

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 30/09/2026.



UNESP - Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Odontologia de Araraquara



Airton Oliveira Santos Júnior

**Acurácia diagnóstica, planejamento estratégico e segmentação baseada em
inteligência artificial de estruturas da cavidade pulpar por meio de imagens
tridimensionais**

Araraquara
2024



UNESP - Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Odontologia de Araraquara



Airton Oliveira Santos Júnior

Acurácia diagnóstica, planejamento estratégico e segmentação baseada em inteligência artificial de estruturas da cavidade pulpar por meio de imagens tridimensionais

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Odontologia de Araraquara, para obtenção do título de Doutor em Odontologia, na Área de Endodontia.

Orientador: Prof. Dr. Mário Tanomaru Filho

Araraquara
2024

S237a

Santos Júnior, Airton Oliveira

Acurácia diagnóstica, planejamento estratégico e segmentação baseada em inteligência artificial de estruturas da cavidade pulpar por meio de imagens tridimensionais / Airton Oliveira Santos Júnior. -- Araraquara, 2024

208 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara

Orientador: Mario Tanomaru Filho

1. Endodontia. 2. Inteligência artificial. 3. Microtomografia por Raio-X. 4. Obtenção do canal radicular. 5. Retratamento. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Airton Oliveira Santos Júnior

Acurácia diagnóstica, planejamento estratégico e segmentação baseada em inteligência artificial de estruturas da cavidade pulpar por meio de imagens tridimensionais

Comissão julgadora

Tese para obtenção do grau de Doutor em Odontologia

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Mário Tanomaru Filho

2º Examinador: Prof. Dr. Marco Antonio Hungaro Duarte

3º Examinador: Profa. Dra. Deborah Queiroz de Freitas França

4º Examinador: Prof. Dr. José Mauricio dos Santos Nunes Reis

Araraquara, 30 de setembro de 2024.

DADOS CURRICULARES

Airton Oliveira Santos Júnior

NASCIMENTO: 13 de junho de 1993 – Castanhal – Pará

FILIAÇÃO: Airton Oliveira Santos (*In memoriam*)
Aurea Cristina de Ataíde Santos

2011 – 2016: Graduação em Odontologia pelo Centro Universitário do Estado do Pará – CESUPA

2016 – 2018: Especialização em Endodontia pelo Hospital de Reabilitação de Anomalias Craniofaciais da Universidade de São Paulo, HRAC – USP

2018 – 2020: Pós-Graduação em Odontologia – Área de Endodontia, Nível Mestrado, na Faculdade de Odontologia de Araraquara, Universidade Estadual Paulista – UNESP

Março de 2023 a setembro de 2023: Doutorado Sanduíche - Faculdade de Medicina, Universidade Católica de Leuven (KU Leuven), OMFS-IMPACT Research Group, Bélgica.

2020 – 2024: Pós-Graduação em Odontologia – Área de Endodontia, Nível Doutorado, na Faculdade de Odontologia de Araraquara, Universidade Estadual Paulista – UNESP

Dedico este trabalho à minha **mãe**, que, sob muito sol, me fez chegar até aqui, na
sombra.

AGRADECIMENTOS

Sou profundamente grato a **Deus** por todas as bênçãos recebidas ao longo desta jornada, pela força e perseverança que me foram concedidas, e por colocar em meu caminho pessoas especiais que foram fundamentais para alcançar este objetivo. Agradeço pela saúde e disposição que me permitiram concluir esses seis anos e meio de pós-graduação, mesmo estando longe da minha família. Além disso, sou grato pelo cuidado com a saúde dos meus familiares durante todo esse período de distanciamento.

Com todo o meu coração, agradeço à minha mãe, **Aurea Cristina de Ataíde Santos**, pelo amor incondicional que sempre me dedicou. Sua incansável dedicação em me proporcionar tudo o que era necessário para que eu pudesse seguir meus estudos, muitas vezes colocando minhas necessidades acima das suas, é algo que guardarei para sempre com imensa gratidão. Sua orientação para que eu trilhasse o caminho do bem, do respeito e da dignidade, assim como seu constante incentivo e valorização da educação, foram pilares fundamentais na realização dos meus sonhos. Sou profundamente grato por todas as renúncias que fez para que eu tivesse as melhores oportunidades e pelas condições que me ofereceu para que nossos sonhos, que são também seus, se tornassem realidade com esforço e amor. Tenho um orgulho imenso de ser seu filho e serei eternamente grato por todo o apoio que recebi. Te amo além das nossas vidas.

Gostaria de agradecer à minha tia, **Hellen Cristina de Ataíde Silva**, e ao meu padrasto, **Moises da Silva Ramos**, pelo inestimável apoio e por sempre valorizarem a continuidade dos meus estudos. O incentivo e a confiança de vocês foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente nesta jornada acadêmica, sempre me encorajando a alcançar meus objetivos e reconhecendo a educação como essencial para o meu crescimento pessoal e profissional.

Com imensa gratidão, agradeço ao meu orientador, **Prof. Dr. Mário Tanomaru Filho**, por todo o apoio inestimável e orientação ao longo dessa jornada. Desde o primeiro dia, sua incansável dedicação à pesquisa e o estímulo constante que me ofereceu foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese e para a minha formação como pesquisador. A admiração que tenho por sua competência é enorme, e as lições que aprendi sobre rigor científico, análise de dados e escrita acadêmica são aprendizados que levarei comigo para sempre. A confiança que o senhor

depositou em mim, junto com o incentivo contínuo para que eu superasse meus próprios limites, foi essencial para que eu alcançasse mais do que imaginava ser possível. Sou profundamente grato por cada oportunidade única que me foi concedida, pela paciência e apoio em cada etapa, e pela sua disponibilidade incondicional. Foi uma honra ser seu orientado e aprender com alguém de tamanha excelência. Obrigado por guiar meus passos e tornar essa jornada não apenas mais leve, mas também profundamente enriquecedora. Admiro muito o senhor e espero que possamos continuar essa parceria no futuro.

À Prof^a. Dr^a. Juliane Maria Guerreiro Tanomaru, sou profundamente grato por todo o apoio, dedicação e ensinamentos desde o início da minha trajetória acadêmica. Agradeço imensamente pela valiosa oportunidade de ter sido seu orientado no mestrado. Sua influência foi fundamental para o meu crescimento, e serei eternamente grato por ter tido a honra de tê-la ao meu lado nessa caminhada. Muito obrigado por tudo, Professora.

