cálcio detectada por EDS, confirmou a atividade mineralizante sustentada promovida pelo biovidro. ⁽³⁵⁾

No estudo de **Rao et al. (2023)**, observou-se uma deposição intrafibrilar de cristais de apatite na dentina afetada por cárie ao fim de seis meses. A modificação PAMAM facilitou a nucleação mineral dentro da matriz colagénica, promovendo não só a regeneração da camada híbrida, mas também a estabilização química da interface, como confirmado por microscopia confocal e microdureza dentinária aumentada. ⁽³⁴⁾

Finalmente, **Kim et al. (2021)** demonstraram, num estudo de contacto indireto entre adesivos modificados com vidro bioativo e dentina desmineralizada, que após duas semanas houve deposição de fluorapatite sobre a superfície dentinária. Esta mineralização espontânea foi acompanhada por uma redução de 50% na permeabilidade dentinária e pela obstrução parcial dos túbulos dentinários, evidenciando o potencial do biovidro para restaurar a integridade mineral da dentina e reforçar a interface adesiva, mesmo sem contacto direto com o material adesivo. ⁽³¹⁾

4.3.4. Atividade antimicrobiana

A atividade antibacteriana é uma característica cada vez mais valorizada nos sistemas adesivos dentários, especialmente em substratos dentinários desmineralizados ou com risco de contaminação bacteriana residual. A modulação do pH local e a libertação de iões alcalinos como cálcio e fosfato têm demonstrado eficácia na inibição do crescimento de microrganismos cariogénicos, como *Streptococcus mutans*, contribuindo para a manutenção da integridade da interface adesiva.

No estudo de **Daood & Fawzy (2023)**, o grupo com 0,5% de HAp/Mg²⁺ (cristais de hidroxiapatite dopada com magnésio incorporados num adesivo universal) apresentou redução de 81,8% na formação de biofilme de *S. mutans* em

comparação com o grupo controlo (adesivo universal sem conter cristais de hidroxiapatite). Esta atividade antimicrobiana foi atribuída ao aumento do pH superficial e à libertação de iões magnésio, que alteram o equilíbrio osmótico bacteriano e reduzem a viabilidade do biofilme. Além disso, o material mostrou-se eficaz na manutenção da integridade da camada híbrida, mesmo após 12 meses de envelhecimento (imersão em saliva artificial), o que reforça a importância da atividade antimicrobiana para a durabilidade da adesão. ⁽³²⁾

Rao et al. (2023) também confirmaram o potencial antimicrobiano indireto de um adesivo universal (Prime & Bond Universal®- Dentsply Sirona) modificado com nanopartículas de vidro bioativo funcionalizadas com PAMAM. O adesivo foi modificado experimentalmente em laboratório e as nanopartículas PAMAM-MBG foram adicionadas diretamente ao adesivo comercial em diferentes concentrações. A modificação favoreceu a mineralização intrafibrilar da dentina e a redução da infiltração de fluidos, o que limita a sobrevivência e crescimento bacteriano na interface adesiva. Embora o estudo não tenha quantificado diretamente a atividade antibacteriana, a modulação positiva do microambiente dentinário foi considerada benéfica para a prevenção da degradação enzimática e bacteriana da camada híbrida. ⁽¹⁶⁾

Por sua vez, **Kim et al. (2021)** relataram que a adição de vidro bioativo BAG a adesivos experimentais promoveu a formação de fluorapatite e a obstrução dos túbulos dentinários após duas semanas. Estes efeitos resultaram numa redução da permeabilidade dentinária e na criação de uma barreira física e química contra a infiltração de bactérias. O aumento do pH local e a libertação sustentada de iões alcalinos foram identificados como mecanismos principais da ação antibacteriana indireta observada nos adesivos testados. ⁽³¹⁾

CONCLUSÃO



V. CONCLUSÃO

Num contexto atual de crescente interesse por aumentar a durabilidade e resistência das restaurações ao longo do tempo, os materiais bioativos têm demonstrado um enorme potencial em várias aplicações na medicina dentária conservadora. A sua capacidade remineralizadora, de proteção pulpar e antibacteriana têm despertado o interesse dos investigadores e consequentemente dos médicos dentistas. Desta forma, as evidências científicas recolhidas e sumarizadas nesta revisão sistemática concluem que:

