



UNIVERSIDADE
FERNANDO
PESSOA

O IMPACTO DA FOTOPOLIMERIZAÇÃO NA MICROINFILTRAÇÃO DE RESTAURAÇÕES EM COMPÓSITO: REVISÃO INTEGRATIVA

[The impact of light curing on microleakage of composite restorations: an integrative review]

Dissertação de Mestrado

[Mestrado Integrado em Medicina Dentária]

Maxime Ange Antoine Graffeo

Orientadora:

Doutora Liliana Alexandra Pascoal Teixeira

Julho 2025

**O IMPACTO DA FOTOPOLIMERIZAÇÃO NA
MICROINFILTRAÇÃO DE RESTAURAÇÕES EM COMPÓSITO:
REVISÃO INTEGRATIVA**

[The impact of light curing on microleakage of composite restorations: an integrative review]

Dissertação de Mestrado

[Mestrado Integrado em Medicina Dentária]

Maxime Ange Antoine Graffeo

Orientadora:

Doutora Liliana Alexandra Pascoal Teixeira

Julho 2025

À ma mère, Michèle Jourdan épouse Graffeo, décédée le 17 décembre 2021, en pleine traversée de mon parcours universitaire. Son départ fut le bouleversement le plus profond de ma vie. Pourtant, malgré l'absence, j'ai poursuivi ce chemin avec la conviction qu'elle m'aurait encouragé à ne jamais renoncer. Cette réussite n'est pas seulement la mienne : elle est la nôtre. Trois années ont passé, mais ton regard et ton soutien silencieux ne m'ont jamais quitté. Avec tout mon amour, Ton fils, Maxime

AGRADECIMENTOS

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement ma professeure Liliana Teixeira, pour son accompagnement tout au long de cette thèse. Dès la 4^e année, lorsque je l'ai eue en clinique, j'ai été marqué par sa pédagogie, sa douceur et son professionnalisme. C'est avec une vraie conviction que j'ai souhaité l'avoir comme encadrante de thèse, et je la remercie du fond du cœur d'avoir accepté. Merci pour ses conseils, ses idées, sa disponibilité et sa patience à toutes les étapes de ce travail. Ce fut un vrai plaisir de pouvoir compter sur une professeure aussi humaine et investie.

Je remercie également l'ensemble des professeurs de la faculté, pour leur bienveillance et leur humanité. J'ai toujours eu la chance d'évoluer dans un cadre où l'humour, la proximité et la confiance pouvaient s'exprimer librement, parfois bien au-delà du simple lien professeur-étudiant. Cela m'a beaucoup aidé à me sentir à l'aise et à rester moi-même dans mon parcours.

Je souhaite maintenant remercier celles et ceux qui m'ont accompagné au quotidien, et sans qui ces années à Porto n'auraient jamais eu la même saveur.

Un merci immense aux "Triplets" mes trois piliers, mes repères, mes frères de cœur rencontrés dès le premier jour au Portugal, et qui ne m'ont plus jamais quitté depuis.

À Alexandre Battestini, la première personne avec qui j'ai accroché. Mon tout premier ami ici. Merci pour ta bienveillance, ta patience, ta générosité. Je souhaite à tout le monde d'avoir un Alex dans sa vie.

À Léo Loumy, mon binôme de rigolade. Merci d'avoir toujours été fidèle à toi-même, d'avoir été présent dans les meilleurs comme dans les pires moments. Merci pour ton côté protecteur, ta bienveillance, et pour avoir toujours été cette oreille rassurante dont j'avais besoin.

À Mathieu Manceron, mon duo, mon pilier, mon meilleur ami. Merci à la vie de t'avoir mis sur mon chemin. Cette rencontre n'a rien d'un hasard. Tu as été à la fois un grand frère et un petit frère pour moi. Merci de m'avoir aidé à me construire, à grandir, à mûrir. Ce lien, je le sais, durera toute une vie.

Merci aussi à Maeva Cholet, ma coloc pendant cinq ans à Porto. Merci d'avoir supporté mes humeurs, de m'avoir fait rire tous les soirs jusqu'à en pleurer, et pour tous les bons

plats que tu m'as cuisinés

Merci à Carla Urbano, ma binôme de clinique et ma meilleure amie. Une femme incroyable, que j'aime profondément. Je n'aurais jamais pu rêver meilleure partenaire. Tu m'as toujours soutenu, dans tout ce que j'entreprenais, et j'ai en toi une confiance totale.

Enfin, un mot pour Sophie Talmont, mon coup de foudre amical de ces six années. Le feeling a été immédiat, et réciproque. Depuis le premier jour, on ne s'est plus jamais quittés. Merci pour ta douceur, ta sagesse, ton amour et tous les moments que nous avons partagés.

Une mention très spéciale à mon père, Pierre Graffeo, la personne la plus importante de ma vie, à qui je dois absolument tout. Merci d'avoir toujours été là, à mes côtés, dans chaque étape, chaque décision, chaque difficulté. Grâce à toi, je n'ai jamais manqué de rien. Merci pour ta générosité, ton soutien, ta patience, ton amour inconditionnel. Merci de m'avoir choyé, porté, rassuré. Tu es, et tu resteras, l'amour de ma vie.

Merci à ma sœur Amandine, la grande sœur parfaite, toujours présente, toujours prête à mener les combats avec moi. Merci d'avoir pris ce rôle de maman dès que la vie l'a exigé, merci de me tirer vers le haut, de me pousser à devenir meilleur jour après jour. Je sais que c'est une chance immense de t'avoir dans ma vie, et d'avoir un lien aussi fort avec toi. Merci aussi pour Victoria et Antoine, ces deux petits êtres merveilleux que tu m'as donnés et pour qui je donnerais tout, je vous aime.

Merci à tous les autres membres de ma famille, ainsi qu'à mes amis proches ou plus lointains, qui ont participé à leur manière à mon équilibre et à mon bien-être. Vous avez tous eu un rôle à jouer, et je n'ai jamais cessé de me sentir entouré et soutenu.

Un dernier mot aussi pour ma turma, la turma 1. Faire la clinique avec vous tous a été une chance. Merci pour cette ambiance, cette complicité, cette entraide, et pour tous les souvenirs partagés. On a été la meilleure turma, et je vous garde tous dans mon cœur.

RESUMO

A microinfiltração marginal continua a ser uma das principais causas de falha em restaurações de resina composta, afetando a sua longevidade clínica. Dada a crescente diversidade de materiais restauradores e a constante evolução dos protocolos de fotopolimerização, torna-se essencial compreender como essas variáveis influenciam a adaptação marginal. A presente revisão integrativa teve como objetivo analisar estudos *in vitro* publicados entre 2014 e 2025 que investigaram a relação entre diferentes protocolos de fotopolimerização e a ocorrência de microinfiltração em restaurações com resina composta. A pesquisa foi conduzida em bases de dados PubMed, PMC, ScienceDirect, resultando na seleção de sete estudos que atenderam aos critérios de inclusão. Os protocolos analisados incluíram variações de intensidade e tempo de luz, tipo de unidade de fotopolimerização (LED vs QTH), modos de ativação (contínuo, soft-start, pulse-delay), estratégias como o pré-aquecimento da resina e o uso de compósitos com tecnologia RAFT (*Reversible Addition-Fragmentation Chain Transfer*). Os resultados indicaram que os dispositivos LED de alta intensidade demonstraram desempenho superior em relação às unidades halógenas convencionais, proporcionando menor infiltração marginal. Além disso, o pré-aquecimento da resina composta revelou-se uma estratégia eficaz para reduzir a microinfiltração, melhorando a adaptação marginal por meio da redução da viscosidade do material. Materiais restauradores de última geração, como os ormocers e as resinas bioativas, apresentaram melhor desempenho marginal quando comparados aos compósitos convencionais. Os compósitos com tecnologia RAFT, fotopolimerizados por apenas três segundos com irradiância elevada, também mostraram resultados promissores, sugerindo que é possível obter selamento eficaz com tempos reduzidos, desde que a composição do material seja otimizada.

Todos os estudos incluídos foram conduzidos em ambiente laboratorial, o que limita a extrapolação dos resultados para o contexto clínico real, devido à ausência de fatores como umidade, variações térmicas, forças mastigatórias e envelhecimento biológico. A heterogeneidade nos métodos de avaliação da microinfiltração, bem como o uso de amostras reduzidas e a ausência de simulações clínicas mais realistas, representam limitações metodológicas importantes. Apesar disso, os achados desta revisão fornecem uma base relevante para orientar decisões clínicas mais informadas e sustentadas por evidências.

Conclui-se que a escolha adequada do protocolo de fotopolimerização, associada a materiais restauradores modernos e estratégias complementares como o pré-aquecimento, pode contribuir significativamente para a redução da microinfiltração marginal. Recomenda-se que futuras pesquisas incluam estudos clínicos controlados e de longo prazo, com padronização metodológica rigorosa, a fim de validar os achados laboratoriais e fortalecer as recomendações para a prática clínica.

