



PENETRAÇÃO INTRATUBULAR APÓS DIFERENTES PROTOCOLOS DE ATIVAÇÃO DA IRRIGAÇÃO ENDODÔNTICA: ESTUDO IN VITRO COMPARATIVO

INTRATUBULAR PENETRATION FOLLOWING DIFFERENT ENDODONTIC IRRIGATION ACTIVATION PROTOCOLS: A COMPARATIVE IN VITRO STUDY

DOI: 10.5281/zenodo.22715633



Carlos Eduardo Fontana¹

Sérgio Luiz Pinheiro²

Luana de Carvalho Davanso³

Beatriz dos Santos Ribeiro⁴

Carla Nery Machado Consulin⁵

Gabriele Rodrigues da Silva⁶

João Daniel Mendonça de Moura⁷

Rodrigo Sanches Cunha⁸

Daniel Guimarães Pedro Rocha⁹

1 Programa de Pós Graduação em Ciências da Saúde/ PUC-Campinas. E-mail: carlos.fontana@puc-campinas.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2868-6839>.

2 Programa de Pós Graduação em Ciências da Saúde/ PUC-Campinas. E-mail: slpinho@puc-campinas.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7157-4923>.

3 Mestranda no Programa de Pós Graduação em Ciências da Saúde/ PUC-Campinas. E-mail: luanadavanso@outlook.com.

4 Doutoranda no Programa de Pós Graduação em Ciências da Saúde/ PUC-Campinas. E-mail: beatrizsribeiro.11@gmail.com.

5 Aluna de Iniciação Científica em Endodontia da Faculdade de Odontologia da PUC-Campinas. E-mail: carlanerymachado@gmail.com.

6 Aluna de Iniciação Científica em Endodontia da Faculdade de Odontologia da PUC-Campinas. E-mail: gabriele.rs@puccampinas.edu.br.

7 Programa de Pós-Graduação em Odontologia Clínica, Centro Universitário do Pará (CESUPA), Belém, Pará, Brasil. E-mail: joao.moura@prof.cesupa.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9845-9677>.

8 University of Manitoba, Winnipeg, Canadá. E-mail: rodrigo.endodontics@gmail.com.

9 Faculdade de Odontologia da PUC - Campinas. E-mail: dnlrocha@uol.com.br.

Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v. 4 n. 9 (2026) - ISSN 2965-2634

A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição (CC BY)





RESUMO

Introdução: A ativação da irrigação endodôntica pode favorecer a penetração das soluções nos túbulos dentinários, potencializando sua ação no interior do sistema de canais radiculares. **Objetivo:** Avaliar e comparar, in vitro, a profundidade de penetração intratubular de um corante após diferentes protocolos de ativação da irrigação endodôntica. **Metodologia:** Foram utilizados 90 raízes distais de molares inferiores humanos extraídos, distribuídos aleatoriamente em seis grupos (n=15). Os canais radiculares foram instrumentados pela técnica crown-down com instrumentos rotatórios ProTaper Next até o diâmetro apical 40 e conicidade .06 (X4), utilizando motor X-Smart Plus. Durante o preparo, os canais foram irrigados com 2mL de hipoclorito de sódio (NaOCl) a 5% entre cada instrumento. Após o preparo, foi realizado o protocolo final de irrigação, composto por NaOCl 5% (5 mL/1 min), água ultrapura (5 mL/1 min), EDTA 17% (5 mL/1 min), com ativação durante 30 s, seguida de água ultrapura (5 mL/1 min) e NaOCl 5% (5 mL/1 min), com ativação por 30 s, repouso de 30 s e nova ativação por 30 s. Após irrigação com água ultrapura e respectiva secagem, os canais foram preenchidos com azul de metileno a 1%, submetido à ativação durante 30 s de acordo com o grupo experimental: irrigação convencional (IRC), irrigação sônica (IRS), irrigação com agulha dupla lateral (IRD), irrigação passiva ultrassônica (PUI), Easy Clean (ECL) e Smart Lite Pro (SLP). Posteriormente, as raízes foram seccionadas transversalmente nos terços cervical, médio e apical, e a média da profundidade de penetração do corante nos túbulos dentinários foi mensurada por microscopia com auxílio do software ImageJ. Os dados foram submetidos à análise estatística, considerando nível de significância de 5%. **Resultados:** Foram observadas diferenças significativas entre os protocolos de ativação nos terços cervical, médio e apical ($p < 0,001$). No terço cervical, as maiores médias de penetração foram observadas para PUI (704,2 μm), SLP (692,4 μm) e IRS (643,5 μm), enquanto IRC (193,9 μm) e IRD (199,1 μm) apresentaram os menores valores. No terço médio, PUI (525,1 μm) e SLP (484,6 μm) apresentaram as maiores médias de penetração, sem diferença estatisticamente significativa entre ambos, enquanto o SLP apresentou penetração significativamente maior que o IRS (292,9 μm ; $p < 0,001$). No terço apical, PUI (141,9 μm) e SLP (131,9 μm) apresentaram as maiores médias de penetração, sem diferença estatisticamente significativa entre ambos, enquanto os demais grupos apresentaram valores inferiores a 100 μm . **Conclusão:** Os protocolos PUI e SLP proporcionaram maior penetração intratubular corante, enquanto IRC e IRD apresentaram os menores valores. A penetração diminuiu significativamente do terço cervical para o apical em todos os grupos. A ativação do irrigante, seja ultrassônica ou sônica, mostrou-se determinante para otimizar a penetração do corante nos túbulos dentinários.

Palavras-chave: Endodontia; Irrigação do canal radicular; Ativação da irrigação; Penetração intratubular; Túbulos dentinários.

