

UNIVERSIDADE DO GRANDE RIO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA

**CORRELAÇÃO DE DIFERENTES VARIÁVEIS IDENTIFICADAS
RADIOGRAFICAMENTE COM A FRATURA RADICULAR DE DENTES
TRATADOS ENDODONTICAMENTE: ESTUDO RETROSPECTIVO
POR TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE FEIXE CÔNICO**

TESE

WARLEY OLIVEIRA SILVA

2023

UNIVERSIDADE DO GRANDE RIO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA

CORRELAÇÃO DE DIFERENTES VARIÁVEIS IDENTIFICADAS
RADIOGRAFICAMENTE COM A FRATURA RADICULAR DE DENTES TRATADOS
ENDODONTICAMENTE: ESTUDO RETROSPECTIVO POR TOMOGRAFIA
COMPUTADORIZADA DE FEIXE CÔNICO

WARLEY OLIVEIRA SILVA

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Odontologia da
Universidade do Grande Rio
(UNIGRANRIO) como parte dos
requisitos para a obtenção do grau de
Doutor em Odontologia.

Orientador:
Prof. Dr. Flávio Rodrigues Ferreira Alves

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Ronaldo e Andréia, meus maiores incentivadores. Todas as minhas conquistas pertencem a vocês, obrigado por todo apoio, incentivo e paciência nessa fase tão importante da minha vida. Dedico carinhosamente este trabalho ao meu tio Sérgio Antônio (*in memoriam*) pela dedicação que teve como professor e paixão pelos estudos, motivo de inspiração e orgulho para mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por abençoar o meu caminho, por ouvir minhas preces, por me permitir realizar os meus sonhos e ser fortaleza em minha vida!

Aos meus pais Ronaldo e Andréia, por sempre acreditarem no meu potencial e fazer dos meus sonhos também deles. Obrigado pela paciência, por me mostrar desde criança o valor do estudo e que nada é impossível quando há dedicação, persistência e amor no que faz.

Agradeço minha família pelo apoio, por torcerem por mim e estar sempre presentes.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio Rodrigues Ferreira Alves, por contribuir na minha formação profissional enormemente, por me ensinar que disciplina, seriedade e muito esforço são palavras de ordem para alcançar a excelência. Obrigado pelo apoio, incentivo e oportunidades.

Agradeço todos os professores do PPGO-Unigranrio, pelos ensinamentos e contribuições na minha formação como pesquisador. Em especial agradeço à Prof^a Sabrina Brasil pela amizade e por me incentivar a ir além, desde que fui seu aluno no curso de Especialização.

Aos Professores Siqueira e Isabela Rôças, pelos ensinamentos, por compartilhar uma Endodontia de excelência, tenho muito orgulho de ter sido alunos

de vocês.

À Profª Renata Perez, pela contribuição e ajuda significativa nesse trabalho, pela amizade estabelecida e por estar sempre disposta em ajudar.

À Profª Renata Costa Val Rodrigues, pelos ensinamentos, amizade estabelecida e oportunidades no curso de Especialização. Agradeço por ter me dado a oportunidade de iniciar na carreira docente na Funorte-Ipatinga.

Aos Professores da UFVJM, em especial Profª Adriana Botelho, Karine Tavano, Cristina Isolan e Mariana Moda que me apoiaram tanto nesse momento e tornaram meus dias especiais em Diamantina.

À minha amiga Débora Souto, por se fazer presente mesmo de longe, por me incentivar e apoiar nessa fase.

Aos meus amigos do PPGO do mestrado Thamyres Monteiro e Amanda Marques. À minha dupla de trabalhos desde o mestrado e hoje uma grande amiga do doutorado Giuliana Soiumu. Vocês tornaram a rotina mais leve e foi maravilhoso conviver com vocês!

“Quem acredita sempre alcança”

(Renato Russo)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA	01
2. JUSTIFICATIVA	32
3. OBJETIVO(S)	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
5. RESULTADOS.....	40
6. DISCUSSÃO.....	45
7. CONCLUSÃO.....	51
8. REFERÊNCIAS.....	52
9. ANEXOS.....	72

RESUMO

Objetivo. Correlacionar diferentes variáveis identificadas radiograficamente por Tomografia Computadorizada de Feixe Cônico (TCFC) com fraturas radiculares em dentes tratados endodonticamente. **Materiais e Métodos.** A amostra foi composta por arquivos digitais de TCFC de dentes, obtidas com o tomógrafo Eagle V-Beam (Dabi Atlante, Ribeirão Preto, SP, Brasil), de pacientes diagnosticados com fratura radicular, conforme atestado por um radiologista. Foram incluídos 41 exames, e as análises realizadas com o software OnDemand 3D Dental (OnDemandDApp 1.0.9.2225; Cybermed, Inc, Coreia do Sul). Os parâmetros mensurados incluíram extensão da fratura, classificação da fratura (horizontal, vertical, oblíqua), qual raiz foi afetada, terço do canal, presença de retentor intrarradicular, presença de área hipodensa, diâmetro do canal e da raiz, área do canal e da raiz, e proporção do canal alargado em relação à raiz. **Resultados.** O tipo mais frequente de fratura radicular foi a oblíqua (60%), seguido pelo vertical (36,7%) e horizontal (3,3%). Em relação à proporção da área do canal preparado em relação à área da raiz, a média foi de 31,05%, com um mínimo de 11,62% e um máximo de 63,13%. Quanto aos tipos de fraturas, as fraturas oblíquas (60,0%) e verticais (36,7%) foram significativamente mais comuns do que as fraturas horizontais (3,3%) ($p < 0,05$). **Conclusão.** As fraturas oblíquas foram significativamente mais prevalentes, ocorrendo em aproximadamente dois terços dos casos. Os molares foram os dentes predominantemente afetados, representando um pouco mais da metade dos casos. A maioria das fraturas se estendeu por mais de um terço do comprimento da raiz. Por fim, os resultados sugerem que a área do canal preparado não deve exceder um terço do diâmetro da raiz para prevenir a ocorrência de fraturas radiculares.

Palavras-chave: fratura radicular, TCFC, tratamento endodôntico

ABSTRACT

Aim. To correlate different variables identified radiographically by Cone Beam Computed Tomography (CBCT) with root fractures in endodontically treated teeth.

Materials and Methods. The sample consisted of digital files of CBCT scans of teeth obtained using the Eagle V-Beam tomograph (Dabi Atlante, Ribeirão Preto, SP, Brazil) from patients diagnosed with root fractures, as confirmed by a radiologist. A total of 41 scans were included, and the analyses conducted with the OnDemand 3D Dental software (OnDemandeDApp 1.0.9.2225; Cybermed, Inc, South Korea). The measured parameters included fracture extent, fracture classification (horizontal, vertical, oblique), which root was affected, canal third, presence of intraradicular retainer, presence of hypodense area, canal and root diameter, canal and root area, and ratio of widened canal to root. **Result.** The most frequent type of root fracture was oblique (60%), followed by vertical (36.7%) and horizontal (3.3%). Regarding the proportion of prepared canal area to root area, the mean was 31.05%, with a minimum of 11.62% and a maximum of 63.13%. Concerning fracture types, oblique (60.0%) and vertical (36.7%) fractures were significantly more common than horizontal fractures (3.3%) ($p < 0.05$). **Conclusion.** Oblique fractures were significantly more prevalent, occurring in approximately two-thirds of cases. Molars were the predominantly affected teeth, accounting for just over half of the cases. The majority of fractures extended over more than one-third of the root length. Finally, the results suggest that the prepared canal area should not exceed one-third of the root diameter to prevent the occurrence of root fractures.

Keywords: root fracture, CBCT, endodontic treatment

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mensuração da extensão da fratura e classificação como fratura	36
Figura 2	Mensuração de área hipodensa adjacente à raiz, em altura e comprimento no corte sagital, dente 21	36
Figura 3	Mensuração do canal radicular alargado, menor remanescente dentinário e raiz dentinária, no corte axial, na região de 4 mm abaixo da JCE, canal distal do dente	37
Figura 4	Área do canal radicular e área total da raiz, corte axial, raiz distal do dente 36, região de JCE	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Estudos <i>in vivo</i> que utilizaram TCFC para o diagnóstico de fraturaradicular	16
Tabela 2	Influência da espessura da fratura radicular na capacidade de detectável pela TCFC	30
Tabela 3	Frequências absolutas e relativas das variáveis analisadas	41
Tabela 4	Análise descritiva das variáveis analisadas	42
Tabela 5	Medidas de diâmetro e área do canal radicular e raiz e associação com o tipo de fratura	43
Tabela 6	Associação entre tipo de fratura e variáveis categóricas	44

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

AAE	American Association of Endodontists
AAOMR	Academia Americana de Radiologia Oral e Maxilofacial
AUC	Área comparável sob a curva
DICOM	Comunicação de imagens de medicina
EDTA	Ácido etilenodiaminotetracético
FOV	(Field of view)
FRH	Fratura radicular horizontal
FRV	Fratura radicular vertical
Kv	Kilovoltagem
JCE	Junção cimento-esmalte
MTAD	Mistura de isômero de tetraciclina e detergente
TCFC	Tomografia computadorizada de feixe cônico
TC	Tomografia computadorizada

1. INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA

1.1 DENIFNIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS FRATURAS RADICULARES

As fraturas radiculares envolvem danos no cimento, dentina e polpa (RANKA *et al.*, 2012; SALINEIRO *et al.*, 2017; KRASTL *et al.*, 2021). Estas fraturas iniciam quando um estresse aplicado sobre a raiz excede a força intrínseca do tecido dentinário (XU *et al.*, 2021). O prognóstico das fraturas radiculares é geralmente desfavorável, mas fatores como localização da fratura, o tipo e distância entre os fragmentos podem influenciar de maneira significativa o status pulpar (DOGAN *et al.*, 2018).

Quando ocorre uma fratura radicular, os tecidos duros do dente (dentina e cimento) se rompem, enquanto o tecido pulpar pode sofrer uma série de injúrias, dependendo se o fragmento coronário da raiz foi deslocado ou não (ABBOTT, 2019). Linha de fraturas radiculares comunicam com a cavidade oral através do ligamento periodontal, que pode ser via de entrada para microrganismos. Além disso, o suprimento sanguíneo da polpa pode ser alterado e resultar em uma necrose pulpar (LEE *et al.*, 2021).

As fraturas radiculares podem ser completas ou incompletas e podem se estender ao longo raiz dentária, em algumas situações, da polpa para o ligamento periodontal (WANG *et al.*, 2010). Baseado em imagens de tomografia computadorizada de feixe cônico as fraturas podem ser classificadas em: horizontal, vertical ou oblíqua. Conforme a localização na raiz as fraturas radiculares podem ser definidas como fratura no terço cervical, médio ou apical (BUENO *et al.*, 2021; MIZUHASHI *et al.*, 2021). Existe ainda uma classificação de fraturas segundo a etiologia como aguda, que são fraturas decorrentes de traumatismos ou fraturas crônicas, que são aquelas decorrentes de fatores que podem contribuir de maneira

significativa para a fratura dentária como hábitos parafuncionais, dentes com restaurações extensas e tratamento endodôntico (POPESCU *et al.*, 2017).

1.1.1 Fratura radicular vertical (FRV)

A FRV é longitudinal (sentido axial) envolve cimento e dentina e pode ser classificada como incompleta quando apenas um lado da raiz é comprometido ou completa quando estende ao lado oposto da raiz (PATEL *et al.*, 2022). A prevalência desse tipo de fratura varia de 3.69% a 31.50% (YOSHINO *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2020). Normalmente inicia na parede interna do canal radicular e se propaga para superfície externa da raiz, na maioria das vezes no sentido vestibulolingual (GHAZIZADEH *et al.*, 2020; GULIBIRE *et al.*, 2021). Com base no exame tomográfico, há autores que classificam as FRVs em: com deslocamento, sutil e oculta. As FRV com deslocamento são fraturas que há deslocamento óbvio dos segmentos, a FRV sutil são fraturas incompletas, estreitas e finas, sem separação óbvia do fragmento e FRV oculta são as que não demonstram clareza (GAO *et al.*, 2021)

De acordo com PATEL *et al.* (2022), a patogênese da FRV inicia a partir de uma microtrinca, que se propaga devido a alguns fatores como força oclusal, hábitos parafuncionais, em alguns casos em um dente já fragilizado por perda de estrutura seja por cárie, necessidade de tratamento endodôntico ou reabilitação protética. Em casos avançados ocorre a separação dos fragmentos, após um período de carga cíclica prolongada, sendo via de entrada para microrganismos e o local da fratura proporciona um ambiente favorável para formação de biofilme.

Esse tipo de fratura normalmente ocorre em dentes tratados endodonticamente, no entanto, também há relatos em dentes vitais, sendo que nesses casos pode ocorrer um diagnóstico equivocado, pois esse tipo de fratura pode simular doença periodontal ou endodôntica (LIAO *et al.*, 2021).

A inflamação no tecido periodontal adjacente se inicia imediatamente devido a contaminação por bactérias da cavidade oral, contribuindo para perda óssea lateral, com a formação de tecido de granulação, defeito ósseo nas proximidades da fratura e mobilidade dentária. No entanto, não há um sinal patognomônico clínico e radiográfico desse tipo de fratura (FREITAS *et al.*, 2018; GUO *et al.*, 2019; QUINTERO-ÁLVARES *et al.*, 2021).

Alguns grupos dentários e tipos de raízes são mais propensos a FRV: raízes com diâmetro oval no sentido vestibulolingual, como em pré-molares superiores e inferiores, raiz mesiovestibular de molares superiores e mesial de molares inferiores são mais suscetíveis a sofrer FRV (HAUEISEN *et al.*, 2013). A detecção desse tipo de fratura é desafiante, sendo necessário correlacionar o exame clínico com radiográfico, sendo que em alguns casos é necessário cirurgia exploratória (QUINTERO-ÁLVAREZ *et al.*, 2021; HEKMATIAN *et al.*, 2018).

Devido ao fato desse tipo de fratura ser mais prevalente em dentes tratados endodonticamente, algumas medidas preventivas têm sido preconizadas para evitá-la, dentre as quais se destacam: aberturas coronárias mais conservadoras, evitar preparos com instrumentos de grande conicidade nos canais radiculares, reforçar o uso de placas de bruxismo para pacientes que possuem hábitos parafuncionais (BAAGEEL *et al.*, 2016).

É importante diferenciar a FRV de outras condições clínicas semelhantes, no entanto, a acurácia diagnóstica através de radiografias é muito difícil, pois depende da apropriada angulação do feixe de raios X e contraste, devido as limitações impostas pela radiografia convencional, TCFC tem sido proposto para auxiliar no diagnóstico (KHASNIS *et al.*, 2014).

1.1.2 Fratura radicular horizontal (FRH)

As FRH podem ser definidas conforme a direção como uma linha que se estende transversalmente ou obliquamente perpendicular ao longo eixo do dente (LIAO *et al.*, 2022). Essas fraturas são também chamadas intra-alveolares, podendo acometer qualquer terço da raiz (GIRELLI *et al.*, 2020). Normalmente o terço médio da raiz é o mais acometido, principalmente em casos que o fator etiológico é de natureza traumática, sendo que o incisivo central superior possui maior chance de ser afetado devido a posição que ocupa no arco dentário (TAORI *et al.*, 2022). As fraturas radiculares horizontais, possuem uma frequência relativa de ocorrência de 57% no terço médio da raiz, seguido de 34% no terço apical e os incisivos centrais possuem uma frequência de 95% desta ocorrência (ANANTULA *et al.*, 2021). Esse tipo de fratura em comparação com FRV possui uma incidência de 0,5%-7% (MAY *et al.*, 2013).

O diagnóstico das FRH, também são considerados desafiantes, principalmente devido artefatos e sobreposição de estruturas anatômicas (SALINEIRO *et al.*, 2015). Alguns fatores como estágio do desenvolvimento da raiz, grau de separação entre os fragmentos, mobilidade e condições de vitalidade da polpa podem interferir no sucesso do tratamento (KAUR *et al.*, 2018; ANANTULA *et al.*, 2021).

As FRH podem ser visualizadas também em dentes posteriores, com fator etiológico de trauma indireto, no entanto, outros fatores como hábitos parafuncionais, trauma oclusal, cáries dentárias extensas e iatrogenias podem contribuir para a ocorrência (MALHOTRA *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2011). As fraturas horizontais no terço médio e apical, nem sempre são sintomáticas e podem ser descobertas através de achados em exames, ou em algumas situações o paciente pode relatar dor durante a mastigação. Dependendo do grau de gravidade da fratura pode ocorrer

mobilidade do elemento dentário (GIUDICE *et al.*, 2018).

As radiografias periapicais e panorâmicas, possuem limitações frente a esse tipo de fratura, pois se o feixe de raios X, não passa diretamente na linha de fratura, a mesma não poderá ser visualizada. Além disso, outros fatores como a espessura de separação entre os fragmentos e sobreposição de estruturas podem comprometer a visualização em exames bidimensionais (MAY *et al.*, 2013).

É importante ressaltar que são necessárias várias tomadas radiográficas, em diferentes ângulos, para maiores chances de diagnóstico, sendo que a TCFC é um método que contorna as limitações impostas pelas radiografias, fornecendo imagens no plano axial, sagital e coronal, produzindo imagens com menor dose de radiação comparadas à TC (AVSEVER *et al.*, 2014). No entanto, a TCFC também possui algumas limitações no diagnóstico desse tipo de fratura, principalmente quando há estruturas de alta densidade como retentores intrarradiculares metálicos e material obturador (COSTA *et al.*, 2011).

TSAI *et al.* (2017) descreveram as características clínicas e radiográficas de fraturas radiculares horizontais em dentes posteriores com e sem histórico de trauma. Foram investigados 24 pacientes de 2006 a 2015, com histórico de trauma e

31 com FRH em 28 dentes posteriores. A idade predominante dos pacientes acometidos foram de 50 a 70 anos (75%), a maioria das fraturas foram encontradas em dentes não tratados endodonticamente (79%), sem coroa e restaurações amplas (82%), ainda foi constado diagnóstico inadequado de periodontite crônica em (92%) dos pacientes.

1.2 CAUSAS DE FRATURA RADICULAR

As causas de fraturas radiculares estão relacionadas a procedimentos endodônticos, protéticos e traumatismos (MIZUHASHI *et al.*, 2021). Estudos apontam

uma correlação de fatores associados ao tratamento endodôntico e protéticos com a ocorrência de FRV, dentre as principais causas se destacam sobreinstrumentação, força excessiva durante a condensação lateral, preparo para retentores intrarradiculares (LIAO *et al.*, 2017).

De acordo com PATEL *et al.* (2022) a etiologia das FRVs é multifatorial, mas podem ser divididas em duas categorias: a de fatores predisponentes e fatores contribuintes. Dentre os fatores predisponentes são citados fatores relacionados a integridade estrutural dos dentes, fraturas e microtrincas preexistentes, tratamentos restauradores extensos, hábitos parafuncionais, a localização das forças oclusais, sendo que dentes posteriores são mais propensos a FRV do que anteriores, além disso são mencionados a morfologia do canal radicular e anatomia. Dentre os fatores contribuintes, os autores mencionaram o tratamento endodôntico e tratamento restaurador.

Durante o preparo químico-mecânico ocorre uma remoção significativa de estrutura dentinária, para que ocorra um debridamento das paredes do canal radicular e melhore a eficácia da irrigação, no entanto, diversos defeitos dentinários como microtrincas e linhas de fraturas podem ser induzidos durante essa fase do tratamento (SHEMESH *et al.*, 2009; MUNARI *et al.*, 2019; CAMPELLO *et al.*, 2021).

DA SILVA *et al.* (2020), demonstraram em um estudo a influência do pré-alargamento cervical na resistência à fratura de dentes tratados endodonticamente. Uma amostra de 44 incisivos inferiores foi dividida em 4 grupos: sem pré alargamento, pré-alargamento com Gates-Gliden 2 e 3, pré-alargamento com instrumento 25.07 WXN (Navegador; MEDIN, Nové Město na Moravě, República Tcheca), pré-alargamento com o instrumento 25.08 (Easy, Equipamentos Odontológicos-Belo Horizonte). O pré-alargamento cervical reduz a espessura dentinária e aumentou o volume dos canais em todos os grupos em 3 mm a 5 mm, o

pré-alargamento com Gattes-Gliden reduziu significativamente a resistência a fraturados dentes ($p < 0,05$), os demais grupos não houve diferença.

YILDIZ *et al.* (2021), verificaram a influência do taper e tamanho do preparo apical durante o preparo químico mecânico na resistência à fratura radicular de 84 incisivos inferiores extraídos. Os dentes foram divididos em 7 grupos: controle (sem preparo), 25/0.04, 25/0.06, 25/0.08, 30/0.04, 30/0.06, 30/0.08. A resistência à fratura foi realizada através de um ensaio mecânico e foi constatado que a seleção por taper maior pode contribuir para fraturas radiculares, sendo encontradas diferenças significativas entre os grupos 25/0.04 e 25/0.08; 30/0.04 e 30/0.08; e 25/0.08 e 30/0.04. Mudanças no taper de 0.04 para 0.08 sem modificar o diâmetro do preparo apical influenciou de maneira significativa para redução da resistência a fratura. Os grupos 25/0.08 e 30/0.08 demonstraram menor resistência à fratura, devido ao fato de maior remoção de estrutura dentinária e o fato das limas com maior taper possuírem maior rigidez, ocasionando maiores modificações na morfologia do canal radicular.

De acordo com CHAI & TAMSE (2018,) as forças excessivas durante a compactação da guta-percha é um fator etiológico de fraturas verticais radiculares em pré-molares superiores, principalmente devido a característica anatômica complexa desses dentes, sendo mais predominante na raiz vestibular.

Os hábitos parafuncionais também são apontados como fator predisponente para fratura radicular em dentes tratados endodonticamente, devido a mudança do mecanismo de propriocepção desses dentes há uma redução da capacidade de resposta a cargas mastigatórias e hábitos parafuncionais (GARCÍA-GUERRERO *et al.*, 2021).

1.3 FRATURA EM DENTES TRATADOS ENDODONTICAMENTE

O tratamento endodôntico pode enfraquecer a estrutura dentária devido a remoção de tecido dentinário durante as fases de abertura e modelagem dos canais radiculares (TIEPO *et al.*, 2017). Diversos estudos avaliaram qual material restaurador proporciona melhor distribuição de forças e maior resistência à fratura radicular após o tratamento, por exemplo os retentores de fibra de vidro têm sido mais utilizados em comparação com os retentores metálicos, por possuírem um módulo de elasticidade similar da dentina e distribuir uniformemente as tensões sobre as estruturas dentárias (HARALUR *et al.*, 2018; ÖZTÜRK *et al.*, 2019). A fratura radicular vertical é a terceira causa mais comum de extrações em dentes tratados endodonticamente (KHASNIS *et al.*, 2014).

Nos dentes tratados endodonticamente a perda de integridade estrutural e fatores pré-existent, como lesões cariosas extensas são fatores relevantes. Desse modo, é importante que seja investigado nesses dentes a presença de contatos prematuros, se o paciente possui hábitos parafuncionais, para evitar possíveis fraturas radiculares (PATEL *et al.*, 2022). Além disso a escolha inadequada do tamanho do retentor intrarradicular, a remoção excessiva de tecido dentinário para inserção de retentores são fatores etiológicos para fratura radicular vertical nos dentes tratados endodonticamente (KAJAN *et al.*, 2018).

As soluções irrigadoras utilizadas durante o preparo químico-mecânico, como hipoclorito de sódio e EDTA, podem contribuir para alterações estruturais na dentina, reduzindo a força flexural, módulo de elasticidade e dureza, aumentando os riscos de fraturas radiculares (BELLI *et al.*, 2014)

UZUNOGLU *et al.* (2016), avaliaram a influência de 4 regimes finais de irrigação nos valores de resistência à fratura radicular de dentes tratados endodonticamente. Foram utilizados 80 incisivos inferiores, 10 raízes utilizadas

como controle negativo e o restante preparadas com Protaper F2. Desses dentes, 10 foram utilizados como controle positivo e os demais ($n = 60$) foram divididas nos grupos de acordo com o protocolo de irrigação: 5 mL solução salina, EDTA 17%, EDTA com surfactante, clorexidina, QMix e MTAD. Os dentes irrigados com EDTA com surfactante e QMix mostraram maiores fraturas radiculares verticais, em comparação ao grupo controle positivo ($p < 0,05$). Os dentes expostos a clorexidina e MTAD, mostraram menores fraturas radiculares verticais em comparação ao grupo controle negativo ($p < 0,05$). A exposição a soluções como QMix e EDTA contribuíram para maiores taxas de fraturas radiculares.

KARYGIANNI *et al.* (2013) avaliaram o impacto do retratamento convencional e retratamento cirúrgico na ocorrência de fratura radicular vertical. Durante um período de 13 anos, foram extraídos 200 dentes retratados endodonticamente, de 192 pacientes com FRV. A maioria dos dentes com FRV (62.31%) passaram por uma combinação de retratamento convencional e cirurgia perirradicular, mulheres apresentaram mais FRV (64.6%) em comparação aos homens (35.94%), e a média de idade foi de 51.1 e 55.1, sendo que essa diferença para idade foi estatisticamente significativa. Primeiros e segundos pré-molares restaurados com resina composta e sem retentor intrarradicular foram mais susceptíveis a FRV.

Em um estudo de ÇIÇEK *et al.* (2015), foi comparado a resistência à fratura radicular vertical de 72 pré-molares inferiores instrumentados com os seguintes instrumentos: Protaper universal, Protaper Next, Wave one, Twisted File, Mtwo e Revo S. Posteriormente, esses dentes foram obturados pela técnica do cone único eselados com resina, sendo então realizado um ensaio mecânico aplicando uma força de 1 mm/minuto até a raiz fraturar. O grupo instrumentado com Protaper Next foi o mais resistente à fratura e o grupo Mtwo foi que apresentou menor resistência à fratura radicular vertical, as diferenças foram estatisticamente significativas entre esses dois

grupos.

PULEIO *et al.* (2022) avaliaram através de uma revisão sistemática se a instrumentação do canal radicular com instrumentos de conicidade reduzida diminui o risco de fratura radicular em comparação com os de maiores conicidades. Foram avaliados 20 estudos em humanos e *in vitro*. No entanto, não foi possível obter uma conclusão definitiva uma vez que não havia nenhum ensaio clínico randomizado.

1.4 DIAGNÓSTICO CLÍNICO

O exame clínico da estrutura dentária com magnificação, o uso de corantes como azul de metileno e transiluminação com luz de led, podem auxiliar o diagnóstico das fraturas radiculares. Além disso, é importante investigar bolsas periodontais, após remoção de placa dentária, pois podem ser um indício de fraturas radiculares (BHANDERI, 2021). A apresentação clínica das fraturas radiculares é variável, os sinais e sintomas variam conforme a posição da fratura, condição periodontal e tipo de dente (MOULE & KAHLER, 1999).

Em algumas situações o diagnóstico e a localização exata das fraturas, somente poderão ser obtidos através da cirurgia exploratória com retalho mucoperiosteal. As FRV frequentemente são mal diagnosticadas, o que pode favorecer tratamentos equivocados e perda óssea na área envolvida (ÖZER *et al.*, 2011). Um dos sinais clínicos mais importantes é dor à mastigação, podem estar presentes abscessos ou fístulas próximos ao dente acometido (KAJAN & TAROMSARI, 2012).

Os casos de fratura radicular horizontal em dentes posteriores, podem ser mais facilmente diagnosticados se a linha de fratura for identificada acima da gengiva marginal, pois a maioria dos dentes nesse tipo de fratura não apresentam inflamação gengival evidente, no entanto, caso não seja possível identificar uma cirurgia

exploratória pode ser indicada (LIAO *et al.*, 2022).

PRADEEPKUMAR *et al.* (2016), em um estudo de coorte retrospectivo, verificaram o tempo de diagnóstico das FRVs em dentes tratados endodonticamente e correlacionaram a diferentes fatores. Foram avaliados 197 dentes tratados endodonticamente, com coroa e sem retentor intrarradicular, com suspeita de FRV. O diagnóstico de fratura foi confirmado por exploração cirúrgica. Os dentes mais acometidos foram molares inferiores (34%) e pré-molares superiores (22.8%). O tempo pós-operatório para o diagnóstico de uma fratura radicular vertical foi de 4,35 ($\pm 1,96$) anos. Os achados clínicos mais comuns foram dor à percussão (60%), dor à palpação (62%), presença de bolsa periodontal profunda (81%), inchaço ou fístula (67%).

YUAN *et al.* (2021) investigaram os tipos de fraturas e direções em dentes superiores, através de uma análise de 274 primeiros molares superiores diagnosticado com fraturas comprovado por TCFC. As taxas de fraturas em dentes não tratados endodonticamente tiveram maior proporção em raízes palatinas (56.1%) em comparação com raiz mesiovestibular (36.1%) e distovestibular (7.8%). Nos dentes tratados endodonticamente a proporção foi maior nas raízes mesiovestibulares (52.7%) em comparação com as raízes palatinas (36.5%) e distovestibular (10.8%). O tipo mais comum de fratura foi a vertical, as raízes palatina e vestibular foram comumente fraturadas no sentido mesiodistal e vestibulopalatino.

1.5 DIAGNÓSTICO ATRAVÉS DE TCFC

O desenvolvimento da TCFC se deu no final da década de 90 e possui como maior vantagem a menor dose de radiação empregada em comparação a tomografia computadorizada convencional (TC), as imagens são adquiridas através de um sensor e a fonte de radiação que rotaciona em torno da cabeça do paciente com um

ângulo de 180°-360°. A área de interesse dos raios X é limitada pela ação de colimação do feixe primário de raios X do TCFC (PATEL, 2009; FISEKCIOGLU *et al.*, 2014). A dose de radiação utilizada depende do tipo de equipamento e a radiação está diretamente relacionada com o período para obtenção e o campo da imagem (DOGAN *et al.*, 2018). A TCFC é considerada a melhor opção de em comparação as radiografias periapicais, no entanto, exige habilidade do profissional para interpretar esse tipo de exame. A acurácia da TCFC apresenta diferenças quando empregada em estudos *in vitro* e *in vivo*, pois, em uma situação *in vitro* que não há a presença de fatores relacionados ao paciente como os tecidos moles e osso alveolar que pode influenciar na qualidade da imagem (ZHANG *et al.*, 2019).

De acordo com FAYAD *et al.* (2012), os cinco sinais no exame tomográfico que são compatíveis com o diagnóstico de FRV são: perda óssea na região do terço médio da raiz e osso coronal intacto e com defeito na porção apical, ausência de toda lâmina óssea vestibular nos planos axial e/ou coronal, radiolusência em torno de uma raiz onde termina um retentor intrarradicular, espaço entre a lâmina vestibular e/ou lingual e superfície da raiz.

WANDERLEY *et al.* (2018) avaliaram se a orientação do dente em relação ao feixe de radiação tem influência na detecção de FRV. Para essa investigação foram utilizados 30 dentes extraídos e inseridos em uma mandíbula humana seca, os dentes foram avaliados em 3 condições: sem material obturador, com material obturador e com retentor intrarradicular. FRV foram produzidas nesses dentes através de um ensaio mecânico. As imagens de TCFC foram obtidas em duas orientações: perpendicular e paralela ao plano de projeção de raio X. Foi evidenciado que a orientação do dente não influencia no diagnóstico de FRV e não houve diferenças significativas entre os grupos.

BHATT *et al.* (2021) compararam a eficácia diagnóstica da radiografia periapical e TCFC com base nas indicações da Associação Americana de Endodontia (AAE) e Academia Americana de Radiologia Oral e Maxilofacial (AAOMR). De acordo com os autores, 1 caso de FRV do total de 28 pacientes foi detectado antes da tomada tomográfica, após a solicitação de TCFC foram detectados 10 pacientes de 28 pacientes com FRV. Os autores constataram que TCFC revelou mais patologias endodônticas e fraturas radiculares do que a radiografia convencional. A maioria dos casos que foram solicitados TCFC confirmaram a fratura.

