

Avaliação, por meio da microtomografia computadorizada, do acúmulo de debris dentinários após o preparo do canal com um instrumento único reciprocante

• **Laila Gonzales Freire** Discipline of Endodontics, Department of Restorative Dentistry, School of Dentistry, University of São Paulo, São Paulo, SP, Brazil • **Elaine Faga Iglecias** Discipline of Endodontics, Department of Restorative Dentistry, School of Dentistry, University of São Paulo, São Paulo, SP, Brazil • **Marcelo dos Santos** Discipline of Endodontics, Department of Restorative Dentistry, School of Dentistry, University of São Paulo, São Paulo, SP, Brazil • **Giulio Gavini** Discipline of Endodontics, Department of Restorative Dentistry, School of Dentistry, University of São Paulo, São Paulo, SP, Brazil

RESUMO | O objetivo do presente estudo foi avaliar e quantificar a presença de debris dentinários em canais curvos, após o preparo químico-cirúrgico com um instrumento único reciprocante, utilizando a microtomografia computadorizada (micro-CT). Vinte e quatro canais mesiais de molares inferiores foram submetidos a exames microtomográficos antes e após o preparo com instrumentos Reciproc R25, utilizando um microtomógrafo de raios X SkyScan 1176, a uma resolução de 17,42 µm. Após a reconstrução das imagens resultantes, o corregristo das mesmas foi realizado com o programa DataViewer. Os programas CTAn e CTvol foram utilizados para binarização dos objetos de interesse, análise volumétrica e reconstrução de modelos 3D. As análises de micro-CT revelaram debris dentinários acumulados no interior dos canais radiculares, ocupando uma porcentagem média de 3,4% em relação ao volume do canal. Concluiu-se que a micro-CT possibilitou identificar e quantificar debris dentinários produzidos após a instrumentação de canais mesiais de molares inferiores com um instrumento único reciprocante.

DESCRITORES | Microtomografia por Raio-X; Preparo de Canal Radicular; Camada de Esfregaço.

ABSTRACT | **Micro-computed tomography evaluation of hard-tissue debris accumulation after root canal preparation with a single-file reciprocating system** • The aim of the present study was to evaluate and quantify the presence of hard-tissue debris inside curved canals, after root canal preparation with a single-file reciprocating system, with the aid of microcomputed tomography (micro-CT). Twenty-four mesial canals of mandibular molars were subjected to microtomographic scanning before and after preparation with R25 Reciproc instruments, using the SkyScan 1176 X-ray microtomograph, at a resolution of 17.42 µm. After reconstruction of the resulting images, co-registration was accomplished with DataViewer software. The CTAn and CTvol softwares were used for binarization of the objects of interest, volumetric analysis and 3D model reconstruction. Analysis of the micro-CT scans revealed debris accumulated inside the root canal, occupying an average 3.4% of the canal's volume. It was concluded that micro-CT enabled identifying and quantifying the hard-tissue debris produced after instrumentation of mesial canals of mandibular molars with a single-file reciprocating system.

DESCRIPTORS | X-Ray Microtomography; Root Canal Preparation; Smear Layer.

CORRESPONDING AUTHOR | • **Laila Gonzales Freire** Discipline of Endodontics, Department of Restorative Dentistry, School of Dentistry, University of São Paulo • **Av. Professor Lineu Prestes, 2227** São Paulo, SP, Brazil • **05508-000** E-mail: lailaifreire@gmail.com

• Received May 26, 2014 • Accepted Aug 29, 2014

INTRODUÇÃO

O tratamento endodôntico tem por objetivo eliminar microorganismos, restos pulpares e necróticos, além de modelar o sistema de canais radiculares, a fim de facilitar os procedimentos de irrigação e obturação.¹

Muitas vezes essa tarefa pode representar um desafio, em virtude da complexa anatomia do canal radicular, incluindo curvaturas, istmos, canais acessórios e ramificações apicais,^{2,3} os quais facilitam o acúmulo de debris orgânicos e inorgânicos, formando o chamado magma dentinário.