À Prof^a Dr^a Fernanda Ferrari Esteves Torres, gostaria de expressar minha profunda gratidão por tudo o que você fez ao longo desta jornada. Desde o momento em que nos conhecemos, quando eu estava iniciando o mestrado e você no doutorado, sempre a enxerguei como um exemplo de dedicação e foco. Sua determinação e excelência me inspiraram e guiaram em minha própria trajetória. Com o tempo, tive o privilégio de conhecê-la melhor, e nossa relação se transformou em uma grande amizade, algo que valorizo profundamente. Agradeço não apenas pela parceria científica, que foi essencial na construção desta tese, mas também pela amizade e apoio incondicional que sempre encontrei em você, minha amiga. Muito obrigado por tudo.

Ao Prof. Dr. Jäder Camilo Pinto, gostaria de expressar minha profunda gratidão por toda a dedicação, contribuição e ajuda ao longo da minha trajetória no mestrado e doutorado. Seus ensinamentos sobre rigor científico, a importância de conduzir testes pilotos e os conhecimentos estatísticos que compartilhou foram fundamentais para o meu desenvolvimento. Agradeço imensamente pelo apoio e dedicação incomparáveis durante as avaliações, na escrita e na construção de todos os artigos desta tese e em toda a minha trajetória científica. Você é um verdadeiro exemplo, meu amigo, e me sinto extremamente privilegiado por ter tido a oportunidade única de trabalhar com você.

À **Faculdade de Medicina da Universidade Católica de Leuven (KU Leuven), OMFS-IMPATh Research Group, na Bélgica**, sou profundamente grato pelo acolhimento e pela oportunidade única de viver sete meses fora do Brasil durante meu doutorado sanduíche. Essa experiência foi transformadora e inesquecível, e nenhuma palavra é suficiente para expressar minha gratidão por tudo que vivenciei. Agradeço de coração à **Profa. Dra. Reinhilde Jacobs** por ter me aceitado como seu orientado no exterior, pela atenção e supervisão cuidadosa dos meus trabalhos, e pelos conhecimentos valiosos que me transmitiu. Um agradecimento especial ao **Prof. Dr. Rocharles Cavalcante Fontenele**, um pesquisador e pessoa excepcional, que me acolheu e me guiou no fascinante mundo da radiologia odontológica e da inteligência artificial, despertando em mim uma verdadeira paixão por essas áreas. Obrigado, meu amigo, por se tornar um grande companheiro, por ser essa pessoa incrível e por me receber em sua casa, tornando essa experiência ainda mais enriquecedora e leve. Também sou grato a todos os amigos que me acolheram e com quem compartilhei muito conhecimento e momentos memoráveis morando no exterior, especialmente ao **Prof. Dr. Frederico Sampaio Neves**, cujo apoio e parceria foram fundamentais para o sucesso dos nossos resultados de pesquisa.

À minha querida amiga e irmã de coração, **Karina Ines Medina Carita Tavares**, agradeço de forma imensurável por tudo que você representa em minha vida. Conhecer você na pós-graduação foi um dos maiores presentes que a vida me ofereceu. Sua presença constante e incansável, seja nos momentos de alegria ou nas dificuldades, trouxe uma força que jamais imaginei ter. Sou profundamente grato por ter tido você ao meu lado em cada etapa, seja nos atendimentos clínicos, nos seminários, nos almoços ou em todas as pequenas coisas do nosso dia a dia. Sua dedicação, responsabilidade e generosidade são admiráveis, assim como sua fé inabalável e seu espírito leve e bem-humorado. Você é um verdadeiro exemplo para mim, e não tenho palavras suficientes para expressar o quanto sua amizade me ajudou a crescer como ser humano. Muito obrigado por tudo, minha irmã.

Aos amigos **Jonas, Raylson, Juliana, Wlton Felipe, Eduarda, Larissa e Raissa**, expresso minha profunda gratidão por sempre torcerem por mim e me incentivarem a seguir em frente. Um agradecimento especial ao **Jonas**, que conheci enquanto me preparava para o doutorado sanduíche, aprimorando meus conhecimentos em inglês. Ele foi um excelente professor e, com o tempo, tornou-se

um querido amigo, de grande coração. Até hoje continuamos com nossas aulas de inglês, que foram essenciais para melhorar minha escrita e fluência no idioma.

Aos **Professores Dr. André Ferreira Leite e Dr. Daniel de Almeida Decurcio** por integrarem minha banca de qualificação do doutorado, enriquecendo este trabalho com suas valiosas contribuições e discussões. Quero agradecer especialmente ao **Prof. Dr. André Ferreira Leite**, que não apenas se dedicou à leitura, mas também desempenhou um papel crucial na avaliação das imagens de TCFC e na redação desta tese.

Aos Professores que gentilmente aceitaram o convite para compor a banca de defesa desta tese de doutorado, **Prof. Dr. Marco Antonio Hungaro Duarte, Profa. Dra. Deborah Queiroz de Freitas França e Prof. Dr. José Mauricio dos Santos Nunes Reis**, expresso minha sincera gratidão pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições que enriqueceram e aprimoraram este trabalho.

Aos **Professores Doutores Gisele Faria, Idomeo Bonetti Filho, Fábio Luiz Camargo Villela Berbert e Renato de Toledo Leonardo**, expresso minha gratidão por todos os ensinamentos transmitidos ao longo da pós-graduação. Cada lição compartilhada será levada comigo com imenso respeito e reconhecimento.

À **Profª. Drª. Lidiane de Castro Pinto**, minha professora na Especialização em Endodontia no Hospital de Reabilitação de Anomalias Craniofaciais da Universidade de São Paulo – HRAC/USP. Sua percepção sobre meu potencial para a pós-graduação e as inúmeras oportunidades que me proporcionou, como a apresentação de trabalhos e a participação em projetos de pesquisa, foram essenciais para minha formação. Sou muito grato por todo o conhecimento compartilhado durante o curso de especialização. Além disso, agradeço por me indicar à FOAr-UNESP; não poderia ter escolhido um lugar melhor para realizar meu mestrado e doutorado.

Aos amigos de pós-graduação, pelo convívio enriquecedor e pelas valiosas trocas de experiências e ideias ao longo desses anos. Em especial, agradeço ao amigo **Pedro Luis Busto Rosim** pelo significativo apoio durante a execução da metodologia de alguns artigos desta tese.

À **Faculdade de Odontologia de Araraquara - FOAr, Universidade Estadual Paulista - UNESP**, representada pela **Profa. Dra. Patrícia Petromilli Nordi Sasso Garcia**, pela infraestrutura disponibilizada por esta instituição, que tem sido minha segunda casa ao longo dos últimos seis anos e meio. Além disso, agradeço

aos funcionários desta faculdade, pelo apoio e suporte inestimáveis durante essa jornada.