MIZUHASHI *et al.* (2021) avaliaram diferenças entre fraturas radiculares horizontais e verticais de 51 TCFC de pacientes com diagnóstico confirmado de fratura radicular. Os autores evidenciaram que houve diferenças na ocorrência de fraturas horizontais e verticais entre dentes vitais e tratados endodonticamente. Houve também diferenças entre a ocorrência de acordo com os dentes anteriores, pré-molares e molares. A maior incidência de FRV foi em dentes tratados endodonticamente e houve mais FRV do que FRH em pré-molares.

ALAUAILY & AZIM (2022) identificaram no exame tomográfico e radiográfico os padrões de perda óssea e fatores preditores clínicos para o diagnóstico de dentes trincados e com FRV. Foram avaliados exames de TCFC e radiográfico de 95 pacientes diagnosticados com FRV ou dente trincado. Radiografias periapicais e TCFC foram avaliadas por dois examinadores para identificar os padrões de perda óssea relacionados a esses dentes. Os autores identificaram que TCFC foi 4 vezes mais eficaz em detectar defeitos ósseos em comparação as radiografias periapicais. FRVs foram associadas com restaurações indiretas, sondagem profunda > 6 mm de profundidade, ausência de cortical óssea e defeito ósseo em “J” de acordo com o exame de TCFC. Houve uma correlação significativa ($p < 0.05$), entre a extensão da

fratura, profundidade de sondagem, bem como os defeitos em forma de “J”. Por outro lado, os dentes trincados foram associados com restaurações diretas, sondagem < 6 mm, cortical óssea intacta e presença de defeito angular na TCFC.

Através de uma revisão sistemática e metanálise, PRADEEPKUMAR *et al.* (2021) determinaram a acurácia diagnóstica de FRV entre TCFC e a visualização direta considerada o padrão ouro. A evidência dessa revisão sistemática demonstrou-se fraca indicando que a TCFC ainda não é uma boa ferramenta para diagnóstico de FRV em dentes tratados endodonticamente. Devido ao número limitado de artigos incluídos, falta de padronização entre os estudos com relação aos indicadores de FRV, além disso, houve artigos que não apresentaram uma referência padrão, demonstrando múltiplas referências para indicar o diagnóstico de FRV.

YALDA *et al.* (2022) investigaram um protocolo de baixa dose para diagnosticar fraturas radiculares em dentes anteriores maxilares não tratados endodonticamente. Esse estudo *ex vivo* utilizou 48 dentes em um modelo semelhante a maxila humana (antropomórfico) e 9 exposições diferentes de raios X foram utilizadas. Os autores constataram que não houve melhora na precisão do diagnóstico quando utilizou a exposição de alta resolução, no entanto, é possível reduzir 20% da dose em comparação com os parâmetros de exposição de referência.

1.5.1 Especificidade e sensibilidade da TCFC

As TCFC além de proporcionar uma análise tridimensional, possuem maior especificidade e sensibilidade para o diagnóstico de fraturas radiculares (TALWAR *et al.*, 2016; KOBAYASHI-VELASCO *et al.*, 2017). Neste caso, a sensibilidade constitui a proporção real de fraturas que mostram resultados positivos para fraturas

na TCFC. Já a especificidade constitui a proporção real de dente intacto que possui um resultado negativo para fratura na TCFC (BUENO *et al.*, 2021).

CANDEMIL *et al.* (2021), avaliaram estratégias para otimizar a detecção de FRV simuladas na presença de material metálico na exomassa e/ou dentro do FOV, por meio de TCFC. Quando pequenos tamanhos de FOV são utilizados, todas as estruturas circundantes fora do FOV, mas ainda entre a fonte de raios-X e o receptor de imagem (chamado exomassa) mostraram gerar artefatos de imagem, que podem ser exacerbados em a presença de materiais altamente atenuantes. Foram incluídos 20 dentes extraídos com canal único que foram instrumentados, obturados e com FRV induzidas. Os dentes foram inseridos em uma mandíbula humana, coberta com um material semelhante a tecido mole. Os materiais metálicos foram dispostos em diferentes posições na exomassa (fora do campo de visão) e/ou endomassa (dentro do campo de visão) e as imagens foram obtidas em dois protocolos de dosagens: padrão e otimizado. A avaliação das imagens foi realizada por 5 radiologistas. Não foram encontradas diferenças significativas entre os dois métodos.

BYAKOVA *et al.* (2019), compararam a acurácia *in vivo* da TCFC para detectar linha de FRV versus seu diagnóstico de acordo com os padrões de reabsorção óssea associados. Foram avaliados 88 pacientes com sintomas de fratura radicular vertical em dentes tratados endodonticamente, esses pacientes foram submetidos ao exame tomográfico, posteriormente tiveram os dentes extraídos e divididos em dois grupos: fraturado (n = 65) e controle (n = 23). A sensibilidade média da TCFC para o diagnóstico da fratura radicular foi $0,84 \pm 0,2$. A acurácia e valor AUC foram $0,81 \pm 0,08$ e $0,84 \pm 0,17$, respectivamente. A sensibilidade, acurácia e valor AUC para detecção de fratura radicular foi significativamente baixo $0,17 \pm 0,24$ ($p = 0,042$), $0,54 \pm 0,07$ ($p = 0,043$), e $0,52 \pm 0,09$ ($p = 0,043$), respectivamente. A especificidade da TCFC para detecção e diagnóstico de fratura radicular vertical não diferiram significativamente.

Tabela 1. Estudos *in vivo* que utilizaram TCFC para o diagnóstico de fratura radicular.

Autor-ano	Objetivo/Metodologia	Resultados/Conclusão
(Mizunashi <i>et al.</i> , 2021)	Investigar a ocorrência de fratura radicular horizontal e vertical utilizando TCFC. Análise de 51 TCFC para o diagnóstico de FR.	Houve diferenças quanto a ocorrência de FRV e FRH entre dentes vitais e não vitais. Houve diferenças na ocorrência de FRV e FRH entre dentes anteriores e posteriores. Os resultados sugeriram que o número de FRV foi maior em dentes não vitais e FRH foi maior dentes vitais. O dente mais acometido por FRH foram os pré-molares.
(Zhang <i>et al.</i> , 2019)	Avaliar a precisão diagnóstica da (TCFC) na detecção de fraturas radiculares verticais sutis (VRFs) em dentes tratados endodonticamente. Vinte e nove dentes tratados endodonticamente com suspeita de VRFs de 29 pacientes foram examinados usando imagens TCFC. As imagens TCFC foram pontuadas com base na avaliação da linha de fratura e perda óssea vertical vestibulo-palatal (lingual). A sensibilidade diagnóstica, especificidade e precisão foram avaliadas.	Dos 29 dentes, 27 foram positivos e 2 foram negativos para VRF de acordo com o padrão-ouro. Sensibilidade, especificidade e precisão foram de 33,3%, 100% e 37,9%, respectivamente, com base no achado direto de uma linha de fratura em imagens TCFC. No entanto, a perda óssea vertical vestibulo-palatal (lingual) foi encontrada em 25 dos 27 dentes com VRFs. Embora a precisão da imagem TCFC para o diagnóstico de VRFs sutis em dentes tratados endodonticamente <i>in vivo</i> fosse pobre, a perda óssea vertical vestibulo-palatal (lingual) é um importante sinal indireto para o diagnóstico de VRFs, que pode ser encontrado em imagens TCFC.

(Wang <i>et al.</i> , 2010)	Avaliar a aplicação da tomografia computadorizada de feixe cônico (TCFC) na detecção de fraturas radiculares dentárias e analisar o perfil demográfico dessas fraturas. O grupo de estudo compreendeu 398 dentes que foram examinados por TCFC para determinar se eles tinham uma fratura radicular. As características dos pacientes foram registradas e a localização, raízes fraturadas, tipos de fratura e imagens tridimensionais das estruturas esqueléticas relacionadas foram analisadas. O diagnóstico foi classificado em uma das três categorias a seguir: fratura definitivamente presente (FDP), fratura provavelmente presente (FPP) e nenhuma fratura visível (NVF).	Dentre esses dentes, 155 (39,0%) foram diagnosticados como FDP, 14 (3,5%) como FPP e 229 (57,5%) como NVF na leitura de consenso. Durante o acompanhamento, todos os dentes diagnosticados como FDP e 4 dos 14 dentes diagnosticados como FPP foram demonstrados no intraoperatório como fraturados. Nos casos de FDP, 60,0% dos pacientes tinham de 50 a 69 anos. No total, 107 dentes FDP foram não tratados endodonticamente, e os restantes foram tratados endodonticamente com (n = 16) ou sem (n = 32) colocação de coroa. Os molares superiores e inferiores foram os mais acometidos (81,9%). As raízes fraturadas foram principalmente palatinas (65,7%) nos molares superiores e mesiais (84,2%) nos molares inferiores.
(Silva <i>et al.</i> , 2021)	Avaliaram os fatores associados à fratura radicular vertical em dentes tratados endodonticamente, usando um banco de dados de imagens de tomografia computadorizada de feixe cônico (TCFC). A amostra para este estudo de caso-controle consistiu em 81 TCFC de dentes com fratura radicular vertical (FRV) e 81 TCFC de dentes não fraturados, pareados por idade, sexo e posição do dente. As variáveis analisadas incluíram a espessura da dentina, retentor intrarradicular, um implante adjacente e um dente adjacente ausente.	A espessura média da dentina dos dentes fraturados foi de 1,3 mm, enquanto a dos não fraturados foi de 1,5 mm ($p < 0,001$). Não houve diferença entre os grupos fraturado e não fraturado em relação à frequência de implantes ou perda de dente adjacente ($p > 0,05$). Houve um número significativamente maior de dentes com retentores intrarradiculares no grupo fraturado versus não fraturado ($p = 0,007$). A espessura da dentina pode influenciar o desenvolvimento de VRF. A espessura da dentina $\leq 1,3$ mm está associada a uma maior probabilidade de fratura do que $\geq 1,4$ mm.

(Quintero- 130 dentes obturados com sinais/sintomas de FR. Álvarez <i>et al.</i>, 2021) Determinar o desempenho diagnóstico (TCFC) para detecção de FRV; avaliar o valor preditivo de critérios diagnósticos quanto à definição de FRVs; e examinar a robustez da associação de variáveis relacionadas ao paciente, ao dente e ao tratamento com FRV. O diagnóstico definitivo de FRV foi confirmado pela exploração microcirúrgica endodôntica (EMS). A determinação do desempenho diagnóstico da TCFC foi baseada em algoritmos padrão derivados da análise da tabela de contingência bidirecional.	FRV foram detectados durante microcirurgia endodôntica em 50% dos dentes. Com base na descoberta de linhas de fratura em exames de TCFC, a sensibilidade, especificidade e precisão foram de 86,2%, 13,8% e 50%, respectivamente. Dentes com mais de três critérios diagnósticos presentes tiveram chances significativamente maiores de diagnóstico de VRF. Os hábitos parafuncionais, dentes unirradiculares, alargamento excessivo do canal radicular e ausência de retentores intra-radiculares podem atuar fortemente/independentemente para a ocorrência de FRVs em dentes tratados endodonticamente.
--	--

1.6 FATORES QUE AFETAM O DIAGNÓSTICO TOMOGRÁFICO

1.6.1 Tamanho do campo de visão (FOV) e voxel

O diagnóstico de fraturas radiculares através de TCFC requer alta definição e qualidade das imagens. Atualmente, os equipamentos de TCFC são separados em equipamentos com FOV pequeno (diâmetro < 0,50 mm) e com FOV grande (diâmetro < 16 cm) (DILLENSEGER *et al.*, 2017). Outro importante parâmetro, que afeta a qualidade da imagem, é o tamanho do voxel, em geral, voxels menores e maior tempo de escaneamento, proporciona uma imagem de resolução melhor, no entanto, deve ser levado em consideração a dose de radiação que o paciente é exposto, o ideal é alcançar uma imagem de boa resolução com a menor dose de radiação possível (BRAGATTO *et al.*, 2016).

DIAS *et al.* (2020), avaliaram a acurácia de TCFC de FOV pequeno em detectar *in vivo* fraturas radiculares verticais comparando com radiografia periapical e utilizando como padrão ouro a cirurgia exploratória. As FRV foram detectadas em 64 de 85 dentes (75,3%), dos quais 62,5% eram multirradiculares e 76,65% tinham retentores intrarradiculares. TCFC obteve maior sensibilidade e acurácia (65,6% e 64%) em comparação a radiografia periapical (27,3% e 40,5%).

UYSAL *et al.* (2021), avaliaram o efeito do tamanho do voxel e redução do artefato na identificação de FRVs em dentes tratados endodonticamente. Foram avaliados 100 pré-molares inferiores extraídos, os quais foram descoronados e realizado tratamento endodontico e obturação pela técnica do cone único. Os dentes foram examinados com TCFC variando o voxel (0.125, 0.200, 0.250, 0.300, e 0.400

voxel/s). Todos os tamanhos de voxel foram eficazes na detecção de fratura radicular vertical. No entanto, a eficácia na detecção diminuiu usando voxel de tamanho maior. Voxel/s de 0,125, 0,200 e 0,250 foram mais sensíveis para detecção de FRVs. A redução de artefato não afeta a precisão, sensibilidade, especificidade e valores preditivos para detecção de FRVs em varreduras TCFC.

MA *et al.* (2016) em uma revisão sistemática e metanálise verificaram se a TCFC é um método confiável na detecção de fraturas radiculares em dentes não tratados endodonticamente e se o tamanho do voxel tem influência na acurácia diagnóstica. Os autores concluíram que a TCFC é um método confiável para detecção de fraturas radiculares, no entanto, a evidência não é definitiva que o tamanho do voxel pode ter um papel na melhor eficácia para detectar fraturas radiculares.

PINTO *et al.* (2021), investigaram a influência do tamanho do FOV, posição do escaneamento no FOV (objeto posicionado no centro ou lateralmente dentro do FOV), e modo de escaneamento da detecção da fratura radicular e percepção de artefato. Foram avaliados 40 pré-molares extraídos, com canal único, restaurados com retentores intrarradiculares de NiCr e AgPd, divididos em dois grupos: fraturados e íntegros. A posição central dentro do FOV apresentou alta sensibilidade, especificidade e acurácia e os valores AUC diferiram da posição lateral para central para os pinos metálicos avaliados ($p < 0,05$). Os autores concluíram que posicionar o objeto no centro do FOV e utilizar um tamanho de FOV reduzido, proporciona melhor detecção de FRV e diminui a percepção de artefatos.

GUO *et al.* (2019) avaliaram a influência do tamanho do FOV e espessura da fratura, na acurácia em detectar FRVs em dentes não tratados endodonticamente. Foram coletados 51 dentes extraídos, induzido fratura radicular com duas espessuras diferentes, os dentes foram escaneados com 4 equipamentos de TCFC

em diferentes tamanhos de voxel fornecidos pelos próprios equipamentos. Para os equipamentos NewTom VGi (Radiologia Quantitativa, Verona, Itália) e ProMax 3D Mid (Planmeca Oy, Helsinque, Finlândia), não foram encontradas diferenças significativas entre o tamanho dos voxels para as AUC, independente da espessura da fratura. Houve diferenças significativas entre imagens digitalizadas com tamanho de voxel 250 μm e 160 μm ($p = 0,02$) e imagens digitalizadas com tamanho de voxel 250 μm e 80 μm para AUC no grupo com fratura radicular com menor espessura para o equipamento 3D Accuitomo (J. Morita, Kyoto, Japão) 170 ($p = 0,03$). Para o i-CAT FLX (Imaging Sciences International, Hatfield, PA, EUA) foram encontradas diferenças significativas entre os protocolos de voxel de 300 μm e dos outros três tamanhos de voxel para AUC, sensibilidade e valor preditivo negativo. Diferenças significativas para AUC foram encontradas nos grupos fratura radicular espessa e fratura radicular larga para os equipamentos 3D Accuitomo e ProMax 3D Mid.

1.7. Artefatos

Os materiais como retentores intrarradiculares, materiais obturadores e restaurações metálicas, podem produzir um endurecimento do feixe de raio X, durante a aquisição da imagem da área de interesse. As estruturas metálicas causam o endurecimento do feixe devido a uma atenuação não-intencional do feixe de raios X pelo material, que filtra os fótons de energia mais baixa (Freitas *et al.*, 2019). Em especial os dentes tratados endodonticamente apresentam uma baixa acurácia na TCFC devido a esses artefatos que contribuem para um diagnóstico impreciso das fraturas radiculares (ZHANG *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

O endurecimento do feixe de raios X pode ocasionar dois tipos de artefatos: a distorção de estruturas metálicas e listas e/ou faixas escuras, que podem aparecer

entre duas substâncias densas ou ao redor de estruturas metálicas. Como consequência, a área em questão não é visualizada com nitidez e precisão (MOUDI *et al.*, 2015)

A redução de artefatos metálicos na efetividade de detectar fraturas radiculares é um assunto controverso. FONTENELE *et al.* (2021), realizaram uma revisão sistemática e meta-análise para avaliar a efetividade da ferramenta de redução de artefatos metálicos para otimizar a detecção de FRV na TCFC. A ferramenta para reduzir artefatos não proporcionou melhor eficácia no diagnóstico de FRV em dentes com materiais intracanais em estudos laboratoriais, no entanto, apenas estudos *invitro* foram incluídos nessa revisão sistemática, sendo uma grande limitação.

1.7.1 Materiais obturadores

BECHARA *et al.* (2013) avaliaram se a redução de artefato em dois equipamentos de TCFC distintos proporciona melhor acurácia para detectar FRV em dentes tratados endodonticamente. Foram coletados 66 dentes e descoronados, todos foram tratados endodonticamente utilizando a mesma técnica de obturação com guta-percha e cimento a base de óxido de zinco. Foi induzido fraturas nas raízes aleatoriamente e colocados em ossos bovinos preparados. A maior acurácia foi obtida com o equipamento ProMax (Plandent, Helsinque, Finlândia) sem a redução de artefatos. A menor acurácia foi obtida com Master 3D (Vatech, Hwaseong, República da Coreia) quando utilizou a ferramenta de redução de artefato.

NEVES *et al.* (2014) avaliaram a influência dos modos de imagem da TCFC no diagnóstico da FRV com diferentes materiais intracanais. A amostra foi composta por 3 grupos (n = 10): controle, fratura completa e incompleta. Os dentes foram escaneados utilizando 4 diferentes modos de imagem: alta resolução, alta fidelidade,

alta velocidade e padrão. As fraturas completas foram mais facilmente visualizadas do que incompletas. A presença de guta-percha e retentor metálico influenciaram negativamente o diagnóstico de fratura. Com relação aos modos de imagem, não houve diferenças significativas.

IHKUBO *et al.* (2015) evidenciaram que materiais obturadores possuem influência direta nas imagens de TCFC. Nesse estudo, foram investigadas imagens de TCFC com artefatos que imitam linhas de fraturas produzidas por materiais obturadores do canal radicular. Esses artefatos, aparecem ao longo eixo dos ossos alveolares. Os autores concluíram que o padrão de linhas de artefato produzidas depende da posição do dente no arco, em dentes como os incisivos, por exemplo, pode haver a formação de linhas oblíquas ao longo eixo do dente. A identificação desses padrões de artefatos característicos ajudará a distinguir de fraturas radiculares verdadeiras.

DUTRA *et al.* (2017), investigaram a influência de diferentes materiais obturadores no diagnóstico da FRV. FRVs foram criadas em 30 dentes e 4 situações clínicas foram criadas: sem material obturador, guta-percha, retentor intrarradicular e coroa metálica. Foi verificado que a análise da linha de fratura no grupo com guta-percha gerou um artefato de endurecimento de feixe baixo, mas não impediu identificar a extensão da FRV. Na presença de retentor intrarradicular de ouro, foi observado que a extensão da linha de fratura parecia ser menor do que realmente estava no plano sagital, enquanto no plano axial a TCFC não melhorou o diagnóstico de FRV, a menos que linha de fratura estivesse envolvendo o terço apical da raiz. A presença de coroa metálica não gerou artefatos adicionais na superfície radicular.

HEKMATIAN *et al.* (2018), investigaram a acurácia de TCFC em detectar FRV na presença e ausência de guta-percha. Foram selecionados 50 pré-molares inferiores, instrumentados e obturados, e posteriormente foi induzido FRV em 25

dentes. Os dentes foram inseridos em uma mandíbula seca e feito a TCFC. Em uma outra etapa a guta-percha foi removida e feita outra TCFC. Os autores concluíram que a guta-percha reduziu a habilidade de detectar FRV, sendo então recomendado remover esse material do canal para melhor diagnóstico das FRVs com TCFC.

IUKUBO *et al.* (2020) verificaram os efeitos de parâmetros de exposição (corrente do tubo e voltagem do tubo) e a conicidade da guta percha em artefatos semelhantes a fraturas radiculares obtidos com TCFC. Os artefatos semelhantes a linhas de fraturas que apareceram em TCFC de 9 pré-molares extraídos, obturados com cones de guta-percha 50 ou 80 foram analisados, utilizando seis fatores de exposição: duas tensões de tubo (80 Kv e 110 Kv), três correntes de tubo (4 mA, 7 mA e 10 mA). Foi evidenciado que o dentes obturados com cone 80 e 50 quando submetidos a mesma voltagem e corrente de tubo. Mais artefatos foram identificados em dentes com cone 80 do que 50. As linhas de artefato foram mais visíveis com 80 Kv em comparação a 110 Kv para cada corrente de tubo e cone de guta-percha utilizado.

CAVALCANTI *et al.* (2022), avaliaram a influência do cimento obturador como artefato na detecção de FRVs. Foram selecionados 100 incisivos centrais superiores e 100 pré-molares superiores com um canal, esses dentes foram divididos em 5 grupos: controle, Pulp Canal Sealer, Ah Plus, Sealer 26 e Bc Sealer. Posteriormente fraturas radiculares foram induzidas nesses dentes e obtidas imagens tomográficas. Os valores de sensibilidade para pré-molares variaram de 20%- 60% e especificidade variaram de 60%-100%. Os valores de sensibilidade para os incisivos variaram de 30%-70% e os valores de especificidade de 70%-100%. Foi constatado uma baixa especificidade principalmente para os pré-molares, o que dificulta o diagnóstico de fraturas radiculares verticais e o cimento BC Sealer induziu significativamente maiores artefatos de imagem em comparação aos demais cimentos.

FREITAS e SILVA *et al.* (2019), avaliaram a capacidade de três tomógrafos diferentes em detectar fratura radicular vertical em dentes tratados endodonticamente obturados com diferentes cimentos endodônticos. Um total de 80 pré-molares extraídos foram submetidos a tratamento endodôntico e obturados com diferentes cimentos (guta-percha + AH Plus, gutapercha + Sealer 26, gutapercha + Fill Canal e gutapercha sem cimento/grupo controle). Metade das amostras foram induzidas a fraturas radiculares e foram escaneadas pelos tomógrafos i-CAT (Imaging Sciences International, Hatfield, USA), PreXion (PreXion Inc., San Mateo, USA), and OrthoPhos XG (Sirona Dental System, Bensheim, Alemanha). A melhor acurácia foi obtida pelo equipamento PreXion, enquanto a melhor sensibilidade foi obtida com o equipamento i-CAT (0.93). Os valores de especificidade variaram entre 0,70-0,75. Os cimentos endodônticos não exerceram influência no diagnóstico da fratura radicular vertical.

GONZÁLEZ *et al.* (2022) avaliaram se mudanças no filtro de nitidez em TCFC melhora o diagnóstico de fratura radicular. Oitenta e quatro volumes de TCFC adquiridos em três níveis de mA de 28 dentes inseridos no alvéolo dentário de crânio humano seco foram selecionados. Os dentes foram divididos em quatro grupos de acordo com a presença e ausência de fratura radicular e obturação endodôntica. Os autores evidenciaram que o uso de filtro de nitidez pode ser recomendado em volumes de TCFC a 4 mA para detecção de fratura radicular por levar ao mesmo desempenho daqueles a 6,3 e 10 mA. A presença de material obturador endodôntico não influenciou a ação dos filtros no diagnóstico de fratura radicular.

1.7.2 Retentores intrarradiculares

COSTA *et al.* (2011), avaliaram a influência de retentores intrarradiculares no diagnóstico de FRHs através de TCFC de pequeno volume. Foram utilizados 40 pré-molares extraídos e divididos em grupos baseados na presença de retentor metálico

e fratura horizontal. Foi verificado que altos valores de acurácia foram obtidos nos dentes sem retentor intrarradicular (73%-88%) em comparação com a presença do retentor intrarradicular (55%-70%), a presença do retentor intrarradicular diminuiu a sensibilidade e especificidade da TCFC em diagnosticar FRH.

COSTA *et al.* (2012) avaliaram se utilizar TCFC de volume maior melhora a acurácia em detectar fratura radicular horizontal e a influência de retentor intrarradicular metálico no diagnóstico. Foi feita análise de 40 pré-molares extraídos e fratura radicular horizontal foi induzida em 20 desses dentes. Os valores de acurácia nos dentes que não possuíam retentor intrarradicular metálico variou de 33%-68%, enquanto as amostras com retentor intrarradicular houve uma grande variação de 38%-83%.

COSTA *et al.* (2014) avaliaram a acurácia de TCFC de pequeno volume em detectar fraturas radiculares horizontais em dentes com e sem retentores intrarradiculares metálicos. Foram avaliados 40 dentes tratados endodonticamente com e sem retentores intrarradiculares, utilizando o tomógrafo PreXion 3D (Terarecon, San Mateo, CA), com um cilindro de 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro em reconstrução de voxels de 0,10 mm. Os valores de sensibilidade variaram de 0.40-0.80. Os resultados foram mais favoráveis para dentes sem retentores intrarradiculares. No grupo que utilizou o protocolo de 1024 projeções de raio X a acurácia de 75%-90% versus o grupo que utilizou o protocolo de 512 projeções de raios X, a acurácia foi de 70%-85%.

MOUDI *et al.* (2015), investigaram os efeitos de artefatos metálicos na acurácia da TCFC para detectar FRV, utilizando FOV pequeno e grande. Foram utilizados 40 molares e pré-molares extraídos, posteriormente foram tratados endodonticamente e inserido retentor intrarradicular metálico. As imagens de TCFC foram obtidas utilizando dois FOVs: 18 cm x 16 cm e 6 cm x 6 cm. Os autores

evidenciaram que a especificidade da TCFC diminuiu com a presença do retentor intrarradicular metálico no grupo que utilizou FOV maior. No entanto, no grupo que utilizou FOV pequeno, não houve interferência.

MENEZES *et al.* (2016), avaliaram a influência de retentores intrarradiculares e material obturador na detecção de FRVs. Foram incluídos 48 dentes extraídos, divididos em 3 grupos experimentais e 3 grupos controle. O primeiro grupo experimental e controle não recebeu gutta-percha e retentor intrarradicular, o segundo grupo experimental e controle receberam apenas gutta-percha, o terceiro grupo experimental e grupo controle receberam retentor intrarradicular e gutta-percha. Os grupos experimentais foram submetidos a fratura artificial. Os autores constataram que a presença de retentor intrarradicular e gutta-percha reduziu significativamente a acurácia de TCFC em detectar FRVs.

FERREIRA *et al.* (2015) avaliaram a influência de filtros para realçar FRVs em dentes com e sem retentores metálicos. Foram preparados 40 dentes extraídos, 20 foram selecionados aleatoriamente e induzida fratura vertical. As imagens com e sem filtro não mostraram diferenças significativas relacionadas a área sob a curva e sensibilidade. Os autores concluíram que o uso de filtros não influencia no diagnóstico de FRV em dentes com e sem retentor intrarradicular, não é necessário o uso de filtros.

SAFI *et al.* (2016), avaliaram o efeito da amperagem (mA) e campo de visão na produção de artefatos por retentores intrarradiculares metálicos e no diagnóstico de FRV. Foram incluídos 80 dentes unirradiculares extraídos e avaliados por TCFC. Os retentores intrarradiculares de níquel foram cimentados nos dentes após o preparo dos canais radiculares. Posteriormente os dentes foram divididos em dois grupos: teste (com fratura) e grupo controle (sem fratura). Foi concluído que diminuir o FOV melhora a detecção de FRVs, se acompanhado pela redução da amperagem. Essa

combinação fornece melhor acurácia na detecção das FRVs.

ARISTIZABAL-ELEJALDE *et al.* (2020) determinaram a relação entre as características das fraturas radiculares e a presença de retentor intrarradicular em dentes tratados endodonticamente utilizando TCFC. Foram analisados 50 TCFC com diagnóstico de fratura de 30 mulheres e 20 homens. O tipo mais comum de fratura foi oblíqua (26 casos), seguido por fratura vertical (18 casos) e fratura horizontal (6 casos). Em 56% das TCFC analisadas havia a presença de retentor intrarradicular metálico. Nenhuma associação foi encontrada entre o tipo de fratura e tipo de retentor intrarradicular. No entanto, o tipo de fratura influenciou no tempo requerido para sua detecção na TCFC.

SHOKRI *et al.* (2022) avaliaram o efeito de diferentes amperagens e tamanho de voxel de dois equipamentos de TCFC na detecção de FRV na presença de diferentes retentores intrarradiculares. Foram preparados espaços para retentores em 20 pré-molares superiores e em metade dessa amostra foram induzidas FRVs. As amostras foram escaneadas com o CS 9300 e Cranex3D com dois tamanhos de voxel diferentes e configuração de amperagem em cada equipamento. Foi constatado que a mudança no tamanho de *voxel* e amperagem não influenciou no diagnóstico de FRV. A detecção de FRV em dentes com retentores de fibra de vidro foi maior do que com retentores de níquel-cromo.

YAMAMOTO-SILVA *et al.* (2018) avaliaram a influência do tamanho do voxel na acurácia de detectar FRV em dentes com retentores intrarradiculares. Foram selecionados 30 dentes extraídos unirradiculares e divididos em dois grupos: 15 controle e 15 com FRV. As imagens de TCFC foram adquiridas com 4 diferentes tamanhos de voxel: 0,1 mm, e 0,16 para o Eagle 3D V-Beam (Dabi Atlante, Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil) e 0,125 mm e 0,2 mm para o i-CAT system (Imaging Sciences International, Hatfield, PA). Os autores concluíram que tamanho de *voxel* e campo de

visão menores fornecem melhor acurácia para detectar FRV.

1.7.3 Outros artefatos

FREITAS *et al.* (2018), avaliaram a influência de artefatos produzidos por implante de zircônia no diagnóstico de FRV em dentes próximos e distantes de implantes na TCFC. Foram divididos 20 dentes unirradiculares em dois grupos, controle e fraturado. Os dentes foram posicionados aleatoriamente no alvéolo de primeiro e segundo pré-molares direito e esquerdo de uma mandíbula seca. Foram obtidos exames de TCFC com e sem redução de artefato metálico, com e sem implante de zircônio colocado no alvéolo. Os artefatos produzidos por implante de zircônio prejudicaram o diagnóstico de FRV por diminuir a especificidade. No entanto, os autores verificaram que a redução de artefato metálico melhora a especificidade.

FONTENELE *et al.* (2021b), avaliaram a influência da corrente do tubo e redução de artefato metálico no diagnóstico de FRV em dentes adjacentes a implantes de zircônia. Foram utilizados 30 dentes (15 com FRV e 15 grupo controle) posicionados em uma mandíbula cada dente foi escaneado com implante de zircônio próximo e sem o implante próximo. Foi verificado que o implante de zircônia dificultou o diagnóstico de FRV, gerando artefatos na imagem de TCFC. A ferramenta de redução de artefato metálico desativada e corrente do tubo menor (4 mA), melhoraram a qualidade da imagem.

