

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

ABORDAGEM TERAPÊUTICA DE DENTES COM METAMORFOSE CALCIFICANTE: O ESTADO DA ARTE E PERSPETIVAS FUTURAS

Trabalho submetido por
Carolina Marto Filipe
para a obtenção do grau de **Mestre** em Medicina Dentária

junho de 2025

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

ABORDAGEM TERAPÊUTICA DE DENTES COM METAMORFOSE CALCIFICANTE: O ESTADO DA ARTE E PERSPETIVAS FUTURAS

Trabalho submetido por
Carolina Marto Filipe
para a obtenção do grau de **Mestre** em Medicina Dentária

Trabalho orientado por
Prof. Doutor Mário Jorge Rito Dias Pereira
Co-orientado por
Mestre Ricardo Manuel Dias Cachinho

junho de 2025

Agradecimentos

À nossa casa nos últimos 5 anos, a *Egas Moniz School of Health and Science*. Por todos os desafios que nos proporcionou e o crescimento a que obrigou.

Ao meu orientador, Prof. Doutor Mário Pereira, pela confiança depositada e por toda a tranquilidade transmitida durante esta fase de maior inquietude. Por nunca hesitar em estender a mão e ir mais além para ajudar.

Ao Mestre Ricardo Cachinho, por sempre ter apostado em mim. Por todo o apoio, compreensão, (santa) paciência e amizade. Agradeço pelo inestimável conhecimento partilhado nestes últimos dois anos. Por me ter tornado numa melhor clínica e por incentivar, desde o primeiro dia, o meu gosto pela Endodontia. Não seria possível imaginar um melhor mentor.

Aos meus melhores amigos: a minha mãe, o meu pai e o meu irmão. Poderia agradecer todos os dias, e continuaria a não ser suficiente. Ainda assim, obrigada pela presença constante, em cada sorriso e em cada lágrima. Por todo o amor e carinho desmedidos. Por ampararem todas as minhas quedas e por nunca me permitirem descobrir o que é estar só. Obrigada por serem o meu porto de abrigo.

À avó Deolinda. Por cada abraço apertado e pelo amor sem peso nem medida. Por me ter dado o maior exemplo de o que é a compaixão, a perseverança e a humildade. Levo-a comigo. Sempre.

Aos restantes membros da minha família, por sempre me acompanharem ao longo deste percurso. Por todo o suporte, amor e fé depositada.

À maior surpresa que a Egas me deu, a Ana Carolina Leitão. Pelo carinho e lealdade incomparáveis. De coragem e determinação incansáveis na luta por tudo aquilo que acredita e ambiciona. A melhor das amigas e a melhor das pessoas. Ainda está para se formar um oceano que nos separe.

A todos os que, embora não mencionados, jamais ficarão esquecidos. Aos que caminharam ao meu lado e ajudaram a tornar a estrada um bocadinho menos íngreme.

Muito obrigada!

Resumo

A metamorfose calcificante, também designada por calcificação do canal radicular ou obliteração do canal radicular (OCR), caracteriza-se pela deposição gradual de tecido duro no interior do espaço pulpar. Este processo pode ter um carácter fisiológico, associado ao envelhecimento, ou reparador, caso seja iniciado por uma reação inflamatória da polpa.

O crescimento progressivo das calcificações pulpares reduz o lúmen dos canais afetados, tornando a sua localização uma tarefa desafiante e aumenta consideravelmente a complexidade do tratamento endodôntico. A *American Association of Endodontics* (AAE) considera o tratamento destes dentes um procedimento de elevada dificuldade, sendo que a presença de calcificações aumenta significativamente a ocorrência de acidentes iatrogénicos.

O surgimento de métodos inovadores tem permitido aumentar a segurança e a taxa de sucesso do tratamento destes casos. Uma abordagem endodôntica conservadora e mais previsível tornou-se possível devido ao desenvolvimento contínuo da Endodontia Digital e à aplicação cada vez mais variada da CBCT, CAD-CAM e *scanners* intra-orais. Técnicas inovadoras como a Endodontia Guiada, a Realidade Aumentada e a Inteligência Artificial representarão, provavelmente, mais um passo na evolução do tratamento destes dentes.

Neste contexto, a presente revisão narrativa tem como objetivo evidenciar a prevalência e o impacto das calcificações pulpares no tratamento endodôntico, com um foco particular no potencial da Endodontia Guiada. Pretende-se, adicionalmente, destacar as perspetivas futuras do tratamento endodôntico de dentes calcificados e enfatizar a importância dos desenvolvimentos mais recentes para a evolução da Endodontia.

Palavras-chave: metamorfose calcificante, calcificação pulpar, endodontia guiada, planeamento digital

Abstract

Calcific metamorphosis, also known as root canal calcification or pulp canal obliteration (PCO), is characterised by the gradual deposition of hard tissue inside the pulp space. This process can be physiological, associated with aging processes, or reparative, if it is initiated by an inflammatory reaction of the pulp.

The progressive growth of pulp calcifications results in a reduction in the lumen of the affected canals, making localization a challenging task and considerably increasing the complexity of endodontic treatment. The American Association of Endodontics (AAE) considers the treatment of these teeth to be a highly difficult procedure, and the presence of calcifications significantly increases the occurrence of iatrogenic accidents.

The emergence of innovative methods has made it possible to increase the safety and success rate of treatment in these cases. A conservative and more predictable endodontic approach has become possible due to the continuous development of Digital Endodontics and the increasingly varied application of CBCT, CAD-CAM and intraoral scanners. Innovative techniques such as Guided Endodontics, Augmented Reality and Artificial Intelligence will probably represent a further step in the evolution of the treatment of these teeth.

In this context, this narrative review aims to highlight the prevalence and impact of pulp calcification on endodontic treatment, with a particular focus on the potential of Guided Endodontics. It also aims to highlight the future prospects for endodontic treatment of calcified teeth and to emphasise the importance of the latest developments for the evolution of endodontics.

Keywords: calcific metamorphosis, pulp calcification, guided endodontics, digital planning

Índice

I. Introdução.....	13
II. Desenvolvimento.....	17
1. Metamorfose Calcificante.....	17
1.1. Composição e classificação.....	17
1.2. Etiologia.....	20
1.2.1. Idade.....	20
1.2.2. Estímulos traumáticos.....	22
1.2.3. Fatores genéticos.....	24
1.2.4. Nanobactérias e nanopartículas.....	25
1.3. Fatores de risco sistêmicos.....	26
1.3.1. Doenças Cardiovasculares.....	27
1.3.2. Patologias renais.....	27
1.3.3. Diabetes.....	28
1.3.4. Glicocorticóides.....	29
1.3.5. Estatinas.....	30
1.4. Diagnóstico.....	30
1.5. Tratamento.....	32
1.5.1. Tratamento estético.....	32
1.5.2. Tratamento endodôntico.....	33
2. Abordagem Endodôntica Convencional.....	35
2.1. Acesso e permeabilização convencional.....	35
2.2. Quelação.....	38
2.2.1. Conceitos e princípios.....	38
2.2.2. Agentes quelantes.....	38
2.2.2.1. Ácido etilenodiaminotetracético.....	38
2.2.3. Técnicas de irrigação.....	40
2.2.3.1. Quelação sequencial.....	40
2.2.3.2. Quelação contínua.....	40

2.2.4. Eficácia em dentes calcificados.....	41
2.3. CBCT.....	41
3. Abordagem endodôntica contemporânea.....	44
3.1. Planejamento Digital.....	44
3.2. Endodontia guiada.....	45
3.2.1. Navegação estática.....	46
3.2.1.1. Aplicações.....	46
3.2.1.2. Sistemas.....	49
3.2.1.3. Tipos de guias.....	50
3.2.1.4. Técnica e Etapas.....	51
3.2.1.5. Vantagens.....	54
3.2.1.6. Limitações.....	54
3.2.2. Navegação dinâmica.....	56
3.2.2.1. Aplicações.....	56
3.2.2.2. Sistemas.....	58
3.2.2.3. Técnica e Etapas.....	58
3.2.2.4. Vantagens.....	62
3.2.2.5. Limitações.....	64
4. Perspectivas futuras.....	66
4.1. Realidade aumentada.....	66
4.2. Inteligência Artificial.....	67
III. Conclusão.....	69
IV. Referências bibliográficas.....	71

Índice de figuras

Figura 1 - Imagens ilustrativas de radiografias clínicas e análises laboratoriais de um cálculo livre. (a) Radiografia de um incisivo mandibular com um cálculo no terço apical; (b) Corte axial e (c) corte sagital de uma microtomografia computadorizada com resolução de 10 µm do mesmo dente; (d) e (e) Cortes sagitais da peça com pigmento fluorescente sob microscopia de fluorescência. Adaptado de (Marshall et al., 2023).

Figura 2 - (a) Imagem ilustrativa da coloração coronária característica de dentes com MC; (b) Vista coronária de uma CBCT de um 21 com OPCR até ao terço apical e imagem radiotransparente nos tecidos periapicais; (c) Vista sagital da peça dentária que mostra a presença de uma dilaceração palatina a nível radicular, uma ramificação vestibular do canal radicular e perda de osso cortical sem atingimento do osso ao nível da crista óssea. Adaptado de (Villa-Machado et al., 2021).

Figura 3 - Imagem ilustrativa da aquisição de um exame de CBCT. Imagem gentilmente cedida pelo Prof. Doutor Mário Pereira.

Figura 4 - Guia não-cirúrgica dento-suportada. (a) Janela de inspeção; (b) Manga; (c) Corpo da guia. Imagem gentilmente cedida pelo Mestre Ricardo Cachinho.

Figura 5 - Acesso endodôntico no dente 11 através de uma guia estática dento-suportada. (a) Colocação da guia sobre a arcada correspondente; (b) Acesso endodôntico; (c) Irrigação através da guia; (d) Cavidade de acesso. Imagens gentilmente cedidas pelo Mestre Ricardo Cachinho.

Figura 6 - Imagens ilustrativas do processo de rastreio. (a) Colocação do *HeadTracker* e (b) *JawTracker*; (c) Calibração do *tracer*; (d) Rastreio da superfície das peças dentárias para posterior correspondência com as imagens da CBCT. Adaptado de (Villa-Machado et al., 2021).

Figura 7 - Esquema comparativo dos dois métodos de rastreio.

Figura 8 - Acesso endodôntico no dente 21 com recurso a ND. (a) Peça de mão com a *DrillTag*; (b) *Target view* - encontram-se descritos no canto superior esquerdo: o desvio, em milímetros e graus, e a distância remanescente até ao *target point*, em milímetros. Do lado

direito, a barra verde indica o progresso da perfuração; (c) Vista panorâmica; (d) Vista sagital; (d) Vista coronária. Adaptado de (Villa-Machado et al., 2021).

Lista de siglas

3D - Tridimensional

AAE - *American Association of Endodontists*

BMP-2 - Proteína morfogénica óssea 2

CAD - *Computer aided design*

CAD/CAM - *Computer aided design e computer aided manufacturing*

CAM - *Computer aided manufacturing*

CBCT - Tomografia computadorizada de feixe cónico

CD68 - Biomarcadores para macrófagos

CD83 - Biomarcadores para células dendríticas

DCV - Doenças cardiovasculares

DICOM - *Digital imaging and communications in medicine*

DL - *Deep learning*

DM2 - Diabetes Mellitus tipo 2

EAC - Estenose da artéria coronária

EDTA - Ácido etilenodiaminotetracético

EG - Endodontia guiada

ESE - *European Society of Endodontology*

FOV - Campo de visão

GC - Glicocorticóides

HEBP/HEDP - Ácido etidróico

IA - Inteligência artificial

JAC - Junção amelo-cementária

kVp - Tensão de pico

LDL - Lipoproteína de baixa densidade

LPS - Lipopolissacarídeos

mA - Miliamperes

MC - Metamorfose calcificante

ML - *Machine learning*

MMTV - Vírus do tumor mamário do rato

NaOCl - Hipoclorito de sódio

NB - Nanobactérias

ND - Navegação dinâmica

NE - Navegação estática

NF-kB - Fator nuclear kappa B

OCR - Obliteração do canal radicular

OH - Ossificação heterotópica

OPCR - Obliteração parcial do canal radicular

OTCR - Obliteração total do canal radicular

OPG - Osteoprotegerina

RA - Realidade aumentada

RANK - Ativadores dos recetores do fator nuclear kappa B

RANKL - Ativadores dos recetores do ligando do fator nuclear kappa B

ROI - Região de interesse

SNP - Polimorfismo de um único nucleótido

STL - *Standart Tessellation Language*

WNT - Tipo *wingless*

I. Introdução

O conceito de “mineralização” é definido como um processo de deposição de matéria inorgânica numa matriz orgânica (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). A metamorfose calcificante (MC), também designada por calcificação do canal radicular ou obliteração do canal radicular (OCR), ocorre durante a mineralização da polpa dentária e caracteriza-se pela precipitação gradual de tecido duro no interior do canal radicular (Chaniotis et al., 2024; Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Este processo pode ter origem em dois mecanismos distintos: um aumento da precipitação concêntrica de uma matriz mineral ou a aglutinação de vários cálculos de menores dimensões (Marshall et al., 2023; Tosco et al., 2025). Estas calcificações, tipicamente identificadas em imagens radiográficas sob a forma de corpos radiopacos, são classificadas como mineralizações ectópicas, podendo apresentar dimensões variáveis, desde partículas microscópicas até extensos cálculos, podendo afetar grande parte da câmara pulpar (Tosco et al., 2025).

As calcificações pulpares são constituídas por duas componentes, a orgânica e a inorgânica (Marshall et al., 2023). A matriz mineral e inorgânica da OCR é composta por uma base de hidroxiapatite e uma junção de diversos oligoelementos (Marshall et al., 2023). A componente orgânica engloba fibras de colagénio e células em degeneração (Marshall et al., 2023).

Estima-se que pelo menos 50% de todas as peças dentárias apresentem algum grau de calcificação (Fristad & Berggreen, 2020). A origem da obliteração dos canais radiculares tem sido associada a processos fisiológicos característicos do envelhecimento e a características biológicas e genéticas dos próprios indivíduos (Fristad & Berggreen, 2020; Gabardo et al., 2019). A presença de nanopartículas e nanobactérias também tem sido apontada como fator causal (Gabardo et al., 2019). No entanto, como ocorre principalmente como consequência de traumas dentários, particularmente em dentes anteriores de indivíduos jovens (Vinagre et al., 2021), estima-se que cerca de 4 a 24% de todos os dentes afetados por trauma possam desenvolver algum grau de calcificação (Lima et al., 2023). Apesar do conhecimento destes factos e da sua prevalência significativa, a etiologia, o desenvolvimento, a configuração, a composição e a influência da OCR na saúde oral e sistémica ainda não encontram explicação (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021).

A metamorfose calcificante apresenta várias características e fatores de risco em comum com a ossificação heterotópica (OH), que se define pelo crescimento de tecido ósseo maduro dentro de tecidos moles extra-esqueléticos (Zhan et al., 2023). Devido ao envolvimento da via de sinalização da proteína morfogenética óssea, ao desenvolvimento ectópico de tecido duro em regiões de tecido mole e à maior prevalência dos cálculos numa relação de intimidade com estruturas neurovasculares comuns a ambas as patologias referidas, teoriza-se um possível envolvimento dos nervos sensoriais (Zhan et al., 2023). Assim, contrariamente ao que é defendido pelas teorias mais tradicionais, é possível que as terminações nervosas sensoriais dentárias não assumam apenas uma função de receptores nociceptivos, mas que têm também um papel fundamental na mediação e regulação da homeostase do complexo pulpo-dentinário e na formação de mineralizações (Zhan et al., 2023).

Existe uma associação entre a OCR e determinadas doenças sistêmicas e medicações, como por exemplo a nefrolitíase e a aterosclerose (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Estas condições podem conduzir à mineralização ectópica de tecidos conjuntivos (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Existem outras condições sistêmicas e genéticas que provocam desregulação e modificações patológicas, contribuindo para a predisposição à calcificação pulpar de polpas saudáveis (Marshall et al., 2023; Milcent et al., 2019). Entre essas condições temos: dentinogênese imperfeita, displasia dentinária, artrite reumatóide, doenças cardiovasculares e renais, diabetes e síndrome de Marfan e síndrome de Williams (Marshall et al., 2023; Milcent et al., 2019).

A presença de metamorfose calcificante não é por si só sinónimo de necrose pulpar, sendo até um indicador de vitalidade pulpar (Jain et al., 2020a). Assim, o tratamento endodôntico destes dentes só está indicado se houver sintomas clínicos e/ou radiológicos de patologia periapical, o que se aplica a cerca de 7% a 27% dos dentes (Jain et al., 2020a).

O acesso endodôntico continua a ser um desafio importante na endodontia quando se abordam dentes com canais calcificados (Lima et al., 2023). Isto deve-se ao desaparecimento ou diminuição do lúmen da anatomia interna, que pode resultar numa perda substancial de dentina vital durante o processo de localização da mesma (Jain et al., 2020a). O sucesso de qualquer tratamento endodôntico depende significativamente da qualidade da cavidade de acesso (Nasiri & Wrbas, 2023), motivo pelo qual a *American Association of Endodontists* (AAE) atribui um grau de dificuldade elevada para o tratamento destes dentes ((American

Association of Endodontists & Canadian Academy of Endodontics, s.d.). A presença de canais calcificados aumenta a propensão a acidentes iatrogénicos, (Chaniotis et al., 2024), entre os quais: perfurações, alteração da anatomia do canal (Dianat et al., 2020) e criação de falsos trajetos (Llaquet Pujol et al., 2020).

Consequentemente, um conjunto de novas técnicas tem sido desenvolvido com o intuito de tornar todo o procedimento mais seguro e de aumentar a taxa de sucesso (Vinagre et al., 2021). Com o desenvolvimento da Endodontia Digital e o uso cada vez mais frequente da tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT) (Chaniotis et al., 2024; Marshall et al., 2023), da CAD-CAM e dos *scanners* intraorais, procedimentos como a Endodontia Guiada têm-se vindo a provar úteis no tratamento destes casos, facilitando a realização de um acesso endodôntico conservador e conferindo maior previsibilidade (Kinariwala, 2021b).

De igual modo, o uso de pontas de ultra-som e a aplicação de métodos de irrigação de quelação contínua têm mostrado grande potencial na minimização de erros iatrogénicos (Nasiri & Wrbas, 2023).

II. Desenvolvimento

1. Metamorfose Calcificante

1.1. Composição e classificação

A metamorfose calcificante é caracterizada por um padrão de crescimento característico, com início na câmara pulpar e progressão gradual em direção aos canais pulpares (Vinagre et al., 2021). Este processo resulta na formação de minerais de hidroxiapatite carbonatada (cálculos), que podem apresentar dimensões variáveis (Fristad & Berggreen, 2020). Estas partículas, geralmente de tamanho microscópico, podem agregar-se às paredes das arteríolas pulpares ou progredir até formar extensos cálculos, afetando uma grande área de espaço pulpar (Fristad & Berggreen, 2020).

Radiograficamente, a metamorfose calcificante pode ser classificada em: calcificação parcial (OPCR) e calcificação completa (OTCR) (Chaniotis et al., 2024). Na OPCR ou localizada verifica-se a presença de alguma obliteração, sobretudo ao nível da câmara pulpar (Chaniotis et al., 2024). Não se verifica um atingimento significativo dos canais ou da região apical, sendo possível identificar as anatomias afetadas (Chaniotis et al., 2024). Com uma prevalência de 3.8% a 24%, este tipo de calcificação surge geralmente como resposta a processos traumáticos tais como: fracturas dentárias, fraturas da mandíbula, movimentações dentárias e intervenções endodônticas (Chaniotis et al., 2024).

As OTCR são consideravelmente menos frequentes, estando maioritariamente associadas a processos fisiológicos, consequência natural do envelhecimento (Chaniotis et al., 2024). Nos casos de maior severidade, podemos observar um pronunciado preenchimento tanto da câmara pulpar como dos canais radiculares, resultando numa maior dificuldade ou até mesmo completa impossibilidade de localização do canal radicular (Chaniotis et al., 2024).

As **características morfológicas** das calcificações pulpares diferem em função da região anatómica onde se encontram (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Na polpa radicular as calcificações apresentam uma expressão difusa ou linear, devido aos feixes vasculares de maior calibre e da maior saturação de fibras de colagénio características dessa área (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021; Tosco et al., 2025). Ao nível da câmara pulpar é mais comum o desenvolvimento de cálculos pulpares de menores dimensões e mais concêntricos, por influência do número aumentado de células na região (Fristad & Berggreen, 2020; Chaniotis et al., 2024; Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Embora os cálculos a nível

coronário apresentem geralmente uma morfologia ovóide ou nodular, as mineralizações tendem a mimetizar a forma das estruturas que afetam (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021; Tosco et al., 2025). Podendo por vezes assumir uma forma análoga à anatomia da câmara pulpar (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Em contraste, as obliterações radiculares apresentam uma configuração mais cilíndrica ou tubular (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021; Tosco et al., 2025). Descreve-se, adicionalmente, uma diferenciação entre as superfícies rugosas e porosas das calcificações radiculares e as superfícies lisas e compactas das calcificações coronárias (Tosco et al., 2025).

De acordo com a sua **localização** os cálculos podem ser classificados em: livres, aderidos ou integrados (Gabardo et al., 2019; Palatyńska-Ulatowska et al., 2021; Tosco et al., 2025). Os cálculos livres e integrados encontram-se total ou parcialmente envolvidos por dentina, sendo os últimos incrustados na mesma aquando da dentinogénese (Gabardo et al., 2019; Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Por sua vez, os cálculos aderidos apresentam uma continuidade com as paredes dentinárias (Gabardo et al., 2019; Palatyńska-Ulatowska et al., 2021).