ABSTRACT

Introduction: Activation of endodontic irrigation may enhance the penetration of irrigating solutions into dentinal tubules, potentially improving their action within the root canal system. **Objective:** To evaluate and compare, in vitro, the depth of intratubular penetration of a dye following different endodontic irrigation activation protocols. **Methodology:** Ninety distal roots of extracted human mandibular molars were randomly distributed into six groups (n=15). Root canals were instrumented using a crown-down technique with ProTaper Next rotary instruments up to size 40 with a .06 taper





(X4), using an X-Smart Plus motor. During instrumentation, the canals were irrigated with 2 mL of 5% sodium hypochlorite (NaOCl) between each instrument. After preparation, a final irrigation protocol was performed consisting of 5% NaOCl (5 mL/1 min), ultrapure water (5 mL/1 min), 17% EDTA (5 mL/1 min), activated for 30 s, followed by ultrapure water (5 mL/1 min) and 5% NaOCl (5 mL/1 min), activated for 30 s, followed by a 30-s resting phase and a further 30-s activation. After irrigation with ultrapure water and drying, the canals were filled with 1% methylene blue and activated for 30 s according to the experimental group: conventional irrigation (CI), sonic irrigation (SI), double side-vented needle irrigation (DSNI), passive ultrasonic irrigation (PUI), Easy Clean (ECL), and Smart Lite Pro (SLP). Subsequently, the roots were sectioned transversely at the cervical, middle, and apical thirds, and dye penetration depth into the dentinal tubules was measured by microscopy using ImageJ software. Data were statistically analyzed at a 5% significance level. Results: Significant differences among the protocols were observed in the cervical, middle, and apical thirds ($p < 0.001$). In the cervical third, the highest mean penetration values were observed for PUI (704.2 μm), SLP (692.4 μm), and SI (643.5 μm), whereas CI (193.9 μm) and DSNI (199.1 μm) presented the lowest values. In the middle third, PUI (525.1 μm) and SLP (484.6 μm) presented the highest values, followed by SI (292.9 μm) and ECL (250.7 μm). In the apical third, PUI presented the highest mean penetration (141.9 μm), followed by SLP (131.9 μm), while the remaining groups presented values below 100 μm . **Conclusion:** The PUI and SLP protocols provided greater intratubular penetration of the dye, whereas IRC and IRD exhibited the lowest values. Penetration decreased significantly from the cervical to the apical third across all groups. Irrigant activation—whether ultrasonic or sonic—proved to be crucial for optimizing dye penetration into the dentinal tubules.

Keywords: Endodontics; Root canal irrigation; Irrigation activation; Intratubular penetration; Dentinal tubules.

INTRODUÇÃO

A adequada limpeza e desinfecção do sistema de canais radiculares constituem etapas fundamentais do tratamento endodôntico, uma vez que a persistência de microrganismos e de seus subprodutos está relacionada à manutenção ou ao desenvolvimento da periodontite apical. Embora a instrumentação mecânica seja essencial para a conformação do espaço endodôntico, sua capacidade de atuar diretamente sobre todas as superfícies do sistema de canais é limitada pela complexidade anatômica radicular. Istmos, reentrâncias, canais laterais, irregularidades anatômicas e regiões profundas da dentina podem permanecer sem contato direto com os instrumentos, favorecendo a retenção de debris, smear layer e biofilme microbiano. Nesse contexto, a irrigação desempenha papel central na limpeza e desinfecção do sistema de canais, complementando a ação mecânica em áreas inacessíveis aos instrumentos (Gomes et al., 2023; Boutsoukakis et al., 2022).





O hipoclorito de sódio (NaOCl) permanece como uma das principais soluções irrigadoras utilizadas durante o preparo químico-mecânico em razão de sua atividade antimicrobiana e capacidade de dissolução de tecidos orgânicos. Entretanto, a efetividade de um irrigante não depende exclusivamente de suas propriedades químicas, mas também de sua capacidade de alcançar, penetrar e ser renovado nas diferentes regiões do sistema de canais radiculares. Em particular, o fluxo do irrigante torna-se progressivamente limitado em regiões apicais, istmos, canais laterais e outras áreas de difícil acesso. Assim, a simples introdução da solução por irrigação convencional com seringa e agulha não garante sua adequada distribuição e interação com todas as superfícies do canal (Cai et al., 2023; Gomes et al., 2023).

A partir dessa limitação, diferentes estratégias de ativação da irrigação têm sido propostas com o objetivo de modificar a dinâmica dos fluidos, aumentar a circulação e a renovação do irrigante e favorecer seu contato com áreas que permanecem pouco acessíveis à irrigação convencional. Sistemas ultrassônicos, sônicos, mecânicos e tecnologias baseadas em laser apresentam diferentes mecanismos de geração de movimento do irrigante, e seus efeitos sobre a remoção de debris, smear layer e biofilme podem variar de acordo com o dispositivo, geometria do canal, amplitude e frequência do movimento, volume e propriedades da solução, além do protocolo empregado (Boutsoukis et al., 2022; Gomes et al., 2023).

Evidências experimentais demonstram que a ativação da irrigação pode modificar o alcance dos irrigantes no interior do sistema de canais. Em estudo ex vivo, Virdee et al. (2020) observaram que a ativação manual dinâmica, ultrassônica e sônica potencializou a penetração do hipoclorito de sódio na dentina radicular quando comparada à irrigação convencional, sendo também observada influência da concentração e do tempo de contato do irrigante. Esses achados reforçam que a penetração intradentinária não depende exclusivamente da concentração da solução, mas também das condições de sua movimentação e permanência no canal. De maneira semelhante, Jain et al. (2023) demonstraram que diferentes estratégias de agitação influenciaram o comportamento do hipoclorito de sódio, destacando a interação entre o modo de aplicação do irrigante e o método de ativação.





A influência da ativação sobre a penetração de soluções irrigadoras também foi observada em estudos que avaliaram diferentes protocolos e regiões radiculares. De Oliveira et al. (2023) investigaram a penetração de hipoclorito de sódio a 2,5% em canais submetidos ou não ao preparo mecânico e observaram que a profundidade de penetração foi influenciada pelo estado de preparo do canal, embora, após a instrumentação, não tenham sido observadas diferenças significativas entre os métodos de ativação avaliados. Esses resultados demonstram que o efeito da ativação não deve ser considerado isoladamente, uma vez que características relacionadas ao preparo do canal e à condição da dentina também podem interferir na penetração do irrigante.

Uma revisão sistemática e metanálise conduzida por Kumar et al. (2023) demonstrou que diferentes técnicas de ativação aumentaram significativamente a penetração do hipoclorito de sódio em canais laterais quando comparadas à irrigação convencional, com a irrigação passiva ultrassônica apresentando o melhor desempenho entre as modalidades avaliadas em canais retos. Esses resultados sustentam a relevância da ativação como estratégia complementar à irrigação convencional, especialmente diante da dificuldade de alcançar regiões anatômicas que não são diretamente acessíveis pela instrumentação ou pelo fluxo convencional do irrigante.

A penetração intratubular apresenta especial relevância nesse contexto, uma vez que os túbulos dentinários podem constituir regiões de difícil acesso e, ainda, representar possíveis nichos para a permanência de microrganismos e seus subprodutos. A capacidade de uma solução irrigadora alcançar maior profundidade na dentina pode, portanto, representar um componente relevante de sua ação potencial sobre regiões não alcançadas diretamente pela instrumentação. Estudos experimentais demonstraram que a ativação da irrigação pode modificar a profundidade de penetração de soluções no interior da dentina, embora a magnitude desse efeito possa variar de acordo com o método de ativação, concentração do irrigante, tempo de contato e características do substrato dentinário (Virdee et al., 2020; Jain et al., 2023).





