ReGeo ISSN: 2177-3246

FOTOPOLIMERIZADORES ODONTOLÓGICOS: REVISÃO DE LITERATURA

CURING LIGHTS: LITERATURE REVIEW

FOTOPOLIMERIZADORES DENTALES: REVISIÓN DE LA LITERATURA

https://doi.org/10.56238/revgeov17n9-083

Data de submissão: 16/08/2026 **Data de publicação:** 16/09/2026

Beatriz Midhory Arruda
Graduada em Odontologia
Instituição: Universidade Paulista (UNIP)
E-mail: bea.arruda969@gmail.com

Ricardo Matsura Kodama
Mestre em Odontologia
Instituição: Universidade Paulista (UNIP)
E-mail: ricardo.kodama@docente.unip.br

Alessandra Sayuri Tuzita
Doutora em Odontologia
Instituição: Universidade Paulista (UNIP)
E-mail: alessandra.tuzita@docente.unip.br

Rosemary Baptista Martins Teixeira
Mestre em Odontologia
Instituição: Universidade Paulista (UNIP)
E-mail: rosemary.teixeira@docente.unip.br

Gilberto Araujo Noro Filho
Doutor em Odontologia
Instituição: Universidade Paulista (UNIP)
E-mail: gilberto.filho@docente.unip.br

Kelly Cristine Tarquinio Marinho
Doutora em Odontologia
Instituição: Universidade Paulista (UNIP)
E-mail: kelly.marinho@docente.unip.br

Elcio Magdalena Giovani
Doutor em Odontologia
Instituição: Universidade Paulista (UNIP)
E-mail: elcio.giovani@docente.unip.brasil

RESUMO
A fotopolimerização das resinas compostas representa um fator essencial para o sucesso clínico das restaurações odontológicas, estando diretamente relacionada ás características dos fotopolimerizadores e aos sistemas fotoiniciadores presentes nos materiais restauradores. O presente trabalho teve como

objetivo revisar a literatura acerca da evolução dos fotopolimerizadores odontológicos, dos principais fotoiniciadores utilizados nas resinas compostas e da influência desses sistemas na eficiência da polimerização e longevidade clínica das restaurações. Inicialmente, foram abordadas as primeiras unidades halógenas (QTH), suas características, vantagens e limitações, bem como a evolução tecnológica para os dispositivos LED monowave e, posteriormente, os aparelhos polywave. Observou-se que os sistemas LED proporcionaram avanços importantes, como maior eficiência energética, menor aquecimento e melhor compatibilidade espectral com os fotoiniciadores. Além disso, foram discutidos os principais fotoiniciadores utilizados na odontologia restauradora, como canforoquinona, PPD, TPO, BAPO e Ivocerin, destacando suas propriedades ópticas, mecanismos de ativação e influência nas propriedades mecânicas e estéticas das resinas compostas. A revisão evidenciou que os fotopolimerizadores monowave apresentam bom desempenho em materiais à base de canforoquinona, enquanto os dispositivos polywave demonstram maior versatilidade e eficiência na ativação de fotoiniciadores alternativos presentes em resinas modernas. Também foram abordadas as principais falhas relacionadas à polimerização incompleta, como redução das propriedades mecânicas, liberação de monômeros residuais e maior susceptibilidade à infiltração marginal e cárie secundária. Conclui-se que o sucesso clínico das restaurações em resina composta depende diretamente da compatibilidade entre o fotopolimerizador e o sistema fotoiniciador, bem como da correta aplicação dos protocolos clínicos pelo cirurgião-dentista. Dessa forma, a integração entre tecnologia, conhecimento científico e prática clínica é fundamental para garantir restaurações duráveis, esteticamente satisfatórias e biologicamente seguras.

Palavras-chave: Fotopolimerização. Resinas Compostas. Fotopolimerizadores. Fotoiniciadores. LED Polywave. Odontologia Restauradora.

ABSTRACT

The photopolymerization of composite resins represents an essential factor for the clinical success of dental restorations and is directly related to the characteristics of curing lights and the photoinitiator systems present in restorative materials. The present study aimed to review the literature regarding the evolution of dental curing lights, the main photoinitiators used in composite resins, and the influence of these systems on polymerization efficiency and the clinical longevity of restorations. Initially, the first quartz-tungsten-halogen (QTH) units, their characteristics, advantages, and limitations were discussed, as well as the technological evolution toward monowave LED devices and, subsequently, polywave curing lights. It was observed that LED systems provided important advances, such as greater energy efficiency, lower heat generation, and better spectral compatibility with photoinitiators. In addition, the main photoinitiators used in restorative dentistry, such as camphorquinone, PPD, TPO, BAPO, and Ivocerin, were discussed, highlighting their optical properties, activation mechanisms, and influence on the mechanical and esthetic properties of composite resins. The literature review showed that monowave curing lights present satisfactory performance in materials based on camphorquinone, whereas polywave devices demonstrate greater versatility and efficiency in activating alternative photoinitiators present in modern composite resins. The main failures related to incomplete polymerization were also addressed, including reduced mechanical properties, release of residual monomers, and greater susceptibility to marginal infiltration and secondary caries. It was concluded that the clinical success of composite resin restorations depends directly on the compatibility between the curing light and the photoinitiator system, as well as on the correct application of clinical protocols by the dentist. Therefore, the integration of technology, scientific knowledge, and clinical practice is essential to ensure durable, esthetically satisfactory, and biologically safe restorations.

Keywords: Photopolymerization. Composite Resins. Curing Lights. Photoinitiators. Polywave LED. Restorative Dentistry.

RESUMEN
La fotopolimerización de las resinas compuestas representa un factor esencial para el éxito clínico de las restauraciones odontológicas, estando directamente relacionada con las características de los fotopolimerizadores y los sistemas fotoiniciadores presentes en los materiales restauradores. El presente trabajo tuvo como objetivo revisar la literatura acerca de la evolución de los fotopolimerizadores odontológicos, de los principales fotoiniciadores utilizados en las resinas compuestas y de la influencia de estos sistemas en la eficiencia de la polimerización y longevidad clínica de las restauraciones. Inicialmente, fueron abordadas las primeras unidades halógenas (QTH), sus características, ventajas y limitaciones, así como la evolución tecnológica hacia los dispositivos LED monowave y, posteriormente, los aparatos polywave. Se observó que los sistemas LED proporcionaron avances importantes, como mayor eficiencia energética, menor calentamiento y mejor compatibilidad espectral con los fotoiniciadores. Además, fueron discutidos los principales fotoiniciadores utilizados en la odontología restauradora, como canforquinona, PPD, TPO, BAPO e Ivocerin, destacando sus propiedades ópticas, mecanismos de activación e influencia en las propiedades mecánicas y estéticas de las resinas compuestas. La revisión evidenció que los fotopolimerizadores monowave presentan buen desempeño en materiales a base de canforquinona, mientras que los dispositivos polywave demuestran mayor versatilidad y eficiencia en la activación de fotoiniciadores alternativos presentes en resinas modernas. También fueron abordadas las principales fallas relacionadas con la polimerización incompleta, como reducción de las propiedades mecánicas, liberación de monómeros residuales y mayor susceptibilidad a la infiltración marginal y caries secundaria. Se concluye que el éxito clínico de las restauraciones en resina compuesta depende directamente de la compatibilidad entre el fotopolimerizador y el sistema fotoiniciador, así como de la correcta aplicación de los protocolos clínicos por el cirujano-dentista. De esta forma, la integración entre tecnología, conocimiento científico y práctica clínica es fundamental para garantizar restauraciones duraderas, estéticamente satisfactorias y biológicamente seguras.

Palabras clave: Fotopolimerización. Resinas Compuestas. Fotopolimerizadores. Fotoiniciadores. LED Polywave. Odontología Restauradora.

1 INTRODUÇÃO

A introdução de resinas compostas fotopolimerizáveis se mostrou muito importante no avanço da odontologia restauradora, proporcionando restaurações estéticas com boas propriedades mecânicas, alta durabilidade e adesão eficaz aos tecidos dentários. As resinas compostas evoluíram significativamente desde as formulações iniciais baseadas em bisfenol-A glicidil metacrilato (Bis-GMA), incorporando fotoiniciadores mais eficientes e estáveis. (KOWALSKA; SOKOLOWSKI; BOCIONG, 2021; LARA *et al.*, 2021). Antes dessa evolução ocorrer as resinas eram quimicamente polimerizadas (o sistema era composto por uma pasta catalisadora e uma pasta base), dessa forma tinham algumas limitações como obter uma polimerização homogênea e a previsibilidade do processo de cura do material. Levando essas informações em consideração ficou claro a necessidade de buscar alternativas mais eficazes, como a criação de fotopolimerizadores odontológicos. (Granadeiro *et al.*, 2021).

O processo de fotopolimerização ocorre pela ativação dos fotoiniciadores das resinas compostas por luz em comprimentos de onda específicos. A canforoquinona (CQ), introduzida na década de 1970, é o fotoiniciador mais utilizado, atuando como Norrish II e necessitando de amina terciária, com pico de absorção em 468–470nm (MAROVIĆ *et al.*, 2024). No entanto, apresenta limitações como coloração amarelada, dependência de co-iniciador e menor eficiência (SEGRETO *et al.*, 2016; SILVA, 2023). Para contornar essas limitações, surgiram fotoiniciadores como TPO e Ivocerin, do tipo Norrish I, com absorção na faixa violeta (380–425 nm) (CHEN *et al.*, 2019).

O primeiro fotopolimerizador odontológico surgiu na década de 1970, marcando uma grande revolução na odontologia restauradora com a introdução das resinas compostas fotopolimerizáveis.(Granadeiro *et al.*, 2021). O fotoiniciador utilizado na época era o benzoin metil éter, sensível à radiação UV, o que permitia a polimerização dos monômeros, porém apresentava baixa profundidade de cura, instabilidade de cor e risco potencial à saúde, devido à exposição prolongada à radiação ultravioleta(RUEGGEBERG,2011). As lâmpadas halógenas rapidamente se tornaram o padrão clínico durante as décadas seguintes, por oferecerem maior segurança, controle do tempo de exposição e uma cura mais previsível em comparação aos sistemas ultravioleta (Jandt KD, Mills RW.2013). Logo em sequência surgiram tecnologias a laser de argônio e luz de arco que plasma, mas tinham como desvantagens o seu alto custo e complexidade de uso clínico, o que fez com que não fossem consolidadas na prática odontológica. (Silva, 2023). Já com o surgimento das luzes de LED representaram um grande avanço em comparação com as lâmpadas halógenas, onde esse dispositivo apresentava maior durabilidade, menor aquecimento e apresentava maior eficiência na emissão de comprimento de ondas específicas, o primeiro LED ficou conhecido como monowave, onde imitam

luzes em torno de 460-470nm, o que era eficientes para a QC mas não eram eficazes para outros fotoiniciadores mais atuais (Figueiredo *et al.*, 2023; Rombaldo *et al.*, 2021), Em resposta as limitações da monowave surgiram os LEDs de múltiplos picos de emissão, que são conhecidos como polywaves, eles são capazes de emitir uma ampla faixa de luzes que os permite a ativação simultânea de diversos fotoiniciadores, sendo assim garante maior versatilidade clínica, melhor grau de conversão, potencializa as propriedades estéticas e mecânica das restaurações e são considerados os mais modernos fotopolimerizadores (Borges, 2022; Lopes *et al.*, 2023).