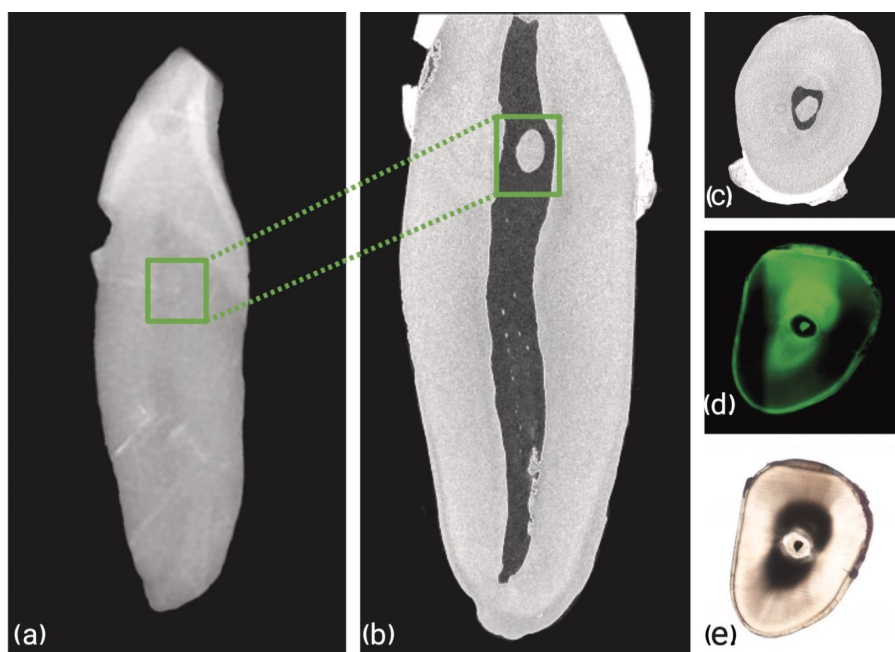


Figura 1 - Imagens ilustrativas de radiografias clínicas e análises laboratoriais de um cálculo livre. (a) Radiografia de um incisivo mandibular com um cálculo no terço apical; (b) Corte axial e (c) corte sagital de uma microtomografia computadorizada com resolução de 10 µm do mesmo dente; (d) e (e) Cortes sagitais da peça com pigmento fluorescente sob microscopia de fluorescência.

De acordo com a sua **composição**, esses cálculos são por sua vez classificados em verdadeiros ou falsos (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Os cálculos verdadeiros, que apresentam características semelhantes à dentina, são constituídos por túbulos dentinários e processos odontoblásticos (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). A camada mais externa destes cálculos é recoberta por um escasso número de odontoblastos (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Relativamente aos cálculos falsos, estes são constituídos por um núcleo celular, envolvido por depósitos minerais concêntricos estratificados (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). O núcleo das células pode estar necrótico e pode originar novos focos de obliteração (Fristad & Berggreen, 2020; Palatyńska-Ulatowska et al., 2021).

Relativamente à **composição química**, embora esta varie conforme a localização dentária e a zona do próprio cálculo em específico, o cálcio e o fósforo destacam-se como os principais componentes (Milcent et al., 2019; Tosco et al., 2025). Em geral, elementos como o cobre, o ferro e o zinco apresentam uma concentração superior na dentina hígida (Milcent et al., 2019). Na região interna das calcificações pulpares encontramos em maior quantidade elementos como o oxigénio, cálcio, carbono e fósforo (Milcent et al., 2019). À superfície encontramos elementos como o nitrogénio, o alumínio, o cloro, o carbono, o enxofre, o cobre, o potássio, o chumbo e o zinco (Milcent et al., 2019). Adicionalmente, é possível distinguir as obliterações radiculares e coronárias (Milcent et al., 2019). As obliterações radiculares apresentam uma menor prevalência de cálcio e fósforo, comparativamente com os cálculos coronários (Milcent et al., 2019).

De um ponto de vista **histológico**, verifica-se uma maior acumulação de fibras de colagéneo na superfície das calcificações pulpares indicando uma formação contínua dessas estruturas (Fristad & Berggreen, 2020). Origina cálculos laminados e concêntricos, de textura lisa e forma regular circular ou ovóide (Fristad & Berggreen, 2020). Em alternativa, estruturas não laminadas, de textura rugosa e forma irregular apresentam um crescimento resultante da mineralização de feixes de fibras de colagéneo formadas anteriormente (Fristad & Berggreen, 2020). Este processo estende-se às fibras grossas da superfície, produzindo uma aparência difusa (Fristad & Berggreen, 2020). Frequentemente, estes feixes de fibras grossas apresentam uma aparência semelhante a tecido cicatricial antigo, o que sugere a ocorrência de processos de hialinização (Fristad & Berggreen, 2020).

Os cálculos podem também surgir na periferia do ápex radicular, contendo túbulos dentinários (Fristad & Berggreen, 2020). A hipótese mais aceite é que as calcificações

encontradas nesta região possam ter origem em torno de células epiteliais, particularmente à volta de resquícios da bainha da raiz epitelial de Hertwig (Fristad & Berggreen, 2020). Este fenómeno pode ser consequência da estimulação da diferenciação das células estaminais mesenquimais adjacentes em odontoblastos desencadeada pelos remanescentes epiteliais (Fristad & Berggreen, 2020).

1.2. Etiologia

Tradicionalmente descrita como uma deposição de dentina terciária, alguns autores têm mais recentemente vindo a classificar a metamorfose calcificante como uma calcificação distrófica multifocal (van der Vyver et al., 2020). As calcificações distróficas correspondem a mineralizações que se desenvolvem pela precipitação de cálcio nos tecidos em processo degenerativo (Fristad & Berggreen, 2020). A deposição de cristais de fosfato de cálcio pode dar-se no interior das células propriamente ditas (Fristad & Berggreen, 2020). As células degeneradas atuam como um foco de calcificação, promovendo a sua propagação aos tecidos (Fristad & Berggreen, 2020). Este processo tem início nas mitocôndrias que, em virtude da incapacidade de manter o funcionamento normal dos sistemas de transportes ativos da membrana, sofrem um aumento da permeabilidade desta ao cálcio (Fristad & Berggreen, 2020).

Contudo, a ocorrência de mineralizações em polpas aparentemente saudáveis sugere que pode não ser necessária a ação de stress funcional para que a OCR ocorra, o que torna questionável a aplicação definitiva do termo “distrófica” (Fristad & Berggreen, 2020). Nestes casos onde não é detetado qualquer grau de degeneração celular, o mecanismo biológico da metamorfose calcificante ainda está por desvendar (Fristad & Berggreen, 2020).

1.2.1. Idade

A análise microscópica da dentição de pacientes jovens indica a presença de OCR em mais de 50% do total de dentes (Zhan et al., 2023). Este valor pode ascender aos 100% em pacientes idosos (Zhan et al., 2023). Este aumento da presença da metamorfose calcificante em pacientes idosos parece estar associado ao envelhecimento da própria polpa dentária, o qual resulta numa redução da quantidade de células, terminações nervosas e vascularização da polpa, em particular na câmara pulpar (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021).

Consequentemente, ocorre degeneração hialina com um aumento do conteúdo fibrilar e da condensação do colagénio (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021), o que o torna num potencial foco de calcificação (Fristad & Berggreen, 2020). Juntamente a estas alterações observa-se também uma intensificação da expressão de genes envolvidos na apoptose celular, que provoca a destruição de capilares, resultando na formação de trombos com plaquetas (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Caso não sejam fagocitadas, as células em processo de apoptose tendem a acelerar a produção de calcificações nodulares, típicas da região coronária (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021).

O papel catalisador das células em apoptose no crescimento da metamorfose calcificante é mediado pela libertação de fosfatidilserina (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Esta liga-se a moléculas de cálcio e fosfato inorgânico, estimulando o princípio da deposição mineral e modelando a morfologia dos cálculos, atribuindo-lhes uma configuração mais nodular (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Este mecanismo está dependente da quantidade de cálcio e fosfato disponíveis na matriz extracelular, que serão absorvidos por mineralizações em formação por processos de nucleação heterogénea (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021).

Com o envelhecimento pulpar dá-se também uma diminuição do espaço disponível para a já diminuída circulação neurovascular (Almadhoon et al., 2022). A deposição adicional de dentina e cemento na porção apical da polpa, pode, em casos mais graves, resultar numa interrupção total dos fluxos nervosos e vasculares (Almadhoon et al., 2022). Consequentemente, há uma diminuição do aporte sanguíneo às células pulpares, provocando a sua substituição por lípidos que, ao sofrerem atrofia, dão origem a lesões quísticas (Almadhoon et al., 2022). É nestes quistos que se dão processos de degeneração mucóide, permitindo então que ocorra o processo de calcificação (Almadhoon et al., 2022).

Adicionalmente, outras mudanças naturais do envelhecimento contribuem para uma maior propensão do aparecimento de OCR em indivíduos de idade mais avançada (Fristad & Berggreen, 2020). Estas mudanças incluem a diminuição excessiva do número de odontoblastos na polpa e um aumento da dentina peritubular e da esclerose dentinária (Fristad & Berggreen, 2020). Consequentemente, existe uma diminuição gradual no diâmetro e permeabilidade dos túbulos dentinários (Fristad & Berggreen, 2020). Além disso, a maior resistência adquirida à ação de enzimas proteolíticas, da hialuronidase e da sialidase sugere

uma alteração do colagénio e dos proteoglicanos no tecido pulpar (Fristad & Berggreen, 2020).

1.2.2. Estímulos traumáticos

De entre os principais fatores que desencadeiam o início e desenvolvimento da metamorfose calcificante estão incluídos: os processos traumáticos, as lesões de cárie, as restaurações profundas, os traumas oclusais, os desgastes dentários ou as forças ortodônticas, bem como os deslocamentos de peças dentárias (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Tratam-se de estímulos de longa duração e baixa intensidade (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021).

Aproximadamente 15% dos dentes que sofrem luxações podem apresentar obliteração do canal pulpar, uma condição que depende do tipo específico de luxação e do grau de desenvolvimento radicular (Krašťl et al., 2021a). Já em casos de avulsão, o desenvolvimento de OCR é observado em cerca de 4 a 14% de todos os dentes reimplantados (Moura et al., 2017). Verifica-se uma prevalência significativa em dentes com ápex imaturo que tenham sido sujeitos a extrusões (61%) ou luxações laterais (17%) (Krašťl et al., 2021b). Este tipo de movimentos provoca danos severos no feixe neurovascular (Vera et al., 2023), alterações na circulação sanguínea e até mesmo necrose em determinadas regiões, à semelhança do que acontece nas fraturas radiculares em dentes permanentes (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Contudo, caso a polpa demonstre resistência, os processos de revascularização poderão induzir alterações recessivas pulpares, tais como hialinizações e deposição de calcificações amorfas e difusas (Flores et al., 2007; Vera et al., 2023).

As alterações circulatórias podem ser responsáveis pela estimulação e diferenciação de células dos músculos lisos das arteríolas pulpares em células metaplásicas com potencial osteogénico (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Em contrapartida, as células, secretam vesículas matriciais que, após se propagarem pela membrana basal ao longo dos vasos, causam uma acumulação de cristais de fosfato de cálcio (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). A partir daqui, formam-se cálculos através de nucleações heterogêneas (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). A camada adventícia dos vasos sanguíneos apresenta uma maior susceptibilidade à mineralização devido a alterações ateroscleróticas (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Esta susceptibilidade permite a deposição de cristais de

hidroxiapatite em diferentes locais da matriz extracelular, estabelecendo uma via de mineralização (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021). Estas calcificações, características dos canais radiculares, apresentam uma morfologia mais difusa, na medida em que as vesículas da matriz se difundem em torno das estruturas dos tecidos (Palatyńska-Ulatowska et al., 2021; Tosco et al., 2025).

Em circunstâncias nas quais ocorrem alterações significativas na homeostase dos dentes e dos tecidos circundantes, como aquelas resultantes da cessação da vascularização, desencadeia-se uma resposta nos ativadores dos recetores do ligando do fator nuclear kappa B (NF- κ B) (RANKL), dos ativadores dos recetores do NF- κ B (RANK) e dos recetores osteoprotegerina (OPG) (Lewis & Aggarwal, 2023).

Em dentes imaturos, é comum observar-se a formação gradual de uma linha indicadora da falência da formação normal de dentina tubular no momento do trauma (Flores et al., 2007). Enquanto que a camada pré-dentinária precedente é normalmente preservada, a maioria dos túbulos dentinários sofrem uma interrupção nesta linha (Flores et al., 2007). Após um período de tempo, a formação de novo tecido duro é retomada, devido à ausência da estrutura tubular normal (Flores et al., 2007). Para além das inclusões vasculares, este novo tecido apresenta, de forma recorrente, inclusões celulares que preservam as ligações tubulares com a dentina previamente estabelecidas antes do dano (Flores et al., 2007). A formação de tecido duro tende a persistir até que o canal radicular esteja completamente obliterado (Flores et al., 2007). A calcificação celular reacionária pode exibir características do cimento e do osso, mas não apresenta a arquitetura celular própria destes tecidos (Flores et al., 2007). Devido à sua propensão para se transformar em dentina tubular, este tecido de cicatrização é apelidado de dentina celular (Flores et al., 2007).

É igualmente possível observar a ocorrência de OCR após a progressão de cáries profundas, tratamentos restauradores extensos e terapias pulpares vitais, devido à formação de dentina terciária (Buchgreitz et al., 2021). Esta dentina resulta de mecanismos reparadores que surgem após lesão da mesma (Duncan et al., 2019; Ren et al., 2023). Os odontoblastos dentinários encontram-se na zona mais periférica em relação à polpa e, como tal, são as primeiras células a necrosar (Duncan et al., 2019; Ren et al., 2023). Num processo subsequente de substituição verifica-se a diferenciação de células semelhantes aos odontoblastos originais, que passam a produzir então dentina terciária (Duncan et al., 2019; Ren et al., 2023).

Adicionalmente, é possível observar um aumento no desenvolvimento de mineralizações pulparem em pacientes ortodônticos, variando de 1,56% a 6,5% (Vitali et al., 2022). É mais comum em dentes que sejam sujeitos a forças intrusivas, particularmente incisivos, responsáveis por uma diminuição imediata no aporte sanguíneo aos tecidos pulparem (Buchgreitz et al., 2021; Vitali et al., 2022). Dependendo da distribuição, intensidade, duração, direção e do tipo da força, os movimentos ortodônticos causam alterações na polpa e nos tecidos de suporte dentário, estimulando a libertação de mediadores inflamatórios (Vitali et al., 2022). Os mecanismos reparadores são desencadeados por odontoblastos e células semelhantes, manifestando-se através da acumulação de dentina terciária ou reabsorções radiculares (Vitali et al., 2022).

1.2.3. Fatores genéticos

A genética tem sido identificada como um fator de risco para o desenvolvimento de calcificações pulparem, devido ao aumento da suscetibilidade individual (Ramirez et al., 2023). Segundo um estudo recente, pelo menos 300 genes desempenham um papel na secreção, desenvolvimento e regulação da dentina (Chen et al., 2022).

A família de locais de integração MMTV (vírus do tumor mamário do rato), do tipo *wingless* (WNT) tem um papel em ambas as vias da dentinogênese e da resposta da dentina ao stress (Kornsuthisophon et al, 2022). A via WNT é responsável pela regulação de múltiplas fases do desenvolvimento dentário e da manutenção após a erupção (Kornsuthisophon et al, 2022). A modulação de eventos celulares nas células da polpa dentária, através de vias canônicas e não canônicas, é igualmente considerada fundamental para os processos fisiológicos e patológicos pulparem (Kornsuthisophon et al, 2022).

A via WNT constitui um importante regulador do equilíbrio entre a função osteoblástica e osteoclástica, sinalizando sobrevivência dos odontoblastos e estimulando, consequentemente, a produção e mineralização contínuas de dentina (Ramirez et al., 2023). Uma pesquisa *in vitro* com células da polpa dentária demonstrou as vantagens da ativação da sinalização da WNT/ β -catenina na diferenciação dos odontoblastos, sugerindo a potencial função da WNT na resposta da polpa às lesões (Vijaykumar et al., 2022). De acordo com os resultados de um estudo realizado com ratos, com vista a simular uma lesão dentinária, foi

possível constatar que, após estimulação por WNT, os odontoblastos produzem nova dentina após uma lesão dentinária superficial (Zhao et al., 2018).

Os SNP's (polimorfismos de um único nucleótido) representam a forma mais frequente de variação genética em seres humanos (Ramirez et al., 2023). Trata-se de uma mutação genética que implica uma alteração de um único par de bases do genoma (Ramirez et al., 2023). Os SNP's adjacentes, localizados nos genes das vias WNT, encontram-se associados à regulação da homeostase óssea, à densidade mineral óssea, às doenças ósseas associadas e outras características associadas à dentição (Ramirez et al., 2023). Apresentam potencial para uma relação com o metabolismo mineral do complexo dentina-polpa (Ramirez et al., 2023).

A sobre-expressão da WNT7b causa um rácio mais elevado de cálcio/fosfato na dentina e uma redução na quantidade e diâmetro dos túbulos dentinários (Chen et al., 2019). Foi igualmente observado o efeito oposto (Ramirez et al., 2023). As mutações na β -catenina, uma proteína essencial para a via canónica WNT, levam a uma diferenciação defeituosa dos odontoblastos e a paredes dentinárias finas, provocando perturbações na dentinogénese e cementogénese (Ramirez et al., 2023).

Já a via não canónica da WNT regula diferentes eventos fisiológicos, atuando de forma independente da β -catenina (Ramirez et al., 2023). Quando ocorre a ligação da WNT ao seu recetor, há uma libertação de cálcio no interior da célula (Ramirez et al., 2023). Esta via WNT/cálcio está tipicamente associada a processos de desenvolvimento (Ramirez et al., 2023).

1.2.4. Nanobactérias e nanopartículas

Outra possibilidade para a origem etiopatogénica da metamorfose calcificante prende-se com a participação de nanobactérias (NB), ou nanopartículas calcificantes (Almadhoon et al., 2022; Wang et al., 2024). As teorias convencionais definem as NB como um foco de nucleação para a formação de apatite biogénica (Almadhoon et al., 2022; Wang et al., 2024). Este processo implica a libertação de toxinas e citocinas nefastas para as células, bem como a promoção de respostas inflamatórias (Almadhoon et al., 2022; Wang et al., 2024). Por outro lado, estudos mais recentes têm vindo a oferecer uma nova perspetiva sobre as nanobactérias (Almadhoon et al., 2022; Wang et al., 2024). A hipótese mais provável é que

estas partículas sejam, na realidade, proteínas minerais sem vida, mas com estrutura própria, capacidade de crescimento e proliferação e subculturas equiparadas a microrganismos vivos (Almadhoon et al., 2022; Wang et al., 2024).

A presença destes complexos macromoleculares calcificantes auto-propagantes podem ser encontrados no tecido ósseo e no sangue, apresentando um diâmetro entre os 20-500 nm (Almadhoon et al., 2022; Wang et al., 2024). São potenciais patógenos, produzindo apatite carbonatada biogénica e hidroxiapatite nucleada, ambas as estruturas associadas ao desenvolvimento de calcificações em várias regiões do corpo e correlacionadas com patologias como aterosclerose, cálculos renais e prostatite (Almadhoon et al., 2022; Wang et al., 2024). As NB são encontradas em grandes quantidades em calcificações pulpares, o que sugere que tenham um papel importante na formação de mineralizações (Almadhoon et al., 2022; Wang et al., 2024).

Os agentes patogénicos, tais como bactérias e toxinas, desempenham um papel meritório na estimulação direta das células pulpares (Diogenes et al., 2020). As toxinas bacterianas, incluindo os lipopolissacarídeos (LPS), são responsáveis pela ativação de receptores do tipo Toll, presentes em células estaminais e progenitoras (Diogenes et al., 2020). Esta ativação desencadeia processos de inflamação intrapulpares (Diogenes et al., 2020). As células estaminais da polpa e dos tecidos periradiculares têm a capacidade de detetar a presença de microrganismos e são seriamente afetadas por antigénios microbianos e citocinas próprias de meios inflamatórios (Diogenes et al., 2020). Tais fatores interferem na regulação do seu potencial de diferenciação e proliferação (Diogenes et al., 2020). De igual modo, diversos fatores de crescimento parecem ter também capacidade de estimular a diferenciação de células estaminais mesenquimais em células *odontoblast-like* (Diogenes et al., 2020).

1.3. Fatores de risco sistémicos

Determinadas disfunções metabólicas podem conduzir a uma elevada concentração de cálcio e fosfato na circulação sanguínea, que pode ser apontada como fator causal da metamorfose calcificante (Almadhoon et al., 2022). Esta abundância mineral tende a formar depósitos a nível ósseo e nas peças dentárias (Almadhoon et al., 2022). Contudo, é comum a ocorrência de metastizações calcificantes em regiões ectópicas, tais como os rins, as

articulações e os vasos sanguíneos (Almadhoon et al., 2022). Estas precipitações tendem a revelar irregularidades no metabolismo sistémico do cálcio, resultando em hipercalcémia (Almadhoon et al., 2022). A OCR pode ser indicativa de problemas sistémicos (Almadhoon et al., 2022). Por conseguinte, a presença de cálculos pulpares pode ter um papel relevante como marcador no diagnóstico de doenças sistémicas (Almadhoon et al., 2022).

1.3.1. Doenças Cardiovasculares

Com relação causal direta com o desenvolvimento de diversas doenças cardiovasculares (DCV), a estenose da artéria coronária (EAC) é uma doença com grande impacto na saúde (Almadhoon et al., 2022).

Sugere-se que, em determinados casos, a OCR e a EAC tenham a hipercalcémia como patogénese comum (Almadhoon et al., 2022). O aumento do número de partículas de fosfato de cálcio na circulação contribui para a acumulação de tecido mineral na artéria coronária, o que pode aumentar o risco de desenvolvimento de doenças cardiovasculares (Almadhoon et al., 2022). Conforme demonstrado por vários estudos, foi observada uma relação estatisticamente significativa entre doentes com mais de 40 anos que apresentam metamorfose calcificante e a incidência de doenças cardiovasculares (Almadhoon et al., 2022).

Importa salientar que, para além do carácter multifatorial das DCV, outros fatores frequentemente associados a estas podem exercer influência na génese da metamorfose calcificante (Parashar et al., 2022). Entre esses fatores em questão destacam-se certos agentes farmacológicos, nomeadamente estatinas e glicocorticóides, outras doenças sistémicas não diagnosticadas e a idade (Parashar et al., 2022).

1.3.2. Patologias renais

À semelhança das EAC, a presença de cálculos renais parece estar associada com a presença de calcificações noutras regiões do corpo, podendo ser apenas uma manifestação local de uma disfunção sistémica no metabolismo do cálcio (hipercalcémia) (Almadhoon et al., 2022). Num artigo de Gabardo et al. (2019), concluíram que é duas vezes mais provável encontrar cálculos renais em pacientes com metamorfose calcificante.

Ainda que a evidência seja escassa, tudo indica que os processos inflamatórios responsáveis pela formação de cálculos pulpares estejam também relacionados com o desenvolvimento de certas doenças sistêmicas (Romano et al., 2022). A litíase renal, também conhecida como “pedras nos rins”, resulta da sobressaturação da urina com oxalato de cálcio ou fosfato de cálcio (Romano et al., 2022). A elevação do nível de concentração destes compostos induz a nucleação, o crescimento e a agregação de cristais de cálcio (Romano et al., 2022). Da mesma forma, a deposição dos cristais de cálcio que formam as OCR inicia-se em agregados amorfos de glicoproteínas fosforiladas, entre as quais a osteopontina (OPN) (Romano et al., 2022). A semelhança no padrão de alterações teciduais observada em ambas as calcificações reforça a hipótese de uma correlação entre calcificações nos rins e nos tecidos pulpares (Romano et al., 2022).