Palavras-chave: resina composta, fotopolimerização, microinfiltração, LED, pré-aquecimento, RAFT

ABSTRACT

Marginal microleakage remains one of the leading causes of failure in composite restorations, compromising their clinical longevity. Given the increasing diversity of restorative materials and the continuous evolution of light-curing protocols, it is essential to understand how these variables influence marginal adaptation. This integrative review aimed to analyze *in vitro* studies published between 2014 and 2025 that investigated the relationship between different light-curing protocols and the occurrence of microleakage in composite restorations. A systematic search was performed in PubMed, PMC, and ScienceDirect databases, resulting in the selection of seven studies that met the predefined inclusion criteria. The protocols analyzed included variations in light intensity and exposure time, types of light-curing units (LED vs. QTH), curing modes (continuous, soft-start, pulse-delay), as well as strategies such as preheating of the resin and the use of composites incorporating RAFT (Reversible Addition–Fragmentation Chain Transfer) technology.

The results indicated that high-intensity LED devices demonstrated superior performance compared to conventional halogen units, resulting in lower marginal microleakage. Furthermore, preheating of composite resin emerged as an effective strategy to reduce microleakage by improving marginal adaptation through viscosity reduction. Next-generation restorative materials, such as ormocers and bioactive resins, also exhibited improved marginal sealing performance compared to conventional methacrylate-based composites. RAFT-modified bulk-fill composites, light-cured in only three seconds under high irradiance, yielded promising results, suggesting that effective marginal sealing can be achieved with reduced curing times, provided that the material composition is optimized.

However, all included studies were conducted under controlled laboratory conditions, which limits the extrapolation of results to the clinical setting, where variables such as moisture, thermal fluctuations, masticatory forces, and biological aging are present. The heterogeneity in microleakage assessment methods, small sample sizes, and lack of realistic clinical simulation were identified as key methodological limitations. Despite these constraints, the findings of this review provide valuable evidence to guide more informed, evidence-based clinical decision-making.

It is concluded that the appropriate selection of light-curing protocols, combined with modern restorative materials and adjunctive techniques such as preheating, can significantly contribute to minimizing marginal microleakage. Future studies are recommended to include long-term, controlled clinical trials with rigorous methodological standardization to validate laboratory findings and strengthen clinical recommendations.

Keywords: composite resin, photopolymerization, microleakage, LED, preheating, RAFT

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Fundamentos e protocolos da fotopolimerização	1
1.2. Objetivos da revisão integrativa	3
2. METODOLOGIA.....	7
2.1. Tipo de revisão e protocolo seguido.....	7
2.2. Critérios de inclusão e exclusão	7
2.3. Estratégia de busca	8
2.4. Seleção dos estudos	8
2.5. Extração e síntese dos dados	8
2.6. Avaliação metodológica e risco de viés	8
3. RESULTADOS	11
4 DISCUSSÃO	15
4.1. Comparação dos protocolos de fotopolimerização.....	15
4.1.1. López-Torres et al. (2023).....	15
4.1.2. Ranjini et al. (2024).....	15
4.1.3. Zakavi et al. (2014).....	16
4.2. Efeitos do pré-aquecimento	16
4.2.1. Soliman (2016).....	16
4.3. Impacto dos diferentes tipos de resina.....	17
4.3.1. Şenol et al. (2023).....	17
4.3.2. Martínez-Sabio et al. (2023).....	17
4.3.3. Frank et al. (2023)	18
4.3.4. Comparação entre ormocer e resina bioativa	18
4.3.5. Estratégias emergentes: polimerização RAFT versus pré-aquecimento	19

4.4. Considerações metodológicas, limitações e implicações clínicas	19
4.5. Análise crítica dos estudos incluídos.....	22
4.5.1. Análise crítica – López-Torres et al. (2023).....	22
4.5.2. Análise crítica – Ranjini et al. (2024).....	23
4.5.3. Análise crítica – Zakavi et al. (2014)	23
4.5.4. Análise crítica – Soliman (2016).....	24
4.5.5. Análise crítica – Şenol et al. (2023)	24
4.5.6. Análise crítica – Martínez-Sabio et al. (2023).....	25
4.5.7. Análise crítica – Frank et al. (2023)	25
5. CONCLUSÃO.....	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fluxograma PRISMA da seleção dos estudos incluídos nesta revisão integrativa.....	9
--------------------------------------------------------------------------------------------	---

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Características metodológicas dos estudos in vitro incluídos na revisão	12
Tabela 2 Principais resultados relacionados à microinfiltração segundo os diferentes protocolos de fotopolimerização	14

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

°C	Grau Celsius
JB	Instituto Joanna Briggs (do inglês Joanna Briggs Institute)
LCUs	Unidades de Fotopolimerização
LED	Diodo Emissor de Luz (do inglês Light Emiting Diode)
MEV	Microscopia Eletrónica de Varredura
MOD	Mesial, Oclusal e Distal
mW/cm²	MiliWatt por Centimetro Quadrado
n	Número
PRISMA	Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises
QTH	Luz Halógena Convencional
RAFT	Transferência por Adição-Fragmentação Reversível
s	Segundo
SDR	Resina Redutora de Tensão
TM	Marca Registada
vs	<i>Versus</i>

1. INTRODUÇÃO

A evolução dos materiais restauradores e das tecnologias de fotopolimerização nas últimas décadas tem permitido avanços significativos na prática clínica da odontologia restauradora. No entanto, persiste uma grande variabilidade nos protocolos utilizados na prática diária, nem sempre suportados em evidências robustas. Questões como o tempo ideal de exposição à luz, o tipo de unidade de fotoativação, a eficácia de estratégias como o pré-aquecimento ou a escolha entre compósitos *bulk-fill*, bioativos e *ormocers* continuam a gerar dúvidas entre profissionais e investigadores. Nesse cenário, torna-se essencial sistematizar o conhecimento disponível para orientar condutas clínicas baseadas em evidência, especialmente no que diz respeito à microinfiltração — um dos principais fatores de falha restauradora. A escolha adequada de protocolos pode ter um impacto direto na longevidade do tratamento, na integridade marginal e na prevenção de complicações como cárie secundária ou sensibilidade pós-operatória (Nedeljkovic et al., 2020).

A longevidade e o sucesso clínico das restaurações em resina composta são determinados por uma série de fatores inter-relacionados, que incluem as características físico-químicas do material, até às técnicas utilizadas durante o procedimento restaurador. Entre estes, a fotopolimerização destaca-se como um processo determinante na obtenção de restaurações duráveis, estáveis e esteticamente satisfatórias (Braga et al., 2005).

A microinfiltração é definida como a passagem indesejada de fluídos, iões, bactérias ou outras substâncias através da interface entre o dente e o material restaurador. Este fenómeno pode levar ao desenvolvimento de cáries secundárias, hipersensibilidade pós-operatória, descoloração marginal e até à falha da restauração (Peutzfeldt & Asmussen, 2004). Num cenário clínico, o controlo da infiltração marginal é, portanto, fundamental para preservar a saúde pulpar e garantir a longevidade funcional da restauração (Ferracane, 2005).

1.1. Fundamentos e protocolos da fotopolimerização

O processo de fotopolimerização envolve a ativação de monómeros presentes na matriz da resina composta, através de uma fonte de luz com comprimento de onda apropriado,

promovendo a formação de uma rede tridimensional de polímeros. No entanto, a eficácia desta reação depende de diversos parâmetros técnicos, tais como: o tipo de fotopolimerizador (halógena, LED (*light emitting diode monowave*, LED *polywave*), o tempo de exposição, a intensidade da luz, o modo de ativação (contínuo, *soft-start*, *pulse-delay*), a distância da ponta de luz à superfície restaurada, e até mesmo o grau de translucidez da resina utilizada.

A evolução tecnológica permitiu a substituição progressiva das unidades halógenas convencionais pelas unidades LED, que oferecem maior eficiência energética, menor geração de calor e durabilidade superior. No entanto, as unidades LED também apresentam variações importantes em termos de intensidade de luz e largura espectral, o que afeta diretamente o grau de conversão dos monómeros e, portanto, a qualidade da união entre o compósito e o dente (Şenol et al., 2023). Além disso, estudos recentes mostram que o uso de modos alternativos de fotopolimerização, como o *soft-start* ou o *pulse-delay*, pode reduzir o stress de contração gerado durante a polimerização, contribuindo assim para um melhor selamento marginal (Münchow et al., 2018).

Outro fator que tem tido atenção crescente na literatura é o pré-aquecimento da resina composta antes da inserção e fotopolimerização. Essa prática visa reduzir a viscosidade do material, favorecendo a sua adaptação às paredes cavitárias e potencializando a polimerização, o que pode impactar positivamente na resistência mecânica e no selamento marginal (Soliman, 2016). Ainda dentro deste contexto, o desenvolvimento de materiais restauradores, como os compósitos *bulk-fill*, os *ormocers* e os materiais bioativos, trouxe novas variáveis ao estudo da microinfiltração. Estudos comparativos têm avaliado esses materiais sob diferentes condições de fotopolimerização, sugerindo que a sua performance varia de acordo com a técnica e o protocolo utilizado (Martínez-Sabio et al., 2023).

Adicionalmente, os métodos utilizados para avaliar a microinfiltração nas pesquisas *in vitro* também variam, o que pode influenciar a interpretação e a comparação dos resultados. Entre os métodos mais comuns estão o uso de corantes (como azul de metileno), a penetração de nitrato de prata, os testes com bactérias, análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microtomografia computadorizada. Cada método possui as suas vantagens e limitações, mas todos buscam quantificar a falha de selamento marginal sob diferentes condições experimentais (Zotti et al., 2021).