O magma dentinário é uma consequência da instrumentação do canal, e sua permanência pode influenciar negativamente o tratamento, caso microorganismos remanescentes continuem a desenvolver-se em áreas não preenchidas pelo material obturador.⁴

Desde a introdução de técnicas de preparo do canal que utilizam instrumentos únicos, os sistemas com movimento reciprocante como Reciproc (VDW, Munique, Alemanha) tornaram-se populares.⁵ Seu movimento consiste em uma rotação para a esquerda com o intuito de cortar dentina, e uma subsequente rotação horária impedindo que o instrumento se prenda às paredes do canal, o que aumentaria sua resistência à fadiga cíclica.⁶ Em contrapartida, o movimento reciprocante parece permitir maior acúmulo de debris nas áreas mais retentivas do canal radicular.⁷

A irrigação com seringa e agulha ainda é o método mais tradicional utilizado para a irrigação dos canais radiculares, apesar de suas conhecidas limitações.⁸ Diversos modelos experimentais são usados para avaliar a efetividade de técnicas de irrigação; contudo, a maioria envolve seções transversais ou longitudinais das raízes, fornecendo uma visão bidimensional, portanto limitada.^{9,10} Além disso, alterações na localização dos debris podem ocorrer durante a manipulação dos espécimes.¹¹

Superando essas dificuldades, a microtomografia

computadorizada (micro-CT) apresenta-se como um método de pesquisa mais confiável e menos invasivo, que possibilita uma avaliação completa e detalhada do canal radicular, em todos os planos, e o registro de parâmetros morfológicos do interior de materiais sem destruí-los.^{12,13}

Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar e quantificar a presença de debris dentinários em canais mesiais de molares inferiores, após o preparo químico-cirúrgico com um instrumento único reciprocante, utilizando a microtomografia computadorizada.

MATERIAL E MÉTODOS

Após a aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa da Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo (FOUSP; protocolo n. 15598), vinte e quatro primeiros e segundos molares inferiores humanos cedidos pelo Banco de Dentes Permanentes Humanos da FOUSP foram selecionados.

Os dentes apresentavam câmara pulpar intacta, raízes mesiais com rizogênese completa, e ângulo de curvatura entre 25° e 35°, mensurados com o auxílio do programa Image J (National Institutes of Health, Maryland, EUA) e de acordo com o método de Schneider.¹⁴ Foram excluídos os dentes com calcificações pulpares, reabsorções, tratamento endodôntico anterior e fraturas radiculares. Ainda, aqueles canais cuja patência não fosse conseguida após a cirurgia de acesso também foram excluídos do estudo.

O tamanho dos dentes foi padronizado em 17 mm, por meio do nivelamento de suas superfícies oclusais, utilizando um disco de diamante acoplado a um micrótomo de tecido duro (Exttec Labcut 1010, Tóquio, Japão). Foi realizada a cirurgia de acesso convencional com brocas esféricas n. 1015 e Endo-Z (Maillefer, Ballaigues, Suíça) em alta rotação. Os canais foram explorados com um instrumento do tipo K #10 (Maillefer, Ballaigues, Suíça), e o comprimento de trabalho foi determinado quando a extremidade desse instrumento era vista através

do forame apical, com o auxílio de um microscópio operatório com aumento de oito vezes, recuando-se um milímetro. Nesse momento, também foram excluídos da amostra os canais em que o instrumento K #15 (Maillefer, Ballaigues, Suíça) estivesse folgado em seu interior.

Exames microtomográficos

Os exames microtomográficos foram realizados com um microtomógrafo de raios X SkyScan 1176 (SkyScan, Kontich, Bélgica). Cada espécime foi submetido a dois escaneamentos: um pré-operatório e outro pós-preparo. Os dentes foram incluídos em material de moldagem de alta precisão à base de vinil polisiloxano com as cavidades de acesso voltadas para baixo, com o intuito de obter um reposicionamento preciso do dente durante a aquisição das imagens pré e pós-operatórias. Em seguida, grupos de 7 dentes foram posicionados em um suporte para amostra (isopor tubular para modelo Skyscan 1176) e levados à cama de fibra de carbono do microtomógrafo. Os espécimes foram escaneados com uma potência de 90 kV e 278 μ A, rotacionados a 360° com 0,5° de passo de rotação, produzindo uma imagem com tamanho de voxel de 17,42 μ m. O filtro utilizado foi o de cobre + alumínio, e cada espécime levou em média 24 min e 40 s para completar o escaneamento.

Após a aquisição das imagens das projeções 2D, deu-se início à etapa de reconstrução das seções transversais, realizada no programa NRecon (SkyScan, Kontich, Bélgica).

Preparo químico-cirúrgico

Para a realização do preparo químico-cirúrgico, as raízes dos dentes foram cobertas com silicona de condensação com o objetivo de reter a solução irrigadora intracanal, evitando-se que a mesma extravasasse pelo forame apical.