1.3.3. Diabetes

A Diabetes Mellitus tipo 2 (DM2) caracteriza-se por níveis elevados de glicémia (hiperglicémia) (Alsamahi et al., 2022). Esta condição pode desencadear alterações morfológicas no complexo dentina-polpa, tais como a formação irregular de dentina terciária e uma diminuição do número de células (Alsamahi et al., 2022). Estas alterações revelam uma maior predisposição à mineralização e deposição de colagénio, resultando em características semelhantes às da polpa envelhecida (Alsamahi et al., 2022). Verifica-se uma modificação nas propriedades mecânicas da dentina devido ao facto do colagénio estar sujeito a glicação, tornando-se mais rígido e frágil (Alsamahi et al., 2022). A maior parte da estrutura dentinária é composta por dentina intertubular, apresentando uma mineralização inferior à da dentina peritubular, localizada à volta dos túbulos dentinários (Alsamahi et al., 2022). As alterações no processo de calcificação e a redução da mineralização, desencadeadas pela DM2, resultam num aumento da dimensão e da densidade dos túbulos dentinários, que se apresentam em maior número nas regiões mais próximas da polpa (Saghiri et al., 2020). Este facto sugere que a dentina peritubular será a mais afetada por estas modificações morfológicas (Saghiri et al., 2020).

Diversos estudos têm vindo a demonstrar que a polpa dentária em pacientes com diabetes mellitus tipo 2 (DM2) é significativamente menos vascularizada, com um espessamento das paredes dos vasos sanguíneos devido ao engrossamento do colagénio perivascular (Alsamahi et al., 2022). Estas alterações conduzem ao desenvolvimento da

ateroesclerose e a uma diminuição do potencial de regeneração pulpar e de angiogénese (Alsamahi et al., 2022).

Em resposta à hiperglicémia o organismo sofre alterações imunitárias, tanto a nível local como sistémico (Alsamahi et al., 2022). A análise da polpa dentária revela uma instabilidade imuno-inflamatória, com o aumento da expressão de células imunitárias e citocinas pró-inflamatórias (Alsamahi et al., 2022). Em amostras laboratoriais de pacientes diabéticos os biomarcadores para células dendríticas (CD83) e macrófagos (CD68) apresentam-se *upregulated* (Alsamahi et al., 2022). Os macrófagos são células de grande importância na defesa e homeostase dos tecidos, fundamentais na eliminação de substâncias irritantes e patogénicas, estimulando a regeneração (Alsamahi et al., 2022). Nestes casos, verifica-se que estas funções encontram-se comprometidas (Alsamahi et al., 2022).

1.3.4. Glicocorticóides

Os glicocorticóides (GC) pertencem ao grupo das hormonas esteróides e ligam-se aos receptores glicocorticóides, com poder de ação na inibição do sistema imunitário, controlo do metabolismo da glicose e redução da inflamação (Vandewalle et al., 2018; Xu et al., 2024). Estes fármacos são úteis no tratamento da asma crónica, alergias, artrite, doenças autoimunes e no seguimento de transplantes de órgãos (Jiandong et al., 2022; Vandewalle et al., 2018; Xu et al., 2024).

A manifestação de efeitos secundários adversos está dependente da dose e da duração da administração, bem como da farmacocinética destes fármacos (Jiandong et al., 2022). Existe alguns resultados que apontam para a maior prevalência de canais de lúmen reduzido em pacientes que façam esta terapêutica a longo termo, sendo nestes casos a toma de esteróides apontada como o fator causal mais significativo para a presença de mineralizações (Jiandong et al., 2022).

No entanto, é importante referir que existe uma forte probabilidade dos GC produzirem uma resposta individual única e específica, visto que as reações diferem significativamente de indivíduo para indivíduo (Jiandong et al., 2022). Sublinha-se também o facto da toma de corticoesteróides ser frequentemente prescrita a indivíduos com doenças renais (Jiandong et al., 2022). Como tal, os efeitos divergentes registados podem ser resultado

da falência renal dos indivíduos estudados, o que provoca alterações no metabolismo hormonal e, como consequência, estimula a formação de dentina (Jiandong et al., 2022).

1.3.5. Estatinas

As estatinas, uma classe de medicamentos frequentemente utilizados para reduzir os níveis plasmáticos de colesterol LDL, apresentam também propriedades antibacterianas, anti-inflamatórias e imunomoduladoras (Ideo et al., 2023).

Foi demonstrado que as estatinas, em particular a sinvastatina, têm um impacto significativo na diferenciação odontogénica das células estaminais da polpa dentária (Pettiette et al., 2013). As estatinas influenciam a diferenciação e a função tanto dos osteoblastos como dos odontoblastos (Pettiette et al., 2013). Este processo ocorre devido à estimulação da diferenciação odontoblástica e da expressão de fatores angiogénicos da heme oxigenase-1 nas células da polpa dentária humana (Pettiette et al., 2013). A heme oxigenase-1, induzida pela sinvastatina, pode também promover a formação de dentina (Pettiette et al., 2013). Adicionalmente, a toma de estatinas promove a função dos osteoblastos através da via BMP-2 (proteína morfogénica óssea 2) e da supressão da função dos osteoclastos, resultando num aumento da formação de tecido ósseo (Pettiette et al., 2013).

1.4. Diagnóstico

A maioria das peças dentárias que apresentam OCR não apresentam patologia apical associada (Jadhav & Mittal, 2024). Assim, o diagnóstico radiográfico é realizado através de radiografias intraorais de rotina, sendo que as calcificações de dimensões mais reduzidas, com um diâmetro inferior a 200 µm, são detectáveis apenas através de imagens de CBCT (Milcent et al., 2019). Se tiver origem num trauma, é comum o diagnóstico só ser possível pelo menos um ano após a ocorrência do acidente (Moura et al., 2017).

Para além dos métodos complementares de diagnóstico, a coloração característica da coroa que surge nos dentes afetados por metamorfose calcificante constitui um sintoma clínico útil para a identificação desta condição (Jadhav & Mittal, 2024). Como consequência do aumento da deposição de dentina na câmara pulpar, a coroa adquire uma tonalidade mais

escurecida comparativamente aos dentes adjacentes (Jadhav & Mittal, 2024; Moura et al., 2017). A porção coronária apresenta tipicamente uma coloração amarelada, embora possa adquirir uma tonalidade acinzentada, resultante da diminuição da translucidez coronária (Jadhav & Mittal, 2024; Vinagre et al., 2021). Apesar destas alterações não serem indicativas de patologia, regista-se uma incidência de patologia pulpar e/ou periapical superior nos dentes com coloração coronária acinzentada (van der Vyver et al., 2020). Considerando o desenvolvimento contínuo das calcificações, a coloração tende a tornar-se mais notória ao longo do tempo (Jadhav & Mittal, 2024; Vinagre et al., 2021).

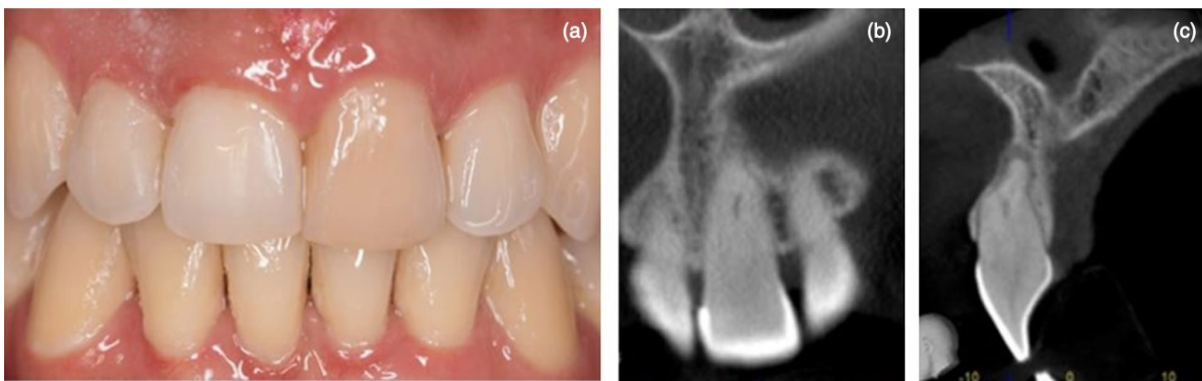


Figura 2 - (a) Imagem ilustrativa da coloração coronária característica de dentes com MC; (b) Vista coronária de uma CBCT de um 21 com OPCR até ao terço apical e imagem radiotransparente nos tecidos periapicais; (c) Vista sagital da peça dentária que mostra a presença de uma dilaceração palatina a nível radicular, uma ramificação vestibular do canal radicular e perda de osso cortical sem atingimento do osso ao nível da crista óssea.

No que respeita ao diagnóstico pulpar, os dentes com MC tendem a manifestar, numa fase inicial, respostas normais aos testes de sensibilidade (Moura et al., 2017). No entanto, com a ininterrupta deposição mineral, as peças dentárias vão reagir com cada vez menos intensidade, deixando, eventualmente, de responder aos estímulos (Moura et al., 2017). Esta situação não é, contudo, necessariamente indicativa de um estado de necrose pulpar (Vinagre et al., 2021). As respostas são menos fiáveis quanto maior for a mineralização (van der Vyver et al., 2020; Vinagre et al., 2021). Por exemplo, um dente completamente obliterado é menos sensível ao teste elétrico do que um dente parcialmente obliterado (Vinagre et al., 2021). Por conseguinte, o diagnóstico pulpar preciso de dentes com MC torna-se um desafio, impactando a escolha da melhor abordagem a implementar (Vinagre et al., 2021).

1.5. Tratamento

Alguns estudos recomendam a intervenção endodôntica profilática após confirmação radiográfica de presença de OCR (Vinagre et al., 2021). Contudo, considerando que o desenvolvimento de calcificações é tido como um sinal de vitalidade pulpar, esta não é a abordagem recomendada pela maioria dos autores (Vinagre et al., 2021). É sugerido realizar-se o controlo clínico e radiográfico, optando-se pelo tratamento endodôntico apenas quando ocorre sintomatologia compatível com necrose pulpar acompanhada por periodontite apical, independentemente da presença de sintomatologia (Krastl et al., 2021b; Vera et al., 2023; Vinagre et al., 2021). Este diagnóstico manifesta-se apenas em 7-27% dos dentes que apresentam obliteração pulpar (Krastl et al., 2021b; Vera et al., 2023; Vinagre et al., 2021).

1.5.1. Tratamento estético

A maioria dos dentes afetados por MC geralmente mantêm-se saudáveis e funcionais, sem qualquer sintomatologia de origem pulpar ou periapical (Vinagre et al., 2021). A descoloração dentária, com a perda de translucidez e escurecimento coronário, constitui a secura mais frequente da calcificação pulpar (Vinagre et al., 2021). Os dentes anteriores são, maioritariamente, os mais afetados, sobretudo quando se considera o trauma como fator causal (Vinagre et al., 2021). Nestes casos, a modificação cromática pode ser um desafio na obtenção de uma estética satisfatória (Moura et al., 2017; van der Vyver et al., 2020).

Existem variadas técnicas que procuram restabelecer a estética desses dentes tais como: branqueamentos externos, branqueamentos internos ou utilizados em simultâneo (técnica *inside-out*), sem tratamento endodôntico prévio, tratamentos restauradores com abrangência total ou parcial da superfície coronária e tratamento endodôntico profilático com subsequente branqueamento interno (Lise et al., 2014; Vinagre et al., 2021). Deste modo, é aconselhável optar pelos métodos mais conservadores disponíveis (Lise et al., 2014; van der Vyver et al., 2020). Neste sentido, recomenda-se a utilização de branqueamentos externos em detrimento dos internos (Lise et al., 2014; van der Vyver et al., 2020). Os branqueamentos externos, para além de permitirem uma maior preservação de estrutura dentária hígida em comparação com métodos restauradores e de branqueamento interno, são também mais simples e tecnicamente mais acessíveis (Kwon et al., 2011; Vinagre et al., 2021).

Por outro lado, os resultados dos procedimentos de branqueamento externo em peças dentárias com metamorfose calcificante revelam uma elevada heterogeneidade entre os diferentes casos estudados (van der Vyver et al., 2020; Vinagre et al., 2021). As irregularidades no final do procedimento devem-se sobretudo às diferentes concentrações de branqueadores existentes, às variações nos intervalos entre *follow-ups*, ao número de sessões, ao protocolo escolhido, à utilização de produtos fotossensíveis e ao tempo de ação diário (Vinagre et al., 2021). Adicionalmente, sabe-se também que os tecidos mineralizados evidenciam uma menor permeabilidade (Vinagre et al., 2021). Esta característica pode resultar num aumento do tempo necessário para a observação de progresso durante o tratamento, o que pode inclusive exigir uma modificação da técnica inicialmente selecionada e um aumento do tempo habitualmente estipulado para estes branqueamentos (van der Vyver et al., 2020; Vinagre et al., 2021).

Nos casos em que os tratamentos branqueadores não proporcionam resultados satisfatórios, pode-se ainda optar por abordagens menos conservadoras, tais como restaurações cerâmicas ou restaurações resinosas diretas ou indiretas (Vinagre et al., 2021).

1.5.2. Tratamento endodôntico

Conforme mencionado anteriormente, a presença de calcificações no espaço pulpar dificulta a interpretação dos resultados obtidos nos testes de sensibilidade e a realização de um diagnóstico pulpar adequado (Vinagre et al., 2021).

Adicionalmente às dificuldades no diagnóstico pulpar, também o tratamento endodôntico destes casos pode estar associado a um conjunto de possíveis complicações, com a incidência de acidentes iatrogénicos a afetarem 15-17% dos incisivos superiores tratados e 71% dos incisivos inferiores (Vera et al., 2023). De acordo com Chaniotis e Ordinola-Zapata (2022), as mineralizações severas propiciam a ocorrência de perfurações aquando da abertura da cavidade de acesso e na localização do canal radicular (Chaniotis & Ordinola-Zapata, 2022). Os cálculos podem sobrepor-se à entrada dos canais, ou alojar-se em zonas de curvatura, impedindo o uso correto de instrumentos exploratórios e impossibilitando a instrumentação (Chaniotis & Ordinola-Zapata, 2022).

Embora estas ocorrências iatrogénicas não impliquem necessariamente o insucesso do procedimento, podem vir a comprometer a capacidade de desinfeção do sistema de canais,

piorando o prognóstico (Chanotis & Ordinola-Zapata, 2022). Neste âmbito, verifica-se uma necessidade de desenvolvimento de tecnologias que permitam determinar a localização precisa dos orifícios de entrada canulares (Vera et al., 2023).

2. Abordagem Endodôntica Convencional

Quando o tratamento endodôntico está indicado, existe atualmente uma variedade de técnicas disponíveis. Uma abordagem tradicional é tipicamente caracterizada pela aplicação dos métodos descritos neste capítulo.

2.1. Acesso e permeabilização convencional

O acesso endodôntico é o primeiro passo de qualquer abordagem endodôntica não-cirúrgica (Chaniotis & Ordinola-Zapata, 2021). A função primordial do acesso endodôntico consiste na criação de um trajeto que permita a entrada dos instrumentos de forma direta até aos canais radiculares, sem qualquer interferência (Chan et al., 2022). No acesso endodôntico tradicional é indicada a remoção completa do teto da câmara pulpar (Chan et al., 2022). Isto permite diminuir a propensão a acidentes iatrogênicos ao simplificar a localização do orifício dos canais, a desinfecção químico-mecânica e a respetiva obturação (Chan et al., 2022).

Os processos convencionais de acesso endodôntico são habitualmente realizados de forma manual e livre, dependendo exclusivamente da experiência clínica e dos conhecimentos de anatomia dentária do operador (Jonaityte et al., 2022). Estes procedimentos são orientados pelas leis anatômicas da câmara pulpar, estabelecidas por Krasner e Rankow (Jonaityte et al., 2022):

- **Lei da centralidade:** O pavimento da câmara pulpar localiza-se sempre no centro do dente, ao nível da junção amelo-cementária (JAC) (Krasner & Rankow, 2004).
- **Lei da concentricidade:** As paredes da câmara pulpar são sempre concêntricas em relação à superfície externa do dente ao nível da JAC, de forma que a anatomia da superfície radicular externa reflete a anatomia da câmara pulpar interna (Krasner & Rankow, 2004).
- **Lei da JAC:** A distância da superfície externa da coroa clínica à parede da câmara pulpar é a mesma em toda a circunferência do dente ao nível da JAC (Krasner & Rankow, 2004).

- **Lei da simetria 1:** Com exceção dos molares maxilares, os orifícios dos canais são equidistantes de uma linha traçada na direção méso-distal, através do pavimento da câmara pulpar (Krasner & Rankow, 2004).
- **Lei da simetria 2:** Exceptuando os molares superiores, os orifícios dos canais estão numa linha perpendicular a uma linha traçada na direção mesial-distal através do centro do pavimento da câmara pulpar (Krasner & Rankow, 2004).
- **Lei da mudança de cor:** A cor do pavimento da câmara pulpar é sempre mais escura que a das paredes (Krasner & Rankow, 2004).
- **Lei da localização dos orifícios 1:** Os orifícios dos canais radiculares estão sempre localizados na junção das paredes axiais e do pavimento (Krasner & Rankow, 2004).
- **Lei da localização dos orifícios 2:** Os orifícios dos canais radiculares estão localizados nos ângulos da junção pavimento-parede (Krasner & Rankow, 2004).
- **Lei da localização dos orifícios 3:** Os orifícios dos canais radiculares estão localizados nas terminações das linhas de fusão de desenvolvimento radicular (Krasner & Rankow, 2004).

Considerando a evidência de que o pavimento da câmara pulpar apresenta uma coloração mais escura que as paredes da câmara pulpar e que as linhas de fusão de desenvolvimento radicular são mais escuras que o pavimento, torna-se imprescindível a realização de uma análise detalhada das alterações de cor e compreender as possíveis anatomias da câmara pulpar (Gutmann & Fan, 2020; Krasner & Rankow, 2004). A observação minuciosa destes pormenores facilita a identificação de canais que se encontrem nas terminações de linhas de fusão de desenvolvimento radicular ou no ângulo de transição das paredes axiais para o pavimento (Gutmann & Fan, 2020). A colocação de uma luz de fibra óptica, orientada para a superfície externa da JAC pode facilitar uma melhor distinção de estruturas anatómicas e variações de cor discretas (Gutmann & Fan, 2020). A localização de canais calcificados pode ser auxiliada por meio de métodos adicionais, tais como a pigmentação do pavimento da câmara com corante azul de metileno a 1%, a indução do teste de efeito champanhe com hipoclorito de sódio e a procura de pontos hemorrágicos de canais (Gutmann & Fan, 2020). Também a aplicação de etanol desnaturado a 95% pode ser vantajosa para a obtenção de uma visibilidade superior (Gutmann & Fan, 2020).

Num estudo de Connert et al. (2019), foi comparada a eficácia das técnicas manuais convencionais e de navegação estática na localização de canais radiculares calcificados. Os

resultados evidenciaram que a técnica convencional apresenta uma taxa de sucesso de cerca de 41,7% na localização de canais calcificados (Connert et al., 2019). Contudo, as áreas da Endodontia e da Dentisteria restauradora têm vindo a evoluir no sentido de privilegiar uma maior preservação de estrutura dentária (Chan et al., 2022). A cavidade de acesso nos casos de dentes calcificados, independentemente do uso da CBCT, tem tendência a promover uma perda substancial até cerca de 63% de dentina vital, o que leva a uma deterioração no prognóstico a longo termo (Jain et al., 2020a; Zubizarreta-Macho et al., 2020). Deste modo, mesmo com recurso à ampliação e referências anatómicas, os dentes com metamorfose calcificante constituem um desafio, resultando numa maior propensão a acidentes iatrogénicos, que tendem a fragilizar as peças dentárias, aumentando a possibilidade de se proceder à sua extração (Jonaityte et al., 2022).

A localização dos orifícios dos canais radiculares torna-se possível após um desgaste progressivo das obliterações, de acordo com as leis de Krasner e Rankow (Chaniotis et al., 2024). A utilização das pontas de ultrassom possibilita a remoção precisa e seletiva de cálculos, permitindo uma melhor visualização do pavimento da câmara pulpar, dos ângulos das junções das paredes axiais com o pavimento e das linhas de fusão embrionárias (Chan et al., 2022; Chaniotis et al., 2024). A sua utilização simultânea com microscópio oferecem uma melhor visibilidade, o que promove a identificação de anatomias acessórias e a remoção de calcificações da câmara pulpar com uma perda mínima de dentina saudável (Chan et al., 2022; Chaniotis et al., 2024).

Após a localização dos canais radiculares, a exploração deve ser iniciada com limas de pequeno diâmetro (#6, #8 ou #10), podendo ser usado em simultâneo um agente quelante de forma a facilitar a permeabilização apical (Gutmann & Fan, 2020). A lima deve ser usada com movimentos verticais curtos repetidos acompanhados por movimentos circulares seletivos (movimentos de *watch-winding*), de acordo com a pressão exercida lateralmente (Gutmann & Fan, 2020). Esta correta negociação dos canais possibilita a inserção de limas com menos interferências a nível cervical (Gutmann & Fan, 2020).

Particularmente em dentes com diagnóstico de periodontite apical, o sucesso na permeabilização dos canais é o fator mais importante para garantir um bom prognóstico do tratamento endodôntico (Chaniotis et al., 2024). Ainda que a redução do lúmen, provocada em particular por processos traumáticos, possa dificultar a negociação dos canais, este processo pode tornar-se mais previsível com a integração do microscópio ótico na prática

clínica (Chaniotis et al., 2024; Jain et al., 2020a). Com o auxílio de um exame de CBCT e com o aumento da visibilidade proporcionado pela magnificação, adicionalmente à técnica descrita acima, é possível negociar até ao terço apical aproximadamente 90% desses canais (Chaniotis et al., 2024).

2.2. Quelação

2.2.1. Conceitos e princípios

O sucesso do tratamento endodôntico, mesmo em casos de presença de mineralizações, depende da eficácia da eliminação mecânica e química de microrganismos do sistema de canais (Hazar & Hazar, 2025). Sendo que a preparação mecânica dos canais pode deixar até cerca de 35% da área do canal por instrumentar, é fundamental a integração de um protocolo de irrigação que proporcione a desinfecção química (Hazar & Hazar, 2025; La Rosa et al., 2024b).