Embora a maioria dos estudos sobre microinfiltração e fotopolimerização seja de natureza

in vitro, o conhecimento produzido por essas pesquisas é fundamental para ajudar nas decisões clínicas, especialmente no que diz respeito à escolha de protocolos e materiais. A variabilidade observada nos resultados sugere que não existe um protocolo universal ideal, e que cada caso clínico pode exigir uma abordagem individualizada baseada em evidências (Ferracane, 2005).

1.2. Objetivos da revisão integrativa

Tendo em vista a diversidade de fatores envolvidos, a presente revisão integrativa tem como objetivo sintetizar criticamente os dados disponíveis na literatura científica dos últimos 10 anos, investigando como os diferentes protocolos de fotopolimerização influenciam a microinfiltração em restaurações de resina composta. Ao reunir estudos experimentais relevantes, pretende-se oferecer uma base sólida para orientar a prática clínica e identificar lacunas que possam guiar futuras investigações.

Na reação de fotopolimerização de compósitos à base de dimetacrilato, a formação de uma rede polimérica é acompanhada por uma troca de ligações intermoleculares de van der Waals por ligações covalentes mais curtas, provocando contração volumétrica, normalmente na gama de 1,5 a 5% (Ferracane, 2005). Clinicamente, esta alteração dimensional é dificultada pela adaptação do material aderido às paredes da cavidade e, em consequência, a contração manifesta-se como stress. O stress de contração da polimerização constitui uma grande preocupação clínica, pois tem o potencial de desviar a estrutura dentária circundante, o que, por sua vez, pode resultar na movimentação da cúspide e fratura do esmalte (Tantbirojn et al., 2004), ou iniciar microfissuras ou falhas marginais, dependendo do tipo de resina utilizada e do protocolo de fotopolimerização aplicado (Ferracane, 2006). Além disso, quando as forças de contração excedem a resistência de união às paredes da cavidade, desenvolvem-se espaços na interface dente-compósito, levando possivelmente à microinfiltração e, por fim, a sinais e sintomas clínicos que vão desde a descoloração marginal à sensibilidade pós-operatória e cárie secundária (Carvalho et al., 1996; Calheiros et al., 2004; Peutzfeldt & Asmussen, 2004).

A magnitude da tensão de contração depende não só da quantidade de contração volumétrica, mas também da geometria da cavidade e da complacência do substrato de ligação envolvente, bem como do comportamento viscoelástico do material, caracterizado pela sua capacidade de escoamento nas fases iniciais da reação de

polimerização e pelo módulo de elasticidade adquirido durante a polimerização (Davidson & Feilzer, 1997; Braga et al., 2005). Antes da gelificação, a deformação plástica (ou fluxo) do compósito resinoso compensa a maior parte da contração da polimerização pelo rearranjo das cadeias poliméricas em propagação. Este comportamento é responsável pela redução da tensão para níveis muito inferiores aos valores teóricos esperados, que são calculados a partir do módulo de elasticidade e da deformação de contração do material (Ferracane, 2005; Ilie & Hickel, 2020).

Têm sido propostas diversas abordagens clínicas na tentativa de minimizar a tensão de contração, incluindo técnicas de estratificação incremental (Peutzfeldt & Asmussen, 2004), a utilização de revestimentos de baixo módulo como camadas intermédias de absorção de tensão (Calheiros et al., 2004; Braga et al., 2005), e a aplicação de métodos de fotoativação modulada envolvendo baixa irradiância inicial como forma de reduzir a taxa de polimerização (Ferracane, 2005; Münchow et al., 2018).

Em teoria, uma rede polimérica que se desenvolvesse a uma taxa mais lenta permaneceria durante mais tempo na fase pré-gel e, conseqüentemente, mais tempo estaria disponível para a ocorrência de escoamento viscoso, adiando o início do desenvolvimento de tensões e reduzindo a sua magnitude (Davidson & Feilzer, 1997). A polimerização por "soft-start" consiste na aplicação de uma baixa irradiância durante a primeira parte do período de polimerização, antes de passar para uma irradiância mais elevada durante o tempo restante. A polimerização "*pulse delay*" é semelhante ao protocolo de início suave, exceto pela introdução de um período de espera entre a fotopolimerização inicial de baixa irradiância e a subsequente de alta irradiância. Ambas demonstraram diminuir o stress de contração e melhorar a integridade interfacial da restauração quando comparadas com a fotoativação contínua de alta intensidade, sem comprometer as propriedades físicas do material restaurador (Münchow et al., 2018; Ilie et al., 2013).

Por outro lado, a redução do stress proporcionada pela irradiação a uma intensidade inicial reduzida também foi associada a uma redução concomitante do grau de conversão da ligação dupla de carbono (Ilie et al., 2013), o que, por sua vez, pode deteriorar as propriedades mecânicas e a biocompatibilidade da restauração em resina composta (Ilie & Watts, 2020).

As características de polimerização variam consoante a composição do material, o que pode influenciar a eficácia dos protocolos de fotoativação com irradiação modulada (Marović et al., 2015). Um estudo que avaliou a influência de abordagens de

polimerização com baixa irradiância inicial no desenvolvimento de tensões de contração de três materiais fotopolimerizáveis encontrou reduções de tensão entre 19 e 30% quando comparado com a exposição contínua à luz de alta intensidade utilizando densidade de energia semelhante (Münchow et al., 2018).

Para além do controlo da exposição à luz, a dinâmica da reação de polimerização pode também ser controlada por modificações na formulação do compósito resinoso. A incorporação de um modulador de polimerização numa resina de metacrilato à base de uretano de alto peso molecular demonstrou retardar a gelificação (Ilie et al., 2013), aumentando assim a oportunidade de alívio de tensões por fluxo. Investigações sobre o comportamento de contração de sistemas resinosos baseados na tecnologia denominada "resina redutora de tensão" (SDR) revelaram que estes materiais geraram forças de contração significativamente mais baixas do que os compósitos resinosos fluidos e híbridos convencionais quando fotoativados por irradiação contínua de alta intensidade (Ilie et al., 2013; Marović et al., 2015).

A fotopolimerização tem sido objeto de estudo ao longo dos anos, com o objetivo específico de reduzir o tempo de fotoativação das resinas compostas. Uma das abordagens mais recentes consiste no aumento da irradiância das unidades de fotopolimerização (LCUs), permitindo uma polimerização eficaz em apenas 3 segundos, comparável a tempos de exposição tradicionais de 40 a 60 segundos. Em resposta a esta evolução, foram desenvolvidos compósitos restauradores capazes de responder a estas exigências, através de uma nova estratégia de fotopolimerização baseada na reação de transferência por adição-fragmentação reversível (RAFT).

Estes compósitos *bulk-fill*, disponíveis em consistências convencionais e fluidas, incorporam a tecnologia RAFT associada a uma otimização dos fotoiniciadores, da translucidez e do conteúdo de carga, permitindo uma polimerização ultrarrápida com emissão luminosa de 3050 mW/cm² durante apenas 3 segundos. Este comportamento inovador é atribuído à adição do reagente β-alil sulfona, que facilita a formação de cadeias poliméricas mais curtas e homogêneas, promovendo uma polimerização mais uniforme (Ilie & Watts, 2020; Ilie & Diegelmann, 2021).

As unidades de fotopolimerização LED de alta intensidade, com potências entre 2000 e 6000 mW/cm², tornaram-se cada vez mais comuns na prática clínica, sendo as de 3000 mW/cm² as mais frequentemente utilizadas. No entanto, as possíveis implicações desta polimerização rápida sobre o risco de contração de polimerização em compósitos

restauradores – quer convencionais, quer formulados especificamente para essas intensidades – devem ser cuidadosamente analisadas (Amo Correia et al., 2020).

A contração volumétrica inerente ao processo de polimerização, resultante do encurtamento das ligações intermoleculares, pode gerar tensões significativas na interface dente-restauração. Estas tensões são suscetíveis de comprometer a adesão, originando falhas marginais, descoloração, sensibilidade pós-operatória e até cárie secundária. A compreensão dos fatores que influenciam a fotopolimerização e das estratégias que permitam otimizar esse processo é, portanto, essencial para garantir o sucesso clínico das restaurações em resina composta.

2. METODOLOGIA

2.1. Tipo de revisão e protocolo seguido

A presente revisão integrativa foi conduzida com o intuito de reunir e analisar criticamente estudos experimentais *in vitro* que investigaram a relação entre diferentes protocolos de fotopolimerização e a ocorrência de microinfiltração em restaurações de resina composta. Para garantir a reprodutibilidade e a transparência do processo, foram seguidas as orientações metodológicas propostas por Whitemore e Knafl (2005), adaptadas ao contexto da investigação laboratorial em medicina dentária.

2.2. Critérios de inclusão e exclusão

Foram incluídos nesta revisão estudos:

- Publicados entre 2014 e 2025;
- Estudos *in vitro*, realizados em dentes humanos extraídos;
- Avaliação da microinfiltração marginal em restaurações classe II com resina composta;
- Teste de diferentes protocolos de fotopolimerização (intensidade, tempo, tipo de luz, modo de ativação, pré-aquecimento, entre outros);
- Publicações em inglês ou português, com texto completo disponível gratuitamente.

Foram excluídos:

- Estudos com dentes artificiais ou bovinos;
- Ensaios exclusivamente com compósitos autopolimerizáveis;
- Trabalhos que não quantificaram diretamente a microinfiltração;
- Revisões de literatura, artigos duplicados ou que não correspondiam ao tema da investigação.