- Nos materiais restauradores, o *Activa Bioactive*TM apresentou os melhores resultados, combinando uma boa resistência e desempenho mecânico, à sua capacidade de libertação de iões e consequente capacidade de remineralização e proteção pulpar. No entanto, uma vez que ainda não tem a mesma performance estética de outros compósitos convencionais, não é indicado para restaurações estéticas (classes III e IV);
- O *Biodentine*TM também apresentou boas características como material restaurador, devido à sua libertação iónica, à sua morfologia mais favorável à formação de apatite bem como uma excelente capacidade remineralizadora acompanhada também da oclusão dos túbulos dentinários. No entanto, o *Biodentine* deve ser utilizado mais como *liner cavitário*, dada a menor resistência comparado com materiais restauradores convencionais e o próprio *Activa Bioactive*;
- A adição de vidros bioativos a materiais restauradores convencionais também tem sido amplamente estudada apresentando resultados bastante promissores, conseguindo manter a resistência dos respetivos materiais e acrescentando a bioatividade destes mesmos vidros bioativos. No entanto os estudos apresentados ainda são estudos *in vitro* experimentais que utilizam materiais ainda não comercializados, sendo necessário maior investigação clínica nestes mesmos materiais;
- Nos *liners* cavitários há alguns materiais que se destacam: o *Theracal*, o *Biodentine* e o *Activa Bioactive*. O *Biodentine* destaca-se pela sua bioatividade, apresentando os melhores resultados em termos de

remineralização, libertação iónica e interação com a dentina desmineralizada, como base para processos de regeneração pulpar. O *Theracal* apesar de apresentar resultados inferiores nestes aspetos, apresenta maior resistência adesiva imediata e oferece uma melhor integração química com os adesivos e compósitos à base de resina;

- Desta forma, podemos concluir que o Biodentine é muito interessante como liner de restaurações provisórias porque promove melhor remineralização do que o Theracal mas que ao trocar para uma restauração definitiva (e após a remineralização estar concluída ao fim de uns meses) seria preferível substituir o Biodentine por Theracal pela sua melhor adesividade aos tecidos e resinas que serão colocadas como restauração definitiva.
- O *Activa Bioactive* apresentou os melhores resultados em termos de proteção pulpar durante a fotopolimerização, apresentando também tal como o *Riva Light Cure*, elevada estabilidade, ausência de falhas marginais e preservação da vitalidade pulpar, sugerindo uma boa integração entre o *liner* e o material restaurador;
- A incorporação de vidros bioativos nos adesivos dentários convencionais apresentou excelentes resultados. Estes resultados positivos foram atribuídos à capacidade remineralizadora das partículas de biobidro, que promovem a deposição intrafibrilar de cristais e reforçaram mecanicamente a matriz de colagénio desmineralizada;
- Também a incorporação de cristais de hidroxiapatite sintética nos adesivos dentários apresentaram excelentes resultados, demonstrando grande estabilidade que foi atribuída à formação de uma camada híbrida uniforme, sem expressão de nanoinfiltração, e à deposição intrafibrilar de cristais de hidroxiapatite dentro das fibras de colagénio. Além disso, o adesivo demonstrou propriedades antibiofilme e aumento da rigidez da interface, sugerindo que a incorporação controlada de HAp/Mg²⁺ pode simultaneamente promover remineralização, proteção contra degradação enzimática e manutenção da resistência adesiva ao longo do tempo.