O hipoclorito de cálcio (NaOCl) é um agente proteolítico não específico cujo poder de ação se baseia na dissolução de substâncias orgânicas, magnésio e iões carbonatados (La Rosa et al., 2024b; Rath et al., 2020). Este irrigante possui propriedades antimicrobianas, tendo a capacidade de eliminar biofilmes através da fragmentação de cadeias longas de péptidos e adicionar átomos de cloro a grupos terminais de proteínas, o que leva à sua destruição (Ballal et al., 2024; Chaniotis et al., 2024; La Rosa et al., 2024b). Como consequência, o hipoclorito de sódio pode, através da degradação de matéria orgânica, interferir nas propriedades mecânicas das obliterações pulpares (Chaniotis et al., 2024).

Em contrapartida, a *smear layer* pode limitar a ação antimicrobiana do NaOCl ao formar uma barreira física, impedindo que a solução penetre os túbulos dentinários (La Rosa et al., 2024b). Assim, e face à incapacidade do NaOCl de dissolver matéria inorgânica, torna-se indispensável a sua associação a um agente quelante, a fim de potencializar o seu poder de ação (La Rosa et al., 2024b).

2.2.2. Agentes quelantes

2.2.2.1. Ácido etilenodiaminotetracético

O ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) é o atualmente tido como a primeira escolha para a associação com o NaOCl (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Acessível e mais biocompatível que o NaOCl, o EDTA é um quelante forte, com um pH neutro ou ligeiramente alcalino (entre 7 e 8) (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Convencionalmente usado com uma concentração de 15% a 17%, este irrigante tem a capacidade de dissolver matéria inorgânica, através do sequestro de cátions inorgânicos di- e tri-covalentes e consequente descalcificação da dentina (Peters et al., 2020; Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Hazar & Hazar, 2025). Apesar da sua principal função se basear na eliminação da fração mineral da *smear layer*, o EDTA pode ligar-se a íons metálicos, tais como o cálcio e o ferro, presentes em proteínas da superfície bacteriana, o que lhe permite um ligeiro poder de ação antimicrobiano (Peters et al., 2020). A ligação dos íons às proteínas sofre um relaxamento, destabilizando a estrutura do biofilme bacteriano, o que promove a difusão do quelante no biofilme e o destacamento do mesmo das paredes dentinárias (Busanello et al., 2018).

2.2.2.2. Ácido cítrico

O ácido cítrico é um ácido fraco (com um pH entre 0.8 e 1.9) incolor, orgânico e biocompatível, com baixa capacidade antibacteriana (Drukteinis et al., 2024; Gómez-Delgado et al., 2023). Apesar da heterogeneidade dos estudos relativos a este irrigante, o ácido cítrico tem a capacidade de provocar erosão e descalcificação da dentina, diminuindo a sua microdureza (Gómez-Delgado et al., 2023). No entanto, à semelhança do EDTA, reduz a quantidade de cloro disponível no meio, diminuindo o poder de ação do NaOCl quando em interação com o mesmo (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

2.2.2.3. Ácido etidróico

O ácido etidróico é um bisfosfonato não nitrogenado biocompatível usado no tratamento da osteoporose, que atua como um quelante suave (Ballal et al., 2024; Hazar & Hazar, 2025; Rath et al., 2020). Também denominado por: 1-hidroxi-etilideno-1,1-bifosfonato, HEBP ou HEDP é comercializado atualmente como Dual Rinse HEDP (DR HEDP; Medcem GmbH, Weinfelden, Suíça), disponível sob a forma de uma cápsula

contendo 0.9 g de pó de etidronato (Ballal et al., 2024). O pó deve ser misturado imediatamente antes do tratamento com 10 mL de uma solução de NaOCl (numa concentração entre os 0.5–5.25 %) de modo a obter um irrigante “dois em um” (Ballal et al., 2024). Com esta combinação beneficia-se de efeitos antimicrobianos, proteolíticos e quelantes num único irrigante, o que leva a uma redução significativa do tempo necessário para uma correta desinfecção e desbridamento do canal (Ballal et al., 2024; Chaniotis et al., 2024; La Rosa et al., 2024b).

O HEDP oferece também uma maior eliminação de *smear layer*, sem comprometer a estrutura dentinária (Ballal et al., 2024; La Rosa et al., 2024b). Isto é possível pois as ligações formadas entre o HEDP e o cálcio são menos estáveis que aquelas criadas pelo EDTA, pelo que se dá uma menor desmineralização da dentina (Ballal et al., 2024). Adicionalmente, estudos prévios indicam que o HEDP, para além de ter propriedades antibacterianas e um poder de dissolução equiparáveis ao NaOCl, tem também a capacidade de melhorar a adesão de cimentos às paredes de dentinárias (Ballal et al., 2024).

2.2.3. Técnicas de irrigação

2.2.3.1. Quelação sequencial

Os protocolos de irrigação *standart* consistem na associação do NaOCl e um agente quelante, geralmente o EDTA ou o ácido cítrico (Ballal et al., 2024). Quando o EDTA se mistura com o NaOCl diminui a quantidade de cloro disponível, o que causa uma redução da capacidade de dissolução de tecidos orgânicos do NaOCl (Ballal et al., 2024; La Rosa et al., 2024b). É, portanto, indicado o seu uso sequencial (Quelação Sequencial), que permite que ambos os irrigantes possam atuar no canal de forma independente, evitando a interação entre ambos (Ballal et al., 2024).

2.2.3.2. Quelação contínua

Numa tentativa de ultrapassar restrições da quelação sequencial, surge em 2005 a noção de “quelação contínua” (La Rosa et al., 2024b). Este método consiste na junção de um quelante fraco ao NaOCl durante a preparação do sistema de canais (Chaniotis et al., 2024). A utilização de quelantes fracos permite que os mesmos possam ser usados em simultâneo com o NaOCl sem que se verifique uma redução do cloro disponível (Ballal et al., 2024; La

Rosa et al., 2024b). Desta forma, a quelação contínua evita a diminuição do poder de dissolução do NaOCl, proporcionando, numa só solução, a ação concomitante em matéria orgânica e inorgânica (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

O HEDP foi o primeiro agente quelante proposto para a associação com o NaOCl nesta técnica, sendo que também o clodronato e o EDTA tetrassódico começam a demonstrar potencial em investigações mais recentes (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Chaniotis et al., 2024). Apesar de ser uma técnica promissora, a quelação contínua exige ainda alguma investigação e desenvolvimento para que o seu uso em situações clínicas possa ser implementado de forma segura (La Rosa et al., 2024b).

2.2.4. Eficácia em dentes calcificados

As calcificações pulpares são, como mencionado previamente, constituídas por uma componente orgânica e uma componente inorgânica (Chaniotis et al, 2024). Mesmo perante a mínima alteração na quantidade de cálcio presente num cálculo, a proporção inicial entre as duas componentes pode ser afetada (Chaniotis et al, 2024). Um desequilíbrio nesta proporção pode vir a causar modificações na permeabilidade, microdureza e solubilidade da calcificação, tornando-a irregular (Chaniotis et al, 2024).

Apesar da proporção cálcio/fosfato nos cálculos pulpares assumir um valor semelhante ao da dentina, os cálculos apresentam uma maior vulnerabilidade a agentes quelantes, devido à sua cristalinidade inferior e à sua composição heterogénea (Tosco et al., 2025). Assim, a inclusão de agentes quelantes na abordagem às OCR, embora ainda sem evidência suficiente sobre o efeito no processo de penetração na estrutura mineral, pode ser benéfica devido ao seu poder de ação direta sobre os iões de cálcio (Chaniotis et al, 2024; Tosco et al., 2025).

2.3. CBCT

O recurso à CBCT em endodontia tem vindo a registar um aumento exponencial a nível global, tendo sido publicadas diversas *guidelines* com o intuito de auxiliar os médicos dentistas na seleção de casos e promover a sua utilização segura (Shah & Chong, 2018). Na mais recente atualização das recomendações da *European Society of Endodontology* (ESE)

para a utilização da CBCT em Endodontia, é recomendada a obtenção de uma CBCT pré-operatória no caso de dentes com MC severa (Patel et al., 2019). A obtenção de imagens detalhadas, através da combinação das perspectivas sagitais, coronais e axiais da CBCT, facilita a identificação e localização tridimensional de canais calcificados (Patel et al., 2019; Vera et al., 2023).

A CBCT permite a obtenção de imagens bidimensionais reconstruídas em todos os planos e de reconstruções tridimensionais, com uma exposição reduzida à radiação X (Kinariwala, 2021a). A obtenção da imagem é efetuada através da utilização de um pórtico rotativo, no qual se encontram fixadas a fonte dos raios-X e um detetor (Kinariwala, 2021a). Estes realizam uma rotação em torno de um fulcro fixo integrado na região de interesse (ROI), para a qual será direcionada uma fonte divergente de radiação ionizante, com uma forma piramidal ou cônica (Kinariwala, 2021a). Esta radiação atravessa a região craniana e cervical do sujeito, com o detetor de raios X posicionado do lado oposto do paciente (Kinariwala, 2021a). No momento da sequência de exposição, são adquiridas centenas de imagens 2D do campo de visão (FOV) num arco mínimo de 180° (Kinariwala, 2021a). Após um processo de reconstrução, é possível visualizar um conjunto de dados tridimensionais (Kinariwala, 2021a).

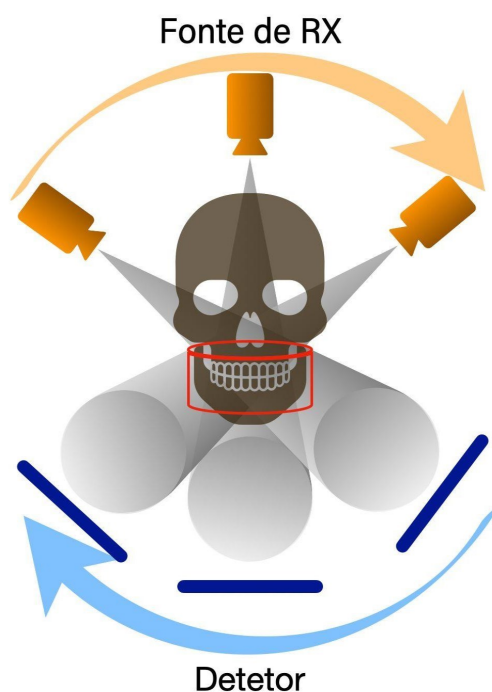


Figura 3 - Imagem ilustrativa da obtenção de uma CBCT.

As dimensões do FOV determinam o volume de scan da CBCT, sendo condicionadas pelo tamanho e forma do detetor, pela geometria da projeção do feixe e pela capacidade de colimação do mesmo (Kinariwala, 2021a). A colimação do feixe é o processo responsável pela moderação da exposição da ROI à radiação ionizante (Kinariwala, 2021a). Além disso, possibilita a escolha do FOV de acordo com cada caso específico (Kinariwala, 2021a). Considerando que, na endodontia, a ROI consiste tipicamente em áreas bastante reduzidas, os dispositivos de CBCT de pequeno volume, com um FOV limitado a um sextante, quadrante ou arcada, são preferíveis (Kinariwala, 2021a). A pré-visualização auxilia na exatidão do posicionamento do FOV, limitando-o à ROI (Patel et al., 2019). Para evitar artefactos de distorção volumétrica, otimizar a resolução espacial da imagem e reduzir a dose de radiação, recomenda-se também o ajuste dos parâmetros de exposição, reduzindo o mA e elevando o kVP (Patel et al., 2019; Vera et al., 2023). A elevada pormenorização das imagens proporciona uma melhor compreensão das anatomias canulares, permitindo uma maior precisão no diagnóstico e na elaboração de um plano de tratamento personalizado (Torres et al, 2025).

No decurso do tratamento, perante a necessidade de confirmar a direção do acesso endodôntico, poderá também revelar-se fundamental a aquisição de uma CBCT de modo a complementar as informações bidimensionais concedidas pelas radiografias periapicais, principalmente nas abordagens convencionais (Torres et al, 2025).

3. Abordagem endodôntica contemporânea

3.1. Planeamento Digital

A digitalização da medicina dentária, potencializada pela possibilidade de transferir réplicas precisas da anatomia oral e facial para um ambiente virtual, tem vindo a manifestar-se em diversas áreas, nomeadamente na reabilitação oral, na implantologia e na ortodontia (Decurcio et al., 2021). A Endodontia tem vindo a investir recentemente no desenvolvimento de estratégias de planeamento assistido por computador (Connert et al., 2022). Estas estratégias têm permitido a localização de canais radiculares calcificados de forma minimamente invasiva, reduzindo a probabilidade de erros iatrogénicos e proporcionando uma redução da duração dos tratamentos (Connert et al., 2022).

A CBCT constitui o elemento fundamental para a concepção de um planeamento endodôntico tridimensional e digital (Decurcio et al., 2021). A informação obtida através da análise meticulosa das imagens de CBCT fornece pormenores abrangentes da anatomia interna das peças dentárias e dos tecidos circundantes (Decurcio et al., 2021). Estes dados constituem a fundamentação para o delineamento e a planificação de cada caso (Decurcio et al., 2021).

Através da CBCT obtém-se um conjunto de dados volumétricos tridimensionais sob o formato de ficheiro DICOM (*Digital imaging and communications in medicine*) (Shah & Chong, 2018; Vecsei et al., 2021), que permite a transferência de imagens médicas entre diferentes sistemas operativos e equipamentos (Shah & Chong, 2018; Vecsei et al., 2021). As imagens resultantes devem ser sujeitas a um processo de binarização, no qual se segmentam os tecidos duros e moles, de forma a isolar as estruturas anatómicas da ROI (Kamio & Kawai, 2023).

Contudo, o formato DICOM apresenta baixa definição para detalhes anatómicos superficiais (Grant, 2015; Kamburoğlu et al., 2023). Para ultrapassar esta limitação os dados da CBCT podem ser combinados com imagens obtidas por *scanners* intraorais, disponibilizadas sob a forma de ficheiros STL (*Standart Tessellation Language*) (Grant, 2015; Kamburoğlu et al., 2023). A conversão dos ficheiros DICOM em STL é realizada através de *softwares* de planeamento digital 3D (Kamio & Onda, 2022; Vecsei et al., 2021). O formato STL descreve a morfologia externa de um objeto por meio de uma malha triangular (Vecsei et al., 2021; Grant, 2015).

Os ficheiros STL provenientes da CBCT e do *scanner* intraoral são alinhados com precisão num *software* especializado, que permite a fusão dos dados e a eliminação de artefactos (Vecsei et al., 2021). A imagem obtida é exportada para um *software* de CAD (*computer-aided design*) ou de planeamento cirúrgico, onde se realiza o desenho tridimensional da estrutura a imprimir (Vecsei et al., 2021).

Concluída a etapa de *design*, procede-se à impressão através de sistemas CAM (*computer-aided manufacturing*) (Grant, 2015). Atualmente, é possível utilizar diversos materiais como matéria prima para a impressão, nomeadamente metais, cerâmicas e resinas (Vecsei et al., 2021). Para a produção de guias cirúrgicas, destacam-se as resinas biocompatíveis de classe IIa, pelo seu baixo custo, rapidez de produção e facilidade de esterilização (Dąbrowski et al., 2022; Kamburoğlu et al., 2023).

3.2. Endodontia guiada

Foi em 2016 que surgiram as primeiras publicações referentes à endodontia guiada (EG) (Buchgreitz et al., 2016; Krastl et al., 2016; van der Meer et al., 2016; Zehnder et al., 2016). Esta literatura, que deu origem ao conceito de EG, apresentava a técnica como uma nova potencial alternativa à abordagem convencionalmente aplicada na preparação de acessos endodônticos em dentes afetados por MC (Connert et al., 2022). Num contexto de anomalias graves de desenvolvimento ou de calcificação do canal, a endodontia guiada maximiza o curso do tratamento, proporcionando um acesso conservador, previsível e fiável (Banka et al., 2024; Kinariwala, 2021b). Esta abordagem facilita uma redução da duração das consultas (Banka et al., 2024; Kinariwala, 2021b).

A EG é uma metodologia que se baseia no recurso a tecnologias computadorizadas para o planeamento dos tratamentos (Banka et al., 2024; Kulinkovych-Levchuk et al., 2022). Esta metodologia beneficia da aplicação da CBCT e de *scanners* intraorais para a aquisição de imagens volumétricas e superficiais, respetivamente (Banka et al., 2024; Kulinkovych-Levchuk et al., 2022). As informações fornecidas pelas imagens obtidas permitem, quando associadas a um *software* adequado, o planeamento digital de um trajeto até ao orifício do canal (Connert et al., 2022). A EG é implementada através de navegação estática (NE) ou dinâmica (ND) (Banka et al., 2024).

Para a navegação estática usam-se guias cirúrgicas fixas, à semelhança daquelas usadas na implantologia guiada (Connert et al., 2022; Ribeiro et al., 2022). Estas guias são desenhadas e produzidas num fluxo de trabalho digital, através de processos de fabrico assistido por computador (CAM) (Ali & Arslan, 2021; Ribeiro et al., 2022).

Já para a navegação dinâmica é necessária a integração de um sistema de triangulação ótica com recurso a câmaras estereoscópicas (Ribeiro et al., 2022). Estes sistemas de rastreamento de movimento em tempo real permitem um controlo e acompanhamento contínuo do trajeto das cavidades de acesso de forma a respeitar o percurso, profundidade e ângulo inicialmente planeados (Ribeiro et al., 2022).

3.2.1. Navegação estática

3.2.1.1. Aplicações

Microcirurgia Apical

A microcirurgia apical é uma técnica cirúrgica complexa preconizada para abordar peças dentárias com lesões periapicais recorrentes ou persistentes (Sánchez-Herrera et al., 2025). Realizado convencionalmente de forma *freehand*, este procedimento cirúrgico consiste na localização, por meio de uma osteotomia, e ressecção dos 3 mm apicais da raiz onde maioritariamente se localizam possíveis ramificações e canais laterais (La Rosa et al., 2024a).

De acordo com os pontos de referência anatómicos e com uma avaliação pré-operatória de radiografias periapicais e CBCT, a microcirurgia endodôntica implica uma osteotomia localizada e a ressecção da extremidade da raiz (Anderson et al., 2018). Encontrar a extremidade radicular sem causar danos às estruturas circundantes é uma dificuldade significativa durante a microcirurgia endodôntica (Ackerman et al., 2019). Um campo de visão diminuído e a presença de hemorragia são alguns dos fatores que tornam desafiante a execução de uma apicetomia de forma precisa (D et al., 2022). Esta questão assume particular importância em contextos nos quais as lesões não tenham ainda originado fenestrações no osso cortical ou quando ocorram na proximidade de estruturas anatómicas nobres (Ackerman et al., 2019).

Ao serem comparadas com as técnicas de intervenção *freehand* a partir das imagens da CBCT, as guias cirúrgicas obtidas de acordo com um planejamento digital permitem um acesso cirúrgico mais preciso durante a cirurgia endodôntica (Ackerman et al., 2019; Sánchez-Herrera et al., 2025). A redução significativa dos desvios no acesso com guias constitui uma vantagem considerável, visto que a redução do tamanho da osteotomia tem sido associada a uma maior taxa de sucesso, com uma redução no tempo de cicatrização e da dor pós-operatória (Ackerman et al., 2019; Anderson et al., 2018). Assim, o sucesso das microcirurgias evoluiu de 44.2% para mais de 90% desde a introdução do uso da CBCT e, por conseguinte, da navegação estática e dinâmica (D et al., 2022).

Remoção de espigões de fibra de vidro

Em virtude das suas características estéticas excepcionais, elevada durabilidade, módulo de elasticidade equivalente ao da dentina e necessidade de um menor número de consultas, o recurso a postes de fibra de vidro pré-fabricados tem-se tornado prática frequente na última década (Haupt et al., 2018; Perez et al., 2019; Wu et al., 2024).

Atualmente, é necessária a remoção de espigões de fibra de vidro em cerca de um quarto de todos os retratamentos endodônticos (Perez et al., 2021). Considerando que a dureza dos postes de fibra é consideravelmente inferior à dos postes de metal, os métodos convencionais de remoção de postes metálicos não são aplicáveis, uma vez que podem promover fraturas e deformações nos espigões de fibra (Wu et al., 2024). Assim sendo, a técnica preconizada para a remoção destes espigões envolve a sua fragmentação, através do uso de ultrassons e ampliação (Perez et al., 2019; Wu et al., 2024). No entanto, este método é altamente dependente da posição do dente na cavidade oral e da experiência do médico (Wu et al., 2024).

Estando os espigões de fibra aderidos às paredes do canal com cimento de resina, torna-se difícil a distinção dos limites dos mesmos (Wu et al., 2024). Consequentemente, os meios de remoção manuais propiciam um elevado risco de iatrogenia e redução do prognóstico, sendo inevitável o desgaste excessivo de estrutura dentária (Haupt et al., 2018; Perez et al., 2021; Wu et al., 2024).

Neste sentido, a integração da navegação estática na remoção de postes de fibra tem vindo a mostrar resultados promissores (Ito et al., 2024; Perez et al., 2019). Ao oferecer um

acesso direto através da guia, a utilização de guias permite uma diminuição nos desvios e uma superior precisão e eficácia na localização dos postes (Ito et al., 2024; Perez et al., 2019).

Autotransplantes

Os autotransplantes são definidos como o transplante de uma peça dentária do mesmo indivíduo, de um local para outro, ou para um novo alvéolo preparado cirurgicamente (Plotino et al., 2022). Esta técnica de reabilitação tem vindo a revelar-se uma opção de tratamento a considerar (Plotino et al., 2022). Os estudos demonstram que os autotransplantes apresentam taxas de sucesso semelhantes em pacientes jovens e adultos (Plotino et al., 2022). No entanto, os dentes imaturos apresentam características distintas, nomeadamente, a presença de células estaminais e um fluxo sanguíneo suficiente para suportar a revascularização da polpa após o transplante (Plotino et al., 2022). Os dentes de pacientes adultos tendem a apresentar o ápex fechado, sendo necessário o tratamento endodôntico do dente a transplantar, antes, durante ou após o procedimento (Plotino et al., 2022).

Independentemente de os dentes terem ápex aberto ou fechado, uma recuperação favorável do ligamento periodontal é o fator determinante mais importante para um bom prognóstico (Plotino et al., 2022). O ligamento periodontal do dente dador pode ser mecanicamente danificado por uma extração traumática ou por um trauma provocado por uma preparação incorreta do alvéolo recetor (Plotino et al., 2022; Strbac et al., 2020). Esta condição pode resultar numa deficiente revascularização pulpar e, por sua vez, a uma reabsorção radicular gradual (Plotino et al., 2022; Strbac et al., 2020).