À **Faculdade de Odontologia de Bauru – FOB/USP**, agradeço pela parceria no desenvolvimento deste trabalho. Um agradecimento especial ao **Prof. Dr. Marco Antonio Hungaro Duarte** por permitir o uso do aparelho de micro-CT e por sua constante atenção e solicitude.

À **Faculdade de Odontologia de Piracicaba – FOP/UNICAMP**, pelo acesso ao equipamento de TCFC, essencial para a aquisição das imagens utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

Ao **Prof. Dr. Marcelo Gonçalves**, sou grato pela parceria e pela contribuição essencial na aquisição dos exames de TCFC para esta tese. Obrigado por sua sempre pronta disponibilidade e por manter as portas abertas para nós.

Ao **Laboratório Multiusuário da Faculdade de Odontologia de Araçatuba – FOA/UNESP e à FINEP** (FINEP/CT-INFRA - Convênio FINEP: 01.12.0530.00 – PROINFRA 01/2011) pelo acesso ao equipamento de Microtomografia Computadorizada SkyScan 1272.

À **CAPES** – O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

À **FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo** (Processos nº 2020/11012-3 e 2022/13774-3), agradeço imensamente pelo suporte financeiro essencial para a realização desta tese. Sou profundamente grato pelas bolsas de Doutorado - Fluxo Contínuo (Processo nº 2020/11012-3) e de Estágio de Pesquisa no Exterior - BEPE (Processo nº 2022/13774-3), que me foram concedidas e possibilitaram a concretização deste trabalho.

Santos Júnior AO. Acurácia diagnóstica, planejamento estratégico e segmentação baseada em inteligência artificial de estruturas da cavidade pulpar por meio de imagens tridimensionais [tese de doutorado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2024.

RESUMO

Publicação 1 – Desenvolvimento e validação de um algoritmo de inteligência artificial (IA) baseado em redes neurais convolucionais para a segmentação automática da câmara pulpar e do canal radicular em exames de tomografia computadorizada de feixe cônico (TCFC) de dentes unirradiculares (**Publicação 1**) e birradiculares (**Publicação 2**). A ferramenta de IA demonstrou excelente acurácia na segmentação de dentes unirradiculares (coeficiente de similaridade Dice [CSD]: 89–93%; 95% distância Hausdorff [DH]: 0,10–0,13 mm) e birradiculares (CSD: 88–93%; 95% DH: 0,13–0,16 mm). Além disso, a eficiência de tempo foi significativamente otimizada, com a IA sendo 54 vezes mais rápida para dentes unirradiculares e 75 vezes mais rápida para birradiculares, em comparação ao método manual realizado por especialistas humanos. **Publicação 3** – Avaliação da influência do filtro *Blooming Artifact Reduction* (BAR), integrado ao software e-Vol DX, na detecção de espaços vazios em canais radiculares ovais longos obturados com os cimentos endodônticos AH Plus Jet (AHPJ) e Bio-C Sealer (BCS), utilizando dois aparelhos de TCFC e tendo como referência as imagens de microtomografia computadorizada (micro-CT). No aparelho de TCFC OP300 Maxio, o filtro BAR aumentou significativamente a área sob a curva ROC (AUC) para a detecção de espaços vazios no terço apical em canais obturados com AHPJ e BCS, além de aumentar os valores de especificidade na detecção de espaços vazios no terço apical com AHPJ. No aparelho VeraView X800, os fatores estudados não influenciaram os valores de AUC e sensibilidade, mas o uso do filtro BAR aumentou significativamente a especificidade na detecção de vazios nos terços cervical/médio em canais radiculares obturados com BCS. **Publicação 4** – Investigou a capacidade de preparo e a preservação da dentina pericervical nos canais mesiovestibulares (MV1 e MV2) de molares superiores, utilizando os sistemas de níquel-titânio (NiTi) ProTaper Ultimate (PU) e ProDesign Logic 2 (PDL2). O sistema PU aumentou significativamente o volume no terço cervical do canal MV1 em comparação ao PDL2, que produziu menos debris no terço apical. No geral, ambos os sistemas de NiTi apresentaram uma porcentagem semelhante de superfícies não instrumentadas e mantiveram uma espessura de dentina acima de 0,5 mm. A TCFC subestimou ligeiramente a espessura da dentina em comparação com as medições feitas pela micro-CT. **Publicação 5** – Comparou o desempenho no retratamento endodôntico e a preservação da dentina pericervical dos sistemas de NiTi PDL2, Reciproc Blue (RB) e WaveOne Gold (WOG) nos canais MV1 e MV2 de molares superiores. O sistema RB demonstrou maior eficácia na remoção do material obturador no canal MV1 em comparação ao PDL2, enquanto o PDL2 superou o WOG no terço apical do canal MV2. Todos os sistemas de NiTi apresentaram mínima alteração na trajetória apical. No geral, a remoção de dentina foi semelhante, mas houve uma redução significativa na espessura da dentina na parede distal (zona de perigo) do canal MV2 para valores abaixo de 0,5 mm após o retratamento, independentemente do sistema de NiTi ou da modalidade de imagem utilizada (TCFC ou micro-CT). Exames de TCFC pré-operatórios são importantes para a seleção

adequada dos sistemas de NiTi no retratamento dos canais MV1 e MV2, visando proteger a dentina pericervical na zona de perigo do canal MV2.

Palavras-chave: Endodontia. Inteligência artificial. Microtomografia por Raio-X. Obturação do canal radicular. Retratoamento. Tomografia computadorizada de feixe cônico.

Santos Júnior AO. Diagnostic accuracy, strategic planning, and artificial intelligence-based segmentation of pulp cavity structures using three-dimensional imaging [tese de doutorado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2024.

