



EGAS MONIZ SCHOOL  
of HEALTH & SCIENCE

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO  
EGAS MONIZ

**INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ**

**MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA**

**RESINAS COMPOSTAS, ADESÃO DENTINÁRIA  
E PERSPECTIVAS FUTURAS: UMA REVISÃO DE  
LITERATURA**

Trabalho submetido por

**Thais Kleinübing Reis**

Para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

**JULHO 2025**





EGAS MONIZ SCHOOL  
of HEALTH & SCIENCE

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO  
EGAS MONIZ

**INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ**

**MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA**

**RESINAS COMPOSTAS, ADESÃO DENTINÁRIA  
E PERSPECTIVAS FUTURAS: UMA REVISÃO DE  
LITERATURA**

Trabalho submetido por

**Thais Kleinübing Reis**

Para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

Trabalho orientado por

**Prof.<sup>a</sup> Doutora Carolina de Andrade Lima Chaves**

**JULHO 2025**



## AGRADECIMENTOS

Concluir esta tese representa o fim de uma etapa exigente, feita de desafios, aprendizagens e superações — um percurso que, apesar de individual, foi atravessado com o apoio essencial de pessoas que marcaram profundamente esta caminhada.

Agradeço ao **Instituto Universitário Egas Moniz**, pelo enquadramento académico que tornou possível a realização deste trabalho.

À minha orientadora, **Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Carolina Chaves**, expresso a minha mais sincera gratidão pela orientação atenta, pela disponibilidade constante e, acima de tudo, pela paciência e empatia com que sempre me acompanhou. A sua compreensão e sensibilidade foram fundamentais para que eu me sentisse apoiada em cada fase deste processo.

À minha família, deixo um agradecimento especial. Aos meus **irmãos, Lucas e Diego**, que foram presença firme e apoio incondicional ao longo de toda esta jornada — a vossa força foi também a minha. Às minhas **cunhadas, Carolina e Rosane**, agradeço o carinho, a generosidade e a forma como estiveram sempre por perto nos momentos importantes.

Ao meu **pai**, a minha gratidão mais profunda: pelo apoio incansável, pela confiança que sempre depositou em mim, por estar presente de forma tão constante e generosa e principalmente, por sempre acreditar em mim.

À minha **mãe**, agradeço com carinho, pelo seu apoio e pelo seu papel ao longo deste percurso.

Aos colegas do processo de equivalência, o nosso querido **G20**, agradeço por terem tornado esta etapa mais leve e humana, com partilhas sinceras, entreaduda e amizade. Em especial, à **Yasmin e à Iscárlet** — amigas que a vida me trouxe através deste processo — obrigada por cada momento, cada palavra e cada gesto que fizeram a diferença e ficarão comigo para sempre.

A todas estas pessoas, o meu profundo e sincero obrigada.



"A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo."

— Peter Drucker



## RESUMO

As resinas compostas e os sistemas adesivos assumem, na actualidade, um papel central na medicina dentária restauradora, constituindo o alicerce de intervenções cada vez mais conservadoras, tanto do ponto de vista estético como funcional. Todavia, a adesão ao tecido dentinário continua a representar uma das maiores dificuldades clínicas, em virtude da sua natureza morfofuncional complexa e da vulnerabilidade à degradação ao longo do tempo. O presente trabalho de revisão teve como propósito examinar, de forma crítica e fundamentada, os progressos recentes no domínio da formulação de materiais restauradores, bem como os mecanismos implicados na deterioração da interface adesiva. Em paralelo, foram exploradas as estratégias actualmente em desenvolvimento para potenciar a eficácia e prolongar a longevidade das restaurações. Entre os temas abordados, destacaram-se a classificação e evolução das resinas compostas, os fundamentos da adesão à dentina, os diferentes tipos de sistemas adesivos disponíveis e as tendências emergentes, que englobam o uso de materiais biomiméticos, a aplicação de nanotecnologia e o recurso a compósitos autoadesivos. Com base na análise da literatura, verificou-se que, apesar das melhorias substanciais no desenvolvimento de novos materiais restauradores, a durabilidade clínica das restaurações continua a depender de uma multiplicidade de factores. Entre estes incluem-se a escolha criteriosa do material, a técnica operatória adotada e as particularidades do ambiente clínico em que a restauração é realizada. Neste contexto, conclui-se que a prática restauradora actual exige uma abordagem que seja baseada em evidências científicas robustas, associada a uma actualização contínua dos conhecimentos técnico-científicos por parte dos profissionais. Esta integração de conhecimento, tecnologia e competência clínica é fundamental para garantir o sucesso terapêutico das intervenções restauradoras e para promover uma evolução sustentada, segura e eficaz na medicina dentária contemporânea.

*Palavras-chave:* adesão dentinária, adesivos dentários, união dentária, agentes adesivos, resinas compostas.



## ABSTRACT

Resin composites and adhesive systems currently play a central role in restorative dentistry, forming the foundation for increasingly conservative interventions from both aesthetic and functional perspectives. Nevertheless, achieving reliable adhesion to dentine remains one of the most significant clinical challenges, due to its complex morphofunctional nature and susceptibility to long-term degradation. This literature review aimed to critically and thoroughly examine recent advances in the formulation of restorative materials, as well as the mechanisms involved in the degradation of the adhesive interface. Additionally, it explored current strategies being developed to enhance the effectiveness and extend the longevity of restorations. Topics covered included the classification and evolution of composite resins, the principles of dentine adhesion, the range of available adhesive systems, and emerging trends such as the use of biomimetic materials, the application of nanotechnology, and the development of self-adhesive composites. Based on the analysis of the literature, it was found that despite substantial improvements in the development of new restorative materials, the clinical durability of restorations still depends on a multifactorial interaction. Key factors include the careful selection of the restorative material, the operative technique used, and the specific clinical context in which the procedure is performed. In this light, it is concluded that modern restorative practice requires an approach grounded in robust scientific evidence, combined with the continuous updating of technical and scientific knowledge by dental professionals. This integration of knowledge, technology, and clinical skill is essential to ensure the therapeutic success of restorative procedures and to foster a sustainable, safe, and effective evolution in contemporary dentistry.

*Keywords:* dentin adhesion, dental adhesives, dental bonding, dentin-bonding agents, composite resins.



## SUMÁRIO

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>13</b> |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>   | <b>15</b> |
| <b>2.1</b>   | <b>Resinas Compostas na Medicina Dentária Restauradora .....</b>  | <b>15</b> |
| <b>2.1.1</b> | <i>Classificação das Resinas Compostas e Suas Aplicações Clínicas .....</i>                                       | <i>18</i> |
| <b>2.2</b>   | <b>Estrutura Dentária e Adesão dos Materiais Restauradores .....</b>  | <b>27</b> |
| <b>2.2.1</b> | <i>Sistemas Adesivos.....</i>   | <i>29</i> |
| <b>2.2.2</b> | <i>Princípios da Adesão Dentária .....</i>  | <i>34</i> |
| <b>2.2.3</b> | <i>Mecanismos de Manipulação e Degradação da Interface Adesiva.....</i>   | <i>36</i> |
| <b>2.2.4</b> | <i>Estratégias Para Melhorar a Adesão.....</i>  | <i>38</i> |
| <b>2.3</b>   | <b>Avanços Tecnológicos e Perspectivas Futuras .....</b>  | <b>39</b> |
| <b>2.3.1</b> | <i>Desenvolvimento de Materiais Restauradores Biomiméticos.....</i>   | <i>39</i> |
| <b>2.3.2</b> | <i>Resinas Autoadesivas Flowable.....</i>   | <i>41</i> |
| <b>2.4</b>   | <b>Inovações e Tendências Futuras em Resinas Compostas e Adesão Dentinária:<br/>Desafios e Oportunidades.....</b> | <b>45</b> |
| <b>3</b>     | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>   | <b>49</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>51</b> |



## LISTA DE FIGURAS

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| <b>Figura 1</b> | <i>Classificação das resinas compostas por aplicação clínica .....</i>  | 22 |
| <b>Figura 2</b> | <i>Diferença entre técnica incremental vertical e técnica com resina Bulkfill</i>                                 | 24 |
| <b>Figura 3</b> | <i>Demonstração composição do esmalte e dentina.....</i>  | 28 |
| <b>Figura 4</b> | <i>Tipos de sistemas adesivos. Estratégia de adesão em medicina dentária, adaptado de Perdigão, em 2021 .....</i> | 33 |
| <b>Figura 5</b> | <i>Smear layer e formação da camada híbrida. ....</i>   | 34 |
| <b>Figura 6</b> | <i>Representação esquemática da aplicação e composição de compósito fluido autoadesivo. ....</i>                  | 44 |



## LISTA DE TABELAS

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| <b>Tabela 1</b> | <i>Estrutura básica das resinas compostas.....</i>   | 16 |
| <b>Tabela 2</b> | <i>Classificação das resinas compostas de acordo com o critério de carga... </i>               | 26 |
| <b>Tabela 3</b> | <i>Classificação das resinas compostas de acordo com o critério de aplicação clínica .....</i> | 27 |



## LISTA DE ABREVIATURAS

|         |  |
|---------|--|
| 10-MDP  | 10-Metacriloilóxi-Decil Dihidrogenofosfato |
| 4-META  | 4-Metacriloxietil Trimelitato Anidrido     |
| Bis-EMA | Bisfenol A Polietoxilado Dimetacrilato     |
| BIS-GMA | Bisfenol A Glicidil Metacrilato            |
| EDMAB   | Etil 4-dimetilaminobenzoato                |
| GPDM    | Glicerofosfato Dimetacrilato               |
| MMPs    | Metaloproteinases da Matriz                |
| MPS     | 3-Metacriloxipropiltrimetoxissilano        |
| SAFC    | Self-Adhesive Flowable Composite           |
| TEGDMA  | Trietilenoglicol Dimetacrilato             |
| UDMA    | Uretano Dimetacrilato                      |



## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, na medicina dentária restauradora tem havido grandes avanços, na maior parte impulsionado pela inovação contínua de materiais com propriedades estéticas aprimoradas, maior longevidade e elevada biocompatibilidade. Neste contexto, as resinas compostas afirmaram-se como uma solução terapêutica central na reabilitação directa de estruturas dentárias, dado o seu notável potencial para reproduzir com precisão as características do tecido dentário natural, permitindo simultaneamente abordagens conservadoras e minimamente invasivas. Simultaneamente ao progresso na ciência dos materiais, tem-se verificado uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e compatibilidade biológica dos materiais restauradores. Face a esta realidade, as resinas compostas, aliadas aos modernos sistemas adesivos, tornaram-se a escolha de eleição em múltiplos domínios da prática clínica, incluindo a odontopediatria, a reabilitação estética e a medicina dentária generalista (Peumans et al., 2005).

Os sistemas adesivos desempenham um papel determinante na retenção das restaurações, ao assegurarem a ligação eficaz entre o substrato dentário e o material restaurador. Ainda que tenham sido alcançados avanços consideráveis na composição química dos adesivos e das próprias resinas, a durabilidade clínica das restaurações continua a ser um desafio, frequentemente comprometido pela degradação progressiva da interface adesiva — fenómeno que constitui uma das principais causas de insucesso à longo prazo (Van Meerbeek et al., 2020).

A deterioração dessa interface resulta de múltiplos factores, entre os quais se destacam a hidrólise dos componentes adesivos, a acção enzimática sobre a matriz colagénica da dentina e a polimerização deficiente dos sistemas adesivos (Betancourt, Baldion & Castellanos, 2019). A combinação destes processos compromete progressivamente a resistência adesiva, favorecendo a ocorrência de fenómenos indesejáveis como a microinfiltração, o desenvolvimento de lesões de cárie secundária e a fractura prematura das restaurações. Em resposta a estas limitações, têm sido exploradas alternativas terapêuticas inovadoras, com o propósito de melhorar a resistência e estabilidade da camada híbrida (Münchow & Bottino, 2017).

Num cenário clínico cada vez mais exigente e orientado para a excelência terapêutica, a selecção informada das resinas compostas e dos sistemas adesivos tornou-se um aspecto crucial, com impacto directo na funcionalidade e previsibilidade dos tratamentos restauradores a longo prazo. Assim, o conhecimento aprofundado dos princípios fundamentais da adesão dentinária, bem como dos diversos factores que influenciam o desempenho clínico dos materiais restauradores, revela-se essencial para uma prática clínica actualizada e baseada na evidência.

A relevância deste tema decorre da necessidade de compreender com maior profundidade os mecanismos que regulam a adesão e a durabilidade das restaurações, ao mesmo tempo que se impõe uma análise crítica das inovações tecnológicas que continuamente surgem nesta área. A rápida evolução dos materiais restauradores e das abordagens clínicas obriga o médico dentista a manter-se actualizado e a recorrer as evidências científicas para integrar de forma segura e eficaz as novas soluções na sua prática diária.