1.8 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA FRATURA RADICULAR NODIAGNÓSTICO POR TCFC

A espessura da linha de fratura pode ser um fator decisivo no diagnóstico através da TCFC, dependendo da espessura a mesma pode inviabilizar a visualização, especialmente em dentes tratados endodonticamente, a não separação óbvia dos fragmentos dificulta o diagnóstico (GULIBIRE *et al.*, 2021). De acordo com HU *et al.* (2022), a eficiência diagnóstica da TCFC é prejudicada conforme a espessura de separação dos fragmentos, afetando a sensibilidade e especificidade em 53%-98% e 80%-98%, respectivamente.

Tabela 2. Influência da espessura da fratura radicular na capacidade de detectável pela TCFC.

Autor/Ano	Metodologia	Tomógrafo utilizado	Resultados
Brady <i>et al.</i> , 2014	30 dentes extraídos (não tratados endodonticamente)	3D Accuitomo e i-CAT	Ambos os tomógrafos foram mais eficazes em detectar fraturas $\geq 50 \mu\text{m}$. O tomógrafo iCAT foi mais eficaz em detectar FRV < 50 em comparação ao 3D Accuitomo.
Byakova <i>et al.</i> , 2016	25 dentes extraídos (não tratados endodonticamente) 21 dentes sem fratura (controle)	3D Accuitomo 170	Maior acurácia e sensibilidade in vitro do que in vivo 50-150 μm . Maior sensibilidade e acurácia de TCFC em detectar FRV em fraturas com espessura maior que 150 μm (in vitro e in vivo)
Makeeva <i>et al.</i> , 2016	25 dentes extraídos (não tratados endodonticamente) 21 dentes sem fratura (controle)	3D Accuitomo 170	Maior acurácia e sensibilidade in vitro do que in vivo 50-150 μm . Maior sensibilidade e acurácia de TCFC em detectar FRV em fraturas com espessura maiores que 150 μm (in vitro e in vivo).

Byakova <i>et al.</i> , 2019	30 dentes hígidos extraídos, preparados endodonticamente e com retentores intrarradiculares (FRV induzida) Dentes divididos em dois grupos: fratura larga (180-250 µm) e fratura espessa (80-150 µm)	3D Accuitomo 170	A acurácia para FRV in vitro maiores e menores foram 0,56e 0,40 respectivamente. Os valores de sensibilidade foram 0,53 para FRV maiores e 0,27 para menores.
---------------------------------	--	------------------	--

2. JUSTIFICATIVA

Apesar do alto índice de sucesso no tratamento endodôntico, é importante reconhecer que falhas podem ocorrer devido a diversos fatores, destacando-se entre eles as fraturas radiculares. Estas fraturas representam a terceira principal causa de perda dentária, seguindo apenas a cárie e doença periodontal (KISHEN, 2006; MIZUHASHI et al., 2021). Até o momento, a maioria dos estudos clínicos voltou-se para a investigação das variáveis individuais de risco que influenciam na ocorrência de fraturas após tratamento ou retratamento endodôntico. No entanto, poucos estudos abordaram conjuntamente múltiplas variáveis, tais como idade, gênero, tipo de dente afetado, raiz envolvida, diâmetro do canal tratado e sua proporção em relação à raiz, anatomia da raiz, padrão da fratura, presença e tamanho de áreas hipodensas adjacentes, utilização de retentores intrarradiculares, extensão da fratura e características radiográficas sugestivas de fratura.

Há uma necessidade premente de mais estudos retrospectivos para fornecer insights significativos aos profissionais da área. Esses estudos poderiam esclarecer questões importantes, como o impacto da área preparada na ocorrência de fraturas, o padrão das fraturas e sua correlação inúmeras variáveis. O objetivo seria estabelecer limites seguros para o alargamento do canal radicular, visando prevenir fraturas indesejadas.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Correlacionar diferentes variáveis identificadas radiograficamente por TCFC com a fratura radicular de dentes tratados endodonticamente.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Investigar a proporção da área do canal preparado em relação a área da raiz.
2. Analisar a média de idade e o gênero mais prevalente na ocorrência de fratura radicular.
3. Mensurar a extensão das fraturas radiculares e testar possíveis correlações com as variáveis estudadas.
4. Classificar o tipo de fratura de acordo com Bueno *et al.*, 2021.
5. Analisar a presença de retentores intrarradiculares e a ocorrência de fratura radicular, descrevendo a extensão do retentor em termos de igual a $2/3$, $> 2/3$ ou $< 2/3$.
6. Investigar a anatomia dos canais radiculares dos dentes fraturados.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PARECER ÉTICO

Este estudo foi submetido e aprovado pelo Comitê de Ética e Pesquisa da Universidade do Grande Rio (CAAE: 65928522.5.0000.5283; número do parecer: 5.871.885).

4.2 TIPO DE ESTUDO E POPULAÇÃO

Este estudo apresentou uma abordagem retrospectiva, utilizando exames de Tomografia Computadorizada de Feixe Cônico (TCFC), juntamente com seus correspondentes laudos radiográficos. Esses exames foram obtidos a partir de uma clínica privada de radiologia odontológica localizada na cidade do Rio de Janeiro/RJ.

4.3 AMOSTRA E CRITÉRIOS DE INCLUSÃO

A amostra foi constituída por arquivos digitais em formato DICOM (Comunicação de Imagens Médicas), adquiridos por meio do Tomógrafo Eagle V-Beam (Dabi Atlante, Ribeirão Preto, SP, Brasil), de pacientes com diagnóstico radiográfico de fratura radicular, confirmado por um radiologista por meio da TCFC. Esses arquivos englobavam reconstruções axiais, panorâmicas, transversais e tridimensionais das fraturas radiculares.

Foram selecionados aleatoriamente 152 exames de TCFC pertencentes a pacientes que possuíam dentes submetidos a tratamento endodôntico e que apresentavam fratura radicular.

4.4 CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO

Foram excluídas imagens tomográficas de pacientes com idade inferior a 18 anos e/ou de dentes decíduos. Também foram excluídos registros com diagnósticos inconclusivos nos laudos, bem como imagens que apresentassem artefatos comprometedores da identificação adequada da fratura radicular. Um total de 111 exames tomográficos foram excluídos por diversos motivos, incluindo artefatos que dificultaram a análise, dentes que apresentavam fratura sem histórico de tratamento endodôntico e imagens inconclusivas.

4.5 COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

Foi realizado um processo de calibração entre dois avaliadores, endodontistas previamente a extração dos dados, com 20 exames, todos com apenas um dente com diagnóstico de fratura. O teste Kappa e a concordância interavaliadores foi de 95%. Uma análise detalhada de cada laudo foi conduzida, extraindo informações como gênero, idade dos pacientes, tamanho do campo de visão (FOV) utilizado no exame, localização anatômica (maxila ou mandíbula), detalhes específicos da localização (região anterior ou posterior dos ossos maxilares), dente afetado, tipo de fratura radicular e características tomográficas sugestivas de fratura.

Posteriormente foi realizada uma análise dos DICOMs utilizando o software OnDemand 3D Dental (OnDemandeDApp 1.0.9.2225; Cybermed, Inc, Coreia do Sul). Foram avaliados diversos parâmetros, incluindo a extensão da fratura e sua classificação quanto à orientação (horizontal, vertical, oblíqua), a raiz afetada, a localização do ponto da fratura em relação aos terços do canal, a presença de retentor intrarradicular e a identificação de áreas hipodensas associadas (Figura 1). As áreas hipodensas detectadas nas proximidades da fratura foram medidas em seus

comprimentos máximo e mínimo (Figura 2), e o valor final registrado foi a média aritmética das medidas realizadas pelos dois avaliadores.

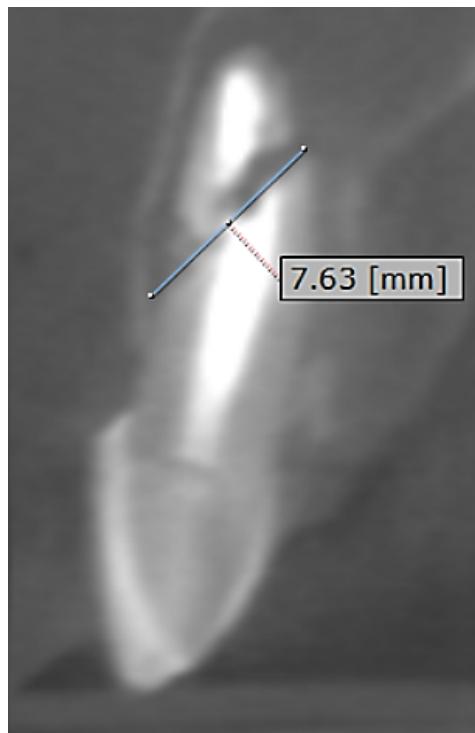


Figura 1. Mensuração da extensão da fratura e classificação como fratura oblíqua.

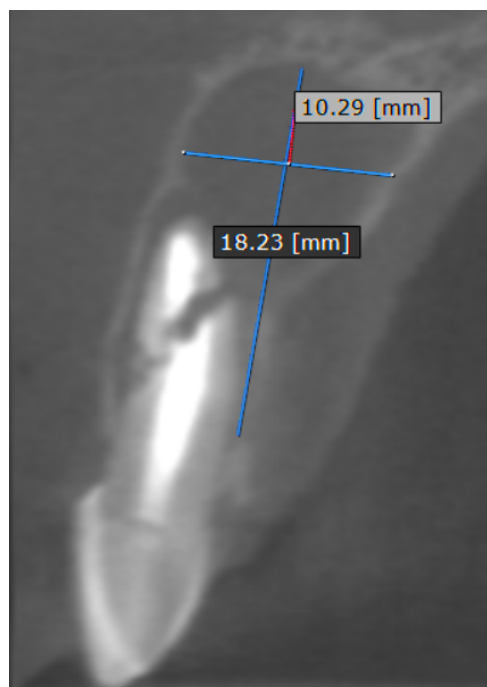


Figura 2. Mensuração de área hipodensa adjacente à raiz, em altura e comprimento no corte sagital, dente 21.

A avaliação do preparo do canal radicular envolveu medições lineares que foram realizadas nos cortes axiais, em pontos específicos: o nível da junção cimento-esmalte (JCE), a uma distância de 4 mm abaixo da JCE, o ponto coronal da fratura radicular, o ponto médio da fratura, a extremidade da fratura, o ponto médio do canal e o limite apical da obturação (Figura 3). Além disso, a área do canal foi medida nos mesmos pontos mencionados (Figura 4). O valor final foi calculado como a média aritmética das medições realizadas pelos dois avaliadores.

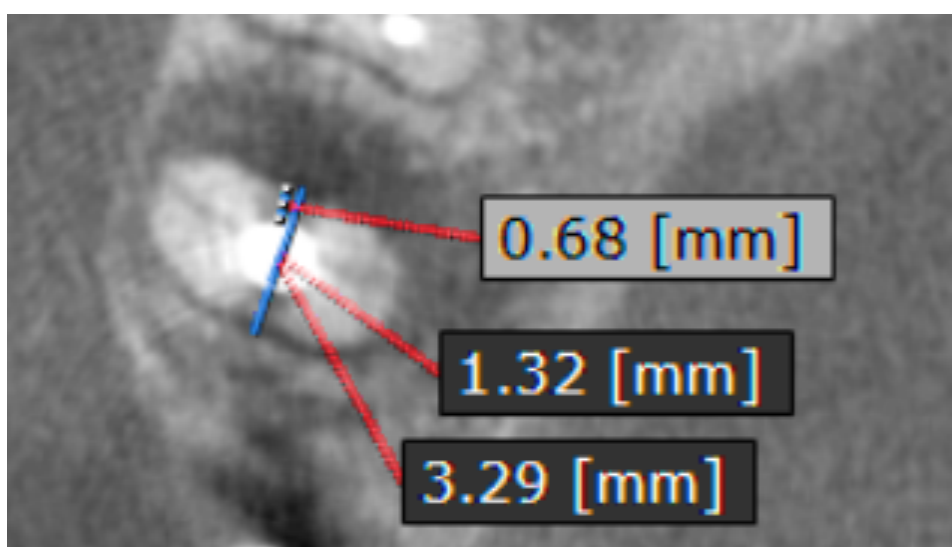


Figura 3. Mensuração do canal radicular alargado, menor remanescente dentinário e raiz dentinária, no corte axial, na região de 4 mm abaixo da JCE, referente ao canal distal do dente 36.

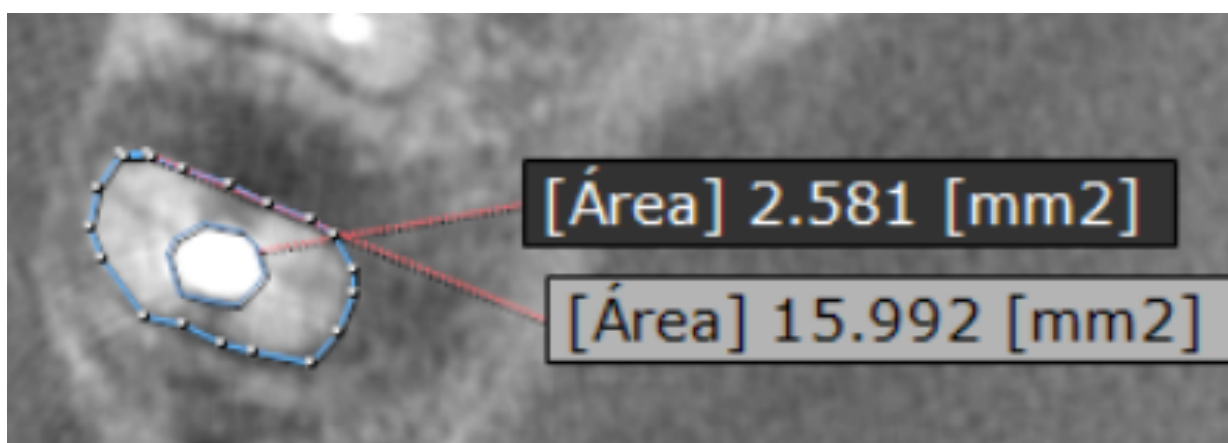


Figura 4. Área do canal radicular e área total da raiz, corte axial, raiz distal do dente 36, região de JCE.

A classificação da seção transversal do canal foi realizada de acordo com o estudo de BUENO et al. (2021), utilizando o corte axial e considerando os terços cervical, médio e apical. Os canais foram categorizados como circulares, achatados ou ovais, com o objetivo de estabelecer uma correlação entre a morfologia do canal e a ocorrência de fratura radicular.

Os dentes contendo retentores intrarradiculares foram analisados em relação a parâmetros como o tipo de retentor e a extensão do retentor intrarradicular (pequeno, correspondendo a $\leq 2/3$ da extensão da raiz; $2/3$ da raiz; e longo, representando $\geq 2/3$ da raiz). Essa análise foi conduzida utilizando a ferramenta de medição linear, verificando a proporção entre o comprimento da raiz e a extensão do retentor intrarradicular.

Quando foram identificados indícios radiográficos que indicavam a presença de fratura radicular, a mesma foi classificada quanto ao tipo de fratura e sua localização. Em casos de discordância entre os avaliadores, um terceiro avaliador, especializado em radiologia, teve a decisão final. Todos os dados relacionados às características tomográficas foram coletados, tabulados e armazenados em um banco de dados para análise estatística posterior.

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises estatísticas foram conduzidas utilizando o programa SPSS® (Statistical Package for the Social Sciences Inc., versão 26). A análise descritiva foi empregada para apresentar frequências, médias e desvio padrão dos dados (Tabela 3). A normalidade dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk. As comparações das medições lineares e áreas foram efetuadas através dos testes de Mann-Whitney e Kruskal-Wallis, quando relevantes, e a correção de Bonferroni foi aplicada no teste post-hoc (Tabelas 4 e 5). Os dados categóricos foram submetidos ao teste Qui-Quadrado. Um nível de significância de 5% ($p < 0,05$) foi adotado para todas as análises.

5. RESULTADOS

No presente estudo, observou-se uma frequência maior de pacientes do sexo feminino, representando 58,5%, em comparação aos pacientes do sexo masculino, que corresponderam a 41,5%. Quanto ao tipo de fratura radicular, a FRO apresentou a maior incidência, com 60%, seguida pela FRV com 36,7%, e a FRH com 3,3%.

Em relação à área do canal preparado em proporção à área da raiz, obteve-se uma média de 31,05%, com um valor mínimo de 11,62% e um valor máximo de 63,13%. Em 73,2% dos exames tomográficos avaliados, foi possível identificar a linha de fratura ao longo da raiz dentária e classificá-la como FRV, FRO ou FRH, além de determinar o terço do canal afetado.

Outros valores descritivos das variáveis analisadas no presente estudo estão apresentados na tabela 3 e 4.

Com relação ao diâmetro do canal e a ocorrência do tipo de fratura, foram encontrados resultados estatisticamente significativos para FRV com uma média de 1,02 e FRO com uma média de 1,34 ($p < 0,05$). Quando foi analisado a proporção de alargamento do canal em relação à raiz, foram encontrados resultados estatisticamente significativos para FRV com uma média de 26,35% e FRO com 33,88% ($p < 0,05$). As medidas de diâmetro e área em relação ao tipo de fratura estão listadas na tabela 5. Na tabela 6, é possível verificar os dados de variáveis categóricas e associação com o tipo de fratura radicular.

Tabela 3. Frequências absolutas e relativas das variáveis analisadas.

Variável	n	%
Gênero		
Feminino	24	58,5
Masculino	17	41,5
Idade		
18 a 30 anos	2	4,9
31 a 45 anos	10	24,4
46 a 60 anos	11	26,8
61 a 85 anos	18	43,9
Tamanho FOV		
5x5	1	2,4
8x8	14	34,1
8x12	14	34,1
8x16	12	29,3
Dente		
Anteriores	7	17,1
Pré-molares	12	29,3
Molares	22	51,2
Retentor		
ausente	31	75,3
presente	10	24,4
Mensuração linear do retentor		
maior que 2/3	4	44,4
2/3 da raiz	1	11,1
menor que 2/3	4	44,4
Tipo de fratura		
horizontal	1	3,3
vertical	11	36,7
oblíqua	18	60,0
Área hipodensa em J		
presente	35	85,4
ausente	6	14,6
Terço acometido		
cervical	6	19,4
medio	5	16,1
Apical	1	3,2
Mais de 1/3	12	38,7
indeterminado	7	22,6
Canal analisado		
vestibular	4	9,8
palatino	4	9,8
mesiovestibular	14	34,1
distal	5	12,2
canal único	13	31,7
distolingual	1	2,4
Forma		
circular	14	50
achatado	6	21,4
oval	8	28,6
Arcada		
Superior	20	48,8
Inferior	21	51,2
Exame		
Diagnóstico exato	30	73,2
Índice tomográfico	11	26,8

Tabela 4. Análise descritiva das variáveis analisadas.

Variável	Média	DP	Mín.	Máx.
Extensão da fratura	17,52	10,43	1,11	288,00
Área hipodensa (largura)	4,05	0,47	1,68	10,35
Área hipodensa (altura)	10,22	0,82	2,29	19,46
Diâmetro do canal tratado	1,23	0,53	0,28	3,82
Medida da dentina radicular remanescente	1,15	0,04	0,36	3,80
Diâmetro total (canal +remanescente da raiz)	4,02	0,11	0,98	9,75
Área canal tratado	1,85	0,01	0,15	9,23
Área total (canal + remanescente da raiz)	17,52	0,74	2,59	45,43
Proporção canal/raiz (%)	31,05	1,14	11,62	63,13

Tabela 5. Medidas de diâmetro e área do canal radicular e raiz e associação com o tipo de fratura

	Horizontal		Vertical		Obliqua		p	Post-hoc
	Média	DP	Média	DP	Média	DP		
Extensão da fratura	-		9,62	1,71	22,63	16,60	0,181	
Área hipodensa (largura)	-		4,05	0,62	4,22	0,74	0,702	
Área hipodensa (altura)	-		8,51	1,17	11,71	1,09	0,082	
Diâmetro do canal tratado	0,81	0,09	1,02	0,08	1,34	0,07	0,002	HxV: 0,293 HxO: 0,034 VxO: 0,012
Medida da menor dentina radicular remanescente	1,28	0,13	1,14	0,08	1,10	0,05	0,231	
Diâmetro total da raiz	3,59	0,31	3,94	0,19	4,01	0,14	0,766	
Área canal tratado	1,83	0,35	1,30	0,23	2,18	0,23	0,009	HxV: 0,153 HxO: 0,999 VxO: 0,012
Área total (canal + remanescente e da raiz)	24,45	3,37	17,29	1,65	17,62	0,98	0,109	
Proporção canal/raiz	22,62	1,11	26,35	1,82	33,88	1,63	<0,001	HxV: 0,709 HxO: 0,009 VxO: 0,002

Tabela 6. Associação entre tipo de fratura e variáveis categóricas

Variável	Horizontal		Vertical		Obliqua		p
	n	%	n	%	n	%	
Gênero							
Feminino	1	100,0	6	54,5	12	66,7	0,597
Masculino	0	0,0	5	45,5	6	33,3	
Idade							
18 a 30 anos	0	0,0	2	18,2	4	22,2	0,921
31 a 45 anos	0	0,0	3	27,3	4	22,2	
46 a 60 anos	1	100,0	6	54,5	10	55,6	
61 a 85 anos	0	0,0	2	18,2	4	22,2	
Dente (criar 2 variáveis)							
Anteriores	0	0,0	0	0,0	4	22,2	0,207
Pré-molares	1	100,0	2	18,2	6	33,3	
Molares	0	0,0	10	81,8	7	38,9	
Retentor							
ausente	1	100,0	9	90,0	13	72,2	0,470
presente	0	0,0	1	10,0	5	27,8	
Área hipodensa em J							
presente	1	100,0	11	100,0	14	77,8	0,215
ausente	0	0,0	0	0,0	4	22,2	
Terço acometido							
cervical	0	0,0	1	9,1	2	11,1	0,931
medio	0	0,0	2	18,2	5	27,8	
Apical	0	0,0	0	0,0	1	5,6	
Mais de 1/3	1	100,0	6	54,5	6	33,3	
indeterminado	0	0,0	2	18,2	4	22,2	
Canal analisado							
vestibular							0,227
palatino	0	0,0	0	0,0	4	22,2	
mesiovestibular	0	0,0	2	18,2	0	0,0	
distal	0	0,0	6	54,5	6	33,3	
canal único	0	0,0	1	9,1	1	5,6	
distolingual	1	100,0	1	9,1	7	38,9	
Forma							
circular	0	0,0	4	44,4	8	57,1	0,334
achatado	1	100,0	2	22,2	1	7,1	
oval	0	0,0	3	33,3	4	28,6	
Arcada							
Superior	1	100,0	4	36,4	9	50,0	0,429
Inferior	0	0,0	7	63,6	9	50,0	

6. DISCUSSÃO

O presente estudo teve como amostra exames tomográficos de dentes tratados endodonticamente com diagnóstico tomográfico de fratura radicular. Diversos estudos na literatura, mencionam esses dentes como os mais acometidos por fraturas radiculares em comparação aos dentes com vitalidade pulpar, sendo o tratamento endodôntico considerado fator etiológico contribuinte para a ocorrência de fraturas (ZOU *et al.*, 2011; LIAO *et al.*, 2021; PATEL *et al.*, 2022).

O tratamento endodôntico possui altas taxas de sucesso, no entanto, é importante mais estudos que verifiquem até qual ponto o preparo do canal é suficiente em termos de desinfecção, sem comprometer a força de resistência da estrutura dentária às fraturas radiculares (WILCOX *et al.*, 1997; MUNARI *et al.*, 2019). São poucos os estudos na literatura, que investigam a influência do alargamento do canal durante o preparo químico-mecânico na ocorrência de fraturas, alguns estudos concluíram que a ocorrência de fratura está associada ao alargamento excessivo do canal radicular (CAMPELLO *et al.*, 2021; KILIÇ *et al.*, 2021, PACHECHO-YANES *et al.*, 2022).

As fraturas radiculares podem ser resultantes de trincas e defeitos que ocorrem na parede dentinária durante o preparo químico-mecânico e se propagam por forças oclusais, resultando em fraturas (ÇAPAR *et al.*, 2015, SHANTIAEE *et al.*, 2019). Apesar da instrumentação do canal radicular com instrumentos de maiores diâmetros proporcionar maior limpeza, ocorre maior remoção de tecido dentinário, o que pode enfraquecer ainda mais a estrutura dentária e ser fator predisponente para fraturas (TOPÇUOĞLU *et al.*, 2012; TIAN *et al.*, 2019, CAMPELLO *et al.*, 2021).

O pré-alargamento do terço cervical do canal radicular, constitui uma etapa importante durante preparo químico-mecânico, pois possibilita menor fadiga do

instrumento e redução da extrusão de debris. No entanto, estudos têm evidenciado que a remoção excessiva de tecido dentinário nessa região é um fator contribuinte para a ocorrência de fraturas radiculares (SOUSA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2020). No presente estudo, um dos pontos de análise nos exames tomográficos foram as regiões de JCE e 4 mm abaixo da mesma, com o intuito de verificar o alargamento nessa região e a ocorrência de fraturas. Os resultados demonstraram que o terço cervical foi a segunda região de maior ocorrência de fraturas radiculares com uma frequência de 19.4%.

Além da ação dos instrumentos, estudos demonstram que as soluções irrigadoras também exercem influência sobre a dureza da estrutura dentinária, favorecendo a ocorrência de fraturas (BELLI *et al.*, 2014). Uma recente scoping-review de DOTTO *et al.*, 2020 demonstrou que soluções irrigadoras como NaOCl, MTAD, clorexidina possuem efeitos deletérios sobre as propriedades mecânicas da estrutura dentária, sendo que quanto maior a concentração maiores os efeitos deletérios, outros estudos corroboram com essa evidência (UZUNOGLU *et al.*, 2016; XU *et al.*, 2022). Neste aspecto reside uma importante limitação do presente estudo, pois não é possível afirmar quais foram o(s) irrigante(s) utilizados em cada caso.

É consenso entre os estudos que a etapa de obturação dos canais radiculares é um fator contribuinte para fraturas radiculares, devido a força excessiva durante a condensação do material obturador ou pela ação de espaçadores digitais (CAPAR *et al.*, 2015; CHAI & TAMSE, 2018). Da mesma forma que para os irrigantes, a influência da força exercida durante a obturação não pode ser considerada no presente estudo.

O diagnóstico de fraturas radiculares é um desafio na prática clínica (ZHANG *et al.*, 2019). Diversos estudos comprovam que a TCFC é o exame com maior acurácia em comparação as radiografias periapicais para permitir o diagnóstico conclusivo de fraturas radiculares (KOBAYASHI-VELASCO *et al.*, 2017; SALINEIRO *et al.*, 2017;

GIUDICE *et al.*, 2018). Um dos indícios tomográficos de fratura radicular é a presença de imagem hipodensa em forma de “J” em torno da raiz acometida, destruição da cortical óssea e associação com dentes com restaurações indiretas extensas (ALAUZILLY; AZIM 2022). No presente estudo, 85,4% dos exames tomográficos avaliados possuíam área hipodensa em “J” com uma média de largura de 4,05 mm e 10,22 mm de altura. Em 73.2% dos exames avaliados, a linha de fratura foi evidente ao longo da raiz, sendo possível a sua classificação conforme o estudo de BUENO *et al.*, 2021, em FRV, FRO e FRH. Contudo, em 26,8% dos exames avaliados, apenas a imagem hipodensa associada a raiz acometida foi visualizada, não sendo possível a classificação do tipo de fratura radicular.

Alguns estudos corroboram que o tipo de fratura mais comum em dentes tratados endodonticamente é a fratura radicular vertical (CHANG *et al.*, 2016; YOSHINO *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2020; PATEL *et al.*, 2022). Contudo, no presente estudo, as FRO foram mais frequentes (60%), seguidas pelas FRV (36.7%) e pelas FRH (3.3%). Essas diferenças podem ser justificadas devido a diferenças metodológicas entre os estudos disponíveis na literatura em comparação a este, diferentes tomógrafos, examinadores e grupos dentários avaliados.

As FRV e FRO ocorrem ao longo eixo do dente e podem acometer mais de um terço do canal radicular (BUENO *et al.*, 2021; MIZUHASHI *et al.*, 2021). Os resultados do presente estudo demonstraram que a maioria dos casos avaliados (38.7%) foram de fraturas que acometeram mais de um terço do canal radicular.

Apesar da alta acurácia diagnóstica da TCFC, alguns fatores podem ser limitantes e impedir a visualização da linha de fratura (FREITAS *et al.*, 2019). Os materiais obturadores e retentores intrarradiculares metálicos, por exemplo, afetam negativamente a qualidade de imagem, devido a geração de artefatos (NEVES *et al.*, 2014; MOUDI *et al.*, 2015; TIEPO *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*,

2021). Além disso, parâmetros de aquisição das imagens como tamanho de voxel, FOV, e dose de radiação influenciam no padrão da imagem (ZHANG *et al.*, 2019). No presente trabalho, mais de dois terços dos exames inicialmente selecionados foram excluídos devido à impossibilidade de visualização da fratura. Isso se deve, em parte, ao fato de que o radiologista por vezes diagnostica fratura sem, contudo, visualiza de fato, sendo o diagnóstico fornecido com base em outros aspectos, como por exemplo a perda óssea lateral a raiz ou mesmo informações fornecidas pelo clínico.

Outro fator limitante da TCFC é detectar com precisão fraturas pequenas em extensão ou espessura, aquelas que são muitas vezes recentes (BAAGEEL *et al.*, 2016). A extensão das fraturas radiculares médias na amostra avaliada foi de 17,52 mm. Entretanto, a espessura do traço de fratura não foi considerada no presente estudo, uma vez que a TCFC não é adequada para este tipo de avaliação, em virtude de sua própria resolução (CAMPELLO *et al.*, 2021).

Os retentores intrarradiculares são considerados fatores etiológicos para fratura radicular, devido a remoção excessiva de tecido dentinário durante a confecção de preparo e/ou comprimento extenso, além do módulo de elasticidade do material ser diferente da dentina, muitas vezes contribuindo para as fraturas, como é o caso dos retentores metálicos (SARKIS-ONOFRE *et al.*, 2020, WANG *et al.*, 2019). Na amostra avaliada, os retentores estavam presentes em 24,4% dos exames, dos quais 44.4% foram de retentores com extensão maior do que 2/3 da proporção coroa raiz. Além disso, todos os retentores apresentavam imagens compatíveis com retentores metálicos. Entretanto, não possível avaliar o diâmetro do retentor intrarradicular devido a artefatos, em linha com estudos que demonstraram que os retentores intrarradiculares provocam uma redução da sensibilidade e especificidade da TCFC em diagnosticar fraturas radiculares (COSTA *et al.*, 2011; COSTA *et al.*, 2012; COSTA *et al.*, 2014; MOUDI *et al.*, 2015; MENEZES *et al.*, 2016; PINTO *et al.*, 2017; FREITAS

et al., 2019). Neste contexto, apenas a extensão dos mesmos foi analisada.

Os exames tomográficos de dentes com restaurações metálicas extensas ou implantes próximos do dente acometido por fratura radicular, também limitaram as análises em alguns pontos como a JCE, devido a geração de artefatos. Alguns estudos apontam que a ferramenta redutora de artefatos metálicos melhora a qualidade da imagem e reduzindo artefatos (FREITAS *et al.*, 2018; MARTIN E SILVA *et al.*, 2018; FONTENELE *et al.*, 2021b). No entanto, tal ferramenta não estava disponível no *software* utilizado, o que é uma limitação. Contudo, ferramentas de redução de artefatos ainda são muito recentes e seu impacto na alteração das imagens a ponto de prejudicar outras análises ainda é desconhecido.