Os canais mesiais foram pré-alargados com uma lima manual do tipo K #15. Em seguida os instru-

mentos Reciproc® R25 (VDW GmbH, Munique, Alemanha) foram utilizados, acionados com o motor elétrico VDW.Silver® (VDW GmbH, Munique, Alemanha), ajustado no movimento reciprocante. Os canais foram preparados por um único operador, de acordo com as instruções do fabricante: inserção lenta do instrumento no canal radicular em movimento de vai e vem e remoção após 3 avanços, com pouca pressão apical. Esse procedimento repetiu-se até o comprimento real de trabalho estabelecido.

A cada retirada do instrumento, a câmara pulpar era preenchida com gel de Endo PTC (Formula e Ação, São Paulo, SP, Brasil) e os canais eram irrigados com 2 mL de NaOCl a 1% (Formula e Ação, São Paulo, SP, Brasil). O comprimento de trabalho também era recapitulado nesse momento, com uma lima manual do tipo K #10. Foram utilizadas seringa descartável tipo luer lock (Ultradent, São Paulo, SP, Brasil) e agulha NaviTips tamanho 30 (Ultradent, São Paulo, SP, Brasil), posicionada o mais apicalmente possível sem que a mesma se prendesse às paredes do canal, sempre em movimentos de vai e vem.

Após o término do preparo químico-cirúrgico, foi realizada a irrigação final com 5 mL de NaOCl a 1%, seguida de 5 mL de EDTA a 17% (Formula e Ação, São Paulo, SP, Brasil) e mais 5 mL de NaOCl a 1%. A seguir, os canais foram aspirados com uma cânula suctora do tipo Capillary Tip (Ultradent, São Paulo, SP, Brasil) e secos com pontas de papel absorvente estéreis Reciproc R25.

A silicona de condensação foi então removida, e os dentes foram reposicionados no porta-amostra para a realização do escaneamento pós-preparo.

Metodologia de avaliação

Primeiramente, foi utilizado o programa Data-Viewer (SkyScan, Kontich, Bélgica) para o correjistro de dois conjuntos de imagens, um usado como referência (ref) e outro como alvo (tar), a fim de alinhar as imagens geometricamente (diff). O resultado foi um novo registro de dados das imagens

referência e alvo.

Em seguida, os conjuntos de imagens foram abertos no programa CTAn (SkyScan, Kontich, Bélgica) para o cálculo de parâmetros quantitativos e para a construção dos modelos visuais em 3D. Para cada espécime, a seção que mostrasse a separação total das entradas dos canais mesiais em relação ao canal distal, no nível da câmara pulpar, era escolhida como “top”, e o primeiro corte apical em que fosse possível visualizar a raiz era selecionado como “bottom”.

O novo volume de interesse era carregado novamente no programa CTAn, agora apenas com a raiz mesial, e o intervalo na escala de cinza necessário para reconhecer cada objeto a ser avaliado era determinado em um histograma de densidade, processo este denominado binarização ou segmentação. O resultado final foi uma imagem binária composta por pixels pretos que representam os espaços vazios (ar), ou brancos, que representam o objeto de interesse.

A seguir, a ferramenta *custom processing* era utilizada para um processamento personalizado das imagens, em que funções diversas e operações matemáticas eram executadas por meio da criação

de *task lists*, ou listas de tarefas.

O resultado final foi a análise volumétrica e o modelo 3D de um determinado objeto apenas. Assim, foram criadas listas-padrão distintas para segmentar o canal radicular, a dentina e os debris dentinários.

O material com densidade similar à da dentina nas imagens pós-preparo, em regiões previamente ocupadas por ar no espaço do canal pré-operatório, foi identificado como debris e quantificado pela interseção entre as imagens antes e depois do preparo do canal (Figura 1).

Para o cálculo das porcentagens de debris, tomou-se como referência o volume do canal pós-preparo sem debris, obtido por meio da operação OR do plug-in *Bitwise Operations*. Assim, as imagens binárias do canal pré e pós-operatórios foram somadas, eliminando-se os debris.