Entretanto, é fundamental estabelecer uma distinção entre penetração intratubular e desinfecção. A maior profundidade de penetração de uma solução não necessariamente representa maior redução ou eliminação microbiana. A concentração efetiva do irrigante, seu tempo de contato, temperatura, presença de agentes químicos, smear layer e características do biofilme são fatores que também determinam sua atividade antimicrobiana (Cai et al., 2023; Boutsoukis et al., 2022). Dessa forma, a penetração intratubular deve ser interpretada como um indicador indireto relacionado ao alcance da solução, e não como evidência isolada de descontaminação. Essa distinção é particularmente importante na interpretação de estudos experimentais que utilizam corantes como marcadores da distribuição intradentinária.

A utilização de corantes permite visualizar e quantificar a profundidade de penetração nos túbulos dentinários e, quando associada a protocolos experimentais padronizados, possibilita a comparação do alcance relativo produzido por diferentes estratégias de irrigação. Widbiller et al. (2023) e Galler et al. (2019), por exemplo, utilizaram azul de metileno para avaliar a penetração associada a diferentes métodos de ativação, juntamente com a avaliação da remoção da smear layer e dos efeitos sobre a superfície dentinária. Entretanto, a utilização de um corante como marcador não reproduz necessariamente as propriedades físico-químicas e antimicrobianas do irrigante propriamente dito. Assim, os resultados obtidos devem ser interpretados como uma medida do potencial de alcance intratubular e não como uma avaliação direta da eficácia antimicrobiana.

Outro aspecto relevante é a heterogeneidade anatômica da dentina ao longo da raiz. O número, o diâmetro e a permeabilidade dos túbulos dentinários tendem a diminuir em direção à região apical, enquanto a esclerose dentinária e a obliteração tubular podem ser mais pronunciadas nessa região. Consequentemente, a penetração das soluções irrigadoras pode apresentar comportamento distinto entre os terços cervical, médio e apical. Em estudo recente, Gasparelli et al. (2024) observaram diferenças na penetração de hipoclorito de sódio a 5,25% entre diferentes métodos de irrigação, com a irrigação ultrassônica apresentando maior penetração no terço apical. De maneira semelhante, um estudo utilizando microscopia confocal demonstrou que a penetração do hipoclorito de sódio foi maior nos terços cervical e





médio do que no terço apical, particularmente após determinados protocolos de ativação (Günes et al., 2024). Esses achados reforçam a necessidade de analisar separadamente diferentes regiões radiculares quando se investigam estratégias de ativação da irrigação.

A importância da ativação torna-se ainda mais evidente diante das abordagens contemporâneas de preparo dos canais radiculares, que buscam preservar maior quantidade de estrutura dentinária. Embora preparos mais conservadores possam apresentar vantagens relacionadas à preservação estrutural, a redução do contato dos instrumentos com determinadas superfícies aumenta a dependência da irrigação e de estratégias auxiliares de movimentação do irrigante para a limpeza de regiões não tocadas. Nesse contexto, a associação entre preparo mecanicamente eficiente e ativação adequada da irrigação pode representar uma estratégia complementar para potencializar a limpeza do sistema de canais (Galler et al., 2019; Boutsoukis et al., 2022; Gomes et al., 2023).

Além dos sistemas ultrassônicos e sônicos tradicionalmente investigados, diferentes dispositivos mecânicos e novas tecnologias de ativação têm sido introduzidos com o objetivo de aumentar a eficiência da irrigação. Entretanto, os resultados disponíveis não permitem assumir que todos os sistemas produzam efeitos equivalentes. Diferenças relacionadas ao mecanismo de ativação, frequência e amplitude do movimento, desenho dos instrumentos, contato com as paredes do canal e protocolo clínico podem influenciar a dinâmica do irrigante e, conseqüentemente, seu alcance em regiões de difícil acesso.

Nesse sentido, estudos comparativos são importantes para determinar se diferentes princípios de ativação produzem alterações semelhantes na penetração intratubular. Embora a irrigação passiva ultrassônica apresente resultados consistentes quanto à capacidade de potencializar a penetração de irrigantes em determinadas condições experimentais (Kumar et al., 2023), ainda existem resultados divergentes entre diferentes métodos sônicos, mecânicos e ultrassônicos. Além disso, a literatura disponível sobre sistemas de desenvolvimento mais recente permanece mais limitada, especialmente quando diferentes tecnologias são avaliadas simultaneamente sob condições experimentais padronizadas.





Dessa forma, investigar a profundidade de penetração associada a diferentes protocolos de ativação pode contribuir para compreender de que maneira a movimentação do irrigante modifica seu alcance no interior da dentina e em diferentes regiões do canal radicular. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar e comparar, *in vitro*, a profundidade de penetração intratubular de um corante após a utilização de diferentes protocolos de ativação da irrigação endodôntica, incluindo irrigação convencional, ativação sônica, irrigação com agulha dupla lateral, irrigação passiva ultrassônica, EasyClean e SmartLite Pro, nos terços cervical, médio e apical de raízes de dentes humanos extraídos.

METODOLOGIA

Foram utilizados para o estudo um total de 90 molares inferiores permanentes doados por pacientes da Clínica da Faculdade de Odontologia da Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas) com assinatura de um Termo de Consentimento Livre e Esclarecido. Devido a esse fato o projeto foi submetido e aprovado pelo Comitê de Ética e Pesquisa da instituição (CAAE 64113822.2.0000.5481 / Número do Parecer: 5.731.282). Os dentes utilizados na pesquisa foram provenientes de extração por motivos diversos inerentes a pesquisa. As respectivas raízes distais de molares inferiores humanos extraídos foram selecionadas de acordo com os seguintes critérios: presença de ápice completamente formado, canal radicular único, ausência de reabsorções radiculares, fraturas, calcificações ou alterações anatômicas que pudessem comprometer a padronização experimental. Após a seleção, as raízes foram submetidas à limpeza e armazenadas em solução timol 0,1% até o momento do experimento.