Embora estes casos não sejam abordados com guias propriamente ditas, o mesmo processo de planeamento digital da NE pode ser aplicado, de forma a criar um *template* tridimensional do dente a transplantar (Plotino et al., 2022; Oh et al., 2018; Strbac et al., 2020). A utilização destes *templates* é imensamente vantajosa para prevenir lesões no ligamento periodontal, pois permite uma diminuição do tempo de manipulação extraoral e uma maximização da preparação do alvéolo (Plotino et al., 2022; Oh et al., 2018; Strbac et al., 2020). Esta técnica permite também um planeamento mais preciso da extensão da osteotomia requerida, bem como a conservação de estruturas anatómicas nobres (Plotino et al., 2022; Oh et al., 2018; Strbac et al., 2020). Deste modo, constitui uma alternativa segura

para a abordagem de casos complexos (Plotino et al., 2022; Oh et al., 2018; Strbac et al., 2020).

Acessos em dentes com MC

Com o intuito de reduzir o tempo de tratamento, os riscos e a perda de substância dentária, que podem ter um impacto no prognóstico a longo prazo, são utilizados métodos guiados na endodontia para aceder aos canais radiculares em dentes de maior grau de dificuldade (Huth et al., 2024).

Em relação à quantidade de volume dentário perdido no acesso endodôntico, Loureiro et al. (2020) comprovaram que o uso de NE permite uma abordagem mais conservadora em molares *ex vivo*.

Kostunov et al. (2021) observaram uma taxa de sucesso de 93,3 % na localização com recurso a guia de canais radiculares em comparação com um sucesso de 100% da abordagem manual convencional. Em contrapartida, a utilização de guias permitiu a obtenção de um acesso 34% a 48% menos invasivo que a técnica convencional (Kostunov et al., 2021).

No estudo de Zubizarreta-Macho et al. (2021), consideraram-se 12 artigos e registou-se uma taxa de sucesso de 98,5% no uso de NE na localização dos canais radiculares, com um intervalo de confiança entre 96,1% e 100%.

Em comparação com a abordagem manual e com a ND, um estudo mais recente verificou que a preparação de acesso mais precisa é fornecida pela NE (Huth et al., 2024). No mesmo estudo, a técnica estática possibilitou a localização do canal em 47 dos 48 dentes utilizados, atingindo uma taxa de sucesso de 97,9% (Huth et al., 2024).

3.2.1.2. Sistemas

A obtenção de guias requer a conclusão de dois processos distintos:

1. Primeiramente há que planear e desenhar a guia e então pode-se iniciar a sua impressão (Vecsei et al., 2021). Para o *design* dos *templates* preconiza-se o uso de *softwares* de planeamento de cirurgia de implantes guiada, tal como o *coDiagnostiX®* (Dental Wings GmbH, Straumann), o *2Ingis® Technology System (2Ingis)*, o *DDS®*

Pro Software (DDS) ou o *Acteon® Imaging Software (AIS) (Acteon)* (Vecsei et al., 2021).

2. De seguida, pode dar-se início ao processo de impressão (Grant, 2015). No que diz respeito a esta etapa, pode-se recorrer a qualquer equipamento CAD/CAM (*Computer aided design e computer aided manufacturing*) (Grant, 2015). Atualmente, alguns dos sistemas mais usados em clínicas dentárias são a *CEREC 3D OmniCam®* e *Primescan®* (*Sirona, Bensheim, Alemanha*), a *Carestream CS 3500®* (*Carestream Dental, Atlanta, Georgia*) e a *PlanScan®* (*Planmeca Oy, Helsínquia, Finlândia*) (Hack et al., 2015).

3.2.1.3. Tipos de guias

As guias endodônticas tridimensionais, também designadas por *endoguides*, *templates* endodônticos ou guias cirúrgicas, são classificadas consoante a sua utilização e o tipo de suporte (D et al., 2022; Kinariwala et al., 2021b). Conforme a sua utilidade específica, as guias podem ser divididas em duas categorias: cirúrgicas ou não-cirúrgicas (Kinariwala et al., 2021b). No que respeita à região que lhes confere suporte, as *endoguides* podem ser classificadas em: dento-suportadas, muco-suportadas ou ossosuportadas (D et al., 2022; Kinariwala et al., 2021b). Para abordagens não cirúrgicas, as guias dento-suportadas são as mais frequentemente utilizadas (Kinariwala et al., 2021b). As guias osso-suportadas são recomendadas para intervenções cirúrgicas, enquanto que as muco-suportadas não estão indicadas para tratamentos endodônticos, devendo ambas ser combinadas com o uso de pinos de fixação, de modo a conferir maior estabilidade (Kinariwala et al., 2021b).

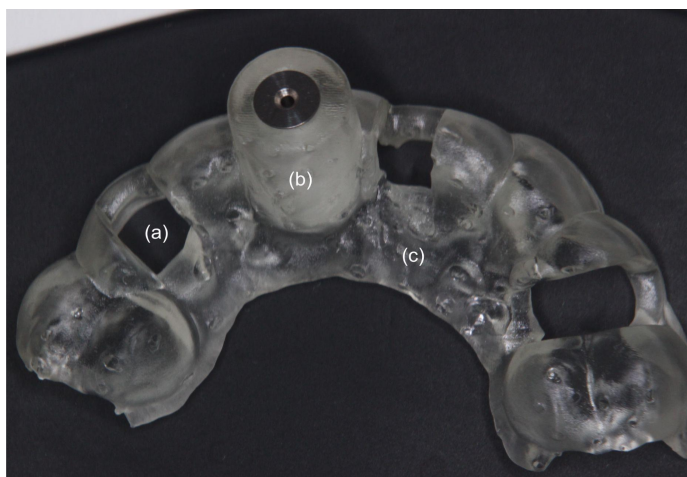


Figura 4 - Guia não-cirúrgica dento-suportada. (a) Janela de inspeção; (b) Manga; (c) Corpo da guia.

3.2.1.4. Técnica e Etapas

A planificação da cavidade de acesso e o desenho da guia dependem fundamentalmente da obtenção de dados sobre a anatomia interna e externa da ROI (Lara-Mendes et al., 2018). Consequentemente, a primeira etapa deve consistir na aquisição de um CBCT pré-operatório e de impressões digitais intraorais de ambas as arcadas (Moreno-Rabié et al., 2020; Ribeiro et al., 2022; Torres et al., 2019). Independentemente da obtenção das impressões, seja através da utilização de *scanners* intra-orais, diretamente na cavidade oral ou por meio de modelos de gesso, o ficheiro resultante deverá ser guardado sob a forma de ficheiro STL (Lara-Mendes et al., 2022; Moreno-Rabié et al., 2020; Ribeiro et al., 2022; Torres et al., 2019). Conforme descrito previamente, os dados fornecidos pelo CBCT devem igualmente ser convertidos do formato DICOM para STL, de modo a que possam ser processados, em conjunto com as impressões intraorais, por um *software* especializado de processamento de imagem (Moreno-Rabié et al., 2020; Ribeiro et al., 2022). Neste *software* os dois ficheiros são combinados com base em três a seis estruturas anatómicas de referência, visíveis radiograficamente (Kinariwala et al., 2021b; Lara-Mendes et al., 2018). Após a correta associação das imagens dá-se início ao planeamento do caso (Kinariwala et al., 2021b).

A primeira etapa do planeamento consiste na definição da localização dos canais (Kinariwala et al., 2021b). A presença de imagens translúcidas, compatíveis com o canal radicular, facilita significativamente a definição do espaço e do trajeto dos canais durante o procedimento (Kinariwala et al., 2021b). Em canais curvos, o trajeto de acesso deve ser planeado apenas até à primeira curvatura (Kinariwala et al., 2021b). Se não for possível encontrar quaisquer traços dos canais no CBCT, deve-se recorrer-se às leis anatómicas da câmara pulpar de Krasner e Rankow (Kinariwala et al., 2021b). A utilização da vista axial do CBCT permite a marcação de um *target point* no ponto onde o canal começa a ser visível (Kinariwala et al., 2021b). A partir deste ponto, é possível delinear um trajeto, respeitando a orientação do longo eixo do dente, de modo a reduzir o risco de perfurações (Kinariwala et al., 2021b).

O próximo passo é criar um modelo tridimensional de uma guia com o auxílio de um programa de desenho 3D, no qual são determinadas as brocas a usar e a posição da manga, de acordo com o trajeto previamente determinado (Moreno-Rabié et al., 2020; Ribeiro et al., 2022). O diâmetro da broca escolhida não deve ultrapassar 1 mm em casos de tratamentos

endodônticos não cirúrgicos (Kinariwala et al., 2021b). Relativamente à manga, esta deve de ter mais 0.1 mm de diâmetro interno do que aquele da broca (Kinariwala et al., 2021b). O diâmetro externo deve ter também 0.1 mm a mais que o diâmetro interno (Kinariwala et al., 2021). A altura da manga da guia deve enquadrar-se entre os 5-7 mm, sendo que quanto maior é a altura, melhor será a angulação da broca e menor serão os desvios apicais e coronários da mesma (Kinariwala et al., 2021b). O corpo da guia deve ter uma espessura de 3.5 mm e estender-se às regiões vestibulares e palatinas/linguais dos três dentes adjacentes de modo a proporcionar maior estabilidade (Dąbrowski et al., 2022; Kinariwala et al., 2021b). Por fim, é necessário imprimir ou fresar a guia 3D e integrar as mangas metálicas no modelo (Ribeiro et al., 2022).

Antes de iniciar o tratamento e de efetuar o devido isolamento absoluto, a guia é colocada sobre os dentes adjacentes, responsáveis pelo suporte, de modo a avaliar a estabilidade (Dąbrowski et al., 2022; Buchgreitz et al., 2021). As guias dento-suportadas devem ser privilegiadas em detrimento de outros *designs*, dado que facilitam a colocação do isolamento absoluto, reduzem o trauma gengival e oferecem uma estabilidade superior (Dąbrowski et al., 2022). A inclusão de janelas ou orifícios de inspeção pode ser benéfica neste passo (Buchgreitz et al., 2021). Após garantir o correto isolamento e encaixe da guia, testa-se novamente a estabilidade desta (Krastl et al., 2016; Ribeiro et al., 2022). A seguir, inicia-se o acesso pela manga com a broca previamente escolhida (Krastl et al., 2016; Ribeiro et al., 2022).

Para evitar possíveis desvios do trajeto, o dente deve ser marcado com uma resina de uma cor contrastante através da manga da guia (Buchgreitz et al., 2021). O acesso deve ser iniciado de forma livre e manual, sem guia, com um broca diamantada até se atingir a dentina (Dąbrowski et al., 2022; Buchgreitz et al., 2021; Lara-Mendes et al., 2018). Garantindo que a broca é colocada o mais perpendicular possível à superfície dentária, é também indicado o uso de irrigação nesta fase, não só para impedir o sobreaquecimento da peça dentária, como também para remover os detritos criados e aumentar a visibilidade (Buchgreitz et al., 2021). A colocação da guia é efetuado logo que se atinge a dentina, sendo o acesso retomado com a broca criada durante a fase de planeamento a baixa rotação (Buchgreitz et al., 2021). Tendo em conta que, a partir deste ponto, procede-se sem irrigação contínua, deve-se progredir gradualmente, parando a cada 2 mm, a fim de avaliar o progresso e diminuir a produção de calor (Dąbrowski et al., 2022; Buchgreitz et al., 2021). A cada interrupção do desgaste, a cavidade é irrigada, a broca limpa e pesquisa-se a cavidade na tentativa de encontrar o canal

(Dąbrowski et al., 2022; Buchgreitz et al., 2021). Caso não se localize o canal precocemente, este processo repete-se até se chegar ao *target point* (Buchgreitz et al., 2021).

Pré-curvar uma lima K #10 e efetuar repetidos movimentos verticais suaves acompanhados por movimentos rotativos no sentido horário (Técnica *Endo Dance*) é um método extremamente útil para a localização e exploração de canais (Buchgreitz et al., 2021). Caso não seja possível a localização do canal, deve ser realizada uma radiografia para verificar se o acesso está a seguir a trajetória planejada (Buchgreitz et al., 2021). Neste cenário, é fundamental tomar precauções para não provocar a perfuração do dente, particularmente em regiões onde a dentina circundante está especialmente fragilizada ou em zonas de dilacerações da raiz (Buchgreitz et al., 2021).

Assim que se identifica o sistema de canais radiculares, é possível negociar com limas manuais até ao comprimento de trabalho, com irrigação abundante (Ribeiro et al., 2022). Posteriormente, pode finalmente ser efetuado o restante do tratamento endodôntico normalmente, recorrendo a técnicas convencionais de instrumentação e obturação (Alberdi et al., 2025; Ribeiro et al., 2022).

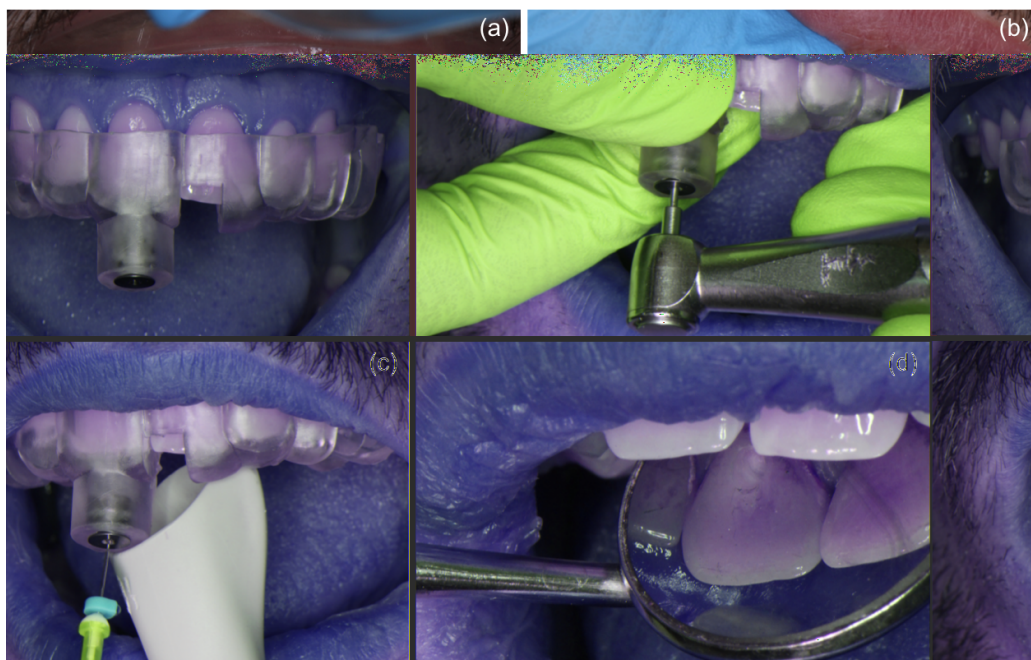


Figura 5 - Acesso endodôntico no dente 11 através de uma guia estática dento-suportada. (a) Colocação da guia sobre a arcada superior; (b) Acesso endodôntico; (c) Refrigeração com soro através da guia; (d) Cavidade de acesso.

3.2.1.5. Vantagens

Segundo Franco et al. (2024), as técnicas de navegação assistida por computador, tanto estáticas como dinâmicas, têm uma elevada taxa de sucesso na identificação dos canais radiculares, atingindo os 98,1%. No entanto, a técnica estática tem vindo a alcançar uma taxa de sucesso ligeiramente superior (98,5%) do que as técnicas dinâmicas (94,5%) (Franco et al., 2024).

As guias estáticas destacam-se em relação às guias dinâmicas no que diz respeito à sua utilização por clínicos menos experientes, visto que impossibilitam que o médico se desvie do trajeto planeado (Dianat et al., 2021).

Ao proporcionar um trajeto mais previsível, a endodontia guiada estática permite um acesso conservador e a negociação de canais radiculares calcificados num período de consulta mais curto e com uma perda consideravelmente reduzida de tecido dentário saudável (Alberdi et al., 2024; Ribeiro et al., 2022). Com o uso de guias, estes benefícios podem ser obtidos independentemente do nível de experiência do médico (Alberdi et al., 2024).

3.2.1.6. Limitações

Apesar de ser extremamente útil, a navegação estática ainda se depara com inúmeros obstáculos que devem ser tidos em consideração no planeamento e seleção dos casos (Alberdi et al., 2025). Primeiramente, dado que a técnica depende da obtenção de uma trajetória em linha reta desde a superfície do dente até ao canal radicular, deve referir-se que a mesma está contraindicada em casos de pacientes com limitação da abertura e em tratamentos de dentes posteriores com um espaço interoclusal reduzido (Alberdi et al., 2025; Jain et al., 2020; Ribeiro et al., 2022; Tavares et al., 2022). Ainda que seja possível tratar um dente posterior com *endoguides*, tal só pode ser feito com a utilização de múltiplos *templates*, pois só assim é possível ter acesso direto e individual a cada canal (Ribeiro et al., 2022; Zubizarreta-Macho et al.,).

As forças ortodônticas podem provocar alterações nas posições das peças dentárias no intervalo de tempo entre o planeamento e o tratamento propriamente dito, sendo necessário ter especial atenção aos casos de pacientes a realizar tratamentos ortodônticos, sejam estes sob a forma de aparelhos fixos ou alinhadores (Alberdi et al., 2025; Kamburoğlu et al., 2023;

Tavares et al., 2022). Assim sendo, após a obtenção da CBCT e do *scan* intra-oral, deve-se suspender o tratamento ortodôntico até à conclusão do tratamento (Tavares et al., 2022). Do mesmo modo, a fim de preservar a configuração original do dente, devem ser evitadas novas restaurações após a consulta de planejamento (Kamburoğlu et al., 2023; Tavares et al., 2022). Os dentes devem permanecer numa posição estável e estacionária, não só para a obtenção de impressões e CBCT como também durante o acesso (Buchgreitz et al., 2021). Portanto, a aplicação da técnica está contraindicada em dentes com periodontite avançada (Buchgreitz et al., 2021).

Além disso, a guia deve encaixar diretamente nos dentes para proporcionar estabilidade, o que obriga a isolar múltiplos dentes durante todo o processo (Ribeiro et al., 2022). A guia deve ser removida sempre que o operador quiser verificar o trajeto durante o tratamento, pois limita o acesso visual à cavidade endodôntica (Ribeiro et al., 2022). Não é possível efetuar modificações intraoperatórias na trajetória do acesso pré-determinado, devido à incapacidade de deformação da broca e à ausência de imagens tridimensionais em tempo real (Jain et al., 2020; Ribeiro et al., 2022; Torres et al., 2020).

As brocas de baixa velocidade usadas nesta técnica têm o potencial de causar fissuras na superfície do dente e produzir calor excessivo, que pode danificar o ligamento periodontal e o osso alveolar (Jain et al., 2020; Moreno-Rabié et al., 2020). Assim, é fundamental garantir uma boa irrigação, o que nem sempre é possível, visto que, ao proporcionar espaço suficiente para que as soluções de irrigação passem para o osso alveolar e/ou para a cavidade de acesso, pode-se comprometer a precisão (Moreno-Rabié et al., 2020).

A probabilidade de fracasso aumenta se a imagem da CBCT já não apresentar quaisquer indícios do canal radicular (Tavares et al., 2022). Em certos casos, o processo de calcificação pode ser tão avançado que é difícil identificar o canal (Tavares et al., 2022). Neste contexto, a escolha e o planejamento virtual do *target point*, tipicamente localizado na zona de lúmen ainda visível, é substancialmente mais complexa (Tavares et al., 2022). Nessas situações, devem ser utilizados outros métodos para maximizar a desinfecção do canal radicular e o operador deve abster-se de progredir para além do comprimento determinado no planejamento 3D (Tavares et al., 2022).

A importância da evolução dos *scanners* intra-orais é indiscutível, uma vez que tem possibilitado o *design* dos modelos necessários para o planejamento 3D com cada vez mais precisão (Tavares et al., 2022). No entanto, o operador deve ser cuidadoso na realização do

scan, no planeamento tridimensional e na impressão da guia, já que a presença de defeitos em qualquer um destes processos irá afetar significativamente o sucesso da técnica (Albardi et al., 2025; Tavares et al., 2022).

Por último, há que apontar o tempo e custos adicionais que o planeamento e produção de uma guia e brocas adaptadas a cada caso específico implicam (Jain et al., 2020a; Torres et al., 2021b).

3.2.2. Navegação dinâmica

3.2.2.1. Aplicações

Remoção de postes de fibra de vidro

No processo de remoção de postes de fibra, a ND torna-se uma ferramenta útil, pois permite ao médico, à semelhança da NE, planejar com precisão o ponto de entrada, o percurso de perfuração, a angulação e a profundidade desejada no exame CBCT antes do procedimento (Martinho et al., 2024). A capacidade de fornecer *feedback* em tempo real possibilita manter a estrutura radicular sem comprometer as paredes (Bardales-Alcocer et al., 2021).

Microcirurgia apical

Já no caso de microcirurgia apical, os sistemas de navegação dinâmica contribuem para a minimização da dimensão das osteotomias, proporcionando uma maior precisão na apicectomia e permitindo abordagens cirúrgicas mais conservadoras, mesmo em molares mandibulares com uma cortical óssea mais espessa (Aldahmash et al., 2022). Em regiões onde existe um elevado risco de perfuração do seio maxilar, do pavimento das fossas nasais, da cortical ou secção do nervo, esta precisão superior é particularmente significativa (Aldahmash et al., 2022).

O tempo intra-operatório é de extrema importância na microcirurgia apical, sendo diretamente proporcional ao risco de erros clínicos (Dianat et al., 2020). Ao garantir um tempo cirúrgico reduzido, evita-se a perda de ação anestésica precoce, hemorragia excessiva e fadiga do médico e do paciente (Aldahmash et al., 2022; Dianat et al., 2020). No estudo de

Aldahmash et al. (2022), a navegação dinâmica reduziu para metade o tempo necessário para a osteotomia e a apicectomia, resultando numa duração geral do procedimento mais curta.

À medida que a distância entre a tábua cortical vestibular e o ápex radicular aumenta, a dependência da visão direta na abordagem manual aumenta a possibilidade de erros de procedimento (Dianat et al., 2020). A técnica dinâmica permite o tratamento em regiões de pouca visibilidade, já que o procedimento é observado através de um monitor, sem ser necessária visão direta do local cirúrgico (Aldahmash et al, 2022; Dianat et al., 2020).

Acesso em dentes com metamorfose calcificante

Os novos sistemas dinâmicos de orientação ótica permitem que os médicos visualizem a posição da broca e a sua angulação durante a perfuração, permitindo ajustes em tempo real e aumentando a segurança e a previsibilidade (Torres et al., 2021). Este método pode ser utilizado para preparar cavidades de acesso de modo conservador, sem os inconvenientes da endodontia guiada estática (Connert et al., 2021; Torres et al., 2021).