2.3. Estratégia de busca

A pesquisa foi realizada nas bases de dados *PubMed*, *PMC*, *ScienceDirect* e *MDPI*, entre março e junho de 2024, utilizando combinações dos seguintes descritores em inglês: “*photopolymerization*”, “*composite resin*”, “*microleakage*”, “*light curing*”, “*bulk-fill*”, “*LED*”, “*preheating*”, “*curing mode*” e “*in vitro*”.

2.4. Seleção dos estudos

Após a remoção de duplicados, os títulos e resumos foram analisados de forma independente por dois revisores. Os artigos elegíveis foram posteriormente lidos na íntegra para confirmação dos critérios de inclusão. Após este processo, sete estudos foram selecionados para análise final.

2.5. Extração e síntese dos dados

Os dados extraídos incluíram: nome do autor, ano de publicação, tipo de resina composta utilizada, protocolo de fotopolimerização testado, método de avaliação da microinfiltração e principais resultados obtidos. Os resultados foram sintetizados em duas tabelas: Tabela 1 (características metodológicas dos estudos) e Tabela 2 (principais resultados em termos de microinfiltração).

2.6. Avaliação metodológica e risco de viés

A avaliação da qualidade metodológica e do risco de viés foi realizada com base na leitura crítica adaptada do modelo JBI para estudos laboratoriais *in vitro*. Esta análise considerou a clareza dos procedimentos experimentais, a padronização das condições de teste e a transparência na apresentação dos dados. Os dados extraídos foram organizados de forma a permitir a comparação entre os protocolos estudados e a identificação dos fatores que influenciam diretamente a microinfiltração marginal.

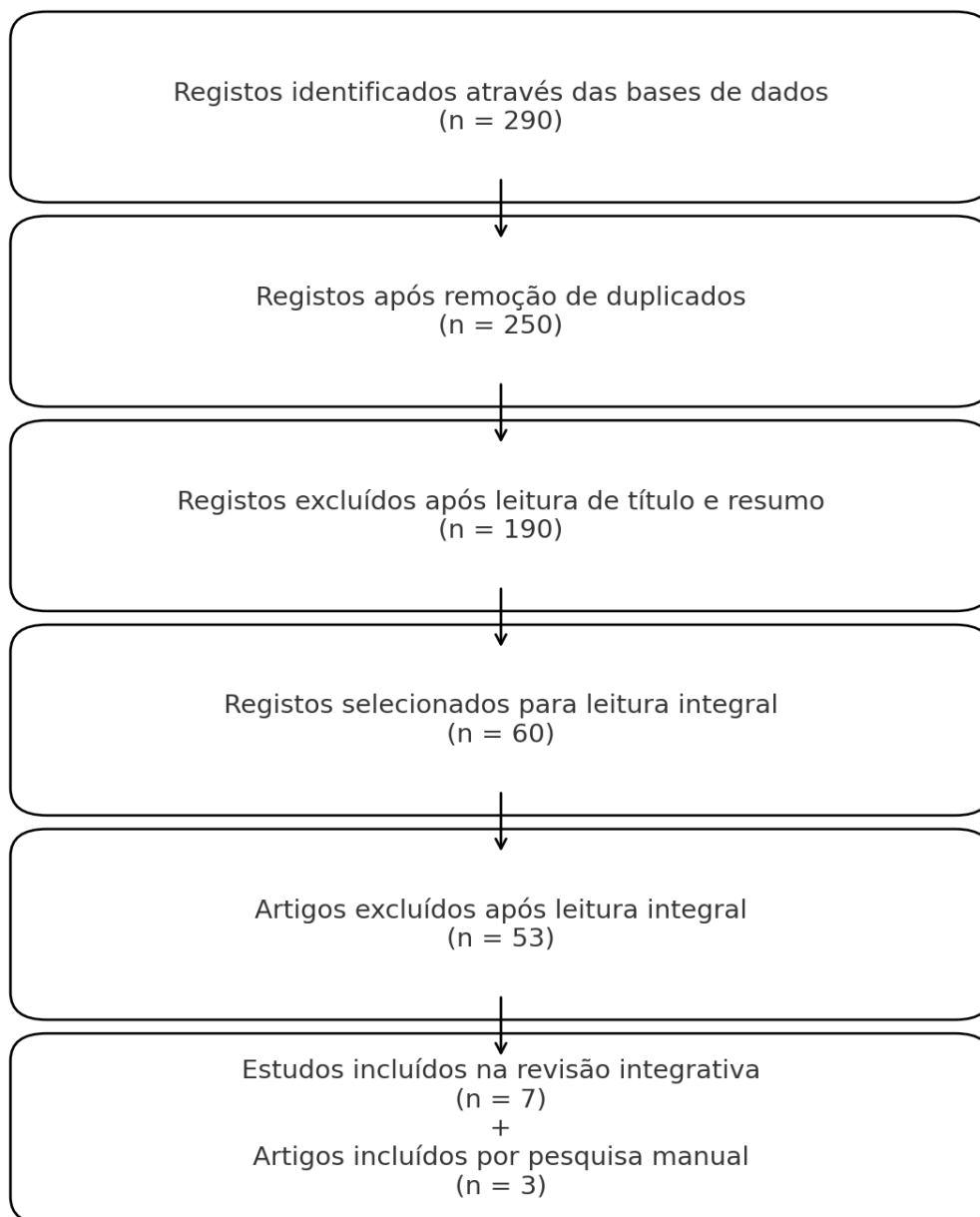
A Tabela 1 apresenta as principais características metodológicas dos estudos *in vitro* incluídos nesta revisão, com ênfase nos protocolos de fotopolimerização utilizados, tipos de resinas compostas testadas, métodos de avaliação da microinfiltração e desenho experimental aplicado em cada investigação. Esta sistematização permite comparar os

diferentes modelos experimentais e compreender a diversidade de técnicas utilizadas para simular a realidade clínica em ambiente laboratorial.

O processo completo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos foi esquematizado conforme as diretrizes PRISMA. A Figura 1 ilustra esse fluxo metodológico, enquanto a versão ampliada pode ser consultada no Anexo A.

Figura 1

Fluxograma PRISMA da seleção dos estudos incluídos nesta revisão integrativa



3. RESULTADOS

Os resultados dos estudos incluídos foram organizados nas Tabelas 1 e 2, que apresentam respectivamente as características metodológicas e os principais achados relacionados à microinfiltração. A maioria dos estudos demonstrou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos testados, refletindo o impacto dos diferentes protocolos de fotopolimerização no desempenho marginal das restaurações em resina composta.

Tabela 1

Características metodológicas dos estudos in vitro incluídos na revisão

Nº	Autor (ano)	Protocolo de fotopolimerização	Tipo de resina composta	Método de avaliação da microinfiltração	Dente humano utilizado	Nº de grupos	Nº de amostras por grupo
1	López-Torres et al. (2023)	20 s com LED (1200 mW/cm ²) vs 20 s com QTH (800 mW/cm ²)	Bulk-fill (Tetric EvoCeram)	Corante azul de metileno + estereomicroscópio ótico	Pré-molares	2	10
2	Ranjini et al. (2024)	20 s com LED (1000 mW/cm ²), técnica <i>snowplow</i> com <i>flow</i> ou compósito pré-aquecido	<i>Bulk-fill flow</i> + <i>Bulk-fill packable</i> (preaquecido), ambos Filtek Z350 XT	Corante azul de metileno + espectrofotometria por extração de corante	Pré-molares	2	15
3	Zakavi et al. (2014)	20 s com LED (Elipar FreeLight 2) vs 20 s com QTH (Optilux 501)	Filtek Z250	Corante azul de metileno + estereomicroscópio ótico	Pré-molares	2	10
4	Soliman (2016)	20 s com LED, compósito aquecido previamente a 54 °C vs compósito não aquecido (controle)	Resina composta Filtek Z250	Corante azul de metileno + estereomicroscópio ótico	Pré-molares	2	10
5	Şenol et al. (2023)	10 s com LED de alta intensidade (1200 mW/cm ²), comparação entre <i>ormocer</i> e resina metacrilato	<i>Ormocer</i> (Admira Fusion x-tra) vs metacrilato (Tetric N-Ceram Bulk Fill)	Microscopia eletrônica de varrimento (MEV) + estereomicroscopia ótica	Molares	2	10

Nº	Autor (ano)	Protocolo de fotopolimerização	Tipo de resina composta	Método de avaliação da microinfiltração	Dente humano utilizado	Nº de grupos	Nº de amostras por grupo
6	Martínez-Sabio et al. (2023)	20 s com LED (1200 mW/cm ²), comparação entre Activa™ Bioactive e Filtek™ Bulk Fill posterior	Resina bioativa (Activa) vs <i>Bulk-fill</i> metacrilato (Filtek)	Corante azul de metileno + estereomicroscópio ótico	Pré-molares	2	10
7	Frank et al. (2023)	3 s com LED ultrarrápido (3050 mW/cm ²) com compósito modificado por RAFT vs 20 s com LED convencional	<i>Bulk-fill</i> RAFT (Tetric PowerFill) vs <i>Bulk-fill</i> tradicional (Tetric EvoCeram)	Corante azul de metileno + microscópio ótico estereoscópico	Pré-molares	2	10

A Tabela 2 resume os principais resultados obtidos em cada estudo incluído, destacando as técnicas de fotopolimerização que apresentaram menor e maior grau de microinfiltração, bem como a presença ou ausência de diferença estatisticamente significativa entre os grupos comparados. Esta análise permite identificar padrões e inferências relevantes para a prática clínica.