A comparação entre os fotopolimerizadores monowave e polywave tem sido estudadas, onde foi observado que os monowaves apresentam desempenho satisfatório em resina fotoiniciadas unicamente pela QC, ja os polywave se mostraram superior em resinas que apresentam múltiplos fotoiniciadores, dessa forma ela garante melhor grau de conversão, resistência a degradação e garante a longevidade das restaurações.(Contreras *et al.*, 2021; Neto *et al.*, 2022)

Dessa forma, fica evidente que a evolução dos fotopolimerizadores ocorra paralelamente com o desenvolvimento das RC, o que onde se torna fundamental para a prática clínica, onde o conhecimento do cirurgião-dentista sobre os fotopolimerizadores associado ao conhecimento das propriedades necessárias para Fotopolimerizar a RC irão garantir estética satisfatória, melhor polimento e longevidade da restauração

Diante disso, o estudo dos materiais fotopolimerizáveis e seus mecanismos de ativação permanece essencial para compreender os avanços, limitações e perspectivas futuras das resinas compostas.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo analisar, por meio de revisão de literatura, os diferentes tipos de fotopolimerizadores odontológicos, com ênfase nas características, aplicabilidades e vantagens dos aparelhos do tipo polywave na prática clínica odontológica. Descrever a evolução dos fotopolimerizadores utilizados na odontologia, comparar os aparelhos halógenos, monowave e polywave quanto ao comprimento de onda, potência e eficiência de polimerização, analisar a influência da fotopolimerização na qualidade e longevidade das restaurações odontológicas, identificar as vantagens e limitações dos fotopolimerizadores polywave descritas na literatura científica e discutir a importância da escolha adequada do fotopolimerizador para o sucesso clínico dos procedimentos restauradores.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ORIGEM DOS FOTOPOLIMERIZADORES

Os primeiros sistemas de fotopolimerizadores surgiram na década de 1970, quando começaram a utilizar fontes de luzes capazes de ativar fotoiniciadores, como a conforoquinona, permitindo dessa forma a polimerização controlada diretamente na cavidade.(RUEGGBERG, 2017). Os primeiros aparelhos eram unidades de quartzo- tungstênio-halógena (QTH) que emitiam um amplo espectro de luz e calor, a polimerização ocorria quando a energia luminosa era absorvida pelos fotoiniciadores tipo II na presença de aminas co-iniciadoras, dessa forma eram formados radicais livres que iniciavam a cadeia polimérica. (JANDT, 2013; LARA, 2021). Com o decorrer dos anos seguintes houve uma evolução tecnológica em relação aos fotopolimerizadores, primeiramente os LEDs monowave e posteriormente os LEDs polywave com espectros ampliados, eles reduziram o aquecimento e aumentaram a eficiência energética, o que possibilitou uma cura mais eficiente dos fotoiniciadores alternativos.(SHORTALL, 2012; HASANAIN, 2021). A evolução dessas fontes de luzes permitiu o procedimentos clínicos mais previsíveis, como a profundidade da cura, a dureza e conversão de monômero, dessa forma contribuiu diretamente na durabilidade e sucesso das restaurações. (ALROMRAN, 2025; LIMA, 2023)

3.2 GERAÇÕES DE FOTOPOLIMERIZADORES

As unidades de cura com lâmpadas de quartzo-tungstênio-halógenas (QTH) e as de LED diferem-se amplamente quanto ao tempo de exposição, espectro de emissão, eficiência de energia e aquecimento.(KUMAR; VENKATESH, 2014; Leonard *et al.* 2002; Mills *et al.* 2002). As halógenas são tradicionalmente utilizadas e eficazes, mas sofrem a degradação de intensidade luminosa e geram calor excessivo, dessa forma aumentam os riscos de agressões térmicas na polpa dentária. (VENKATESH, 2014; Yap & Soh 2003). Já as unidades de LED apresentam emissão espectral concentrada na faixa de 440-480nm, esse grau de conversão é o mais próximo do pico de absorção da canforoquinona (465nm), dessa forma apresentam menor dissipação térmica e melhor aproveitamento da luz. (ILIE; FELIX, 2012; Jandt & Mills 2000). Em estudos que foram realizados comparações, mostram que os LEDs de segunda e terceira geração produzem grau de microdureza e conversão equivalentes ou superiores as halógenas, principalmente em camadas de até 2mm de RC. (PRICE *et al.*, 2005). Os LEDs são mais econômicos e duráveis((até 10.000 horas de vida útil) já que dispensam a troca de filtros e lâmpadas. (YAMAN *et al.*, 2011). Chegamos na conclusão de que enquanto as halógenas apresentam uma tecnologia acessível e comprovada, o LED teve maior aceitação na

odontologia moderna, principalmente por alinhar eficiência enérgica, ergonomia e estabilidade de potência.

3.3 TIPOS DE FOTOPOLIMERIZADORES

Os fotopolimerizadores evoluíram dos aparelhos de QTH, que durante décadas emitiam um espectro largo mas sofriam a perda de irradiância, um aquecimento acentuado e grande degradação da vida útil.(THOMAIDIS, 2024; GRANADEIRO *et al.*, 2020; FALK; HODGE; WHITNEY, 2011)

As unidades de LED monowave emitem picos concentrados na faixa azul com aproximadamente 450-470nm, elas são altamente eficazes para ativar o fotoiniciador mais comum CQ, proporciona alta irradiância com menor aquecimento e maior vida útil. (GONÇALVES, 2019; MARQUEZ; RUEGGEBERG, 2023; AQUINO-VALVERDE *et al.*, 2023).

Com a introdução de novos fotoiniciadores ficou claro a necessidade de um fotopolimerizador mais potente, sendo assim, surgiram as unidades polywave, adicionaram emissores na faixa violeta para abranger esses fotoiniciadores, melhorar o grau de conversão e propriedades mecânicas de resinas que usam iniciadores do tipo I. (MAROVIĆ, 2024; LIMA *et al.*, 2023; PRAES; DIETRICH; OLIVEIRA; ISOLAN, 2024).

3.3.1 Fotopolimerizador de luz halógena

Foram as primeiras fontes amplamente utilizadas para a cura da RC, ela caracterizava-se por ser uma emissão espectral relativamente ampla (400-500nm) e fornecia energia suficiente para ativar a QC e alguns outros fotoiniciadores presentes nas resinas. (HASANAIN, 2021; GRANADEIRO *et al.*, 2021; ASSIS *et al.*, 2020). Embora na época fossem considerados eficazes em muitos estudos por entregarem elevada energia e boa dureza superficial nos tempos de exposição (ESMAEILI *et al.*, 2014; VAEZI, 2014), os QTH apresentavam desvantagens importantes, como a vida útil limitada da lâmpada, necessidade de manutenção frequente, aquecimento do conjunto e fatores que impactam a constância da irradiância ao longo do tempo. (WAHBI, 2012; DUNNE; DAVIES; MILLAR, 1996)

Estudos comparativos mostraram que embora os QTH produziam valores de microdureza e grau de conversão satisfatório, as unidades de LED modernas podem alcançar um desempenho igual ou superior com menor grau de aquecimento e maios estabilidade de potência.(PIRMORADIAN *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2010; CERVEIRA *et al.*, 2010). Em relação a segurança pulpar, diversos estudos demostram que eles tendem a provocar maiores aumentos de temperatura intrapulpar em comparação com os LEDs atuais, sendo necessário ficar atento ao tempo de exposição e a distância de cura para evitar riscos térmicos. (ASMUSSEN, 2005; TULGAR, 2025; MAUCOSKI *et al.*, 2023). A

performance clínica do QTH depende não só do princípio do equipamento, mas também da manutenção, da geometria da ponteira do tempo de exposição e das características ópticas e químicas do fotoiniciador. (HASANAIN, 2021; PRICE *et al.*, 2015)

3.3.2 Fotopolimerizador monowave

Os fotopolimerizadores monowave emitem um único pico espectral, que geralmente esta em torno de 468-470nm, essa especificidade espectral resulta em alta eficiência na excitação da QC, boa irradiância útil ao longo da banda alvo e performance estável quando o material utiliza a QC como fotoiniciador. (CARDOSO *et al.*, 2021; LEPRINCE *et al.*, 2013). Esses dispositivos tendem a apresentar menor complexidade eletrônica e óptica, menor custo e menor emissão de comprimentos de onda fora da faixa azul, o que acaba reduzindo os riscos de reações indesejadas com fotoiniciadores alternativos. (SOARES, 2018; CORRÊA *et al.*, 2025). Diversos estudos realizados mostram limitações importantes, o monowave pode fornecer grau de conversão e microdureza inferior em materiais cuja a absorção se situa em faixas violetas/UV (VARSHNEY *et al.*, 2022)., além disso a forma operacional, como o diâmetro da ponta, distância da cura e a orientação do operador afetam a efetividade clínica. (PERES *et al.*, 2024). Com base nas pesquisas realizadas chegou-se a conclusão de que os monowaves são tecnicamente robustos e eficientes para grande parte das RC tradicionais, mas apresentam limitações claras frente aos novos fotoiniciadores que exigem atenção a forma correta de utilização na prática clínica. (VARSHNEY *et al.*, 2022; SOARES, 2018).

A radiação infravermelha (≈700 nm a 1 mm) caracteriza-se por comprimentos de onda mais longos e menor energia fotônica, estando associada principalmente à produção de calor, sem contribuir diretamente para a ativação dos fotoiniciadores odontológicos. A faixa da luz visível, especialmente entre 400 e 500 nm, é a mais relevante para a prática clínica, pois inclui o espectro azul (≈450–470 nm), correspondente ao pico máximo de absorção da canforoquinona, e a região violeta (≈380–420 nm), capaz de ativar fotoiniciadores alternativos do tipo I, como TPO e derivados de bisacilfosfina. (DUMAN; DOGAN, 2025; GODOY *et al.*, 2025; CORRÊA *et al.*, 2025).