De acordo com alguns estudos da literatura, a morfologia do canal radicular, pode ser um fator predisponente para a ocorrência de fraturas em dentes tratados endodonticamente (CHAI; TAMSE 2015; PATEL *et al.*, 2022). Com base nos presentes resultados, os canais radiculares mais afetados foram os com morfologia circular, seguido de canais ovais e achatados. A maior ocorrência de canais circulares se deve ao fato de que o grupo dentário mais afetado por fraturas radiculares na amostra avaliada foram os molares (51.2%), com os canais mesiovestibulares sendo os mais acometidos (34.1%), seguido de pré-molares (29.3%) e dentes anteriores (17.1%). Estes resultados reforçam estudos prévios, que também evidenciaram uma maior ocorrência de fraturas radiculares em molares. Segundo os autores, isto se deve a localização dos mesmos nos arcos dentários em áreas de concentração de forças oclusais (PRADEEPKUMAR *et al.*, 2016; PATEL *et al.*, 2022).

No presente estudo, não houve diferenças significativas quanto à dentina remanescente nos dentes tratados endodonticamente e a ocorrência de fratura radicular. No entanto, estudos da literatura demonstram que a espessura dentinária remanescente pode influenciar na ocorrência de fratura radicular, sugerindo que existe

uma quantidade mínima de dentina que deve ser preservada após o tratamento endodôntico para garantir que não ocorra a fratura (SOUSA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2020). Com relação ao alargamento do canal, os resultados foram estatisticamente significantes, em casos de FRV o alargamento foi de 26,35% e em casos de FRO o alargamento foi de 33.88%.

7. CONCLUSÃO

As FRO foram mais frequentes, seguido das FRVs, os dentes acometidos apresentaram mais de um terço da raiz envolvidos. Os molares foram os dentes mais envolvidos, devido a sua localização e maior força oclusal. O tratamento endodôntico é um fator etiológico para a ocorrência de fraturas radiculares, sendo necessários mais estudos como esse, para guiar o clínico e fornecer dados sobre até qual ponto o alargamento do canal pode ocasionar fraturas radiculares.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbot PV (2019). Diagnosis and management of transverse root fractures. *Dental Traumatology* 35, 333-347.

Alaugaily I, Azim AA (2022). CBCT patterns of bone loss and clinical predictors for the diagnosis of cracked teeth and teeth with vertical root fracture. *Journal of Endodontics* 48, 1100-1106.

Anantula K, Vankayala B, Yadav SS (2021). A three-dimensional finite element analysis of stress distribution in maxillary central incisor with a horizontal middle root fracture after various management protocols. *Journal of Conservative Dentistry* 24, 470-474.

Aristizabal-Elejalde D, Arriola-Guillén LE, Castilho AA, Ruíz-Mora GA, Rodríguez-Cárdenas YA (2020). Assessment of fractures in endodontically treated teeth restored with and without root canal posts using high-resolution cone beam computed tomography. *Journal Clinical and Experimental Dentistry* 12, 547-554.

Avsever H, Gunduz K, Orhan K, Uzun I, Ozmen B, Egrioglu E, Midilli M (2014). Comparison of intraoral radiography and cone-beam computed tomography for the detection of horizontal root fractures: an in vitro study. *Clinical Oral Investigation* 18, 285-292.

Baageel TM, Allah EH, Bakalka GT, Jadu F, Yamany I, Jan AM, Bogari DF, Alhazzazi (2016). Vertical root fracture: Biological effects and accuracy of diagnostic

imaging methods. Journal of International Society of Preventive & Community Dentistry 6, suppl.2.

Bechara B, McMahan CA, Moore WS, Noujeim M, Teixeira FB, Geha H (2013). Cone beam CT scans with and without artefact reduction in root fracture detection of endodontically treated teeth. Dentomaxillofacial Radiology 42, 1-13.

Belli S, Eraslan O, Eraslan O, Eskitascioglu M, Eskitascioglu G (2014). Effects of NaOCl, EDTA and MTAD when applied to dentine on stress distribution in post-restored roots with flared canals. International Endodontic Journal 47, 1123-1132.

Bhatt M, Colil J, Chehroudi B, Esteves A, Aleksejuniene J, MacDonald D (2021). Clinical decision making and importance of the AAOMR/AAE position statement for CBCT examination in endodontic cases. International Endodontic Journal 54, 26-37.

Bhandari S (2021). Facts about cracks in teeth. Primary Dental Journal 10, 20-27.

Brady E, Mannocci F, Brown J, Wilson R, Patel S (2014). A comparison of cone beam computed tomography and periapical radiography for the detection of vertical root fractures in nonendodontically treated teeth. International Endodontic Journal 47, 735-746.

Bragatto FP, Filho LI, Kasuya AVB, Chicarelli M, Queiroz AF, Takeshita WM, Iwaki LCV (2016). Accuracy in the diagnosis of vertical root fractures external root resorptions, and root perforations using cone beam computed tomography with different voxel sizes of acquisition. Journal of Conservative Dentistry 19, 573-577.

Bueno MR, Estrela C, Azevedo BC, Junqueira JLC (2020). Root Canal Shape of Human Permanent Teeth Determined by a New Cone-Beam Computed Tomography Software. *Journal of Endodontics* 46, 1662-1674.

Bueno MR, Azevedo BC, Estrela C (2021). A critical review of the differential diagnosis of root fracture line in CBCT scans. *Brazilian Dental Journal* 32, 114-128.

Byakova SF, Novozhilova NE, Makeeva IM, Grachev VI, Kasatkina IV (2019a). The accuracy of CBCT for the detection and diagnosis of vertical root fractures in vivo. *International Endodontic Journal* 52, 1255-1263.

Byakova SF, Novozhilova NE, Makeeva IM, Grachev VI, Kasatkina IV (2019b). The detection of vertical root fractures in post-core restored teeth with cone-beam CT: in vivo and ex vivo. *Dentomaxillofacial Radiology* 48, 1-7.

Campello AF, Marceliano-Alves MF, Siqueira Jr JF, Fonseca SC, Lopes RT, Alves FRF (2021). Unprepared surface areas, accumulated hard tissue debris, and dentinal crack formation after preparation using reciprocating or rotary instruments: a study in human cadavers. *Clinical Oral Investigation* 25, 6239-6248.

Campello AF, Marceliano-Alves MF, Provenzano JC, Loyola SC, Siqueira Jr JF, Machado AG, Machado AL, Lopes RT, Paiva MM, Alves FRF (2021). Accuracy of Microcomputed Tomography in Detecting Dentinal Cracks: A Correlative Study with Scanning Electron and Operative Microscopy. *Scanning* 15, 5571123.

Candemil AP, Salmon B, Vasconcelos KF, Oenning AC, Jacobs R, Freitas DQ, Haiter-Neto F, Mangione F, Oliveira ML (2021). Cone beam CT optimization for detection of

vertical root fracture with metal in the field of view or the exomass. *Scientific Reports* 27, 19155.

Çapar ID, Saygılı G, Ergun H, Gök T, Arslan H, Ertas H (2015). Effects of root canal preparation, various filling techniques and retreatment after filling on vertical root fracture and crack formation. *Dental Traumatology* 4, 302-307.

Çapar ID, Uysal B, Ok E, Arslan H (2015). Effect of the Size of the Apical Enlargement with Rotary Instruments, Single-cone Filling, Post Space Preparation with Drills, Fiber Post Removal, and Root Canal Filling Removal on Apical Crack Initiation and Propagation. *Journal of Endodontics* 2, 253-256.

Cavalcanti MGP, Salineiro FC, Barros FM, Barros FBA (2022). Influence of endodontic sealers artifacts in the detection of vertical root fractures. *Brazilian Dental Journal* 33, 22-30.

Chai H, Tamse A (2018). Vertical root fracture in buccal roots of bifurcated maxillary premolars from condensation of gutta-percha. *Journal of Endodontics* 44, 1159-1163.

Chang E, Lam E, Shah P, Azarpazhooh (2016). Cone-beam Computed Tomography for Detecting Vertical Root Fractures in Endodontically Treated Teeth: A Systematic Review. *Journal of Endodontics* 2, 177-185.

Çiçek E, Aslan MA, Akkoçan O (2015). Comparison of the resistance of teeth instrumented with different nickel-titanium systems to vertical root fracture: an in vitro study. *Journal of Endodontics* 41, 1682-1685.

Costa FF, Gaia BF, Umetsubo OS, Cavalcanti MGP (2011). Detection of horizontal root fracture with small-volume cone-beam computed tomography in the presence and absence of intracanal metallic post. *Journal of Endodontics* 37, 1456-1459.

Costa FF, Gaia BF, Umetsubo OS, Pinheiro LR, Tortamano IP, Cavalcanti MGP (2012). Use of large-volume cone-beam computed tomography in identification and localization of horizontal root fracture in the presence and absence of intracanal metallic post. *Journal of Endodontics* 38, 856-859.

Costa FF, Pinheiro LR, Umetsubo OS, Santos Jr O, Gaia BF, Cavalcanti MGP (2014). Influence of cone-beam computed tomographic scan mode for detection of horizontal root fracture. *Journal of Endodontics* 40, 1472-1476.

Dias DR, Iwaki LCV, Oliveira ACA, Martinhão FS, Rossi RM, Araújo MG, Hayacibara RM (2020). Accuracy of high-resolution small-volume cone-beam computed tomography in the diagnosis of vertical root fracture: a in vivo analysis. *Journal of Endodontics* 46, 1059-1066.

Dillenseger JP, Gros CI, Sayeh A, Rasamimanana J, Lawniczak F, Leminor JM, Matern JF, Constantinesco A, Bornert F, Choquet P (2017). Image quality evaluation of small FOV and large FOV CBCT devices for oral and maxillofacial radiology. *Dentomaxillofacial Radiology* 46, 20160285.

Dogan MS, Callea M, Kusdhany L, Aras A, Muharani DA, Mandasari M, Adiatman M, Yavuz I (2018). The evaluation of root fracture with cone beam computed tomography

(cbct): an epidemiological study. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry* 10, 41-48.

Dotto L, Onofre RS, Bacchi A, Pereira GKR (2020). Effect of Root Canal Irrigants on the Mechanical Properties of Endodontically Treated Teeth: A Scoping Review. *Journal of Endodontics* 5, 596-604.

Dutra KL, Pachêco-Pereira C, Bartoluzzi EA, Flores-Mir C, Lagravère MO, Corrêa M (2017). Influence of intracanal materials in vertical root fracture pathway detection with cone-beam computed tomography. *Journal of Endodontics* 43, 1170-1175.

Estrela C, Bueno MR, Silva JA, Porto OCL, Leles CR, Azevedo BC (2015). Effect of intracanal posts on dimensions of cone beam computed tomography images of endodontically treated teeth. *Dental Press* 1, 28-36.

Fayad MI, Ashkenaz PJ, Johnson BR (2012). Different representations of vertical root fractures detected by cone-beam volumetric tomography: A Case Series Report. *Journal of Endodontics* 38, 1435-1442.

Ferreira LM, Visconti MAPG, Nascimento HÁ, Dallemolle RR, Ambrosano GM, Freitas DQ (2015). Influence of CBCT enhancement filters on diagnosis of vertical root fractures: a simulation study in endodontically treated teeth with and without intracanal posts. *Dentomaxillofacial Radiology* 44, 20140352.

Fisekcioglu E, Dolekoglu S, Ilguy M, Ersan N, Ilguy D (2014). In vitro detection of dental root fractures with cone beam computed tomography (CBCT). *Iranian Journal of Radiology* (1) 11, e11485.

Fontenele RC, Machado AH, Reis LO, Freitas DQ (2021a). Influence of metal artefact reduction tool on the detection of vertical root fractures involving teeth with intracanal materials in cone beam computed tomography images: A systematic review and meta-analysis. *International Endodontic Journal* 54, 1769-1781.

Fontenele RC, Gomes AF, Nejaim Y, Freitas DQ (2021b). Do the tube current and metal artifact reduction influence the diagnosis of vertical root fracture in a tooth positioned in the vicinity of a zirconium implant? A CBCT study. *Clinical Oral Investigation* 25, 2229-2235.

Freitas DQ, Vasconcelos TV, Noujeim M (2018). Diagnosis of vertical root fracture in teeth close and distant to implant: an in vitro study to assess the influence of artifacts produced in cone beam computed tomography. *Clinical Oral Investigation* 23, 1263-1270.

Freitas APLF, Cavalcanti YW, Costa FCM, Peixoto LR, Maia AMA, Rovaris K, Bento PM, Melo DP (2019). Assessment of artefacts produced by metal posts on CBCT images. *International Endodontic Journal* 52, 223-236.

Freitas e Silva A, Mármora B, Barriviera M, Panzarella FK, Raitz R (2019). CBCT performance and endodontic sealer influence in the diagnosis of vertical root fractures. *The Journal of Contemporary Dental Practice* 20, 552-556.

Gaêta-Araújo H, Souza GQS, Freitas DQ, Oliveira-Santos C (2017). Optimization of tube current in cone-beam computed tomography for the detection of vertical root

fractures with different intracanal materials. *Journal of Endodontics* 43, 1668-1673.

Gao A, Cao D, Lin Z (2021). Diagnosis of cracked teeth using cone-beam computed tomography: literature review and clinical experience. *Dentomaxillofacial Radiology* (5) 50, 20200407.

García-Guerrero C, Mendonza-Beltrán W, Roldan-Roldan M, Villa-Machado P, Restrepo-Restrepo F (2021). Vertical root fractures: a time-dependent clinical condition. A case-control study in two colombian populations. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry* 13, 1104-1111.

Ghazizadeh M, Sheikhi M, Aminian M, Ghazizadeh MM (2020). Accuracy of digital image enhancement in detection of vertical and horizontal root fracture. *Dental Research Journal* 14, 266-272.

Girelli CFM, Lima CO, Lacerda MFLS, Coelho RG, Silveira FF, Nunes E (2020). The importance of bioceramics and computed tomography in the late clinical management of a horizontal root fracture: A case report. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry* 12, 514-518.

Giudice RL, Lizio A, Cervino G, Fabiana N, Francesco P, Ausiello P, Cicciù M (2018). The horizontal root fractures. diagnosis, clinical management and three-year follow-up. *The Open Dentistry Journal* 28, 687-695.

González AR, Tosoni GM, Freitas DQ, Oliveira ML (2022). Influence of sharpening filters on the detection of root fractures using low-dose cone-beam computed

tomography. Clinical Oral Investigation 26, 4797-4803.

Gulibire A, Cao Y, Gao A, Wang C, Wang T, Xie X, Liang J, Li W, Lin Z (2021). Assessment of true vertical root fracture line in endodontically treated teeth using a new subtraction software – A Micro-CT and CBCT study. Australian Endodontic Journal 47, 290-297.

Guo XL, Li G, Zheng JQ, Ma RH, Liu FC, Yuan FS, Lyu PJ, Guo YJ, S Yin (2019). Accuracy of detecting vertical root fractures in non-root filled teeth using cone beam computed tomography: effect of voxel size and fracture width. International Endodontic Journal 52, 887-898.

Haralur SB, Ahamari MAA, AlQarni SA, Althobati MK (2018). The effect of intraradicular multiple fiber and cast posts on the fracture resistance of endodontically treated teeth with wide root canals. Biomed Research International 15, 1671498.

Haueisen H, Gärtner K, Kaiser L, Trohorsch D, Heidemann D (2013). Vertical root fracture: prevalence, etiology, and diagnosis. Quintessence international 44, 467-474.

Hekmatian E, Kheir MK, Fathollahzade H, Sheikhi M (2018). Detection of vertical root fractures using cone-beam computed tomography in the presence and absence of gutta-percha. Scientific World Journal 9,1-10.

Hu Z, Cao D, Hu Y, Wang B, Zhang Y, Tang R, Zhuang J, Gao A, Chen Y, Lin Z (2022). Diagnosis of in vivo vertical root fracture using deep learning on cone-beam CT

images. BMC Oral health 22, 1-9.

Ikubo M, Osano T, Sano T, Katsumata A, Arjii E, Kobayashi K, Sasano T, Wakoh M, Seki K, Kojima I, Sakamoto M (2015). Root canal filling materials spread pattern mimicking root fractures in dental CBCT images. Oral Surgery Oral Medicine Oral Pathology Oral Radiology 120, 521-527.

Ikubo M, Kagawa T, Fujisawa J, Kumasaka A, Nishioka T, Kojima I, Sakamoto M, Kobayashi K, Yuasa K (2020). Effect of exposure parameters and gutta-percha cone size on fracture-like artifacts in endodontically treated teeth on cone-beam computed tomography images. Oral Radiology 36, 344-348.

Kajan ZD, Taromsari M (2012). Value of cone beam CT in detection of dental root fractures. Dentomaxillofacial Radiology 41, 3-10.

Kajan ZD, Taromsari M, Fard NK, Khaksari F, Hamidi FM (2018). The efficacy of metal artifact reduction mode in cone-beam computed tomography images on diagnostic accuracy of root fractures in teeth with intracanal posts. Iranian Endodontic Journal 13, 47-53.

Karygianni L, Krenzel M, Winter M, Stampf S, Wrbas KT (2014). Comparative assessment of the incidence of vertical root fractures between conventional versus surgical endodontic retreatment. Clinical Oral Investigation 18, 2015-2021.

Kaur A, Logani A, Chahar M (2018). Atypical radiographic presentation of a horizontal mid-root fracture in a maxillary central incisor tooth. Journal of Conservative Dentistry

21, 233-236.

Khasnis SA, Kidiyoor KH, Patil AB, Kenganal SB (2014). Vertical root fractures and their management. *Journal of Conservative Dentistry* 17, 103-110.

Kliç Y, Karataşlıoğlu E, Kaval ME (2021). The Effect of Root Canal Preparation Size and Taper of Middle Mesial Canals on Fracture Resistance of the Mandibular Molar Teeth: and in vitro study. *Journal of Endodontic* 9, 1467-1471.

Kobayashi-Velasco S, Salineiro FCS, Gialain IO, Cavalcanti MGP (2017). Diagnosis of alveolar and root fractures: an in vitro study comparing CBCT imaging with periapical radiographs. *Journal of applied oral science* 25, 227-233.

Krastl G, Weiger R, Ebeleseder K, Galler K (2022). Present status and future directions: Endodontic management of traumatic injuries to permanent teeth. *International Endodontic Journal* 55, suppl. 4.

Lee WB, Kim YD, Shin SH, Lee JY (2021). Prognosis of teeth in mandibular fracture lines. *Dental Traumatology* 37, 430-435.

Liao WC, Chen CH, Pan YH, Chang MC, Jeng JH (2021). Vertical root fracture in non-endodontically and endodontically treated teeth: current understanding and future challenge. *Journal of personalized Medicine* 16, 1-29.

Liao WC, Chen CH, Pan YH, Chang MC, Jeng JH (2022). Horizontal root fracture in posterior teeth without dental trauma: A diseased condition with special characteristics. *Journal of the Formosan Medical Association* 121, 1625-1635.

Martin e Silva D, Campos CN, Carvalho ACP, Devito KL (2018). Diagnosis of Mesiodistal Vertical Root Fractures in Teeth with Metal Posts: Influence of Applying Filters in Cone-beam Computed Tomography Images at Different Resolutions. *Journal of Endodontics* 3, 470-474.

Moudi E, Haghanifar S, Madani Z, Bijani A, Nabavi ZS (2015). The effect of metal artifacts on the identification of vertical root fractures using different fields of view in cone-beam computed tomography. *Imaging Science in Dentistry* 45, 147-151.

Neves FS, Freitas DQ, Campos PSF, Ekestubbe A, Lofthag-Hansen S (2014). Evaluation of cone-beam computed tomography in the diagnosis of vertical root fractures: the influence of imaging modes and root canal materials. *Journal of Endodontics* 40, 1530-1536.

Puleio F, Giudice GL, Militi A, Bellezza U, Giudice RL (2022). Does low-taper root canal shaping decrease the risk of root fracture? a systematic review. *Dentistry Journal* (6) 10.

Ma RH, Ge ZP, Li G (2016). Detection accuracy of root fractures in cone-beam computed tomography images: a systematic review and meta-analysis. *International Endodontic Journal* 49, 646-654.

Makeeva IM, Byakova SF, Novozhilova NE, Adzhieva EK, Golubeva GI, Grachev VI, Kasatkina IV (2016). Detection of artificially induced vertical root fractures of different widths by cone beam computed tomography in vitro and in vivo. *International Endodontic Journal* 49, 980-989.

Malhotra N, Kundabala M, Acharaya S (2011). A review of root fractures: diagnosis, treatment and prognosis. *Dental Update* 38, 615-624.

May JJ, Cohenca N, Peters OA (2013). Contemporary management of horizontal root fractures to the permanent dentition: diagnosis--radiologic assessment to include cone-beam computed tomography. *Journal of Endodontics* (3 suppl) 39,

Menezes RF, Araújo NC, Rosa JMCS, Carneiro VSM, Neto APS, Costa V, Moreno LM, Miranda JM, Albuquerque DS, Albuquerque M, Santos RA, Gerbi MEMM (2016). Detection of vertical root fractures in endodontically treated teeth in the absence and in the presence of metal post by cone-beam computed tomography. *BMC OralHealth* 14, 1-16.

Mizunashi F, Ogura I, Sugawara Y, Ohashi M, Mizunashi R, Saegusa H (2021). Diagnosis of root fractures using cone-beam computed tomography: difference of vertical and horizontal root fracture. *Oral Radiology* 37, 305-310.

Moule AJ, Kahler B. (1999) Diagnosis and management of teeth with vertical root fractures. *Australian Endodontic Journal* 44, 75-87.

Munari LS, Bowles WR, Fok ASL (2019). Relationship between canal enlargement and fracture load of root dentin sections. *Dental Materials* 35, 818-824.

Oliveira MR, Sousa TO, Caetano AF, Paiva RR, Valladares-Neto J, Yamamoto-Silva FP, Silva MAG (2021). Influence of CBCT metal artifact reduction on vertical radicular fracture detection. *Imaging Science in Dentistry* 51, 55-62.

Özer SY, Ünlü G, Deger Y (2011). Diagnosis and treatment of endodontically treated teeth with vertical root fracture: three case reports with two-year follow-up. *Journal of Endodontics* 37, 97-102.

Öztürk C, Polat S, Tunçdemir M, Gönüldas F, Seker E (2019). Evaluation of the fracture resistance of root filled thin walled teeth restored with different post systems. *Biomedical Journal* 42, 53-58.

Pacheco-Yanes J, Gazzaneo I, Campello AF, Marceliano-Alves MF, Estrela C, Bueno MR, Lopes RT, Rôças IN, Alves FRF, Siqueira Jr JF (2022). The Effect of Root Canal Preparation Size and Taper of Middle Mesial Canals on Fracture Resistance of the Mandibular Molar Teeth: and in vitro study. *Journal of Endodontics* 9, 1467-1471.

Patel S, Bhuva B, Bose R (2022). Present status and future directions: vertical root fractures in root filled teeth. *International Endodontic Journal* (suppl. 3) 55.

Pinto MGO, Rabelo KA, Melo SLS, Campos PSF, Oliveira LSAF, Bento PM, Melo DP (2017). Influence of exposure parameters on the detection of simulated root fractures in the presence of various intracanal materials. *International Endodontic Journal* 6, 586-594.

Pinto MGO, Melo SLS, Suassuna FCM, Marinho LE, Leite JBS, Batista AUD, Bento PM, Melo DP (2021). Influence of size of field of view (FOV), position within the FOV, and scanning mode on the detection of root fracture and observer's perception of artifacts in CBCT images. *Dentomaxillofacial Radiology* 50, 1-18.

Pradeepkumar AR, Shemesh H, Jothilatha S, Vijayabharathi R, Jayalakshmi S, Kishore A (2016). Diagnosis of vertical root fractures in restored endodontically treated teeth: a time-dependent retrospective cohort study. *Journal of Endodontics* 42, 1175-1180.

Pradeepkumar AR, Shemesh H, Nivedhitha MS, Hashir MMB, Arockiam S, Maheswari TNU, Natanasabapathy V (2021). Diagnosis of vertical root fractures by cone-beam computed tomography in root-filled teeth with confirmation by direct visualization: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Endodontics* 47, 1198-1214.

Patel S (2009). New dimensions in endodontic imaging: Part 2. Cone beam computed tomography. *International Endodontic Journal* 42, 463-475.

Popescu SM, Diaconu OA, Scriciu M, Marinescu IR, Drăghici EC, Truscă AG, Bănică AC, Vătu M, Mercur V (2017). Root fractures: epidemiological, clinical and radiographic aspects. *Romanian Journal Morphology and Embryology* 58, 501-506.

Quintero-Álvarez M, Bolaños-Alzate LM, Villa-Machado PA, Restrepo-Restrepo FA, Tobón-Arroyave SI (2021). In vivo detection of vertical root fractures in endodontically treated teeth: Accuracy of cone-beam computed tomography and assessment of potential predictor variables. *Journal of Clinical Experimental Dentistry* 13, 119-131.

Ranka M, Shah J, Youngson C (2012). Root fracture and its management. *Dental Update* 39, 535-538.

Safi Y, Hosseinpour S, Aziz A, Bamedi M, Malekashtari M, Vasegh Z (2016). Effect of

amperage and field of view on detection of vertical root fracture in teeth with intracanal posts. Iranian Endodontic Journal 11, 202-207.

Salineiro FCS, Pinheiro LR, Júnior OS, Cavalcanti MGP (2015). Detection of horizontal root fracture using four different protocols of cone-beam computed tomography. Brazilian Oral Research (1) 29.

Salineiro FCS, Kobayashi-Velasco S, Braga MM, Cavalcanti MGP (2017). Radiographic diagnosis of root fractures: a systematic review, meta-analyses and sources of heterogeneity. Dentomaxillofacial Radiology (8) 46.

Sarkis-Onofre R, Pinheiro HA, Poletto-Neto V, Bergoli CD, Cenci MS, Pereira-Cenci T (2020). Randomized controlled trial comparing glass fiber posts and cast metal posts
Short Title: Glass fiber posts versus cast metal posts. J Dent 96, 103334.

Shantiaae Y, Dianat O, Mosayebi G, Namdari M, Tordik P (2019). Effect of Root Canal Preparation Techniques on Crack Formation in Root Dentin. Journal of Endodontics 4, 447-452.

Shemesh H, Bier CAS, Wu MK, Tanomaru-Filho M, Wesselink PR (2009). The effects of canal preparation and filling on the incidence of dentinal defects. International Endodontic Journal 42, 208-213.

Shokri A, Eskandarloo A, Zahedi F, Karkehabadi H, Foroozandeh M, Farhadian M (2022). Effect of different intracanal posts and exposure parameters on detection of vertical root fracture by cone-beam computed tomography. Australian Endodontic

Journal.

Silva PB, Duarte SF, Alcalde MP, Duarte MAH, Vivan RR, Rosa RA, Só MVR, Nascimento AL (2020). Influence of cervical preflaring and root canal preparation on the fracture resistance of endodontically treated teeth. *BMC Oral Health* (1) 20, 111.

Sousa K, Andrade-Júnior CV, Silva JM, Duarte MAH, De-Deus G, Silva EJNL (2015). Comparison of the effects of Triple Gates and Gates-Glidden burs on cervical dentin thickness and root canal area by using cone beam computed tomography. *J App Oral Sci* 2, 164-168.

Talwar S, Utneja S, Nawal RR, Kaushik A, Srivastava D, Oberoy SS (2016). Role of cone-beam computed tomography in diagnosis of vertical root fractures: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Endodontics* 42, 12-24.

Tangari-Meira R, Vancetto JR, Dovigo LN, Tosoni GM (2017). Influence of tube current settings on diagnostic detection of root fractures using cone-beam computed tomography: an in vitro study. *Journal of Endodontics* 43, 1701-1705.

Taori P, Nikhade P, Chandak M, Ikhar A, Mahapatra J (2022). Management of Untreated Horizontal Root Fracture: A Case Report. *Cureus* 18, 1-18.

Tian SY, Bai W, Jiang WR, Liang YH (2019). Fracture Resistance of Roots in Mandibular Premolars Following Root Canal Instrumentation of Different Sizes. *Clin J Dent Research* 3, 197-202.

Tiepo M, Magrin G, Kovalik AC, Marmora B, Silva MF, Raitz R (2017). Evaluation of root fracture in endodontically treated teeth using cone beam computed tomography. The Journal of Contemporary Dental Practice. 18, 94-99.

Topçuoğlu HS, Arslan H, Keles A, Köseoğlu M (2012). Fracture resistance of roots filled with three different obturation techniques. Medicine Oral Patology Oral Cir Bucal 3, 528-532.

Tsai YL, Liao WC, Wang CY, Chang MC, Chang SH, Chang SF, Chang CW, Huang YD, Chan CP, Jeng JH (2017). Horizontal root fractures in posterior teeth without dental trauma: tooth/root distribution and clinical characteristics. International Endodontic Journal 50, 830-835.

Wilcox LR, Roskelley C, Sutton T (1997). The Relationship of Root Canal Enlargement to Finger-Spreader Induced Vertical Root Fracture. Journal of Endodontics 8, 533-534.

Uysal S, Akcicek G, Yalcin ED, Tuncel B, Dural S (2021). The influence of voxel size and artifact reduction on the detection of vertical root fracture in endodontically treated teeth. Acta Odontologica Scandinavica 79, 354-358.

Uzunoglu E, Yilmaz Z, Erdogan O, Gördüysus (2016). Final irrigation regimens affect fracture resistance values of root-filled teeth. Journal of Endodontics 42, 493-495.

Xu H, Ye N, Lin F, Heo YC, Fok ASL (2021). A new method to test the fracture strength of endodontically-treated root dentin. Dental Mater 37, 796-804.

Yalda FA, Theodorakou C, Clarkson RJ, Davies J, Feinberg L, Sengupta A, Horner K (2022). Determination of a cone-beam CT low-dose protocol for root fracture diagnosis in non-endodontically treated anterior maxillary teeth. *Dentomaxillofacial Radiology* (2) 51.

Yamamoto-Silva FP, Siqueira CFO, Silva MAGS, Fonseca RB, Santos AA, Estrela C, Silva BSF (2018). Influence of voxel size on cone-beam computed tomography- based detection of vertical root fractures in the presence of intracanal metallic posts. *Imaging Science in Dentistry* 48, 177-184.

Yildiz ED, Fidan ME, Sakarya RE, Dinçer B (2021). The effect of taper and apical preparation size on fracture resistance of roots. *Australian Endodontic Journal* 47, 67-72.

Yoshino K, Ito K, Kuroda M, Sugihara N (2015). Prevalence of vertical root fractures the reason for tooth extraction in dental clinics. *Clinical Oral Investigation* 19, 1405-1409.

Yuan ZY, Zou XH, Dai LL, Ao HZ, Li HX (2021). Clinical analysis on the root fracture of the maxillary first molar. *West China journal of stomatology* 39, 555-559.

Zhang L, Wang T, Cao Y, Wang C, Tan B, Tang X, Tan R, Lin Z (2019). In vivo detection of subtle vertical root fracture in endodontically treated teeth by cone-beam computed tomography. *Journal of Endodontics* 45, 856-862.

Zou X, Liu D, Yue L, Wu M (2011). The ability of cone-beam computerized tomography to detect vertical root fractures in endodontically treated and nonendodontically treated teeth: a report of 3 cases. *Oral Surgery Oral Medicine Oral Pathology Oral Radiology Endodontic* 6, 797-801.

Wanderley VA, Freitas DQ, Haiter-Neto F, Oliveira ML (2018). Influence of tooth orientation on the detection of vertical root fracture in cone-beam computed tomography. *Journal of Endodontics* 44, 1168-1172.

Wang P, Yan XB, Liu DG, Zhang WL, Zhang ZY, Ma XC (2010). Evaluation of dental root fracture using cone-beam computed tomography. *The Chinese Journal of Dental Research* 13, 31-35.

Wang P, Lv H, Sun H, Lin Y, He W (2011). Horizontal root fractures in posterior teeth: a case series. *Dental Traumatology* 27, 152-157.