Tabela 2

Principais resultados relacionados à microinfiltração segundo os diferentes protocolos de fotopolimerização

Nº	Autor (ano)	Técnica com menor microinfiltração	Técnica com maior microinfiltração	Conclusão dos autores
1	López-Torres et al. (2023)	LED (1200 mW/cm ² , 20 s)	QTH (800 mW/cm ² , 20 s)	LED apresentou melhor desempenho marginal em comparação com QTH. Diferença estatisticamente significativa
2	Ranjini et al. (2024)	Técnica <i>snowplow</i> com compósito <i>packable</i> preaquecido	Técnica <i>snowplow</i> com compósito <i>flow</i>	O uso de compósito <i>packable</i> preaquecido reduziu significativamente a microinfiltração. Diferença estatisticamente significativa
3	Zakavi et al. (2014)	LED (Elipar FreeLight 2, 20 s)	QTH (Optilux 501, 20 s)	A luz LED demonstrou menor infiltração marginal em comparação com a luz halógena. Diferença estatisticamente significativa
4	Soliman (2016)	Compósito pré-aquecido (54 °C)	Compósito não aquecido	O pré-aquecimento da resina composta reduziu significativamente a microinfiltração. Diferença estatisticamente significativa
5	Şenol et al. (2023)	O pré-aquecimento da resina composta reduziu significativamente a microinfiltração.	Metacrilato (Tetric N-Ceram Bulk Fill)	Os <i>ormocers</i> apresentaram melhor selamento marginal do que as resinas metacriladas. Diferença estatisticamente significativa
6	Martínez-Sabio et al. (2023)	Activa™ Bioactive	Filtek™ Bulk Fill posterior	A resina bioativa Activa™ demonstrou menor microinfiltração do que o compósito convencional. Diferença estatisticamente significativa
7	Frank et al. (2023)	LED ultrarrápido (3 s, 3050 mW/cm ² , RAFT)	LED convencional (20 s, 1200 mW/cm ² , Tetric)	A polimerização RAFT de 3 s foi tão eficaz quanto a convencional, com menor microinfiltração marginal. Diferença estatisticamente significativa

4 DISCUSSÃO

4.1. Comparação dos protocolos de fotopolimerização

4.1.1. López-Torres et al. (2023)

O estudo de López-Torres et al. (2023) comparou diretamente duas fontes de luz: LED de alta intensidade (1200 mW/cm²) e halogena QTH (800 mW/cm²), ambas aplicadas durante 20 segundos. Os resultados demonstraram que o grupo fotopolimerizado com LED apresentou valores significativamente inferiores de microinfiltração em relação ao grupo QTH. Estes dados reforçam a superioridade dos dispositivos LED modernos, que permitem uma ativação mais eficiente dos fotoiniciadores presentes na resina composta, resultando numa rede polimérica mais densa e com menor porosidade marginal. Além disso, a menor dispersão térmica e a maior estabilidade da intensidade luminosa nas unidades LED podem ter contribuído para uma polimerização mais homogênea, justificando o melhor desempenho observado.

4.1.2. Ranjini et al. (2024)

O estudo de Ranjini et al. (2024) teve como objetivo comparar duas abordagens dentro da técnica snowplow, utilizando diferentes tipos de resina como incremento gengival: um compósito flow e um compósito condensável previamente aquecido. Ambos os grupos foram fotopolimerizados com LED sob os mesmos parâmetros de tempo e intensidade, o que permitiu isolar o efeito do tipo de material e do pré-aquecimento. Os resultados demonstraram que o grupo restaurado com resina de consistência condensável previamente aquecida apresentou valores significativamente inferiores de microinfiltração em comparação com o grupo que utilizou compósito flow.

Estes achados sugerem que o pré-aquecimento do compósito, ao reduzir a sua viscosidade inicial, favorece uma melhor adaptação às paredes cavitárias e uma polimerização mais homogênea, o que contribui para um selamento marginal mais eficaz. Além disso, a resina condensável, por apresentar um maior conteúdo de carga e menor contração de polimerização do que os materiais flow, pode também ter influenciado positivamente a estabilidade dimensional da restauração. O estudo destaca, portanto, a importância da manipulação térmica dos compósitos como variável crítica no controlo da infiltração

marginal.

4.1.3. Zakavi et al. (2014)

Zakavi et al. (2014) compararam diretamente duas tecnologias de fotopolimerização disponíveis na prática clínica: luz halógena convencional (QTH) e luz LED de segunda geração, ambas aplicadas por 20 segundos. Os compósitos foram inseridos em cavidades classe II e submetidos à coloração com azul de metileno para análise da microinfiltração. Os resultados revelaram que os espécimes fotopolimerizados com LED apresentaram uma infiltração significativamente menor em comparação com aqueles submetidos à luz halógena.

Esta diferença pode ser atribuída à maior intensidade luminosa e à estabilidade do espectro emitido pelas unidades LED, que garantem uma ativação mais completa dos fotoiniciadores presentes na resina. Por outro lado, as lâmpadas QTH, embora amplamente utilizadas no passado, apresentam limitações como variação de intensidade, maior aquecimento e degradação da lâmpada ao longo do tempo. O estudo reforça, assim, a superioridade das fontes LED modernas não apenas em termos de eficiência, mas também no que diz respeito à qualidade do selamento marginal das restaurações.

4.2. Efeitos do pré-aquecimento

4.2.1. Soliman (2016)

Soliman (2016) avaliou o impacto do pré-aquecimento da resina composta sobre a microinfiltração marginal. No estudo, dentes restaurados com resina pré-aquecida a 54 °C foram comparados com dentes restaurados com o mesmo compósito em temperatura ambiente, utilizando o mesmo protocolo de fotopolimerização. Os resultados mostraram uma redução significativa da microinfiltração no grupo que recebeu o compósito previamente aquecido.

Este achado corrobora a hipótese de que o pré-aquecimento melhora a adaptação marginal ao tornar o compósito mais fluido, favorecendo a penetração em áreas retentivas e reduzindo a formação de espaços interfaciais. Além disso, a temperatura elevada pode aumentar a taxa de conversão de monómeros, contribuindo para uma matriz polimérica mais densa e estável. Assim, o estudo destaca a relevância de intervenções simples, como o controle da temperatura do material restaurador, como estratégia eficaz para melhorar

o selamento marginal sem necessidade de alterar o compósito ou o equipamento de fotopolimerização.

4.3. Impacto dos diferentes tipos de resina

4.3.1. Şenol et al. (2023)

No estudo conduzido por Şenol et al. (2023), foram comparadas duas classes de materiais restauradores com diferentes matrizes poliméricas: os compósitos *ormocer* (*organically modified ceramics*) e os compósitos metacrilatos convencionais. Ambos os materiais foram utilizados em cavidades MOD de molares humanos, restauradas sob o mesmo protocolo de fotopolimerização com LED de alta intensidade. A análise da microinfiltração foi realizada por estereomicroscopia e MEV, permitindo uma observação precisa da interface restauradora.

Os resultados demonstraram que os *ormocers* apresentaram significativamente menos microinfiltração do que os compósitos metacrilados. Este desempenho superior pode ser explicado pelas características estruturais dos *ormocers*, que apresentam uma matriz inorgânica tridimensional mais estável e menor taxa de contração de polimerização. Além disso, o menor teor de monómeros residuais e a elevada conversão de ligações cruzadas contribuem para uma interface mais coesa e durável. O estudo sugere, assim, que a escolha do tipo de resina composta pode ter impacto direto no sucesso clínico a longo prazo, especialmente em zonas de maior risco de infiltração marginal.

4.3.2. Martínez-Sabio et al. (2023)

Martínez-Sabio et al. (2023) compararam o desempenho de uma resina bioativa (Activa™ Bioactive Restorative™) com um compósito *bulk-fill* metacrilato (Filtek™ Bulk Fill) em relação à microinfiltração marginal e à resistência adesiva. Ambos os grupos foram submetidos ao mesmo protocolo de fotopolimerização com LED de alta intensidade. A avaliação da microinfiltração foi realizada através de coloração com azul de metileno e análise por estereomicroscopia.

Os resultados indicaram que a resina bioativa apresentou significativamente menor microinfiltração do que o compósito convencional. Este resultado pode ser atribuído à composição diferenciada do material Activa™, que combina propriedades de libertação

iônica (como cálcio e fosfato), maior molhabilidade e melhor adesão química à estrutura dentária. Além disso, a sua capacidade de formação de apatita e interação com a dentina pode favorecer um selamento biológico mais eficaz. O estudo aponta para o potencial promissor dos materiais bioativos como alternativa viável em situações clínicas que exijam um controle rigoroso da infiltração marginal.

4.3.3. Frank et al. (2023)

O estudo de Frank et al. (2023) avaliou o desempenho de um compósito *bulk-fill* modificado com tecnologia RAFT submetido à fotopolimerização ultrarrápida (3 segundos a 3050 mW/cm²), em comparação com um compósito convencional fotopolimerizado durante 20 segundos com LED tradicional. A análise da microinfiltração, realizada com azul de metileno e estereomicroscópio, revelou que o material com RAFT apresentou infiltração marginal significativamente menor, mesmo com tempo de ativação reduzido.