ABSTRACT

Publication 1 – Development and validation of an artificial intelligence (AI)-driven algorithm based on convolutional neural networks for the automatic segmentation of the pulp chamber and root canal using cone-beam computed tomography (CBCT) scans of single-rooted (**Publication 1**) and bi-rooted teeth (**Publication 2**). The AI tool demonstrated excellent accuracy in segmenting single-rooted teeth (Dice similarity coefficient [DSC]: 89–93%; 95% Hausdorff distance [HD]: 0.10–0.13 mm) and bi-rooted teeth (DSC: 88–93%; 95% HD: 0.13–0.16 mm). Additionally, the time efficiency was significantly optimized, with the AI being 54 times faster for single-rooted teeth and 75 times faster for bi-rooted teeth compared to the manual method performed by human experts. **Publication 3** – Evaluation of the influence of the Blooming Artifact Reduction (BAR) filter, integrated into the e-Vol DX software, on the detection of voids in long oval root canals filled with the endodontic sealers AH Plus Jet (AHPJ) and Bio-C Sealer (BCS), using two CBCT devices and using micro-computed tomography (micro-CT) images as a reference. In the OP300 Maxio CBCT device, the BAR filter significantly increased the area under the ROC curve (AUC) for detecting voids in the apical third of canals filled with AHPJ and BCS, and also increased specificity values for detecting voids in the apical third with AHPJ. In the VeraView X800 device, the studied factors did not affect AUC and sensitivity values, but the use of the BAR filter significantly increased specificity for detecting voids in the cervical/middle thirds of root canals filled with BCS. **Publication 4** – Investigated the shaping ability and pericervical dentin preservation in the mesiobuccal canals (MB1 and MB2) of maxillary molars using the nickel-titanium (NiTi) systems ProTaper Ultimate (PU) and ProDesign Logic 2 (PDL2). The PU system significantly increased the volume in the cervical third of the MB1 canal compared to PDL2, which produced less debris in the apical third. Overall, both NiTi systems showed a similar percentage of uninstrumented surfaces and maintained a dentin thickness above 0.5 mm. CBCT slightly underestimated dentin thickness compared to micro-CT measurements. **Publication 5** – Compared the performance of NiTi systems PDL2, Reciproc Blue (RB), and WaveOne Gold (WOG) in endodontic retreatment and pericervical dentin preservation in the MB1 and MB2 canals of maxillary molars. The RB system was more effective in removing filling material from the MB1 canal compared to PDL2, while PDL2 outperformed WOG in the apical third of the MB2 canal. All NiTi systems exhibited minimal apical transportation. Overall, dentin removal was similar, but there was a significant reduction in dentin thickness in the distal wall (danger zone) of the MB2 canal to values below 0.5 mm after retreatment, regardless of the NiTi system or imaging modality used (CBCT or micro-CT). Preoperative CBCT scans are important for the proper selection of NiTi systems in the retreatment of MB1 and MB2 canals, aiming to protect pericervical dentin in the danger zone of the MB2 canal.

Keywords: Endodontics. Artificial Intelligence. X-Ray Microtomography. Root Canal Obturation. Retreatment. Cone-Beam Computed Tomography.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 PROPOSIÇÃO	21
2.1 Objetivos Específicos	21
3 PUBLICAÇÕES	23
3.1 Publicação 1	23
3.2 Publicação 2	53
3.3 Publicação 3	80
3.4 Publicação 4	104
3.5 Publicação 5	128
4 DISCUSSÃO	156
5 CONCLUSÃO	159
REFERÊNCIAS	161
APÊNDICE A	167
ANEXO A	200
ANEXO B	203
ANEXO C	207
ANEXO D	208

1 INTRODUÇÃO

O sucesso do tratamento endodôntico depende do conhecimento adequado da anatomia do sistema de canais radiculares¹. Além disso, a desinfecção durante o tratamento e a resposta do hospedeiro são fundamentais para eliminar ou reduzir os microrganismos no canal radicular, proporcionando o reparo dos tecidos periapicais². No entanto, a complexidade do sistema de canais radiculares pode dificultar o preparo com instrumentos endodônticos^{3,4}, bem como os processos adequados de limpeza, desinfecção e obturação⁵⁻⁷.

A morfologia dos canais radiculares apresenta variação considerável entre os diferentes grupos dentários⁸. Nos incisivos inferiores, é comum encontrar um único canal, com uma seção transversal oval ou achatada^{8,9}, o que representa desafio para o preparo e obturação adequados¹⁰⁻¹². Molares superiores apresentam maior complexidade morfológica, especialmente devido à presença do segundo canal (MV2) na raiz méso-vestibular¹³. Este canal é altamente prevalente, variando de 48% a 97,6% na população mundial¹⁴, e a persistência da periodontite apical muitas vezes está relacionada à ausência de tratamento endodôntico nos canais MV2¹³. O orifício de entrada do canal MV2 é geralmente menor que o do canal MV1 devido à deposição de dentina secundária¹⁵ e muitas vezes está coberto por uma camada de dentina¹³. Além disso, a espessura de dentina na parede mesial (zona de segurança) e distal (zona de perigo) dos canais MV2 é consideravelmente menor do que a do canal MV1 dos molares superiores¹³. Portanto, o tratamento endodôntico desses canais representa um grande desafio para os clínicos, e o uso de recursos adicionais, como microscópios cirúrgicos operatórios, insertos ultrassônicos e instrumentos de níquel-titânio (NiTi) tratados termicamente, é essencial para garantir uma terapia endodôntica adequada^{13,16-20}.

Embora o tratamento endodôntico possa apresentar altas taxas de sucesso, variando entre 78% e 95,6%, complexidades anatômicas são relacionadas aos casos de insucesso^{21,22,23}. Portanto, o planejamento e o acompanhamento devem orientar a tomada de decisão em casos de insucesso da terapia, evitando extrações dentárias desnecessárias²³. Com os avanços atuais, a tomografia computadorizada de feixe cônico (TCFC) representa uma ferramenta diagnóstica fundamental na endodontia²⁴, sendo capaz de detectar espaços vazios com maior precisão no interior do material

obturador²⁵. Esses avanços, combinados com o histórico do caso clínico podem auxiliar no manejo de situações complexas^{24,25}. Além disso, fornecem informações relevantes para o planejamento do retratamento endodôntico quando necessário, contribuindo para aumentar os índices de sucesso e a possibilidade de manutenção do elemento dentário²⁶.

A TCFC é recomendada na endodontia quando os dados fornecidos pela radiografia periapical são inconclusivos ou incompatíveis com as informações clínicas^{24,27,28}. Essa modalidade de imagem tridimensional (3D) aumenta a confiança dos endodontistas para o diagnóstico e planejamento do tratamento endodôntico, demonstrando ser superior às radiografias periapicais^{24,29}. A TCFC tem diversas aplicações na endodontia, como a visualização detalhada da anatomia interna dos dentes⁸, a detecção de fraturas radiculares^{30,31} e reabsorções³², a localização de canais não tratados^{33,34} e o planejamento de acesso a canais radiculares calcificados^{35,36}. Consequentemente, a TCFC é o principal método de imagem utilizado na endodontia em casos de complexidade moderada a elevada²⁴.