Neste sentido, a presente revisão de literatura propõe-se apresentar uma análise abrangente e actualizada sobre os desenvolvimentos mais recentes na composição das resinas compostas e dos sistemas adesivos, com ênfase nas estratégias voltadas para o reforço da adesão à dentina e para a optimização da longevidade clínica das restaurações.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A presente secção propõe-se realizar uma análise crítica e aprofundada dos mais recentes desenvolvimentos e obstáculos inerentes à utilização de resinas compostas e sistemas adesivos, com especial enfoque na adesão à dentina — domínio que permanece entre os mais complexos e exigentes no âmbito da medicina dentária restauradora.

De acordo com a literatura científica contemporânea, a eficácia da ligação entre os materiais restauradores e o tecido dentinário constitui um factor determinante para a durabilidade clínica das restaurações (Münchow & Bottino, 2017).

Neste sentido, será realizada uma revisão da evolução das composições das resinas compostas, bem como dos fundamentos científicos que sustentam o processo de adesão à dentina. Serão igualmente abordadas as diferentes categorias de sistemas adesivos actualmente disponíveis, assim como os mecanismos que comprometem a estabilidade e longevidade da interface restauradora. Para além desta análise, será igualmente explorado o rumo que a investigação tem vindo a seguir nesta área, dando especial atenção a soluções inovadoras pensadas para ultrapassar as limitações clínicas actuais, nomeadamente o desenvolvimento de biomateriais funcionais, compósitos com propriedades autoadesivas e aplicações baseadas em nanotecnologia.

### 2.1 Resinas Compostas na Medicina Dentária Restauradora

Actualmente, as resinas compostas representam a principal escolha de material restaurador para procedimentos restauradores e conservadores em toda a extensão da arcada dentária. A sua formulação é baseada numa estrutura composta por três elementos fundamentais: uma matriz orgânica, constituída habitualmente por monómeros como o BIS-GMA (bisfenol A glicidil metacrilato), UDMA (uretano dimetacrilato), TEGDMA (trietilenoglicol dimetacrilato) e Bis-EMA (bisfenol A polietoxilado dimetacrilato); partículas de carga inorgânica, que podem incluir sílica amorfa, zircónia, vidros de bariosilicato ou partículas de quartzo e, por fim, um agente de união entre a matriz orgânica e as cargas inorgânicas, sendo o mais comum o silano 3-metacriloxipropiltrimetoxissilano (MPS) (Monteiro et al., 2018).

A Tabela 1 ilustra esta estrutura composicional típica das resinas compostas, permitindo uma visualização clara dos seus componentes e respectivas funções na matriz do material restaurador.

**Tabela 1.** *Estrutura básica das resinas compostas.*

| <b>Componente</b>                      | <b>Função</b>   | <b>Exemplos</b>   |
|--|---|---|
| <b>Matriz Orgânica (Monómeros)</b>     | Fornece as características manipulativas e físicas                    | BIS-GMA, UDMA, TEGDMA, Bis-EMA  |
| <b>Partículas inorgânicas de Carga</b> | Proporcionam resistência, mecânica e estabilidade                     | Sílica amorfa, Zircônia, Vidros de bariosilicato, Partículas de quartzo |
| <b>Agente de União (Silano)</b>        | Promove a ligação entre a matriz orgânica e as partículas inorgânicas | 3-Metacriloxipropiltrimetoxissilano (MPS)                               |

Fonte: Tabela elaborada pelo autor com base nos dados de Monteiro et al. (2018).

As resinas compostas constituem uma inovação determinante no cenário da medicina dentária restauradora, assentando no princípio de que a combinação sinérgica de diferentes componentes confere ao conjunto propriedades superiores às dos constituintes isolados. Estes materiais multicomponentes apresentam, na sua estrutura fundamental, uma matriz orgânica, partículas de carga inorgânica e um agente de união, cuja acção conjunta assegura resistência mecânica, durabilidade clínica e adesão eficaz. O silano desempenha um papel central neste processo, ao estabelecer uma ligação estável entre as fases orgânica e inorgânica. Para além desta estrutura base, as resinas compostas integram outros elementos essenciais ao sucesso clínico das restaurações, nomeadamente sistemas iniciadores de polimerização, inibidores de reacção e pigmentos que permitem uma reprodução estética fiel da estrutura dentária. A eficiência destes materiais está directamente associada ao grau de conversão polimérica, podendo ser este optimizado através da incorporação de co-iniciadores que possuem uma cânforoquinona associada a uma amina terciária, como o etil 4-dimetilaminobenzoato (EDMAB) e o 2-(dimetilamino)etilmetacrilato, em proporções cuidadosamente equilibradas. A adição de compostos como o difeniliodónio hexafluorofosfato potencializa a fotopolimerização, o que resulta em melhorias significativas ao nível da resistência mecânica, estabilidade dimensional e redução da quantidade de monómeros residuais — factores que, em

conjunto, contribuem para um desempenho clínico mais duradouro e seguro (Cho et al., 2022; Andrade et al., 2016).

As formulações contemporâneas de resinas compostas marcaram uma mudança no paradigma da medicina dentária restauradora, ao viabilizarem intervenções minimamente invasivas que preservam, sempre que possível, a estrutura dentária saudável. A sua capacidade de reproduzir a aparência natural dos dentes, aliada à versatilidade de aplicação em diferentes zonas da arcada dentária, constitui um dos principais trunfos destes materiais. A constante evolução da sua composição química tem permitido expandir significativamente as suas aplicações clínicas. No entanto, apesar dos progressos registados, a durabilidade das restaurações em resina composta continua a ser alvo de debate no meio científico. O seu comportamento ao longo do tempo depende de uma interacção complexa entre factores intrínsecos ao material — como o grau de conversão da matriz polimérica e a resistência à degradação hidrolítica — e variáveis clínicas, que incluem a técnica operatória, a escolha do sistema adesivo e o controlo eficaz da contaminação durante o procedimento, sendo sempre ideal o uso de isolamento absoluto (Demarco et al., 2023; Mei et al., 2016; Monteiro et al., 2018; Ojeda et al., 2020).

Estudos demonstram que, quando aplicadas de forma correcta, as restaurações em resina composta podem apresentar um comportamento biomecânico semelhante ao dos tecidos dentários naturais. As suas propriedades elásticas favorecem a dissipação uniforme das forças mastigatórias e a resistência à fractura — características estas fortemente influenciadas pelo desenho cavitário e pela espessura do material aplicado. A investigação e desenvolvimento contínuos destas resinas têm contribuído não apenas para o aperfeiçoamento das suas propriedades físicas, mas também para facilitar o seu manuseamento clínico. As formulações actuais procuram conjugar facilidade de utilização com elevada adaptabilidade às exigências clínicas, oferecendo soluções eficientes tanto para reabilitações funcionais como estéticas. Esta evolução tecnológica, sustentada por evidência clínica robusta, consolida as resinas compostas como materiais de eleição na prática dentária contemporânea, respondendo às expectativas de eficácia e estética de profissionais e pacientes (Demarco et al., 2023; Mei et al., 2016; Monteiro et al., 2018; Ojeda et al., 2020).

Todavia, apesar da significativa evolução dos sistemas restauradores, persistem limitações relevantes nas formulações actualmente disponíveis no mercado. Entre as principais problemáticas encontram-se a adesão insuficiente à dentina, o desempenho insatisfatório na obtenção de selamento periférico na ausência de sistemas adesivos convencionais, e os níveis elevados de solubilidade e hidrossolubilidade — vulnerabilidades que comprometem a longevidade clínica (Monteiro et al., 2018).

Assim, embora as resinas compostas representem um avanço incontestável na medicina dentária, o seu desenvolvimento ainda se depara com desafios substanciais que requerem uma abordagem científica multidisciplinar. A melhoria das propriedades adesivas, a mitigação dos efeitos da degradação hidrolítica e o reforço da estabilidade biomecânica constituem, actualmente, áreas prioritárias de investigação. A superação destes obstáculos, aliada à contínua evolução dos sistemas adesivos e das metodologias de aplicação clínica, poderá consolidar de forma ainda mais robusta o estatuto das resinas compostas enquanto solução terapêutica de excelência, conjugando durabilidade, biocompatibilidade e desempenho funcional (Monteiro et al., 2018).

### ***2.1.1 Classificação das Resinas Compostas e Suas Aplicações Clínicas***

As resinas compostas podem ser organizadas segundo critérios distintos, nomeadamente o tamanho das partículas de carga e o contexto clínico em que são aplicadas, conforme representado nas Tabelas 2 e 3.. Tradicionalmente, esta classificação de acordo com o tamanho das partículas de carga baseava-se na dimensão e distribuição das partículas inorgânicas, sendo agrupadas em três categorias principais: macroparticuladas (10–50  $\mu\text{m}$ ), microparticuladas (40–50 nm) e híbridas — estas últimas constituídas por uma mistura de partículas de grande dimensão (10–50  $\mu\text{m}$ ) com nanopartículas (40 nm). Com os avanços tecnológicos, as resinas híbridas evoluíram, originando novas subcategorias, como as microhíbridas, que integram partículas de 0,6–1  $\mu\text{m}$  associadas a cargas de 40 nm. Mais recentemente, surgiram as resinas nanoparticuladas (1–100 nm) e as nanohíbridas, que aliam estrategicamente micro e nanopartículas, permitindo alcançar desempenhos superiores tanto ao nível mecânico como estético (Alzraikat et al., 2018; Zhou et al., 2019).

A longevidade das restaurações realizadas com resinas compostas está directamente correlacionada com as características estruturais destes materiais. Propriedades como resistência ao desgaste e integridade mecânica estão intrinsecamente dependentes da distribuição uniforme das partículas de carga e do grau de conversão da matriz polimérica. Estes factores são determinantes para assegurar estabilidade sob cargas oclusais intensas, prevenindo falhas como fracturas, descolorações precoces e desadaptação marginal. Por conseguinte, a escolha criteriosa da resina composta, tendo em conta a sua classificação e a indicação clínica, revela-se essencial para o sucesso terapêutico (Velo et al., 2016).

O desenvolvimento de técnicas avançadas de microfabricação e nanofabricação constituiu um marco importante na evolução da medicina dentária restauradora, ao permitir a produção de partículas de carga com precisão nanométrica e morfologias diversas, incluindo formas esféricas, tubulares ou fibrosas. Esta variabilidade estrutural possibilitou a criação de materiais verdadeiramente multifuncionais, em que a integração de diferentes tipos de partículas promove propriedades mecânicas e biológicas notavelmente melhoradas. Neste enquadramento, a introdução de nanopartículas em resinas compostas tem-se revelado especialmente promissora, proporcionando não só melhores propriedades ópticas e capacidade de polimento, mas também uma resistência superior ao desgaste e ao impacto. O crescente interesse na nanotecnologia justifica-se, assim, pelo seu potencial em modificar a microestrutura interna dos materiais restauradores, promovendo simultaneamente melhorias a nível da estabilidade química, desempenho mecânico e características estéticas. Esta abordagem inovadora contribui para o desenvolvimento de resinas compostas com características optimizadas, adaptáveis às exigências funcionais e estéticas de diferentes zonas da cavidade oral (Cho et al., 2022; Alzraikat et al., 2018).

Por fim, os materiais restauradores em resina composta podem ainda ser agrupados segundo a sua aplicação clínica e características de manipulação. Distinguem-se, neste domínio, duas categorias fundamentais: *flowable* (de baixa viscosidade, também denominadas fluídas) e *packable* (de alta viscosidade, condensáveis). Estas categorias subdividem-se em três variantes: convencionais, autoadesivas e *bulkfill* (Zhou et al., 2019). Todas estas subcategorias podem ser encontradas tanto nas versões *flowable* como *packable*, conforme esquematizado na Figura 1.

As resinas compostas *packable* e *flowable* constituem variantes das formulações convencionais, tendo sido desenvolvidas através de modificações na sua composição e reologia, com o objectivo de responder a exigências clínicas específicas, sobretudo no que se refere à facilidade de manuseamento e adaptação ao tipo de cavidade e à técnica restauradora aplicada. No que respeita à resistência mecânica e ao comportamento intraoral, as resinas *packable* foram concebidas como uma alternativa prática ao amálgama, com particular enfoque em restaurações posteriores. Apresentam uma consistência mais rígida, menor aderência ao instrumental e superior resistência à deformação durante o processo de modelação, características que favorecem a aplicação em incrementos e facilitam a obtenção de pontos de contacto proximais consistentes. O seu manuseio aproxima-se do dos materiais restauradores metálicos, permitindo um controlo mais preciso da escultura anatómica. A sua utilização prende-se, em grande medida, com preferências clínicas individuais e com a facilidade de manipulação, mais do que com vantagens evidentes ao nível do desempenho físico (Zhou et al., 2019).