A porcentagem de debris produzidos após o preparo foi calculada utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\% \text{ debris pós-preparo} = \frac{\text{volume de debris pós-preparo} \times 100}{\text{volume do canal pós-preparo sem debris}}$$

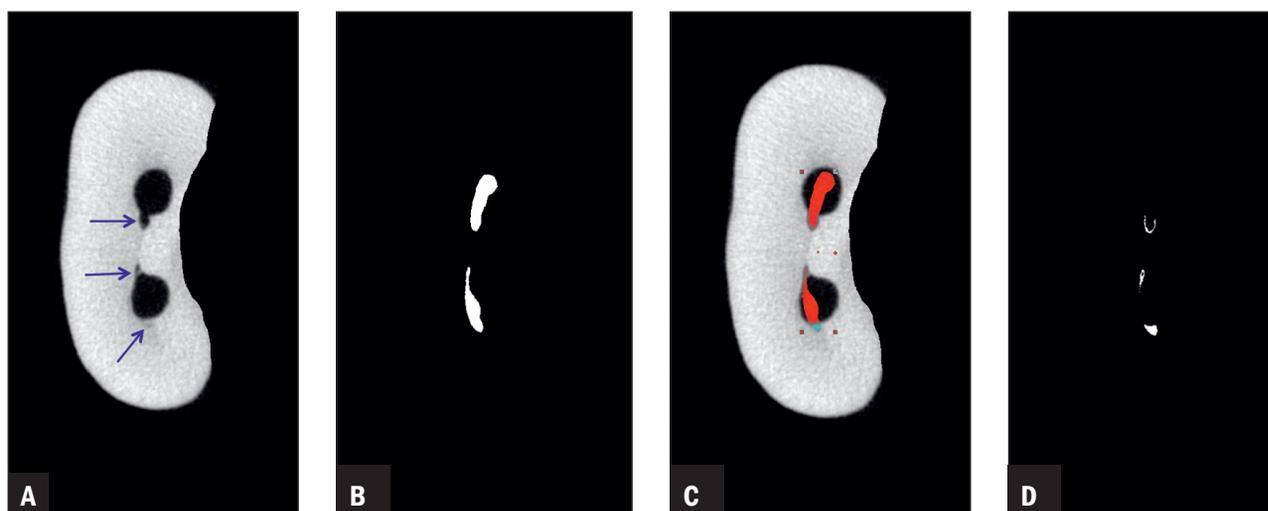


Figura 1 | Avaliação dos debris dentinários. **A:** Imagem original do canal pós-preparo; **B:** Imagem binária do canal no tempo pré-operatório; **C:** Sobreposição de A e B: interseção em azul; **D:** Interseção de A e B = debris binarizados: o material com densidade similar à da dentina nas imagens pós-preparo, em regiões previamente ocupadas por ar no espaço do canal no pré-operatório, foi identificado como sendo debris (setas azuis em A).



Figura 2 | Modelos 3D representativos. **A:** Canal radicular antes do preparo (verde); **B:** Canal radicular após o preparo (vermelho); **C:** Debris produzidos após o preparo (preto), sobrepostos à anatomia final do canal radicular (vermelho).

RESULTADOS

As análises de micro-CT revelaram ser possível identificar e mensurar o acúmulo de debris dentinários após o preparo de canais mesiais de molares inferiores. Os instrumentos Reciproc R25 produziram debris dentinários, os quais permaneceram no interior dos canais radiculares, ocupando, em média, 3,40% do volume do canal.

A avaliação qualitativa das reconstruções tridimensionais e secções transversais dos espécimes mostrou que a maioria dos debris acumulou-se nas áreas não instrumentadas, tais como istmos, projeções dos canais principais e ramificações.

A Figura 2 mostra o espaço do canal radicular antes do preparo (verde), após o preparo (vermelho) e os debris produzidos após o preparo do canal (preto). Na Figura 3, as linhas pontilhadas indicam a localização aproximada das secções transversais correspondentes.

DISCUSSÃO

A microtomografia computadorizada permitiu avaliar tridimensionalmente a anatomia do canal radicular original e o acúmulo de debris dentinários,

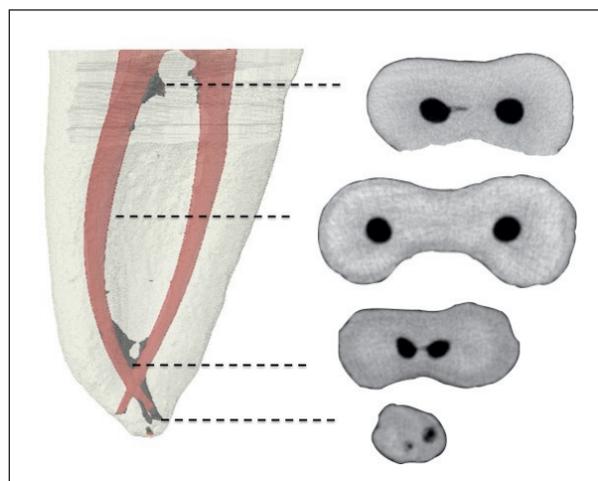


Figura 3 | Acúmulo de debris dentinários. As linhas pontilhadas indicam as secções transversais correspondentes.