Ao longo da análise dos ensaios científicos reunidos nesta revisão sistemática foram verificadas algumas limitações nos estudos relativamente a períodos curtos de *follow-up*, amostras pequenas e também grande variedade nos métodos de avaliação dos resultados. Em adição, a maioria dos estudos encontrados eram estudos *in vitro*, o que evidencia a necessidade da realização de mais estudos clínicos com períodos longos de *follow-up* de forma a obter evidência científica mais segura de quais materiais têm melhores aplicações clínicas dependendo do caso clínico em questão. Por fim, os resultados obtidos e discutidos nesta revisão sistemática demonstram um enorme potencial nos materiais bioativos, quer como materiais restauradores, *liners* cavitários e adesivos dentários, sendo então necessária maior investigação na área para obter resultados mais seguros e aplicáveis clinicamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Fernando D, Attik N, Pradelle-Plasse N, Jackson P, Grosogoeat B, Colon P. Bioactive glass for dentin remineralization: A systematic review. *Materials Science and Engineering C-Materials for Biological Applications*. 2017;76:1369-77.
2. Munhoz VD, Rocha MG, Correr AB, Sinhoreti MA, Geraldeli S, Oliveira D. The role of protective liners and glass ionomer in managing pulp temperature during light curing. *J Clin Exp Dent*. 2024;16(6):e749-e54.
3. About I. Biodentine: from biochemical and bioactive properties to clinical applications. *Giornale Italiano Di Endodonzia*. 2016;30(2):81-8.
4. Melo MAS, Garcia IM, Mokeem L, Weir MD, Xu HHK, Montoya C, et al. Developing Bioactive Dental Resins for Restorative Dentistry. *Journal of Dental Research*. 2023;102(11):1180-90.
5. Abdalla MM, Sayed O, Lung CYK, Rajasekar V, Yiu CKY. Applications of Bioactive Strontium Compounds in Dentistry. *J Funct Biomater*. 2024;15(8).
6. Mohn N, Par M, Gubler A, Tauböck TT. Marginal integrity of prototype bioactive glass-doped resin composites in class II cavities. *Clin Oral Investig*. 2024;28(8):430.
7. Oltramare R, Par M, Mohn D, Wiedemeier DB, Attin T, Tauböck TT. Short- and Long-Term Dentin Bond Strength of Bioactive Glass-Modified Dental Adhesives. *Nanomaterials*. 2021;11(8).
8. Abuna G, Feitosa VP, Correr AB, Cama G, Giannini M, Sinhoreti MA, et al. Bonding performance of experimental bioactive/biomimetic self-etch adhesives doped with calcium-phosphate fillers and biomimetic analogs of phosphoproteins. *J Dent*. 2016;52:79-86.
9. Khoroushi M, Keshani F. A review of glass-ionomers: From conventional glass-ionomer to bioactive glass-ionomer. *Dent Res J (Isfahan)*. 2013;10(4):411-20.
10. Arandi NZ, Rabi T. TheraCal LC: From Biochemical and Bioactive Properties to Clinical Applications. *Int J Dent*. 2018;2018:3484653.
11. Banon R, Vandenbulcke J, Van Acker J, Martens L, De Coster P, Rajasekharan S. Two-year clinical and radiographic evaluation of ACTIVA BioACTIVE versus Compomer (Dyract® eXtra) in the restoration of class-2 cavities of primary molars: a non-inferior split-mouth randomised clinical trial. *BMC Oral Health*. 2024;24(1):437.
12. Riva JJ, Malik KM, Burnie SJ, Endicott AR, Busse JW. What is your research question? An introduction to the PICOT format for clinicians. *J Can Chiropr Assoc*. 2012;56(3):167-71.
13. Sheth VH, Shah NP, Jain R, Bhanushali N, Bhatnagar V. Development and validation of a risk-of-bias tool for assessing in vitro studies conducted in dentistry: The QUIN. *J Prosthet Dent*. 2024;131(6):1038-42.
14. Sterne JAC, Savović J, Page MJ, Elbers RG, Blencowe NS, Boutron I, et al. RoB 2: a revised tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ*. 2019;366:l4898.
15. Bacino M, Girn V, Nurrohman H, Saeki K, Marshall SJ, Gower L, et al. Integrating the PILP-mineralization process into a restorative dental treatment. *Dental Materials*. 2019;35(1):53-63.
16. Bhadra D, Shah NC, Rao AS, Dedania MS, Bajpai N. A 1-year comparative evaluation of clinical performance of nanohybrid composite with Activa™ bioactive

composite in Class II carious lesion: A randomized control study. *J Conserv Dent*. 2019;22(1):92-6.