As resinas *flowable*, por seu lado, distinguem-se pela baixa viscosidade e elevada fluidez, propriedades resultantes da redução na proporção de carga inorgânica na sua formulação. Tal modificação estrutural permite que estas resinas se adaptem com maior facilidade às superfícies cavitárias, sendo particularmente úteis para preencher áreas de difícil acesso ou pequenas irregularidades. Inicialmente, a sua utilização era sobretudo aplicada a funções como *liners* cavitários e selantes de fissuras, dada a sua limitada resistência à abrasão e reduzido módulo elástico. Contudo, com o avanço das formulações, surgiram versões mais recentes com melhorias significativas ao nível do desempenho clínico, possibilitando a sua aplicação em restaurações submetidas a cargas funcionais leves, como em lesões cervicais não cariosas e cavidades de acesso minimamente invasivo (Singh et al., 2023).

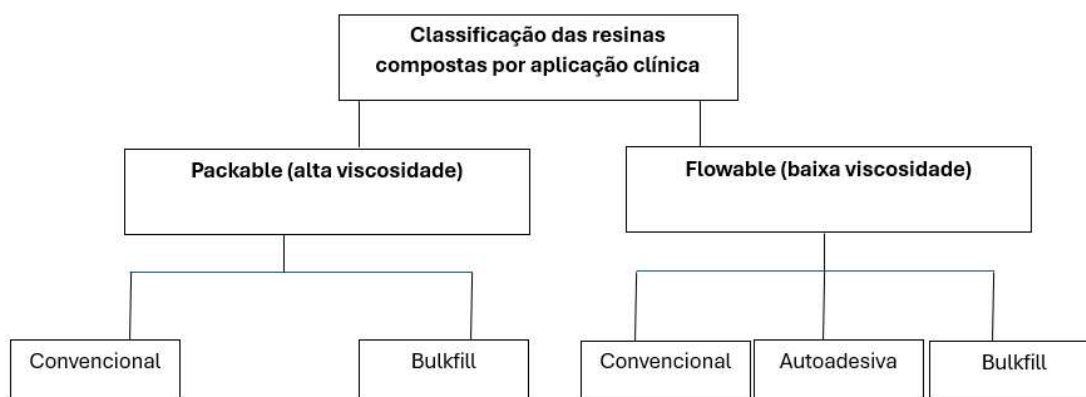
É importante reforçar que tanto as resinas *packable* como as *flowable* são derivações das resinas compostas convencionais, as quais continuam a destacar-se pela sua versatilidade e pelo equilíbrio entre propriedades mecânicas e estéticas, justificando a sua ampla aceitação na prática clínica. As versões *packable* e *flowable* configuram adaptações específicas a contextos operatórios determinados, oferecendo alternativas que se ajustam às particularidades anatómicas, funcionais e técnicas de cada caso clínico. A

selecção entre estas opções deve, por conseguinte, basear-se numa análise criteriosa dos requisitos clínicos, da extensão e localização da cavidade, bem como do perfil funcional do dente a restaurar (Zhou et al., 2019).

Mais recentemente, as resinas compostas autoadesivas e as designadas *bulkfill* têm se destacado pela sua praticidade no contexto clínico. Em comparação com as resinas convencionais e *packable*, observa-se uma crescente preferência pelos compósitos *flowable* e *bulkfill*, que assumem actualmente um papel cada vez mais relevante na medicina dentária restauradora. Os compósitos *flowable*, desenvolvidos originalmente na década de 1990, apresentavam limitações significativas, como uma contracção de polimerização mais elevada, maior susceptibilidade ao desgaste e menor robustez mecânica face às resinas *packable*. No entanto, a evolução contínua da sua formulação permitiu superar estas fragilidades, elevando o seu desempenho a níveis comparáveis aos dos compósitos *packable* de alto desempenho. Actualmente, destacam-se pela versatilidade e facilidade de manuseamento, qualidades que lhes conferem um lugar central na prática clínica diária. Simultaneamente, os compósitos *bulkfill* emergiram como uma opção vantajosa, permitindo a aplicação em camadas de maior espessura sem comprometer a eficácia da polimerização, o que se traduz em uma simplificação significativa dos protocolos operatórios. Esta característica tem sido determinante para a sua adoção progressiva na prática clínica, permitindo ao profissional maior eficiência sem abdicar da segurança e da qualidade da restauração (Cho et al., 2022).

**Figura 1**

Classificação das resinas compostas por aplicação clínica.



Fonte: Imagem elaborada pelo autor com base em Zhou et al. (2019) e Singh et al. (2023).

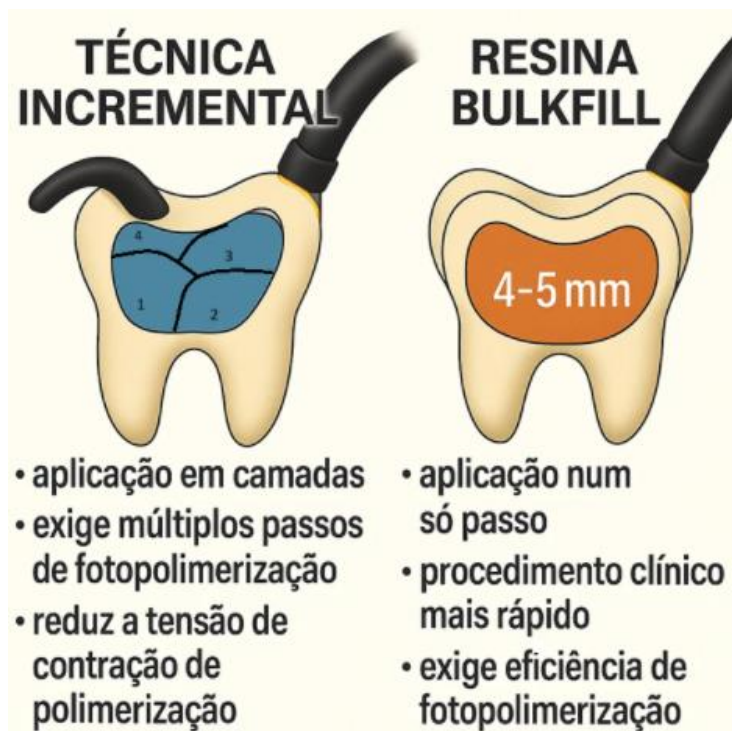
A contracção de polimerização constitui uma das limitações mais relevantes dos materiais restauradores à base de resina, representando um desafio técnico persistente na medicina dentária restauradora. Este fenómeno ocorre durante a conversão dos monómeros em polímeros, processo induzido pela fotopolimerização, e resulta na geração de tensões internas dentro do material restaurador. Estas tensões, ao incidirem sobre a interface entre a estrutura dentária e a restauração, podem comprometer a sua integridade, originando consequências clínicas adversas. Entre estas, destacam-se a formação de microfissuras marginais, alterações cromáticas ao longo do tempo, hipersensibilidade dentinária pós-operatória, ocorrência de cáries secundárias, fractura da restauração e, em casos mais graves, falha total da reabilitação (Zhou et al., 2019; Velo et al., 2016).

Com o objectivo de minimizar os efeitos nocivos desta contracção, têm sido propostas diversas estratégias inovadoras. Uma das mais promissoras é a utilização das resinas *bulkfill*, cuja composição foi especialmente concebida para reduzir as tensões internas durante a polimerização. Estas resinas permitem a aplicação em poucos incrementos — tipicamente entre 4 e 5 mm cada — em contraste com as resinas compostas convencionais, que requerem camadas incrementais verticais e sucessivas de, no máximo 2 mm cada, conforme ilustrado na Figura 2. Esta vantagem deve-se a modificações na matriz orgânica das *bulkfill* e à incorporação de fotoiniciadores mais eficientes, capazes de assegurar uma conversão adequada da matriz resinosa mesmo em profundidade (Rodrigues et al., 2021).

Adicionalmente, estas resinas apresentam partículas de carga com características optimizadas e uma translucidez aumentada, factores que favorecem a penetração da luz e promovem uma polimerização mais homogénea nas regiões profundas da restauração. Como resultado, observa-se um desempenho clínico comparável — e, em determinados aspectos, superior — ao das resinas tradicionais, particularmente no que se refere à adaptação marginal e à resistência à fractura (Rodrigues et al., 2021).

Segundo Batihlim e Ratnasari (2021), estas propriedades tornam as resinas *bulkfill* especialmente indicadas para restaurações directas em dentes posteriores, sobretudo em contextos clínicos em que a eficiência operatória e a gestão do tempo assumem um papel determinante na tomada de decisão terapêutica. As resinas *bulkfill* representam uma evolução relevante na medicina dentária restauradora, sobretudo pela sua capacidade de conjugar eficiência operatória com elevada previsibilidade clínica. A possibilidade de inserção em incrementos mais espessos, com redução substancial do número de etapas clínicas e conseqüente diminuição das tensões internas geradas durante a polimerização, permite uma abordagem restauradora mais ágil e menos susceptível a falhas associadas à técnica incremental. Esta simplificação não só reduz o tempo clínico envolvido, como também contribui a durabilidade da restauração.

**Figura 2.** Diferença entre técnica incremental vertical e técnica com resina Bulkfill.



Fonte: Imagem elaborada pelo autor com apoio de inteligência artificial (ChatGPT, OpenAI, 2025), com base em Rodrigues et al. (2021).

Segundo Ojeda et al. (2017), a aplicação clínica das resinas *bulkfill* tem evidenciado resultados consistentes em parâmetros essenciais como adaptação marginal, integridade estrutural e estética final. Estas vantagens tornam-se particularmente relevantes em situações clínicas com restrições temporais ou em pacientes com múltiplas necessidades de reabilitação, nos quais a previsibilidade e a agilidade do tratamento são determinantes.

Neste mesmo contexto, a medicina dentária restauradora tem vindo a incorporar adesivos universais e compósitos *bulkfill*, a fim de simplificar os protocolos restauradores e contribuindo para a sua padronização. Estes avanços reduziram significativamente o número de fases envolvidas no processo adesivo, possibilitando procedimentos menos invasivos e mais rápidos. Contudo, permanece a necessidade da utilização de um sistema adesivo prévio, sobretudo em situações clínicas mais complexas, como cavidades de difícil acesso ou em pacientes cuja condição clínica requer intervenções de curta duração. Este constrangimento tem fomentado a investigação na direcção do desenvolvimento de materiais verdadeiramente autoadesivos, que permitam eliminar por completo as etapas convencionais de adesão — tais como o condicionamento ácido e a aplicação sequencial

de primer e adesivo —, potencialmente a inaugurar um novo paradigma de simplificação e eficácia clínica (Cieplik et al., 2022).

Neste cenário, as resinas compostas autoadesivas, apesar de desenvolvidas há mais de uma década, continuam a ser consideradas uma solução promissora cuja integração plena na prática clínica permanece em desenvolvimento. O seu mecanismo de acção baseia-se na presença de monómeros ácidos específicos, os quais induzem uma desmineralização controlada da dentina, expondo a matriz de apatite e permitindo o estabelecimento de ligações químicas com o material restaurador. No entanto, o desempenho destas resinas varia consideravelmente em função da composição e da pureza dos seus componentes. A complexidade destes sistemas reside na necessidade de alcançar um equilíbrio preciso entre três propriedades críticas:

- (1) hidrofiliabilidade adequada para interagir com a dentina húmida;
- (2) acidez suficiente para assegurar a desmineralização eficaz da superfície;
- (3) capacidade de polimerização eficiente para garantir resistência mecânica satisfatória (Delgado et al., 2021).

Embora representem um avanço conceptual significativo — ao dispensarem os sistemas adesivos tradicionais e reduzirem a margem de erro operativo —, os materiais autoadesivos que contêm monómeros ácidos, como o 10-Metacrilóilóxi-Decil Dihidrogenofosfato (10-MDP), continuam a apresentar valores de resistência adesiva inferiores aos observados com os sistemas adesivos convencionais. Esta limitação, associada a resultados clínicos ainda inconsistentes em termos de longevidade, posiciona as resinas autoadesivas como uma tecnologia em progresso, cujo potencial clínico pleno permanece por concretizar (Zhou et al., 2019).