9. ANEXOS

9.1. ARTIGOS PRODUZIDOS E SUBMETIDOS DURANTE O DOUTORADO

9.1.1. Artigo 1 (Submissão no Journal of Endodontics)

12/08/2023, 15:23

Gmail - Submission Confirmation for Apical root canal microbiome associated with primary or posttreatment apical periodont...



Flávio Alves <flavioferreiraalves@gmail.com>

Submission Confirmation for Apical root canal microbiome associated with primary or posttreatment apical periodontitis: a systematic review

2 mensagens

The Journal of Endodontics <em@editorialmanager.com>
Responder a: The Journal of Endodontics <hargreaves@uthscsa.edu>
Para: "Flávio F. R. Alves" <flavioferreiraalves@gmail.com>

31 de julho de 2023 às 21:57

Dear Dr. Alves,

Your submission entitled "Apical root canal microbiome associated with primary or posttreatment apical periodontitis: a systematic review" has been received by the Journal of Endodontics.

You will be able to check on the progress of your paper by logging on to the Journal of Endodontics web site as an author.

The URL is <https://www.editorialmanager.com/joe/>

Your username is: flavioferreiraalves@gmail.com

Can't remember your password?

To reset your password please try to sign in and click 'continue'. On the next screen click the 'forgot password' link and follow the steps to reset your password.

Your manuscript will be given a reference number once an Editor has been assigned.

Thank you for submitting your work to the Journal of Endodontics.

Kind regards,

Journal of Endodontics

At Elsevier, we want to help all our authors to stay safe when publishing. Please be aware of fraudulent messages requesting money in return for the publication of your paper. If you are publishing open access with Elsevier, bear in mind that we will never request payment before the paper has been accepted. We have prepared some guidelines (<https://www.elsevier.com/connect/authors-update/seven-top-tips-on-stopping-apc-scams>) that you may find helpful, including a short video on Identifying fake acceptance letters (<https://www.youtube.com/watch?v=o5l8thD9XtE>). Please remember that you can contact Elsevier's Researcher Support team (<https://service.elsevier.com/app/home/supporthub/publishing/>) at any time if you have questions about your manuscript, and you can log into Editorial Manager to check the status of your manuscript (https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/29155/c/10530/supporthub/publishing/kw/status/).

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. (Use the following URL: <https://www.editorialmanager.com/joe/login.asp?a=r>). Please contact the publication office if you have any questions.

Flávio Alves <flavioferreiraalves@gmail.com>
Para: Warley Oliveira <warleyosodonto@gmail.com>

31 de julho de 2023 às 21:58

Revisão Microbiota Apical Submetida

Flávio Rodrigues Ferreira Alves, DDS, MSc, PhD
Coordenador Geral do Programa de Pós-Graduação em Odontologia da UNIGRANRIO
Mestrado e Doutorado

(21)987730077 e whats app (21)987730077

[Curriculum](#) - [Face](#) - [Instagram](#)

[Texto das mensagens anteriores oculto]



Não contém vírus. www.avast.com

Apical root canal microbiome associated with primary or posttreatment apical periodontitis: a systematic review

José F. Siqueira Jr, PhD^{1,2}

Warley Oliveira Silva, MSc¹

Kaline Romeiro, PhD¹

Luciana Gominho, PhD³

Flávio R. F. Alves, PhD^{1,2}

Isabela N. Rôças, PhD^{1,2}

¹Postgraduate Program in Dentistry, University of Grande Rio (UNIGRANRIO), Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

²Department of Endodontics, Faculty of Dentistry, Iguaçu University (UNIG), Nova Iguaçu, RJ, Brazil.

³Department of Restorative Dentistry, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, PB, Brazil.

Running title: Apical Root Canal Microbiome

Author's address:

Flávio R. F. Alves, PhD
Rua Professor José de Souza Herdy, 1160
Duque de Caxias, RJ
Brazil 25071-202
e-mail: flavioferreiraalves@gmail.com

Acknowledgments

This study was supported by grants from Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brazilian Governmental Institutions.

The authors deny any conflicts of interest.

ABSTRACT

Introduction Microorganisms colonizing the apical root canal system are conceivably the ones directly involved with the causation and maintenance of apical periodontitis. This article systematically reviews the reports on the microbiome occurring exclusively at this region in teeth with primary and posttreatment apical periodontitis.

Methods The electronic databases PubMed, Embase, Web of Science, and Science Direct were searched up to May 2023 (PROSPERO: CRD42021275886). Clinical studies using culture and molecular microbiology methods to identify the microbial taxa present exclusively in the apical root canal segment of infected teeth with apical periodontitis were included. Studies were critically assessed using the Joanna Briggs Institute Critical Prevalence Assessment Checklist.

Results From 2277 articles initially detected, 52 were selected for full reading, and 21 were eventually included in this review. Of these, molecular methods were used in 19 and culture in 2 studies. Ten studies evaluated primary infections, 8 evaluated posttreatment infections, and 3 included both. Cryopulverization of the apical root specimens was conducted in 11 studies. Overall, the most frequent/abundant taxa found in the apical canal of primary infections were *Pseudoramibacter alactolyticus*, *Olsenella uli*, *Fusobacterium* species, *Streptococcus* species, *Porphyromonas endodontalis*, *Prevotella* species, *Actinomyces* species, *Parvimonas micra*, *Treponema denticola*, and an as-yet uncharacterized taxon. In posttreatment infections, the most prevalent/abundant taxa included species of *Streptococcus*, *Enterococcus*, *Fusobacterium*, *Actinomyces*, *Pseudoramibacter*, *Pseudomonas* and *Propionibacterium*. At the phylum level, *Firmicutes* was the most represented. The average apical bacterial load ranged from 10^5 to 10^6 in primary infections and from 10^3 to 10^4 in posttreatment infections.

Conclusion There is a pronounced bacterial diversity in the infected apical canal, with a high interindividual variability. Different microbiome compositions at the species/genus level are observed according to the infection type.

Key-words: apical root canal system; microbiome; primary apical periodontitis; posttreatment apical periodontitis

INTRODUCTION

Apical periodontitis is an inflammatory disease in response to microbial infection of the root canal system ¹. Given the proximity and direct access to the periradicular tissues, bacteria located in the apical segment of the root canal can be regarded as the main culprits of apical periodontitis ². Bacteria have been reported to build biofilm communities in the apical canal segment in the large majority of cases of primary and posttreatment apical periodontitis, with higher prevalences in teeth with large lesions (>5 mm in diameter on radiographs) and those diagnosed as apical cysts ³. In teeth with posttreatment apical periodontitis, persistent bacterial infection has been found in the apical canal in virtually all cases ⁴. This strongly suggests a role in the failure of the root canal treatment.

As a consequence, the apical region of the root canal system can be considered as a critical territory ⁵. Bacteria in this area can derive nutrients from the tissue fluids and inflammatory exudate that seep into the canal via apical foramen and ramifications ². In addition, they establish a close interaction with the host cells and tissues that will invariably result in inflammation and accumulation of the host defenses around the portal of exit of bacteria to the periradicular tissues ^{6,7}. Given their association with persistent disease ⁴, this is also a critical area for disinfection, cleaning, shaping and filling.

Since the introduction of sophisticated molecular methods in endodontic microbiology studies, there has been a significant refinement and expansion in the list of candidate pathogens associated with apical periodontitis ⁸. Curiously, despite these advances, only a limited number of studies have focused on bacterial identification exclusively in the apical part of the canal system. This may be mostly related to technological difficulties in effectively sampling this specific area ⁹.

Because bacteria located in the apical canal system are allegedly the most important associated with the pathogenesis and maintenance of apical periodontitis, it becomes imperative to determine the main taxa involved. Therefore, this study aimed to systematically review the reports on the microbiome present in the apical root canal segment of infected teeth with primary and posttreatment apical periodontitis.

MATERIALS AND METHODS

Protocol and registration

This systematic review followed the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) guidelines¹⁰. The protocol was registered in the International Prospective Record of Systematic Reviews (PROSPERO: CRD42021275886).

Focused question

The question that guided this study was formulated using the PECO (population, exposure, comparison, outcome) strategy: what is the microbiome present in the apical root canal segment of teeth with primary or posttreatment apical periodontitis? Thus, the outcome of the research question (O) was to identify the microbial taxa of the apical root canal in infected teeth. The sample (P) was apical root segments (derived from periradicular surgery or extraction) from adult patients, and the exposition (E) was primary or posttreatment apical periodontitis. The comparative group (C) was not applicable.

Eligibility criteria

Cross-sectional clinical studies were included, which investigated the microbiome of the apical segment of the root canal in teeth with primary or posttreatment infections using molecular and/or culture methods. Samples consisted of resected root apices from extracted teeth or obtained by periradicular surgery. The exclusion criteria included studies that did not specify the sampled root canal segment and those evaluating the extraradicular microbiome associated with pus samples or lesion specimens.

Search strategy and selection of articles

This review was conducted in the following databases: Medline via PubMed (www.pubmed.gov), Web of Sciences (<http://www.isiknowledge.com>), Science Direct (www.sciencedirect.com), and Embase (<https://www.embase.com>) (Supplementary table). Searches included only studies published in English up to May 22, 2023.

Three independent reviewers performed the electronic searches. Articles found in the databases were exported to Rayyan (<https://www.rayyan.ai>) for management and to eliminate duplicates. Before the article selection process, calibration of the reviewers was performed

with a sample of 20 articles retrieved from the databases using the search strategy. Titles and abstracts were analyzed for the screening of articles based on the eligibility criteria. The pre-selected articles from the screening process underwent full-text analysis.

Data extraction

The following data were extracted from the articles included in the present review: author(s), year of publication, country of origin, sample type (obtained by periradicular surgery or extraction), infection/lesion type (primary or posttreatment), identification method (culture or molecular), identified microorganisms, and limitations.

Risk of bias

Two reviewers performed independent analyses of the methodological quality of the eligible studies. A third reviewer decided on the discordant cases. The Joanna Briggs Institute (JBI) checklist for cross-sectional studies was applied to evaluate the risk of bias. Each of the eight JBI questions was answered with 'Yes', 'No', 'Unclear', or 'Not applicable'. A score of one point was given for each 'Yes' answer, while a score of zero was assigned for 'No' or 'Unclear' responses. Overall scores for each paper were calculated as percentages, and the quality was rated as high (80–100%), fair (50–79%), or low (< 50%).

RESULTS

Type of infection and sampling method

Initially, 2277 articles were identified, of which 727 were duplicates and were removed. Of the 1550 articles that went through the stage of title and abstract selection, 52 remained for complete reading and analysis. The final sample consisted of 21 studies (Figure 1). Ten studies investigated only primary infections ¹¹⁻²⁰, 8 only posttreatment infections ²¹⁻²⁸, and 3 included both types ²⁹⁻³¹.

Regarding the methods used for bacterial detection and identification, 2 studies used culture, while the other 19 studies used culture-independent molecular microbiology methods. The characteristics of these studies are listed in Tables 1, 2,

and 3. The countries with more publications were Brazil, China, and the United States (Figure 2).

All included studies evaluated root apex specimens obtained either from extracted teeth or after root-end resection during periradicular surgery. Extracted teeth were used in 13 studies, with the length of the apical segment varying from 2 to 7 mm. Apical segments obtained by periradicular surgery were used in 8 studies, with the apical root segment ranging from 2 to 5 mm in length. For sample processing, cryopulverization was employed in 11 studies ^{14-17,19,23-25,27,28,31}. In one study, the root apex specimens were triturated using orthodontic pliers ²⁶. As for the other studies, 5 used endodontic files and paper points ^{11,13,18,20,29} and 2 studies used only endodontic files ^{12,30} to take samples from the root canal in the resected apical root segment; in the other 2, samples were obtained by agitation and centrifugation of the root specimens ^{21,22}.

Closed-ended molecular methods

Closed-ended methods are intended to identify targeted microbial species or groups. Table 1 shows the studies that used closed-ended molecular methods for the analyses of the apical microbiome; 3 in posttreatment and 6 in primary infections. The number of samples that were positive for bacteria ranged from 12 to 38 in primary infections and from 21 to 36 in posttreatment infections. Among the studies using molecular methods, the reverse-capture checkerboard DNA-DNA hybridization was used in 3 and the nested polymerase chain reaction (PCR) in 1 study evaluating primary infections; real-time PCR was used in 3 studies of posttreatment infection and in 1 study of primary infection (Figure 3).

In primary infections, *Pseudoramibacter alactolyticus* was one of the most prevalent species-level taxon, with frequencies ranging from 6% to 44% ^{13,18-20}. *Olsenella uli* was found in primary infections in 3 studies, with prevalence varying from 10.5% to 76.5% ^{13,14,18}. *Fusobacterium* species, especially *F. nucleatum*, were found in 7 closed-ended studies, 5 from

primary (range, 8%-53%) and 2 from posttreatment infections (range, 14%-73.3%)^{13,14,18-20,23,26}. *Streptococcus* species were detected in 5 studies, 3 in primary (range, 21%-35%) and 2 in posttreatment infections (range, 76%-91.6%)^{13,18,19,23}. *Actinobacteria* species were always detected in high prevalences: 2 studies of posttreatment infection (52%-97%)^{23,27} and in 1 of primary infection (53%)¹⁹. Other relatively frequent taxa included *Porphyromonas endodontalis*, black-pigmented *Prevotella* species, *Treponema denticola*, and an as-yet uncultivated/uncharacterized taxon *Bacteroidaceae* [G-1] bacterium HMT 272 (also Bacteroidetes oral clone X083).

Open-ended molecular methods from 1st and 3rd generations

Open-ended methods are intended to identify all microbial taxa, or at least the most dominant ones, in a given sample. These methods comprise the 1st (culture), 3rd (PCR-cloning-Sanger sequencing, PCR-DGGE) and 5th (NGS, see next section) generations of endodontic microbiology studies³². Table 2 shows studies that used open-ended methods, 1 that evaluated only primary infections by culture and 3 others using molecular methods to evaluate posttreatment infections (2 studies) and both primary and posttreatment infections (1 study). The number of samples ranged from 10 to 18 per study of primary infections and from 8 to 34 in posttreatment infections.

In primary infections, the most prevalent taxa were *F. nucleatum*, *P. endodontalis*, *Prevotella* species, *Peptostreptococcus anaerobius*, Synergistetes and *Actinomyces* species, and *Veillonella parvula* (all above 50% of the cases)^{11,29}. In posttreatment infections, the most prevalent taxa were *F. nucleatum*, *Anaeroglobus geminatus*, *Pseudomonas* species, *Actinomyces* species, *Propionibacterium* species, and *Burkholderiales* species, each being found in more than 50% of the cases^{21,22,29}.

Next-generation sequencing (NGS)

The studies using massively parallel NGS technologies are grouped in Table 3. The number of samples evaluated ranged from 10 to 23 in cases of primary infection and 8 to 22 in posttreatment infection.

In primary infections, the most abundant phyla detected in the apical canal included Firmicutes (25% – 48%)^{15,16,30}, Proteobacteria (2.4% – 43%)^{15,30,31}, Actinobacteria (5% – 30%)

^{15,16,30,31}, Bacteroidetes (9% – 26.6%) ^{15,16,30,31}, Fusobacteria (4.2%-16%) ^{30,31}, and Synergistetes (9.9%) ³⁰. One study did not report on phyla abundance ¹⁷. In posttreatment infections, the most abundant phyla were Firmicutes (18% – 48.4%) ^{24,25,28,30,31}, Proteobacteria (4.8% – 46%) ^{24,25,28,30,31}, Actinobacteria (8% – 23.4%) ^{24,25,30,31}, Bacteroidetes (9.5% – 19%) ^{24,28,30,31}, and Fusobacteria (5.6% – 15%) ^{24,25,28,30,31}. Richness of the detected phyla are shown in Table 3.

At the genus level, the following were more abundant in the apical canal of primary infections: *Fusobacterium* (2% – 15%) ^{15-17,30}, *Lactobacillus* (11.2% – 14.3%) ^{16,17}, *Prevotella* (5.6% – 12.7%) ^{16,17}, *Actinomyces* (7.5% – 11.9%) ^{16,17}, *Streptococcus* (4.4% – 8.4%) ^{16,17}, *Parvimonas* (3.4% – 8%) ^{16,30}, *Pseudoramibacter* (3% – 8%) ^{15,16}, *Pyramidobacter* (2.9% – 6.3%) ^{17,30}, and *Porphyromonas* (2.7% – 5.6%) ^{17,30}. As for posttreatment infections, the following were the most abundant genera: *Enterococcus* (2.4% – 18.8%) ^{25,28,30}, *Fusobacterium* (5.2% – 16%) ^{24,25,28,30}, *Streptococcus* (3.4% – 12%) ^{24,28,30}, *Actinomyces* (2.3% – 4%) ^{24,30}, and *Pseudoramibacter* (2.8% – 3.5%) ^{25,30}. Genus richness is depicted in Table 3.

Fungi were detected in the apical canal segment with primary endodontic infection in one study ¹⁷, containing 5 ± 2 OTUs (range 2-8) per sample. *Candida* and *Malassezia* were the taxa found.

Number of taxa per apical canal

Data from closed-ended analysis showed a range of 1 to 25 distinct taxa per apical canal. However, this information is biased and limited to the number of taxa targeted in each study. Open-ended analysis in turn using culture revealed 4 to 6 species per canal, while PCR-DGGE showed 9 to 26, and NGS studies found 13 to 184 species-level taxa; excluding a study with too discrepant findings (235 to 654 taxa/canal) ²⁴.

Bacterial load in the apical canal

Only 4 studies quantified the total bacterial cells present in the apical canal segment. Of these, 2 used culture to evaluate primary infections: Dougherty et al. ¹² reported a mean 3.89×10^5 bacterial cells per canal (range, 2×10^1 – 4.2×10^6), while Baumgartner and Falkler ¹¹ found 1.08×10^6 cells/canal (range, 5.4×10^4 – 4.3×10^6). The other 2 studies used molecular methods and evaluated posttreatment infections: Siqueira et al. ²⁷ reported a mean

1.82×10^3 cell equivalents/canal (range, $1.53 \times 10^2 - 1.18 \times 10^4$) and Antunes et al.²³ found 5.7×10^4 (range, $4 \times 10^1 - 3.7 \times 10^5$)

Risk of bias

Regarding the risk of bias, the included studies were rated as fair quality (score 50-70%), and among the 21 studies, all were rated as 'moderate risk'. A summary of the quality appraisal ratings of each study is presented in Table 4. No manuscript was rejected based on the quality appraisal, suggesting that despite the moderate risk of bias, the studies still provided valuable and relevant data for a systematic review.

DISCUSSION

Knowledge about the microbial populations colonizing the apical portion of necrotic root canals of teeth with apical periodontitis is of utmost importance because this is regarded as a critical zone for infection control. Bacteria located in the apical segment of the canal system are conceivably the ones directly involved with disease pathogenesis and those remaining in this area after treatment have the potential to sustain periapical inflammation^{4,5}. The apical canal third contains the most significant anatomical challenges compared to the middle and coronal portions, including a large number of ramifications³³. The present systematic review evaluated the bacterial diversity in the apical portion of the root canal system, compiling data from primary and posttreatment infections. Rigorous inclusion criteria were applied in the study selection, and the risk of bias was consistently rated as 'moderate' for all the included studies. One limitation was the heterogeneity of the studies, particularly in terms of sample taking and microbial identification procedures, which precluded a meta-analysis.

According to this review, there are not many studies that have specifically focused on investigating the apical microbiome of the root canal system. This is highly likely to be due to the methodological difficulties in obtaining samples exclusively from the apical segment of the canal during treatment⁹. Because the methods used for taking samples from the root canals of teeth undergoing treatment or retreatment cannot distinguish the exact region sampled, the most feasible approach is to resect

the apical segment of extracted teeth or teeth subjected to periradicular surgery. While the former permits the study of the apical microbiome in primary and posttreatment apical periodontitis, the latter is typically used to evaluate cases of posttreatment disease. All the studies included in this review used one or the other sample source. The length of the apical segments ranged from 2 to 7 mm, which precludes us to accurately refer to them as the “apical third”.

Once the root apex is resected, samples from the main root canal can be obtained by burs, paper points and/or files ^{11-13,20} or agitation and/or centrifugation ^{21,22}. However, these methods cannot predictably retrieve microbial cells entrapped in the intricate anatomy of the root canal system ¹³. To address these limitations, Alves et al. ³⁴ proposed the use of cryogenic grinding (cryopulverization) as an alternative approach. Since then, several studies have adopted this methodology ^{14-17,19,23-25,27,28,31}. In 11 of the selected studies, cryopulverization was used to process the root apices. An important limitation of cryopulverization, however, is that it is a destructive approach, which does not allow for longitudinal analyses of samples taken in different time periods ⁹.

Of the studies included in this review, 19 used molecular methods in either closed- or open-ended strategies for microbial identification, while 2 studies relied on culture, one for closed-ended and the other for open-ended identification. Molecular methods are usually more sensitive and some can be even more specific than culture, allowing the detection of difficult-to-grow and even uncultivable microorganisms ³⁵. Although the use of open-ended analyses is essential to detect the most dominant taxa in the sample and provide information on the overall community members, closed-ended approaches are generally more sensitive to detect the target taxa, thus offering valuable information about their prevalence. ^{9,35}.

While only one study reported on detection of fungi in the apical canal of teeth with primary infection, most studies evaluated the prevalence and diversity of bacteria. A high interindividual variability in the composition of the apical microbioma was reported in all studies using bacterial community profiling methods such as DGGE and NGS ^{15,16,22,25,29,34}. This agrees with other studies evaluating the microbioma of the entire canal using the conventional paper

point sampling ³⁶⁻⁴⁰, and supports the concept that apical periodontitis is a disease with heterogeneous etiology ⁴¹. Only a few studies compared the composition of the apical microbiome with that found in the most coronal segments of the canal, with the results showing a significant difference ^{14,16,34}.

Data evaluating the apical microbiome revealed *Firmicutes* was the most represented/abundant phylum followed by *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, and *Fusobacteria*. At lower taxonomic hierarchies, the most frequent/abundant taxa in teeth with primary infections were *Pseudoramibacter alactolyticus*, *Olsenella uli*, *Fusobacterium* species, *Streptococcus* species, *Porphyromonas endodontalis*, *Prevotella* species, *Actinomyces* species, *Parvimonas micra*, *Treponema denticola*, *Synergistetes* species, and an as-yet uncharacterized taxon *Bacteroidaceae* [G-1] bacterium HMT 272 (clone X083). As for species-level taxa, those present in more than 20% of the cases of primary infections included *F. nucleatum* (4 studies), *P. alactolyticus* (3 studies), clone HMT 272 and *P. endodontalis* (2 studies). Other 12 species were found in >20% prevalence in 1 study each. In teeth with posttreatment infections, the most prevalent/abundant taxa occurring in the apical canal included species of *Streptococcus*, *Enterococcus*, *Fusobacterium*, *Actinomyces*, *Pseudoramibacter*, *Pseudomonas* and *Propionibacterium*. The species-level taxa found in more than 20% of the teeth with posttreatment disease included *F. nucleatum* (2 studies), and 7 species in one study. *E. faecalis* was present in more than 20% of the specimens in one study of primary and another one of posttreatment infection. All these most prevalent/abundant taxa found in the apical canal have also been reported to be amongst the common member of the endodontic microbiome when samples from the entire length of the main canal were evaluated ^{42,43}. The present results strengthen their association with apical periodontitis and reinforce their status as candidate endodontic pathogens.

Another critical aspect is how many species-level bacteria compose the apical microbiome (species richness). For this, data from open-ended studies are the most accurate. In primary infections, a culture-based study reported a mean of 5 species/apical canal (range, 4-6) ¹¹. Two PCR-DGGE analyses of apical specimens were published: one revealed a mean 28 species/apical canal (range, 18-48)³⁴, while the other found a mean 33 species (range, 16-

50)²⁹. Open-ended studies from the 5th generation (NGS) are particularly effective in detecting low abundance species-level bacteria, resulting in increased richness values. Three studies evaluated primary infections and reported the following mean numbers of species-level taxa in the apical canal: 37 (range, 13-80)¹⁵; 44 (range, 13-111)¹⁶; and 87 (46-184)¹⁷. Only two studies, both using NGS, reported on the species richness in the apical canal of teeth with posttreatment disease; one reported a mean 116 species-level taxa/ canal (range, 86-146)²⁵; and the other found 418 species-level taxa (range, 235-654). It is worth pointing out that the latter study reported exceptionally discrepant findings, which could potentially be an outlier and may require further investigation.

Development of an infectious disease is related not only to the type and number of species, but also the counts of individual bacterial cells present (infectious load). Obviously, the bacterial counts in the apical canal represent only a fraction of the overall counts in the full canal, which may range from 10^3 to 10^8 in primary infections, and from 10^3 to 10^7 in posttreatment infections⁴⁴. Only a few studies have quantified the total bacterial cells in the apical root canal segment and they reported an average apical bacterial load ranging from 10^5 to 10^6 in primary infections and from 10^3 to 10^4 in posttreatment infections.

In conclusion, findings from this systematic review revealed a significant diversity of bacterial taxa in the apical segment of infected root canals, which was more complex than anticipated. There was a high interindividual composition in the apical microbiome. Differences in the prevalence order of the detected taxa were verified among the studies and are possibly related to the specificity/sensitivity of the detection methods for both primary and posttreatment infections. While no significant variability at the phylum level was observed in both infection types, differences were evident at the species/genus level. Further studies are required to provide more details of the microbiome present in the apical canal of teeth with different types of apical periodontitis, its association with clinical and radiographic features, as well as its response to antimicrobial intracanal procedures.

REFERENCES

1. Ørstavik D. Apical periodontitis: microbial infection and host responses. In: Ørstavik D, editor. *Essential endodontology*. 2nd ed. Oxford, UK: Wiley Blackwell; 2020. p. 1-10.
2. Siqueira JF, Jr, Rôças IN. *Treatment of endodontic infections*. 2nd ed. London: Quintessence Publishing; 2022.
3. Ricucci D, Siqueira JF, Jr. Biofilms and apical periodontitis: study of prevalence and association with clinical and histopathologic findings. *J Endod* 2010;36:1277-1288.
4. Ricucci D, Siqueira JF, Jr., Bate AL, Pitt Ford TR. Histologic investigation of root canal-treated teeth with apical periodontitis: a retrospective study from twenty-four patients. *J Endod* 2009;35:493-502.
5. Simon JH. The apex: how critical is it? *General Dentistry* 1994;42:330–334.
6. Ricucci D, Pascon EA, Ford TR, Langeland K. Epithelium and bacteria in periapical lesions. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2006;101:239-249.
7. Cavalla F, Letra A, Silva RM, Garlet GP. Determinants of Periodontal/Periapical Lesion Stability and Progression. *J Dent Res* 2021;100:29-36.
8. Siqueira JF, Jr, Rôças IN. Exploiting molecular methods to explore endodontic infections: Part 2-redefining the endodontic microbiota. *J Endod* 2005;31:488-498.
9. Siqueira JF, Jr., Rôças IN. A critical analysis of research methods and experimental models to study the root canal microbiome. *Int Endod J* 2022;55 Suppl 1:46-71.
10. Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, Group P. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *International journal of surgery* 2010;8:336-341.
11. Baumgartner JC, Falkler WA, Jr. Bacteria in the apical 5 mm of infected root canals. *J Endod* 1991;17:380-383.
12. Dougherty WJ, Bae KS, Watkins BJ, Baumgartner JC. Black-pigmented bacteria in coronal and apical segments of infected root canals. *J Endod* 1998;24:356-358.
13. Siqueira JF, Jr., Rôças IN, Alves FR, Silva MG. Bacteria in the apical root canal of teeth with primary apical periodontitis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2009;107:721-726.

14. Rôças IN, Alves FR, Santos AL, Rosado AS, Siqueira JF, Jr. Apical root canal microbiota as determined by reverse-capture checkerboard analysis of cryogenically ground root samples from teeth with apical periodontitis. *J Endod* 2010;36:1617-1621.
15. Siqueira JF, Jr., Alves FR, Rôças IN. Pyrosequencing analysis of the apical root canal microbiota. *J Endod* 2011;37:1499-1503.
16. Ozok AR, Persoon IF, Huse SM, Keijser BJ, Wesselink PR, Crielaard W, et al. Ecology of the microbiome of the infected root canal system: a comparison between apical and coronal root segments. *Int Endod J* 2012;45:530-541.
17. Persoon IF, Buijs MJ, Ozok AR, Crielaard W, Krom BP, Zaura E, et al. The mycobiome of root canal infections is correlated to the bacteriome. *Clin Oral Investig* 2017;21:1871-1881.
18. Tatikonda A, Sudheep N, Biswas KP, Gowtham K, Pujari S, Singh P. Evaluation of Bacteriological Profile in the Apical Root Segment of the Patients with Primary Apical Periodontitis. *J Contemp Dent Pract* 2017;18:44-48.
19. Takahama A, Jr., Rôças IN, Faustino ISP, Alves FRF, Azevedo RS, Gomes CC, et al. Association between bacteria occurring in the apical canal system and expression of bone-resorbing mediators and matrix metalloproteinases in apical periodontitis. *Int Endod J* 2018;51:738-746.
20. Siqueira JF, Jr, Rôças IN, Alves FR, Santos KR. Selected endodontic pathogens in the apical third of infected root canals: a molecular investigation. *J Endod* 2004;30:638-643.
21. Subramanian K, Mickel AK. Molecular analysis of persistent periradicular lesions and root ends reveals a diverse microbial profile. *J Endod* 2009;35:950-957.
22. Wang J, Jiang Y, Chen W, Zhu C, Liang J. Bacterial flora and extraradicular biofilm associated with the apical segment of teeth with post-treatment apical periodontitis. *J Endod* 2012;38:954-959.
23. Antunes HS, Rôças IN, Alves FR, Siqueira JF, Jr. Total and specific bacterial levels in the apical root canal system of teeth with post-treatment apical periodontitis. *J Endod* 2015;41:1037-1042.
24. Ping Y, Wang J, Liang J. Pyrosequencing analysis of apical microbiota of teeth with persistent apical periodontitis. *Journal of Dental Sciences* 2015;10:6.

25. Siqueira JF, Jr., Antunes HS, Rôças IN, Rachid CT, Alves FR. Microbiome in the apical root canal system of teeth with post-treatment apical periodontitis. *PLoS One* 2016;11:e0162887.
26. Pereira RS, Rodrigues VAA, Furtado WT, Gueiros S, Pereira GS, Avila-Campos MJ. Microbial analysis of root canal and periradicular lesion associated to teeth with endodontic failure. *Anaerobe* 2017;48:12-18.
27. Siqueira JF, Jr., Antunes HS, Perez AR, Alves FRF, Mdala I, Silva E, et al. The apical root canal system of teeth with posttreatment apical periodontitis: correlating microbiologic, tomographic, and histopathologic findings. *J Endod* 2020;46:1195-1203.
28. Perez-Carrasco V, Uroz-Torres D, Soriano M, Solana C, Ruiz-Linares M, Garcia-Salcedo JA, et al. Microbiome in paired root apices and periapical lesions and its association with clinical signs in persistent apical periodontitis using next-generation sequencing. *Int Endod J* 2023;56:622-636.
29. Chugal N, Wang JK, Wang R, He X, Kang M, Li J, et al. Molecular characterization of the microbial flora residing at the apical portion of infected root canals of human teeth. *J Endod* 2011;37:1359-1364.
30. Bouillaguet S, Manoil D, Girard M, Louis J, Gaia N, Leo S, et al. Root microbiota in primary and secondary apical periodontitis. *Front Microbiol* 2018;9:2374.
31. Qian W, Ma T, Ye M, Li Z, Liu Y, Hao P. Microbiota in the apical root canal system of tooth with apical periodontitis. *BMC Genomics* 2019;20:189.
32. Siqueira JF, Jr, Rôças IN. Present status and future directions in endodontic microbiology. *Endod Topics* 2014;30:3-22.
33. Ricucci D, Siqueira JF, Jr. Fate of the tissue in lateral canals and apical ramifications in response to pathologic conditions and treatment procedures. *J Endod* 2010;36:1-15.
34. Alves FR, Siqueira JF, Jr., Carmo FL, Santos AL, Peixoto RS, Rôças IN, et al. Bacterial community profiling of cryogenically ground samples from the apical and coronal root segments of teeth with apical periodontitis. *J Endod* 2009;35:486-492.
35. Siqueira JF, Jr, Rôças IN. Exploiting molecular methods to explore endodontic infections: Part 1-current molecular technologies for microbiological diagnosis. *J Endod* 2005;31:411-423.

