

Mestrado Integrado em Medicina Dentária

Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra



**FACULDADE DE MEDICINA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA**

**Avaliação da adaptação marginal de dois cimentos biocerâmicos usados
em *plug* apical: estudo *in vitro***

Sara Margarida Santos Filipe

Orientadores: Professor Doutor Manuel Marques Ferreira

Mestre José Pedro Martinho

Coimbra, julho 2023

**Avaliação da adaptação marginal de dois cimentos biocerâmicos usados
em *plug* apical: estudo *in vitro***

Filipe, SM.^{1,2}, Martinho, JP.^{2,3}, Ferreira, MM.^{2,4}

- 1) Aluna do 5º ano do Mestrado Integrado em Medicina Dentária, Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra, Portugal
- 2) Instituto de Endodontia da Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra, Portugal
- 3) Assistente Convidado, Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra, Portugal
- 4) Professor Associado com Agregação, Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra, Portugal

Área de Medicina Dentária
Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra
Av. Bissaya Barreto, Bloco de Celas
3000-075 Coimbra, Portugal
Tel.: +351 239 484 183
Fax.: +351 239 402 910

Email: sara.filipe2000@gmail.com

Coimbra, julho 2023

ÍNDICE

RESUMO	5
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. MATERIAIS E MÉTODOS	12
2.1. Seleção da amostra	12
2.2. Preparação da amostra.....	13
2.3. Formação de grupos.....	14
2.4. Cimentos endodônticos	14
2.5. Execução do <i>plug</i> apical	15
2.6. Adaptação marginal	16
2.7. Análise estatística	17
3. RESULTADOS.....	17
4. DISCUSSÃO	19
5. CONCLUSÃO.....	24
AGRADECIMENTOS.....	25
REFERÊNCIAS.....	27

RESUMO

Introdução: A ausência de encerramento do forâmen apical em dentes com necessidade de tratamento endodôntico constitui um desafio clínico, para o qual estão descritas várias abordagens clínicas entre as quais a apexificação. O agregado de trióxido mineral (MTA, *Mineral Trioxide Aggregate*) tem sido o material *gold-standard* utilizado na formação de *plugs* apicais. Contudo, o aparecimento de novos cimentos biocerâmicos tem desafiado este paradigma por mérito das múltiplas características destes materiais que colmatam algumas limitações do MTA.

Objetivo: Este estudo tem como objetivo avaliar e comparar a adaptação marginal de dois cimentos à base de silicatos de cálcio (White ProRoot MTA® e TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™), quando usados na realização de *plugs* apicais em dentes com ápice aberto, utilizando microscopia eletrônica de varrimento (SEM, *Scanning Eletron Microscopy*).

Materiais e Métodos: Foram usados vinte e quatro dentes monorradiculares que foram seccionados na coroa e na raiz, obtendo segmentos radiculares de 15 mm e utilizados para simular *in vitro* um modelo de apexificação. Os canais foram instrumentados e divididos em dois grupos: grupo GMTA (Grupo com *plug* apical realizado com White ProRoot MTA®, n = 12) e grupo GTBC (Grupo com *plug* apical realizado com TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™, n = 12). Posteriormente, os segmentos foram seccionados transversalmente obtendo-se para cada segmento um corte de uma região apical (1 mm do ápice) e um da região cervical (2 mm do ápice). Finalmente, os cortes foram analisados através do SEM. A adaptação marginal dos materiais foi medida utilizando o software ImageJ® (National Institutes of Health, Madison, WI, USA). A análise estatística foi executada através do software de estatística IBM® SPSS® (versão 27) e a significância estatística foi definida para 0.05 ($p < 0.05$).

Resultados: Nenhum dos cimentos apresentou adaptação marginal total. Houve diferença estatisticamente significativa entre o GMTA e o GTBC na região apical do *plug* ($p < 0,05$), na qual o White ProRoot MTA® evidenciou menor percentagem de falha de adaptação marginal ($1,32 \pm 4,47$). O mesmo não se verificou para a região cervical dos *plugs* apicais ($p = 0,774$).

Conclusões: Apesar das limitações deste estudo, pode-se concluir que o White ProRoot MTA® demonstrou uma adaptação marginal mais eficiente em comparação ao TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ no corte apical.