A selecção do material restaurador ideal deve considerar não apenas a sua composição química, mas também as propriedades mecânicas que afectam directamente o desempenho clínico a longo prazo. Entre os parâmetros de maior relevância encontram-se a distribuição e o tamanho das partículas inorgânicas, o grau de conversão monomérica — que reflecte a eficácia do processo de polimerização — e a compatibilidade entre a matriz orgânica e os agentes silânicos, fundamentais para garantir uma ligação duradoura entre a carga inorgânica e a matriz resinosa. Estes factores influenciam de forma

determinante a estabilidade estrutural do material, a resistência ao desgaste e a sua longevidade no meio oral (Zhou et al., 2019).

Adicionalmente, as propriedades biomecânicas desempenham um papel crucial na longevidade das restaurações. Como assinalado por Mei et al. (2016), a capacidade do material restaurador para distribuir uniformemente as forças mastigatórias depende do seu módulo de elasticidade. Compósitos com elasticidade semelhante à da dentina promovem uma integração biomecânica mais eficaz, reduzindo a concentração de tensões internas e, por conseguinte, o risco de fractura tanto da restauração como da estrutura dentária remanescente. Assim, a selecção racional de resinas compostas para restaurações duradouras e funcionalmente eficazes deve basear-se na conjugação entre propriedades físico-químicas optimizadas e comportamento mecânico compatível com os tecidos dentários naturais.

**Tabela 2.** *Classificação das resinas compostas de acordo com o critério de carga.*

| <b>Critério</b>        | <b>Categoria</b> | <b>Características Clínicas Principais</b>            |
|------------------------|------------------|---|
| Carga (tamanho e tipo) | Macroparticulada | Alta resistência, acabamento menos estético           |
|                        | Microparticulada | Ótimo polimento, baixa resistência mecânica           |
|                        | Híbrida          | Equilíbrio entre força e estética                     |
|                        | Microhíbrida     | Estética refinada com boa resistência                 |
|                        | Nanoparticulada  | Polimento superior, excelente resistência ao desgaste |
|                        | Nanohíbrida      | Propriedades mecânicas e estéticas optimizadas        |

Fonte: Dados organizados pelo autor, adaptado de Alzraikat et al. (2018) e Zhou et al. (2019).

**Tabela 3.** Classificação das resinas compostas de acordo com o critério de aplicação clínica.

| <b>Critério</b>   | <b>Categoria</b> | <b>Características Clínicas Principais</b>                                       |
|-------------------|------------------|--|
| Aplicação clínica | Flowable         | Alta adaptação; atualmente com boa resistência e alta contração de polimerização |
|                   | Packable         | Alta viscosidade; ideal para áreas de carga oclusal                              |
|                   | Bulkfill         | Inserção em camadas espessas (4–5 mm); reduz tempo clínico                       |
|                   | Autoadesiva      | Simplifica o protocolo; ainda com adesão inferior aos sistemas convencionais     |

Fonte: Dados organizados pelo autor, adaptado de Zhou et al. (2019).

## 2.2 Estrutura Dentária e Adesão dos Materiais Restauradores

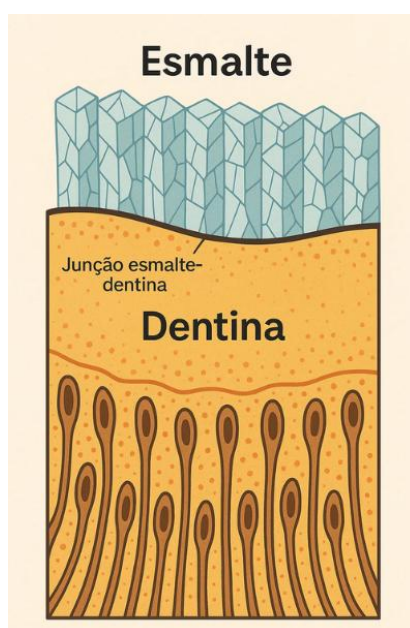
O esmalte e a dentina apresentam composições e propriedades estruturais distintas, as quais influenciam de forma determinante as suas funções biológicas e o comportamento perante intervenções em medicina dentária. O esmalte é constituído, predominantemente, por cristais de hidroxiapatite, representando cerca de 96% da sua composição em conteúdo inorgânico, sendo considerado o tecido mais mineralizado do organismo humano. Essa elevada mineralização é responsável por uma dureza extrema, mas, simultaneamente, uma maior fragilidade perante cargas de impacto e uma total ausência de capacidade regenerativa. Em contraste, a dentina exhibe uma estrutura mais heterogénea, composta por aproximadamente 70% de material inorgânico, 20 % de matriz orgânica — maioritariamente colagénio do tipo I — e cerca de 10% de água. Esta configuração confere-lhe propriedades mecânicas que privilegiam a elasticidade e a resistência à fractura, permitindo-lhe actuar como elemento amortecedor das forças mastigatórias, função que não é desempenhada pelo esmalte de forma tão eficaz. A organização tubular da dentina é essencial para a sua permeabilidade e reactividade a estímulos ambientais. Os túbulos dentinários, que se estendem desde a câmara pulpar até à junção amelo-dentinária, possibilitam a difusão de substâncias e microrganismos, o que justifica fenómenos de sensibilidade e reforça a necessidade de selamento eficiente durante os procedimentos restauradores. Adicionalmente, a junção amelo-dentinária desempenha um papel estrutural crucial, funcionando como uma zona de transição gradual entre os dois tecidos. Esta interface biomecanicamente adaptada contribui para a

integridade funcional do dente, amortecendo as tensões entre o esmalte rígido e a dentina resiliente, conforme demonstrado na Figura 3 (Abed, 2023; Fonseca et al., 2020).

Diversos agentes externos podem comprometer a integridade estrutural e funcional tanto do esmalte como da dentina. No caso do esmalte, observa-se frequentemente uma desmineralização progressiva, com perda de íons cálcio e fosfato, e alterações na configuração cristalina da hidroxiapatite, reduzindo a sua dureza e resistência. Na dentina, os danos concentram-se sobretudo na degradação da matriz colagénica, mais especificamente no enfraquecimento das fibrilas de colagénio, o que reduz significativamente a sua resistência à tração, aumentando o risco de fractura sob cargas funcionais (Miranda et al., 2021).

**Figura 3**

*Demonstração composição do esmalte e dentina.*



Fonte: Imagem gerada por inteligência artificial no ChatGPT (OpenAI, 2025).

### 2.2.1 *Sistemas Adesivos*

A eficácia da adesão à dentina e a qualidade da interface resultante constituem elementos cruciais para o sucesso clínico das restaurações diretas. Uma ligação dentinária robusta permite alcançar elevados níveis de resistência do material restaurador, reduz a ocorrência de permeabilidade marginal e contribui significativamente para a manutenção da integridade biomecânica da estrutura restauradora (Zheng et al., 2024).

As diferenças morfológicas e composicionais entre o esmalte e a dentina exigem estratégias adesivas distintas. O esmalte, altamente mineralizado e predominantemente inorgânico, responde favoravelmente ao condicionamento ácido, que permite a criação de microretenções. Por sua vez, a dentina apresenta uma matriz colagénica rica em material orgânico, cuja preservação durante o processo adesivo é essencial para a formação de uma camada híbrida funcional — estrutura imprescindível para a durabilidade da interface restauradora (Alghauli et al., 2023).

O método de condicionamento ácido, introduzido por Buonocore em 1955 (Buonocore, 1955), mantém-se, até à actualidade, como uma prática amplamente reconhecida e aplicada na medicina dentária restauradora. A sua afirmação como técnica de referência — frequentemente designada como padrão-ouro — advém da conjugação de três atributos fundamentais: previsibilidade clínica, elevada eficiência adesiva e simplicidade operatória. Estes factores tornaram o protocolo amplamente aceite e mantêm-no como uma escolha preferencial em múltiplas intervenções restauradoras contemporâneas.

A relevância do contributo inicial de Buonocore foi essencial para o progresso da dentisteria adesiva, motivando uma intensificação da investigação científica orientada para a análise aprofundada dos mecanismos de adesão aos tecidos dentários, com particular enfoque no esmalte e, subsequentemente, na dentina. A robustez dos resultados obtidos com o condicionamento ácido promoveu o desenvolvimento de sistemas adesivos inovadores, capazes de criar ligações coesas e duradouras com os diversos substratos presentes na cavidade oral. Embora inicialmente circunscrito ao esmalte, o recurso ao condicionamento ácido foi, com o tempo, alargado à dentina. Contudo, a complexidade morfoestrutural deste tecido constituiu um desafio técnico considerável, dificultando,

numa fase inicial, a obtenção de adesões efectivas e previsíveis. Foi apenas na década de 1980 que os avanços alcançados no domínio da histologia e fisiologia da dentina permitiram a concepção de agentes de união com capacidade de penetrar na rede colagénica, promovendo assim a formação de ligações adesivas estáveis e de longa duração (Alomran, Nizami, Xu, & Sun, 2025).

A adesão à dentina foi profundamente transformada com a aplicação desta técnica, permitindo a obtenção de interfaces adesivas mais estáveis. Esta inovação serviu de base para o desenvolvimento dos sistemas adesivos modernos, cuja eficácia depende, em grande medida, da modificação controlada da *smear layer* — camada de resíduos formada durante o preparo cavitário. A evolução das formulações adesivas resultou numa melhoria substancial da estabilidade química e mecânica da adesão ao longo do tempo, o que facilitou uma interação mais eficiente entre a dentina e os agentes adesivos (Bourgi et al., 2021).

A *smear layer* é constituída por detritos orgânicos e inorgânicos gerados pela instrumentação dentária, que permanecem sobre a superfície dentária preparada. Estes resíduos, predominantemente formados por hidroxiapatite e colagénio desnaturado, podem obstruir parcialmente os túbulos dentinários, formando tampões que reduzem consideravelmente a permeabilidade dentinária — até cerca de 86%. O calor e a fricção decorrentes do uso de instrumentos rotativos são responsáveis pela modificação física e química desta camada (Saikaew et al., 2022).

O protocolo clínico clássico envolve o condicionamento da superfície dentária com ácido fosfórico a 35–37%, o qual exerce uma dupla função: elimina completamente a *smear layer* e promove a criação de uma zona de dentina desmineralizada com profundidade entre 5 e 6  $\mu\text{m}$ . Após o enxaguamento, torna-se fundamental manter a dentina visivelmente húmida — sem excesso de água — para garantir a preservação da rede de fibrilas colagénicas expostas. Esta condição favorece a infiltração dos monómeros resinosos, promovendo a formação de uma ligação micromecânica eficaz e duradoura (Zheng et al., 2024).

O desenvolvimento dos sistemas adesivos acompanhou a evolução dos materiais restauradores, inicialmente baseando-se na técnica de condicionamento ácido com

subsequente lavagem. Com o tempo, surgiram os sistemas *self etch*, que representaram um avanço na simplificação destes protocolos clínicos (Liu et al., 2023).

Na actualidade, os sistemas adesivos mais eficazes devem conjugar três qualidades essenciais: aplicação rápida, facilidade de uso e reduzida sensibilidade à técnica operatória (Steiner et al., 2021).

As estratégias adesivas podem ser agrupadas em duas grandes categorias: a técnica de condicionamento e lavagem (*etch-and-rinse* – E&R) e a técnica autocondicionante (*self-etch* – AA), como ilustrado na Figura 4. A principal distinção entre ambas reside na forma como interagem com a *smear layer* (Liu et al., 2023). Na técnica *etch-and-rinse*, o ácido fosfórico é aplicado para desmineralizar tanto a camada de esmalte como os tecidos dentinários subjacentes. Em dentina, a utilização de ácido com concentrações entre 30 % e 40 % permitem a completa remoção da *smear layer*, expondo a matriz colagénica. Esta zona é posteriormente infiltrada com monómeros resinosos, formando a camada híbrida — estrutura crítica para a adesão (Figura 5) (Saikaew et al., 2022).

Os sistemas *etch-and-rinse* subdividem-se segundo o número de etapas clínicas: nos sistemas de três passos, o condicionador ácido, o primer e o adesivo hidrofóbico são aplicados separadamente; nos sistemas de dois passos, o condicionador mantém-se separado, mas o primer e o adesivo estão combinados numa única solução funcional (Perdigão et al., 2021).