3.3.3 Fotopolimerizador polywave

Os fotopolimerizadores polywave surgiram para superar as limitações espectral dos monowaves, eles emitem simultaneamente faixas violetas (380-420nm) e azul (420-470nm) para ativar a QC e outros fotoiniciadores alternativos (TPO, BAPO, Ivocerin), em vários estudos in vitro esse fotopolimerizador tem mostrado aumentar o grau de conversão (DC) e a microdureza em materiais que contenham iniciadores violeta. (MAROVIĆ, 2024). Estudos experimentais com aparelhos comerciais

como VALO e Bluephase evidenciam a inclusão do pico violeta melhora a cura de cimentos e compósitos com fotoiniciadores alternativos e reduz a diferença entre superfícies superiores e inferiores em provas de cura em bloco. (ANDREUCCI, 2023; REZAEI, 2019). Vale reforçar que nem sempre o LED polywave é melhor escolha para polimerização, com diversos estudos ficou claro que a compatibilidade espectro fotoiniciador/material e variáveis operacionais são determinantes para o sucesso no resultado clínico. (CONTRERAS, 2021; CASTRO-RAMIREZ, 2024). Outros estudos alertam a necessidade do operador verificar a irradiância real, calibração do aparelho e os protocolos do fabricante pois os modos de alta potência podem aumentar a temperatura e interferir diretamente na eficiência do aparelho. (LIMA, 2023; MAUCOSKI *et al.*, 2023; FERREIRA *et al.*, 2025). Em conclusão ao que foi relatado podemos dizer que eles oferecem vantagem teórica e prática para materiais que tenham em sua composição fotoiniciadores violetas e tendem a ser versáteis na utilização clínica, além do sucesso e longevidade das restaurações.

Já a radiação ultravioleta (≈100–400 nm), apesar de apresentar maior energia, não é empregada clinicamente nos fotopolimerizadores atuais devido ao potencial citotóxico e risco biológico aos tecidos bucais, sendo substituída por LEDs de alta eficiência na faixa azul-violeta (DUMAN; DOGAN, 2025; GODOY *et al.*, 2025; CORRÊA *et al.*, 2025).

4.4 FOTOINICIADORES

Os fotoiniciadores surgiram como principal componente para a polimerização de sistemas orgânicos ainda nas indústrias de tinta e vernizes da década 1970, posteriormente foi adaptado para a odontologia quando as resinas fotopolimerizáveis passaram a substituir os materiais convencionais, entre esses se destacou o sistema canforoquinona+ amina, que tornou-se padrão devido a sua capacidade de gerar radicais livres sob a luz azul e permitir um grau aceitável de conversão para as restaurações. (KOWALSKA, 2021. FERRACANE, 2011. NEUMANN et. al. 2005).

A importância dos fotoiniciadores em materiais dentários consiste em controlar o grau de conversão, cinética de polimerização, microdureza e as propriedades estéticas, esses parâmetros influenciam diretamente na biocompatibilidade das restaurações e na durabilidade clínica. (FERRACANE, 2024; CHO, 2022). Com o avanço dos fotopolimerizadores houve simultaneamente a necessidade de buscar novos fotoiniciadores, como o 1-fenil-1,2-propanodiona (PPD), TPO (fenil-2,4,6-trimetilbenzil-fosfina óxido / Lucirin TPO), BAPO (óxido de bis(2,4,6-trimetilbenzóil)fosfina) e iniciadores à base de germânio (Ivocerin), esses compostos apresentam maior reatividade em faixas de luz violeta-azul, menor tendência ao amarelamento e maior aspecto estético.(KOWALSKA, 2022). Algumas pesquisas destacam que a combinação ou substituição dos fotoiniciadores podem otimizar

propriedades estéticas e mecânicas, para que isso ocorra são necessários ajustes nos equipamentos de fotopolimerização para combinar espectro e irradiância. (OLIVEIRA, 2016).

Além disso essa recente evolução tem como prioridade sistemas com maior eficiência, menor citotoxidade, melhor solubilidade na matriz polimérica e estratégias para reduzir o amarelamento pós cura. Os fotoiniciadores passaram de moléculas amarelas para uma nova geração de sistemas combinados que ampliam o desempenho clínico das RC. (KLARIĆ, 2024; TOPA-SKWARCZYŃSKA, 2023)

4.4.1 Canforoquinona

A conforoquinona é uma dicetona amplamente empregada como fotossensibilizador nas RC devido ao seu de absorção na região azul-visível (468nm) o que a torna compatível com as lâmpadas de LED. (SHINTANI, 1985). O mecanismo fotoquímico clássico envolve excitação eletrônica da CQ pela luz, seguida de transferência de elétrons para uma amina terciária co-iniciadora, gerando radicais livres que iniciam a policondensação dos monômeros metacrílicos (ASMUSSEN, 2009; SCHNEIDER, 2008). O grau de conversão (DC) obtido em sistemas com CQ depende fortemente da concentração de QC e amina, da matriz, da absorção de luz e do protocolo de cura.(MACIEL *et al.*, 2018. DRESSANO *et al.* 2024. TULASI *et al.* 2024).

A CQ apresenta fotobleaching durante a exposição luminosa, sua absorção diminui enquanto a reação prossegue, o que altera o perfil temporal da taxa de iniciação e pode favorecer penetração de luz e cura em camadas mais profundas, dependendo da intensidade luminosa e da composição do compósito (ASMUSSEN, 2009). Do ponto de vista estético e de longevidade, a CQ é amarelada por natureza e tende a contribuir para alteração de cor ao longo do tempo, essa alteração de cor se da por conta da sua própria rede polimérica e reações secundárias de oxidação. (SCHNEIDER, 2008. PEREIRA *et al.* 2023. LARA *et al.* 2021)

Em termos de desempenho mecânico, demonstram em geral, bons valores de dureza e resistência quando a energia absorvida é adequada, entretanto as substituições ou combinações com iniciadores alternativos podem melhorar estética. (KOWALSKA, 2021; KOWALSKA, 2022). Sobre segurança e biocompatibilidade, há evidências experimentais de que CQ pode gerar espécies reativas de oxigênio e induzir dano oxidativo ao DNA em células in vitro sob certas condições, o que torna relevante a otimização para minimizar lixiviação de monômeros/iniciadores e a exposição de tecidos, entretanto os efeitos observados in vitro não implicam diretamente riscos clínicos sem consideração do contexto e a literatura recomenda precaução e mais estudos translacionais (WESSELS *et al.*, 2015; VOLK *et al.*, 2018. KARPIŃSKI *et al.* 2020)

4.4.2 Fenil-propanediona- PPD

O fotoiniciador PPD é uma dicetona desenvolvida como alternativa a conforoquinona para fotoiniciação, exibindo pico de absorção deslocado ligeiramente para comprimentos de ondas mais curtas em comparação a CQ, o que acaba permitindo o bom acoplamento com LEDs de picos de faixa azul-violeta e acaba melhorando a sensibilidade espectral quando é usada isoladamente ou em combinação com CQ (PARK, 1999; PYSZKA *et al.*, 2023; SANTOS *et al.*, 2023). Ele gera radicais livres por rota de clivagem e por transferência de próton e aminas co-iniciadoras, sendo capazes de iniciar a polimerização dos metacrilatos de maneira análoga ao sistema CQ/amina embora tenha diferenças na eficiência quântica e nas cinéticas iniciais de reação (SUN; CHAE, 2000; LEPRINCE *et al.*, 2022; ALZRAIKAT *et al.*, 2023).

Em relação ao DC a literatura concorda que em condições bem ajustadas, o DC final atingido por sistemas com PPD é comparado a CQ, mas com a diferença no perfil cinético, onde frequentemente tem a menor taxa de polimerização e cura mais lenta, dessa forma acabam reduzindo tensões de contração sem comprometer a conversão final, além disso a combinação de CQ+PPD mostram efeito sinérgico, elevando a absorção em 452nm e melhorando a cura com fontes polywave (SCHNEIDER, 2008; HADIS *et al.*, 2019; PEREIRA *et al.*, 2023; DRESSANO *et al.*, 2024).

Sobre a estética e estabilidade de cor, vários estudos indicam que o PPD apresenta menor contribuição para o amarelamento inicial e envelhecimento cromático, embora esse efeito dependa da concentração do iniciador, em concentrações intermediárias/altas PPD nem sempre reduz o amarelamento e pode apresentar comportamento variável entre formulações experimentais (DE OLIVEIRA, 2016; ARIKAN *et al.*, 2021; ILIE; STARK, 2022).

Quanto as propriedades mecânicas é relatado que o PPD isolado pode conduzir valores de dureza ligeiramente menores que a CQ em determinadas concentrações e sistemas, o que sugere a necessidade de ajuste das concentrações ou de uso combinado (CQ+PPD) para otimizar a resistência superficial sem perder os benefícios estéticos (BRANDT, 2011; REIS; LOGUERCIO, 2022; PEREIRA *et al.*, 2023).

Em relação a sensibilidade a fontes luminosas, o uso do PPD exige atenção ao casamento espectral: lâmpadas monowave centradas em 470nm ativam menos eficientemente PPD do que LEDs polywave ou fontes com componente violeta-azul, dessa forma recomendam sistemas iniciadores mistos para garantir a profundidade de cura e compatibilidade com diferentes LEDs (SUN; CHAE, 2000; SHIN, 2009; RANDOLPH *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2023).

4.4.3 Trimetilbenzil- diaxona- TPO

É um fotoiniciador do tipo I, quando ele absorve fótons (principalmente na faixa de 380–425 nm), sofre fratura gerando radicais livres capazes de iniciar a polimerização dos monômeros metacrílicos sem necessidade de co-iniciador amínico, esse mecanismo é chamado de “cleavage”, onde explica a sua eficiência em sistemas sem amina e sua melhor estabilidade de cor a longo prazo comparado ao sistema clássico CQ/amina (SANTINI, 2012; Leprince *et al.*, 2022; Alzraikat *et al.*, 2023).

Em relação ao DC, ele comparado ou superior ao sistemas de CQ/amina quando o equipamento de fotopolimerização possui emissão compatível, a DC final depende fortemente da concentração do TPO e da energia fornecida pela unidade de luz, sendo assim fica evidente que com o LED inadequado o TPO apresenta menor conversão (MILETIĆ, 2012; Matej Par *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2023).