Para análises laboratoriais, a microtomografia computadorizada (micro-CT) é amplamente reconhecida como o padrão-ouro³⁷⁻³⁹. Esse método não invasivo de imagem 3D é comumente utilizado na endodontia para investigar a morfologia dos canais radiculares^{40,41}, avaliar a eficácia das técnicas de preparo^{3,4}, limpeza e irrigação^{42,43}, além de determinar a qualidade do preenchimento^{6,7} e a quantidade de material obturador residual após o retratamento endodôntico^{44,45}. Adicionalmente, a espessura de dentina remanescente após o preparo dos canais radiculares tem sido avaliada por meio de micro-CT^{16,17,18}. Nesse contexto, a inclusão de desenhos experimentais que utilizem exames de TCFC como método de análise, adotando imagens de micro-CT como referência, pode aumentar a robustez dos resultados e a confiabilidade das conclusões obtidas^{37,38}.

Junto com a crescente incorporação da TCFC na endodontia, houve um avanço significativo no desenvolvimento de softwares dedicados para análise das imagens tomográficas²⁵. Um desses softwares é o e-Vol DX (CDT Software, Bauru, São Paulo, Brasil), projetado para tornar a interpretação dos exames de TCFC mais fácil e precisa^{8,25,46}. Ele utiliza filtros de aprimoramento de imagem, como o "*Blooming Artifact Reduction*" (BAR), especialmente útil em situações onde há artefatos de distorção volumétrica que prejudicam a qualidade da imagem para fins

diagnósticos^{25,46,47}. O e-Vol DX tem sido empregado em diversos estudos com objetivos variados, desde auxiliar na localização do forame apical⁴⁸ e medir o diâmetro de estruturas anatômicas^{49,50} até identificar canais radiculares acessórios⁵¹, detectar fraturas radiculares^{47,52} e avaliar a espessura da dentina remanescente após o preparo com instrumentos de NiTi na zona de perigo de molares inferiores⁵³. No entanto, não há evidências sobre o impacto do filtro BAR na precisão diagnóstica para a detecção de espaços vazios em dentes tratados endodonticamente usando imagens de TCFC. Além disso, não existem dados disponíveis sobre a espessura de dentina remanescente medida pelo software e-Vol DX em exames de TCFC após o preparo e retratamento com instrumentos de NiTi nos canais MV1 e MV2 de molares superiores.

Os progressos na ciência da computação impulsionaram o desenvolvimento de algoritmos orientados por inteligência artificial (IA), como as redes neurais convolucionais (RNC), capazes de desempenhar uma ampla gama de tarefas que antes exigiam intervenção humana⁵⁴. Basicamente, as RNC representam as múltiplas camadas de conexões neurais, inspiradas no padrão de conectividade dos neurônios do cérebro humano, que são treinadas para aprendizagem profunda de tarefas específicas^{55,56}. Esses algoritmos apresentam grande potencial para a análise de imagens digitais⁵⁷, podendo simplificar o fluxo de trabalho digital na endodontia⁵⁸⁻⁶². Eles possibilitam um planejamento de tratamento mais personalizado e automatizado, resultando em maior eficiência de tempo e previsibilidade nos resultados do tratamento endodôntico^{57,59}.

No fluxo de trabalho digital, a segunda etapa mais crítica é a segmentação da região de interesse em imagens de TCFC para criar um modelo 3D preciso⁶³. No entanto, os métodos tradicionais de segmentação são prejudicados pela baixa qualidade da imagem, pelos diferentes artefatos causados por materiais de alto número atômico e pelo efeito de volume parcial nas imagens de TCFC^{55,56}. Além disso, esses métodos consomem tempo clínico significativo e são altamente influenciados pela subjetividade e pela habilidade humana⁵⁵⁻⁵⁷. Estudos recentes apontam que a segmentação automatizada de canais radiculares com o uso de ferramentas de IA tem o potencial de revolucionar o fluxo digital na endodontia, trazendo grandes benefícios para a técnica de acesso endodôntico guiado, o processo de ensino e a compreensão por parte dos pacientes⁵⁸⁻⁶². No entanto, existe uma lacuna no conhecimento em relação à aplicação desses modelos computacionais baseados em IA para segmentar

as câmaras pulpares e os canais radiculares em exames de TCFC nos diferentes tipos de dentes.

Portanto, este estudo teve como objetivo desenvolver e validar uma ferramenta de IA para segmentar as estruturas da cavidade pulpar, incluindo a câmara pulpar e o canal radicular, em exames de TCFC. Também foi investigada a influência de um filtro de pós-processamento aplicado a imagens de TCFC na detecção de espaços vazios na obturação de canais radiculares ovais longos. Além disso, foi avaliado o planejamento estratégico do preparo e retratamento endodôntico utilizando diferentes sistemas de NiTi nos canais MV1 e MV2 de molares superiores.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

Publicação 1: A ferramenta proposta baseada em IA demonstrou desempenho altamente preciso e rápido na segmentação de canais radiculares em dentes unirradiculares em imagens de TCFC. Esses resultados têm o potencial de transformar o fluxo de trabalho digital em endodontia, possibilitando tratamentos mais consistentes e previsíveis.

Publicação 2: O algoritmo de IA desenvolvido e validado proporcionou uma segmentação automática altamente precisa dos canais radiculares de dentes birradiculares, exigindo um tempo mínimo de processamento. A ferramenta proposta possui a capacidade de representar um grande avanço no planejamento digital para o tratamento endodôntico, tornando mais simples o fluxo de trabalho digital em endodontia.

Publicação 3: O filtro BAR mostrou um aprimoramento significativo na acurácia diagnóstica para a detecção de espaços vazios no terço apical dos canais radiculares ovais longos ao utilizar o aparelho de TCFC OP300 Maxio, tanto com o cimento AH Plus Jet quanto com o Bio-C Sealer. Adicionalmente, o filtro BAR aumentou substancialmente a especificidade na identificação de espaços vazios no terço apical com o AH Plus Jet. Embora o dispositivo VeraView X800 não tenha mostrado uma melhora geral no desempenho diagnóstico ao utilizar o filtro BAR, ele apresentou um aumento significativo na especificidade para detectar espaços vazios nos terços cervical/médio dos canais preenchidos com o Bio-C Sealer.