Por outro lado, os sistemas *self-etch* eliminam a necessidade de condicionamento isolado com ácido, empregando um primer ácido que actua simultaneamente como agente desmineralizante e promotor de infiltração no tecido dentinário. Estes sistemas estão disponíveis em versões de uma ou duas etapas e dispensam o enxaguamento, o que reduz consideravelmente a sensibilidade técnica. Nas técnicas de duas etapas, o primer é seguido da aplicação de um adesivo hidrofóbico; na técnica de uma etapa, todos os componentes estão integrados numa única fórmula. O primer ácido, com pH moderadamente baixo, induz uma desmineralização parcial da *smear layer*, que é assim parcialmente preservada e incorporada na interface adesiva. Esta interação promove não apenas ligações micromecânicas, mas também químicas, estabelecendo uma ligação

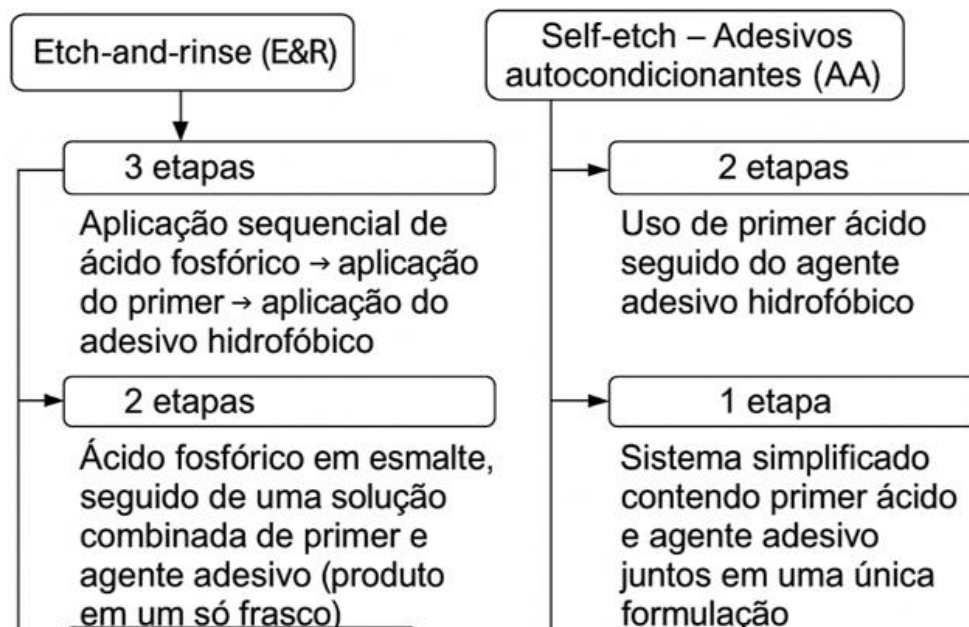
directa entre os monómeros adesivos e os cristais de hidroxiapatite remanescentes presentes na dentina e no esmalte (Van Meerbeek et al., 2020; Saikaew et al., 2022).

A categorização dos sistemas adesivos segundo o tipo de interação com a *smear layer* tem progressivamente substituído a tradicional classificação por gerações, anteriormente baseada na cronologia do seu desenvolvimento e comercialização. Esta abordagem contemporânea oferece uma perspectiva mais orientada para a prática clínica, permitindo uma selecção mais criteriosa do protocolo adesivo, de acordo com as particularidades do substrato dentário e com as exigências específicas de cada procedimento restaurador. Nesta tipologia, que distingue os sistemas *etch-and-rinse* dos sistemas *self-etch*, os adesivos universais constituem uma inovação significativa no contexto da medicina dentária actual. Estes produtos foram concebidos com o intuito de integrar múltiplas técnicas adesivas num único sistema, viabilizando a sua aplicação em protocolos de condicionamento total, técnicas autocondicionantes e, ainda, na abordagem de condicionamento selectivo do esmalte (*selective enamel etching* – SEE). Tal versatilidade funcional adapta-se a uma ampla variedade de situações clínicas, ao mesmo tempo que a sua composição química avançada assegura maior estabilidade da interface adesiva e resistência acrescida à degradação hidrolítica (Andrade et al., 2016; Bourgi et al., 2021).

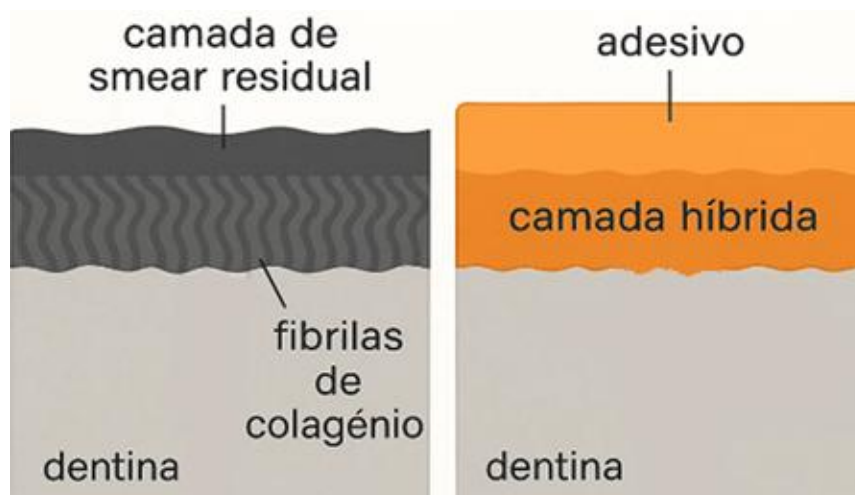
Os sistemas autocondicionantes foram desenvolvidos com o propósito de simplificar os protocolos restauradores e reduzir a incidência de falhas técnicas durante a aplicação. A sua principal mais-valia reside na compatibilidade com diferentes tipos de substratos dentários, aliada a uma interação química eficaz com a dentina parcialmente desmineralizada. Estas características contribuem para uma maior previsibilidade clínica e uma durabilidade reforçada das restaurações adesivas. A evolução contínua das formulações adesivas tem sido impulsionada pela necessidade de disponibilizar aos profissionais soluções cada vez mais eficientes, seguras e fáceis de aplicar, com o objectivo de melhorar os resultados clínicos em medicina dentária restauradora, já que a capacidade de adesão constitui uma propriedade fundamental dos materiais resinosos restauradores, uma vez que o sistema adesivo estabelece a ligação entre o compósito e o tecido dentário, influenciando de forma directa a longevidade funcional da restauração (Bourgi et al., 2021; Liu et al., 2023).

Apesar dos avanços tecnológicos, persiste na literatura científica alguma controvérsia quanto à superioridade de um determinado tipo de sistema adesivo em termos de resistência de união à estrutura dentária. Longe de se tratar de uma disputa entre técnicas, importa reconhecer os méritos próprios de cada abordagem, avaliando-as segundo critérios objectivos de eficácia adesiva. Neste sentido, a análise comparativa deve basear-se essencialmente no desempenho clínico demonstrado por cada sistema, valorizando os seus pontos fortes e reconhecendo eventuais limitações, sempre com vista a uma prática clínica fundamentada na evidência (Steiner et al., 2021).

**Figura 4.** Tipos de sistemas adesivos. Estratégia de adesão em medicina dentária.



Fonte: Imagem criada pelo autor com apoio de inteligência artificial (ChatGPT, OpenAI, 2025), adaptada de Perdigão (2021).

**Figura 5***Smear layer e formação da camada híbrida.*

Fonte: Imagem gerada por inteligência artificial no ChatGPT (OpenAI, 2025).

### 2.2.2 Princípios da Adesão Dentária

A adesão em medicina dentária restauradora comporta desafios distintos consoante ao tipo de tecido dentário envolvido. O esmalte, caracterizado por uma composição eminentemente mineral — sendo constituído maioritariamente por cristais de hidroxiapatite —, configura um substrato particularmente propício à adesão. A ligação entre os materiais resinosos e o esmalte ocorre fundamentalmente por retenção micromecânica, processo no qual o condicionamento ácido cria microporosidade na superfície esmaltada. Esses microporos funcionam como canais para a penetração dos monómeros resinosos, originando *tags* de resina que asseguram uma ligação estável e duradoura à estrutura dentária (Sato et al., 2016).

Por oposição, a adesão à dentina apresenta maior complexidade. Trata-se de um tecido biocompósito, estruturalmente heterogéneo, composto por hidroxiapatite carbonatada, proteínas e um teor elevado de água. A sua natureza húmida e orgânica, associada à presença de túbulos dentinários e à matriz colagénica, torna o processo adesivo mais sensível e tecnicamente desafiante. A literatura científica descreve a dentina tanto como um conjunto de zonas histológicas distintas como um nanocompósito que partilha semelhanças com o tecido ósseo. A adesão eficaz à dentina é condicionada por diversos factores biológicos e clínicos, incluindo a profundidade e permeabilidade do tecido, a existência de dentina esclerótica ou com lesões de cárie, a idade do paciente, a

localização anatômica do dente, o tipo de material restaurador escolhido, a eficácia do isolamento operatório e a competência técnica do profissional (Perdigão, 2020).

A selecção criteriosa do sistema adesivo, bem como a execução rigorosa da técnica restauradora, são fundamentais para alcançar níveis elevados de resistência adesiva. Ainda assim, parâmetros como a morfologia superficial do esmalte e o tempo de aplicação do ácido de condicionamento podem interferir significativamente no resultado final (Chen et al., 2015; Manso & Carvalho, 2017; Suzuki et al., 2016).

Para que se forme uma camada híbrida com estabilidade duradoura, é essencial que os monómeros resinosos penetrem eficazmente entre as fibrilas de colagénio desmineralizadas. Este processo é influenciado por diversos elementos: a profundidade da desmineralização, o grau de humidade da dentina e a eficácia da polimerização. A taxa de conversão monomérica durante a polimerização é particularmente relevante, pois afecta directamente a resistência mecânica e a durabilidade da interface adesiva (Chen et al., 2015; Cadenaro et al., 2019).

Em resposta a estas dificuldades, as formulações adesivas mais recentes foram concebidas para equilibrar propriedades hidrofílicas e hidrofóbicas, optimizando assim a adaptação ao ambiente dentinário. Ainda, muitos destes sistemas incluem inibidores de metaloproteinases da matriz (MMPs), com o objectivo de evitar a degradação enzimática da rede colagénica. Estudos actuais sublinham a importância da adesão rigorosa aos protocolos clínicos — em particular no que respeita ao tempo de aplicação dos agentes adesivos e à completa evaporação dos solventes — como condições indispensáveis à obtenção de uma camada híbrida funcional e estável (Chen et al., 2015; Muñoz et al., 2015; Alex, 2015).

A longevidade clínica das restaurações adesivas está intimamente relacionada com a estabilidade da interface restauradora perante as agressões físico-químicas do meio oral. Estratégias como a aplicação de múltiplas camadas adesivas têm demonstrado uma melhoria notável na resistência de união e na durabilidade da interface perante fenómenos de degradação (Bahari et al., 2021).

Esta abordagem integrada — que alia os avanços nos materiais à optimização dos procedimentos clínicos — representa o paradigma contemporâneo da adesão em medicina dentária restauradora, procurando superar as limitações clássicas que condicionavam a durabilidade das restaurações directas (Betancourt, Baldion & Castellanos, 2019; Shi et al., 2024).

### ***2.2.3 Mecanismos de Manipulação e Degradação da Interface Adesiva***

A durabilidade das restaurações adesivas continua a constituir um dos grandes desafios da medicina dentária restauradora actual, sendo comprometida por três vias principais de degradação da interface: hidrolítica e enzimática. Estes mecanismos, actuando de forma simultânea e progressiva, deterioram a ligação entre o material restaurador e o substrato dentário, condicionando negativamente a longevidade clínica das restaurações directas. A degradação de natureza hidrolítica resulta da capacidade das porções hidrofílicas dos sistemas adesivos em absorver água. Esta infiltração hídrica provoca alterações estruturais na matriz resinosa, levando a uma diminuição expressiva da resistência mecânica da interface. De forma a mitigar este fenómeno, tem-se recorrido à utilização de monómeros com propriedades mais hidrofóbicas, os quais demonstram conferir maior estabilidade química ao adesivo ao longo do tempo (Betancourt et al., 2019).

Em paralelo, a degradação enzimática desempenha também um papel determinante na falha da adesão. Este processo é desencadeado pela acção das metaloproteinases da matriz (MMPs) endógenas da dentina, que são responsáveis pela degradação do colagénio não infiltrado na camada híbrida. A integridade estrutural desta camada é, assim, significativamente afectada. A aplicação tópica de substâncias inibidoras da actividade enzimática, como é o caso da clorexidina, tem revelado eficácia na inibição das MMPs, contribuindo para a preservação da matriz colagénica e, por conseguinte, da interface adesiva (Münchow & Bottino, 2017).

A sua utilização clínica consiste, geralmente, na aplicação de uma solução de clorexidina a 2% sobre a dentina condicionada, recorrendo-se a um microaplicador ou a uma pequena bolinha de algodão durante cerca de 60 segundos, seguida de uma ligeira secagem sem enxaguamento. Este protocolo, amplamente descrito na literatura

contemporânea, tem demonstrado preservar significativamente a durabilidade da ligação resina-dentina, sem comprometer a resistência adesiva imediata (Robo, 2023).