17. Leon-Pineda C, Donly K. Inhibition of Demineralization at Restoration Margins of Z100 and Tetric EvoCeram Bulk Fill in Dentin and Enamel. *Bioengineering-Basel*. 2019;6(2).

18. Porenczuk A, Jankiewicz B, Naurecka M, Bartosewicz B, Sierakowski B, Gozdowski D, et al. A comparison of the remineralizing potential of dental restorative materials by analyzing their fluoride release profiles. *Advances in Clinical and Experimental Medicine*. 2019;28(6):815-23.

19. Kim HJ, Bae HE, Lee JE, Park IS, Kim HG, Kwon J, et al. Effects of bioactive glass incorporation into glass ionomer cement on demineralized dentin. *Scientific Reports*. 2021;11(1).

20. Par M, Gubler A, Attin T, Tarle Z, Tarle A, Tauböck TT. Experimental Bioactive Glass-Containing Composites and Commercial Restorative Materials: Anti-Demineralizing Protection of Dentin. *Biomedicines*. 2021;9(11).

21. Neves P, Pires S, Marto CM, Amaro I, Coelho A, Sousa J, et al. Evaluation of Microleakage of a New Bioactive Material for Restoration of Posterior Teeth: An In Vitro Radioactive Model. *Applied Sciences-Basel*. 2022;12(22).

22. Diniz AC, Bauer J, Veloso SDR, Abreu-Pereira CA, Carvalho CN, Leitao TJ, et al. Effect of Bioactive Filler Addition on the Mechanical and Biological Properties of Resin-Modified Glass Ionomer. *Materials*. 2023;16(5).

23. Al-Wakeel RE, Hamama HH, Farahat DS, El-Negoly S. Microhardness and elemental analysis of ion-releasing restoration/ dentin interface following enzymatic chemomechanical caries excavation. *Bmc Oral Health*. 2024;24(1).

24. Kuru E, Eronat N, Türkün M, Çogulu D. Comparison of remineralization ability of tricalcium silicate and of glass ionomer cement on residual dentin: an in vitro study. *Bmc Oral Health*. 2024;24(1).

25. Schwendicke F, Al-Abdi A, Pascual Moscardó A, Ferrando Cascales A, Sauro S. Remineralization effects of conventional and experimental ion-releasing materials in chemically or bacterially-induced dentin caries lesions. *Dent Mater*. 2019;35(5):772-9.

26. Daneshpoor N, Pishevar L. Comparative evaluation of bioactive cements on biomimetic remineralization of dentin. *J Clin Exp Dent*. 2020;12(3):e291-e9.

27. Abbassy MA, Bakry AS, Hill R, Habib Hassan A. Fluoride bioactive glass paste improves bond durability and remineralizes tooth structure prior to adhesive restoration. *Dent Mater*. 2021;37(1):71-80.

28. Tohidkhah S, Ahmadi E, Abbasi M, Morvaridi Farimani R, Ranjbar Omrani L. Effect of Bioinductive Cavity Liners on Shear Bond Strength of Dental Composite to Dentin. *Biomed Res Int*. 2022;2022:3283211.

29. Ahmed B, Wafaie RA, Hamama HH, Mahmoud SH. 3-year randomized clinical trial to evaluate the performance of posterior composite restorations lined with ion-releasing materials. *Sci Rep*. 2024;14(1):4942.

30. Li YC, Hu XY, Ruan JP, Arola DD, Ji C, Weir MD, et al. Bonding durability, antibacterial activity and biofilm pH of novel adhesive containing antibacterial monomer and nanoparticles of amorphous calcium phosphate. *Journal of Dentistry*. 2019;81:91-101.