Publicação 4: O sistema ProTaper Ultimate promove maior aumento volumétrico no terço cervical do canal MV1 em comparação ao Logic 2, que, em contrapartida, gerou menos debris no terço apical, conforme revelado pelas análises de micro-CT. De modo geral, ambos os sistemas de NiTi apresentaram percentuais semelhantes de superfícies não instrumentadas nos canais MV1 e MV2, mantendo eficazmente a trajetória original dos canais e preservando uma espessura de dentina superior a 0,5 mm. As imagens de TCFC são recomendadas para avaliar a espessura

dentinária nas zonas de segurança e perigo dos canais radiculares MV1 e MV2. Contudo, é importante destacar que, em alguns casos, a espessura da dentina pode ser subestimada nas imagens de TCFC, dependendo do protocolo utilizado nesta investigação.

Publicação 5: O sistema Reciproc Blue mostrou-se mais eficaz na remoção de material obturador dos canais MV1 em comparação ao Logic 2, enquanto o Logic 2 superou o WaveOne Gold no terço apical dos canais MV2. Todos os sistemas de NiTi apresentaram mínima alteração na trajetória apical e mantiveram uma centralização eficaz dos canais MV1 e MV2, como demonstrado pelas análises de micro-CT. De modo geral, os sistemas de NiTi tiveram desempenhos semelhantes na remoção de dentina. Contudo, foi observada uma redução significativa na espessura da dentina abaixo de 0,5 mm na zona de perigo dos canais MV2 após o retratamento, independentemente do sistema de NiTi empregado e do tipo de imagem utilizada, seja TCFC ou micro-CT. As imagens pré-operatórias de TCFC são importantes para o planejamento do retratamento endodôntico dos canais MV1 e MV2, fornecendo informações valiosas sobre a espessura da dentina pericervical e permitindo que os clínicos desenvolvam estratégias para minimizar a remoção desnecessária de dentina.

REFERÊNCIAS*

1. Mazzi-Chaves JF, Silva-Sousa YTC, Leoni GB, Silva-Sousa AC, Estrela L, Estrela C et al. Micro-computed tomographic assessment of the variability and morphological features of root canal system and their ramifications. *J Appl Oral Sci.* 2020; 28: e20190393.
2. Siqueira Jr JF, Silva WO, Romeiro K, Gominho LF, Alves FRF, Rôças IN. Apical root canal microbiome associated with primary and posttreatment apical periodontitis: a systematic review. *Int Endod J.* 2024; 57(8): 1043-58.
3. Santos Junior AO, Tanomaru Filho M, Pinto JC, Tavares KIMC, Pivoto João MMB, Guerreiro Tanomaru JM. New ultrasonic tip decreases uninstrumented surface and debris in flattened canals: a micro-computed tomographic study. *J Endod.* 2020; 46(11): 1712-8.
4. Tavares KIMC, Pinto JC, Santos Junior AO, Esteves Torres FF, Guerreiro Tanomaru JM, Tanomaru Filho M. Combination of a new ultrasonic tip with rotary systems for the preparation of flattened root canals. *Restor Dent Endod.* 2021; 46(4): e56.
5. Vasconcelos LRSM, Midena RZ, Minotti PG, Pereira TC, Duarte MAH, Andrade FB. Effect of ultrasound streaming on the disinfection of flattened root canals prepared by rotary and reciprocating systems. *J Appl Oral Sci.* 2017; 25(5): 477-82.
6. Santos-Junior AO, Tanomaru-Filho M, Pinto JC, Tavares KIMC, Torres FFE, Guerreiro-Tanomaru JM. Effect of obturation technique using a new bioceramic sealer on the presence of voids in flattened root canals. *Braz Oral Res.* 2021; 12(35):e028.
7. Tavares KIMC, Pinto JC, Santos-Junior AO, Torres FFE, Guerreiro-Tanomaru JM, Tanomaru-Filho M. Micro-CT evaluation of filling of flattened root canals using a new premixed ready-to-use calcium silicate sealer by single-cone technique. *Microsc Res Tech.* 2021; 84(5):976-81.
8. Bueno MR, Estrela C, Azevedo BC, Cintra Junqueira JL. Root canal shape of human permanent teeth determined by new cone-beam computed tomographic software. *J Endod.* 2020; 46(11):1662-74.
9. Espir CG, Nascimento CA, Guerreiro-Tanomaru JM, Bonetti-Filho I, Tanomaru-Filho M. Radiographic and micro-computed tomography classification of root canal morphology and dentin thickness of mandibular incisors. *J Conserv Dent.* 2018; 21(1):57-62.
10. Espir CG, Nascimento-Mendes CA, Guerreiro-Tanomaru JM, Freire LG, Gavini G, Tanomaru-Filho M. Counterclockwise or clockwise reciprocating motion for oval root canal preparation: a micro-CT analysis. *Int Endod J.* 2018; 51(5):541-8.

* De acordo com o Guia de Trabalhos Acadêmicos da FOAr, adaptado das Normas Vancouver. Disponível no site da Biblioteca: <http://www.foar.unesp.br/Home/Biblioteca/guia-de-normalizacao-atualizado.pdf>

11. Espir CG, Nascimento-Mendes CA, Guerreiro-Tanomaru JM, Cavenago BC, Hungaro Duarte MA, Tanomaru-Filho M. Shaping ability of rotary or reciprocating systems for oval root canal preparation: a micro-computed tomography study. *Clin Oral Investig*. 2018; 22(9):3189-94.
12. Soğur E, Baksi BG, Gröndahl HG. Imaging of root canal fillings: a comparison of subjective image quality between limited cone-beam CT, storage phosphor and film radiography. *Int Endod J*. 2007; 40(3):179-85.
13. Ordinola-Zapata R, Martins JNR, Versiani MA, Bramante CM. Micro-CT analysis of danger zone thickness in the mesiobuccal roots of maxillary first molars. *Int Endod J*. 2019; 52(4):524-9.
14. Martins JNR, Alkhawas MAM, Altaki Z, Bellardini G, Berti L, Boveda C et al. Worldwide analyses of maxillary first molar second mesiobuccal prevalence: a multicenter cone-beam computed tomographic study. *J Endod*. 2018; 44(11):1641-49.e1.
15. Degerness RA, Bowles WR. Dimension, anatomy and morphology of the mesiobuccal root canal system in maxillary molars. *J Endod*. 2010; 36(6):985-9.
16. Camargo EJ, Duarte MAH, Marques VAS, Só MVR, Duque JA, Alcalde MP et al. The ability of three nickel-titanium mechanized systems to negotiate and shape MB2 canals in extracted maxillary first molars: a micro-computed tomographic study. *Int Endod J*. 2019; 52(6):847-56.
17. Barbosa AFA, de Lima CO, Antunes BR, Sassone LM, Versiani MA, da Silva EJNL. Effect of the progressive taper enlargement of buccal root canals of three-rooted maxillary molars: A stepwise micro-CT study. *Aust Endod J*. 2023; 49(3):700-10.
18. Zhang Y, Liu J, Gu Y, Wang J, Xu H, Zhang G. Analysis of second mesiobuccal root canal instrumentation in maxillary first molars with three nickel-titanium rotary instruments: a micro-computed tomographic study. *Odontology*. 2021; 109(2):496-505.
19. Forghani M, Hamed A, Khorasani M, Moushekhian S, Kheirabadi N. Dentine thickness of second mesiobuccal canals in first maxillary molars prepared with rotary instruments. *Iran Endod J*. 2022; 17(3):126-31.
20. Heyse Jr JD, Ordinola-Zapata R, Gaalaas L, McClanahan SB. The effect of rotary instrumentation on dentin thickness in the danger zone of the MB2 canal of maxillary first molars. *Aust Endod J*. 2022; 48(2):239-44.
21. Ricucci D, Russo J, Rutberg M, Burleson JA, Spångberg LS. A prospective cohort study of endodontic treatments of 1,369 root canals: results after 5 years. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2011; 112(6):825-42.
22. de Chevigny C, Dao TT, Basrani BR, Marquis V, Farzaneh M, Abitbol S et al. Treatment outcome in endodontics: the Toronto study--phase 4: initial treatment. *J Endod*. 2008; 34(3):258-63.
23. Santos-Junior AO, De Castro Pinto L, Mateo-Castillo JF, Pinheiro CR. Success or failure of endodontic treatments: A retrospective study. *J Conserv Dent*. 2019; 22(2):129-32.