Como resposta a estes desafios multifatoriais, têm vindo a ser implementadas abordagens combinadas que integram avanços em materiais e técnicas operatórias. Uma dessas estratégias consiste na aplicação sucessiva de várias camadas adesivas, promovendo uma interface mais espessa e mecanicamente mais estável, com melhor distribuição das tensões. Adicionalmente, a inclusão de agentes com capacidade de promover ligação química ao substrato dentário tem vindo a demonstrar benefícios evidentes no reforço da união adesiva (Van Meerbeek et al., 2020).

Destaca-se ainda a aplicação emergente da nanotecnologia no desenvolvimento de sistemas adesivos. A incorporação de nanopartículas bioativas nestas formulações tem evidenciado ganhos significativos, tanto ao nível da resistência à degradação química como da resistência mecânica, proporcionando uma protecção acrescida da interface restauradora face às agressões do meio oral (Berwanger et al., 2016).

A investigação nesta área continua a progredir, favorecendo o desenvolvimento de sistemas adesivos tecnologicamente mais avançados e protocolos clínicos mais fiáveis. Estes progressos constituem um contributo valioso para a evolução da medicina dentária restauradora, aproximando-se progressivamente do ideal de restaurações directas com estabilidade funcional e longevidade previsível. O sucesso clínico das restaurações adesivas depende, de forma determinante, da qualidade da interface estabelecida entre o compósito restaurador e os tecidos dentários, com especial enfoque na dentina. A adesão a este substrato revela-se particularmente desafiante, requerendo intervenções cuidadosamente planificadas que assegurem uma ligação duradoura e eficaz. Neste contexto, torna-se imprescindível otimizar as condições da superfície dentinária e ajustar, de forma criteriosa, os protocolos de aplicação dos sistemas adesivos às especificidades do tecido envolvido (Nagasawa, 2022).

#### **2.2.4 Estratégias Para Melhorar a Adesão**

A eficiência da adesão encontra-se fortemente condicionada pela adequação do protocolo utilizado. Assim, o recurso indiscriminado a técnicas simplificadas é desaconselhado, sendo preferível uma abordagem personalizada que considere variáveis como o tipo de material restaurador, a profundidade da cavidade e o estado histológico da dentina. Um dos pontos críticos deste processo reside na gestão da humidade da dentina após o condicionamento ácido total. Uma superfície excessivamente húmida dificulta a penetração dos monómeros adesivos, ao passo que a secagem exagerada pode provocar o colapso das fibrilas de colagénio, inviabilizando a formação eficaz da camada híbrida. Neste contexto, os sistemas adesivos com propriedades reidratantes e elevada capacidade de infiltração na matriz colagénica têm evidenciado desempenhos promissores (Moghaddas et al., 2017).

A preparação ideal da superfície dentinária pressupõe ainda a utilização de primers adequados, a aplicação activa do agente adesivo — através de fricção controlada — e um domínio preciso sobre os níveis de humidade. Estas práticas visam maximizar a formação de uma camada híbrida estável, tanto do ponto de vista mecânico como químico, garantindo uma ligação resistente e duradoura (Manso & Carvalho, 2017).

Adicionalmente, os procedimentos de pré-tratamento da dentina têm demonstrado contribuir significativamente para a melhoria da adesão. Destaca-se, entre eles, o condicionamento ácido seletivo do esmalte, técnica que promove uma desmineralização localizada e controlada, permitindo a exposição eficaz das fibrilas de colagénio e facilitando a difusão dos monómeros na matriz orgânica. A aplicação activa dos sistemas adesivos, por meio de fricção durante a inserção, tem também sido associada a um incremento na força de união. Outra abordagem recomendada consiste na aplicação de camadas adesivas múltiplas, acompanhada de uma evaporação cuidadosa dos solventes. Esta estratégia favorece a infiltração profunda e contínua do adesivo, minimizando falhas estruturais na interface. (Bahari et al., 2021).

Ainda, a incorporação de monómeros funcionais nos sistemas adesivos tem revelado um contributo relevante para o reforço da adesão. Estes compostos são capazes de estabelecer ligações químicas estáveis com a hidroxiapatite remanescente da dentina,

potenciando não apenas a força de adesão, mas também a longevidade da interface (Inglês et al., 2022).

Em síntese, a adoção de estratégias clínicas fundamentadas na compreensão da morfologia da dentina, aliada à seleção apropriada de materiais e à execução rigorosa dos protocolos operatórios, constitui a base para a obtenção de uma adesão eficaz e previsível. Tal abordagem favorece a durabilidade das restaurações adesivas, contribuindo decisivamente para o sucesso a longo prazo dos tratamentos restauradores.

## **2.3 Avanços Tecnológicos e Perspectivas Futuras**

### ***2.3.1 Desenvolvimento de Materiais Restauradores Biomiméticos***

A biomimética configura-se como uma área de investigação multidisciplinar centrada na análise sistemática da estrutura, desenvolvimento e propriedades funcionais de materiais de origem biológica, com o intuito de conceber soluções artificiais que reproduzam, de forma eficaz, os mecanismos encontrados na natureza. Embasada nos princípios fundamentais da biologia, esta abordagem visa o desenvolvimento de tecnologias e materiais capazes de imitar processos naturais, originando sistemas designados como biomiméticos. No âmbito da medicina dentária restauradora moderna, esta filosofia manifesta-se na substituição de tecidos dentários por biomateriais que consigam emular as propriedades biomecânicas dos dentes naturais. Tal estratégia visa não só a recuperação da função mastigatória e da resistência mecânica, como também a preservação da estética, mesmo em contextos de exigência funcional elevada (Attik et al., 2024).

O propósito central da biomimética aplicada à medicina dentária reside na formulação de soluções restauradoras que apresentem características físico-mecânicas equivalentes às da dentina, sendo prioritário garantir compatibilidade entre o módulo de elasticidade e a resistência à fractura. Neste cenário, a aplicação do conceito biomimético foca-se na reabilitação dos tecidos mineralizados — designadamente o esmalte e a dentina — através da criação de uma interface adesiva funcional e eficaz com o substrato dentário. Este tipo de ligação permite uma distribuição fisiológica das cargas mastigatórias,

conferindo ao conjunto restaurador um comportamento biomecânico semelhante ao do dente natural, ao mesmo tempo que assegura a preservação dos tecidos adjacentes e a harmonia estética global (Goswami, 2018; Attik et al., 2024).

No campo da investigação em materiais restauradores, a biomimética tem incentivado avanços significativos, destacando-se o desenvolvimento de resinas compostas dotadas de propriedades autorreparadoras. Estas soluções inovadoras inspiram-se nos mecanismos de regeneração presentes em tecidos biológicos, como os que se verificam na cicatrização óssea. A incorporação de agentes reparadores microencapsulados em matrizes poliméricas tem demonstrado capacidade para restaurar parcialmente as propriedades mecânicas após agressões externas, impedindo simultaneamente a propagação de microfissuras. Tais sistemas reproduzem os mecanismos de autodefesa próprios dos tecidos vivos, fornecendo proteção contra falhas estruturais progressivas (Maas et al., 2017; Kim et al., 2023).

Entre os avanços mais relevantes destaca-se o papel da nanotecnologia, particularmente pela adição de nanopartículas funcionais às composições resinosas. Estas partículas facilitam a libertação controlada de iões cálcio e fosfato, promovendo processos de remineralização tanto do esmalte como da dentina, com efeitos benéficos na regeneração de tecidos afectados por cárie. Além disso, a inclusão de cargas bioactivas nas resinas favorece a formação de apatite quando em contacto com o meio oral, induzindo a oclusão dos túbulos dentinários e contribuindo para a redução da hipersensibilidade dentinária (Nagasawa, 2022; Kim et al., 2023).

Adicionalmente, a libertação sustentada de substâncias com acção antimicrobiana — como fluoreto, clorexidina ou iões metálicos — tem demonstrado eficácia no controlo da microinfiltração bacteriana e na prevenção de cáries secundárias, factores que influenciam directamente a longevidade clínica das restaurações (Manso & Carvalho, 2017).

No plano mecânico, os estudos apontam para uma resistência ao desgaste das resinas bioactivas comparável à das suas congéneres convencionais, sobretudo quando estas integram nanopartículas com propriedades reforçantes. A introdução destas

partículas permite aumentar significativamente a resistência à abrasão, o que viabiliza o uso destes materiais em áreas sujeitas a elevadas cargas oclusais (Nagasawa, 2022).

Contudo, a transposição destes avanços para o contexto clínico exige compatibilidade plena com os sistemas adesivos actualmente disponíveis. Os materiais autorreparadores devem manter a sua eficácia funcional após os procedimentos de polimerização e acabamento, sem comprometer a adesão. Para tal, é necessário alcançar um equilíbrio criterioso entre as propriedades físico-químicas, a estabilidade estrutural e o desempenho clínico. A durabilidade das resinas biomiméticas está directamente relacionada com a eficiência dos seus sistemas de reparação interna, com a sua resistência à degradação hidrolítica e com a qualidade da seleção dos componentes que integram a sua composição (Lee, Kim & Shin, 2021; Kim et al., 2023).

Em síntese, os avanços na investigação de biomateriais restauradores de natureza biomimética representam um progresso substancial na prática da medicina dentária restauradora, oferecendo soluções que se aproximam dos processos naturais de regeneração e demonstram elevado potencial de aplicação clínica num futuro próximo.

### ***2.3.2 Resinas Autoadesivas Flowable***

As resinas compostas autoadesivas de baixa viscosidade, conhecidas como Self-Adhesive Flowable Composites (SAFCs), representam um marco recente no domínio da dentisteria adesiva, surgindo como resposta à procura por materiais que combinem simplificação de procedimentos, eficiência clínica e previsibilidade de resultados. Esta inovação está alinhada com os princípios da medicina dentária minimamente invasiva, ao propor uma abordagem restauradora que simplifica as múltiplas etapas inerentes aos sistemas adesivos convencionais. Concebidas para serem aplicadas directamente sobre a superfície dentinária, as SAFCs eliminam a necessidade de condicionamento ácido prévio, bem como da aplicação de primer ou adesivo, o que resulta numa redução substancial do tempo clínico e numa menor dependência da técnica operatória. A estrutura molecular destas resinas baseia-se em matrizes de metacrilatos clássicos — como o bis-GMA, o UDMA ou o TEGDMA — aos quais são adicionados monómeros ácidos funcionalizados, entre os quais se destacam o 10-metacrilóilóxi-decil dihidrogenofosfato (10-MDP), o glicerofosfato dimetacrilato (GPDM) e, em determinadas formulações, o 4-

metacriloxiethyl trimelitate anhydride (4-META), conforme representado na Figura 6 (Delgado et al., 2021; David et al., 2022).

A presença destes monómeros ácidos confere às SAFCs a capacidade de aderirem directamente tanto ao esmalte como à dentina, através de um mecanismo dual que envolve interação química com os iões cálcio da hidroxiapatite e penetração micromecânica superficial, formando uma zona de interpenetração sem a constituição de uma verdadeira camada híbrida. Este processo, designado como adesão-descalcificação, resulta de uma ligeira desmineralização do substrato dentário, promovendo simultaneamente ligações químicas estáveis com os seus componentes minerais. Isto resulta em que os principais benefícios clínicos das SAFCs incluam a simplificação do protocolo, a diminuição da sensibilidade operatória, a menor exigência em termos de controlo da humidade e a rapidez de aplicação. Estas características tornam-nas particularmente úteis em contextos de acesso difícil ou cooperação limitada, como na odontopediatria, em pacientes geriátricos ou com necessidades especiais. Estão indicadas para restaurações directas de Classes I, III e V, selamento de fissuras e como base sob compósitos de maior viscosidade (Delgado et al., 2019).

Contudo, apesar dos seus benefícios práticos, vários estudos destacam limitações relevantes particularmente ao desempenho mecânico e adesivo destas resinas, sobretudo quando comparadas com compósitos convencionais aplicados em conjunto com sistemas adesivos em múltiplas fases. Segundo uma revisão sistemática e meta-análise conduzida por David et al. (2022), a resistência de união ao esmalte e à dentina das SAFCs é inferior à observada com os protocolos *etch-and-rinse* e *self-etch* tradicionais. Esta limitação decorre, em grande medida, da reduzida capacidade de desmineralização e de penetração dos monómeros ácidos, agravada pela elevada viscosidade que compromete a molhabilidade e a infiltração no substrato.