Preparo dos canais radiculares

Os canais radiculares foram instrumentados pela técnica crown-down, utilizando o sistema rotatório ProTaper Next (Dentsply Sirona, Ballaigues, Suíça), até o instrumento X4, correspondente ao diâmetro apical 40 e conicidade .06, acionado pelo motor X-Smart Plus





(Dentsply Sirona). Durante o preparo biomecânico, os canais foram irrigados com 2 mL de hipoclorito de sódio (NaOCl) a 2,5% entre cada instrumento. Após a conclusão da instrumentação, foi realizado o protocolo final de irrigação, previamente padronizado para todas as amostras:

1. NaOCl 5% — 5 mL por 1 minuto;
2. Água ultrapura — 5 mL por 1 minuto;
3. EDTA 17% — 5 mL por 1 minuto, com ativação durante 30 segundos;
4. Água ultrapura — 5 mL por 1 minuto;
5. NaOCl 5% — 5 mL por 1 minuto, seguido de ativação durante 30 segundos, repouso de 30 segundos e nova ativação durante 30 segundos.

Após o término do protocolo, os canais foram irrigados com água ultrapura e posteriormente secos com cones de papel absorvente. As amostras foram distribuídas aleatoriamente em seis grupos experimentais ($n = 15$), de acordo com o protocolo de irrigação/ativação empregado.

Aplicação e ativação do azul de metileno

Após a secagem dos canais, estes foram irrigados e preenchidos com 1mL de azul de metileno a 1%, utilizado como marcador da penetração intratubular. A solução foi submetida à ativação durante 30 segundos, de acordo com o protocolo correspondente ao grupo experimental:

- IRC — irrigação convencional: azul de metileno introduzido com agulha metálica NaviTip 30G (Ultradent) e submetido a movimentos de entrada e saída no interior do canal;
- IRS — irrigação sônica: ativação do azul de metileno utilizando dispositivo Glin Sonic/inserto plástico (com calibre aproximado de 35.04) no interior do canal durante 30s;
- IRD — irrigação com agulha siliconada Dentsply (30G .04) Trunatomy, com dupla saída lateral, associada a movimentos de entrada e saída no canal;





- PUI — irrigação passiva ultrassônica: ativação utilizando inserto Irrisonic E1 – 20.01 (Helse Ultrasonic), posicionado no interior do canal durante 30s;
- ECL — EasyClean: ativação utilizando ponta plastica (30.04) acionada em modo rotatório com proximadamente 10.000 RPM durante 30s;
- SLP — Smart Lite Pro (Dentsply/Sirona): ativação utilizando o sistema com ponta polimérica Medium (25.04) no interior do canal durante 30s.

Secção das raízes

Após a conclusão dos protocolos experimentais, as raízes foram seccionadas transversalmente ao longo de seu eixo longitudinal, utilizando um equipamento de corte Isomet 100 (Buehler, Lake Bluff, IL, EUA), em baixa rotação e sob refrigeração contínua com água. Foram obtidas secções correspondentes aos terços cervical, médio e apical, localizadas respectivamente a 9, 6 e 3 mm do vértice radicular. A espessura aproximada do disco diamantado utilizado para os cortes foi de 1 mm.

Avaliação da penetração intratubular

A profundidade de penetração do azul de metileno nos túbulos dentinários foi avaliada por microscopia óptica utilizando microscópio operatório (Alliance, São Carlos-SP, Brasil), sob magnificação de 25×. As secções radiculares foram fotografadas e posteriormente analisadas utilizando o software ImageJ (National Institutes of Health, Bethesda, MD, EUA). A profundidade de penetração do corante foi mensurada, em milímetros, a partir da parede interna do canal radicular em direção à superfície externa da raiz. Para cada secção, foram determinadas as maiores e menores profundidades de penetração observadas para obtenção de uma média de profundidade. Esses valores foram registrados individualmente para cada espécime e utilizados para as análises estatísticas subsequentes.





Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para verificação da normalidade e ao teste de Levene para avaliação da homogeneidade de variâncias. A comparação entre os protocolos de irrigação dentro de cada terço radicular foi realizada por meio de ANOVA one-way, complementada pelo teste de Kruskal-Wallis quando os pressupostos de normalidade não foram atendidos. Para a comparação entre os terços radiculares dentro de cada protocolo, utilizou-se ANOVA one-way. A análise da interação entre os fatores (terço radicular × protocolo de irrigação) foi realizada por ANOVA two-way. Nas situações em que diferenças significativas foram detectadas, aplicou-se o teste post-hoc de Tukey HSD para comparações múltiplas. O nível de significância adotado foi de 5% ($\alpha=0,05$). As análises foram realizadas com auxílio dos softwares Python (SciPy v1.12 e Statsmodels v0.14).

RESULTADOS

Os valores de penetração intratubular diferiram significativamente entre os protocolos de irrigação nos três terços radiculares avaliados ($p<0,001$).

No terço cervical, PUI ($704,20 \pm 85,95 \mu\text{m}$) e SLP ($692,40 \pm 100,03 \mu\text{m}$) apresentaram os maiores valores de penetração, sem diferença estatística entre si ($p=0,996$), seguidos por IRS ($584,47 \pm 44,84 \mu\text{m}$) e ECL ($422,93 \pm 53,66 \mu\text{m}$). IRC ($193,93 \pm 45,57 \mu\text{m}$) e IRD ($199,07 \pm 28,34 \mu\text{m}$) obtiveram os menores valores, também sem diferença entre si ($p=0,999$).

No terço médio, o mesmo padrão se manteve: PUI ($525,13 \pm 74,15 \mu\text{m}$) e SLP ($484,60 \pm 68,13 \mu\text{m}$) foram superiores ($p=0,328$ entre si), enquanto IRC ($133,13 \pm 35,94 \mu\text{m}$) e IRD ($159,20 \pm 23,10 \mu\text{m}$) permaneceram com os menores valores ($p=0,777$).





No terço apical, as diferenças entre os grupos se reduziram, porém PUI ($141,87 \pm 43,80 \mu\text{m}$) e SLP ($131,87 \pm 53,64 \mu\text{m}$) mantiveram superioridade significativa em relação a IRC ($78,87 \pm 21,42 \mu\text{m}$), IRD ($79,53 \pm 22,15 \mu\text{m}$) e ECL ($88,20 \pm 11,62 \mu\text{m}$), sem diferença significativa entre PUI e SLP ($p=0,958$).

Tabela 1: Penetração intratubular (μm) por protocolo e terço radicular
Média $\pm$ desvio padrão. Letras maiúsculas comparam protocolos dentro de cada terço (colunas). Letras minúsculas comparam terços dentro de cada protocolo (linhas). Letras iguais = sem diferença significativa (Tukey HSD, $p>0.05$).