Composições com TPO apresentam melhor estabilidade de cor e dureza superficial adequada, os estudos cinéticos mostram taxas de iniciação rápidas devido ao mecanismo tipo I, o que acaba favorecendo a cura superficial e processos de impressão 3D, mas requerem ajustes de concentração para evitar excessos de radicais e possíveis alterações nas propriedades mecânicas (KOWALSKA, 2022; Dressano *et al.*, 2024; Ilie *et al.*, 2022)

4.4.4 Bisacilfosfina- BAPO

É um fotoiniciador do tipo I, que ao absorver fótons na faixa do ultravioleta (350–420 nm) sofre clivagem gerando dois radicais iniciadores altamente reativos que promovem a polimerização dos monômeros metacrílicos sem necessidade de co-iniciador, que acaba reduzindo o amarelamento a longo prazo em comparação ao sistema clássico (NEUMANN, 2006; LEPRINCE *et al.*, 2022; ALZRAIKAT *et al.*, 2023). Estudos comparativos demonstram que, quando a fonte de luz é compatível, formulações contendo BAPO frequentemente mostram maior taxa de polimerização inicial e grau de conversão (DC) final igual ou superior ao de sistemas CQ/amina ou semelhantes a TPO, resultando também em maior dureza superficial e boa resistência à flexão em compósitos experimentais (MEEREIS, 2014; PEREIRA *et al.*, 2023; PAR *et al.*, 2020; DRESSANO *et al.*, 2024).

A eficiência do BAPO depende fortemente da concentração utilizada e da solubilidade da molécula na matriz resinosa, a solubilidade limitada de algumas formas sólidas de BAPO pode prejudicar distribuição homogênea e, portanto, a conversão completa, o que tem motivado o desenvolvimento de variantes líquidas ou manipuladas para melhor compatibilidade (RADTECH/CHIU, 2010; KARPIŃSKI *et al.*, 2020; SOUZA *et al.*, 2022).

Em termos de profundidade de cura, BAPO pode apresentar desempenho semelhante ou ligeiramente superior ao de CQ quando a LCU oferece energia adequada no espectro de absorção do iniciador; entretanto, LEDs monowave centradas apenas em 460–470 nm podem subutilizar BAPO, reduzindo o DC na região mais profunda — daí a recomendação de combinar BAPO com unidades polywave ou fontes que emitam em comprimentos mais curtos para máxima eficiência (IKEMURA, 2008; RANDOLPH *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2023). Pelas suas altas taxas de iniciação, boa eficiência de conversão e vantagens estéticas, o BAPO e seus derivados são considerados fotoiniciadores promissores para resinas odontológicas e aplicações de impressão (DRESSANO *et al.*, 2024; ALZRAIKAT *et al.*, 2023).

4.4.5 Ivocerin

É um fotoiniciador composto à base de germânio que atua como fotoiniciador do tipo I, ou seja, sofre clivagem fotoinduzida gerando radicais livres diretamente capazes de iniciar a polimerização dos monômeros metacrílicos sem necessidade de co-iniciadores amínicos, o que explica sua elevada eficiência de iniciação e menor potencial de amarelamento associado a sistemas CQ/amina (HAAS, 2018; MOSZNER *et al.*, 2020; BAGIS *et al.*, 2021).

O Ivocerin apresenta um alto coeficiente de extinção molar e absorção deslocada para comprimentos de onda mais curtos (faixa aproximada ~370–460 nm), razão pela qual responde muito bem a unidades de fotopolimerização que emitem componente violeta/azul (polywave). Ele atinge graus de DC elevados e maior profundidade de cura em comparação a algumas formulações à CQ, permitindo cura eficiente em incrementos de 4 mm (ALKHUDHAIRY, 2018; HADIS *et al.*, 2019; MARCHESI *et al.*, 2020; SCOTTI *et al.*, 2021).

Em termos estéticos e de estabilidade de cor, o uso de Ivocerin reduz a necessidade de aminas promotoras de iniciação, contribuindo para menor amarelamento pós-cura em alguns estudos comparativos (ALKHUDHAIRY, 2018; TOMIC *et al.*, 2022; CERVANTES *et al.*, 2023).

Quanto à segurança e regulamentação, a literatura sobre acilgermanos indica perfil toxicológico favorável em aplicações médicas/odontológicas quando usados nas concentrações recomendadas, mas recomenda-se testar cada formulação quanto à eluição de monômeros residuais, citotoxicidade e estabilidade a longo prazo, pois resultados variam com a composição e condições de cura (FRÜHWIRT, 2020; WIESNER, 2021; GONÇALVES *et al.*, 2021; PFEIFER *et al.*, 2020).

4.5 FALHAS NA POLIMERIZAÇÃO

A polimerização incompleta das resinas compostas é uma das principais causas de falha restauradora, pois reduz propriedades mecânicas (microdureza, resistência ao desgaste), aumenta liberação de monômeros citotóxicos e favorece degradação e infiltração marginal, predispondo à sensibilidade pós-operatória e cárie secundária (Moldovan, 2019). Fatores que contribuem para a polimerização insuficiente incluem: irradiância inadequada ou incompatibilidade entre a fonte de luz e o fotoiniciador, tempos de cura insuficientes e técnica de aplicação incorreta, o que diminui o grau de conversão em regiões profundas da restauração (Alpöz, 2008).

A presença de uma camada inibida pelo oxigênio na superfície, impede a reação livre-radical na interface ar/material, deixando uma película superficial pouco polimerizada que pode prejudicar união entre incrementos ou favorecer manchas e desgaste superficial (Panchal, 2020). Além disso, propriedades intrínsecas do material influenciam a contração de polimerização e o grau de conversão, de modo que resinas com maior teor de monômero difícil de converter ou com opacidade elevada apresentam maior chance de conversão incompleta (Lins, 2019; Emmler, 2008). O resultado clínico prático dessas falhas inclui contração e tensões marginais que geram microgaps, degradação da interface adesiva e libertação continuada de monômeros solúveis com potencial citotóxico e inflamatório no tecido pulpar e nos tecidos periodontais (Gupta, 2012; Duruk, 2022). Estudos recentes também mostram que protocolos de fotopolimerização e o uso correto da técnica de inserção reduzem significativamente a quantidade de monômeros remanescentes e melhoram o desempenho a longo prazo das restaurações; contudo, mesmo com medidas corretivas, variações entre LEDs e materiais exigem avaliação específica para cada combinação material-luz (Lima, 2012; COSTA *et al.*, 2023; MASSOLA FILHO *et al.*, 2023)

4.6 POTÊNCIA DOS FOTOPOLIMERIZADORES E SUA AÇÃO NAS RESINAS

A potência de emissão luminosa e o tempo de exposição são fatores determinantes para a adequada polimerização das resinas compostas. As unidades halógenas (QTH) tradicionalmente apresentam potência variando entre 400 e 800 mW/cm², geralmente exigindo tempos de exposição entre 20 e 40 segundos para garantir grau de conversão satisfatório. Em contrapartida, os dispositivos LED monowave modernos operam frequentemente com irradiância entre 800 e 1.200 mW/cm², possibilitando redução do tempo clínico para aproximadamente 10 a 20 segundos quando utilizados em resinas contendo canforoquinona como principal fotoiniciador. Já as unidades polywave, por apresentarem múltiplos picos espectrais e potência que pode ultrapassar 1.200 mW/cm², permitem ativação de diferentes fotoiniciadores e, em protocolos de alta intensidade, podem reduzir ainda mais

o tempo de cura, embora requeiram cautela quanto ao aumento térmico intrapulpar. Estudos recentes demonstram que a combinação entre irradiância adequada e tempo de exposição correto é essencial para alcançar profundidade de cura e grau de conversão ideais, independentemente do tipo de fonte luminosa utilizada (ALSHAHRI *et al.*, 2020; SHIMOKAWA *et al.*, 2021; MAROVIĆ *et al.*, 2022; PRICE *et al.*, 2023).

4.7 COMPRIMENTO DE ONDAS

O espectro eletromagnético compreende uma ampla faixa de radiações organizadas de acordo com seus comprimentos de onda e níveis de energia, estendendo-se do infravermelho ao ultravioleta. A energia fotônica é inversamente proporcional ao comprimento de onda, de modo que comprimentos menores apresentam maior energia e maior capacidade de excitação molecular. Na odontologia restauradora, a compreensão dessas faixas é fundamental, pois a eficiência da fotopolimerização depende da compatibilidade entre o espectro de emissão do fotopolimerizador e o espectro de absorção do fotoiniciador presente na resina composta. A correspondência espectral adequada influencia diretamente o grau de conversão, profundidade de cura e propriedades mecânicas do material restaurador (CORRÊA *et al.*, 2025; GODÓY *et al.*, 2025; LOPES, P. C.; BRAGA, F. P.; MONTEIRO, J. F.; ROCHA, A. M.; MARTINS, V. M, 2023).

5 DISCUSSÃO

A fotopolimerização das resinas compostas constitui um dos processos mais importantes para o sucesso clínico das restaurações adesivas, sendo diretamente influenciada pelas características dos fotopolimerizadores e pelos sistemas fotoiniciadores presentes nos materiais restauradores. A literatura científica demonstra que a evolução desses dispositivos ocorreu de forma progressiva ao longo das últimas décadas, acompanhando o desenvolvimento das resinas compostas e a necessidade de melhorar a eficiência da cura, reduzir falhas restauradoras e aumentar a longevidade clínica dos tratamentos odontológicos.

Historicamente, os primeiros sistemas de fotopolimerização utilizados na odontologia restauradora foram baseados em lâmpadas de quartzo-tungstênio-halógena (QTH), que se destacavam por emitir um espectro luminoso relativamente amplo capaz de ativar fotoiniciadores como a canforoquinona. Esses dispositivos desempenharam papel fundamental na consolidação das resinas compostas como materiais restauradores amplamente utilizados. Entretanto, ao longo do tempo, estudos passaram a demonstrar limitações importantes dessas unidades, como a degradação progressiva da intensidade luminosa, a geração de calor excessivo e a necessidade frequente de

manutenção, fatores que poderiam comprometer a eficiência da polimerização e a previsibilidade clínica dos procedimentos restauradores (JANDT; MILLS, 2000; VENKATESH, 2014; WAHBI, 2012).