A eficácia da adesão promovida pelos monómeros funcionais depende significativamente da sua concentração, do pH da formulação e da composição global da matriz resinosa. Estudos *in vitro* demonstram que concentrações entre 5 % e 10 % de 10-MDP favorecem uma conversão polimérica eficiente e uma resistência flexural adequada; no entanto, concentrações superiores tendem a comprometer o módulo de elasticidade e a uniformidade estrutural, originando fragilidades na matriz. Por outro lado, a adição de

partículas bioativas, como o fosfato monocalcário e a polilisina, tem demonstrado conferir propriedades antimicrobianas e remineralizantes às SAFCs, reforçando a estabilidade da interface resina-dentina. No entanto, por não serem funcionalizadas, estas partículas apresentam uma capacidade de ligação limitada ao polímero. A inclusão dos monómeros tem-se revelado útil como agentes de união, a resultar em uma melhora da integração entre partículas hidrofílicas e a matriz orgânica e, conseqüentemente, a coesão do material (Delgado et al., 2021).

Ainda assim, importa salientar que a longevidade clínica das SAFCs continua a ser inferior à dos compósitos convencionais, sobretudo em cavidades de grande extensão ou elevada complexidade, nas quais a retenção depende fortemente da macrogeometria cavitária (Cieplik et al., 2022).

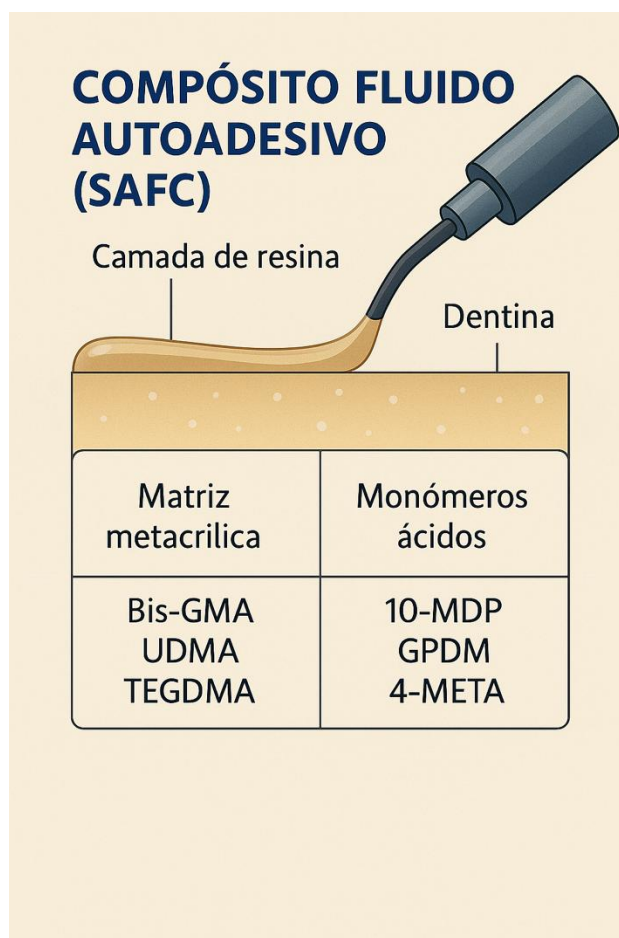
Com o intuito de ultrapassar as limitações identificadas nas resinas compostas autoadesivas do tipo *flowable*, têm sido desenvolvidas diversas estratégias de otimização, centradas em aspectos fundamentais da sua composição e comportamento clínico. Entre as propostas mais relevantes encontram-se o ajuste rigoroso da proporção dos monómeros ácidos funcionais, a reformulação da viscosidade da matriz orgânica para melhorar a molhabilidade, o aperfeiçoamento dos sistemas fotoiniciadores para potenciar a conversão polimérica, bem como a integração de partículas bioativas funcionalizadas, que visam reforçar a adesão e conferir propriedades terapêuticas adicionais ao material. Paralelamente, a adoção de uma abordagem clínica seletiva no emprego das SAFCs, limitada a indicações específicas bem definidas, tem sido recomendada como uma estratégia prudente, sustentada na evidência científica disponível até ao momento. Esta postura conservadora permite tirar partido das vantagens operatórias das SAFCs, ao mesmo tempo que se minimizam os riscos associados à sua aplicação indiscriminada em situações de maior complexidade biomecânica (David et al. 2022).

Em síntese, as resinas autoadesivas de baixa viscosidade representam uma evolução tecnológica significativa no campo da dentisteria adesiva, com potencial de aplicação em cenários clínicos particularmente exigentes, onde a simplicidade operatória e a eficiência são factores determinantes. Contudo, a sua eficácia está intrinsecamente dependente de múltiplas variáveis — desde a arquitectura química da formulação até às especificidades do substrato dentário e ao rigor técnico do procedimento clínico. A sua

utilização deverá, por conseguinte, ser criteriosa, ponderando cuidadosamente as características da cavidade preparada, as cargas funcionais previstas e os objectivos terapêuticos delineados para cada caso. O futuro destes materiais passará necessariamente pela continuação da investigação laboratorial e clínica, que permitirá clarificar os seus mecanismos de acção, refinar os seus componentes e consolidar o seu lugar na prática restauradora contemporânea baseada na evidência (Delgado et al., 2021; David et al., 2022).

**Figura 6**

*Representação esquemática da aplicação e composição de compósito fluido autoadesivo.*



Fonte: Imagem gerada por inteligência artificial no ChatGPT (OpenAI, 2025).

## **2.4 Inovações e Tendências Futuras em Resinas Compostas e Adesão Dentinária: Desafios e Oportunidades**

As resinas compostas, associadas aos diversos sistemas adesivos, constituem actualmente o alicerce da medicina dentária restauradora estética, quer em procedimentos directos, quer indirectos. Apesar dos notáveis progressos científicos e tecnológicos alcançados nas últimas décadas, persistem limitações relevantes que condicionam a previsibilidade e a durabilidade clínica das restaurações. Entre os principais constrangimentos destacam-se a degradação progressiva da interface adesiva, a contracção inerente ao processo de polimerização e a resistência reduzida em ambientes orais com elevado grau de complexidade. Neste panorama, a investigação tem evoluído no sentido de desenvolver materiais restauradores que transcendam a função meramente estrutural, incorporando, por exemplo, propriedades bioactivas, inteligentes e adaptativas, ajustadas às necessidades particulares de cada paciente (Nagasawa, 2022).

Uma das áreas de investigação mais promissoras reside na integração desses componentes bioactivos nas matrizes das resinas compostas, conferindo-lhes propriedades terapêuticas complementares. Segundo Xu et al. (2024), a incorporação de agentes como fosfatos de cálcio amorfos, nanopartículas de fluoreto de prata ou compostos à base de zinco tem demonstrado efeitos benéficos, nomeadamente através da libertação controlada de iões com acção remineralizante sobre tecidos dentários desmineralizados e com capacidade de inibição bacteriana. Esta abordagem representa uma mudança de paradigma na terapêutica restauradora, ao introduzir o conceito de materiais “activos”, que não apenas restauram a estrutura perdida, mas contribuem directamente para a manutenção da saúde oral. Em paralelo, os sistemas adesivos têm sido alvo de modificações estruturais significativas com vista à melhoria da sua estabilidade química e resistência à acção hidrolítica. O desenvolvimento de novos monómeros, com maior resistência à degradação e afinidade pela hidroxiapatite, tem permitido o estabelecimento de ligações químicas mais duradouras, minimizando a acção de enzimas proteolíticas endógenas. Estes avanços são particularmente relevantes em substratos dentários comprometidos, como ocorre em dentes com esclerose dentinária ou já sujeitos a tratamentos restauradores prévios, contribuindo para a maior longevidade das intervenções clínicas (Kim et al., 2023).

Outro domínio emergente é o dos materiais restauradores com capacidades autorreparadoras. Estas formulações visam regenerar microdefeitos estruturais antes da sua progressão para falhas clínicas significativas. De acordo com Minjia et al. (2022), resinas experimentais contendo microcápsulas com monómeros activáveis ou sistemas de regeneração baseados em reacções redox têm evidenciado desempenho promissor em testes laboratoriais. A sua futura aplicação clínica poderá representar uma estratégia eficaz para reduzir a necessidade de substituições precoces, fomentando uma prática restauradora mais sustentável e duradoura.

Todavia, apesar do entusiasmo gerado em torno destas inovações, persistem obstáculos significativos à sua implementação generalizada. He et al. (2022) alertam que muitos destes materiais permanecem em fases experimentais ou de ensaios pré-clínicos, carecendo de validação rigorosa através de estudos clínicos longitudinais. Acrescem ainda dificuldades práticas relacionadas com os custos de produção, a compatibilidade com os equipamentos clínicos actualmente disponíveis e a necessidade de formação específica para a sua aplicação correcta. Por conseguinte, a adoção destas tecnologias deverá ocorrer de forma gradual, sustentada por uma base científica sólida e devidamente comprovada.

Por fim, o desenvolvimento contínuo de resinas compostas com propriedades físicas e mecânicas equilibradas permanece uma prioridade na investigação. A introdução de tecnologias inovadoras, como cargas reactivas e sistemas iniciadores mais eficientes, tem como objectivo melhorar a resistência do material, reduzir o tempo clínico necessário e aumentar a previsibilidade dos resultados terapêuticos. Estas inovações reforçam o papel das resinas compostas como elementos indispensáveis na prática da medicina dentária contemporânea, capazes de responder eficazmente aos desafios clínicos com soluções cada vez mais evoluídas, funcionais e biologicamente integradas (Zhou et al., 2019)





### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão de literatura permitiu reunir e analisar criticamente o conhecimento actual relativo às resinas compostas e à adesão à dentina, dois pilares fundamentais da medicina dentária restauradora contemporânea. A evolução das resinas compostas ao longo das últimas décadas foi notável, marcada por melhorias significativas na sua composição química, desempenho mecânico e propriedades estéticas, que permitiram uma prática clínica cada vez mais conservadora, funcional e previsível.

A adesão à dentina, contudo, continua a constituir um dos maiores desafios técnicos na reabilitação directa, em virtude das características estruturais e bioquímicas complexas deste tecido. A formação de uma interface adesiva estável e duradoura depende de múltiplos factores, desde a selecção adequada do sistema adesivo e do protocolo operatório até ao controlo rigoroso da humidade dentinária e da polimerização. Os mecanismos de degradação da camada híbrida — sejam eles hidrolíticos, enzimáticos ou mecânicos — continuam a comprometer a longevidade das restaurações, exigindo estratégias inovadoras e abordagens integradas.

Neste contexto, destaca-se a constante renovação de materiais e técnicas, como a introdução de adesivos hidrofóbicos, a incorporação de inibidores de MMPs e o desenvolvimento de resinas compostas com propriedades físicas e químicas cada vez mais ajustadas ao ambiente oral. As inovações recentes incluem ainda materiais bioactivos e compostos autorreparadores, que procuram aliar desempenho funcional à capacidade de interagir com os tecidos dentários de forma mais biocompatível e inteligente.

Entre as tendências emergentes, observam-se propostas de simplificação dos protocolos restauradores, como no caso das resinas autoadesivas de baixa viscosidade, que, embora ainda em fase de validação clínica alargada, reflectem uma mudança de paradigma na forma como se projeta e executa a adesão em medicina dentária restauradora.

Conclui-se, assim, que apesar dos avanços significativos no desenvolvimento de materiais restauradores e sistemas adesivos, o sucesso clínico continua fortemente

dependente de uma actuação criteriosa, baseada na evidência científica e na compreensão aprofundada da biologia do substrato dentário. A selecção individualizada dos materiais, aliada à formação contínua dos profissionais, revela-se essencial para maximizar os resultados terapêuticos e garantir restaurações mais duráveis, seguras e adaptadas às exigências da prática contemporânea.

Neste percurso de evolução, a integração entre tecnologia, conhecimento e rigor clínico continuará a ser o alicerce sobre o qual se construirão as soluções restauradoras do futuro.