PROTOCOLO	CERVICAL	MÉDIO	APICAL	P (ENTRE TERÇOS)
IRC	193.93 ± 45.57 E,a	133.13 ± 35.94 E,b	78.87 ± 21.42 C,c	<0.001***
IRS	584.47 ± 44.84 C,a	292.93 ± 32.34 C,b	97.80 ± 20.85 BC,c	<0.001***
IRD	199.07 ± 28.34 E,a	159.20 ± 23.10 E,b	79.53 ± 22.15 C,c	<0.001***
PUI	704.20 ± 85.95 A,a	525.13 ± 74.15 A,b	141.87 ± 43.80 A,c	<0.001***
ECL	422.93 ± 53.66 D,a	250.67 ± 68.79 CD,b	88.20 ± 11.62 C,c	<0.001***
SLP	692.40 ± 100.03 AB,a	484.60 ± 68.13 AB,b	131.87 ± 53.64 AB,c	<0.001***
p (entre protocolos)	<0.001***	<0.001***	<0.001***	

Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística entre protocolos ($p<0.05$). Letras minúsculas diferentes na mesma linha indicam diferença entre terços ($p<0.05$). Tukey HSD post-hoc após ANOVA/Kruskal-Wallis ($p<0.001$ para todos). N=15 por grupo.

Quanto à influência do terço radicular, todos os protocolos apresentaram redução significativa e progressiva da penetração intratubular na direção cervical $\rightarrow$ médio $\rightarrow$ apical ($p<0,001$ para todos os pares). A ANOVA two-way confirmou efeito significativo tanto do fator terço ($\eta^2=0,47$) quanto do protocolo ($\eta^2=0,33$), além de interação significativa entre ambos ($p<0,001$, $\eta^2=0,15$), indicando que a magnitude das diferenças entre protocolos varia conforme o terço avaliado.



Gráfico 1: Gráfico de interação entre o terço radicular e o protocolo de irrigação sobre a penetração intratubular. Os pontos representam as médias e as barras verticais, o desvio padrão. Observa-se redução progressiva da penetração do terço cervical para o apical em todos os protocolos, com maior separação entre os grupos nos terços cervical e médio e aproximação dos resultados no terço apical, caracterizando interação entre os fatores.

Gráfico de Interação: Terço x Protocolo de Irrigação

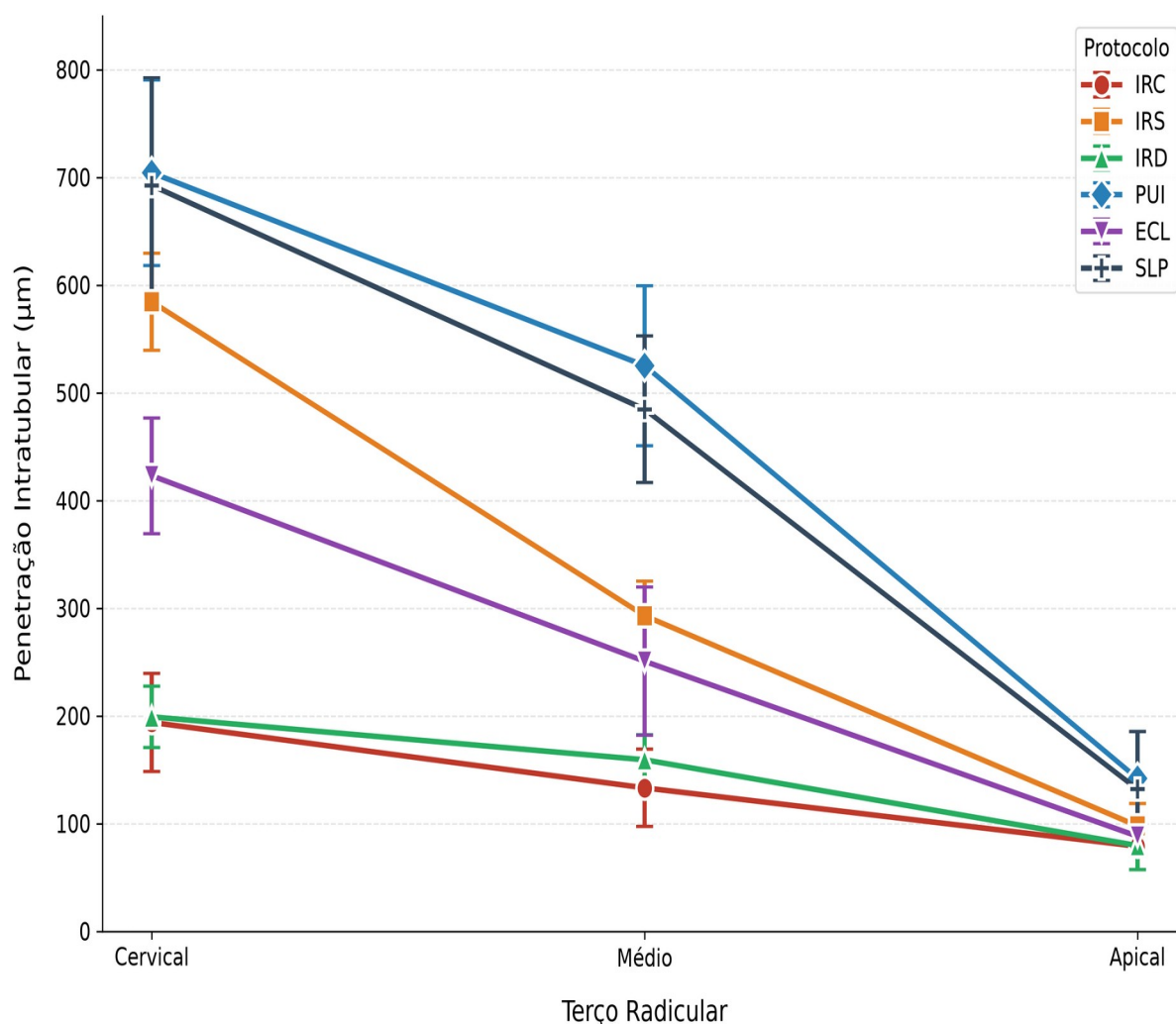




Tabela 2: Matriz de p-valores (Tukey HSD) entre protocolos. Valores de p para comparações par a par. Verde = significativo ($p < 0.05$).