24. Viana Wanzeler AM, Montagner F, Vieira HT, Dias da Silveira HL, Arús NA, Vizzotto MB. Can cone-beam computed tomography change endodontists' level of confidence in diagnosis and treatment planning? a before and after study. *J Endod.* 2020; 46(2):283-8.
25. Bueno MR, Estrela C, Azevedo BC, Diogenes A. Development of a new cone-beam computed tomography software for endodontic diagnosis. *Braz Dent J.* 2018; 29(6):517-29.
26. Sabeti M, Chung YJ, Aghamohammadi N, Khansari A, Pakzad R, Azarpazhooh A. Outcome of contemporary nonsurgical endodontic retreatment: a systematic review of randomized controlled trials and cohort studies. *J Endod.* 2024; 50(4):414-33.
27. Pinto JC, Wanderley VA, de Faria Vasconcelos K, Leite AF, Pauwels R, Nadjmi M et al. Evaluation of 10 cone-beam computed tomographic devices for endodontic assessment of fine anatomic structures. *J Endod.* 2021; 47(6):947-53.
28. Pinto JC, de Faria Vasconcelos K, Leite AF, Wanderley VA, Pauwels R, Oliveira ML et al. Image quality for visualization of cracks and fine endodontic structures using 10 CBCT devices with various scanning protocols and artefact conditions. *Sci Rep.* 2023; 13(1):4001.
29. Abella F, Patel S, Duran-Sindreu F, Mercadé M, Bueno R, Roig M. Evaluating the periapical status of teeth with irreversible pulpitis by using cone-beam computed tomography scanning and periapical radiographs. *J Endod.* 2012; 38(12):1588-91.
30. Habibzadeh S, Ghoncheh Z, Kabiri P, Mosaddad SA. Diagnostic efficacy of cone-beam computed tomography for detection of vertical root fractures in endodontically treated teeth: a systematic review. *BMC Med Imaging.* 2023; 23(1):68.
31. Talwar S, Utneja S, Nawal RR, Kaushik A, Srivastava D, Oberoy SS. Role of cone-beam computed tomography in diagnosis of vertical root fractures: a systematic review and meta-analysis. *J Endod.* 2016; 42(1):12-24.
32. Bastos MF, Visconti MA, Pinto RR, Junqueira RB, Verner FS. Assessing the impact of the metal artifact reduction tool on detecting furcation lesions in maxillary molars with different intracanal posts: an ex vivo cone-beam computed tomography study. *J Endod.* 2024; 50(6):835-43.
33. do Carmo WD, Verner FS, Aguiar LM, Visconti MA, Ferreira MD, Lacerda MFLS et al. Missed canals in endodontically treated maxillary molars of a Brazilian subpopulation: prevalence and association with periapical lesion using cone-beam computed tomography. *Clin Oral Investig.* 2021; 25(4):2317-23.
34. Alotaibi BB, Khan KI, Javed MQ, Dutta SD, Shaikh SS, Almutairi NM. Relationship between apical periodontitis and missed canals in mesio-buccal roots of maxillary molars: CBCT study. *J Taibah Univ Med Sci.* 2023; 19(1):18-27.
35. Chaves GS, Silva JA, Capeletti LR, Silva EJNL, Estrela C, Decurcio DA. Guided access cavity preparation using a new simplified digital workflow. *J Endod.* 2023; 49(1):89-95.