Vários estudos têm surgido com o intuito de demonstrar e comparar a eficácia e precisão desta técnica, em detrimento da técnica convencional manual e da NE (Connert et al., 2021). Num estudo comparativo recente, concluiu-se que a ND permitiu uma menor quantidade de tecido dentário perdido (Huth et al., 2024). Huth et al. verificaram também uma taxa de sucesso de 95,8% na localização de canais calcificados, tendo sido alcançado o *target point* em 46 dos 48 dentes da amostra (Huth et al., 2024).

Zubizarreta-Macho et al. (2021) incluíram dois artigos na sua revisão e obtiveram uma taxa de sucesso de 94,5% e um intervalo de confiança entre os 84,4% e os 100% na localização de canais radiculares com MC através da aplicação de técnicas de ND.

Dianat et al. (2020) registaram uma taxa de sucesso de 96,6% na localização de canais radiculares, evitando perfurações e provocando apenas uma ocorrência de falso trajeto numa amostra de 30 dentes. Na mesma amostra, a técnica manual registou cinco perfurações e três falsos trajetos, revelando-se menos precisa e segura, estando associada a um risco significativamente superior de erros iatrogénicos (Dianat et al., 2020).

No artigo de Jain et al. (2020b), foi comparada a quantidade de estrutura dentária perdida por desgaste excessivo durante o acesso endodôntico. Quando comparadas com o método tradicional *freehand*, as abordagens de ND resultaram numa perda média muito inferior de substância dentária (27,2 vs. 40,7 mm³) (Jain et al., 2020b).

Também Jonaityte et al. (2022) concluiu que todos os estudos considerados na revisão demonstravam uma maior precisão e menor perda volumétrica da estrutura dentária com o uso de ND, verificando-se também um menor número de erros iatrogénicos.

As técnicas de ND têm vindo a revelar-se bastante promissoras (Villa-Machado et al., 2021). Este método é conservador, previsível, preciso e rápido, contribuindo para a obtenção de resultados clínicos favoráveis em abordagens complexas de dentes com OCR que requerem tratamento endodôntico (Villa-Machado et al., 2021; Wu et al., 2022).

3.2.2.2. Sistemas

À semelhança da navegação estática, os programas mais usados no planeamento para a técnica dinâmica são sistemas já usados na área da implantologia (Connert et al., 2022). Entre estes destacam-se, por ordem de maior popularidade, o *Navident* (*ClaroNav*, Toronto, Ontário, Canadá), o *X-guide* (*X-nav technologies*, LLC, Lansdale, PA, EUA), o *ImplaNav* (*ImplaNav*, *BresMedical*, Sidney, Austrália) e o *DENACAM* (*mininavident AG*, Liestal, Suíça) (Vasudevan et al., 2022).

3.2.2.3. Técnica e Etapas

Os sistemas de navegação dinâmica consistem numa unidade móvel com iluminação própria e câmaras estereoscópicas na turbina e na boca do paciente para rastrear os movimentos (Ribeiro et al., 2022; Vasudevan et al., 2022). Incluem também um computador com *software* de planeamento de implantes (Ribeiro et al., 2022; Vasudevan et al., 2022). As imagens de CBCT da ROI são utilizadas pelo *software*, permitindo a comparação contínua do acesso criado com aquele pré-determinado até finalmente se alcançar o *target point* (Ribeiro et al., 2022; Vasudevan et al., 2022).

Para que seja possível dar início a esta técnica, é essencial dispor dos seguintes componentes:

- Os constituintes primários do sistema (um computador, o *software* e câmaras) (Kinariwala et al., 2021a);
- Fixadores para a turbina ou contra-ângulo e para a mandíbula do paciente (Kinariwala et al., 2021a);
- Marcadores fiduciais, sejam estes naturais ou não, que possam ser usados como pontos de referência da posição da broca nas radiografias de controlo intra-operatórias (Kinariwala et al., 2021a).

O primeiro passo da abordagem dinâmica consiste na obtenção dos dados radiográficos pré-operatórios do paciente, nomeadamente, uma CBCT de alta resolução e com um FOV reduzido a toda a arcada (Huth et al., 2024; Kinariwala et al., 2021a; Ribeiro et al., 2022; Vasudevan et al., 2022). Para proceder ao planeamento digital do caso, o ficheiro obtido é importado, para o *software* de planeamento escolhido no formato DICOM (Kinariwala et al., 2021a; Ribeiro et al., 2022; Vasudevan et al., 2022). De seguida, e após a identificação do canal nas imagens da CBCT, é desenhado o trajeto virtual das brocas até ao *target point* (Dianat et al., 2020; Kinariwala et al., 2021a; Vasudevan et al., 2022). A trajetória criada deve ter uma largura reduzida, não excedendo 1 mm de diâmetro (Kinariwala et al., 2021a).

Em seguida, é necessário realizar o registo de rastreio, ou *tracing* (Kinariwala et al., 2021a). Este processo, que consiste em corresponder a posição atual do paciente com as imagens pré-operatórias, podendo ser realizado de duas formas distintas (Kinariwala et al., 2021a). Um dos protocolos possíveis exige a inserção de um *stent* personalizado para cada paciente com marcadores radiopacos fiduciais, que atuam como pontos de referência estáveis no maxilar (Vasudevan et al., 2022). Realiza-se um novo exame de CBCT, que é posteriormente importado para o *software* de planeamento e sobreposto ao primeiro exame pré-operatório, de forma a fazer corresponder os pontos de referência e as estruturas anatómicas da ROI (Vasudevan et al., 2022).

Já o outro método envolve a seleção de três a seis pontos de referência não colineares e a instalação de um localizador no maxilar do paciente (*JawTracker* ou *HeadTracker*), dentro do alcance do sistema de rastreio da câmara (Kinariwala et al., 2021a; Vasudevan et al., 2022). De forma a realizar o registo, o localizador regista os dados da CBCT e faz uma

correspondência entre as imagens e a ROI (Kinariwala et al., 2021a; Vasudevan et al., 2022). O rastreio envolve movimentos de escovagem de um *tracer* calibrado ao longo das superfícies dos dentes, enquanto que a câmara regista múltiplos pontos ao longo do percurso, originando uma nuvem de pontos (Kinariwala et al., 2021a; Vasudevan et al., 2022). A nuvem de pontos obtida é automaticamente comparada às superfícies dentárias externas correspondentes da CBCT (Kinariwala et al., 2021a; Vasudevan et al., 2022). Posteriormente à conclusão do registo, deve ser feita uma verificação de precisão nos três eixos (ocluso-gengival, anterior e posterior) (Kinariwala et al., 2021a; Vasudevan et al., 2022).

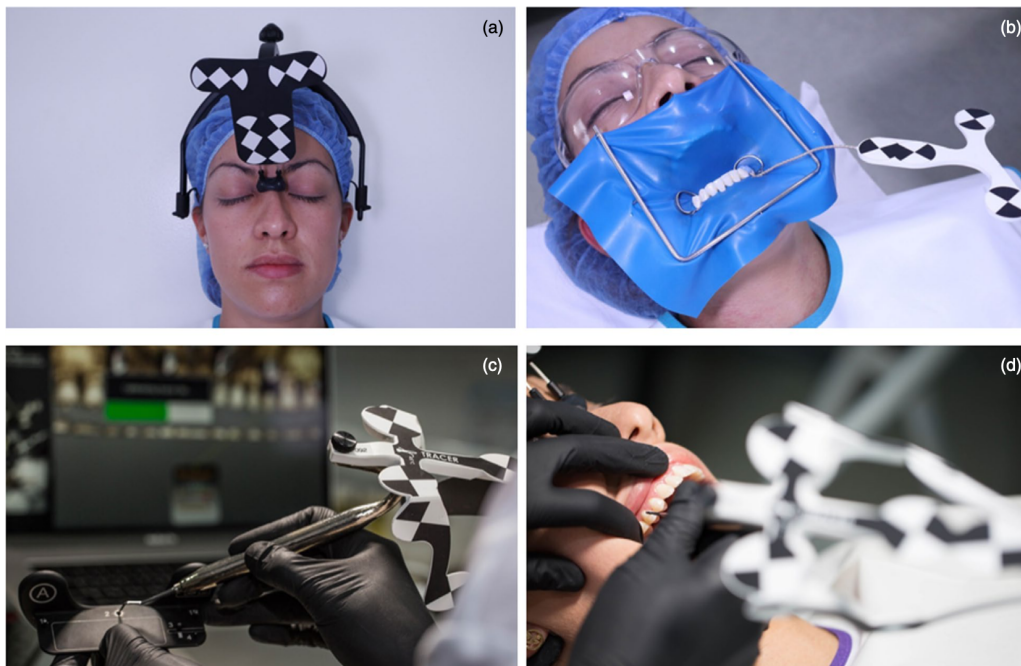


Figura 6 - Imagens ilustrativas do processo de rastreio. (a) Colocação do *HeadTracker* e (b) *JawTracker*; (c) Calibração do *tracer*; (d) Rastreio da superfície das peças dentárias para posterior correspondência com as imagens da CBCT.

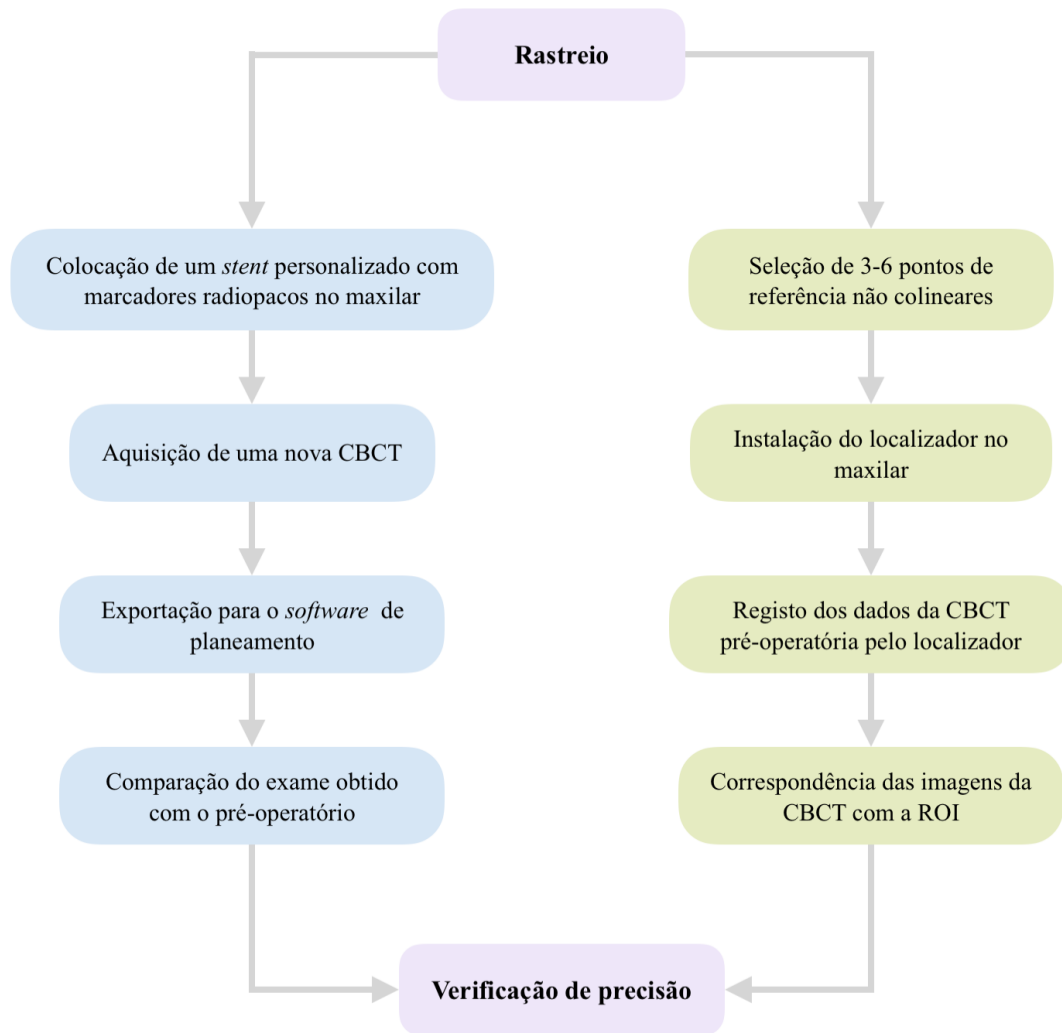


Figura 7 - Esquema comparativo dos dois métodos de rastreio.

A etapa seguinte consiste na colocação do isolamento absoluto, evitando que o dique e o grampo exerçam pressão ou interfiram na posição do localizador (Kinariwala et al., 2021a). Antes do início do tratamento, a broca tem de ser calibrada em função do eixo de perfuração (Ribeiro et al., 2022). Para tal, a ponta da broca é mapeada com o *DrillTag* (localizador associado à turbina), através da colocação da broca sobre um pino no *JawTag* (Kinariwala et al., 2021a). Sempre que se troca de broca, a calibração deve ser repetida (Kinariwala et al., 2021a).

Após a calibração da broca, pode-se finalmente avançar para a criação do acesso endodôntico (Ribeiro et al., 2022).. Ao visualizar o movimento da broca no ecrã do computador, o operador pode regular a sua posição visualmente (Ribeiro et al., 2022). Uma barra verde no medidor de profundidade na imagem em tempo real indica a profundidade da

broca (Ribeiro et al., 2022). Quando a barra está a 1 mm da profundidade pretendida, fica amarela e quando a profundidade planeada é atingida, fica vermelha (Ribeiro et al., 2022). À semelhança do que se dá na navegação estática, assim que se identifica o sistema de canais, o tratamento endodôntico pode proceder de forma convencional (Ribeiro et al., 2022; van der Meer et al., 2016).

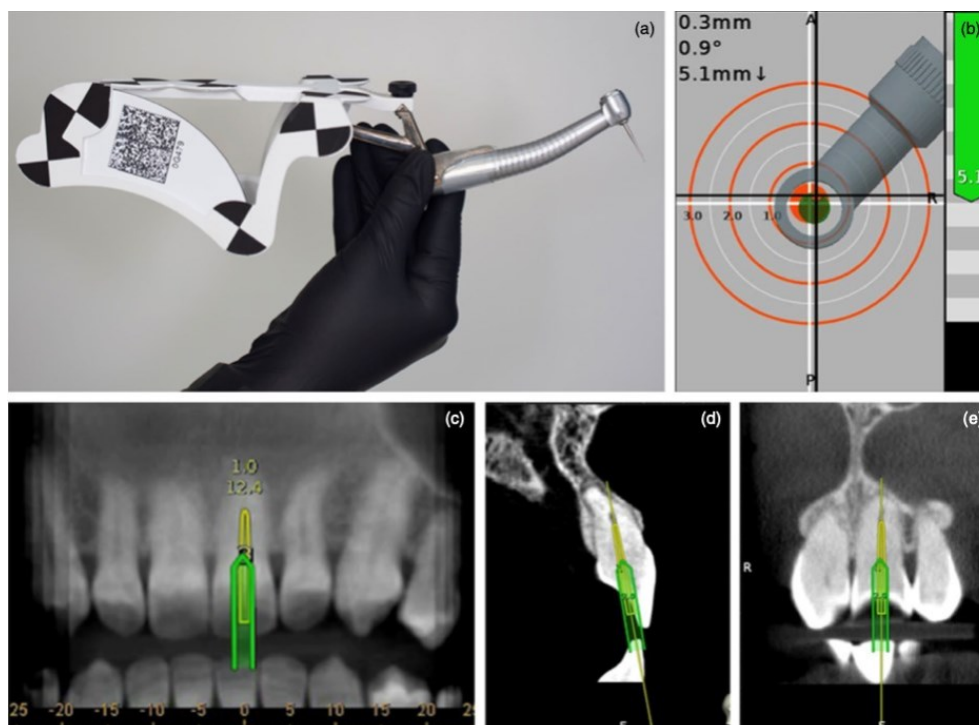


Figura 8 - Acesso endodôntico no dente 21 com recurso a ND. (a) Peça de mão com a *DrillTag*; (b) *Target view* - encontram-se descritos no canto superior esquerdo: o desvio, em milímetros e graus, e a distância remanescente até ao *target point*, em milímetros. Do lado direito, a barra verde indica o progresso da perfuração; (c) Vista panorâmica; (d) Vista sagital; (e) Vista coronária.

3.2.2.4. Vantagens

Ao oferecer uma visão direta do campo operatório, a navegação dinâmica permite modificar a trajetória do acesso pré-determinado em caso de erros de planeamento durante o procedimento (Ribeiro et al., 2022; Torres et al., 2021a; Vasudevan et al., 2022). Em oposição às técnicas de navegação estática, a capacidade de verificar e validar em tempo real as precisões posicionais aumenta a transparência clínica e a responsabilização para otimizar os resultados dos tratamentos (Jain et al., 2020a). De igual modo, a possibilidade de

monitorização constante da precisão do acesso resulta numa diminuição do risco de erros iatrogênicos, conferindo uma previsibilidade e segurança acrescida ao procedimento (Kinariwala et al., 2021a; Vasudevan et al., 2022).

A ausência de guias para a execução da ND apresenta inúmeras vantagens, nomeadamente: a redução do custo do tratamento (Kinariwala et al., 2021a), a melhor colocação do dique (Yang et al., 2024), a maior liberdade na seleção da broca (Torres et al., 2021a), a melhoria da ergonomia de trabalho e a diminuição das falhas de navegação causadas por guias danificadas ou mal adaptadas (Kinariwala et al., 2021a; Torres et al., 2021a). Em virtude da ausência de quaisquer barreiras entre a fonte de irrigação e a broca, há uma melhor visibilidade e uma diminuição do risco de produção excessiva de calor (Ribeiro et al., 2022; Torres et al., 2021a). Esta técnica é menos traumática para os tecidos periodontais e o osso alveolar (Ribeiro et al., 2022; Torres et al., 2021a). Em contraste com a perda de espaço associada à utilização de *endoguides* na cavidade oral, a navegação dinâmica permite o tratamento de casos com espaço vertical limitado, o qual é contra-indicado na NE (Ribeiro et al., 2022; Torres et al., 2021a).

O planeamento do tratamento está consideravelmente mais simplificado com a aplicação desta técnica (Kinariwala et al., 2021a; Torres et al., 2021a). A ausência da necessidade de realizar *scans* intra-orais, enceramentos, modelos de gesso ou o desenho e impressão de guias, permite que todo o processo ocorra com maior fluidez e eficiência (Kinariwala et al., 2021a; Ribeiro et al., 2022). Na eventualidade de na clínica estar disponível uma CBCT, o planeamento e o tratamento podem ser feitos numa única sessão (Kinariwala et al., 2021a; Torres et al., 2021a; Yang et al., 2024). Deste modo, em oposição da técnica estática, que requer etapas suplementares para o desenho e impressão das guias, os sistemas dinâmicos podem ser utilizados para abordar urgências endodônticas em pacientes que estão a realizar tratamento ortodôntico (Ribeiro et al., 2022; Yang et al., 2024).

A duração das consultas assume um papel fundamental no tratamento endodôntico para todos os intervenientes (Dianat et al., 2020). A redução do número de consultas, da quantidade de anestesia local administrada associadas a um menor tempo de tratamento maximizam a experiência do clínico e do doente durante o tratamento, diminuindo a fadiga mental e física de ambos (Dianat et al., 2020).

3.2.2.5. Limitações

A principal limitação da DN reside no facto de revelar difícil manter o contacto visual com o ecrã do sistema durante o processo (Ribeiro, 2022). Consequentemente, há uma curva de aprendizagem acentuada uma vez que o operador tem de se habituar a observar o monitor no decorrer de todo o procedimento clínico, sem que isso resulte na perda da correta angulação e do posicionamento adequado da broca (Dianat et al., 2020; Jonaityte et al., 2022; Vasudevan et al., 2022). Nesta perspetiva, é fundamental uma cuidada formação prévia antes de se considerar a aplicação desta tecnologia num tratamento (Ribeiro et al., 2022; Vasudevan et al., 2022).

Adicionalmente, a uma despesa inicial para aquisição de equipamento necessário constitui um aspeto significativo (Ribeiro et al., 2020; Torres et al., 2021). Para além do investimento necessário na instalação do *software*, é também fundamental assegurar a sua manutenção e a respetiva atualização de versões (Kinariwala et al., 2021a). Uma vez que cada sistema possui o seu próprio *software* de planeamento, pode ser impossível utilizar outro *software* sofisticado (Vasudevan et al., 2022). Com o propósito de compensar o investimento inicial efetuado num sistema de navegação dinâmica e nas necessidades de *software* relacionadas, o custo total do tratamento aumentará (Vasudevan et al., 2022).

Os erros da ND dividem-se em três categorias: operador, doente/dente e máquina (Dianat et al., 2020). Apesar de a maioria dos erros associados à navegação dinâmica serem erros do operador e da peça dentária, há algumas falhas tecnológicas que podem ocorrer (Vasudevan et al., 2022). Estes problemas podem ser consequência da interrupção do rastreo em tempo real durante o ajuste da trajetória da broca, mapeamento insuficiente de pontos de referência ou perda de estabilidade do *Jawtracker* durante o tratamento (Jain et al., 2020a; Vasudevan et al., 2022).

Entre os erros associados ao paciente ou ao dente incluem-se a presença de mobilidade dentária e uma CBCT de baixa qualidade (Dianat et al., 2020). Independentemente de a última resultar de artefactos provenientes de restaurações radiopacas ou da mobilidade do paciente durante a aquisição do exame, a má qualidade da CBCT pode dificultar ou até mesmo impedir o planeamento digital do caso, diminuindo a precisão do tratamento (Dianat et al., 2020).

Considerando o nível de coordenação mão-olho, destreza manual, prática contínua e conhecimentos técnicos cruciais para o uso correto da técnica, falhas do operador como erros de percepção humana e tremores das mãos têm uma influência significativa na obtenção de resultados satisfatórios (Dianat et al., 2020; Jain et al., 2020a; Jonaityte et al., 2022; Vasudevan et al., 2022).

4. Perspectivas futuras

4.1. Realidade aumentada

No mesmo contexto, têm sido propostas técnicas que recorrem à realidade aumentada (RA) (Franco et al., 2024; Yang et al., 2024). Os resultados clinicamente favoráveis na área de implantologia sugerem a possibilidade de integração da RA em sistemas de ND, de forma a maximizar o acesso em dentes com MC (Yang et al., 2024). Esta tecnologia consiste na incorporação, em tempo real, de imagens virtuais tridimensionais, incluindo imagens, vídeos e modelos, num ambiente tridimensional real (Franco et al., 2024; Yang et al., 2024).