36. Siqueira JF, Jr., Rôças IN, Debelian GJ, Carmo FL, Paiva SS, Alves FR, et al. Profiling of root canal bacterial communities associated with chronic apical periodontitis from Brazilian and Norwegian subjects. *J Endod* 2008;34:1457-1461.
37. Rôças IN, Siqueira JF, Jr, Aboim MC, Rosado AS. Denaturing gradient gel electrophoresis analysis of bacterial communities associated with failed endodontic treatment. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2004;98:741-749.
38. Siqueira JF, Jr, Rôças IN, Rosado AS. Investigation of bacterial communities associated with asymptomatic and symptomatic endodontic infections by denaturing gradient gel electrophoresis fingerprinting approach. *Oral Microbiol Immunol* 2004;19:363-370.
39. Kruly PC, Alenezi H, Manogue M, Devine DA, Dame-Teixeira N, Garcia FCP, et al. Residual Bacteriome after Chemomechanical Preparation of Root Canals in Primary and Secondary Infections. *J Endod* 2022;48:855-863.
40. Zandi H, Kristoffersen AK, Ørstavik D, Rôças IN, Siqueira JF, Jr, Enersen M. Microbial analysis of endodontic infections in root-filled teeth with apical periodontitis before and after irrigation using pyrosequencing. *J Endod* 2018;44:372-378.
41. Siqueira JF, Jr, Rôças IN. Community as the unit of pathogenicity: an emerging concept as to the microbial pathogenesis of apical periodontitis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2009;107:870-878.
42. Siqueira JF, Jr., Rôças IN. Diversity of endodontic microbiota revisited. *J Dent Res* 2009;88:969-981.
43. Manoil D, Al-Manei K, Belibasakis GN. A Systematic Review of the Root Canal Microbiota Associated with Apical Periodontitis: Lessons from Next-Generation Sequencing. *Proteomics Clin Appl* 2020;14:e1900060.
44. Siqueira JF, Jr., Rôças IN. Present status and future directions: Microbiology of endodontic infections. *Int Endod J* 2022;55 Suppl 3:512-530.

FIGURE LEGENDS

Figure 1. Flowchart illustrating the screening and article selection approaches.

Figure 2. Publications by country.

Figure 3. Methods used to identify microorganisms according to the study.

CLINICAL RELEVANCE

The study emphasizes the importance of understanding the bacterial diversity in the apical segment of infected root canals, which plays a critical role in the pathogenesis and persistence of apical periodontitis. This knowledge can guide effective infection control strategies.

Table 1. Closed-ended studies to evaluate the apical microbiota

Reference	N (sample)	N (samples positive for bacteria)	Sample type	Apical fragment length	Identification method	Infection type	Most prevalent taxa	Mean no. species-level taxa/canal (range)
Dougherty et al., 1998	18	12	Extracted teeth	7 mm	Culture	Primary infection	Black-pigmented bacteria (67%) <i>Prevotella nigrescens</i> (50%) <i>Prevotella melaninogenica</i> (16.6%) <i>Porphyromonas gingivalis</i> (5.5%) <i>Prevotella intermedia</i> (5.5%)	Not reported
Siqueira et al., 2004	23	17	Extracted teeth	5 mm	Nested PCR	Primary infection	<i>Pseudoramibacter alactolyticus</i> (44%) <i>Treponema denticola</i> (26%) <i>Fusobacterium nucleatum</i> (26%) <i>Porphyromonas endodontalis</i> (17%) <i>Filifactor alocis</i> (9%) <i>Dialister pneumosintes</i> (4%) <i>Porphyromonas gingivalis</i> (4%) <i>Tannerella forsythensis</i> (4%)	Not reported
Siqueira et al., 2009	20	19	Extracted teeth	5 mm	Checkerboard	Primary infection	<i>Pseudoramibacter alactolyticus</i> (32%) <i>Bacteroidetes</i> clone oral X083 (26%) <i>Streptococcus</i> species (21%) <i>Olsenella uli</i> (10.5%) <i>Synergistetes</i> oral clone BA121 (10.5%) <i>Fusobacterium nucleatum</i> (10.5%) <i>Porphyromonas endodontalis</i> (10.5%) <i>Dialister</i> clone oral BS016 (5%) <i>Parvimonas micra</i> (5%) <i>Treponema denticola</i> (5%) <i>Filifactor alocis</i> (5%)	Ranged 1–6
Rôças et al., 2010	17	17	Extracted teeth	4-6 mm	Checkerboard	Primary infection	<i>Olsenella uli</i> (76.5%) <i>Prevotella baroniae</i> (71%) <i>Porphyromonas endodontalis</i> (65%) <i>Fusobacterium nucleatum</i> (53%) <i>Tannerella forsythia</i> (47%)	8 (1–25)
Antunes et al., 2015	27	21	Root-end resection	3-5 mm	Real-time PCR	Posttreatment infection	<i>Streptococcus</i> species (76%) <i>Actinobacteria</i> species (52%) <i>Pseudoramibacter alactolyticus</i> (19%) <i>Enterococcus faecalis</i> (14%) <i>Fusobacterium</i> species (14%) <i>Parvimonas micra</i> (14%)	Not reported
Pereira et al., 2017	30	30	Root-end resection	3 mm	Real-time PCR	Posttreatment infection	<i>Dialister pneumosintes</i> (73.3%) <i>Fusobacterium nucleatum</i> (73.3%)	4 (1-8)

							<i>Tannerella forsythia</i> (53.3%) <i>Aggregatibacter actinomycetemcomitans</i> (23.3%) <i>Porphyromonas gingivalis</i> (16.6%) <i>Prevotella intermedia</i> (13.3%) <i>Treponema denticola</i> (13.3%) <i>Porphyromonas endodontalis</i> (10%) <i>Prevotella nigrescens</i> (3.3%)	
Tatikonda et al., 2017	40	38	Extracted teeth	5-6 mm	Checkboard	Primary infection	<i>Pseudoramibacter alactolyticus</i> (32%) <i>Bacteroidetes</i> clone X083 (26%) <i>Streptococcus</i> species (21%) <i>Olsenella uli</i> (10.5%) <i>Synergistetes</i> clone BA121 (8%) <i>Fusobacterium nucleatum</i> (8%) <i>Porphyromonas endodontalis</i> (8%)	Not reported
Takahama et al., 2018	17	17	Extracted teeth	5 mm	Real-time PCR	Primary infection	<i>Actinobacteria</i> species (53%) <i>Streptococcus</i> species (35%) <i>Fusobacterium</i> species (18%) <i>Parvimonas micra</i> (18%) <i>Porphyromonas endodontalis</i> (12%) <i>Dialister</i> species (12%) <i>Pseudoramibacter alactolyticus</i> (6%) <i>Filifactor alocis</i> (6%)	Not reported
Siqueira et al., 2020	36	36	Root-end resection	3-5 mm	Real-time PCR	Posttreatment infection	<i>Actinobacteria</i> species (97%) <i>Streptococcus</i> species (91.6%) <i>Enterococcus faecalis</i> (19 %)	Not reported

Table 2. Open-ended studies from the first (culture) and third (molecular methods) generations to evaluate the apical microbiota

Reference	N (sample)	N (samples positive for bacteria)	Sample type	Apical fragment length	Identification method	Infection type	Most prevalent taxa	Mean no. species-level taxa/canal (range)
Baumgartner & Falkler, 1991	10	10	Extracted teeth	5 mm apical	Culture	Primary infection	<i>Prevotella intermedia</i> (50%) <i>Prevotella buccae</i> (50%) <i>Peptostreptococcus anaerobius</i> (50%) <i>Veillonella parvula</i> (50%) <i>Lactobacillus</i> species (40%) <i>Enterococcus faecalis</i> (40%) <i>Streptococcus mutans</i> (30%) <i>Fusobacterium nucleatum</i> (30%) <i>Actinomyces</i> species (20%) <i>Actinomyces naeslundii</i> (20%)	5 (4-6)
Subramanian et al., 2009	34	33	Root-end resection	2-3 mm	PCR, cloning and sequencing	Posttreatment infection	<i>Enterococcus faecalis</i> * (11.5%) <i>Burkholderia cepacia</i> * (8.8%) <i>Bifidobacterium dentium</i> * (4.8%) <i>Streptococcus gordonii</i> * (4.1%) <i>Campylobacter gracilis</i> * (3.8%) <i>Firmicutes</i> oral clone CK057* (3.3%) <i>Achromobacter xylosoxidans</i> * (3.0%)	Not reported
Chugal et al., 2011	26	26	Extracted teeth	5 mm	PCR-DGGE	Primary infection (n=18); Posttreatment infection (n=8)	Primary infection <i>Fusobacterium nucleatum</i> ssp. <i>animalis</i> (68%) <i>Fusobacterium nucleatum</i> ssp. <i>nucleatum</i> (68%) <i>Porphyromonas endodontalis</i> (57.8%) <i>Synergistetes</i> species (57.8%) <i>Actinomyces</i> species (57.8%) <i>Anaeroglobus geminatus</i> (47%) Posttreatment infection <i>Fusobacterium nucleatum</i> ssp. <i>nucleatum</i> (80%) <i>Fusobacterium nucleatum</i> ssp. <i>animalis</i> (70%) <i>Anaeroglobus geminatus</i> (50%) <i>Pseudomonas</i> species (50%) <i>Burkholderiales</i> species (50%) <i>Actinomyces</i> species (50%) <i>Enterococcus faecalis</i> (40%)	Primary infection 33 (16-50) Posttreatment infection 16 (9-26)

Wang et al., 2012	23	13 samples subjected to identification	Root-end resection	3 mm	PCR-DGGE	Posttreatment infection	<i>Propionibacterium</i> species (40%)	Not reported
							<i>Comamonadaceae</i> (30%)	
							<i>Actinomyces</i> oral clone EL030 (84.6%)	
							<i>Propionibacterium</i> oral clone HE018 (61.5%)	
							<i>Propionibacterium propionicus</i> (46.2%)	
							Uncultured clone ncd2794c06c1 (38.5%)	
							<i>Porphyromonas endodontalis</i> (30.8%)	
							<i>Capnocytophaga gingivalis</i> (15.4%)	
							<i>Dialister invisus</i> (23.1%)	
							<i>Pseudoramibacter alactolyticus</i> (23.1%)	
							<i>Bilophila wadsworthia</i> (15.4%)	
							<i>Firmicutes</i> oral clone CK057 (7.7%)	

*Data provided as abundance (% clones)
PCR, polymerase chain reaction
DGGE, denaturing gradient gel electrophoresis

Table 3. Next-Generation Sequencing (NGS) studies to evaluate the apical microbiota

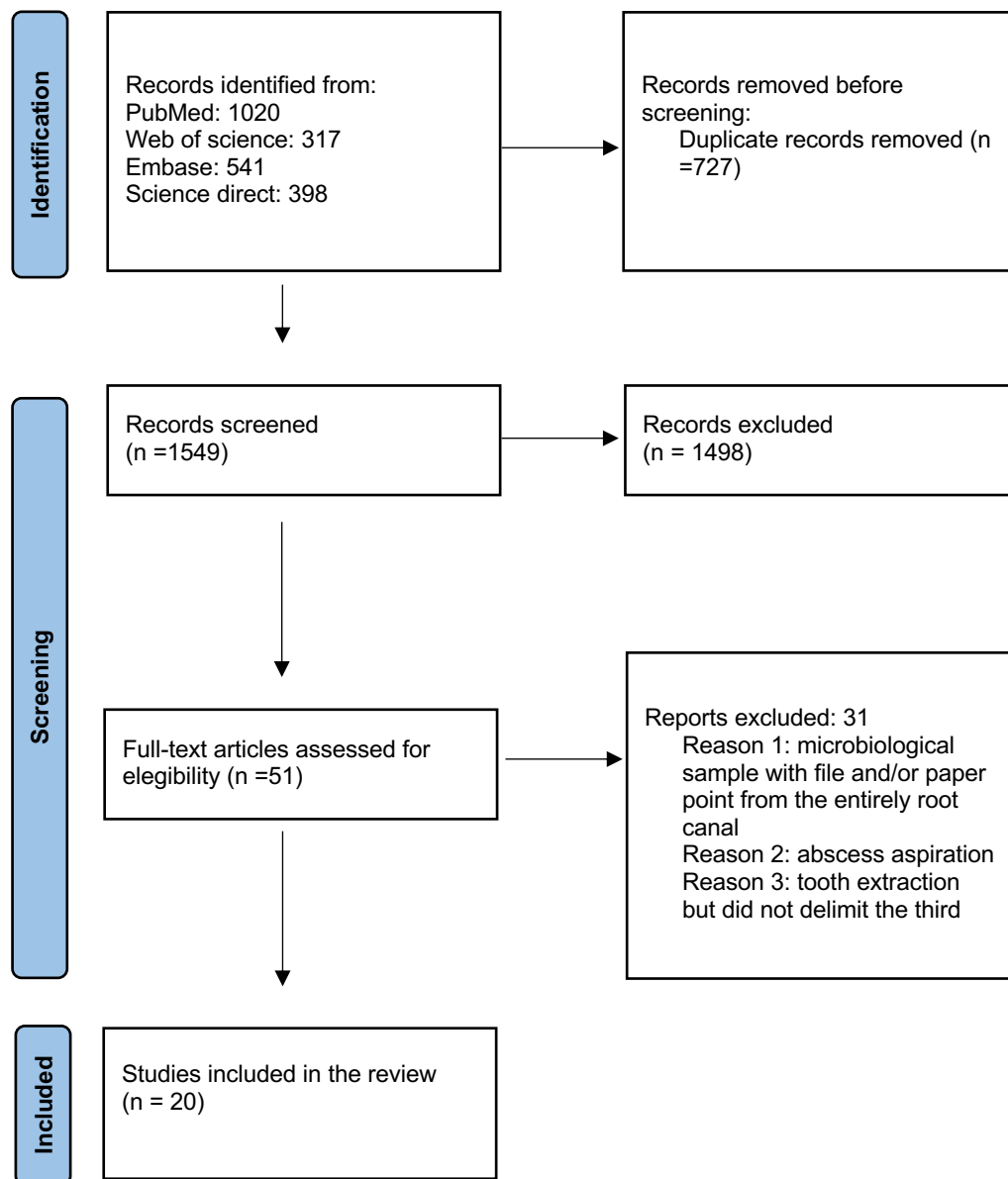
Reference	N (samples)	N (samples positive for bacteria)	NGS platform	Infection type	Mean no. species-level taxa/canal (range)	No. different phyla	Phylum (abundance)	Phylum (richness)	Genus (abundance)	Genus (richness)
Siqueira et al., 2011	10 extracted teeth (4-6 mm)	10	Pyrosequencing	Primary infection	37 (13-80)	10	Proteobacteria (43%) Firmicutes (25%) Fusobacteria (15%) Bacteroidetes (9%) Actinobacteria (5%)	Firmicutes (65) Proteobacteria (57) Bacteroidetes (20)	<i>Fusobacterium</i> (15%) <i>Pseudoramibacter</i> (8%) <i>Novosphingobium</i> (8%) <i>Ralstonia</i> (6%) <i>Bacteroides</i> (5%)	<i>Pseudomonas</i> (5) <i>Bacteroidetes</i> (4) <i>Bacillus</i> (4) <i>Atopobium</i> (3) <i>Eubacterium</i> (3) <i>Fusobacterium</i> (3) <i>Mogibacterium</i> (3) <i>Streptococcus</i> (3)
Ozok et al., 2012	23 extracted teeth (1/2 root)	23	Pyrosequencing	Primary infection	44 (13-111)	24	Firmicutes (48%) Actinobacteria (30%) Bacteroidetes (12%)	Not defined.	<i>Lactobacillus</i> (14.3%) <i>Actinomyces</i> (11.9%) <i>Streptococcus</i> (8.4%) <i>Actinobacteria</i> 6.9% <i>Prevotella</i> (6.1%) <i>Parvimonas</i> (3.4%) <i>Pseudoramibacter</i> (3%) Bacteroidales (2.7%) <i>Veillonella</i> (2.5%) <i>Fusobacterium</i> (2.0%) <i>Peptostreptococcus</i> (2.0%)	Not reported
Ping et al., 2015	20 root-end resection (3 mm)	20	Pyrosequencing	Posttreatment infection	418 (235-654)	20	Firmicutes (31%) Proteobacteria (23%) Bacteroidetes (19%) Fusobacteria (12%)	Firmicutes (564) Proteobacteria (428) Bacteroidetes (359) Actinobacteria (241)	<i>Streptococcus</i> (12%) <i>Burkholderia</i> (8%) <i>Prevotella</i> (7%) <i>Fusobacterium</i> (7%) <i>Veillonella</i> (5%) <i>Leptotrichia</i> (5%)	<i>Prevotella</i> (564) <i>Streptococcus</i> (104) <i>Actinomyces</i> (102) <i>Capnocytophaga</i> (76) <i>Burkholderia</i> (71)

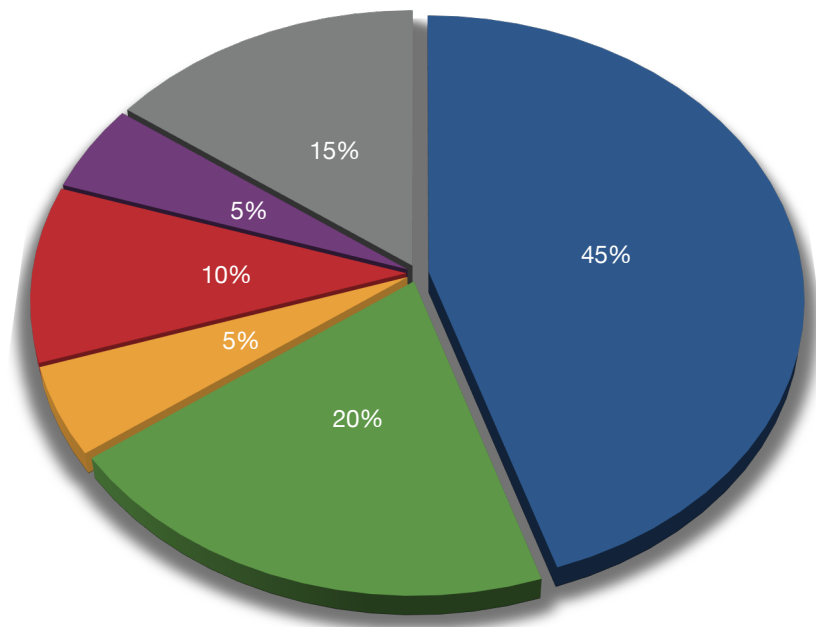
								Actinobacteria (10%) Synergistetes (2%) Spirochaetes (2%)	Fusobacteria (158)	Capnocytophaga (4%) Actinomyces (4%)	Fusobacterium (59) Leptotrichia (55) Veillonella (40)
Siqueira et al., 2016	10 root-end resection (3-5 mm)	10	Illumina MiSeq	Posttreatment infection	116 (86-146)	11	Proteobacteria (46%) Firmicutes (18%) Fusobacteria (15%) Actinobacteria (8%)	Proteobacteria (192) Firmicutes (137) Actinobacteria (53) Fusobacteria (51) Unclassified (41) Bacteroidetes (26) Synergistetes (21) Spirochaetes (9) Chloroflexi (4)	Fusobacterium (15.3%) Unclassified (14.4%) Pseudomonas (11%) Stenotrophomonas (5.2%) Rhodococcus (4.8%) Alcanivorax (4.2%) Rhizobium (4.0%) Pseudoramibacter (2.8%) Alcaligenes (2.7%) Pyramidobacter (2.5%) Enterococcus (2.4%)	Not reported	
Persoon et al., 2017	26 extracted teeth (1/2 root)	23	Illumina MiSeq	Primary infection	87 (46-184)	Not reported	Not reported	Not reported	Bacteriome Prevotella (12.7 %) Lactobacillus (11.2%) Actinomyces (7.5 %) Fusobacterium (7.2%) Atopobium (6.9 %) Streptococcus (4.4%) Leptotrichia (4.3 %) Phocaeicola (3.5 %) Pyramidobacter (2.9 %) Porphyromonas (2.7%) Mycobiome Candida (90.7%)	Not reported	

								Actinobacteria (11%) Fusobacteria (4.2%)			
								Posttreatment infection Proteobacteria: (28.7%) Firmicutes: (26.2%) Bacteroidetes (17.3%) Actinobacteria (13.6%) Fusobacteria (8.6%)			
Pérez- Carrasco al., 2023	et	38 root-end resection (segment length not reported)	21	Illumina Mi-Seq	Posttreatment infection	Not reported	21	Firmicutes (38%) Bacteroidetes (19%) Fusobacteria (14%) Proteobacteria (10%) Synergistetes (7%)	Not reported	<i>Fusobacterium</i> (16%) <i>Streptococcus</i> (7.6%) <i>Porphyromonas</i> (5.9%) <i>Enterococcus</i> (4.8%) <i>Pseudomonas</i> (4.7%)	Not reported

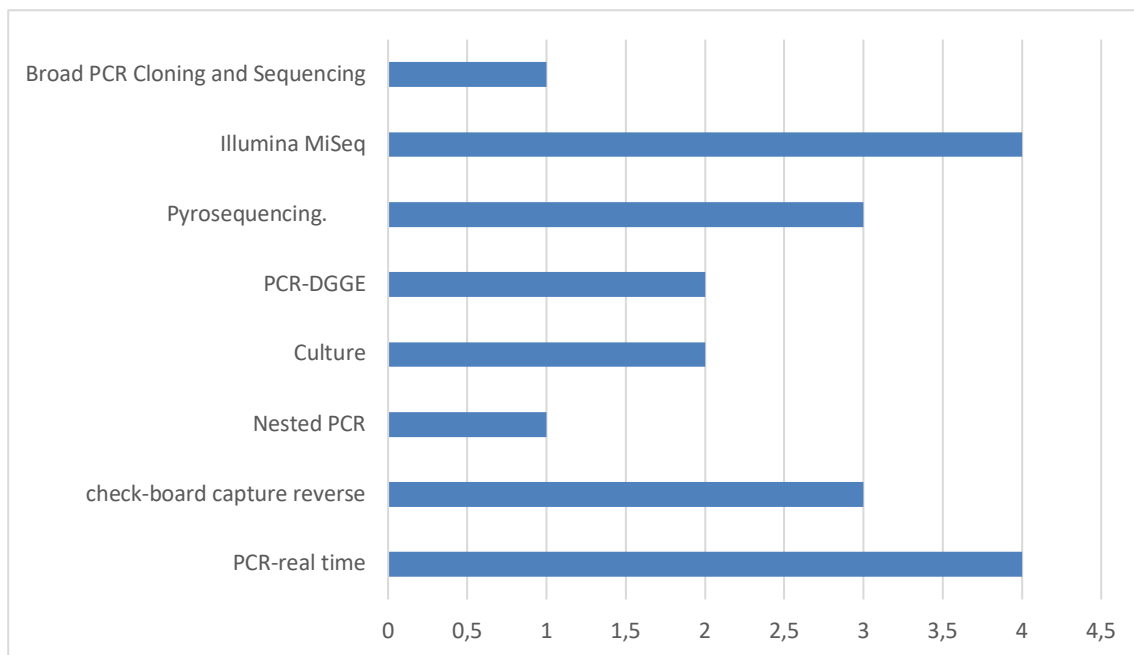
Table 4. Methodological quality of the studies

Study reference	Methodological items								Score	%
	1 Were the criteria for inclusion in the sample clearly defined?	2 Were the study subjects and the setting described in detail?	3 Was the exposure measured in a valid and reliable way?	4 Were objective, standard criteria used for measurement of the condition?	5 Were confounding factors identified?	6 Were strategies to deal with confounding factors stated?	7 Were the outcomes measured in a valid and reliable way?	8 Was appropriate statistical analysis used?		
Baumgartner & Falkler, 1991	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Dougherty et al., 1998	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Siqueira et al., 2004	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Siqueira et al., 2009	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Subramanian et al., 2009	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Rôças et al., 2010	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Chugal et al., 2011	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Siqueira et al., 2011	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Özok et al., 2012	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Wang et al., 2012	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Antunes et al., 2015	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Ping et al., 2015	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Peerson et al., 2016	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Siqueira et al., 2016	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Pereira et al., 2017	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Tatikonda et al., 2017	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Bouillaguet et al., 2018	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Takahama et al., 2018	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Qian et al., 2019	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Siqueira et al., 2020	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75
Pérez-Carrasco et al., 2023	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	6	75





■ Brazil ■ China ■ India ■ Netherlands ■ Switzerland ■ United States



9.1.2. Artigo 2 (Submissão no European Endodontic Journal)

12/08/2023, 15:24

Gmail - Manuscript submitted to European Journal of Dental Education



Flávio Alves <flavioferreiraalves@gmail.com>

Manuscript submitted to European Journal of Dental Education

2 mensagens

European Journal of Dental Education <no-reply@atyponrex.com>
Para: Flavio Alves <flavioferreiraalves@gmail.com>

30 de julho de 2023 às 17:34

Dear Flavio Alves,

Your manuscript entitled "Exploring the safety of engine-driven instruments when used by inexperienced students: a systematic review" has been successfully submitted online and is being delivered to the Editorial Office of *European Journal of Dental Education* for consideration.

You will receive a follow-up email with further instructions from our electronic editorial office platform, ScholarOne Manuscripts, typically within one business day. That message will confirm that the Editorial Office has received your submission and will provide your Manuscript ID.

Thank you for submitting your manuscript to *European Journal of Dental Education*

Sincerely,
The Editorial Staff at European Journal of Dental Education

By submitting a manuscript to or reviewing for this publication, your name, email address, and affiliation, and other contact details the publication might require, will be used for the regular operations of the publication, including, when necessary, sharing with the publisher (Wiley) and partners for production and publication. The publication and the publisher recognize the importance of protecting the personal information collected from users in the operation of these services and have practices in place to ensure that steps are taken to maintain the security, integrity, and privacy of the personal data collected and processed. You can learn more by reading our [data protection policy](#). In case you don't want to be contacted by this publication again, please send an email to ejoffice@wiley.com.

Flávio Alves <flavioferreiraalves@gmail.com>
Para: Warley Oliveira <warleyosodonto@gmail.com>

30 de julho de 2023 às 17:38

Comprovação da submissão

Flávio Rodrigues Ferreira Alves, DDS, MSc, PhD
Coordenador Geral do Programa de Pós-Graduação em Odontologia da UNIGRANRIO
Mestrado e Doutorado
(21)987730077 e whats app (21)987730077
[Curriculum](#) - [Face](#) - [Instagram](#)
[Texto das mensagens anteriores oculto]



Não contém vírus. www.avast.com

Exploring the safety of engine-driven instruments when used by inexperienced students: a systematic review

Warley Oliveira Silva, DDS, MSc¹

Sara Leal Poncio, DDS, MSc¹

Renata Costa Val Rodrigues, DDS, MSc, PhD^{1,2}

Flávio Rodrigues Ferreira Alves, DDS, MSc, PhD^{1,3}

¹ Postgraduate Program in Dentistry, University of Grande Rio (UNIGRANRIO), Rio de Janeiro, RJ, Brazil

² Department of Endodontics, Faculty of Dentistry, Veiga de Almeida University, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

³ Department of Endodontics, Faculty of Dentistry, Iguaçu University (UNIG), Nova Iguaçu, RJ, Brazil.

Running title: Engine-driven instruments in endodontic training

Author's address:

Flávio R. F. Alves, PhD

Rua Professor José de Souza Herdy, 1160

Duque de Caxias, RJ

Brazil 25071-202

e-mail: flavioferreiraalves@gmail.com

Acknowledgments

This study was supported by grants from Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

The authors deny any conflicts of interest.

ABSTRACT

Introduction: This systematic review compared the safety of engine-driven and manual instruments in terms of fracture rate and other accidents when used by inexperienced students, who have never had contact with mechanized instruments.

Methods: The study followed the PRISMA guidelines and was registered on PROSPERO (CRD42021289545). The research question, formulated using the PECO strategy, focused on identifying the system with the lowest fracture rate (O) when utilized by inexperienced students (P), specifically comparing manual (E) and engine-driven (rotating or reciprocating) (C) techniques. Databases, including Medline via PubMed, Web of Science, EMBASE, and SCOPUS, were searched to identify studies investigating the fracture rate of engine-driven systems and manual techniques used by inexperienced students. The methodological quality of the included studies was assessed using the Joanna Briggs Institute Critical Appraisal Checklist. **Results:** Out of 1364 articles initially obtained, the final sample included 13 studies. Results regarding the fracture rate of the instruments revealed that in 8 studies, engine-driven instruments demonstrated either zero or lower rates of fracture and other accidents compared to manual techniques, while 5 studies reported lower fracture rates with manual files. **Conclusion:** In conclusion, when utilized by inexperienced students, engine-driven systems showed either zero or lower fracture rates and accidents compared to manual systems. Moreover, treatment outcomes achieved with engine-driven instruments were superior and required less operation time.

Key-words: instrument fracture, engine-driven, manual systems

INTRODUCTION

Learning and acquiring practical skills during Dentistry graduation is widely acknowledged as a complex and highly demanding process ^{1,2}. Among the challenging subjects for undergraduates, endodontics stands out due to the specific skills it demands, including the development and refinement of tactile sensitivity, understanding of external and internal dental anatomy, accurate diagnosis, and mastery of various treatment stages ³. Additionally, the variable and intricate morphology of the root canal system poses a significant challenge for dental students ⁴.

Over time, endodontics has witnessed significant advancements, particularly with the introduction of nickel-titanium (Ni-Ti) instruments featuring superelasticity and shape memory effects, significantly reducing accident rates ⁵. This progress was further enhanced by the utilization of motors for instrument activation. However, the initial introduction of engine-driven Ni-Ti systems was accompanied by a surge in accident rates due to untreated metallic alloys, limited instrument designs, and continuous rotation as the sole activation mode. As a result, some resistance to incorporating engine-driven NiTi instruments in undergraduate courses emerged, persisting in certain institutions today ⁶⁻⁸.

One of the most frequent and challenging issues encountered during root canal preparation is instrument fracture, which can result from torsional or cyclic fatigue ⁹. Both manual and engine-driven techniques carry the risk of instrument fracture, making laboratory training crucial for undergraduates to prevent such accidents, as well as steps, perforations, and canal transportation ⁴. However, studies investigating the learning curve, accident rates, and students' perceptions of using engine-driven instruments are scarce ¹. Notably, there has been no systematic review of the literature to compile and discuss the evidence on the utilization of engine-driven systems by

inexperienced students who have never had contact with these instruments, especially in the context of undergraduate courses. Understanding this information is vital for curriculum planning and enhancing the learning process ¹⁰.

This systematic review compared the safety of manual and engine-driven systems in terms of fracture rate and other accidents when used by inexperienced students, who have never had contact with mechanized instruments. Besides, the evidence regarding introducing engine-driven systems in undergraduate dentistry courses was critically examined and discussed.