Este resultado destaca o impacto da inovação na formulação dos compósitos, que permite manter um desempenho clínico eficaz mesmo com tempos de polimerização extremamente curtos. A presença de reagentes como a β -alil sulfona, associados a iniciadores otimizados e maior translucidez do material, favorece uma polimerização mais homogênea, reduzindo o stress de contração e melhorando o selamento marginal. O estudo valida, assim, a aplicabilidade dos compósitos RAFT na prática clínica moderna, especialmente em contextos onde o tempo operatório é um fator crítico.

4.3.4. Comparação entre ormocer e resina bioativa

Embora ambos os materiais apresentem desempenho superior em termos de selamento marginal quando comparados aos compósitos metacrilados convencionais, suas propriedades químicas e mecanismos de atuação diferem substancialmente. O *ormocer*, como observado no estudo de Şenol et al. (2023), possui uma matriz híbrida composta por unidades orgânicas e inorgânicas entrelaçadas, resultando em menor contração de polimerização e melhor estabilidade dimensional. Por outro lado, a resina bioativa, analisada por Martínez-Sabio et al. (2023), destaca-se pela capacidade de liberação iônica e interação química com a estrutura dentária, promovendo um potencial remineralizador.

Em termos clínicos, enquanto o *ormocer* oferece maior previsibilidade mecânica e estética, a resina bioativa pode ser particularmente vantajosa em restaurações de dentes com risco elevado de cárie secundária ou em pacientes com necessidade de materiais de maior biocompatibilidade. Ambos os materiais demonstraram microinfiltração reduzida, mas o seu comportamento ao longo do tempo permanece incerto, sendo necessários estudos clínicos comparativos de longo prazo para validar as suas vantagens específicas.

4.3.5. Estratégias emergentes: polimerização RAFT versus pré-aquecimento

Os resultados observados nos estudos de Frank et al. (2023) e Soliman (2016) evidenciam duas estratégias distintas com impacto positivo na redução da microinfiltração marginal: o uso de compósitos modificados com tecnologia RAFT e o pré-aquecimento da resina composta. Enquanto o pré-aquecimento atua na modificação transitória da viscosidade, facilitando a adaptação marginal e possivelmente aumentando o grau de conversão, a tecnologia RAFT atua na arquitetura da reação polimérica, promovendo redes mais homogêneas e resistentes com menor stress de contração, mesmo com tempos de fotopolimerização extremamente reduzidos.

A combinação das duas estratégias ainda não foi amplamente explorada na literatura, mas poderia representar uma abordagem sinérgica para maximizar a qualidade da polimerização. No entanto, a aplicação clínica da polimerização RAFT requer equipamentos de alta potência luminosa e compósitos específicos, enquanto o pré-aquecimento pode ser implementado com mais facilidade na prática diária. Assim, a escolha entre estas estratégias dependerá da realidade clínica, da disponibilidade tecnológica e da preferência do profissional.

4.4. Considerações metodológicas, limitações e implicações clínicas

Embora os estudos incluídos nesta revisão apresentem resultados relevantes sobre a influência dos diferentes protocolos de fotopolimerização na microinfiltração marginal, é essencial analisar de forma crítica os seus desenhos metodológicos, bem como os fatores que podem limitar a generalização dos achados para a prática clínica.

Uma das principais limitações observadas refere-se à variabilidade nos métodos de avaliação da microinfiltração. Os estudos utilizaram diferentes técnicas, desde a

coloração com azul de metileno e visualização sob estereomicroscópio até análises por microscopia eletrônica de varrimento (MEV) ou espectrofotometria por extração de corante. Esta diversidade metodológica dificulta a comparação direta dos resultados entre os estudos, uma vez que cada método possui sensibilidade, precisão e critérios de análise distintos. Por exemplo, enquanto a coloração com azul de metileno é uma técnica amplamente utilizada e de baixo custo, apresenta limitações quanto à penetração do corante e à subjetividade na classificação da infiltração. Por outro lado, a MEV permite uma análise mais detalhada da interface restauradora, mas exige equipamento especializado e maior custo operacional. Esta heterogeneidade metodológica reforça a necessidade de padronização nos critérios de avaliação, a fim de facilitar a comparação e a meta-análise dos resultados em estudos futuros.

Além disso, a maioria dos estudos analisados apresenta um tamanho amostral reduzido, com média de 10 a 15 dentes por grupo. Embora tal número seja frequentemente considerado suficiente em ensaios laboratoriais, ele limita a robustez estatística e a capacidade de detectar pequenas diferenças entre grupos. Estudos com maior poder amostral poderiam permitir análises mais refinadas, como a influência de variáveis adicionais (tipo de cavidade, localização do dente, grau de escurecimento marginal, entre outras). Ainda dentro do desenho experimental, nota-se que nem todos os estudos especificam com clareza critérios como o método de seleção dos dentes, o estado prévio dos espécimes, a padronização do preparo cavitário ou o controle da profundidade e volume da resina inserida. Estas omissões metodológicas comprometem a reprodutibilidade dos protocolos e devem ser corrigidas em investigações futuras.

Outro ponto crítico é o fato de todos os estudos incluídos serem de natureza *in vitro*, realizados em dentes humanos extraídos. Embora este modelo experimental permita o controle de variáveis e a aplicação de metodologias padronizadas, não reproduz com fidelidade as condições da cavidade oral, como a presença de saliva, a variação de temperatura, as forças mastigatórias e a interação com tecidos vivos. Consequentemente, a microinfiltração observada em ambiente laboratorial pode diferir substancialmente daquela observada em situações clínicas reais. Esta discrepância levanta questões quanto à validade externa dos resultados e à prudência necessária na extrapolação direta das conclusões para a clínica.

Adicionalmente, observa-se nos estudos uma variação considerável dos parâmetros de fotopolimerização, incluindo a intensidade da luz, o tempo de exposição, a distância da

fonte ao material, o tipo de fotopolimerizador (*monowave vs polywave*), e o modo de ativação (contínuo, *soft-start*, *pulse-delay*, etc.). Essa diversidade é compreensível, tendo em vista a evolução dos dispositivos disponíveis no mercado, mas reforça a complexidade da análise dos seus efeitos sobre a microinfiltração. Na ausência de protocolos clínicos consensuais, cabe ao médico-dentista avaliar criticamente os parâmetros dos seus equipamentos e os requisitos específicos dos materiais restauradores utilizados, ajustando a técnica conforme o contexto clínico. A revisão atual demonstra que pequenas variações no protocolo de fotopolimerização podem produzir diferenças estatisticamente significativas na infiltração marginal, destacando a necessidade de uma formação técnica rigorosa e da atualização constante dos profissionais.

Do ponto de vista clínico, os resultados desta revisão apontam para algumas tendências relevantes. Em primeiro lugar, a fotopolimerização com dispositivos LED modernos demonstrou desempenho superior à polimerização com unidades halógenas QTH, tanto em termos de grau de conversão quanto na redução da infiltração marginal. Esta conclusão já é amplamente reconhecida na literatura, mas a presente análise reforça a necessidade de abandonar equipamentos obsoletos e investir em tecnologias mais seguras e eficazes. Em segundo lugar, o pré-aquecimento da resina composta revelou-se uma estratégia eficaz e de fácil implementação para melhorar a adaptação marginal, especialmente quando combinado com técnicas como a inserção incremental ou a técnica *snowplow*. Esta prática, embora ainda pouco disseminada na rotina clínica, merece maior atenção por parte dos profissionais.

No que diz respeito aos materiais restauradores, observa-se uma tendência favorável aos compósitos de nova geração, como os *ormocers*, as resinas bioativas e os compósitos modificados por RAFT. Estes materiais demonstraram desempenho superior à resina metacrilada convencional, tanto na resistência marginal quanto na estabilidade dimensional após a fotopolimerização. Contudo, é importante salientar que a maioria destes dados provém de estudos laboratoriais recentes, e a sua aplicabilidade clínica ainda depende de mais evidência científica de longo prazo. Além disso, o custo mais elevado de alguns destes materiais pode representar uma limitação prática em determinados contextos de atendimento.

Por outro lado, algumas limitações são transversais a praticamente todos os estudos avaliados. Uma delas é a curta duração do *follow up* das restaurações. Em ambiente clínico, a degradação marginal ocorre ao longo de meses ou anos, como resultado da

fadiga funcional, das variações térmicas e da degradação química da interface adesiva. A maioria dos estudos incluídos nesta revisão limita-se a avaliar a infiltração marginal logo após a fotoativação, o que impede uma análise do comportamento do selamento ao longo do tempo. Além disso, poucos estudos consideram variáveis como o tipo de substrato dentário (esmalte vs dentina), o tipo de adesivo utilizado ou a influência da contaminação durante o procedimento, o que reduz a representatividade clínica dos dados.

Neste contexto, recomenda-se que estudos futuros adotem protocolos mais robustos e realistas, incluindo a simulação do envelhecimento dos materiais (termociclagem, fadiga mecânica), a análise da interface adesiva com microscopia de alta resolução e a comparação de diferentes estratégias de polimerização com diferentes marcas comerciais. Além disso, estudos clínicos controlados, mesmo que em pequena escala, seriam fundamentais para validar os achados laboratoriais e determinar a real eficácia dos materiais e técnicas em ambiente clínico.