mensurando o volume das regiões de interesse, sem qualquer manipulação dos espécimes. Talvez essa seja a maior vantagem desse método não-invasivo, que possibilita análises 3D de procedimentos sequenciais em um mesmo espécime, de modo quantitativo e qualitativo.

Essa tecnologia traz consigo ainda outros benefícios. Os dados armazenados podem ser trabalhados, gerando imagens de qualquer área de

interesse do dente para futuras análises comparativas.¹⁵ Além disso, é considerada uma importante ferramenta educacional para o treinamento pré-clínico em endodontia.

Desde os primeiros relatos sobre a utilização da tomografia computadorizada para a visualização das imagens dos canais radiculares, avanços tecnológicos levando ao desenvolvimento de microtomógrafos, aliados a avanços nos softwares, aprimoraram a resolução das imagens, diminuindo também o tempo necessário para o escaneamento das amostras.¹⁶

Assim, a micro-CT abriu novas possibilidades e tornou possível aos pesquisadores mensurar parâmetros até então desconhecidos, como a alteração de volume do canal por diferentes protocolos de instrumentação,¹⁵ detalhes da anatomia do canal radicular,⁵ quantidade e distribuição das áreas da parede do canal não tocadas pelo instrumento,¹⁷ volume de debris produzidos no canal radicular, e removidos dele, após o preparo,¹² volume de material obturador obtido por diversas técnicas de obturação,¹⁸ volume remanescente de medicação de hidróxido de cálcio,¹⁹ além de propiciar análises relativas a outros métodos de pesquisa.²⁰

Os primeiros a validar um método para o estudo tridimensional do acúmulo de debris dentinários foram Paqué *et al.*¹² Eles identificaram como debris o espaço do canal original ocupado por material radiopaco após a instrumentação rotatória, encontrando um volume em torno de 29,1%. Em seguida, uma análise por espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDX) comparou a quantidade de cálcio e de fósforo desse material com a do tecido dentinário, confirmando que debris eram depositados no canal sob a forma de pequenas lascas de dentina. Vale salientar que, propositalmente, os autores não utilizaram nenhuma irrigação.

Nos anos seguintes, outros estudos foram realizados com micro-CT, comparando diferentes protocolos de irrigação.^{7,21-25} Em todos eles,

reconstruções tridimensionais de canais mesiais de molares inferiores mostraram o acúmulo de debris dentinários em regiões de istmos, ramificações e canais acessórios, assim como no presente estudo.

A literatura relata que a anatomia de molares inferiores é variada e que a incidência de istmos ocorre em todos os níveis da raiz mesial,² variando entre 17,25% e 50,25% nos 5 mm apicais.³ Neste estudo, a análise da anatomia pré-operatória dos espécimes identificou irregularidades nas mais diversas posições ao longo do canal radicular.

Nas porções do canal onde a secção transversal é circular, normalmente os debris são levados coronalmente pelas lâminas do instrumento. Quando há espaço lateralmente, como no caso da presença de istmos, o instrumento pode empurrar os debris para essa região.⁷

Após a avaliação dos modelos 3D e das seções transversais das amostras, foi possível observar restos de tecido duro, não só nas áreas de istmos, mas também em irregularidades das paredes dentinárias ao longo do comprimento do canal, concentrando-se mais nos terços médio e apical. Nessas regiões, o espaço radiolúcido do canal se tornou rapiopaco, desaparecendo após a instrumentação.

Durante o preparo do canal, foi utilizado o protocolo de irrigação com NaOCl a 1%, gel de Endo-PTC e EDTA a 17%, resultando em uma média de debris acumulados na ordem de 3,4%. O uso dessas substâncias justifica-se pela capacidade de dissolução tecidual do NaOCl, combinado com um lubrificante que diminui o atrito do instrumento e facilita a suspensão dos detritos, e de um agente quelante que vai atuar na porção inorgânica do magma dentinário.²⁵

Outros trabalhos que utilizaram a mesma metodologia de avaliação encontraram resultados com valores entre 3,8% e 11,35%.^{21,23-25} No estudo de Robinson *et al.*,⁷ no entanto, 19,5% de debris foram acumulados em canais preparados com instrumen-

to único reciprocante, um valor estatisticamente superior ao do grupo rotatório, em que se produziram 10,6% de debris. Todavia, eles não utilizaram nenhum agente quelante durante a irrigação final.