Cervical						
	IRC	IRS	IRD	PUI	ECL	SLP
IRC	—	<0.001	0.999	<0.001	<0.001	<0.001
IRS	<0.001	—	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
IRD	0.999	<0.001	—	<0.001	<0.001	<0.001
PUI	<0.001	<0.001	<0.001	—	<0.001	0.996
ECL	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	—	<0.001
SLP	<0.001	<0.001	<0.001	0.996	<0.001	—

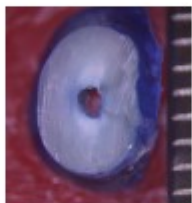
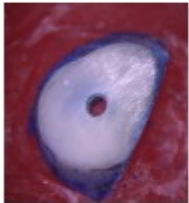
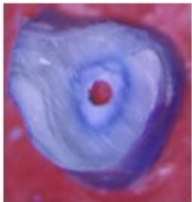
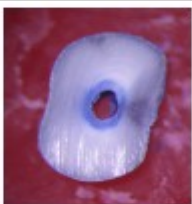
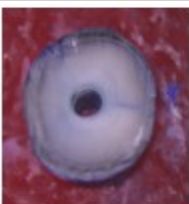
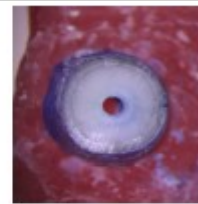
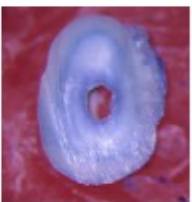
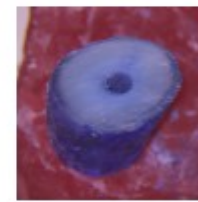
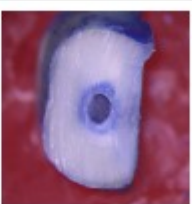
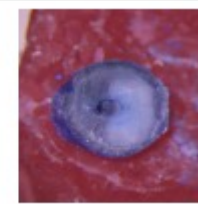
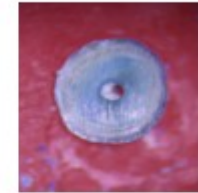
Médio						
	IRC	IRS	IRD	PUI	ECL	SLP
IRC	—	<0.001	0.777	<0.001	<0.001	<0.001
IRS	<0.001	—	<0.001	<0.001	0.283	<0.001
IRD	0.777	<0.001	—	<0.001	<0.001	<0.001
PUI	<0.001	<0.001	<0.001	—	<0.001	0.328
ECL	<0.001	0.283	<0.001	<0.001	—	<0.001
SLP	<0.001	<0.001	<0.001	0.328	<0.001	—

Apical						
	IRC	IRS	IRD	PUI	ECL	SLP
IRC	—	0.602	1.000	<0.001	0.969	<0.001
IRS	0.602	—	0.638	0.005	0.965	0.056
IRD	1.000	0.638	—	<0.001	0.977	<0.001
PUI	<0.001	0.005	<0.001	—	<0.001	0.958
ECL	0.969	0.965	0.977	<0.001	—	0.005
SLP	<0.001	0.056	<0.001	0.958	0.005	—

Células verdes indicam diferença estatisticamente significativa ($p < 0.05$). Teste de Tukey HSD após ANOVA one-way/Kruskal-Wallis significativo. N=15 por grupo.



Figura 1 - Aspecto visual dos espécimes sob microscopia operatória (16×) nos terços cervical, médio e apical, conforme os grupos de irrigação: irrigação convencional (IRC), irrigação sônica (IRS), irrigação com agulha dupla lateral (IRD), irrigação passiva ultrassônica (PUI), Easy Clean (ECL) e Smart Lite Pro (SLP)

GRUPO (Protocolo)	TERÇO CERVICAL	TERÇO MÉDIO	TERÇO APICAL
IRC			
IRS			
IRD			
PUI			
ECL			
SLP			



DISCUSSÃO

Os resultados do presente estudo demonstraram que tanto o protocolo de irrigação quanto o terço radicular influenciaram significativamente a penetração intratubular. De modo geral, PUI e SLP apresentaram os maiores valores, enquanto IRC e IRD apresentaram os menores. Entretanto, a magnitude dessas diferenças variou conforme a região radicular, como demonstrado pela interação significativa entre os fatores. Esse achado indica que a eficiência de um protocolo de irrigação não deve ser interpretada apenas pela média geral, mas também considerando as particularidades anatômicas de cada terço.

A maior penetração observada nos grupos PUI e SLP, principalmente nos terços cervical e médio, pode estar relacionada à ativação mecânica do irrigante. A irrigação ultrassônica passiva promove oscilação da ponta e microfluxo acústico, aumentando a movimentação do líquido, o contato com as paredes dentinárias e as tensões de cisalhamento sobre resíduos e biofilme. A ativação sônica atua por princípio semelhante, embora geralmente utilize frequências menores. Galler et al. (2019) destacaram que a ativação sônica e ultrassônica pode favorecer a penetração do irrigante em áreas não instrumentadas, especialmente quando comparada à irrigação manual dinâmica.

Esse mecanismo também é compatível com os achados de De Gregorio et al. (2010), que observaram maior penetração de hipoclorito de sódio em canais laterais após técnicas de ativação, com desempenho particularmente favorável da irrigação ultrassônica. Da mesma forma, a revisão sistemática e metanálise de Kumar et al. (2023) indicou uma vantagem geral das técnicas de ativação sobre a irrigação convencional, sobretudo em canais laterais e regiões de difícil acesso. Embora os estudos citados tenham avaliado principalmente a penetração do irrigante, seus resultados oferecem suporte biológico para a interpretação de que uma irrigação mais efetiva pode modificar as condições da dentina e favorecer a posterior penetração de materiais endodônticos.

No presente estudo, PUI e SLP não diferiram significativamente entre si nos terços cervical e médio. Essa semelhança sugere que, sob as condições experimentais avaliadas,





tanto a ativação ultrassônica quanto a sônica foram capazes de promover adequada movimentação do irrigante. O desempenho semelhante entre essas técnicas também é coerente com os resultados de Galler et al. (2019), que encontraram diferenças pequenas entre os métodos de ativação nas regiões coronal e média. Assim, a superioridade de uma técnica sobre outra pode depender não apenas do princípio de ativação, mas também de fatores como desenho da ponta, frequência, amplitude, tempo de ativação, volume e composição da solução irrigadora (Iandolo et al., 2025).