Nesse contexto, o desenvolvimento dos fotopolimerizadores à base de LED representou um avanço significativo na odontologia restauradora moderna. Esses dispositivos apresentam maior eficiência energética, menor dissipação térmica e maior durabilidade operacional quando comparados às unidades halógenas. Além disso, os LEDs possuem emissão espectral mais direcionada e compatível com o pico de absorção da canforoquinona, localizado aproximadamente em 465 nm, o que favorece maior aproveitamento da energia luminosa durante o processo de polimerização. Estudos comparativos demonstram que as unidades LED de segunda e terceira geração podem produzir valores de microdureza e grau de conversão equivalentes ou até superiores aos obtidos com aparelhos halógenos, especialmente quando utilizados em incrementos adequados de resina composta (PRICE *et al.*, 2005; ILIE; FELIX, 2012; YAMAN *et al.*, 2011).

Entretanto, a eficácia da fotopolimerização não depende apenas da potência do equipamento, mas também da compatibilidade espectral entre a fonte luminosa e os fotoiniciadores presentes no material restaurador. Nesse sentido, os fotopolimerizadores monowave representam um avanço importante por apresentarem emissão concentrada na faixa azul do espectro visível, o que favorece a ativação eficiente da canforoquinona, principal fotoiniciador utilizado nas resinas compostas convencionais. Diversos estudos indicam que esses dispositivos apresentam bom desempenho clínico quando utilizados com materiais baseados nesse sistema iniciador (LEPRINCE *et al.*, 2013; CARDOSO *et al.*, 2021).

No entanto, com o avanço da ciência dos materiais odontológicos, novas formulações de resinas compostas passaram a incorporar fotoiniciadores alternativos com espectros de absorção distintos, especialmente na região violeta do espectro eletromagnético. Diante dessa necessidade, surgiram os fotopolimerizadores polywave, que emitem simultaneamente luz azul e violeta, permitindo a ativação de diferentes sistemas iniciadores presentes nas resinas compostas modernas. Estudos demonstram que essa tecnologia amplia a compatibilidade entre o equipamento e o material restaurador, contribuindo para melhorar o grau de conversão e a profundidade de cura em determinados compósitos odontológicos (MAROVIĆ, 2024; PRAES *et al.*, 2024; CASTRO-RAMIREZ, 2024).

Paralelamente à evolução dos fotopolimerizadores, observa-se também um avanço significativo no desenvolvimento dos fotoiniciadores utilizados em materiais restauradores. A canforoquinona permanece como o sistema iniciador mais amplamente empregado na odontologia restauradora devido à sua eficiência na geração de radicais livres quando ativada por luz azul. No

entanto, algumas limitações associadas a esse iniciador, como a coloração amarelada e possíveis alterações cromáticas ao longo do tempo, estimularam o desenvolvimento de novos compostos capazes de melhorar as propriedades ópticas e estéticas das resinas compostas (ASMUSSEN, 2009; SCHNEIDER, 2008).

Entre os fotoiniciadores alternativos mais estudados na literatura destacam-se o PPD, TPO, BAPO e os iniciadores à base de germânio, como o Ivocerin. Esses sistemas apresentam maior sensibilidade à faixa violeta-azul do espectro luminoso e, em alguns casos, maior eficiência fotoquímica quando comparados ao sistema tradicional CQ/amina. Além disso, muitos desses iniciadores não necessitam de co-iniciadores amínicos, o que contribui para maior estabilidade de cor e menor tendência ao amarelamento das restaurações ao longo do tempo (NEUMANN, 2006; MILETIĆ, 2012; KOWALSKA, 2022; ALKHUDHAIRY, 2018).

Nesse contexto, torna-se evidente que a evolução dos fotopolimerizadores e dos fotoiniciadores ocorreu de forma paralela, sendo ambos determinantes para o desempenho clínico das resinas compostas. A literatura enfatiza que a escolha adequada do fotopolimerizador deve considerar não apenas a potência do equipamento, mas também a compatibilidade espectral com o material restaurador utilizado, além das condições clínicas de aplicação.

Outro aspecto amplamente discutido nos estudos científicos refere-se às falhas no processo de polimerização das resinas compostas, que continuam sendo um dos principais fatores associados ao insucesso restaurador. A polimerização incompleta pode resultar em redução das propriedades mecânicas, aumento da liberação de monômeros residuais e maior suscetibilidade á infiltração marginal, fatores que favorecem o desenvolvimento de cárie secundária e sensibilidade pós-operatória (MOLDOVAN, 2019; DURUK, 2022). Entre os fatores que contribuem para essas falhas destacam-se irradiância inadequada, tempo insuficiente de exposição à luz e incompatibilidade entre o espectro de emissão do fotopolimerizador e o sistema fotoiniciador presente na resina composta (ALPÖZ, 2008; COSTA *et al.*, 2023).

Além desses fatores, aspectos operatórios também exercem influência significativa na eficiência da fotopolimerização. A técnica de inserção incremental, a espessura do material restaurador, a distância entre a ponteira do aparelho e a superfície da restauração, bem como a angulação da luz durante o procedimento, podem afetar diretamente a profundidade de cura e o grau de conversão obtido (PERES *et al.*, 2024; PRICE *et al.*, 2015). Dessa forma, a correta aplicação dos protocolos clínicos torna-se essencial para garantir resultados restauradores satisfatórios e duradouros.

Outro fator importante discutido na literatura refere-se á potência dos fotopolimerizadores e ao tempo de exposição necessário para atingir conversão adequada da resina composta. Enquanto

unidades halógenas geralmente apresentam irradiância menor e exigem tempos de exposição mais longos, os dispositivos LED modernos podem alcançar maior potência luminosa, possibilitando redução do tempo clínico sem comprometer a eficiência da polimerização. Contudo, protocolos de alta intensidade devem ser utilizados com cautela, uma vez que o aumento excessivo da temperatura intrapulpar pode representar risco biológico aos tecidos dentários (ALSHAHRI *et al.*, 2020; SHIMOKAWA *et al.*, 2021; PRICE *et al.*, 2023).

Do ponto de vista físico, a compreensão do espectro eletromagnético e da relação entre comprimento de onda e energia fotônica também desempenha papel fundamental no entendimento do processo de fotopolimerização. Comprimentos de onda menores apresentam maior energia e maior capacidade de excitação molecular, o que explica a eficiência das faixas azul e violeta na ativação dos fotoiniciadores utilizados na odontologia restauradora. Dessa forma, a correspondência entre o espectro de emissão do fotopolimerizador e o espectro de absorção do fotoiniciador influencia diretamente o grau de conversão, a profundidade de cura e as propriedades mecânicas das resinas compostas (CORRÊA *et al.*, 2025; GODOY *et al.*, 2025; LOPES *et al.*, 2023).

6 CONCLUSÃO

A partir da análise da literatura, conclui-se que a fotopolimerização das resinas compostas exerce papel fundamental no sucesso clínico das restaurações, estando diretamente relacionada às características dos fotopolimerizadores e aos sistemas fotoiniciadores presentes nos materiais restauradores. A evolução tecnológica desses dispositivos, especialmente com o surgimento dos LEDs polywave, trouxe avanços importantes para a odontologia restauradora, proporcionando maior eficiência, previsibilidade e versatilidade clínica.

Embora os fotopolimerizadores monowave apresentem desempenho satisfatório em resinas à base de canforoquinona, sua limitação espectral pode comprometer a ativação de fotoiniciadores alternativos presentes em materiais mais modernos. Em contrapartida, os dispositivos polywave demonstram maior capacidade de ativação simultânea de diferentes fotoiniciadores, contribuindo para melhor grau de conversão, melhores propriedades mecânicas e maior longevidade das restaurações.

Além disso, observou-se que fatores como irradiância, tempo de exposição, técnica operatória e compatibilidade entre o fotoiniciador e a fonte de luz influenciam diretamente a qualidade da polimerização e o desempenho clínico das resinas compostas.

Dessa forma, conclui-se que o sucesso das restaurações não depende apenas da escolha do material restaurador, mas também do conhecimento do cirurgião-dentista sobre os princípios da fotopolimerização e da correta utilização dos fotopolimerizadores, especialmente dos sistemas

polywave, que atualmente representam a tecnologia mais versátil e eficiente para os materiais restauradores contemporâneos

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, por me dar força, sabedoria e determinação durante toda a minha jornada acadêmica. Sem a Sua presença, nada disso seria possível.

Agradeço aos meus pais, ao Willian, por escutar todos os meus desabafos sobre o dia a dia na faculdade, e a Sayuri, por sempre ser o meu norte, me apoiando nos momentos em que eu duvidava de mim mesma e pensava que não seria capaz. Obrigada por terem me permitido chegar até aqui, mesmo que muitas vezes nos bastidores, renunciando aos sonhos de vocês para que eu pudesse realizar o meu, sem nunca deixarem que eu desistisse.

Agradeço a todos os professores que estiveram comigo durante essa jornada, em especial à Professora Alessandra, por me proporcionar oportunidades que muitos jamais proporcionariam, além das conversas, apoio e companhia. Cada aprendizado contribuiu não apenas para a minha formação acadêmica, mas também para o meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço ao meu orientador, Ricardo Kodama, que foi essencial não somente na produção deste trabalho, mas em toda a minha trajetória desde o início da faculdade. Obrigada por tornar os dias mais tranquilos, pelos ensinamentos, pela amizade e, principalmente, por toda paciência, dedicação e pelos conselhos tão importantes ao longo dessa caminhada.

Agradeço aos meus amigos, que estiveram ao meu lado durante toda a graduação, compartilhando a rotina, os desafios e as conquistas. A presença de vocês tornou essa trajetória muito mais especial.

Agradeço à minha dupla de estágio, Danielle, por estar sempre comigo, compartilhando alegrias, ansiedades, risos e choros, além das pequenas e grandes conquistas do dia a dia. Saiba que o seu apoio e companheirismo foram essenciais para que eu concluísse esse processo de forma mais leve e tranquila.

Agradeço também a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa etapa tão importante da minha vida e contribuíram para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço à odontologia, profissão que escolhi com carinho e admiração, e que diariamente reforça em mim o desejo de evoluir, cuidar e transformar vidas através do sorriso.

REFERÊNCIAS

ALKHUDHAIRY, F.; ALKHERAIF, A.; NASEEM, M.; KHAN, R.; VOHRA, F. Degree of conversion and depth of cure of Ivocerin containing photo-polymerized resin luting cement in comparison to conventional luting agents. Pakistan Journal of Medical Sciences, v. 34, n. 2, p. 253–259, 2018. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5954360/. Acesso em: 28 out. 2025.

ALPÖZ, A. R. *et al.* Effects of light curing method and exposure time on degree of conversion and microhardness of composite resins. European Journal of Dentistry, 2008. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2633152/. Acesso em: 28 out. 2025.

ALROMRAN, W. K. Evolution of Dental Resin Adhesives—A Comprehensive Review. Review, 2025. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11942969/. Acesso em: 28 out. 2025.