Por fim, cabe destacar que o conhecimento dos fatores que influenciam a microinfiltração é essencial para a prática baseada em evidências. O médico-dentista deve estar consciente de que a escolha do protocolo de fotopolimerização, do tipo de resina e da técnica operatória pode ter impacto direto na durabilidade da restauração, na prevenção de cárie secundária e na satisfação estética do paciente. A atualização contínua, a leitura crítica da literatura científica e a adaptação individualizada da técnica clínica são, portanto, indispensáveis para garantir resultados restauradores previsíveis e duradouros.

4.5. Análise crítica dos estudos incluídos

Nesta secção, apresenta-se uma análise narrativa da qualidade metodológica dos sete estudos incluídos na revisão, com base nos critérios adaptados das grelhas do *Joanna Briggs Institute* (JBI) para estudos laboratoriais *in vitro*. São consideradas a clareza dos objetivos, a padronização dos métodos, a validade dos instrumentos de medida e o controlo de viéses experimentais.

4.5.1. Análise crítica – López-Torres et al. (2023)

O estudo conduzido por López-Torres et al. (2023) apresenta uma metodologia clara e bem estruturada, com descrição detalhada dos grupos experimentais e padronização

adequada do protocolo de fotopolimerização. A utilização de dentes humanos e cavidades classe II contribui para uma simulação aceitável da realidade clínica. O método de avaliação da microinfiltração por coloração com azul de metileno e estereomicroscópio é simples, mas possui limitações quanto à sensibilidade e subjetividade da análise. Embora o número de amostras por grupo (n=10) seja comum em estudos laboratoriais, não garante elevado poder estatístico. O estudo não menciona se houve randomização na alocação dos espécimes, o que pode introduzir viés de seleção. Apesar dessas limitações, os resultados foram consistentes e clinicamente relevantes. No geral, trata-se de um estudo de qualidade metodológica moderada a elevada, com fiabilidade suficiente para apoiar suas conclusões.

4.5.2. Análise crítica – Ranjini et al. (2024)

O estudo conduzido por Ranjini et al. (2024) foi bem delineado quanto à comparação entre diferentes estratégias de uso do compósito na técnica *snowplow*. Os autores especificaram claramente os materiais utilizados, o protocolo de inserção e o método de polimerização, o que favorece a reprodutibilidade. O número de grupos experimentais foi adequado, mas o número reduzido de amostras por grupo (n=10) limita o poder estatístico dos resultados. Um ponto positivo é a avaliação quantitativa da microinfiltração por espectrofotometria após extração do corante, que representa um método mais objetivo do que a análise visual subjetiva. No entanto, o estudo não fornece detalhes sobre o processo de randomização dos espécimes nem sobre a calibração dos examinadores, o que pode introduzir viés de medição. Globalmente, a qualidade metodológica é considerada moderada, com relevância clínica aceitável.

4.5.3. Análise crítica – Zakavi et al. (2014)

O estudo de Zakavi et al. (2014) apresenta uma comparação direta entre duas fontes de luz amplamente utilizadas na prática clínica: LED e QTH. A estrutura experimental é clara e bem definida, com utilização de dentes humanos e restaurações padronizadas em cavidades classe II. O método de avaliação da microinfiltração por corante azul de metileno e observação estereomicroscópica é tradicional, mas apresenta limitações quanto à sensibilidade e à subjetividade dos resultados. O estudo não especifica se houve randomização dos espécimes nem se os avaliadores foram cegos para os grupos, o que

pode comprometer a validade interna. Além disso, o número de amostras por grupo é limitado (n=10), reduzindo o poder estatístico. Apesar dessas restrições, os resultados são consistentes com a literatura atual, e as conclusões são bem fundamentadas. Trata-se de um estudo de qualidade metodológica moderada, com aplicabilidade clínica relevante.

4.5.4. Análise crítica – Soliman (2016)

O estudo de Soliman (2016) investigou o efeito do pré-aquecimento da resina composta sobre a microinfiltração marginal, apresentando uma hipótese relevante e bem fundamentada. A descrição dos grupos experimentais, da temperatura utilizada e do método de inserção foi clara e suficientemente detalhada para garantir a reprodutibilidade. A análise da microinfiltração foi realizada através de coloração com azul de metileno e observação estereomicroscópica, técnica simples e comum na literatura, mas com limitações em termos de precisão. O número de amostras por grupo (n=10) é limitado, e o estudo não menciona se houve randomização ou cegamento dos avaliadores, o que pode introduzir viés de seleção ou de medição. Além disso, o autor não discute possíveis fatores de confusão que poderiam afetar os resultados. Apesar dessas limitações, os dados obtidos são coerentes com outras publicações, e o estudo apresenta qualidade metodológica moderada com relevância clínica prática.

4.5.5. Análise crítica – Şenol et al. (2023)

O estudo conduzido por Şenol et al. (2023) destaca-se pela comparação entre dois tipos de resina composta com matrizes diferentes: *ormocer* e metacrilato convencional. A metodologia foi bem estruturada, com descrição detalhada dos materiais utilizados, da técnica restauradora e dos parâmetros de fotopolimerização. A avaliação da microinfiltração combinou estereomicroscopia e microscopia eletrônica de varrimento (MEV), o que confere maior rigor e sensibilidade à análise dos resultados. No entanto, o número de amostras por grupo (n=10) permanece limitado, e o estudo não informa claramente se os examinadores foram cegos quanto aos grupos, o que pode introduzir viés de observação. Além disso, o tempo de armazenamento dos espécimes antes da avaliação foi curto, não permitindo inferências sobre a durabilidade do selamento marginal. Ainda assim, o estudo apresenta qualidade metodológica elevada entre os trabalhos laboratoriais incluídos nesta revisão.

4.5.6. Análise crítica – Martínez-Sabio et al. (2023)

O estudo realizado por Martínez-Sabio et al. (2023) investigou a microinfiltração e a resistência adesiva de dois materiais restauradores: uma resina bioativa e um compósito *bulk-fill* convencional. A metodologia foi claramente descrita, incluindo a padronização das cavidades, o uso de dentes humanos e o protocolo de fotopolimerização. A utilização de técnicas complementares para avaliar a infiltração e a resistência adesiva aumenta a robustez dos dados. No entanto, o estudo apresenta limitações semelhantes às demais investigações *in vitro*: número de amostras reduzido (n=10 por grupo), ausência de simulação do envelhecimento oral (como termociclagem) e falta de menção à randomização dos espécimes ou ao cegamento dos avaliadores. Apesar disso, os resultados são consistentes e metodologicamente sólidos, com aplicabilidade clínica promissora, especialmente no contexto de seleção de materiais bioativos para restaurações diretas.

4.5.7. Análise crítica – Frank et al. (2023)

O estudo de Frank et al. (2023) avaliou o desempenho de um compósito *bulk-fill* com tecnologia RAFT submetido à fotopolimerização ultrarrápida, comparando-o com um compósito convencional. A proposta metodológica é inovadora e relevante, refletindo as tendências atuais de redução do tempo clínico sem comprometer a qualidade restauradora. Os grupos experimentais foram bem delineados, e os parâmetros de fotopolimerização foram especificados com rigor. A análise da microinfiltração foi realizada com azul de metileno e estereomicroscopia, técnica que, embora comum, possui limitações em termos de precisão quantitativa. O estudo não informa claramente sobre a randomização, e o número de amostras por grupo continua limitado. Ainda assim, os resultados obtidos são consistentes e indicam que protocolos de curta duração podem ser eficazes, desde que associados a compósitos de última geração. A qualidade metodológica do estudo é considerada moderada a elevada.

5. CONCLUSÃO

Com base na análise dos sete estudos *in vitro* incluídos nesta revisão integrativa, torna-se evidente que os protocolos de fotopolimerização exercem influência significativa sobre a ocorrência de microinfiltração marginal em restaurações de resina composta. As diferenças observadas entre os grupos comparados, muitas vezes com significância estatística, demonstram que tanto os parâmetros operatórios (tempo, intensidade, modo de ativação) como as propriedades físico-químicas dos materiais utilizados afetam diretamente a qualidade do selamento marginal.

Entre os principais resultados, destaca-se o desempenho consistentemente superior das unidades de fotopolimerização LED em comparação com as fontes halógenas convencionais, especialmente quando associadas a estratégias modernas como o pré-aquecimento da resina, o uso de compósitos modificados por RAFT ou a aplicação de materiais inovadores como os *ormocers* e resinas bioativas. Estes avanços tecnológicos contribuíram para a redução da microinfiltração, aumentando assim o potencial de longevidade das restaurações e reduzindo o risco de complicações clínicas como cárie secundária, sensibilidade pós-operatória e falhas adesivas.

Contudo, apesar dos resultados promissores, importa salientar que todos os estudos incluídos foram realizados em ambiente laboratorial controlado. Embora os modelos *in vitro* sejam úteis para investigar o comportamento dos materiais em condições padronizadas, eles não reproduzem completamente os desafios da cavidade oral, como a presença de umidade, variações térmicas, forças mastigatórias e interação com os tecidos moles. Por esse motivo, a extrapolação dos resultados deve ser feita com cautela, e a sua aplicabilidade clínica deve ser confirmada por estudos clínicos randomizados e de longo prazo.