Por outro lado, Paqué *et al.*,²² ao avaliarem um sistema de instrumentação que agrega irrigação simultânea por meio de um dispositivo acoplado no corpo do instrumento — a SAF (*self adjusting file*) —, obtiveram um volume menor de debris (1,7%). Paqué *et al.*²¹ conseguiram uma redução em torno de 50% após a ativação da substância química com irrigação ultrassônica passiva.

Trabalhos utilizando diferentes metodologias concordam que, apesar de nenhuma técnica remover completamente os debris acumulados durante a instrumentação, os métodos que envolvem a ativação da substância química apresentam melhores resultados na remoção de restos de tecido orgânico e inorgânico.^{9,10}

O principal motivo é atribuído à limitação do alcance da substância química para além da ponta da agulha,³ e ao efeito “vapor lock”.²⁶ Em uma situação clínica em que a raiz está delimitada pelo tecido perirradicular, o canal se comporta como um sistema fechado, causando esse efeito, o qual impede o irrigante de alcançar efetivamente o comprimento de trabalho. Portanto, para serem clinicamente relevantes, estudos que avaliam a irrigação devem simular um sistema fechado que previna a extrusão passiva de irrigantes. Essa foi a razão de se cobrirem as raízes dos dentes com silicona de condensação no presente estudo.

É consenso entre os autores que a não remoção do magma dentinário pode trazer consequências ao tratamento endodôntico. O acúmulo de debris dentinários possivelmente impede o fluxo de irrigantes, neutraliza a eficiência de medicamentos, interfere no preenchimento do canal radicular e mantém a sobrevivência microbiana dentro da complexa anatomia do canal radicular.^{1,17,20}

Métodos utilizando equipamentos de última

geração em microscopia óptica,¹¹ eletrônica ou confocal,^{9,10} ainda que com validade indiscutível, possibilitam apenas a visualização de partes da superfície de uma amostra ou de cortes selecionados, não fornecendo, portanto, informações a respeito de volume.

Ainda, os procedimentos de seção dos espécimes podem resultar em deposição de magma,³ levando a interpretações errôneas.^{11,13} Também acabam limitando a utilização de dentes multirradiculares, por serem mais difíceis de manipular.

Avaliações tridimensionais por micro-CT indicam que nenhuma técnica é capaz de remover por completo restos de tecido duro acumulados. Assim sendo, resultados advindos de métodos bidimensionais que avaliam apenas uma parte do canal devem ser interpretados com cautela.

A micro-CT, como todo método de pesquisa, possui algumas limitações, identificadas neste trabalho e também por outros pesquisadores. A primeira é a impossibilidade de visualização de tecidos não mineralizados, por se tratar de uma tecnologia baseada em emissão de raios X. Especialmente para o estudo do magma dentinário, o ideal seria uma metodologia capaz de detectar também a matéria orgânica.

Estudos anteriores com micro-CT também reportaram dificuldade em distinguir debris dentinários e a dentina radicular, devido à radiopacidade similar.^{12,25}

Acreditamos que essa dificuldade existe, mas pode ser superada seguindo todos os passos que envolvem a análise de imagens microtomográficas, de maneira criteriosa.

Ainda, a definição das imagens a serem estudadas depende da resolução do aparelho. No presente trabalho, algumas regiões de istmo muito estreitas, apesar de visualizadas nos cortes axiais, não puderam ser submetidas à análise e reconstrução 3D. Vale salientar que, quanto melhor a resolução, mais tempo será necessário para a aquisição das

imagens, reconstrução e análise, o que pode inviabilizar o estudo.

Pode-se citar também a necessidade de utilização de softwares de difícil entendimento e manipulação,²⁷ podendo levar a alguns erros processuais que se refletem nas medidas finais.²⁵ Ainda, tem-se o alto custo, dado o valor do microtomógrafo, dos pacotes de programas de computador e do treinamento, além de ser um processo trabalhoso, exigindo uma curva de aprendizado prolongada para obter os conhecimentos necessários.