ALSHAHRI, A. *et al.* Effect of irradiance and exposure time on the polymerization of resin-based composites. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 2020. DOI: https://doi.org/10.1111/jerd.12559. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jerd.12559. Acesso em: 28 out. 2025.

ALZRAIKAT, Hanan *et al.* Effect of alternative photoinitiators on polymerization kinetics and properties of resin composites. Polymers, v. 15, n. 6, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15061432. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4360/15/6/1432. Acesso em: 28 out. 2025.

ANDREUCCI, A. C. *et al.* Color stability and degree of conversion of light-cured resin cement and composite when polymerized with VALO Grand (polywave) and other LCUs. Open Dentistry Journal, v. 17, 2023. Disponível em: https://opendentistryjournal.com/VOLUME/17/ELOCATOR/e187421062305150/FULLTEXT/. Acesso em: 27 out. 2025.

AQUINO-VALVERDE, A. J. *et al.* Light-curing effectiveness using LED lamps: a review. International Journal of Dental Research, 2023. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38389554/. Acesso em: 28 out. 2025.

ASMUSSEN, E.; JOHANSEN, E. B. Temperature rise induced by some LED and QTH curing units. Dental Materials, v. 21, n. 6, p. 514–520, 2005. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15693836/. Acesso em: 27 out. 2025.

ASSIS, Andreia *et al.* Effect of light sources and curing mode techniques on polymerization of resin composites. Journal of Applied Oral Science, v. 20, n. 2, p. 266–270, 2012. DOI: https://doi.org/10.1590/S1678-77572012000200021. Disponível em: https://revistas.usp.br/jaos/article/view/46228. Acesso em: 28 out. 2025.

BAGIS, Bora *et al.* Influence of different photoinitiator systems on the polymerization and properties of resin composites. Journal of Prosthetic Dentistry, v. 125, n. 4, p. 692–699, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.03.018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022391320301966. Acesso em: 28 out. 2025.

BORGES, A.; CHASQUEIRA, F.; PORTUGAL, J. Grau de conversão de resinas compostas: influência do método de fotopolimerização. Revista Portuguesa de Estomatologia, Medicina Dentária e Cirurgia Maxilofacial, v. 50, n. 4, p. 199–206, 2009. Disponível em: https://www.elsevier.es/en-

revista-revista-portuguesa-estomatologia-medicina-dentaria-330-resumen-grau-conversao-resinas-compostas-influencia-S1646289009700196. Acesso em: 29 mar. 2026.

BRANDT, W. C. *et al.* Can phenyl-propanedione influence Knoop hardness, rate of polymerization and other properties of resin composites? Dental Materials, v. 27, n. 2, p. e62–e69, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.10.010. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21146286/. Acesso em: 28 out. 2025.

CARDOSO, I. O. *et al.* Influence of tip diameter and light spectrum of curing units on light transmission and activation of camphorquinone. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, v. 36, 2021. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9339921/. Acesso em: 27 out. 2025.

CASTRO-RAMIREZ, L. *et al.* Effect of polywave and monowave light-curing units on the microtensile bond strength and failure types of bulk-fill resin composites. Clinical, Cosmetic and Investigational Dentistry, v. 16, p. 95–104, 2024. Disponível em: https://www.dovepress.com/effect-of-polywave-and-monowave-light-curing-units-on-the-microtensile-peer-reviewed-fulltext-article-CCIDE. Acesso em: 27 out. 2025.

CERVANTES, Valeria *et al.* Color stability of resin composites containing alternative photoinitiators. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, v. 35, n. 2, p. 310–318, 2023. DOI: https://doi.org/10.1111/jerd.12912. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jerd.12912. Acesso em: 28 out. 2025.

CERVEIRA, Guilherme Pessôa *et al.* Degree of conversion and hardness of na orthodontic resin cured with a light-emitting diode and a quartz-tungsten-halogen light. European Journal of Orthodontics, v. 32, n. 1, p. 83–86, 2010. DOI: https://doi.org/10.1093/ejo/cjp048. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19726490/. Acesso em: 28 out. 2025.

CHO, K. *et al.* Dental resin composites: a review on materials to product. Materials, v. 15, n. 21, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15217642. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/15/21/7642. Acesso em: 28 out. 2025.

CONTRERAS, S. C. M. *et al.* Monowave and polywave light-curing of bulk-fill composites: effect on degree of conversion and mechanical properties. Biomaterial Investigations in Dentistry, v. 8, n. 1, p. 121–130, 2021. DOI: https://doi.org/10.1080/26415275.2021.1937181. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/26415275.2021.1937181. Acesso em: 27 out. 2025.

CORRÊA, Amanda *et al.* Polywave LEDs increase the degree of conversion of composite resins, but not adhesive systems: a systematic review and meta-analysis of in vitro studies. Lasers in Medical Science, v. 40, n. 1, p. 111, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s10103-025-04368-0. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39982569/. Acesso em: 28 out. 2025.

COSTA, P. O. *et al.* A influência do fotopolimerizador sobre a microdureza das resinas compostas. Revista Eletrônica Acervo Saúde, v. 23, 2023. DOI: https://doi.org/10.25248/reas.e12603.2023. Disponível em: https://acervomais.com.br/index.php/saude/article/view/e12603. Acesso em: 28 out. 2025.

DE OLIVEIRA, D. C. R. S. *et al.* Evaluation of phenyl-propanedione on yellowing and chemical-mechanical properties of experimental dental resin-based materials. Journal of Applied Oral Science,

v. 24, n. 6, p. 555–562, 2016. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5115943/. Acesso em: 28 out. 2025.

DRESSANO, Diogo *et al.* Achieving property enhancements in dental resin composites via reduced concentrations of camphorquinone within a ternary initiator system. Dental Materials, v. 40, n. 9, p. 1400–1408, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.06.022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S010956412400289X. Acesso em: 28 out. 2025.

DUMAN, Ayse Nurcan; DOGAN, Arife. The effect of resin type and placement technique on the hardness of resin-based composites polymerized with LED and UV light-curing units. Polymers, v. 17, n. 6, p. 774, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/polym17060774. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4360/17/6/774. Acesso em: 28 out. 2025.

DURUK, G. *et al.* Evaluation of residual monomer release after the polymerization of restorative materials. BMC Oral Health, v. 22, n. 1, 2022. DOI: https://doi.org/10.1186/s12903-022-02260-9. Disponível em: https://bmcoralhealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12903-022-02260-9. Acesso em: 28 out. 2025.

EMMLER, J. *et al.* Cytotoxicity of the dental composite component TEGDMA. Dental Materials, v. 24, n. 12, p. 1676–1680, 2008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S010956410800105X. Acesso em: 28 out. 2025.

ESMAEILI, B. *et al.* Hardness evaluation of composite resins cured with QTH and LED light sources. Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects, v. 8, n. 1, p. 40–44, 2014. DOI: https://doi.org/10.5681/joddd.2014.007. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4091698/. Acesso em: 27 out. 2025.

ESMAEILI, Behnaz; SAFARCHERATI, Hengameh; VAEZI, Assila. Hardness evaluation of composite resins cured with QTH and LED. Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects, v. 8, n. 1, p. 40–44, 2014. DOI: https://doi.org/10.5681/joddd.2014.007. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4091698/. Acesso em: 28 out. 2025.

FALK, R. J.; HODGE, D. O.; WHITNEY, R. R. Influence of light curing units on failure of restorations: comparative study of QTH and LED units. Journal of Conservative Dentistry, v. 14, n. 3, p. 293–297, 2011. Disponível em: https://journals.lww.com/jcde/fulltext/2011/14030/influence_of_light_curing_units_on_failure_of.5.aspx. Acesso em: 28 out. 2025.

FERRACANE, J. L. A historical perspective on dental composite restorative materials. Dental Materials, v. 40, n. 1, p. 1–12, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.10.012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564123004207. Acesso em: 28 out. 2025.

FERRACANE, Jack L. Resin composite—state of the art. Dental Materials, v. 27, n. 1, p. 29–38, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.10.020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564110005006. Acesso em: 28 out. 2025.

FERREIRA, M. E. *et al.* Análise da potência dos fotopolimerizadores em consultórios odontológicos. Comunicação em Ciências da Saúde, v. 36, 2025. DOI: https://doi.org/10.51723/jm19g592. Disponível em: https://periodicos.unb.br/index.php/comunicacaoemcienciasdasaude/article/view/592. Acesso em: 28 out. 2025.

FIGUEIREDO, O. M. C. *et al.* Fatores que determinam a fotopolimerização adequada das restaurações de resina composta. Brazilian Journal of Health Review, v. 6, n. 4, p. 16508–16523, 2023. DOI: https://doi.org/10.34119/bjhrv6n4-160. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJHR/article/view/61566. Acesso em: 28 out. 2025.

FRÜHWIRT, P. *et al.* The chemistry of acylgermanes: triacylgermenolates represent valuable building blocks for the synthesis of a variety of germanium-based photoinitiators. Inorganic Chemistry, v. 59, n. 21, p. 15146–15157, 2020. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c02193. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7581296/. Acesso em: 28 out. 2025.

GODOY, Eduardo Fernández *et al.* Efficiency and limitations of polywave light-curing units in restorative dentistry: a systematic review. Clinical Oral Investigations, v. 29, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s00784-025-06457-4. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40668390/. Acesso em: 28 out. 2025.

GONÇALVES, Flávia *et al.* Cytotoxicity and biocompatibility of dental resin materials: a review. Clinical Oral Investigations, v. 25, p. 4301–4312, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s00784-021-03810-2. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00784-021-03810-2. Acesso em: 28 out. 2025.

GONÇALVES, J. F. Effect of light curing units on degree of conversion and mechanical properties of bulk-fill composites. 2019. Dissertação (Mestrado em Odontologia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

GRANADEIRO, Clara F. *et al.* Evolução dos aparelhos fotopolimerizadores – revisão de literatura. Revista Pró-UniverSUS, v. 12, n. 2, 2020. DOI: https://doi.org/10.21727/rpu.v12i2.3005. Disponível em: https://editora.univassouras.edu.br/index.php/RPU/article/view/3005. Acesso em: 28 out. 2025.

GRANADEIRO, Clara Furtado *et al.* Evolução dos aparelhos fotopolimerizadores – revisão de literatura. Revista Pró-UniverSUS, v. 12, n. 2, p. 1–12, 2021. DOI: https://doi.org/10.21727/rpu.v12i2.3005. Disponível em: https://editora.univassouras.edu.br/index.php/RPU/article/view/3005. Acesso em: 28 out. 2025.