MATERIALS AND METHODS

Protocol and registration

This systematic review was conducted following the PRISMA guidelines (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) ¹¹ and was registered on PROSPERO (International Prospective Registry of Systematic Reviews) with the registration number CRD42021289545. The research question was formulated using the PECO strategy, aiming to determine the system (manual/engine-driven) with the lowest fracture rate and other accidents (O) when used by inexperienced students (who have never had contact with engine-driven instruments) (P), comparing manual (E) and engine-driven (rotary/reciprocating) systems (C).

Eligibility Criteria

The inclusion criteria comprised cross-sectional or cohort-retrospective studies that directly compared the fracture rates and other accidents between engine-driven and manual instruments used by inexperienced students, who have never had contact with rotary/reciprocating instruments. On the other hand, studies that did not directly compare engine-driven and manual instruments or focused on experienced professionals were excluded.

Search strategy and selection of articles

Two independent reviewers conducted comprehensive searches in 4 databases: Medline via PubMed (www.pubmed.gov), Web of Sciences (<http://www.isiknowledge.com>), EMBASE (<https://www.embase.com>), and SCOPUS (scopus.com). The search was restricted to articles published until October 16, 2021, and only articles in the English language were considered for inclusion.

After exporting the retrieved articles to Rayyan (<https://www.rayyan.ai>) to remove duplicates, the reviewers performed an initial screening based on titles and abstracts. Before this process, the reviewers were calibrated to ensure consistency in applying the inclusion and exclusion criteria using the first 10 studies retrieved. Subsequently, a second selection round was conducted by thoroughly reading the full manuscripts. In disagreements between the two reviewers, a third reviewer was consulted to make the final decision.

Data Extraction

The data extraction involved obtaining the following information: reference details (authors, publication year, and journal); study design; sample type and its anatomical characteristics; evaluation method (radiographs, medical records, or questionnaires); rates of instrument fracture and other accidents; quality of endodontic treatment; time taken to complete root canal preparations; teeth with the highest error rate; assessment of learning; and students' preference, satisfaction and difficulties.

Risk of bias

Two independent evaluators thoroughly assessed the studies' methodological quality using the Joanna Briggs Institute Critical Appraisal Checklist (<https://joannabriggs.org/>). Two checklists, one for cross-sectional and another for cohort studies, were applied. For each question on the checklists, the evaluators provided responses of "yes," "no," "unclear," or "not applicable." Points were assigned

for "yes" responses, while "no" or "unclear" responses received zero points. The maximum possible scores were 8 for cross-sectional and 10 for cohort studies. The scores were then converted into percentages to determine the quality of each study, which was categorized as high (100-80%), moderate (50-79%), or low (<50%). A third reviewer decided on the discordant cases.

RESULTS

The electronic search yielded 1364 articles, from which 246 duplicates were removed. In the title and abstract selection stage, 1118 articles were screened. Following a thorough evaluation, 40 articles were shortlisted for full-text reading. After careful examination, 13 articles were ultimately included in the review, while 27 were excluded for various reasons (see Figure 1). The selected studies comprised 7 cross-sectional designs, 5 retrospective studies, and 1 study that employed both methodological approaches (Table 1).

The included studies exhibited significant methodological heterogeneity. Some studies utilized extracted teeth or resin blocks as samples, while others were clinical or retrospective. Regarding the evaluation method, 4 studies relied on radiographs and medical records, 3 used photographs taken before and after instrumentation, and 2 employed questionnaires for data collection.

The methodological quality assessment of the included studies revealed that the cross-sectional studies obtained scores ranging from 50% to 75%, indicating a moderate risk of bias. As for the retrospective cohort studies, 4 were rated as having a moderate risk of bias, while 2 were considered to have low methodological quality, indicating a higher risk of bias (Supplementary tables 2 and 3).

In the evaluation of instrument fracture, a total of 11 studies compared engine-driven rotary instruments with manual, while 1 study compared a hybrid technique

(reciprocating and rotary) with either a rotary system or a manual technique, and only 1 study compared a reciprocating system with a manual system. Among the studies, 8 demonstrated either the absence of fracture when using engine-driven instruments or lower fracture rates compared to manual techniques ¹²⁻¹⁷. Conversely, 5 studies reported lower fracture rates with manual files ^{9, 18-21}, and 1 study did not find significant differences between the two systems ²² (Table 2).

Among the most frequent errors encountered, ledge and canal transportation were the most mentioned (Table 3). Engine-driven systems were found to significantly reduce the occurrence of ledge creation compared to manual techniques in most studies ^{12, 13, 20, 22}. However, no significant differences were observed in terms of canal transportation ^{14, 19}.

Regarding specific tooth types, mandibular molars showed the highest rates of iatrogenic incidents during root canal preparation, followed by maxillary molars ^{13, 15, 21}. The apical third of the root canals was identified as the region with the highest fracture rate, accounting for 80-90% of cases, predominantly observed in the mesial canals of molars ^{12, 15}.

Some studies (n = 5) assessed undergraduate students' learning curve, and all reported a more significant learning improvement with engine-driven systems compared to manual, encompassing aspects of performance, technique assimilation, and perceived safety ^{10,13,17,18,20}. Regarding student perceptions, most studies indicated that engine-driven systems were safer than manual instruments, with only one study showing the opposite trend ²⁰. Additionally, students found the technique with engine-driven instruments to be more straightforward and better understood. Furthermore, all studies comparing the preparation time revealed that engine-driven systems were faster than manual methods ^{10,12,16,17,18,20}. Lastly, undergraduate students exhibited a high level of satisfaction with the use of motor-driven systems in

their courses ^{10,18}.

DISCUSSION

This systematic review aimed to critically examine and discuss the evidence regarding introducing engine-driven systems in undergraduate dentistry courses. Studies evaluating the performance of inexperienced students with no prior exposure to rotary/reciprocating systems were carefully reviewed. The findings strongly support adopting such systems, as they demonstrate improved safety, a lower learning curve, and faster performance than manual instruments. Moreover, the high level of student satisfaction emphasizes the positive impact and motivational potential of this approach. Notably, this review represents the first systematic review to address this question, considering an extensive search of electronic databases. These results offer valuable insights for educational institutions aiming to optimize endodontic training for undergraduate students.

This review showed that engine-driven systems offer superior root canal preparations, particularly in centralizing and preserving root canal anatomy. Moreover, undergraduate students perceived these systems as safer, and errors were lower than manual instruments ^{12, 13, 19, 20, 22}. These findings are consistent with the continuous improvement of engine-driven systems, with advancements in alloy, surface treatment, and design contributing to enhanced performance over time ^{12, 13, 20}. Only one study reported contrasting findings, which could be attributed to the significant number of molars involved ²¹, with a higher difficulty level. Additionally, methodological variations, including the choice of instrumentation systems and previous laboratory training, could have contributed to the differences observed in other studies ^{15, 19, 20}. Furthermore, concerning other errors like perforations, ledge formation, and root canal transportation, it became evident that engine-driven systems substantially decreased

the occurrence of these accidents compared to manual ²³.

Indeed, the utilization of engine-driven systems demonstrated notable advantages in speed and effectiveness during endodontic treatment, as evidenced by several studies ^{10, 12, 19, 20, 24}. The reduced treatment time also contributes to enhanced patient comfort, as fewer sessions are required for completion. However, it is crucial to consider potential drawbacks associated with faster preparations. One significant concern is the reduced action of the irrigating solution inside the root canal, which may hinder thorough disinfection and debris removal, potentially compromising the treatment's overall success, especially in infected canals ^{23, 25}. However, increasing the time of contact and volume of the irrigant during the preparations with engine-driven systems compensates for their disinfection ability, and it is easy to perform ^{25, 28}.

It is important to acknowledge the limitations of this systematic review. One major limitation was the heterogeneity observed among the included studies, which hindered the possibility of conducting a meta-analysis. Another limitation was the relatively low number of included studies, underscoring the need for more investigations in this area. Despite these limitations, it is noteworthy that the included studies generally demonstrated good methodological quality, with only two exceptions ^{14, 22}. The issues identified in these studies were related to confounding factors and poorly characterized samples.

The continuous improvement of endodontic instruments, coupled with the advancement of endodontic motors, has enabled the integration of engine-driven instruments into undergraduate courses with proven safety and efficacy ²⁶. Nevertheless, it is crucial to highlight that students should know the specific engine-driven system used and be familiar with the complexities of root canal anatomy ²¹. Reciprocating systems may be favorable because they offer a simplified technique and demonstrate promising outcomes concerning fracture rates and accidents ²³.

Furthermore, multiple studies suggest reciprocating techniques exhibit disinfecting abilities comparable to multi-file techniques ²⁷⁻³⁰.

In the present context, it is essential to clarify that the findings of this review do not undermine the significance of manual instruments or suggest that they are obsolete or unnecessary. Manual instruments continue to play a crucial role in endodontic treatment, especially in addressing specific anatomical challenges that may be better suited to manual manipulation. Moreover, hand files remain a cost-effective option for root canal treatment, with their efficacy supported by a wealth of research.

However, it would be unwise for educators and institutions to disregard the technological advancements in endodontics and withhold the knowledge and use of engine-driven instruments from undergraduate students. The evidence presented in this review underscores the benefits of introducing engine-driven systems into undergraduate courses, including enhanced safety, a lower learning curve, and improved treatment efficiency. Denying students exposure to such advancements may limit their future proficiency in adopting new techniques and technologies in their dental practice.

CONCLUSION

Studies consistently show that engine-driven instruments are safer and easier to learn than manual files for inexperienced students. They have lower fracture rates, fewer errors, and faster learning curves. Engine-driven instruments also produce superior technical quality of treatments, which can improve patient care. While manual instruments are still essential in some cases, denying students exposure to engine-driven technology would be counterproductive.

REFERENCES

1. Grock CH, Luz LB, Oliveira VF, et al. Experiences during the execution of emergency endodontic treatment and levels of anxiety in dental students. *Eur J Dent Educ* 2018;22:e715-e723.
2. Barakat RM, Almohareb RA. Conservative preparation of curved root canals using novel nickel-titanium instruments: influence of operator experience. *Heliyon*. 2022;8:e11939.
3. Tavares LG, Lima SMF, Lima MG, Arruda MP, Menegazzi TC, Rezende TMB. Undergraduate dentistry students' perception of difficulties regarding endodontic treatment. *Aust Endod J* 2019;45:98-105.
4. Abdulrab S, Alaajam W, Al-Sabri F, et al. Endodontic procedural errors by students in two saudi dental schools. *Eur Endod J* 2018;3:186-191.
5. Tabassum S, Zafar K, Umer F. Nickel-Titanium Rotary File Systems: What's New? *Eur Endod J* 2019;4:111-117.
6. Rolland S, Hobson R, Hanwell S. Clinical competency exercises: some student perceptions. *Eur J Dent Educ* 2007;11:184-191.
7. Seijo MO, Ferreira EF, Ribeiro Sobrinho AP, Paiva SM, Martins RC. Learning experience in endodontics: Brazilian students' perceptions. *J Dent Educ* 2013;77:648-655.
8. Alrahabi M. The confidence of undergraduate dental students in Saudi Arabia in performing endodontic treatment. *Eur J Dent* 2017;11:17-21.
9. Tzanetakis GN, Kontakiotis EG, Maurikou DV, Marzelou MP. Prevalence and management of instrument fracture in the postgraduate endodontic program at the Dental School of Athens: a five-year retrospective clinical study. *J Endod* 2008;34:675-678.
10. Martins RC, Seijo MO, Ferreira EF, Paiva SM, Ribeiro Sobrinho AP. Dental students' perceptions about the endodontic treatments performed using NiTi rotary instruments and hand stainless steel files. *Braz Dent J* 2012;23:729-736.
11. Page MJ, Moher D, Bossuyt PM, et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ* 2021;372:n160.
12. Abu-Tahun I, Al-Rabab'ah MA, Hammad M, Khraisat A. Technical quality of root canal treatment of posterior teeth after rotary or hand preparation by fifth year undergraduate students, The University of Jordan. *Aust Endod J* 2014;40:123-130.
13. Coelho MS, Card SJ, Tawil PZ. Safety Assessment of two hybrid instrumentation techniques in a dental student endodontic clinic: a retrospective study. *J Dent Educ* 2017;81:333-339.

14. Kfir A, Rosenberg E, Zuckerman O, Tamse A, Fuss Z. Comparison of procedural errors resulting during root canal preparations completed by senior dental students in patients using an '8-step method' versus 'serial step-back technique'. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2004;97:745-748.
15. Pedir SS, Mahran AH, Beshr K, Baroudi K. Evaluation of the factors and treatment options of separated endodontic files among dentists and undergraduate students in riyadh area. *J Clin Diagn Res* 2016;10:ZC18-23.
16. Peru M, Peru C, Mannocci F, Sherriff M, Buchanan LS, Pitt Ford TR. Hand and nickel-titanium root canal instrumentation performed by dental students: a micro-computed tomographic study. *Eur J Dent Educ* 2006;10:52-59.
17. Steffen H, Low A, Rosin M, Welk A. Comparison of K hand files and ProFiles 0.06/0.04 in simulated curved root canals prepared by students. *Quintessence Int.* 2006;37:811-817.
18. Sonntag D, Delschen S, Stachniss V. Root-canal shaping with manual and rotary Ni-Ti files performed by students. *Int Endod J* 2003;36:715-723.
19. Alves RA, Souza JB, Goncalves Alencar AH, Pecora JD, Estrela C. Detection of procedural errors with stainless steel and NiTi instruments by undergraduate students using conventional radiograph and cone beam computed tomography. *Iran Endod J* 2013;8:160-165.
20. Alrahabi M. Comparative study of root-canal shaping with stainless steel and rotary NiTi files performed by preclinical dental students. *Technol Health Care* 2015;23:257-265.
21. Haug SR, Solfjeld AF, Ranheim LE, Bardsen A. Impact of case difficulty on endodontic mishaps in an undergraduate student clinic. *J Endod* 2018;44:1088-1095.
22. Cheung GS, Liu CS. A retrospective study of endodontic treatment outcome between nickel-titanium rotary and stainless steel hand filing techniques. *J Endod* 2009;35:938-943.
23. Gavini G, Santos MD, Caldeira CL, et al. Nickel-titanium instruments in endodontics: a concise review of the state of the art. *Brazilian Oral Research* 2018;32:e67.
24. Sonntag D, Guntermann A, Kim SK, Stachniss V. Root canal shaping with manual stainless steel files and rotary Ni-Ti files performed by students. *Int Endod J* 2003;36:246-255.
25. Siqueira JF, Jr, Rôças IN, Marceliano-Alves MF, Pérez AR, Ricucci D. Unprepared root canal surface areas: causes, clinical implications, and therapeutic strategies. *Brazilian Oral Research* 2018;32:e65.
26. Leonardi DP, Baratto-Filho F, Haragushiku GA, Tomazinho FSF, Lopes MGK, Moro A. Undergraduates' opinion after 5-year experience with rotary endodontic instruments. *RSBO* 2011;8.

27. Machado ME, Nabeshima CK, Leonardo MF, Reis FA, Britto ML, Cai S. Influence of reciprocating single-file and rotary instrumentation on bacterial reduction on infected root canals. *Int Endod J* 2013;46:1083-1087.
28. Siqueira JF, Jr., Alves FR, Versiani MA, et al. Correlative bacteriologic and micro-computed tomographic analysis of mandibular molar mesial canals prepared by self-adjusting file, reciproc, and twisted file systems. *J Endod* 2013;39:1044-1050.
29. Neves MA, Provenzano JC, Rocas IN, Siqueira JF, Jr. Clinical antibacterial effectiveness of root canal preparation with reciprocating single-instrument or continuously rotating multi-instrument systems. *J Endod* 2016;42:25-29.
30. Basmaci F, Oztan MD, Kiyani M. Ex vivo evaluation of various instrumentation techniques and irrigants in reducing *E. faecalis* within root canals. *Int Endod J* 2013;46:823-830.

FIGURE LEGENDS

Figure 1. Flowchart illustrating the screening and article selection approaches.

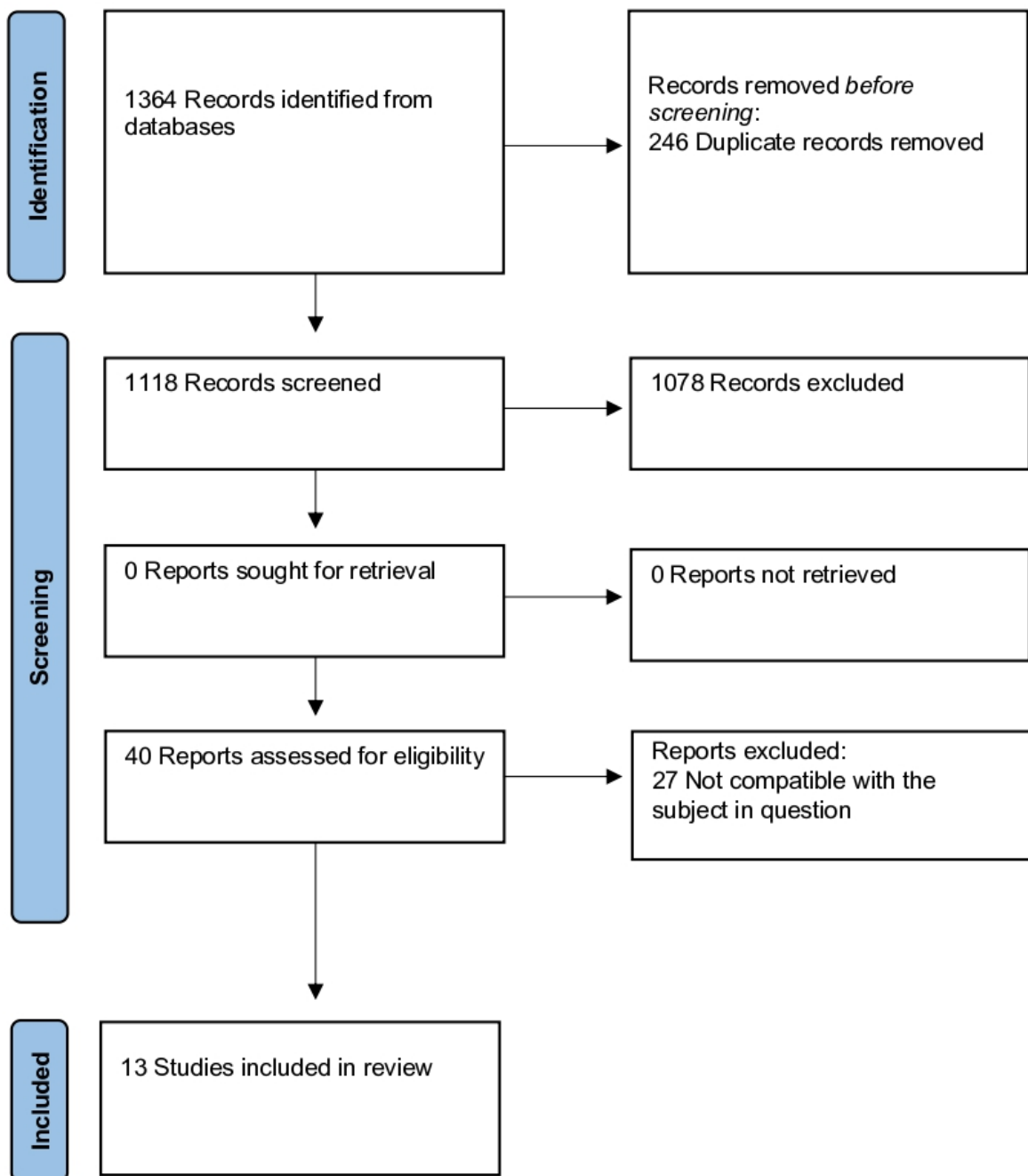


Table 1. Characteristics of the included studies

Reference	Study type (retrospective or cross-sectional)	Sample used: extracted resin block/ printed tooth	Anatomical characteristics of the canals	Quality of endodontic treatment	Time canal preparation	Learning curve	Authors' conclusions
Abu-Tahun <i>et al.</i> , 2014	Retrospective	Molar mandibular and molar maxillary (evaluation of clinical care in patients)	Not available	Significantly better root canal shaping and less incidence of deviation with engine-driven instruments than with manual	Less time with engine-driven instruments than with manual (time in min not available)	Not available	Mechanized instrumentation provided better results, and in less time.
Alrahabi, 2005	Cross-sectional	Simulated canals in resin blocks	The taper of the simulated canal was 0.2, 17 mm length, coronary third straight of 12 mm length and apical third curve with 5 mm length, and 40-degree curve	Significantly better root canal shaping and less incidence of deviation with engine-driven instruments than with manual	Less time with engine-driven instruments (7.33 min) than with manual (17.24 min)	Stainless steel file was considered safer	Instrumentation with hand files is safer than engine-driven instrumentation for inexperienced undergraduates.
Alves <i>et al.</i> , 2013	Cross-sectional	Extracted tooth	Maxillary and mandibular molars, less than 22 mm in length, mesiobuccal root canal with a radius of curvature >4 and ≤ 8 mm	Higher error rate for BioRace 5 (45.5%), K3 and flexo-file3 (27.27%)	Less time with engine-driven instruments (17 min) than with manual (43 min)	Not available	The frequency of errors during the procedures was low, regardless of the system, even with inexperienced operators.
Cheung; Liu 2009	Retrospective	Dental records	Not available	Engine-driven instruments showed fewer errors (deviation) and better quality of endodontic treatment	Not available	Not available	The success rate was higher for the group that used engine-driven instruments compared to manual.
Coelho; Tawil 2017	Retrospective	Endodontic treatment patients	Teeth with a single root canal, straight in	Engine-driven instruments provided lower incident rates as ledges	Not available	Engine-driven instruments provided greater safety due to low accident rates.	The hybrid technique (rotary and reciprocating) provided good safety low rate of ledge creation, with

								no fracture occurrences.
Haug <i>et al.</i> , 2018	Retrospective	Endodontic treatment patients	in	Not available	No significant differences in endodontic mishaps during root canal preparation between the hand and engine-driven groups	Not available	Not available	Students must know the engine-driven system at graduation.
Kfir <i>et al.</i> , 2004	Cross-sectional	Endodontic treatment patients	in	Not available	Not available	Not available	Not available	The insertion of new instrumentation methods in graduation provided fewer errors than the manual technique alone.
Martins <i>et al.</i> , 2012	Cross-sectional	Endodontic treatment patients	in	Teeth with straight and curved canal	97 students (84.3%) classified their treatments as good. Seventeen students (14.8%), 13 of whom were in g2, classified their treatments as adequate and only one student in g1 (0.9%) classified them as poor	Less time with engine-driven instruments than with manual (time in minutes not available)	The students had similar views (in both groups, manual and mechanized instruments) of their learning during the endodontic treatments	The NiTi rotary technique could be safely introduced into the undergraduate dental curriculum, resulting in a substantial improvement in the quality of root canal treatment.
Pedir <i>et al.</i> , 2016	Retrospective and cross-sectional	Endodontic treatment patients	in	Curved and narrow root canals	Not available	Not available	Not available	Did not bring it up clearly. This study compares the index of instrument fracture between students and dentists.
Steffen <i>et al.</i> , 2005	Cross-sectional	Resin block		Curved plastic blocks - curvature angle of 30 degrees and coronal diameter (1.15 mm)	Both techniques showed unprepared areas in the apical portion, mainly in the curvature (in the middle third of the canal, only manual	Without differences between engine-driven and manual instruments	Engine-driven instruments provided greater safety	The mechanized system showed better results than the manual.

				instruments showed unprepared areas). The coronal diameter was irregular and wider in canals instrumented with hand files.				
Sonntag <i>et al.</i> , 2003	Cross-sectional	Resin block	Simulated canal in acrylic resin with a length of 19 mm, a radius of curvature of 5.5 mm, and an angle measured at 40 degrees.	Correct preparation length was achieved significantly (P < 0.05) more often with rotary files than with manual files	Less time with engine-driven instruments (12 min) than with manual (24 min)	Engine-driven system was considered easier than manual	The students achieved better results engine-driven system compared to the manual. The introduction of mechanized endodontics for undergraduate students significantly improves learning about the preparation of root canals.	
Tzanetakis <i>et al.</i> , 2008	Retrospective	Record dental	Not available	Not available	Not available	Not available	Engine-driven instruments show a slightly more frequent tendency to fracture than stainless steel instruments. However, the authors believe it to be a low frequency. Errors can be minimized by teaching basic teaching principles to access cavity and mechanical chemical preparation.	

Peru <i>et al.</i> , 2005	Cross-sectional	Teeth extracted	Curved radius between 15-45°	Both GT and Profile mechanized systems provided better quality repairs than hand instrumentation.	Less time with engine-driven instruments than with manual (time in minutes not available)	Not available	The mechanized systems can be introduced at graduation, offering security to students and substantial quality in root canal treatment for inexperienced students. However, the authors report that more clinical studies are needed.
---------------------------	-----------------	-----------------	------------------------------	---	---	---------------	--

Table 2. Rate of fracture

Studies	Manual systems	Engine-driven systems
Abu-tahun <i>et al.</i> , 2014	5.38% stainless steel file	1.04% Protaper
Alrahabi <i>et al.</i> , 2015	1.1% stainless steel K files	5.56% Protaper
Alves <i>et al.</i> , 2013	None	3.88%- Biorace/K3
Cheung, 2009	(Did not clarify the rate)-Stainless steel hand files ($p > 0.05$)	ProFile (0.06 tapered) (No between manual and mechanized)
Coelho, 2017	3 stainless steel files (2 files 15 and 1 file 20)	None
Haug <i>et al.</i> , 2018	Stainless steel k file 15 (0.39%)	Wave one (1.94%)
Kfir <i>et al.</i> , 2004	1 stainless steel K	None
Martins <i>et al.</i> , 2012	Not reported	Not reported
Pedir <i>et al.</i> , 2016	70% stainless steel	30% of rotary files
Steffen <i>et al.</i> , 2005	7 k files	None
Sonntag <i>et al.</i> , 2003	2 NiTi K-files	14 FlexMaster
Tzanetakis <i>et al.</i> , 2008	Stainless steel file 0.55%	Rotary file - 1.33%
Peru <i>et al.</i> , 2005	None	None

Table 3. Other errors

Studies	Other errors	Manual systems	Engine-driven system	Conclusion
Abu-tahun <i>et al.</i> , 2014	Ledge	Stainless steel file 16 (94.1%).	Protaper 1 (5.9%)	The ledge formation was greater for stainless steel files.
Alrahabi <i>et al.</i> , 2015	Ledge	Stainless steel file- 14.4%	NiTi 1.1%.	The ledge formation was greater for stainless steel files.
Alves <i>et al.</i> , 2013	Canal transportation	Rate not mentioned	Rate not mentioned	No significant between engine-driven and manual instruments
Cheung, 2009	Ledge, apical transportation, perforation, instrument fracture.	Rate not mentioned	Rate not mentioned	Significantly higher incidence of ledge formation with manual files, with no differences for the other accidents
Coelho, 2017	Ledge	24 canals (1.4%)	8 canals (0.5 %)	The incidence of ledges was greater for manual systems
Haug <i>et al.</i> , 2018	Overinstrumentation, loss of working length, obturation less than 2 mm from the radiographic apex, perforation, and instrument fracture.	Rate not mentioned	Rate not mentioned	There were no significant differences in endodontic mishaps between engine-driven and manual instruments
Kfir <i>et al.</i> , 2004	Canal transportation	2 canals (3%)	3 canals (4%)	Canal transportation was greater for manual systems
Steffen <i>et al.</i> , 2005	Canal blockage and transportation	Root canal blockage in 26 blocks instrumented with manual K file Canal transportation: 19 cases Zip: 9 cases	Root canal blockage: Profile there were 3 Canal transportation: 4 cases	The incidence of errors was greater for stainless steel files.
Sonntag <i>et al.</i> , 2003	Zip, elbow, and ledge	Zip: 49.5% Elbow: 65.7% Ledge: 6.7%	Zip: 9.5% Elbow: 17.1% Ledge: 1.9%	The incidence of errors was greater for stainless steel files.
Peru <i>et al.</i> , 2005	Ledge	Rate not mentioned	Rate not mentioned	Both systems demonstrated ledge formation due to improper use of Gates-Glidden

Supplementary table 1. Search strategy: databases and combination of MeSH terms/keywords.