Os grupos IRC e IRD apresentaram os menores valores de penetração nos terços cervical e médio, sem diferença significativa entre si. Esse resultado pode indicar menor capacidade de renovação do irrigante, menor remoção da smear layer ou menor alteração das condições superficiais da dentina. A camada de smear layer pode atuar como uma barreira parcial à entrada de soluções e materiais nos túbulos dentinários. Nesse contexto, Teixeira et al. (2005) e Violich & Chandler (2010) ressaltaram a importância da remoção dessa camada para melhorar a limpeza das paredes do canal, enquanto Zehnder (2006) destacou que a irrigação possui funções químicas e mecânicas complementares durante o preparo endodôntico.

A redução progressiva da penetração do terço cervical para o médio e o apical foi observada em todos os protocolos. Esse padrão é compatível com a anatomia do sistema de canais radiculares. O terço apical apresenta, em geral, menor diâmetro, menor quantidade e menor calibre dos túbulos dentinários, maior presença de irregularidades e maior dificuldade de acesso. Carrigan et al. (1984) demonstraram que a densidade e o diâmetro dos túbulos variam de acordo com a localização radicular e podem ser reduzidos pela esclerose dentinária. Além disso, Vertucci (1984) descreveu a maior complexidade anatômica da região apical, que pode incluir ramificações, deltas e canais acessórios. Esses fatores ajudam a explicar por que a penetração foi consistentemente menor nessa região.

Os resultados também se aproximam das observações de Galler et al. (2019), que identificaram diminuição da penetração do irrigante em direção ao ápice. No estudo desses autores, as diferenças entre os métodos de ativação foram mais evidentes no terço apical, onde





a ativação ultrassônica e sônica apresentaram vantagens em relação à ativação manual. Os autores relacionaram esse comportamento à dificuldade de acesso, à menor dimensão dos túbulos e à possibilidade de formação do vapor lock apical, que pode limitar a circulação do irrigante. Entretanto, no presente estudo, embora PUI e SLP tenham mantido os maiores valores numéricos no terço apical, várias comparações entre os grupos não foram estatisticamente significativas. Isso sugere que as limitações anatômicas dessa região podem reduzir a vantagem relativa da ativação. Além disso, Ali et al. (2022) revela em uma meta-análise que os resultados entre agitação sônica e ultrassônica não são absolutamente uniformes, dependendo do desfecho analisado.

A literatura também demonstra que a ativação ultrasônica pode favorecer a remoção de debris e a limpeza de irregularidades devido ao microstreaming acústico (Van der Sluis et al., 2007). Pereira et al. (2021) mostraram que a ação química e mecânica da irrigação influencia a remoção de biofilme em características laterais simuladas, discos de dentina e túbulos dentinários. Mais recentemente, Huynh et al. (2025) destacaram a relevância da ativação sônica na remoção de debris em canais preparados de forma conservadora, enquanto Yoo et al. (2024) demonstraram que a ativação ultrassônica pode melhorar a remoção de hidróxido de cálcio em modelos tridimensionais. Esses achados reforçam que o benefício da ativação está relacionado à melhoria da dinâmica do fluido, e não apenas à ação química do irrigante.

Apesar disso, maior penetração intratubular não deve ser interpretada isoladamente como sinônimo de melhor desempenho clínico do irrigante. Estudos como os de Galler et al. (2019) e Widbiller et al. (2023) utilizaram corantes ou irrigantes como indicadores indiretos, enquanto o presente estudo avaliou a penetração intratubular relacionada aos protocolos investigados. Essa diferença metodológica exige cautela na comparação direta dos valores entre os trabalhos e traz uma visão interessante, onde embora a ativação melhore diversos parâmetros laboratoriais, ainda não há evidência sólida de que qualquer método auxiliar produza necessariamente melhor resultado clínico de longo prazo (Wadia, 2022).





Uma análise importante a ser mencionada é que os protocolos de agitação não necessariamente promovem uma redução de biofilme bacteriano, mas podem colaborar no processo de descontaminação do prepare químico endodôntico (Ahmad et al., 2021, Hoedke et al., 2021).

Algumas limitações devem ser consideradas, já que o modelo experimental ex vivo não reproduz integralmente as condições clínicas, como presença de tecido vital, biofilme organizado, variações de temperatura, umidade, anatomia complexa e pressão periapical. A amostra também foi composta por 15 observações por grupo, o que limita a precisão das estimativas. Além disso, foram observadas diferenças na distribuição e na variabilidade dos dados, tornando recomendável a confirmação dos achados em estudos futuros com modelos estatísticos robustos e amostras maiores.

Clinicamente, os resultados sugerem que PUI e SLP podem ser alternativas úteis para aumentar a penetração intratubular, sobretudo nos terços cervical e médio. Contudo, nenhuma técnica deve ser considerada capaz de eliminar completamente as limitações do terço apical. A efetividade clínica depende da combinação entre preparo adequado, renovação do irrigante, remoção da smear layer, ativação cuidadosa e, ainda, um tempo de descanso do irrigante dentro do canal radicular pós agitação principalmente. Portanto, dentro das limitações deste estudo, PUI e SLP apresentaram o desempenho mais favorável, mas estudos adicionais são necessários para determinar se essa maior penetração resulta efetivamente em melhor selamento e melhores resultados clínicos.

CONCLUSÃO

Os protocolos PUI e SLP promoveram os maiores valores de penetração intratubular do cimento endodôntico, sem diferença estatística entre si, sendo significativamente superiores aos demais protocolos em todos os terços radiculares. Os protocolos IRC e IRD apresentaram os menores valores de penetração intratubular, sem diferença significativa entre si, independentemente do terço radicular avaliado. O terço radicular exerceu influência





significativa sobre a penetração intratubular para todos os protocolos de irrigação, com decréscimo progressivo e significativo na direção cervical, médio e apical. A interação significativa entre protocolo de irrigação e terço radicular demonstra que a magnitude das diferenças entre os protocolos se reduz no terço apical, embora a hierarquia de desempenho se mantenha.

REFERÊNCIAS

AHMAD, M. et al. In vitro evaluation of efficacy of two endodontic sonic-powered irrigant agitation systems in killing single-species intracanal biofilms. *Journal of Dentistry*, [s. l.], v. 115, p. 103859, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103859>. Acesso em: 30 ago. 2026.

ALI, N. T. et al. Efficacy of sonic and ultrasonic activation during endodontic treatment: a meta-analysis of in vitro studies. *Acta Odontologica Scandinavica*, [s. l.], v. 80, n. 8, p. 1-10, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00016357.2022.2061591>. Acesso em: 30 ago. 2026.

BOUTSIUKIS, C. et al. Present status and future directions – irrigants and irrigation methods. *International Endodontic Journal*, [s. l.], v. 55, n. S3, p. 588-612, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/iej.13739>. Acesso em: 30 ago. 2026.