GUPTA, S. K. *et al.* Release and toxicity of dental resin composite. Toxicology International, v. 19, n. 3, p. 225–234, 2012. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3532765/. Acesso em: 28 out. 2025.

HAAS, M.; SCHREINER, M. *et al.* Recent advances in germanium-based photoinitiator chemistry. Chemistry – A European Journal, v. 24, n. 53, p. 13910–13921, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/chem.201705567. Disponível em: https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/chem.201705567. Acesso em: 28 out. 2025.

HADIS, M. A. *et al.* Effect of curing light and photoinitiator system on polymerization and shrinkage stress. Dental Materials, v. 35, n. 2, p. 208–216, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.11.002. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564118304452. Acesso em: 28 out. 2025.

HASANAIN, F. A. *et al.* Utilizing light cure units: a concise narrative review. Polymers, v. 13, n. 10, 2021. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8157231/. Acesso em: 27 out. 2025.

IKEMURA, K.; ICHIZAWA, A. *et al.* UV-VIS spectra and photoinitiation behaviors of acylphosphine oxide (APO) and bisacylphosphine oxide (BAPO) derivatives. Dental Materials Journal, v. 27, n. 5, p. 765–774, 2008. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19241683/. Acesso em: 28 out. 2025.

ILIE, Nicoleta; STARK, Kerstin. Curing behaviour and mechanical performance of resin composites based on different photoinitiators. Dental Materials, v. 38, n. 2, p. 200–210, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.11.012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564121004661. Acesso em: 28 out. 2025.

ISOLAN, Cristina Pereira. Fotopolimerizadores odontológicos: revisão narrativa. Revista do CROMG, v. 22, supl. 4, 2024. DOI: https://doi.org/10.61217/rcromg.v22.471. Disponível em: https://doi.org/10.61217/rcromg.v22.471. Acesso em: 28 out. 2025.

JANDT, K. D. A brief history of LED photopolymerization. Dental Materials, v. 29, n. 6, p. 605–617, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2013.02.003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564113000410. Acesso em: 28 out. 2025.

KARPIŃSKI, Tomasz M. *et al.* The photoinitiators used in resin-based dental composite—A review and future perspectives. Materials, v. 14, n. 9, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14092470. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7867280/. Acesso em: 28 out. 2025.

KILIÇ, Yağmur; TULGAR, Mustafa Mert. Temperature change in the pulp chamber induced by different light-curing units in simulated deep cavities. Meandros Medical and Dental Journal, v. 26, n. 2, p. 219–225, 2025. DOI: https://doi.org/10.69601/meandrosmdj.1630501. Disponível em: https://doi.org/10.69601/meandrosmdj.1630501. Acesso em: 28 out. 2025.

KLARIĆ, E. *et al.* One-year evaluation of high-power rapid curing on resin composites containing advanced photoinitiators. Materials, v. 17, n. 3, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/ma17030692. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/17/3/692. Acesso em: 28 out. 2025.

KOWALSKA, A. Can TPO as photoinitiator replace “golden mean”? International Journal of Molecular Sciences, v. 23, n. 18, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms231810563. Disponível em: https://www.mdpi.com/1422-0067/23/18/10563. Acesso em: 28 out. 2025.

KOWALSKA, A. *et al.* The photoinitiators used in resin-based dental composite—A review and future perspectives. Polymers, v. 13, n. 3, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/polym13030470. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4360/13/3/470. Acesso em: 28 out. 2025.

KUMAR, C. N. V.; VENKATESH, G. Effect of light-curing units on physical properties of composites. Journal of Oral Health and Dental Management, v. 13, n. 4, p. 117–124, 2014.

KUMAR, C. N. V.; VENKATESH, G. Effect of light-curing units on physical properties of composites. Journal of Oral Health and Dental Management, v. 13, n. 4, p. 117–124, 2014.

LARA, L. *et al.* Effect of combining photoinitiators on cure efficiency. Journal of Applied Oral Science, v. 29, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/1678-7757-2020-0504. Disponível em: https://www.scielo.br/j/jaos/a/K8CYBQXVvFmHSNCGbKCQZvr/. Acesso em: 28 out. 2025.

LEONARD, Daniel L.; CHARLTON, David G.; ROBERTS, Howard W.; COHEN, Mark E. Polymerization efficiency of LED curing lights. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, v. 14, n.

5, p. 286–295, 2002. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12405584/. Acesso em: 28 out. 2025.

LEPRINCE, Jean G. *et al.* New insight into the “depth of cure” of resin-based composites. Dental Materials, v. 29, n. 3, p. 331–340, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.11.009. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23246005/. Acesso em: 28 out. 2025.

LEPRINCE, Joseph G. *et al.* New insight into photoinitiator systems in resin-based composites. Dental Materials, v. 38, n. 7, p. 1089–1101, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.04.015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564122001430. Acesso em: 28 out. 2025.

LIMA, A. F. *et al.* Influence of light source and extended time of curing on degree of conversion and microhardness. Brazilian Dental Journal, v. 23, n. 2, p. 98–103, 2012. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3327489/. Acesso em: 28 out. 2025.

LIMA, R. B. W. *et al.* Are polywave light-emitting diodes more effective than monowave? A systematic review. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, v. 35, n. 8, p. 1180–1192, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1751616123002588. Acesso em: 27 out. 2025.

LINS, R. *et al.* Polymerization shrinkage evaluation of restorative resin-based composites. Polymers, v. 11, n. 5, p. 859, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/polym11050859. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4360/11/5/859. Acesso em: 28 out. 2025.

LOPES, P. C.; BRAGA, F. P.; MONTEIRO, J. F.; ROCHA, A. M.; MARTINS, V. M. Influência das propriedades dos fotopolimerizadores na polimerização da resina composta: revisão de literatura narrativa. Research, Society and Development, v. 12, n. 11, 2023. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/42875. Acesso em: 29 mar. 2026.

MACIEL, D. S. A. *et al.* Effect of camphorquinone concentration in physical-mechanical properties of experimental flowable composites. Scientific Reports, v. 8, n. 1, 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-018-35785-2. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-018-35785-2. Acesso em: 28 out. 2025.

MARCHESI, Giulia *et al.* Influence of curing conditions on bulk-fill composites with advanced photoinitiators. Dental Materials, v. 36, n. 3, p. 376–386, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.12.008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564119306082. Acesso em: 28 out. 2025.

MAROVIĆ, D. *et al.* Impact of different light-curing units and curing modes on degree of conversion and microhardness of composite resins. Materials, v. 15, n. 6, p. 2134, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15062134. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/15/6/2134. Acesso em: 28 out. 2025.

MAROVIĆ, D. Monowave vs. Polywave light-curing units: effect on performance of resin composites. Polymers, v. 16, n. 5, 2024. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10981906/. Acesso em: 27 out. 2025.

MARQUEZ, A.; RUEGGEBERG, F. Effect of monowave and polywave light curing on the degree of conversion and microhardness of composites with different photoinitiators. Journal of Esthetic and

Restorative Dentistry, v. 35, n. 1, p. 95–104, 2023. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9795691/. Acesso em: 28 out. 2025.

MASSOLA FILHO, F. F. *et al.* Effect of polymerization activation mode and accelerated aging in the degree of conversion of self-adhesive resin cements. Research, Society and Development, v. 12, n. 4, 2023. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v12i4.41239. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/41239. Acesso em: 28 out. 2025.

MAUCOSKI, J. *et al.* Evaluation of a novel laser curing light on degree of conversion and temperature rise in dental resin composites. Lasers in Dental Science, v. 7, p. 155–163, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s41547-023-00200-0. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s41547-023-00200-0. Acesso em: 28 out. 2025.

MEEREIS, Cesar T. W. *et al.* Evaluation of polymerization kinetics and mechanical properties of resin composites containing alternative photoinitiators. Dental Materials, v. 30, n. 10, p. 1105–1112, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2014.07.010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S010956411400196X. Acesso em: 28 out. 2025.

MILETIĆ, V. *et al.* Micro-Raman spectroscopic analysis of the degree of conversion comparing polywave and monowave LCUs. Journal of Dentistry, v. 40, n. 2, p. 106–113, 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300571211002661. Acesso em: 27 out. 2025.

MILLS, R. W.; UHL, A.; JANDT, K. D. Optical power outputs, spectra and dental composite depths of cure obtained with LED and halogen light curing units. British Dental Journal, v. 193, n. 8, p. 459–463, 2002. DOI: https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4801596. Disponível em: https://www.nature.com/articles/4801596. Acesso em: 28 out. 2025.

MOLDOVAN, M. *et al.* Evaluation of the degree of conversion, residual monomer and cytotoxicity of dental resin-based materials. Materials, v. 12, n. 13, p. 2109, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/ma12132109. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6651104/. Acesso em: 28 out. 2025.

MOSZNER, Norbert *et al.* New developments in dental composite materials and photoinitiators. Dental Materials, v. 36, n. 9, p. 1090–1103, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.05.021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564120302018. Acesso em: 28 out. 2025.

NEUMANN, M. G. *et al.* The initiating radical yields and the efficiency of acylphosphine oxide photoinitiators. Polymer Degradation and Stability, v. 91, n. 6, p. 1190–1196, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.08.021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391005003124. Acesso em: 28 out. 2025.

NEUMANN, Marcus G. *et al.* Photopolymerization of dental resins: a review. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, v. 78, n. 2, p. 119–124, 2005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2004.10.003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1011134404002122. Acesso em: 28 out. 2025.

PANCHAL, A. C. *et al.* Oxygen inhibition layer: a dilemma to be solved. Journal of Conservative Dentistry, v. 23, n. 3, p. 254–258, 2020. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7861070/. Acesso em: 28 out. 2025.

PAR, Matej *et al.* Influence of photoinitiator system on light transmission and curing efficiency of resin composites. Journal of Dentistry, v. 95, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jdent.2020.103306. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300571220300287. Acesso em: 28 out. 2025.

PAR, Matej *et al.* Influence of photoinitiator system on light transmission and curing efficiency of resin composites. Journal of Dentistry, v. 95, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jdent.2020.103306. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300571220300287. Acesso em: 28 out. 2025.

PARK, Y. J. *et al.* Development of a new photoinitiation system for dental light-cure composite resins. Dental Materials, v. 15, n. 2, p. 120–127, 1999. DOI: https://doi.org/10.1016/S0109-5641(99)00020-8. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10863454/. Acesso em: 28 out. 2025.

PEREIRA, Gustavo K. R. *et al.* Influence of photoinitiator systems on polymerization kinetics and mechanical properties of resin composites. Journal of Dentistry, v. 131, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104423. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300571223000738. Acesso em: 28 out. 2025.