Todos os canais utilizados foram instrumentados com instrumentos Reciproc R25, que operam em modo reciprocante e são indicados para canais estreitos e curvos. Eles possuem ponta de 25 mm e conicidade de 0,08 mm/mm nos últimos 3 mm, o que parece ser adequado para conseguir um fluxo hidrodinâmico dos irrigantes.⁷

Pesquisas mostram resultados favoráveis obtidos com o uso de instrumentos únicos em mo-

vimento recíprocante, salientando-se um menor tempo de trabalho,⁵ um aumento da resistência à fadiga cíclica⁶ e uma capacidade de modelagem similar a de uma sequência completa de instrumentos rotatórios.²⁰ No entanto, a qualidade da limpeza conseguida com esses instrumentos é controversa. Bürklein *et al.*⁵ encontraram boa capacidade de limpeza em canais curvos. Por outro lado, Robinson *et al.*⁷ reportaram mais acúmulo de debris em comparação com o sistema ProTaper.

Em conclusão, a instrumentação do canal radicular traz, como consequência evidente, o acúmulo de debris dentinários, independentemente da técnica ou instrumento utilizados. A micro-CT mostrou-se como uma excelente ferramenta metodológica para identificar e quantificar os debris remanescentes após o preparo do canal. Estudos futuros avaliando técnicas de limpeza e remoção de debris dentinários devem ser preferencialmente conduzidos com auxílio de métodos que permitam uma avaliação tridimensional como a micro-CT.

REFERÊNCIAS

1. Violich DR, Chandler NP. The smear layer in endodontics - a review. *Int Endod J.* 2010 Jan;43(1):2-15. doi: 10.1111/j.1365-2591.2009.01627.x.
2. Fan B, Pan Y, Gao Y, Fang F, Wu Q, Gutmann JL. Three-dimensional morphologic analysis of isthmuses in the mesial roots of mandibular molars. *J Endod.* 2010 Nov;36(11):1866-9. doi: 10.1016/j.joen.2010.08.030.
3. Mannocci F, Peru M, Sherriff M, Cook R, Pitt Ford TR. The isthmuses of the mesial root of mandibular molars: a micro-computed tomographic study. *Int Endod J.* 2005 Aug;38(8):558-63. doi: 10.1111/j.1365-2591.2005.00994.x.
4. Endal U, Shen Y, Knut A, Gao Y, Haapasalo M. A High-resolution Computed Tomographic Study of Changes in Root Canal Isthmus Area by Instrumentation and Root Filling. *J Endod.* 2011 Feb;37(2):223-7. doi: 10.1016/j.joen.2010.10.012.
5. Bürklein S, Hinschitzka K, Dammaschke T, Schäfer E. Shaping ability and cleaning effectiveness of two single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth: Reciproc and WaveOne versus Mtwo and ProTaper. *Int Endod J.* 2012 May;45(5):449-61. doi: 10.1111/j.1365-2591.2011.01996.x.
6. Gavini G, Caldeira CL, Akisue E, Candeiro GTM, Kawakami AS. Resistance to flexural fatigue of Reciproc R25 files under continuous rotation and reciprocating movement. *J Endod.* 2012 May;38(5):684-7. doi: 10.1016/j.joen.2011.12.033.
7. Robinson JP, Lumley PJ, Cooper PR, Grover LM, Walmsley AD. Reciprocating root canal technique induces greater debris accumulation than a continuous rotary technique as assessed by 3-dimensional micro-computed tomography. *J Endod.* 2013 Aug;39(8):1067-70. doi: 10.1016/j.joen.2013.04.003.
8. Boutsoukias C, Verhaagen B, Versluis M, Kastrinakis E, Wesselink PR, Van der Sluis LW. Evaluation of irrigant flow in the root canal using different needle types by an unsteady computational fluid dynamics model. *J Endod.* 2010 May;36(5):875-9. doi: 10.1016/j.joen.2009.12.026.
9. Abarajithan M, Dham S, Velmurugan N, Valerian-Albuquerque D, Ballal S, Senthilkumar H. Comparison of Endovac