Database	Key words	Total Articles
PubMed	("Endodontics"[MeSH Terms] OR "Endodontics" [All Fields] OR "Dental students"[All Fields] OR "students, dental"[MeSH Terms] OR "students dental"[All Fields] OR "Undergraduate*" [All Fields] OR "Undergraduate student"[All Fields] OR "Novice operators"[All Fields] OR "dental education"[All Fields] OR "Dental schools"[All Fields] OR "Student education"[All Fields] OR "Dental training"[All Fields] OR "Pre-doctoral"[All Fields] OR "Beginner operators"[All Fields] OR "Preclinical training"[All Fields] OR "education"[MeSH Terms] OR "education"[All Fields] OR "experience"[All Fields] OR "preference"[All Fields] OR "perceptions"[All Fields]) AND "nitinol"[All Fields]) OR "nickel-titanium"[All Fields] OR "instruments"[All Fields] OR "reciprocating"[All Fields] OR "Rotary"[All Fields] OR "NiTi rotary instruments"[All Fields] OR "nickel-titanium systems"[All Fields] OR "Rotary instrumentation"[All Fields] OR "endodontic techniques"[All Fields] OR "single file"[All Fields] OR "Rotary endodontic instruments"[All Fields] OR "Engine-driven systems"[All Fields] OR "Engine-driven instruments"[All Fields] OR "Continuous rotation"[All Fields] OR "Rotary system"[All Fields] OR "NiTi endodontic instruments"[All Fields] OR "Reciprocating movement"[All Fields] OR "Rotary preparation"[All Fields] OR "single file"[All Fields] OR "Multi-file"[All Fields]) AND "Hand Stainless Steel Files"[All Fields]) OR "stainless steel"[All Fields] OR "crown-down"[All Fields] OR "Manual root canal preparation"[All Fields] OR "K file"[All Fields]) AND "instrument separation"[All Fields]) OR "Instrument failure"[All Fields] OR "Instrument fracture"[All Fields] OR "File fracture"[All Fields] OR "procedural errors"[All Fields]	604
Web of Science	TS= ("endodontics") OR TS= ("dental students") OR TS= ("Undergraduate") OR TS= ("Undergraduate student") OR TS= ("novice operators") OR TS= ("Dental education") OR TS= ("Dental schools") OR TS= ("Student education") OR TS= ("Dental training") OR TS= ("Pre-doctoral") OR TS= ("Beginner operators") OR TS= ("Preclinical training") OR TS= ("education") OR TS= ("experience") OR TS= ("preference") OR TS= ("perceptions") AND TS= ("nitinol") OR TS= ("nickel-titanium") OR TS= ("instruments") OR TS= ("reciprocating") OR TS= ("Rotary") OR TS= ("NiTi rotary instruments") OR TS= ("nickel-titanium systems") OR TS= ("Rotary instrumentation") OR TS= ("endodontic techniques") OR TS= ("single file") OR TS= ("Rotary endodontic instruments") OR TS= ("Engine-driven systems") OR TS= ("Engine-driven instruments") OR TS= ("Continuous rotation") OR TS= ("Rotary system") OR TS= ("NiTi endodontic instruments") OR TS= ("Reciprocating movement") OR TS= ("Rotary preparation") OR TS= ("single file") OR TS= ("Multi-file") AND TS= ("Hand Stainless Steel Files") OR TS= ("stainless steel") OR TS= ("crown-down") OR TS= ("Manual root canal preparation") OR TS= ("K file")	28
Embase	'endodontics'/exp OR 'endodontics' OR 'dental student'/exp OR 'dental student' OR 'undergraduate'/exp OR 'undergraduate' OR 'undergraduate education'/exp OR 'undergraduate education' OR 'undergraduate student'/exp OR 'undergraduate student' OR 'novice operators' OR 'dental education'/exp OR 'dental education' OR 'dental schools' OR 'student education' OR 'dental training' OR 'pre-doctoral' OR 'beginner	55

	operators' OR 'preclinical training' OR 'education'/exp OR 'education' OR 'experience'/exp OR 'experience' OR 'preference'/exp OR 'preference' OR 'perceptions'/exp OR 'perceptions' AND 'nitinol'/exp OR 'nitinol' OR 'nickel-titanium' OR 'instruments'/exp OR 'instruments' OR 'reciprocating' OR 'rotary' OR 'niti rotary instruments' OR 'nickel-titanium systems' OR 'rotary instrumentation' OR 'endodontic techniques' OR 'single-file' OR 'rotary endodontic instruments' OR 'engine-driven systems' OR 'engine-driven instruments' OR 'continuous rotation' OR 'rotary system' OR 'niti endodontic instruments' OR 'reciprocating movement' OR 'rotary preparation' OR 'multi-file AND'hand stainless steel files' OR 'stainless steel'/exp OR 'stainless steel' OR 'crown-down' OR 'manual root canal preparation' OR 'k file'/exp
Scopus	(ALL ("endodontics" OR "dental students" OR "Undergraduate" OR "Undergraduate student" OR "novice operators" OR "dental education" OR "Dental schools" OR "Student education" OR "Dental training" OR "Pre-doctoral" OR "Beginner operators" OR "Preclinicaltraining" OR "education" OR "experience" OR "preference" OR "perceptions") AND ALL ("nitinol" OR "nickel titanium" OR "instruments" OR "reciprocating" OR "NiTi rotary instruments" OR "nickel-titanium systems" OR "Rotary instrumentation" OR "endodontic techniques" OR "single file" OR "Rotary endodontic instruments" OR "Engine-driven systems" OR "Engine-driven instruments" OR "Continuous rotation" OR "Rotary system" OR "NiTi endodontic instruments" OR "Reciprocating movement" OR "Rotary preparation" OR "Multi-file") AND ALL ("Hand Stainless Steel Files" OR "stainless steel" OR "crown-down" OR "Manual root canal preparation" OR "K file") AND ALL ("instrument separation" OR "Instrument failure" OR "Instrument fracture" OR "File fracture" OR "procedural errors"))

Supplementary table 2. Appraisal checklist for cross-sectional studies

Reference	Methodological items								Score	%
	1	2	3	4	5	6	7	8		
	Were the criteria for inclusion in the sample clearly defined?	Were the study subjects and the setting described in detail?	Was the exposure measured in a valid and reliable way?	Were objective, standard criteria used for measurement of the condition?	Were confounding factors identified?	Were strategies to deal with confounding factors stated?	Were the outcomes measured in a valid and reliable way?	Was appropriate statistical analysis used?		
Alrahabi et al., 2005	Y	Y	Y	Y	U	U	Y	Y	6	75%
Alves et al., 2013	Y	Y	Y	Y	U	N	Y	Y	6	75%
Kfir et al., 2004	N	Y	Y	Y	N	N	Y	Y	4	50%
Martins et al., 2012	Y	Y	Y	Y	N	N	Y	Y	6	75%
Steffen et al., 2005	Y	Y	Y	Y	U	U	Y	Y	6	75%
Sonntag et al., 2003	Y	Y	Y	Y	N	U	Y	Y	6	75%
Peru et al., 2005	Y	N	Y	Y	N	N	Y	Y	5	63%

Supplementary table 3. Appraisal checklist for retrospective studies

Reference	Methodological items											Score %	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
	Were the two groups similar and recruited from the same population?	Were the exposures measured similarly to assign people to both exposed and unexposed groups?	Was the exposure measured in a valid and reliable way?	Were confounding factors identified?	Were strategies to deal with confounding factors stated?	Were the groups/participants free of the outcome at the start of the study (or at the moment of exposure)?	Were the outcomes measured in a valid and reliable way?	Was the follow up time reported and sufficient to be long enough for outcomes to occur?	Was follow up complete, and if not, were the reasons to loss to follow up described and explored?	Were strategies to address incomplete follow up utilized?	Was appropriate statistical analysis used?		
Abu-tahun et al., 2014	Y	Y	Y	N	U	Y	Y	Y	Y	U	Y	5	45
Cheung, 2009	Y	U	Y	N	N	Y	Y	U	U	U	Y	4	36
Coelho, 2017	Y	Y	Y	U	U	Y	Y	Y	Y	U	Y	6	54
Haug et al., 2018	Y	Y	Y	N	N	Y	Y	U	Y	U	Y	7	63
Pedir et al., 2016	Y	Y	Y	N	N	Y	Y	Y	Y	N	Y	6	54
Tzanetakis et al., 2008	Y	Y	Y	N	U	Y	Y	Y	Y	U	Y	7	63

Your submissions

Track your submissions

Enhancing debris removal in curved canals: a comparative evaluation of XP-endo Finisher and Passive Ultrasonic Irrigation

Corresponding Author: Marilia F Marceliano-Alves

Clinical Oral Investigations

e47cd92f-e806-47b3-aaa1-48c11f230141 | v.1.0

[View submission details](#)

Enhancing debris removal in curved canals: a comparative evaluation of XP-endo Finisher and Passive Ultrasonic Irrigation

Warley Oliveira Silva, MSc, PhD^{1,2}

Pablo Amoroso-Silva, MSc, PhD¹

Patrícia Olivares, MSc, PhD⁴

Flávio Rodrigues Ferreira Alves, DDS, MSc, PhD^{1,5}

Marília Fagury Marceliano-Alves, DDS, MSc, PhD⁵

¹ Postgraduate Program in Dentistry, University of Grande Rio (UNIGRANRIO), Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

² Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

⁴ Postgraduate Program in Dentistry, University of Grande Rio (UNIGRANRIO), Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

⁵ Department of Dental Research, Faculty of Dentistry, Iguaçu University (UNIG), Nova Iguaçu, RJ, Brazil.

Running title: debris removal by XP-endo Finisher and PUI

Author's address:

Warley Oliveira Silva, PhD
Rua da Glória, 187, Center, Diamantina-MG
Brazil
CEP:39100000
e-mail: warleyosodonto@gmail.com

ACKNOWLEDGEMENTS

Supported by grants from the Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brazilian Governmental Institutions.

The authors deny any conflicts of interest.

ABSTRACT

Objectives The study aimed to compare the efficacy of XP-endo Finisher and Passive Ultrasonic Irrigation (PUI) in removing hard tissue debris from curved canals.

Materials and methods Thirty-four mandibular molars with Vertucci's type II mesial canals were scanned in microcomputed tomography before and after preparation with HyFlex EDM, and accumulated hard tissue debris was quantified. Subsequently, the teeth were randomly divided into two groups according to the supplementary procedure: PUI with the Ultra-X insert or XP-endo Finisher. After the intervention, the specimens underwent another scanning. Two separate analyses were conducted, one for the total canal and another for the isthmus area. Unpaired and paired T-tests were used for inter- and intergroup comparisons, with a significance level set at 5%.

Results Both supplementary methods reduced the amount of debris compared to the initial volume. Remarkably, the XP-endo Finisher achieved a significantly higher percentage of debris removal (71% for the total canal and 74% for the isthmus areas) compared to PUI (41% for the total canal and 52% for the isthmus area) ($P < 0.05$).

Clinical relevance: none of the supplementary methods rendered canals completely free of hard tissue debris. However, the supplementary approach with XP-endo Finisher resulted in lower levels of hard tissue debris than PUI in curved canals with isthmuses.

Keywords: hard tissue debris; isthmus, micro-computed tomography; Passive Ultrasonic Irrigation; XP-endo Finisher.

Introduction

The intricate anatomy of the root canal system poses challenges to achieving effective cleaning and disinfection. In infected canals, anatomical complexities like isthmuses, apical deltas, lateral canals, and irregularities can harbor dentine debris, pulp remnants, and microorganisms, serving as a nutrient source and shelter for bacteria, perpetuating intracanal infections [1, 2]. For instance, isthmuses occur in 65% of the mesial roots from mandibular molars [3].

Various supplementary irrigation approaches have been employed to enhance the penetration of irrigating solutions into anatomical complexities, thereby improving root canal disinfection and cleaning. These strategies encompass sonic or ultrasonic devices and rotary instruments designed to agitate the irrigating solution [1, 4, 5].

The XP-endo Finisher, crafted from MaxWire nickel-titanium alloy by FKG Dentaire (La Chaux de Fonds, Switzerland), displays remarkable adaptability within the root canal. Transforming its shape from straight-martensitic to spoon-shaped at body temperature, this instrument's elasticity and shape memory effect aid in expansion and contraction during rotation, enhancing cleaning and disinfection. This dynamic behavior optimizes root canal treatments by reaching challenging areas and agitating the irrigant [1, 6].

Passive ultrasonic irrigation (PUI) gained popularity among clinicians, showing improved root canal cleaning when used as a supplementary approach after canal preparation (Suila, Minu 2019; Liang *et al.* 2022). Despite these promising results, complete dentine debris removal remains a challenge. Recently, a cordless ultrasonic activator, Ultra X (Eighteenth, Sifary Medical Technology, Changzhou City, China), was introduced to the market. This device boasts a 45kHz frequency and utilizes a 20.02 or 25.02 ultrasonic insert. According to the manufacturer, these inserts were specially designed to smear layer and dentine debris removal, biofilm disruption, and clean complex areas such as isthmus.

Hard tissue debris removal was initially assessed using scanning electron microscopy [7]. However, microcomputed tomography (micro-CT) is currently regarded as the gold

standard method for this purpose due to its ability to provide detailed quantifiable 3D images and allow multiple sequential analyses without sample destruction [8-10]. In this context, this study aimed to compare the effectiveness of XP-endo Finisher and Passive Ultrasonic Irrigation (PUI, with Ultra-X device and insert) in removing hard tissue debris from curved canals connected by isthmuses.

Material and methods

Sample calculation, selection, and preparation

The Institutional Ethics Committee approved the study protocol. A power calculation was performed using G*Power 3.1 software (Heinrich Hein University, Dusseldorf, Germany), with $\alpha = 0.05$ and $\beta = 0.95$, applying the chi-square test family and variance statistical test. The minimum sample size required for each group was 11 samples per group. Hence, 17 specimens were included in each group to account for potential losses during the study.

Thirty-four mandibular molars with Vertucci's type II mesial roots (two individual canals that start from the pulp chamber and join apically in a single canal) [11] and moderate curvature ($10-24^\circ$) [12] were selected. All teeth had complete rhizogenesis and no previous endodontic treatment, resorptions, or root fractures. The teeth were scanned using a SkyScan 1174 micro-CT device (Bruker micro-CT, Kontich, Belgium) to confirm the internal Vertucci's configuration and for posterior teeth pair-matching by groups. Then, conventional coronal access was performed with high-speed rounded diamond bur #1013 (FKG- Sorensen, São Paulo, SP) and Endo- Z bur (Dentsply, Maillefer, Switzerland).

The root canals were explored with #10 K-type files until the instrument tip was visualized at the apical foramen, and the working length (WL) was established by subtracting 1 mm. After that, the apical foramen of each root was sealed with Topdam (FGM, Joinville, SC, Brazil) to create a closed-end system [1].

Micro-CT parameters and pair-matched sample

Subsequently, the teeth were scanned in a micro-CT device (SkyScan 1174v2, Bruker, Kontich, Belgium) using the following parameters: 0.5° rotation step, 360° around the vertical axis, 9.9 µm pixel size, and 1-mm-thick aluminum filter. The NRecon v.1.7.4.6 software (Bruker micro-CT, Kontich, Belgium) was used to reconstruct the images using the following parameters: beam hardening correction set at 50%, ring artifact correction of 5, and smoothing value of 0. The CTAn software (v1.6.6.0, Bruker Micro-CT, Kontich, Belgium) was used to binarize images and analyze the three-dimensional parameters of surface area and volume of the initial internal canal morphology. This analysis allowed the sample pairing by similar volume into two experimental groups of 16 teeth each (PUI or XP-Endo Finisher).

Root canal preparation

The canals were instrumented using the HyFlex EDM system (Coltene, Whaledent, Switzerland) in the sequence recommended by the manufacturer (25/.12, 10/.05, and 25/~). The instruments were operated at 500 rpm and 2.5 N/cm, except the *glide path* instrument (10/.05), activated at 300 rpm and 1.8 N/cm. A VDW Silver electric motor (VDW, Munich, Germany) was used to drive the instruments. Before the preparation and after using each instrument, the canals were irrigated with 2 mL 2.5% sodium hypochlorite (NaOCl) for 30 seconds with a NaviTip 30G needle (Ultradent, South Jordan, USA). The total volume of NaOCl used during the preparation was 8 ml.

After root canal preparation, all teeth were submitted to another micro-CT scan with the same previously mentioned parameters. Then, the teeth were subjected to either PUI or XP-Endo Finisher supplementary procedures. Before the adjunct steps, the canals were irrigated with 2 mL 2.5% NaOCl with a 30G NaviTip needle (Ultradent, South Jordan, USA) introduced 2 mm below the CT. All supplementary procedures were performed at 37°C inside a heater cabinet (800-Heater; PlasLabs, Lansing, MI).

PUI

A total of 2 mL 2.5% NaOCl solution, preheated at 37°C, was used to irrigate the root canal for 30 seconds before PUI. Subsequently, an Ultra X Silver insert #20/02%, measuring

21 mm in length, was inserted until it reach the WL and activated for 1 minute at 45 kHz using a portable ultrasonic device (Ultra X, Eighteeth). After canal aspiration, they were irrigated with 2 mL of 17% EDTA, heated to 37° C, and ultrasonically activated for 1 minute. This protocol was repeated once more for each irrigant, resulting in a total of 4 mL of NaOCl and 4 mL of EDTA irrigation.

XP-endo Finisher

The XP-endo Finisher instrument was coupled to the VDW Silver motor, cooled with refrigerant gas (Endo Ice Spray, Maquira, Maringá, Brazil), and removed from the plastic tube in rotation. Next, 2 mL 2.5% NaOCl solution, preheated at 37°C, was used to irrigate the root canal for 30 seconds. The instrument was then inserted into the canal and operated for 1 minute at 800 rpm, 1 N/cm, using up-and-down movements (7- to 8-mm-long) up to WL. After aspiration, the canals were irrigated with 2 mL 17% EDTA, agitated by XP-endo Finisher for 1 minute. This protocol was repeated once more for each irrigant, resulting in a total of 4 mL of NaOCl and 4 mL of EDTA irrigation. Each instrument was used for only one tooth (2 canals) and discarded. Following the supplementary approaches, all teeth were scanned again in the micro-CT using the previously described parameters.

Micro-CT analysis

Post-preparation and post-supplementary image models were obtained by the CTAn v1.6.6.0 program (Bruker Micro-CT) and converted from the .BMP format to the .NRRD format in the Image J 1.50d software (National Institutes of Health, Bethesda, MD). Then, they were registered in the Slicer v1 software 5.1.2 (www.slicer.org) with a custom combination of a rigid registration module based on image intensity similarities with an accuracy greater than one voxel.

The volume (mm³) and surface area (mm²) of the isthmus region and the entire root canal length were measured. Also, the amount of hard tissue debris was calculated by the Image J software v. 1.49. Hard tissue debris was considered a material with a density similar to dentin in regions previously occupied by empty spaces and quantified by the intersection of images

before and after the final irrigation protocols. Hard tissue debris quantification involved assessing the difference in volume between unprepared and prepared root canal space through post-processing procedures. This difference was expressed as a percentage of the total canal system volume after preparation. CTvol v 2.2.3.0 program (Bruker Micro-CT) allowed the establishment of color codes (green to preoperative unprepared canal surface area, gray for instrumented canals, and blue for hard tissue debris) and graphic visualization of 3D models.

Statistical analysis

Intergroup data analysis was conducted to assess whether the supplementary methods had significant differences in hard tissue debris removal. The Shapiro-Wilk test revealed normality between the groups regarding the results obtained from debris accumulation. Unpaired and paired T-tests were used for inter- and intergroup comparisons. All analyses were processed using the Prism 9.5.1 program (GraphPad Software, Inc., La Jolla, CA, USA). The level of significance of the test was 5%.

Results

There were no significant differences between the initial volume and surface area of the root canal in both groups, revealing an adequate tooth pairing ($P > 0.05$). The XP-endo Finisher was significantly more effective in removing hard tissue debris from the canals than PUI ($P < 0.05$). The mean percent of debris removal was 71% for XP-endo Finisher and 41% for PUI. Considering only the isthmus areas, XP-endo Finisher removed significantly more debris from isthmuses than PUI, 74% and 52%, respectively ($P < 0.05$) (Table 1 and Figure 1).

Discussion

The present study evaluated the efficacy of two supplementary approaches in removing hard tissue debris. For this, mandibular first molars were chosen because they present the

highest prevalence of endodontic treatment and frequently possess isthmuses in their mesial root, representing one of the most challenging root canal anatomies for cleaning and disinfection [13, 14]. Data from a systematic review revealed the presence of isthmus communications averaged 54.8% on the mesial roots from mandibular molars [13]. In addition to investigating the complex root canal anatomy and testing a new ultrasonic device and insert for PUI, our study stands out for another crucial aspect – adopting a significantly improved micro-CT isotropic resolution. This advancement represents a notable difference compared to previous studies [4, 15]. By utilizing this enhanced resolution, we obtained more detailed and accurate three-dimensional images of the root canal system. This higher level of precision allowed us to make more reliable identification and quantification of the hard tissue debris, leading to more robust and meaningful findings.

Dentine debris accumulation can significantly impact the success of endodontic treatments, especially in infected canals, where microorganisms may thrive and maintain apical periodontitis [16, 17]. Moreover, hard tissue debris can hinder irrigants' proper flow and distribution during canal preparation [18, 19]. Despite the remarkable progress in endodontic techniques, recent studies have consistently reported substantial levels of hard tissue debris accumulation, ranging from 14.5% to 42.5% [8, 20]. The present findings revealed an even superior level of debris accumulation in the PUI group, with a mean of 59%, contrasting with the XP-endo, with a mean of 29%, proving that some supplementary cleaning approaches could be ineffective in more complex anatomies.

The hard tissue debris accumulation is closely associated with the intricate root canal anatomy. For instance, isthmuses, which are narrow areas connecting root canals, are often left untouched by instrumentation and potentially unaffected by irrigants, rendering them ideal reservoirs for debris accumulation [21]. Besides, canal curvature is another anatomical challenge that jeopardizes debris removal [22]. Given this context, it is essential to employ supplementary approaches to enhance the penetration and distribution of irrigants in such difficult-to-reach regions [23, 24]. For instance, our findings demonstrate that approximately half of the debris amount was accumulated in the isthmus area following root canal preparation.

In the present study, although no tested supplementary approaches could completely remove the hard tissue debris from the root canal system, corroborating previous studies [15, 25], they significantly reduced their amount. The XP-endo Finisher showed the highest debris reduction compared with PUI, not only for the total canal but also for the separate analysis of the isthmuses. This outcome could be attributed to its superior ability to distribute the irrigant compared to the PUI technique, as documented in a previous study [26]. The XP-endo Finisher likely achieves this due to its expanded action and high-speed rotation, which may agitate the irrigant solution more effectively. However, further investigations are needed to confirm this hypothesis.

In contrast to the present findings, two previous studies [15, 27] did not observe significant differences in hard tissue debris removal when comparing PUI and XP-endo Finisher. However, it's important to note that both of these studies utilized a less challenging canal configuration, Vertucci's class I, which lacks the complexity seen in the present study (Vertucci's class II), characterized by the presence of isthmuses. This suggests that the efficacy of these supplementary procedures may vary depending on the complexity of the root canal anatomy, particularly in cases involving isthmuses. Such distinctions provide valuable insights for optimizing debris removal strategies in diverse endodontic scenarios.

Conclusion

When testing XP-endo Finisher and PUI with Ultra X insert in the mesial root of mandibular molars with curvatures and isthmuses, both supplementary approaches reduced the amount of hard tissue debris resulting from canal preparation. However, the XP-endo Finisher demonstrated a significantly higher reduction compared to PUI. Despite this, no tested supplementary approaches could completely remove the debris from the root canal system or isthmus areas.

Author contribution

Warley O. Silva — Teeth selection and preparation, root canal preparation, data collection, and manuscript writing (first draft)

Pablo Amoroso-Silva — Statistical analysis

Patrícia Olivares — Teeth selection and preparation

Flávio R. F. Alves — manuscript writing and revision

Marília F. Marceliano-Alves — Study concept/design, supervision, and microtomographic analyses

Funding

This study was supported by grants from Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brazilian Governmental Institutions.

Declarations

Ethical approval All procedures performed in studies involving human participants were in accordance with the ethical standards of the institutional and/or national research committee and with the 1964 Helsinki declaration and its later amendments or comparable ethical standards.

Informed consent

Not applicable.

Conflict of interest

The authors declare no competing interests.

REFERENCES

1. Alves FR, Andrade-Junior CV, Marceliano-Alves MF, Perez AR, Rocas IN, Versiani MA, Sousa-Neto MD, Provenzano JC and Siqueira JF, Jr. (2016) Adjunctive Steps for Disinfection of the Mandibular Molar Root Canal System: A Correlative Bacteriologic, Micro-Computed Tomography, and Cryopulverization Approach. *Journal of Endodontics* 42:1667-1672. doi: 10.1016/j.joen.2016.08.003

2. Ricucci D and Siqueira JF, Jr. (2010) Biofilms and apical periodontitis: study of prevalence and association with clinical and histopathologic findings. *J Endod* 36:1277-1288. doi: 10.1016/j.joen.2010.04.007
3. Tahmasbi M, Jalali P, Nair MK, Barghan S and Nair UP (2017) Prevalence of Middle Mesial Canals and Isthmi in the Mesial Root of Mandibular Molars: An In Vivo Cone-beam Computed Tomographic Study. *J Endod* 43:1080-1083. doi: 10.1016/j.joen.2017.02.008
4. Versiani MA, Alves FR, Andrade-Junior CV, Marceliano-Alves MF, Provenzano JC, Rocas IN, Sousa-Neto MD and Siqueira JF, Jr. (2016) Micro-CT evaluation of the efficacy of hard-tissue removal from the root canal and isthmus area by positive and negative pressure irrigation systems. *Int Endod J* 49:1079-1087. doi: 10.1111/iej.12559
5. Bryce G, MacBeth N, Gulabivala K and Ng YL (2018) The efficacy of supplementary sonic irrigation using the EndoActivator((R)) system determined by removal of a collagen film from an ex vivo model. *Int Endod J* 51:489-497. doi: 10.1111/iej.12870
6. De-Deus G, Belladonna FG, Zuolo AS, Cavalcante DM, Carvalhal JCA, Simoes-Carvalho M, Souza EM, Lopes RT and Silva E (2019) XP-endo Finisher R instrument optimizes the removal of root filling remnants in oval-shaped canals. *Int Endod J* 52:899-907. doi: 10.1111/iej.13077
7. Virdee SS, Seymour DW, Farnell D, Bhamra G and Bhakta S (2018) Efficacy of irrigant activation techniques in removing intracanal smear layer and debris from mature permanent teeth: a systematic review and meta-analysis. *Int Endod J* 51:605-621. doi: 10.1111/iej.12877
8. Paque F, Laib A, Gautschi H and Zehnder M (2009) Hard-tissue debris accumulation analysis by high-resolution computed tomography scans. *J Endod* 35:1044-1047. doi: 10.1016/j.joen.2009.04.026
9. Yang Q, Liu MW, Zhu LX and Peng B (2020) Micro-CT study on the removal of accumulated hard-tissue debris from the root canal system of mandibular molars when using a novel laser-activated irrigation approach. *Int Endod J* 53:529-538. doi: 10.1111/iej.13250
10. Alves FRF, Paiva PL, Marceliano-Alves MF, Cabreira LJ, Lima KC, Siqueira JF, Jr., Rocas IN and Provenzano JC (2018) Bacteria and Hard Tissue Debris Extrusion and Intracanal Bacterial Reduction Promoted by XP-endo Shaper and Reciproc Instruments. *J Endod* 44:1173-1178. doi: 10.1016/j.joen.2018.04.007
11. Vertucci FJ (1984) Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 58:589-599. doi: 10.1016/0030-4220(84)90085-9
12. Schneider SW (1971) A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 32:271-275. doi: 10.1016/0030-4220(71)90230-1
13. de Pablo OV, Estevez R, Peix Sanchez M, Heilborn C and Cohenca N (2010) Root anatomy and canal configuration of the permanent mandibular first molar: a systematic review. *J Endod* 36:1919-1931. doi: 10.1016/j.joen.2010.08.055
14. Passalidou S, Calberson F, De Bruyne M, De Moor R and Meire MA (2018) Debris Removal from the Mesial Root Canal System of Mandibular Molars with Laser-activated Irrigation. *J Endod* 44:1697-1701. doi: 10.1016/j.joen.2018.06.007
15. De-Deus G, Belladonna FG, de Siqueira Zuolo A, Perez R, Carvalho MS, Souza EM, Lopes RT and Silva E (2019) Micro-CT comparison of XP-endo Finisher and passive ultrasonic irrigation as final irrigation protocols on the removal of accumulated hard-tissue debris from oval shaped-canals. *Clin Oral Investig* 23:3087-3093. doi: 10.1007/s00784-018-2729-y
16. Siqueira JF, Jr., Perez AR, Marceliano-Alves MF, Provenzano JC, Silva SG, Pires FR, Vieira GCS, Rocas IN and Alves FRF (2018) What happens to unprepared root canal walls: a correlative analysis using micro-computed tomography and histology/scanning electron microscopy. *Int Endod J* 51:501-508. doi: 10.1111/iej.12753
17. Siqueira Junior JF, Rocas IDN, Marceliano-Alves MF, Perez AR and Ricucci D (2018) Unprepared root canal surface areas: causes, clinical implications, and therapeutic strategies. *Braz Oral Res* 32:e65. doi: 10.1590/1807-3107bor-2018.vol32.0065

18. van der Sluis LW, Gambarini G, Wu MK and Wesselink PR (2006) The influence of volume, type of irrigant and flushing method on removing artificially placed dentine debris from the apical root canal during passive ultrasonic irrigation. *Int Endod J* 39:472-476. doi: 10.1111/j.1365-2591.2006.01108.x
19. Perez R, Neves AA, Belladonna FG, Silva E, Souza EM, Fidel S, Versiani MA, Lima I, Carvalho C and De-Deus G (2017) Impact of needle insertion depth on the removal of hard-tissue debris. *Int Endod J* 50:560-568. doi: 10.1111/iej.12648
20. Campello AF, Marceliano-Alves MF, Siqueira JF, Jr., Fonseca SC, Lopes RT and Alves FRF (2021) Unprepared surface areas, accumulated hard tissue debris, and dentinal crack formation after preparation using reciprocating or rotary instruments: a study in human cadavers. *Clin Oral Investig* 25:6239-6248. doi: 10.1007/s00784-021-03922-8
21. Siqueira JF, Jr., Alves FR, Versiani MA, Rocas IN, Almeida BM, Neves MA and Sousa-Neto MD (2013) Correlative bacteriologic and micro-computed tomographic analysis of mandibular molar mesial canals prepared by self-adjusting file, reciproc, and twisted file systems. *J Endod* 39:1044-1050. doi: 10.1016/j.joen.2013.04.034
22. Haupt F, Meinel M, Gunawardana A and Hulsman M (2019) Effectiveness of different activated irrigation techniques on debris and smear layer removal from curved root canals: a SEM evaluation. *Aust Endod J*. doi: 10.1111/aej.12342
23. Linden D, Boone M, De Bruyne M, De Moor R, Versiani MA and Meire M (2020) Adjunctive Steps for the Removal of Hard Tissue Debris from the Anatomic Complexities of the Mesial Root Canal System of Mandibular Molars: A Micro-Computed Tomographic Study. *J Endod* 46:1508-1514. doi: 10.1016/j.joen.2020.05.009
24. Chan R, Versiani MA, Friedman S, Malkhassian G, Sousa-Neto MD, Leoni GB, Silva-Sousa YTC and Basrani B (2019) Efficacy of 3 Supplementary Irrigation Protocols in the Removal of Hard Tissue Debris from the Mesial Root Canal System of Mandibular Molars. *J Endod* 45:923-929. doi: 10.1016/j.joen.2019.03.013
25. Zhao Y, Fan W, Xu T, Tay FR, Gutmann JL and Fan B (2019) Evaluation of several instrumentation techniques and irrigation methods on the percentage of untouched canal wall and accumulated dentine debris in C-shaped canals. *Int Endod J* 52:1354-1365. doi: 10.1111/iej.13119
26. Pacheco-Yanes J, Provenzano JC, Marceliano-Alves MF, Gazzaneo I, Perez AR, Goncalves LS and Siqueira JF, Jr. (2020) Distribution of sodium hypochlorite throughout the mesial root canal system of mandibular molars after adjunctive irrigant activation procedures: a micro-computed tomographic study. *Clin Oral Investig* 24:907-914. doi: 10.1007/s00784-019-02970-5
27. Leoni GB, Versiani MA, Silva-Sousa YT, Bruniera JF, Pecora JD and Sousa-Neto MD (2017) Ex vivo evaluation of four final irrigation protocols on the removal of hard-tissue debris from the mesial root canal system of mandibular first molars. *Int Endod J* 50:398-406. doi: 10.1111/iej.12630

FIGURE LEGEND

Figure 1. 3D micro-CT images: (A) before chemical-mechanical preparation; (B) after preparation with the Hyflex EDM system; and (C) after supplementary approach with Ultra-X tip in PUI.

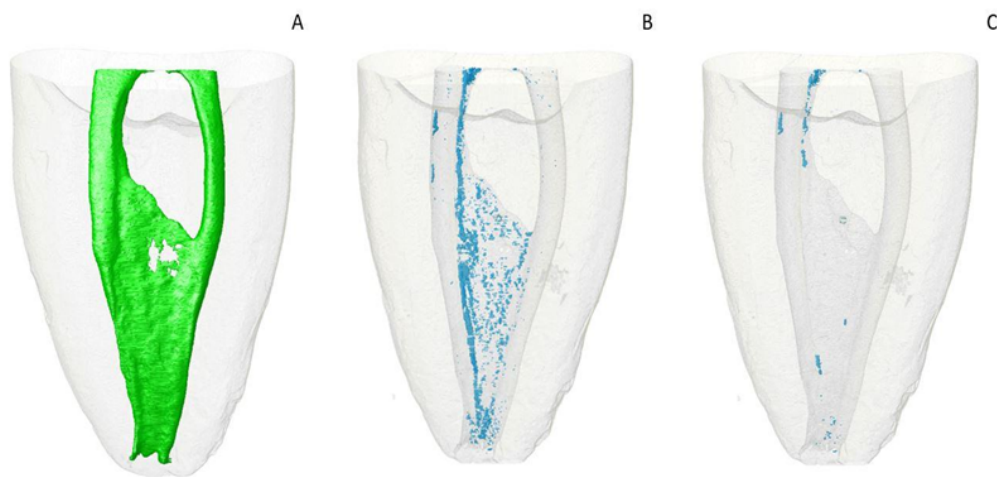


Table 1. Mean and standard deviation of the initial and final volume of debris (mm³) after additional procedures and the total removal percentage.

	Initial volume	Final volume	% removed
<i>Total canal</i>			
PUI	4.13 ± 1.09 ^{aA}	2.41 ± 0.88 ^{aB}	41.08 ± 16.99 ^a
XP-endo Finisher	4.25 ± 1.03 ^{aA}	1.11 ± 0.88 ^{bB}	71.33 ± 24.19 ^b
<i>Isthmus</i>			
PUI	2.16 ± 0.56 ^{aA}	0.95 ± 0.47 ^{aB}	52.02 ± 24.48 ^a
XP-endo Finisher	2.01 ± 0.53 ^{aA}	0.50 ± 0.30 ^{bB}	74.12 ± 15.48 ^b

Lowercase and capital letters show intra- and intergroup differences, respectively.