Os dispositivos montados na cabeça, designadamente as “viseiras”, são o *hardware* mais frequentemente utilizado em abordagens de RA (Farronato et al., 2023). Precedido por um *workflow* semelhante ao descrito para os sistemas de ND, os dados da CBCT em formato STL são transferidos para o dispositivo ótico, após a marcação do trajeto e do *target point*, sobrepondo-se a estas imagens ao campo de visão real do operador (Franco et al., 2024; Yang et al., 2024). Este sistema possibilita a visão do campo operatório e a navegação tridimensional sem necessidade de observação de um ecrã, recorrendo a câmaras de luz visível e infravermelhos, um sensor de profundidade, um magnetómetro, um giroscópio e um acelerómetro (Franco et al., 2024; Yang et al., 2024).

Relativamente à sua potencial utilidade como guia digital, o estudo *in vitro* de Farronato et al. (2023) avaliou a precisão da RA no acesso a canais radiculares. Os resultados obtidos demonstraram que, nos molares, a área de superfície em sobreposição com o plano virtual (82%) foi substancialmente superior do que com os dentes anteriores (56%) e com os pré-molares (57%) (Farronato et al., 2023). Os desvios do acesso obtido em relação ao plano virtual apresentaram valores superiores nos dentes anteriores (164%) e pré-molares (168%) comparativamente com os molares (125%) (Farronato et al., 2023). Já Franco et al. (2024), num estudo em dentes extraídos com OCR, concluiu que a utilização de RA resultou numa redução de discrepâncias entre o trajeto digital planeado e o acesso efetuado. Comparativamente às técnicas manuais, à NE e à ND, a RA foi a que apresentou os valores de desvio coronário (0,72 mm), apical (0,81 mm) e angular (2,87 mm) mais reduzidos (Franco et al., 2024).

A implementação destes sistemas requer um determinado nível de experiência, formação, coordenação visual e motora e investimento nos *hardwares* necessários (Franco et

al., 2024). Para que a validação *in vivo* se torne exequível, é necessário prosseguir com o trabalho de personalização do fluxo de trabalho associado (Farronato et al., 2023). Tal permite reduzir os desvios lineares e angulares, bem como diminuir o tempo exigido na calibração pré-operatória (Farronato et al., 2023). No entanto, a precisão observada em estudos *in vitro* mostra que a RA tem a capacidade de potencializar o desenvolvimento futuro da endodontia guiada (Farronato et al., 2023; Franco et al., 2024).

4.2. Inteligência Artificial

A confirmação da presença de MC é possível apenas através de exames radiográficos e histológicos (Altındağ et al., 2024). Conforme anteriormente mencionado, o único meio atualmente disponível para detectar cálculos pulpares, de forma clínica e não invasiva, consiste na realização de exames radiográficos (Altındağ et al., 2024). Contudo, apesar de este ser o método de diagnóstico recomendado, as calcificações devem de ter um grau de mineralização e uma dimensão considerável (superior a 200 μm) para que se tornem visíveis em radiografias (Altındağ et al., 2024; Ye et al., 2024). Apesar dos modelos de inteligência artificial (IA) atualmente disponíveis não apresentarem capacidade de detectar cálculos com dimensões inferiores a 200 μm , têm vindo a revelar-se úteis no diagnóstico radiográfico de calcificações discretas (Mohammad-Rahimi et al., 2024; Ye et al., 2024). Estas permitem investigar padrões e anomalias frequentemente indetectáveis para o olho humano (Mohammad-Rahimi et al., 2024; Ye et al., 2024).

Novas técnicas de análise de imagem, em particular as baseadas em *deep learning* (DL), têm suscitado interesse e têm sido aplicadas com eficácia em vários domínios da imagiologia médica, apresentando resultados notáveis (Ye et al., 2024). O DL é um domínio de IA, mais especificamente de *machine learning* (ML): um método que permite aos computadores adquirir instruções a partir da análise de relação de dados, sem necessidade de programação (Altındağ et al., 2024). Os computadores usam os seus conhecimentos sobre padrões de dados e informações previamente obtidas para fazer previsões ou tomar decisões com base em novos dados (Altındağ et al., 2024). Já o DL refere-se a uma ramificação que engloba a utilização de redes neuronais artificiais avançadas com uma ou mais camadas ocultas, com o objetivo de mimetizar a estrutura e funcionamento do cérebro humano (Altındağ et al., 2024; Ourang et al., 2024).

O modelo U-Net, uma arquitetura de DL muito apreciada e amplamente aplicada, incorpora informações contextuais com uma grande eficácia, devido à sua estrutura em forma de U (Ye et al., 2024). É constituído por uma quantidade limitada de parâmetros, uma velocidade de treino rápida e a capacidade de atingir uma elevada precisão mesmo com um número reduzido de amostras, este modelo apresenta inúmeras vantagens (Ye et al., 2024). Para identificar a calcificação da polpa, Selmi et al. classificaram as radiografias periapicais como “com” ou “sem” cálculos pulpares, utilizando modelos DL e classificadores de aprendizagem automática (Ye et al., 2024). Com o intuito de compreender as características da calcificação da polpa e de identificar automaticamente dentes calcificados em aplicações em tempo real, o modelo DL é treinado numa grande quantidade de dados registados por profissionais médicos qualificados (Ye et al., 2024). Um modelo U-Net foi aplicado a diversas CBCT no estudo de Ye et al. (2024), procurando reconhecer calcificações pulpares. Este estudo alcançou uma taxa de exatidão de $72,78 \pm 2,13\%$, uma especificidade de $68,88 \pm 2,35\%$ e uma sensibilidade de $75,91 \pm 2,84\%$ (Ye et al., 2024).

O algoritmo representativo YOLO (You Only Look Once) é um modelo de DL desenvolvido para a detecção e segmentação de objetos em tempo real (Altındağ et al., 2024; Kang & Kim, 2023). Conforme o nome indica, o YOLO possibilita o reconhecimento e segmentação de objectos de forma rápida e precisa, identificando a presença de objetos em tempo real e numa única leitura (Altındağ et al., 2024; Kang & Kim, 2023). Num estudo de Altındağ et al. (2024) aplicaram o YOLOv5 (a mais recente versão do algoritmo) em radiografias panorâmicas com o intuito de reconhecer cálculos pulpares. Os resultados obtidos indicam uma sensibilidade e precisão de cerca de 80%, e 77%, respetivamente, valores que poderão ser potencialmente aumentados com a implementação de bases de dados mais extensas (Altındağ et al., 2024).

Em contraste com as técnicas convencionais, os modelos de DL apresentam a capacidade de automatizar o processo de identificação, reduzir o esforço dos profissionais de saúde e minimizar as discrepâncias e erros provocados por variações subjetivas (Ye et al., 2024). A aplicação da IA na área da endodontia tem o potencial de revolucionar o setor, através da otimização dos processos de investigação médica, educação, diagnóstico, planeamento do tratamento e processos administrativos (Mohammad-Rahimi et al., 2024; Ye et al., 2024).

III. Conclusão

O desenvolvimento de metamorfose calcificante em espaços pulpare é uma ocorrência relativamente comum, estando tipicamente associada a vitalidade pulpar. No entanto, a sua presença em dentes com indicação para tratamento endodôntico persiste um desafio para as abordagens tradicionais. As tentativas de acesso a canais com calcificação extensa aumentam o risco de perda de estrutura dentária saudável e de erros iatrogênicos, comprometendo o prognóstico e podendo, em última instância, levar à extração de dentes sem quaisquer complicações prévias.

Com etiologias variadas e um mecanismo biológico ainda pouco compreendido, a calcificação pulpar permanece uma patologia escassamente explorada. A sua associação a fatores fisiológicos, doenças sistêmicas e fármacos frequentemente ligados ao envelhecimento sugere um aumento futuro da prevalência da OCR, acompanhando o crescimento da esperança média de vida. Neste contexto, torna-se essencial investir em técnicas inovadoras que otimizem o tratamento de dentes afetados.

Desde 2016, a Endodontia Guiada tem demonstrado resultados cada vez mais promissores. Ao possibilitar um acesso seguro, previsível e minimamente invasivo em canais calcificados, tanto a NE como a ND têm-se revelado ferramentas valiosas, cada uma com as suas particularidades. A ND, em especial, apresenta ainda um grande potencial de desenvolvimento.

Tecnologias inovadoras como a RA poderão impulsionar a evolução dos sistemas de ND, tornando o processo intra-operatório mais intuitivo. Simultaneamente, a IA tem mostrado utilidade no apoio ao diagnóstico, nomeadamente no desenvolvimento de algoritmos que facilitam a identificação de OCR. Desta forma, existe uma diminuição da percentagem de cálculos pulpares não identificáveis em exames radiográficos e auxilia na prevenção de acidentes no decorrer do tratamento.

Diante das limitações impostas pelas abordagens convencionais, os mais recentes avanços têm sido fundamentais para o aumento das taxas de sucesso e do prognóstico a longo prazo. Apesar da *performance* notável das técnicas mais recentemente disponibilizadas, há ainda um longo caminho a percorrer em busca da perfeição. Como tal, é expectável que a

Endodontia não estagne e que se continue a testemunhar um crescimento incessante, no sentido de permitir a abordagem a casos cada vez mais complexos.

IV. Referências bibliográficas

Ackerman, S., Aguilera, F. C., Buie, J. M., Glickman, G. N., Umorin, M., Wang, Q., & Jalali, P. (2019). Accuracy of 3-dimensional-printed Endodontic Surgical Guide: A Human Cadaver Study. *Journal of Endodontics*, *45*(5), 615–618. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.02.005>

Aldahmash, S. A., Price, J. B., Mostoufi, B., Griffin, I. L., Dianat, O., Tordik, P. A., & Martinho, F. C. (2022). Real-time 3-dimensional Dynamic Navigation System in Endodontic Microsurgery: A Cadaver Study. *Journal of Endodontics*, *48*(7), 922–929. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2022.04.012>

Ali, A., & Arslan, H. (2021). Effectiveness of the static-guided endodontic technique for accessing the root canal through MTA and its effect on fracture strength. *Clinical Oral Investigations*, *25*(4), 1989–1995. <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03507-x>

Almadhoon, H. W., Al-Kafarna, M., Asla, M. M., Gbreel, M. I., Abd Allah, M. A. E., & Almotairy, N. (2022). The Association of Dental Pulp Stones to Cardiovascular and Renal Diseases: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Endodontics*, *48*(7), 845–854. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2022.02.010>

Alsamahi, S., Milne, T. M., Hussaini, H., Rich, A. M., & Friedlander, L. T. (2022). Type 2 diabetes and the clinically normal pulp: An in vitro study. *International Endodontic Journal*, *55*(6), 660–671. <https://doi.org/10.1111/iej.13732>

Altındağ, A., Bahrilli, S., Çelik, Ö., Bayrakdar, İ. Ş., & Orhan, K. (2024). The Detection of Pulp Stones with Automatic Deep Learning in Panoramic Radiographies: An AI Pilot Study. *Diagnostics*, *14*(9), 890. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14090890>

American Association of Endodontists & Canadian Academy of Endodontics. (n.d.). *AAE Endodontic Case Difficulty Assessment Form and Guidelines*. <https://www.aae.org/specialty/wp-content/uploads/sites/2/2022/01/CaseDifficultyAssessmentFormFINAL2022.pdf>

Anderson, J., Wealleans, J., & Ray, J. (2018). Endodontic applications of 3D printing. *International Endodontic Journal*, 51(9), 1005–1018. <https://doi.org/10.1111/iej.12917>

Ballal, N. V., Ray, A. B., Narkedamalli, R., Urala, A. S., Patel, V., Harris, M., Bergeron, B. E., & Tay, F. R. (2024). Effect of continuous vs sequential chelation on the mechanical properties of root dentin: An ex vivo study. *Journal of Dentistry*, 148, 105214. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105214>

Banka, A., Patri, G., Pradhan, P. K., & Lath, H. (2024). Comparative evaluation between guided endodontics and conventional techniques for calcific metamorphosis - A systematic review and meta-analysis. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*, 27(9), 891–896. https://doi.org/10.4103/JCDE.JCDE_294_24

Bardales-Alcocer, J., Ramírez-Salomón, M., Vega-Lizama, E., López-Villanueva, M., Alvarado-Cárdenas, G., Serota, K. S., & Ramírez-Wong, J. (2021). Endodontic retreatment using Dynamic Navigation: a case report. *Journal of Endodontics*, 47(6), 1007–1013. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.03.005>

Boutsioukis, C., & Arias-Moliz, M. T. (2022). Present status and future directions – irrigants and irrigation methods. *International Endodontic Journal*, 55(S3), 588–612. <https://doi.org/10.1111/iej.13739>

Buchgreitz, J., Bjørndal, L., Sobrinho, A. P. R., Tavares, W. L., Kinariwala, N., & Maia, L. M. (2021). Static Guided Nonsurgical Approach for Calcified Canals of Anterior Teeth. Em N. Kinariwala & L. Samaranayake (Eds.), *Guided Endodontics* (pp. 113–133). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55281-7_6

Buchgreitz, J., Buchgreitz, M., Mortensen, D., & Bjørndal, L. (2016). Guided access cavity preparation using cone-beam computed tomography and optical surface scans - an ex vivo study. *International Endodontic Journal*, 49(8), 790–795. <https://doi.org/10.1111/iej.12516>

Busanello, F. H., Petridis, X., So, M. V. R., Dijkstra, R. J. B., Sharma, P. K., & van der Sluis, L. W. M. (2019). Chemical biofilm removal capacity of endodontic irrigants as a function of biofilm structure: optical coherence tomography, confocal microscopy and

viscoelasticity determination as integrated assessment tools. *International Endodontic Journal*, 52(4), 461–474. <https://doi.org/10.1111/iej.13027>

Chan, M. Y. C., Cheung, V., Lee, A. H. C., & Zhang, C. (2022). A Literature Review of Minimally Invasive Endodontic Access Cavities - Past, Present and Future. *European Endodontic Journal*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.14744/eej.2022.62681>

Chaniotis, A., & Ordinola-Zapata, R. (2022). Present status and future directions: Management of curved and calcified root canals. *International Endodontic Journal*, 55(S3), 656–684. <https://doi.org/10.1111/iej.13685>

Chaniotis, A., Sousa Dias, H., & Chanioti, A. (2024). Negotiation of Calcified Canals. *Journal of Clinical Medicine*, 13(9), 2703. <https://doi.org/10.3390/jcm13092703>

Chen, X., Dou, J., Fu, Z., Qiu, Y., Zou, L., Huang, D., & Tan, X. (2022). Macrophage M1 polarization mediated via the IL-6/STAT3 pathway contributes to apical periodontitis induced by *Porphyromonas gingivalis*. *Journal of Applied Oral Science*, 30, e20220316. <https://doi.org/10.1590/1678-7757-2022-0316>

Chen, D., Yu, F., Wu, F., Bai, M., Lou, F., Liao, X., Wang, C., & Ye, L. (2019). The role of Wnt7B in the mediation of dentinogenesis via the ERK1/2 pathway. *Archives of Oral Biology*, 104, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2019.05.009>

Connert, T., Krug, R., Eggmann, F., Emsermann, I., ElAyouti, A., Weiger, R., Köhl, S., & Krastl, G. (2019). Guided Endodontics versus Conventional Access Cavity Preparation: A Comparative Study on Substance Loss Using 3-dimensional–printed Teeth. *Journal of Endodontics*, 45(3), 327–331. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.11>

Connert, T., Weiger, R., & Krastl, G. (2022). Present status and future directions - Guided endodontics. *International Endodontic Journal*, 55(S4), 995–1002. <https://doi.org/10.1111/iej.13687>

D, G. T., Saxena, P., & Gupta, S. (2022). Static vs. dynamic navigation for endodontic

microsurgery - A comparative review. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 12(4), 410–412. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2022.04.010>

Dąbrowski, W., Puchalska, W., Ziemlewski, A., & Ordyniec-Kwaśnica, I. (2022). Guide endodontics as a personalized tool for complicated clinical cases. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 9958. <https://doi.org/10.3390/ijerph19169958>

Decurcio, D. A., Bueno, M. R., Silva, J. A., Loureiro, M. a. Z., Sousa-Neto, M. D., & Estrela, C. (2021). Digital planning on guided endodontics technology. *Brazilian Dental Journal*, 32(5), 23–33. <https://doi.org/10.1590/0103-6440202104740>

Dianat, O., Nosrat, A., Mostoufi, B., Price, J. B., Gupta, S., & Martinho, F. C. (2021). Accuracy and efficiency of guided root-end resection using a dynamic navigation system: a human cadaver study. *International Endodontic Journal*, 54(5), 793–801. <https://doi.org/10.1111/iej.13466>

Dianat, O., Nosrat, A., Tordik, P. A., Aldahmash, S. A., Romberg, E., Price, J. B., & Mostoufi, B. (2020). Accuracy and Efficiency of a Dynamic Navigation System for Locating Calcified Canals. *Journal of Endodontics*, 46(11), 1719–1725. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.07.014>

Diogenes, A., Simon, S., & Law, A. S. (2020). Regenerative endodontics. Em L. H. Berman, & K. M. Hargreaves, *Cohen's Pathways of the Pulp—E-Book: Cohen's Pathways of the Pulp—E-Book* (12.th ed., pp. 475-512). Elsevier Health Sciences. <https://books.google.pt/books?id= 9 7DwAAQBAJ>

Drukteinis, S., Bilvinaite, G., & Sakirzanovas, S. (2024). The Impact of Citric Acid Solution on Hydraulic Calcium Silicate-Based Sealers and Root Dentin: A Preliminary Assessment. *Materials*, 17(6), 1351. <https://doi.org/10.3390/ma17061351>

Duncan, H. F., Cooper, P. R., & Smith, A. J. (2019). Dissecting dentine-pulp injury and wound healing responses: consequences for regenerative endodontics. *International Endodontic Journal*, 52(3), 261–266. <https://doi.org/10.1111/iej.13064>

Farronato, M., Torres, A., Pedano, M. S., & Jacobs, R. (2023). Novel method for augmented reality guided endodontics: An in vitro study. *Journal of Dentistry*, 132, 104476. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104476>

Flores, M. T., Holan, G., Borum, M., & Andreasen, J. O. (2007). Injuries to the Primary Dentition Em J. O. Andreasen, F. M. Andreasen, & L. Andersson, *Textbook and Color Atlas of Traumatic Injuries to the Teeth* (4.th ed., pp. 516-541). Wiley. <https://books.google.pt/books?id=geE1Zeui1bMC>

Franco, C. G., Deglow, E. R., Montero, J., Sans, F. A., Nagendrababu, V., Dummer, P. M., Galindo, A. B. L., & Zubizarreta-Macho, Á. (2024). Endodontic access with different computer navigation systems in calcified root canals. *The Journal of the American Dental Association*, 155(12), 1043–1052. <https://doi.org/10.1016/j.adaj.2024.09.011>

Fristad, I., & Berggreen, E. (2020). Structure and functions of the dentin-pulp complex. Em L. H. Berman, & K. M. Hargreaves, *Cohen's Pathways of the Pulp—E-Book: Cohen's Pathways of the Pulp—E-Book* (12.th ed., pp. 512-557). Elsevier Health Sciences. https://books.google.pt/books?id=_9_7DwAAQBAJ

Gabardo, M. C. L., Wambier, L. M., Rocha, J. S., Küchler, E. C., de Lara, R. M., Leonardi, D. P., Sousa-Neto, M. D., Baratto-Filho, F., & Michel-Crosato, E. (2019). Association between Pulp Stones and Kidney Stones: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Endodontics*, 45(9), 1099–1105.e2. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.06.006>

Gómez-Delgado, M., Camps-Font, O., Luz, L., Sanz, D., & Mercade, M. (2023). Update on citric acid use in endodontic treatment: a systematic review. *Odontology*, 111(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10266-022-00744-2>

Grant, G. T. (2015). Direct Digital Manufacturing. Em *Clinical Applications of Digital Dental Technology* (pp. 41–56). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119045564.ch3>

Gutmann, J. L., & Fan, B. (2020). Tooth morphology and pulpar access cavities. Em L. H. Berman, & K. M. Hargreaves, *Cohen's Pathways of the Pulp—E-Book: Cohen's Pathways of the Pulp—E-Book* (12.th ed., pp. 192-236). Elsevier Health Sciences. https://books.google.pt/books?id=_9_7DwAAQBAJ

Hack, G. D., Bloom, I. T., & Patzelt, S. B. M. (2015). Digital Impressions. Em *Clinical Applications of Digital Dental Technology* (pp. 27–40). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119045564.ch2>

Haupt, F., Pfitzner, J., & Hülsmann, M. (2017). A comparative in vitro study of different techniques for removal of fibre posts from root canals. *Australian Endodontic Journal*, 44(3), 245–250. <https://doi.org/10.1111/aej.12230>

Hazar, E., & Hazar, A. (2025). Effects of phytic acid and etidronic acid using continuous and sequential chelation on the removal of smear layer, dentin microhardness, and push-out bond strength of calcium silicate-based cement. *BMC Oral Health*, 25(1), 633. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-06010-5>

Huth, K. C., Borkowski, L., Liebermann, A., Berlinghoff, F., Hickel, R., Schwendicke, F., & Reymus, M. (2024). Comparing accuracy in guided endodontics: dynamic real-time navigation, static guides, and manual approaches for access cavity preparation - an in vitro study using 3D printed teeth. *Clinical Oral Investigations*, 28(4), 212. <https://doi.org/10.1007/s00784-024-05603-8>

Ideo, F., Manca, M. F., Niazi, S., Mannocci, F., Bardini, G., & Cotti, E. (2023). The role of systemic statins in the inception and healing of apical periodontitis: a systematic review. *BMC Oral Health*, 23(1), 730. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03472-3>

Ito, R., Watanabe, S., Satake, K., Saito, R., & Okiji, T. (2024). Accuracy and Efficiency of the Surgical-Guide-Assisted Fiber Post Removal Technique for anterior teeth: an Ex vivo study. *Dentistry Journal*, 12(10), 333. <https://doi.org/10.3390/dj12100333>

Jadhav, G. R., & Mittal, P. (2025). Cone-Beam Computed Tomographic Scan-based Assessment of the Correlation between the Location of Caries and Pulp Canal Obliteration:

An Aid to Treatment Planning. *Journal of Endodontics*, 51(1), 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2024.10.005>

Jain, S. D., Carrico, C. K., & Bermanis, I. (2020a). 3-Dimensional Accuracy of Dynamic Navigation Technology in Locating Calcified Canals. *Journal of Endodontics*, 46(6), 839–845. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.03.014>