## REFERÊNCIAS

- Abed, H. (2023). Dental considerations for head and neck cancer: A clinical review. *The Saudi Dental Journal*, 35(5), 476-486. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2023.05.009>
- Alex, G. (2015). Universal adhesives: The next evolution in adhesive dentistry *Compendium of Continuing Education in dentistry*, 36(1), 15-26. PMID: 25822403.
- Alghauli, M. A., Alqutaibi, A. Y., Wille, S., & Kern, M. (2023). Clinical reliability of self-adhesive luting resins compared to other adhesive procedures: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*, 129, 104394. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104394>
- Alomran, W. K., Nizami, M. Z. I., Xu, H. H. K., & Sun, J. (2025). Evolution of dental resin adhesives—A comprehensive review. *Journal of Functional Biomaterials*, 16(3), 104. <https://doi.org/10.3390/jfb16030104>
- Alzraikat, H., Burrow, M. F., Maghaireh, G. A., & Taha, N. A. (2018). Nanofilled resin composite properties and clinical performance: A review. *Operative Dentistry*, 43(4), E173-E190. <https://doi.org/10.2341/17-208-T>
- Andrade, K. M., Palialol, A. R., Lancellotti, A. C., Aguiar, F. H., Watts, D. C., Gonçalves, L. S., et al. (2016). Effect of diphenyliodonium hexafluorophosphate on resin cements containing different concentrations of ethyl 4-dimethylamino) benzoate and 2-(dimethylamino)ethylmethacrylate as co-initiators. *Dental Materials*, 32(6), 749-755. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.03.012>
- Attik, N., Richert, R., & Garoushi, S. (2024). Biomechanics, bioactive and biomimetic philosophy in restorative dentistry – Quo vadis? *Journal of Dentistry*, 148, 105036. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105036>
- Bahari, M., Oskoe, S. S., Chaharom, M. E. E., Kahnamoui, M. A., Gholizadeh, S., & Davoodi, F. (2021). Effect of accelerated aging and double application on the dentin bond strength of universal adhesive system. *Dental Research Journal*, 18, 25.
- Batihahim, C. N., & Ratnasari, D. (2021). The effect of polishing techniques on color change of nanofill composite resin immersed in green tea (*camellia sinensis*). *Journal of Indonesian Dental Association*, 4(1), 21-27. <https://doi.org/10.32793/jida.v4i1.687>
- Berwanger, C., et al. (2016). Diastema closure with direct composite restorations - a case report. *Revista da Associação Paulista de Cirurgiões Dentistas*, 70(3), 317-322. <https://doi.org/10.30973/revapo.v70i3.1021>
- Betancourt, D. E., Baldion, P. A., & Castellanos, J. E. (2019). Resin-dentin bonding interface: Mechanisms of degradation and strategies for stabilization of the hybrid layer. *International Journal of Biomaterials*, 2019, Article 5268342. <https://doi.org/10.1155/2019/5268342>

Buonocore, M. G. (1955). A Simple Method of Increasing the Adhesion of Acrylic Filling Materials to Enamel Surfaces. *Journal of Dental Research*, 34(6), 849–853. <https://doi.org/10.1177/00220345550340060801>

Cadenaro, M., et al. (2019). The role of polymerization in adhesive dentistry. *Dental Materials*, 35(1), e21-e22. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.11.001>

Cieplik, F., Scholz, K. J., Anthony, J. C., Tabenski, I., Ettenberger, S., Hiller, K. A., Buchalla, W., & Federlin, M. (2022). One-year results of a novel self-adhesive bulk-fill restorative and a conventional bulk-fill composite in class II cavities: A randomized clinical split-mouth study. *Clinical Oral Investigations*, 26(1), 449–461. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04019-y>

Delgado, A. H. S., Owji, N., Ashley, P., & Young, A. M. (2021). Varying 10-methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate (10-MDP) level improves polymerisation kinetics and flexural strength in self-adhesive, remineralising composites. *Dental Materials*, 37(9), 1366-1376. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.06.006>

Delgado, A. H. S., Almuusa, A., Eshmawi, Y., Xia, W., Ashley, P., & Young, A. M. (2019). Novel self-bonding composites: Resin-dentin interfacial chemistry. *Annals of Medicine*, 51(sup1), 97. <https://doi.org/10.1080/07853890.2018.1562698>

Demarco, F. F., Cenci, M. S., Montagner, A. F., et al. (2023). Longevity of composite restorations is definitely not only about materials. *Dental Materials*, 39, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.11.001>

Fonseca, J. M., et al. (2020). The impact of head and neck radiotherapy on the dentine-enamel junction: A systematic review. *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal*, 25(1), e96-e105. <https://doi.org/10.4317/medoral.23212>

Goswami, S. (2018). Biomimetic dentistry. *Journal of Oral Research and Review*, 10(1), 28. [https://doi.org/10.4103/jorr.jorr\\_3\\_17](https://doi.org/10.4103/jorr.jorr_3_17)

Inglês, M., et al. (2022). Comparative assessment of different pre-treatment bonding strategies to improve the adhesion of self-adhesive composites to dentin. *Polymers*, 14(19), 3945. <https://doi.org/10.3390/polym14193945>

Kim, S., Hwangbo, H., Chae, S., & Lee, H. (2023). Biopolymers and their application in bioprinting processes for dental tissue engineering. *Pharmaceutics*, 15(8), 2118. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15082118>

Lee, Y., Kim, J., & Shin, Y. (2021). Push-out bond strength evaluation of fiber-reinforced composite resin post cemented with self-adhesive resin cement using different adhesive bonding systems. *Materials*, 14(13), 3639. <https://doi.org/10.3390/ma14133639>

Liu, J.-F., Yang, C.-C., Luo, J.-L., Liu, Y.-C., Yan, M., & Ding, S.-J. (2022). Bond strength of self-adhesive resin cements to a high transparency zirconia crown and dentin. *Journal of Dental Sciences*, 17(2), 973–983. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2021.12.008>

- Liu, W., et al. (2018). Phosphoric and carboxylic methacrylate esters as bonding agents in self-adhesive resin cements. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 15(5), 4531-4537. <https://doi.org/10.3892/etm.2018.5951>
- Liu, X., Zhang, R., Yu, X., Hua, F., Zhang, L., & Chen, Z. (2023). Self-adhesive flowable composite resins and flowable composite resins in permanent teeth with occlusal cavities: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*, 138, 104691. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104691>
- Luka, B., et al. (2024). Preventing caries after radiotherapy to the head and neck region: A systematic review. *The Journal of Evidence-Based Dental Practice*, 24(3), 101989. <https://doi.org/10.1016/j.jebdp.2024.101989>
- Maas, M. S., Alania, Y., Natale, L. C., Rodrigues, M. C., Watts, D. C., & Braga, R. R. (2017). Trends in restorative composite research: What is the future? *Brazilian Oral Research*, 31(Suppl), e55. <https://doi.org/10.1590/1807-3107BOR-2017>
- Manso, A. P., & Carvalho, R. M. (2017). Dental cements for luting and bonding restorations: Self-adhesive resin cements. *Dental Clinics of North America*, 61(4), 821-834. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2017.06.006>
- Mei, M. L., Chen, Y. M., Li, H., & Chu, C. H. (2016). Influence of the indirect restoration design on the fracture resistance: A finite element study. *Biomedical Engineering Online*, 15(1), Article 3. <https://doi.org/10.1186/s12938-015-0115-4>
- Miranda, R. R., et al. (2021). Effects of fractionation and ionizing radiation dose on the chemical composition and microhardness of enamel. *Archives of Oral Biology*, 121, 104959. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2020.104959>
- Moghaddas, M. J., et al. (2017). Comparison of the shear bond strength of self-adhesive resin cements to enamel and dentin with different protocol of application. *Electronic Physician*, 9(8), 4985-4991. <https://doi.org/10.19082/4985>
- Monteiro, A. A., Salgado, V. E., Vitti, R. P., Bertolo, M. V. L., Cavalcante, L. M., & Schneider, L. F. J. (2018). Effect of adhesive-monomers and photoinitiator on C=C conversion and color stability of model self-adhesive flowable composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 87, 119-123. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.09.010>
- Muñoz, M. A., et al. (2015). In vitro longevity of bonding properties of universal adhesives to dentin. *Operative Dentistry*, 40(3), 282-292. <https://doi.org/10.2341/14-055-L>
- Münchow, E. A., & Bottino, M. C. (2017). Recent advances in adhesive bonding: The role of biomolecules, nanocompounds, and bonding strategies in enhancing resin bonding to dental substrates. *Current Oral Health Reports*, 4(3), 215-227. <https://doi.org/10.1007/s40496-017-0146-y>
- Nagasawa, Y., Eda, Y., Shigeta, H., Ferrari, M., Nakajima, H., & Hibino, Y. (2022). Effect of sandblasting and/or priming treatment on the shear bond strength of self-

adhesive resin cement to CAD/CAM blocks. *Odontology*, 110(1), 70–80. <https://doi.org/10.1007/s10266-021-00635-y>

Ojeda, G. D., Gutiérrez, I. H., Tisi, J. P., & Rosales, A. B. (2020). A novel technique for bulk-fill resin-based restorations: Achieving function and esthetics in posterior teeth. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 32(5), 450–461. <https://doi.org/10.1111/jerd.12589>

OpenAI. (2025). Demonstração da composição do esmalte e dentina [Imagem gerada por inteligência artificial]. ChatGPT. <https://chat.openai.com/>

OpenAI. (2025). Representação esquemática da composição e aplicação clínica de compósito fluído autoadesivo (SAFC) [Imagem gerada por inteligência artificial]. ChatGPT. <https://chat.openai.com/>

OpenAI. (2025). Smear layer e formação da camada híbrida [Imagem gerada por inteligência artificial]. ChatGPT. <https://chat.openai.com/>

Perdigão, J. (2020). Current perspectives on dental adhesion: (1) Dentin adhesion – not there yet. *Japanese Dental Science Review*, 56(1), 190–207. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2020.08.004>

Perdigão, J., Araujo, E., Ramos, R. Q., Gomes, G., & Pizzolotto, L. (2021). Adhesive dentistry: Current concepts and clinical considerations. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 33(1), 51–68. <https://doi.org/10.1111/jerd.12692>

Peumans, M., Kanumilli, P., De Munck, J., Van Landuyt, K., Lambrechts, P., & Van Meerbeek, B. (2005). Clinical effectiveness of contemporary adhesives: A systematic review of current clinical trials. *Dental Materials*, 21(9), 864–881. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.02.003>

Robo, I. (2023). Application of chlorhexidine and its effect on hybrid layers: A review of the literature. *Yemen Journal of Medicine*, 2(2), 81–86. <https://doi.org/10.32677/yjm.v2i2.3798>

Rodrigues, B. B., et al. (2021). Bulk fill resin composite properties: A literature review. *Research, Society and Development*, 10(13), e136101320852. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i13.20852>

Rodrigues, R. B., Lima, E., Roscoe, M. G., Soares, C. J., Cesar, P. F., & Novais, V. R. (2017). Influence of resin cements on color stability of different ceramic systems. *Brazilian Dental Journal*, 28(2), 191–195. <https://doi.org/10.1590/0103-644020170>

Saikaew, P., Sattabanasuk, V., Harnirattisai, C., Chowdhury, A. F. M. A., Carvalho, R., & Sano, H. (2022). Role of the smear layer in adhesive dentistry and the clinical applications to improve bonding performance. *Japanese Dental Science Review*, 58, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2021.12.001>

- Sato, T., et al. (2016). Morphological evaluation of the adhesive/enamel interfaces of two-step self-etching adhesives and multimode one-bottle self-etching adhesives. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 18(3), 223-229. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a36123>
- Singh, P., Raghavender, V., Joshi, S., Vasant, N. P., Awasthi, A., Nagpal, A., & Abd al-Saheb, A. J. (2023). Composite material: A review over current development and automotive application. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.012>
- Steiner, R., Schwarz, V., Schnabl, D., Edelhoff, D., & Stawarczyk, B. (2021). Effect of adhesive systems, direct resin composites and artificial aging on tensile bond strength between different resin composites and human dentin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 108, 102888. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102888>
- Suzuki, T., et al. (2016). Influence of etching mode on enamel bond durability of universal adhesive systems. *Operative Dentistry*, 41(5), 520-530. <https://doi.org/10.2341/15-347-L>
- Van Meerbeek, B., Yoshihara, K., Van Landuyt, K., Yoshida, Y., & Peumans, M. (2020). From Buonocore's pioneering acid-etch technique to self-adhering restoratives: A status perspective of rapidly advancing dental adhesive technology. *Journal of Adhesive Dentistry*, 22(1), 7-34. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a43994>
- Velo, M., Coelho, L., Basting, R., Amaral, F., & França, F. M. G. (2016). Longevity of restorations in direct composite resin: Literature review. *RGO - Revista Gaúcha de Odontologia*, 64, 320–326. <https://doi.org/10.1590/1981-8637201600030000123109>
- Xu, H., Zhang, Y., Zhang, Y., Zhao, Z., Xue, T., Wang, J., ... & Ding, Y. (2024). 3D bioprinting advanced biomaterials for craniofacial and dental tissue engineering—A review. *Materials & Design*, 242, 112886. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112886>
- Zheng, S., Chen, H., Lin, Q., & Zhu, S. (2024). Effect of dentin conditioners on dentin bond strength: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 132(3), 509.e1-509.e11. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.05.038>
- Zhou, X., Huang, X., Li, M., Peng, X., Wang, S., Zhou, X., & Cheng, L. (2019). Development and status of resin composite as dental restorative materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(35), 48180. <https://doi.org/10.1002/app.48180>