- irrigation system with conventional irrigation for removal of intracanal smear layer: an in vitro study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2011 Sept;112(3):407-11. doi: 10.1016/j.tripleo.2011.02.024.
10. Al-Ali M, Sathorn C, Parashos P. Root canal debridement efficacy of different final irrigation protocols. *Int Endod J.* 2012 Oct;45(10):898-906. doi: 10.1111/j.1365-2591.2012.02046.x.
 11. De-Deus G, Reis C, Paciornik S. Critical appraisal of published smear layer-removal studies: methodological issues. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2011 Oct;112(4):531-43. doi: 10.1016/j.tripleo.2011.01.046.
 12. Paqué F, Laib A, Gautschi H, Zehnder M. Hard-tissue debris accumulation analysis by high-resolution computed tomography scans. *J Endod.* 2009 Jul;35(7):1044-7. doi: 10.1016/j.joen.2009.04.026.
 13. Freire LG, Gavini G, Cunha RS, Santos Md. Assessing apical transportation in curved canals: comparison between cross-sections and micro-computed tomography. *Braz Oral Res.* 2012 May-Jun;26(3):222-7. doi.org/10.1590/S1806-83242012000300007.
 14. Schneider SW. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1971 Aug;2(32):273-5. doi: 10.1016/0030-4220(71)90230-1.
 15. Peters OA, Schönenberger K, Laib A. Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J.* 2001 Apr;34(3):221-30. doi: 10.1046/j.1365-2591.2001.00373.x.
 16. Dowker S, Davis G, Elliott J. X-ray microtomography—nondestructive three-dimensional imaging for in vitro endodontic studies. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 1997 Apr;83(4):510-6. doi: 10.1016/S1079-2104(97)90155-4.
 17. Metzger Z, Zary R, Cohen R, Teperovich E, Paqué F. The quality of root canal preparation and root canal obturation in canals treated with rotary versus self-adjusting files: a three-dimensional micro-computed tomographic study. *J Endod.* 2010 Sept;36(9):1569-73. doi: 10.1016/j.joen.2010.06.003.
 18. Hammad M, Qualtrough A, Silikas N. Evaluation of root canal obturation: a three-dimensional in vitro study. *J Endod.* 2009 Apr;35(4):541-4. doi: 10.1016/j.joen.2008.12.021.
 19. Wiseman A, Cox TC, Paranjpe A, Flake NM, Cohenca N, Johnson JD. Efficacy of sonic and ultrasonic activation for removal of calcium hydroxide from mesial canals of mandibular molars: a microtomographic study. *J Endod.* 2011 Feb;37(2):235-8. doi: 10.1016/j.joen.2010.11.019.
 20. Siqueira JF Jr, Alves FR, Versiani MA, Rôças IN, Almeida BM, Neves 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 Aug;39(8):1044-50. doi: 10.1016/j.joen.2013.04.034.
 21. Paqué F, Boessler C, Zehnder M. Accumulated hard tissue debris levels in mesial roots of mandibular molars after sequential irrigation steps. *Int Endod J.* 2011 Feb;44(2):148-53. doi: 10.1111/j.1365-2591.2010.01823.x.
 22. Paqué F, Al-Jadaa A, Kfir A. Hard-tissue debris accumulation created by conventional rotary versus self-adjusting file instrumentation in mesial root canal systems of mandibular molars. *Int Endod J.* 2012 May;45(5):413-8. doi: 10.1111/j.1365-2591.2011.01991.x.
 23. Paqué F, Rechenberg DK, Zehnder M. Reduction of hard-tissue debris accumulation during rotary root canal instrumentation by etidronic acid in a sodium hypochlorite irrigant. *J Endod.* 2012 May;38(5):692-5. doi: 10.1016/j.joen.2011.12.019.
 24. Robinson JP, Lumley PJ, Claridge E, Cooper PR, Grover LM, Williams RL, et al. An analytical Micro CT methodology for quantifying inorganic dentine debris following internal tooth preparation. *J Dent.* 2012 Nov;40(11):999-1005. doi: 10.1016/j.jdent.2012.08.007.
 25. De-Deus G, Marins J, Neves A, Reis C, Fidel S, Versiani MA, et al. Assessing Accumulated Hard-tissue Debris Using Micro-computed Tomography and Free Software for Image Processing and Analysis. *J Endod.* 2014 Feb;40(2):271-6. doi: 10.1016/j.joen.2013.07.025.
 26. Tay FR, Gu L, Schoeffel GJ, Wimmer C, Susin L, Zang K, et al. Effect of vapor lock on root canal debridement by using a side-vented needle for positive-pressure irrigant delivery. *J Endod.* 2010 Apr;36(4):745-50. doi: 10.1016/j.joen.2009.11.022.
 27. Gao Y, Peters OA, Wu H, Zhou X. An application framework of three-dimensional reconstruction and measurement for endodontic research. *J Endod.* 2009 Feb;35(2):269-74. doi: 10.1016/j.joen.2008.11.011.