31. Kim HJ, Jang JH, Woo SU, Choi KK, Kim SY, Ferracane JL, et al. Effect of Novel Bioactive Glass-Containing Dentin Adhesive on the Permeability of Demineralized Dentin. *Materials (Basel)*. 2021;14(18).
32. Daood U, Fawzy A. Development of a bioactive dentin adhesive resin modified with magnesium-doped synthetic hydroxyapatite crystals. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2023;140:105737.
33. Mousavinasab SM, Sarandi F, Rezvanian P, Atai M, Mousavinasab S. Effect of bioactive glass-containing dentin adhesives on microshear bond strength of composite restorations. *Dent Res J (Isfahan)*. 2023;20:95.
34. Rao AC, Kondas VV, Nandini V, Kirana R, Yadalam PK, Eswaramoorthy R. Evaluating the effect of poly (amidoamine) treated bioactive glass nanoparticle incorporated in universal adhesive on bonding to artificially induced caries affected dentin. *BMC Oral Health*. 2023;23(1):810.
35. Rifane TO, Cordeiro KEM, Silvestre FA, Souza MT, Zanotto ED, Araújo-Neto VG, et al. Impact of silanization of different bioactive glasses in simplified adhesives on degree of conversion, dentin bonding and collagen remineralization. *Dent Mater*. 2023;39(2):217-26.
36. Essa M, Nassar A, Attia R. One-year comparative clinical evaluation of ACTIVA Bioactive restorative material with Nano hybrid composite resin in class V cavity preparation. *Egyptian Dental Journal*. 2022;68(2):1875-88.
37. de Freitas SAA, Ferreira PVC, Carvalho EM, Aldaz MAN, Loguercio AD, Grazziotin-Soares R, et al. Experimental pastes containing niobophosphate and 45S5 bioactive glasses for treatment of dentin hypersensitivity: dentin permeability and tubule obliteration. *Clin Oral Investig*. 2022;26(10):6397-407.
38. Mahapatra J, Nikhade PP, Patel A, Mankar N, Taori P. Comparative Evaluation of the Efficacy of TheraCal LC, Mineral Trioxide Aggregate, and Biodentine As Direct Pulp Capping Materials in Patients With Pulpal Exposure in Posterior Teeth: A Triple-Blinded Randomized Parallel Group Clinical Trial. *Cureus*. 2024;16(2):e55022.

ANEXOS



VII. ANEXOS

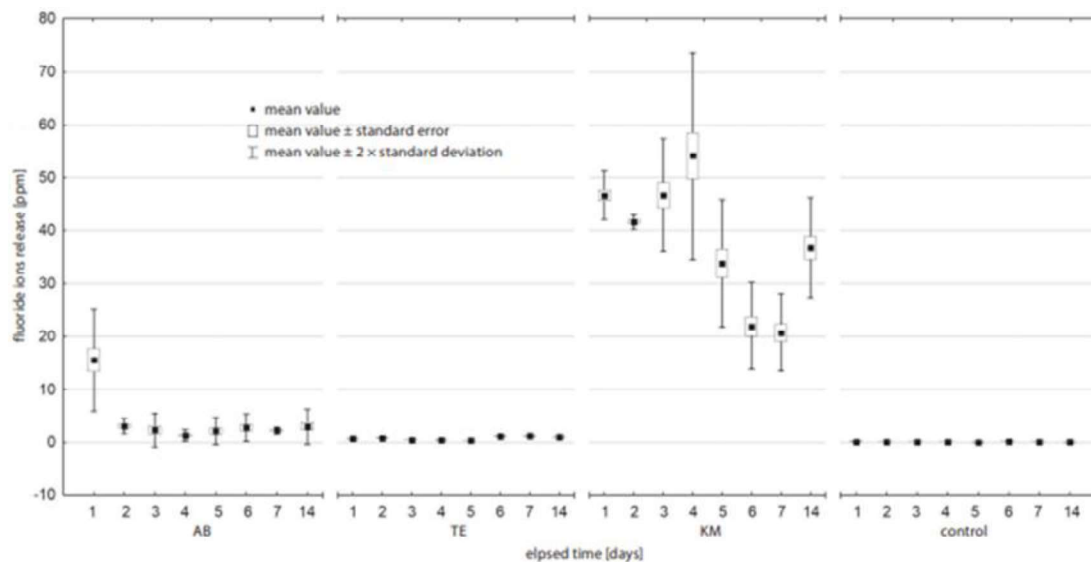


Figura 2. Valores médios diários de íões de flúor libertados pelos materiais restauradores dentários (AB, TE, KM) e pelo controlo (C). Adaptado de Porenczuk A. et al. (18)