Um estudo recente de Sari-Mehmet et al. (2025) reforça esta necessidade, ao demonstrar que a utilização de compósitos *bulk-fill* associados a técnicas restauradoras alternativas pode reduzir significativamente a microinfiltração marginal, mesmo em dentes tratados endodonticamente. Este achado ressalta a importância da seleção criteriosa dos materiais restauradores e da otimização do protocolo de fotopolimerização, especialmente em contextos clínicos complexos onde o selamento marginal é crítico para o sucesso a longo prazo.

A presente revisão também revelou limitações metodológicas recorrentes na literatura, como tamanhos amostrais reduzidos, falta de padronização nos métodos de avaliação da microinfiltração e ausência de acompanhamento temporal dos espécimes restaurados. Estas limitações reforçam a necessidade de protocolos experimentais mais rigorosos, que combinem análise quantitativa precisa com simulações mais próximas da realidade clínica.

Apesar destas restrições, os dados reunidos nesta revisão fornecem uma base científica relevante para o auxílio na tomada de decisões clínicas. O conhecimento sobre os efeitos dos diferentes protocolos de fotopolimerização pode auxiliar o médico dentista na escolha consciente do equipamento, do tempo de exposição, do tipo de resina e da técnica operatória mais adequada a cada situação. Estratégias como o uso de LED de alta potência, o pré-aquecimento do compósito e a escolha de materiais com melhor desempenho marginal devem ser consideradas como ferramentas clínicas valiosas para otimizar os resultados restauradores.

Em suma, esta revisão reforça a importância de uma abordagem baseada em evidências para o controlo da microinfiltração em restaurações diretas. A fotopolimerização, embora frequentemente subestimada na prática diária, revela-se um componente técnico crucial que, quando bem compreendido e corretamente aplicado, pode determinar o sucesso ou o fracasso de um tratamento restaurador. A continuidade da investigação nesta área, com estudos metodologicamente sólidos e aplicabilidade clínica, é essencial para consolidar as recomendações atuais e orientar o futuro da prática restauradora minimamente invasiva.

Além disso, esta revisão integrativa evidenciou lacunas metodológicas relevantes na literatura atual. Assim, recomenda-se que futuras investigações incluam protocolos mais padronizados, com simulação de fadiga mecânica e térmica, bem como avaliações de longo prazo que reflitam com maior fidelidade a realidade clínica. Seria igualmente pertinente explorar comparações diretas entre estratégias promissoras como o pré-aquecimento e a tecnologia RAFT, que ainda carecem de evidência conclusiva. Ao integrar evidência laboratorial robusta com uma análise crítica da aplicabilidade clínica, torna-se possível refinar a seleção de protocolos restauradores e contribuir efetivamente para uma medicina dentária baseada em evidência e centrada no paciente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amo Correia, M. R., Andrade, J., Tribst, J. P. M., Borges, A. L. S., & Caneppele, T. M. F. (2020). Influence of bulk fill restoration on polymerization shrinkage stress and marginal gap formation in Class V restorations. *Operative Dentistry*, 45(4), E207–E216. <https://doi.org/10.2341/19-062-L>
- Braga, R. R., Ballester, R. Y., & Ferracane, J. L. (2005). Factors involved in the development of polymerization shrinkage stress in resin composites: A systematic review. *Dental Materials*, 21(10), 962–970. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.04.018>
- Calheiros, F. C., Sadek, F. T., Braga, R. R., & Cardoso, P. E. C. (2004). Polymerization contraction stress of low-shrinkage composite resins and its correlation with shrinkage strain. *Journal of Applied Oral Science*, 12(4), 338–343. <https://doi.org/10.1590/S1678-77572004000400015>
- Carvalho, R. M., Pereira, J. C., Yoshiyama, M., & Pashley, D. H. (1996). A review of polymerization contraction: the influence of stress development versus stress relief. *Operative Dentistry*, 21(1), 17–24. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8957911/>
- Davidson, C. L., & Feilzer, A. J. (1997). Polymerization shrinkage and polymerization shrinkage stress in polymer-based restoratives. *Journal of Dentistry*, 25(6), 435–440. [https://doi.org/10.1016/S0300-5712\(96\)00063-6](https://doi.org/10.1016/S0300-5712(96)00063-6)
- Ferracane, J. L. (2005). Developing a more complete understanding of stresses produced in dental composites during polymerization. *Dental Materials*, 21(1), 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2004.10.004>
- Ferracane, J. L. (2006). Hygroscopic and hydrolytic effects in dental polymer networks. *Dental Materials*, 22(3), 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.05.005>
- Frank, J., Tauböck, T. T., Zimmermann, M., Attin, T., & Hamza, B. (2023). Influence of high irradiance light curing on the marginal integrity of composite restorations in primary teeth. *BMC Oral Health*, 23(1), 569. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03291-6>
- Ilie, N., Bucuta, S., & Draenert, M. (2013). Bulk fill resin based composites: An in vitro assessment of their mechanical performance. *Operative Dentistry*, 38(6), 618–625. <https://doi.org/10.2341/12-395-L>
- Ilie, N., & Hickel, R. (2020). Can polymerization stress be reduced by preheating and curing techniques? *Dental Materials*, 36(5), 735–747. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.02.008>
- Ilie, N., & Watts, D. C. (2020). Outcomes of ultra fast (3 s) photo cure in a RAFT modified resin composite. *Dental Materials*, 36(4), 570–579. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.02.007>
- Ilie, N., & Diegelmann, J. (2021). Impact of ultra-fast (3 s) light curing on cell toxicity and viscoelastic behavior in a dental resin-based composite with RAFT-mediated polymerization. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 124, 104810. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104810>

- López-Torres, J., García-Godoy, F., & Aranguren, M. (2023). Microleakage of Class II Bulk-Fill Resin Composite Restorations Cured with Light-Emitting Diode versus Quartz Tungsten-Halogen Light: An In Vitro Study in Human Teeth. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 15(3), e192–e198. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36831092/>
- Marović, D., Tauböck, T. T., Attin, T., Pandurić, V., & Tarle, Z. (2015). Monomer conversion and shrinkage force kinetics of low viscosity bulk fill resin composites. *Acta Odontologica Scandinavica*, 73(6), 474–480. <https://doi.org/10.3109/00016357.2014.992810>
- Martínez-Sabio, L., Segura-Egea, J. J., Sauro, S., & Cabanillas-Balsera, D. (2023). Comparison of shear bond strength and microleakage between Activa™ Bioactive Restorative™ and bulk-fill composites—An in vitro study. *Polymers*, 15(13), 2840. <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/13/2840>
- Münchow, E. A., Meereis, C. T. W., de Oliveira da Rosa, W. L., de Silva, A. F., & Piva, E. (2018). Polymerization shrinkage stress of resin-based dental materials: A systematic review and meta-analyses of technique protocol and photo-activation strategies. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 82, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.03.004>
- Nedeljkovic, I., De Munck, J., Slomka, V., Van Meerbeek, B., & Van Landuyt, K. L. (2020). Secondary caries: Causes, prevention and management. *Clinical Oral Investigations*, 24(2), 683–691. <https://doi.org/10.1007/s00784-019-03002-w>
- Peutzfeldt, A., & Asmussen, E. (2004). Resin composite properties and energy density of light cure. *Journal of Dental Research*, 83(8), 663–667. <https://doi.org/10.1177/154405910408300812>
- Ranjini, M. A., Ramesh, T., & Smitha, K. (2024). Comparative evaluation of microleakage in Class II cavities restored with snowplow technique using flowable or preheated packable bulk-fill composite resin as gingival increment by dye extraction method: An in vitro study. *Journal of Conservative Dentistry*, 27(2), 137–141. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39777392/>
- Sari-Mehmet, C., Ural, C., Ozturk, B., & Yildiz, M. (2025). Effect of using different materials and restorative techniques on cuspal deflection and microleakage in endodontically treated teeth. *BMC Oral Health*, 25(1), 302. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05693-0>
- Şenol, A. A., Adıgüzel, Ö., Akin, H., & Türkün, L. Ş. (2023). Microleakage and marginal integrity ofOrmocer/methacrylate-based bulk-fill resin restorations in MOD cavities: SEM and stereomicroscopic evaluation. *Polymers*, 15(7), 1716. <https://doi.org/10.3390/polym15071716>
- Soliman, E. M. (2016). Effect of preheating on microleakage and microhardness of composite resin (An in vitro study). *Al-Azhar Dental Journal for Girls*, 3(3), 201–206. https://journals.ekb.eg/article_59163.html
- Tantbirojn, D., Versluis, A., Lee, M. S., & DeLong, R. (2004). Cuspal deformation and cracking of teeth restored with different restorative materials using finite element analysis. *Dental Materials*, 20(6), 535–543. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2003.07.003>

- Whittemore, R., & Knafl, K. (2005). The integrative review: Updated methodology. *Journal of Advanced Nursing*, 52(5), 546–553. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x>
- Zakavi, F., Rezaei-Soufi, L., & Vojdani, M. (2014). Evaluation of microleakage of class II dental composite resin restorations cured with LED or QTH dental curing light: Blind, cluster randomized, in vitro cross sectional study. *Journal of Dentistry*, 11(2), 194–200. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4085696/>
- Zotti, F., Falavigna, E., Capocasale, G., De Santis, D., & Albanese, M. (2021). Microleakage of direct restorations – Comparison between bulk-fill and traditional composite resins: systematic review and meta-analysis. *European Journal of Dentistry*, 15(4), 755–767. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1724155>