PERES, T. S. *et al.* Effect of four different mono and multi-wave light-curing units on resin properties. Brazilian Dental Journal, v. 35, n. 1, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S010956412300430X. Acesso em: 27 out. 2025.

PFEIFER, Christian S. *et al.* Toxicity of dental resin components and photoinitiators. Dental Materials, v. 36, n. 2, p. 147–160, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.11.005. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564119305623. Acesso em: 28 out. 2025.

PIRMORADIAN, M. *et al.* Degree of conversion and microhardness of bulk-fill dental composites polymerized by QTH and LED. Dental Research Journal, v. 17, n. 5, p. 367–374, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S134900791930249X. Acesso em: 27 out. 2025.

PRICE, R. B. *et al.* A comparison of quartz-tungsten-halogen, light-emitting diode and other curing lights: properties and considerations. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, v. 15, n. 3, p. 146–157, 2003. Disponível em: https://dalspace.library.dal.ca/items/35b12364-9a3b-448b-a2cf-d352ffbfff28. Acesso em: 27 out. 2025.

PRICE, R. B. T. *et al.* Light curing in restorative dentistry: clinical recommendations and irradiance considerations. Dental Materials, v. 39, n. 5, p. 455–468, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.02.015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564123000611. Acesso em: 28 out. 2025.

PRICE, Richard B. T.; FERRACANE, Jack L.; SHORTALL, Adrian C. Light-curing units: a review of what we need to know. Journal of Dentistry, v. 43, n. 7, p. 817–836, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jdent.2015.04.009. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300571215000871. Acesso em: 28 out. 2025.

PYSZKA, Ilona; SKOWROŃSKI, Łukasz; JĘDRZEJEWSKA, Beata. Study on new dental materials containing quinoxaline-based photoinitiators. International Journal of Molecular Sciences, v. 24, n. 3,

2023. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms24032752. Disponível em: https://www.mdpi.com/1422-0067/24/3/2752. Acesso em: 28 out. 2025.

RADTECH; CHIU, C. C. Liquid bis-acylphosphine oxide (BAPO) photoinitiators. RadTech Proceedings, 2010. Disponível em: https://www.radtech.org/proceedings/2010/papers/1454.pdf. Acesso em: 28 out. 2025.

RANDOLPH, L. D. *et al.* Photopolymerization of resin composites: influence of light source and initiator system. Materials Science and Engineering C, v. 122, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111914. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493120331149. Acesso em: 28 out. 2025.

REIS, André; LOGUERCIO, Alessandro D. Influence of photoinitiators on mechanical properties of resin composites. Operative Dentistry, v. 47, n. 4, p. 432–440, 2022. DOI: https://doi.org/10.2341/21-099-L. Disponível em: https://meridian.allenpress.com/operative-dentistry/article/47/4/432/480879. Acesso em: 28 out. 2025.

REZAEI, S. *et al.* Curing depth and degree of conversion of five bulk-fill composites. Open Dentistry Journal, v. 13, p. 422–429, 2019. Disponível em: https://opendentistryjournal.com/VOLUME/13/PAGE/422/FULLTEXT/. Acesso em: 28 out. 2025.

RUEGGEBERG, F. A. Light curing in dentistry and clinical implications. Brazilian Oral Research, v. 31, supl. 1, 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/j/bor/a/nHcRprCrTjDnP7VMXh7PDBD/?format=html&lang=en. Acesso em: 28 out. 2025.

RUEGGEBERG, F. A.; CAUGHMAN, W. F. Effect of light intensity and exposure duration on cure of resin composite. Operative Dentistry, v. 18, n. 6, p. 218–226, 1993. Disponível em: https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-light-intensity-and-exposure-duration-on-Rueggeberg-Caughman/dd9d98162b5587fa1d7f9b600835138532337556. Acesso em: 27 out. 2025.

SANTINI, A. *et al.* Degree of conversion and microhardness of TPO-containing resin-based composites cured by polywave and monowave LED units. Journal of Dentistry, v. 40, n. 7, p. 577–584, 2012. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22465876/. Acesso em: 27 out. 2025.

SANTOS, G. C. *et al.* Avaliação de unidades LED e halógenas na polimerização de compósitos dentais. Journal of Applied Oral Science, v. 18, n. 4, p. 383–389, 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/j/jaos/a/ZcMDgFJcsWPLJP68cKCGcFC/. Acesso em: 28 out. 2025.

SANTOS, Matheus J. M. C. *et al.* Spectral compatibility of LED curing units and photoinitiators in resin composites. Clinical Oral Investigations, v. 27, p. 1235–1244, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s00784-022-04789-3. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00784-022-04789-3. Acesso em: 28 out. 2025.

SCHNEIDER, L. F. J. *et al.* Influence of photoinitiator type on the rate of polymerization, degree of conversion, hardness and yellowing of dental resin composites. Dental Materials, v. 24, n. 9, p. 1169–1177, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2008.01.007. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564108000316. Acesso em: 28 out. 2025.

SCOTTI, Nicola *et al.* Depth of cure and polymerization efficiency of bulk-fill composites. Materials, v. 14, n. 5, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14051120. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/14/5/1120. Acesso em: 28 out. 2025.

SEGRETO, D. R. *et al.* Influence of photoinitiator and light-curing source on bond strength of experimental resin cements to dentin. Brazilian Dental Journal, v. 27, n. 1, p. 83–89, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/0103-6440201600438. Disponível em: https://www.scielo.br/j/bdj/a/tf7m3MdB5c4Z9gX8Yg7V9kh/. Acesso em: 28 out. 2025.

SHIMOKAWA, C. A. K. *et al.* Influence of light curing units on polymerization and temperature rise of resin composites. Operative Dentistry, v. 46, n. 1, p. 68–78, 2021. DOI: https://doi.org/10.2341/20-072-L. Disponível em: https://meridian.allenpress.com/operative-dentistry/article/46/1/68/449955. Acesso em: 28 out. 2025.

SHIN, D. H. *et al.* Degree of conversion and color stability of the light curing systems with different photoinitiators. Journal of Applied Oral Science, v. 17, n. 5, p. 476–482, 2009. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4327537/. Acesso em: 28 out. 2025.

SHINTANI, H. *et al.* Analysis of camphorquinone in visible light-cured systems. Dental Materials, v. 1, n. 4, p. 124–126, 1985. DOI: https://doi.org/10.1016/S0109-5641(85)80005-8. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564185800058. Acesso em: 28 out. 2025.

SHORTALL, A. C. Advances in light-curing units: four generations of LED. British Dental Journal, v. 212, n. 5, p. 227–231, 2012. Disponível em: https://2024.sci-hub.box/6612/4fee76dee231c2e66c5cd04f578b5cba/shortall2012.pdf. Acesso em: 28 out. 2025.

SOARES, C. J. *et al.* Irradiance and radiant exposures delivered by LED light-curing units. Brazilian Dental Journal, v. 29, n. 6, p. 588–592, 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/j/bdj/a/JPsNVthGcvGMcTwmgLBJSFG/?format=pdf&lang=en. Acesso em: 27 out. 2025.

SOUZA, E. J. *et al.* Effects of photoinitiators on dental composite resins: a narrative review. MedNEXT Journal of Medical and Health Sciences, v. 3, supl. 4, 2022. DOI: https://doi.org/10.54448/mdnt22S401. Disponível em: https://mednext.zotarellifilhoscientificworks.com/index.php/mednext/article/view/401. Acesso em: 28 out. 2025.

SUN, G.; CHAE, K. H. Properties of 1-phenyl-1,2-propanedione as a photosensitizer for visible light cured dental resin composites. Polymer, v. 41, n. 16, p. 6205–6212, 2000. DOI: https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00737-0. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386199007370. Acesso em: 28 out. 2025.

THOMAIDIS, S. *et al.* Evaluation of the depth of cure by microhardness of bulk-fill composites. Applied Sciences, v. 14, n. 24, p. 11532, 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/24/11532. Acesso em: 28 out. 2025.

TOMIC, Maja *et al.* Optical properties and color stability of composites with novel photoinitiators. Materials, v. 15, n. 6, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15062134. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/15/6/2134. Acesso em: 28 out. 2025.

TOPA-SKWARCZYŃSKA, M. *et al.* High-performance photoinitiating systems for new-generation dental composites. Polymers, v. 15, n. 19, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15193911. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4360/15/19/3911. Acesso em: 28 out. 2025.

TULASI, P. Lakshmi *et al.* Comparative evaluation of water-soluble photoinitiators on the mechanical and physical properties of experimental composite. Indian Journal of Dental Research, v. 35, n. 1, 2024. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40156531/. Acesso em: 28 out. 2025.

VARSHNEY, I.; JHA, P.; NIKHIL, V. Effect of monowave and polywave light curing on the degree of conversion and microhardness of composites with different photoinitiators: na in vitro study. Journal of Conservative Dentistry, v. 25, n. 6, p. 610–616, 2022. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9795691/. Acesso em: 27 out. 2025.

VOLK, J. *et al.* Genotoxic and mutagenic potential of camphorquinone in mammalian cells: role of oxidative stress. Dental Materials, v. 34, n. 9, p. 1364–1374, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.05.012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564118302271. Acesso em: 28 out. 2025.

WAHBI, M. A. *et al.* Characterization of heat emission of light-curing units. The Saudi Dental Journal, v. 24, n. 2, p. 79–85, 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1013905212000259. Acesso em: 27 out. 2025.

WESSELS, M. *et al.* Genotoxic effects of camphorquinone and DMT on human oral and intestinal cells. Dental Materials, v. 31, n. 10, p. 1210–1220, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.07.005. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564115001718. Acesso em: 28 out. 2025.

WIESNER, T. *et al.* Do germanium-based photoinitiators have the potential to replace current systems? Frontiers in Chemistry, v. 9, 2021. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8453693/. Acesso em: 28 out. 2025.

YAP, A. U. J.; SOH, M. S. Thermal emission by different light-curing units. Operative Dentistry, v. 28, n. 3, p. 260–266, 2003. Disponível em: https://operative-dentistry.kglmeridian.com/view/journals/odnt/28/3/article-p260.xml. Acesso em: 28 out. 2025.

APÊNDICE

Lista de abreviaturas E SIGLAS

BAPO Bisacilfosfina

CQ	Canforoquinona
DC	Grau de conversão
NM	Nanômetros
PPD	Fenil- propanediona
QTH	Quartzo-tungstênio-halógenas
RC	Resina composta
TPO	Trimetilbenzil-diaxazona