CAI, C. et al. Advances in the role of sodium hypochlorite irrigant in chemical preparation of root canal treatment. *BioMed Research International*, [s. l.], v. 2023, p. 8858283, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2023/8858283>. Acesso em: 30 ago. 2026.

CARRIGAN, P. J. et al. A scanning electron microscopic evaluation of human dentinal tubules according to age and location. *Journal of Endodontics*, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 359-363, 1984. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6590745/>. Acesso em: 30 ago. 2026.

DE GREGORIO, C. et al. Efficacy of different irrigation and activation systems on the penetration of sodium hypochlorite into simulated lateral canals and up to working length: an in vitro study. *Journal of Endodontics*, [s. l.], v. 36, n. 7, p. 1216-1221, 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20630302/>. Acesso em: 30 ago. 2026.





DE OLIVEIRA, R. A. et al. Dentinal tubule penetration of sodium hypochlorite in root canals with and without mechanical preparation and different irrigant activation methods. *Restorative Dentistry and Endodontics*, [s. l.], v. 48, n. 1, e1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5395/rde.2023.48.e1>. Acesso em: 30 ago. 2026.

GALLER, K. M. et al. Penetration depth of irrigants into root dentine after sonic, ultrasonic and photoacoustic activation. *International Endodontic Journal*, [s. l.], v. 52, n. 8, p. 1210-1217, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/iej.13108>. Acesso em: 30 ago. 2026.

GASPARELLI, G. A. et al. Analysis of the penetration of NaOCl 5.25% into dentinal tubules using different irrigation protocols: an ex vivo study. *Australian Endodontic Journal*, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/aej.12824>. Acesso em: 30 ago. 2026.

GOMES, B. P. F. A. et al. Irrigants and irrigation activation systems in Endodontics. *Brazilian Dental Journal*, [s. l.], v. 34, n. 4, p. 1-33, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37909632/>. Acesso em: 30 ago. 2026.

GÜNEŞ, B.; YEŞİLDAL YETER, K.; ALTAY, Y. Impact of different activation procedures on sodium hypochlorite penetration into dentinal tubules after endodontic retreatment via confocal laser scanning microscopy. *BMC Oral Health*, [s. l.], v. 24, art. 1103, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04891-6>. Acesso em: 31 ago. 2026.

HOEDKE, D. et al. Reduction of dual-species biofilm after sonic- or ultrasonic-activated irrigation protocols: a laboratory study. *International Endodontic Journal*, [s. l.], v. 54, n. 12, p. 2219-2228, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/iej.13618>. Acesso em: 30 ago. 2026.

HUYNH, A. et al. Efficacy of laser activated versus sonic activated irrigation for debris removal in conservatively instrumented root canals. *Journal of Endodontics*, [s. l.], v. 51, n. 3, p. 332-339, 2025. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39706474/>. Acesso em: 30 ago. 2026.

IANDOLO A, DINA A, MANCINO D, ROLIN G, COUSSENS C, LOUVRIER A, BELLADONNA FG, EUVRARD E, SILVA EJNL. In vitro experimental study comparing continuous and intermittent irrigation protocols: influence of sodium hypochlorite volume and contact





time on tissue dissolution. *Restorative Dentistry & Endodontics*, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 1-8, 2025. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41189478/>. Acesso em: 31 ago. 2026.

JAIN, S. et al. Comparison of dentinal tubular penetration of intracanal heated and preheated sodium hypochlorite through different agitation techniques. *Journal of Endodontics*, [s. l.], v. 49, n. 6, p. 686-691, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2023.04.007>. Acesso em: 30 ago. 2026.

KUMAR, R. S. et al. Effectiveness of various irrigant activation techniques on the penetration of sodium hypochlorite into lateral canals of mature permanent teeth: a systematic review and meta-analysis. *Saudi Dental Journal*, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 1-23, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36817024/>. Acesso em: 30 ago. 2026.

PEREIRA, T. C. et al. Chemical and mechanical influence of root canal irrigation on biofilm removal from lateral morphological features of simulated root canals, dentine discs and dentinal tubules. *International Endodontic Journal*, [s. l.], v. 54, n. 1, p. 112-129, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/iej.13399>. Acesso em: 30 ago. 2026.

TEIXEIRA, C. S.; FELIPPE, M. C. S.; FELIPPE, W. T. The effect of application time of EDTA and NaOCl on intracanal smear layer removal: an SEM analysis. *International Endodontic Journal*, [s. l.], v. 38, n. 5, p. 285-290, 2005. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2591.2005.00930.x>. Acesso em: 30 ago. 2026.

VAN DER SLUIS, L. W. M. et al. Passive ultrasonic irrigation of the root canal: a review of the literature. *International Endodontic Journal*, [s. l.], v. 40, n. 6, p. 415-426, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2007.01243.x>. Acesso em: 30 ago. 2026.

VERTUCCI, F. J. Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, [s. l.], v. 58, n. 5, p. 589-599, 1984. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6595621/>. Acesso em: 30 ago. 2026.

VIOLICH, D. R.; CHANDLER, N. P. The smear layer in endodontics – a review. *International Endodontic Journal*, [s. l.], v. 43, n. 1, p. 2-15, 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20002799/>. Acesso em: 30 ago. 2026.





VIRDEE, S. S. et al. The influence of irrigant activation, concentration and contact time on sodium hypochlorite penetration into root dentine: an ex vivo experiment. *International Endodontic Journal*, [s. l.], v. 53, n. 7, p. 986-997, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/iej.13290>. Acesso em: 30 ago. 2026.

WADIA, R. Irrigants and irrigation methods. *British Dental Journal*, [s. l.], v. 232, p. 533, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41415-022-4211-0>. Acesso em: 30 ago. 2026.

WIDBILLER, M. et al. Impact of endodontic irrigant activation on smear layer removal and surface disintegration of root canal dentine in vitro. *Healthcare*, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 376, 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9914448/>. Acesso em: 30 ago. 2026.

YOO, Y. J. et al. Efficacy of different irrigation needles and ultrasonic activation on calcium hydroxide removal: a micro-CT study using 3D-printed endodontic models. *Journal of Endodontics*, [s. l.], v. 50, n. 10, p. 1478-1483, 2024. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39033800/>. Acesso em: 30 ago. 2026.

ZEHNDER, M. Root canal irrigants. *Journal of Endodontics*, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 389-398, 2006. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16631834/>. Acesso em: 30 ago. 2026.

Recebido em: 02/08/2026

Aprovado em: 23/08/2026

Publicado em: 11/09/2026