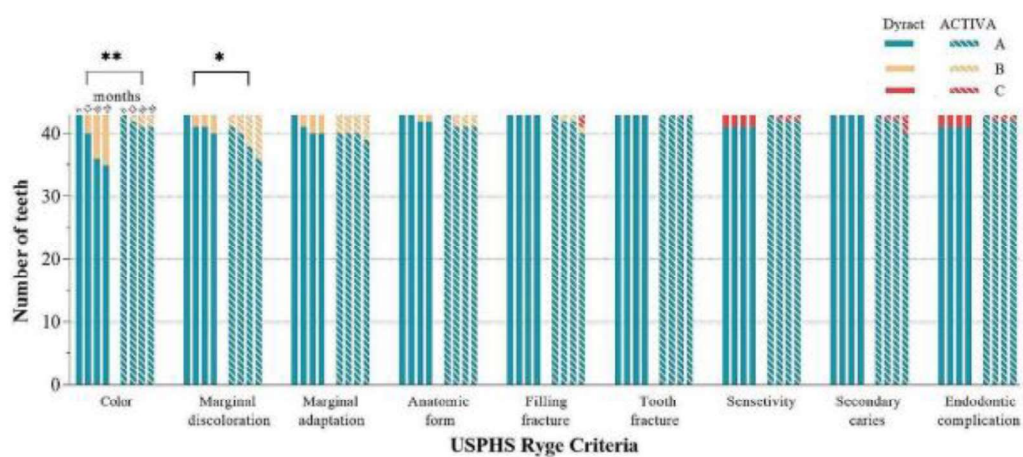


Figura 3. Avaliação clínica com base nos critérios USPHS Ryge aos 6, 12, 18 e 24 meses. A pontuação A representa a situação clínica ideal, B representa uma situação clinicamente aceitável e C representa falha. Adaptado de Banon R. et. al (11)

Group	Peak temperature °C			
	Initial temperature	First light-activation	Second light-activation	Third light-activation
Activa	34,4 (± 0,78)	Adhesive (20 s) 50,54 (± 1,43) A	Activa (20s) 52,59 (± 1,84) A	-
TheraCal and Fuji II LC	34,11 (± 0,34)	Theracal (20s) 53,66 (± 0,73) A	Fuji II LC (20 s) 50,11 (± 2,39) AB	Fuji II LC (20 s) 44,04 (± 3,52) C
Dycal and Fuji II LC	34,27 (± 0,99)	Fuji II LC (20 s) 52,41 (± 1,43) A	Fuji II LC (20 s) 44,48 (± 2,13) C	-
Fuji II LC	34,74 (± 1,09)	Fuji II LC (20 s) 53,06 (± 3,32) A	Fuji II LC (20 s) 46,58 (± 2,34) BC	-

Figura 4. Variações de temperatura na parede pulpar durante a restauração com diferentes materiais: Activa (Pulpdent), TheraCal (Bisco), Fuji II LC (GC), Dycal (Dentsply). Temperaturas iniciais e picos durante ativações de luz sucessivas. Adaptado de Munhoz VD. et. al (2)