36. Peña-Bengoa F, Valenzuela M, Flores MJ, Dufey N, Pinto KP, Silva EJNL. Effectiveness of guided endodontics in locating calcified root canals: a systematic review. *Clin Oral Investig*. 2023; 27(5):2359-74.
37. Celikten B, Jacobs R, Faria Vasconcelos K, Huang Y, Nicolielo LFP, Orhan K. Assessment of volumetric distortion artifact in filled root canals using different cone-beam computed tomographic devices. *J Endod*. 2017; 43(9):1517-21.
38. Celikten B, Jacobs R, Faria Vasconcelos K, Huang Y, Shaheen E, Nicolielo LFP et al. Comparative evaluation of cone beam CT and micro-CT on blooming artifacts in human teeth filled with bioceramic sealers. *Clin Oral Investig*. 2019; 23(8):3267-73.
39. Girelli CFM, de Lima CO, Silveira FF, Lacerda MFLS, Nunes E. Marginal gaps and voids using two warm compaction techniques and different sealers: a micro-CT study. *Clin Oral Investig*. 2023; 27(6):2805-11.
40. Karobari MI, Batul R, Khan M, Patil SR, Basheer SN, Rezallah NNF et al. Micro computed tomography (Micro-CT) characterization of root and root canal morphology of mandibular first premolars: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health*. 2024; 24(1):1.
41. Mustafa M, Batul R, Karobari MI, Alamri HM, Abdulwahed A, Almokhatieb AA et al. Assessment of the root and canal morphology in the permanent dentition of Saudi Arabian population using cone beam computed and micro-computed tomography - a systematic review. *BMC Oral Health*. 2024; 24(1):343.
42. Pinto JC, Torres FFE, Santos Junior AO, Tavares KIMC, Guerreiro-Tanomaru JM, Tanomaru-Filho M. Influence of voxel size on micro-CT analysis of debris after root canal preparation. *Braz Oral Res*. 2020; 35:e008.
43. Tanomaru-Filho M, Torres FF, Chávez-Andrade GM, Miano LM, Guerreiro-Tanomaru JM. Intermittent or continuous ultrasonically activated irrigation: micro-computed tomographic evaluation of root canal system cleaning. *Clin Oral Investig*. 2016; 20(7):1541-6.
44. Cecagno FL, De Martin AS, Fontana CE, Cavenago BC, Nascimento WM, Limoeiro AGDS et al. Evaluation of the ability of 3 reciprocating instruments to remove obturation material: a micro-computed tomography study. *J Endod*. 2024; 50(3):376-80.
45. Santos-Junior AO, Tavares KIMC, Pinto JC, Torres FFE, Guerreiro-Tanomaru JM, Tanomaru-Filho M. Flatsonic ultrasonic tip optimizes the removal of remaining filling material in flattened root canals: a micro-computed tomographic analysis. *J Endod*. 2024; 50(5):612-8.
46. Estrela C, Costa MVC, Bueno MR, Rabelo LEG, Decurcio DA, Silva JÁ et al. Potential of a new cone-beam ct software for blooming artifact reduction. *Braz Dent J*. 2020; 31(6):582-8.
47. Dias-Junior LCL, Correa M, Porto OCL, Estrela C, Teixeira CS, Garcia LFR et al. Influence of a metal artifact reduction filter on the diagnostic accuracy of complete and incomplete vertical root fractures. *J Endod*. 2023; 49(10):1352-61.

48. Estrela C, Couto GS, Bueno MR, Bueno KG, Estrela LRA, Porto OCL et al. Apical foramen position in relation to proximal root surfaces of human permanent teeth determined by using a new cone-beam computed tomographic software. *J Endod.* 2018; 44(11):1741-8.
49. Estrela C, Bueno MR, Rossi-Fedele G, Decurcio DA, Guedes OA, Sousa-Neto MD et al. Method to determine the root canal spatial geometry using an algorithm of the e-Vol DX CBCT software. *Braz Dent J.* 2023; 34(6):40-9.
50. Bueno MR, Estrela CRA, Granjeiro JM, Sousa-Neto MD, Estrela C. Method to determine the root canal anatomic dimension by using a new cone-beam computed tomography software. *Braz Dent J.* 2019; 30(1):3-11.
51. Bueno MR, Azevedo BC, Estrela CRA, Sousa-Neto MD, Estrela C. Method to identify accessory root canals using a new cbct software. *Braz Dent J.* 2021; 32(6):28-35.
52. Caetano AP, Sousa TO, Oliveira MR, Evanglista K, Bueno JM, Silva MA. Accuracy of three cone-beam CT devices and two software systems in the detection of vertical root fractures. *Dentomaxillofac Radiol.* 2021; 50(3):20200334.
53. Sousa VC, Alencar AHG, Bueno MR, Decurcio DA, Estrela CRA, Estrela C. Evaluation in the danger zone of mandibular molars after root canal preparation using novel CBCT software. *Braz Oral Res.* 2022; 36:e038.
54. Aminoshariae A, Kulild J, Nagendrababu V. Artificial Intelligence in endodontics: current applications and future directions. *J Endod.* 2021; 47(9):1352-7.
55. Fontenele RC, Gerhardt MDN, Picoli FF, Van Gerven A, Nomidis S, Willems H et al. Convolutional neural network-based automated maxillary alveolar bone segmentation on cone-beam computed tomography images. *Clin Oral Implants Res.* 2023; 34(6):565-74.
56. Fontenele RC, Gerhardt MDN, Pinto JC, Van Gerven A, Willems H, Jacobs R et al. Influence of dental fillings and tooth type on the performance of a novel artificial intelligence-driven tool for automatic tooth segmentation on CBCT images - A validation study. *J Dent.* 2022; 119:104069.
57. Lahoud P, EzEldeen M, Beznik T, Willems H, Leite A, Van Gerven A et al. Artificial intelligence for fast and accurate 3-dimensional tooth segmentation on cone-beam computed tomography. *J Endod.* 2021; 47(5):827-35.
58. Duan W, Chen Y, Zhang Q, Lin X, Yang X. Refined tooth and pulp segmentation using u-net in cbct image. *Dentomaxillofac Radiol.* 2021; 50(6):20200251.
59. Lin X, Fu Y, Ren G, Yang X, Duan W, Chen Y et al. Micro-computed tomography-guided artificial intelligence for pulp cavity and tooth segmentation on cone-beam computed tomography. *J Endod.* 2021; 47(12):1933-41.
60. Lin X, Fu YJ, Ren GQ, Wen JH, Chen YF, Zhang Q. Segmentation and accuracy validation of mandibular molar and pulp cavity on cone-beam CT images by U-net neural network. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue.* 2022; 31(5):454-9.
61. Wang Y, Xia W, Yan Z, Zhao L, Bian X, Liu C et al. Root canal treatment planning by automatic tooth and root canal segmentation in dental CBCT with deep multi-task feature learning. *Med Image Anal.* 2023; 85:102750.

62. Zhang J, Xia W, Dong J, Tang Z, Zhao Q. Root canal segmentation in cbct images by 3d u-net with global and local combination loss. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2021; 2021:3097-100.
63. Shujaat S, Bornstein MM, Price JB, Jacobs R. Integration of imaging modalities in digital dental workflows - possibilities, limitations, and potential future developments. *Dentomaxillofac Radiol.* 2021; 50(7):20210268.
64. Elgarba BM, Fontenele RC, Mangano F, Jacobs R. Novel AI-based automated virtual implant placement: artificial versus human intelligence. *J Dent.* 2024; 147:105146.
65. Møller L, Wenzel A, Wegge-Larsen AM, Ding M, Væth M, Hirsch E et al. Comparison of images from digital intraoral receptors and cone beam computed tomography scanning for detection of voids in root canal fillings: an in vitro study using micro-computed tomography as validation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 2013; 115(6):810-8.
66. Rodrigues CT, Jacobs R, Vasconcelos KF, Lambrechts P, Rubira-Bullen IRF, Gaêta-Araujo H et al. Influence of CBCT-based volumetric distortion and beam hardening artefacts on the assessment of root canal filling quality in isthmus-containing molars. *Dentomaxillofac Radiol.* 2021; 50(5):20200503.