Jain, S. D., Saunders, M. W., Carrico, C. K., Jadhav, A., Deeb, J. G., & Myers, G. L. (2020b). Dynamically Navigated versus Freehand Access Cavity Preparation: A Comparative Study on Substance Loss Using Simulated Calcified Canals. *Journal of Endodontics*, 46(11), 1745–1751. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.07.032>

Jiandong, B., Yunxiao, Z., Zuhua, W., Yan, H., Shuangshuang, G., Junke, L., Hongwei, W., & Hua, X. (2022). Generalized pulp canal obliteration in a patient on long-term glucocorticoids: a case report and literature review. *BMC Oral Health*, 22(1), 352. <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02387-9>

Jonaityte, E. M., Bilvinaite, G., Drukteinis, S., & Torres, A. (2022). Accuracy of Dynamic Navigation for Non-Surgical Endodontic Treatment: A Systematic Review. *Journal of Clinical Medicine*, 11(12), 3441. <https://doi.org/10.3390/jcm11123441>

Kamburoğlu, K., Sönmez, G., Koç, C., Yılmaz, F., Tunç, O., & Isayev, A. (2023). Access Cavity Preparation and Localization of Root Canals Using Guides in 3D-Printed Teeth with Calcified Root Canals: An In Vitro CBCT Study. *Diagnostics*, 13(13), 2215. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13132215>

Kamio, T., & Kawai, T. (2023). CBCT Images to an STL Model: Exploring the “Critical Factors” to Binarization Thresholds in STL Data Creation. *Diagnostics*, 13(5), 921. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13050921>

Kamio, T., & Onda, T. (2022). Fused Deposition Modeling 3D Printing in Oral and Maxillofacial Surgery: Problems and Solutions. *Cureus*, 14(9), e28906. <https://doi.org/10.7759/cureus.28906>

Kang, C. H., & Kim, S. Y. (2023). Real-time object detection and segmentation technology: an analysis of the YOLO algorithm. *JMST Advances*, 5(2–3), 69–76. <https://doi.org/10.1007/s42791-023-00049-7>

Krasner, P., & Rankow, H. J. (2004). Anatomy of the pulp-chamber floor. *Journal of Endodontics*, 30(1), 5–16. <https://doi.org/10.1097/00004770-200401000-00002>

Krastl, G., Weiger, R., Filippi, A., Van Waes, H., Ebeleseder, K., Ree, M., Connert, T., Widbiller, M., Tjäderhane, L., Dummer, P. M. H., & Galler, K. (2021a). Endodontic management of traumatized permanent teeth: a comprehensive review. *International Endodontic Journal*, 54(8), 1221–1245. <https://doi.org/10.1111/iej.13508>

Krastl, G., Weiger, R., Filippi, A., Van Waes, H., Ebeleseder, K., Ree, M., Connert, T., Widbiller, M., Tjäderhane, L., Dummer, P. M. H., & Galler, K. (2021b). European Society of Endodontology position statement: endodontic management of traumatized permanent teeth. *International Endodontic Journal*, 54(9), 1473–1481. <https://doi.org/10.1111/iej.13543>

Krastl, G., Zehnder, M. S., Connert, T., Weiger, R., & Kühn, S. (2016). Guided Endodontics: a novel treatment approach for teeth with pulp canal calcification and apical pathology. *Dental traumatology : official publication of International Association for Dental Traumatology*, 32(3), 240–246. <https://doi.org/10.1111/edt.12235>

Kinariwala, N. (2021a). CBCT in Endodontics. Em N. Kinariwala & L. Samaranayake (Eds.), *Guided Endodontics* (pp. 13–25). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55281-7_2

Kinariwala, N. (2021b). Navigation in Dentistry and Minimally Invasive Endodontics. Em N. Kinariwala & L. Samaranayake (Eds.), *Guided Endodontics* (pp. 1–11). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55281-7_1

Kinariwala, N., Antal, M. A., & Kiscsatári, R. (2021a). Dynamic Navigation in Endodontics. Em N. Kinariwala & L. Samaranayake (Eds.), *Guided Endodontics* (pp. 193–202). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55281-7_9

Kinariwala, N., Buchgreitz, J., Bjørndal, L., Molnár, B., & Ludhwani, S. (2021b). Endodontic Guides and Software Planning. Em N. Kinariwala & L. Samaranayake (Eds.), *Guided Endodontics* (pp. 65–84). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55281-7_4

Kornsuthisophon, C., Photichailert, S., Nowwarote, N., Tompkins, K. A., & Osathanon, T. (2022). Wnt signaling in dental pulp homeostasis and dentin regeneration. *Archives of Oral Biology*, 134, 105322. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2021.105322>

Kulinkovych-Levchuk, K., Pecci-Lloret, M. P., Castelo-Baz, P., Pecci-Lloret, M. R., & Oñate-Sánchez, R. E. (2022). Guided Endodontics: A Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21), 13900. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113900>

Kostunov, J., Rammelsberg, P., Klotz, A. L., Zenthöfer, A., & Schwindling, F. S. (2021). Minimization of Tooth Substance Removal in Normally Calcified Teeth Using Guided Endodontics: An In Vitro Pilot Study. *Journal of Endodontics*, 47(2), 286–290. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.10.025>

Kwon S. R. (2011). Whitening the single discolored tooth. *Dental clinics of North America*, 55(2), 229–vii. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2011.01.001>

La Rosa, G. R. M., Peditto, M., Venticinque, A., Marcianò, A., Bianchi, A., & Pedullà, E. (2024a). Advancements in guided surgical endodontics: A scoping review of case report and case series and research implications. *Australian Endodontic Journal*, 50(2), 397–408. <https://doi.org/10.1111/aej.12865>

La Rosa, G. R. M., Plotino, G., Nagendrababu, V., & Pedullà, E. (2024b). Effectiveness of continuous chelation irrigation protocol in endodontics: a scoping review of laboratory studies. *Odontology*, 112(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10266-023-00835-8>

Lara-Mendes, S. T. O., Barbosa, C. F. M., Machado, V. C., & Santa-Rosa, C. C. (2018). A New Approach for Minimally Invasive Access to Severely Calcified Anterior Teeth Using the

Guided Endodontics Technique. *Journal of Endodontics*, 44(10), 1578–1582. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.07.006>

Lima, T. O., Rocha, A. O., Dos Anjos, L. M., Meneses Júnior, N. S., Hungaro Duarte, M. A., Alcalde, M. P., Cardoso, M., & Vivan, R. R. (2024). A Global Overview of Guided Endodontics: A Bibliometric Analysis. *Journal of Endodontics*, 50(1), 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2023.10.002>

Lise, D. P., Gutiérrez, C., da Rosa, T. P., & Vieira, L. C. (2014). Bleaching options for pulp-calcified teeth: case history reports. *Operative Dentistry*, 39(6), 572–577. <https://doi.org/10.2341/13-349-T>

Llaquet Pujol, M., Vidal, C., Mercadé, M., Muñoz, M., & Ortolani-Seltenerich, S. (2021). Guided Endodontics for Managing Severely Calcified Canals. *Journal of Endodontics*, 47(2), 315–321. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.11.026>

Loureiro, M. A. Z., Elias, M. R. A., Capeletti, L. R., Silva, J. A., Siqueira, P. C., Chaves, G. S., & Decurcio, D. A. (2020). Guided Endodontics: Volume of Dental Tissue Removed by Guided Access Cavity Preparation-An Ex Vivo Study. *Journal of Endodontics*, 46(12), 1907–1912. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.09.008>

Marshall, G., Verdelis, K., & Peters, O. A. (2023). Morphology of pulpal mineralizations: A scoping review. *Journal of Dentistry*, 139, 104745. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104745>

Martinho, F. C., Qadir, S. J., Griffin, I. L., Melo, M. a. S., & Fay, G. G. (2024). Augmented Reality Head-Mounted device and dynamic navigation system for postremoval in maxillary molars. *Journal of Endodontics*, 50(6), 844–851. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2024.02.004>

Milcent, C. P. F., da Silva, T. G., Baika, L. M., Grassi, M. T., Carneiro, E., Franco, A., & de Lima, A. A. S. (2019). Morphologic, Structural, and Chemical Properties of Pulp Stones in Extracted Human Teeth. *Journal of Endodontics*, 45(12), 1504–1512. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.09.009>

- Mohammad-Rahimi, H., Sohrabniya, F., Ourang, S. A., Dianat, O., Aminoshariae, A., Nagendrababu, V., Dummer, P. M. H., Duncan, H. F., & Nosrat, A. (2024). Artificial intelligence in endodontics: Data preparation, clinical applications, ethical considerations, limitations, and future directions. *International Endodontic Journal*, 57(11), 1566–1595. <https://doi.org/10.1111/iej.14128>
- Moreno-Rabié, C., Torres, A., Lambrechts, P., & Jacobs, R. (2020). Clinical applications, accuracy and limitations of guided endodontics: a systematic review. *International Endodontic Journal*, 53(2), 214–231. <https://doi.org/10.1111/iej.13216>
- Moura, L. B., Velasques, B. D., Silveira, L. F. M., Martos, J., & Xavier, C. B. (2017). Therapeutic Approach to Pulp Canal Calcification as Sequelae of Dental Avulsion. *European Endodontic Journal*, 2(1), 1–5. <https://doi.org/10.5152/eej.2017.16060>
- Nasiri, K., & Wrbas, K. T. (2023). Management of calcified root canal during root canal therapy. *Journal of Dental Sciences*, 18(4), 1931–1932. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2023.06.018>
- Oh, S., Kim, S., Lo, H. S., Choi, J. Y., Kim, H. J., Ryu, G. J., Kim, S. Y., Choi, K. K., Kim, D. S., & Jang, J. H. (2018). Virtual Simulation of Autotransplantation Using 3-dimensional Printing Prototyping Model and Computer-assisted Design Program. *Journal of Endodontics*, 44(12), 1883–1888. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.08.010>
- Ourang, S. A., Sohrabniya, F., Mohammad-Rahimi, H., Dianat, O., Aminoshariae, A., Nagendrababu, V., Dummer, P. M. H., Duncan, H. F., & Nosrat, A. (2024). Artificial intelligence in endodontics: Fundamental principles, workflow, and tasks. *International Endodontic Journal*, 57(11), 1546–1565. <https://doi.org/10.1111/iej.14127>
- Palatyńska-Ulatowska, A., Fernandes, M. C., Pietrzycka, K., Koprowicz, A., Klimek, L., Souza, R. A., Pradebon, M., & de Figueiredo, J. A. P. (2021). The Pulp Stones: Morphological Analysis in Scanning Electron Microscopy and Spectroscopic Chemical Quantification. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 58(1), 5. <https://doi.org/10.3390/medicina58010005>

Parashar, S. R., Kasabwala, K., Ulaganathan, S., McV, A., Khandelwal, P., Arockiam, S., & Natanasabapathy, V. (2022). ASSOCIATION OF PULP CALCIFICATIONS AND CARDIOVASCULAR DISEASE: A SYSTEMATIC REVIEW AND META-ANALYSIS. *The Journal of Evidence-based Dental Practice*, 22(2), 101707. <https://doi.org/10.1016/j.jebdp.2022.101707>

Patel, S., Brown, J., Semper, M., Abella, F., & Mannocci, F. (2019). European Society of Endodontology position statement: Use of cone beam computed tomography in Endodontics: European Society of Endodontology (ESE) developed by. *International Endodontic Journal*, 52(12), 1675–1678. <https://doi.org/10.1111/iej.13187>

Perez, C., Finelle, G., & Couvrechel, C. (2019). Optimisation of a guided endodontics protocol for removal of fibre-reinforced posts. *Australian Endodontic Journal*, 46(1), 107–114. <https://doi.org/10.1111/aej.12379>

Perez, C., Sayeh, A., Etienne, O., Gros, C. I., Mark, A., Couvrechel, C., & Meyer, F. (2021). Microguided endodontics: Accuracy evaluation for access through intraroot fibre-post. *Australian Endodontic Journal*, 47(3), 592–598. <https://doi.org/10.1111/aej.12524>

Peters, O. A., Peters, C. I., & Basrani, B. (2020). Cleaning and shaping of the root canal system. Em L. H. Berman, & K. M. Hargreaves, *Cohen's Pathways of the Pulp—E-Book: Cohen's Pathways of the Pulp—E-Book* (12.th ed., pp. 236-304). Elsevier Health Sciences. https://books.google.pt/books?id=_9_7DwAAQBAJ

Pettiette, M. T., Zhong, S., Moretti, A. J., & Khan, A. A. (2013). Potential correlation between statins and pulp chamber calcification. *Journal of Endodontics*, 39(9), 1119–1123. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2013.06.005>

Plotino, G., Abella Sans, F., Duggal, M. S., Grande, N. M., Krastl, G., Nagendrababu, V., & Gambarini, G. (2022). Present status and future directions: Surgical extrusion, intentional replantation and tooth autotransplantation. *International Endodontic Journal*, 55(S3), 827–842. <https://doi.org/10.1111/iej.13723>

- Ramirez, I., Kirschneck, C., Silva-Sousa, A. C., Proff, P., S Antunes, L., Gabbardo, M. C., de Oliveira, D. S., Sousa-Neto, M. D., Baratto-Filho, F., & Kuchler, E. C. (2023). The investigation of WNT6 and WNT10A single nucleotide polymorphisms as potential biomarkers for dental pulp calcification in orthodontic patients. *PloS one*, *18*(8), e0288782. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288782>
- Ren, Y., Zhang, J., Meng, T., Li, W., & Li, S. (2023). Reparative dentin formation as a possible factor influencing the penetrability of dentin in human teeth with apical periodontitis: an ex vivo study. *BMC Oral Health*, *23*(1), 412. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03105-9>
- Ribeiro, D., Reis, E., Marques, J. A., Falacho, R. I., & Palma, P. J. (2022). Guided Endodontics: Static vs. Dynamic Computer-Aided Techniques-A Literature Review. *Journal of Personalized Medicine*, *12*(9), 1516. <https://doi.org/10.3390/jpm12091516>
- Romano, B. D. S., Kublitski, P. M. D. O., Juglair, M. M., Brancher, J. A., Baratto-Filho, F., Michel-Crosato, E., & Gabardo, M. C. L. (2024). Association between pulp stones and systemic diseases: A case-control study. *ABCS Health Sciences*, *49*, e024211. <https://doi.org/10.7322/abcshs.2022074.2137>
- Saghiri, M. A., Karamifar, K., Fakharzadeh, A., Conte, M., & Morgano, S. M. (2020). Effect of Diabetes on Tubular Density and Push-out Bond Strength of Mineral Trioxide Aggregate to Dentin. *Journal of Endodontics*, *46*(11), 1584–1591. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.07.025>
- Sánchez-Herrera, G., Facchera, M., Palma-Carrió, C., & Pérez-Leal, M. (2025). Approaches in apical microsurgery: conventional vs. guided. A systematic review. *Oral and Maxillofacial Surgery*, *29*(1), 76. <https://doi.org/10.1007/s10006-025-01372-0>
- Shah, P., & Chong, B. S. (2018). 3D imaging, 3D printing and 3D virtual planning in endodontics. *Clinical Oral Investigations*, *22*(2), 641–654. <https://doi.org/10.1007/s00784-018-2338-9>

Strbac, G. D., Schnappauf, A., Bertl, M. H., Vasak, C., Ulm, C., & Giannis, K. (2020). Guided Osteotomy and Guided Autotransplantation for Treatment of Severely Impacted Teeth: A Proof-of-Concept Report. *Journal of Endodontics*, 46(11), 1791–1798. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.07.024>

Tavares, W. L. F., De Oliveira Murta Pedrosa, N., Moreira, R. A., Braga, T., De Carvalho Machado, V., Sobrinho, A. P. R., & Amaral, R. R. (2021). Limitations and management of static-guided endodontics failure. *Journal of Endodontics*, 48(2), 273–279. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.11.004>

Torres, A., Boelen, G. J., Lambrechts, P., Pedano, M. S., & Jacobs, R. (2021a). Dynamic navigation: a laboratory study on the accuracy and potential use of guided root canal treatment. *International Endodontic Journal*, 54(9), 1659–1667. <https://doi.org/10.1111/iej.13563>

Torres, A., Dierickx, M., Lerut, K., Bleyen, S., Shaheen, E., Coucke, W., Pedano, M. S., Lambrechts, P., & Jacobs, R. (2025). Clinical outcome of guided endodontics versus freehand drilling: A controlled clinical trial, single arm with external control group. *International Endodontic Journal*, 58(2), 209–224. <https://doi.org/10.1111/iej.14157>

Torres, A., Lerut, K., Lambrechts, P., & Jacobs, R. (2021b). Guided Endodontics: Use of a Sleeveless Guide System on an Upper Premolar with Pulp Canal Obliteration and Apical Periodontitis. *Journal of Endodontics*, 47(1), 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.09.016>

Torres, A., Shaheen, E., Lambrechts, P., Politis, C., & Jacobs, R. (2019). Microguided Endodontics: a case report of a maxillary lateral incisor with pulp canal obliteration and apical periodontitis. *International Endodontic Journal*, 52(4), 540–549. <https://doi.org/10.1111/iej.13031>

Tosco, V., Monterubbianesi, R., Aranguren, J., Furlani, M., Riberti, N., Putignano, A., & Orsini, G. (2025). Evaluation of morphological and chemical composition of dental pulp stones: a combined microanalytical approach. *Journal of Endodontics*. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2025.02.014>

van der Meer, W. J., Vissink, A., Ng, Y. L., & Gulabivala, K. (2016). 3D Computer aided treatment planning in endodontics. *Journal of Dentistry*, 45, 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2015.11.007>

van der Vyver, P. J., Vorster, M., Jonker, C. H., & Potgieter, N. (2020). Calcific Metamorphosis - A review of literature and clinical management. *SADJ*, 75(6), 316–322. <https://doi.org/10.17159/2519-0105/2020/v75no6a5>

Vasudevan, A., Santosh, S. S., Selvakumar, R. J., Sampath, D. T., & Natanasabapathy, V. (2022). Dynamic Navigation in Guided Endodontics - A Systematic Review. *European Endodontic Journal*, 7(2), 81–91. <https://doi.org/10.14744/ej.2022.96168>

Vecsei, B., Czigola, A., Róth, I., Hermann, P., & Borbély, J. (2021). Digital Impression Systems, CAD/CAM, and STL file. Em N. Kinariwala & L. Samaranayake (Eds.), *Guided Endodontics* (pp. 27–63). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55281-7_3

Vera, J., Thepris-Charaf, J., Hernández-Ramírez, A., García, J. G., Romero, M., Vazquez-Carcaño, M., & Arias, A. (2022). Prevalence of pulp canal obliteration and periapical pathology in human anterior teeth: A three-dimensional analysis based on CBCT scans. *Australian Endodontic Journal*, 49(2), 351–357. <https://doi.org/10.1111/aej.12669>

Vijaykumar, A., Root, S. H., & Mina, M. (2021). Wnt/ β -Catenin Signaling Promotes the Formation of Preodontoblasts In Vitro. *Journal of Dental Research*, 100(4), 387–396. <https://doi.org/10.1177/0022034520967353>

Villa-Machado, P. A., Restrepo-Restrepo, F. A., Sousa-Dias, H., & Tobón-Arroyave, S. I. (2022). Application of computer-assisted dynamic navigation in complex root canal treatments: Report of two cases of calcified canals. *Australian Endodontic Journal*, 48(1), 187–196. <https://doi.org/10.1111/aej.12614>

Vinagre, A., Castanheira, C., Messias, A., Palma, P. J., & Ramos, J. C. (2021). Management of Pulp Canal Obliteration-Systematic Review of Case Reports. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 57(11), 1237. <https://doi.org/10.3390/medicina57111237>

Vitali, F. C., Cardoso, I. V., Mello, F. W., Flores-Mir, C., Andrada, A. C., Dutra-Horstmann, K. L., & Duque, T. M. (2022). Association between Orthodontic Force and Dental Pulp Changes: A Systematic Review of Clinical and Radiographic Outcomes. *Journal of Endodontics*, 48(3), 298–311. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.11.018>

Wang, S., Yang, L., Bai, G., Gu, Y., Fan, Q., Guan, X., Yuan, J., & Liu, J. (2024). A preliminary study on calcifying nanoparticles in dental plaque: Isolation, characterization, and potential mineralization mechanism. *Clinical and Experimental Dental Research*, 10(3), e885. <https://doi.org/10.1002/cre2.885>

Wu, M., Liu, M., Cheng, Y., Tang, W., Yan, P., & Jiang, H. (2022). Treatment of pulp canal obliteration using a dynamic navigation system: two case reports. *Journal of Endodontics*, 48(11), 1441–1446. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2022.07.014>

Wu, Y., Huang, L., Ge, B., Zhang, Y., Zhang, J., Xie, H., Zhu, Y., & Chen, C. (2024). Application of 3D-printed resin guides for the removal of molar fiber posts. *Journal of Dentistry*, 105462. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105462>

Yang, X., Zhang, Y., Chen, X., Huang, L., & Qiu, X. (2024). Limitations and Management of Dynamic Navigation System for Locating Calcified Canals Failure. *Journal of Endodontics*, 50(1), 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2023.10.010>

Zehnder, M. S., Connert, T., Weiger, R., Krastl, G., & Kühl, S. (2016). Guided endodontics: accuracy of a novel method for guided access cavity preparation and root canal location. *International Endodontic Journal*, 49(10), 966–972. <https://doi.org/10.1111/iej.12544>

Zhan, C., Huang, M., Zeng, J., Chen, T., Lu, Y., Chen, J., Li, X., Yin, L., Yang, X., & Hou, J. (2023). Irritation of Dental Sensory Nerves Promotes the Occurrence of Pulp Calcification. *Journal of Endodontics*, 49(4), 402–409. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2023.01.001>

Zhao, Y., Yuan, X., Liu, B., Tulu, U. S., & Helms, J. A. (2018). Wnt-Responsive Odontoblasts Secrete New Dentin after Superficial Tooth Injury. *Journal of Dental Research*, 97(9), 1047–1054. <https://doi.org/10.1177/0022034518763151>

Zubizarreta-Macho, Á., Muñoz, A. P., Deglow, E. R., Agustín-Panadero, R., & Álvarez, J. M. (2020). Accuracy of Computer-Aided Dynamic Navigation Compared to Computer-Aided Static Procedure for Endodontic Access Cavities: An in Vitro Study. *Journal of Clinical Medicine*, 9(1), 129. <https://doi.org/10.3390/jcm9010129>

Zubizarreta-Macho, Á., Valle Castaño, S., Montiel-Company, J. M., & Mena-Álvarez, J. (2021). Effect of Computer-Aided Navigation Techniques on the Accuracy of Endodontic Access Cavities: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Biology*, 10(3), 212. <https://doi.org/10.3390/biology100302>