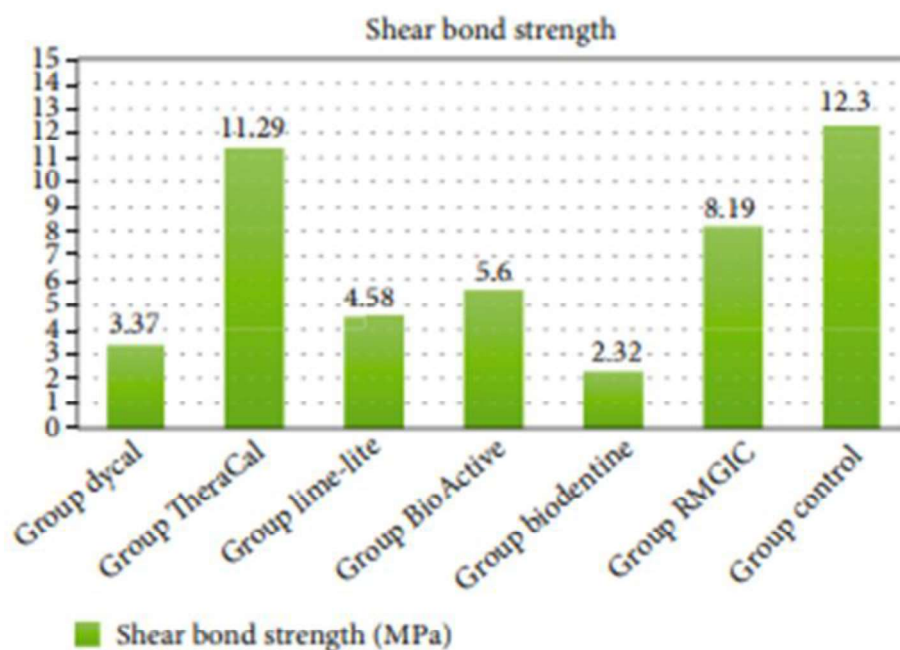


Figura 5. Gráfico comparativo dos valores de resistência de união ao cisalhamento (MPa) entre os diferentes grupos de estudo (Dycal, TheraCal, Lime-Lite, BioActive, Biodentine, RMGIC e grupo controlo). Adaptado de Tohidkhah S. et. al (28)

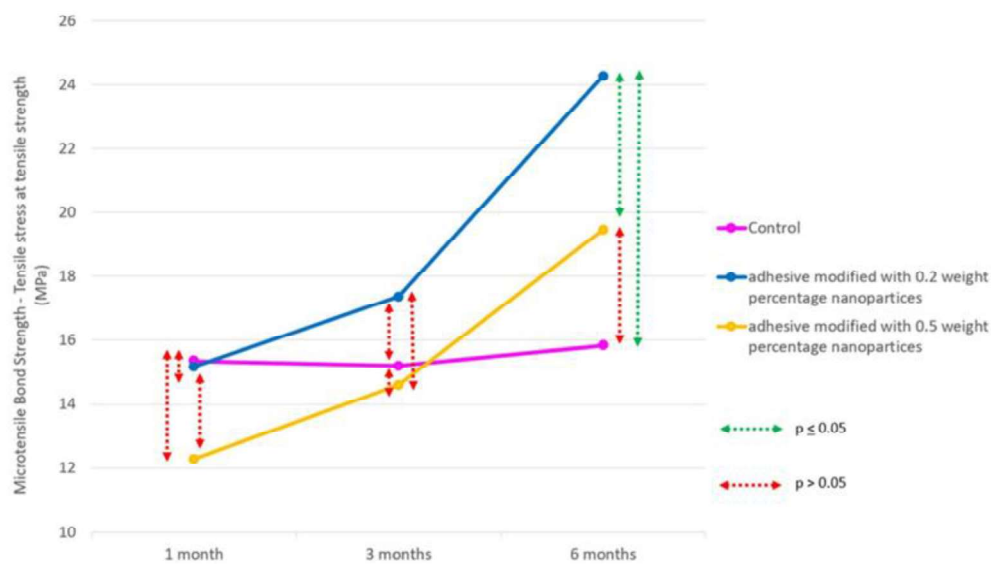


Figura 6. Diagrama de linhas representando a resistência de união à microtração (microtensile bond strength) das amostras após 1, 3 e 6 meses. As comparações entre os grupos incluem adesivo controle, adesivo com 0,2% e 0,5% de nanopartículas em peso. Adaptado de Rao AC. et. al (34)