Palavras-chave: Adaptação Marginal, Agregado Trióxido Mineral, Apexificação, Cimento Biocerâmico, *Plug* Apical

ABSTRACT

Introduction: The absence of closure of the apical foramen in teeth requiring endodontic treatment poses a clinical challenge, for which various clinical approaches, including apexification, have been described. Mineral Trioxide Aggregate (MTA) has been the gold-standard material used for the formation of apical plugs. However, the emergence of new bioceramic sealer has challenged this paradigm due to their multiple characteristics that address some limitations of MTA.

Objective: This study aims to evaluate and compare the marginal adaptation of two calcium silicate-based sealers (White ProRoot MTA[®] and TotalFill[®] BC RRM Fast Set Putty[™]) when used to create apical plugs in teeth with open apices, using Scanning Electron Microscopy (SEM).

Materials and Methods: Twenty-four single-rooted teeth were sectioned at the crown and root to obtain 15 mm root segments, which were used to simulate an in vitro apexification model. The canals were instrumented and divided into two groups: the GMTA group (apical plug created with White ProRoot MTA[®], n = 12) and the GTBC group (apical plug created with TotalFill[®] BC RRM Fast Set Putty[™], n = 12). Subsequently, the segments were transversely sectioned, resulting in one section from the apical region (1 mm from the apex) and one from the cervical region (2 mm from the apex). Finally, the sections were analyzed using SEM. The marginal adaptation of the materials was measured using ImageJ[®] software (National Institutes of Health, Madison, WI, USA). Statistical analysis was performed using IBM[®] SPSS[®] statistics software (version 27), and statistical significance was set at 0.05 ($p < 0.05$).

Results: Neither of the cements showed complete marginal adaptation. There was a statistically significant difference between GMTA and GTBC in the apical region of the plug ($p < 0.05$), with White ProRoot MTA[®] demonstrating a lower percentage of marginal adaptation failure (1.32 ± 4.47). However, this difference was not observed in the cervical region of the apical plugs ($p = 0.774$).

Conclusions: Despite the limitations of this study, it can be concluded that White ProRoot MTA[®] showed more efficient marginal adaptation compared to TotalFill[®] BC RRM Fast Set Putty[™] in the apical section.

Keywords: Apexification, Apical Plug, Bioceramic Sealer, Marginal adaptation, Mineral Trioxide Aggregate.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal do tratamento endodôntico passa por eliminar os microrganismos presentes no sistema de canais radiculares e criar uma barreira que possa proporcionar uma selagem adequada do canal, capaz de prevenir a recontaminação bacteriana das seguintes estruturas contíguas: cavidade oral (e o seu microbioma), sistema de canais radiculares e tecidos periapicais (1–3). A obturação canalar tridimensional, realizada após uma adequada instrumentação, sela hermeticamente o sistema de canais radiculares e previne tanto a colonização bacteriana como a entrada de fluidos da cavidade oral para os tecidos periapicais, de forma a criar condições para a cicatrização dos tecidos periradiculares (4–7). Além disso, uma obturação adequada é essencial para inviabilizar os microrganismos presentes nos canais radiculares que possam ter sobrevivido à fase químico-mecânica do tratamento endodôntico bem como no impedimento da circulação de fluidos periradiculares (4). Tradicionalmente, este procedimento clínico é realizado com recurso a materiais de núcleo, como é o caso da guta-percha, e cimentos de selagem endodônticos (8). Por sua vez, os cimentos endodônticos mais usados atualmente são à base de resinas epóxicas e têm como objetivo o preenchimento do espaço entre as paredes canalares e o material de núcleo, assim como dos gaps existentes no próprio material de núcleo (8,9).

No entanto, em casos de necrose pulpar de dentes imaturos a abordagem terapêutica constitui um desafio clínico, podendo haver dificuldade em estabelecer os limites da preparação, desinfecção e obturação canalar (10,11). Perante um traumatismo, uma lesão de cárie profunda ou uma anomalia de desenvolvimento, um dente imaturo pode resultar num comprometimento da sua maturação radicular, com a interrupção da formação da raiz até ao seu comprimento final e ausência de encerramento do ápice radicular (10,12). A interrupção do processo de formação radicular resulta numa conformação apical divergente, o que impossibilita um controlo adequado do comprimento de trabalho para o material de obturação canalar (11). A conformação apical divergente e a ausência da constrição apical decorrentes do trauma podem levar à extrusão de soluções irrigantes, medicação intracanal e do próprio material de obturação para os tecidos periapicais, situações que colocam em causa o sucesso do tratamento endodôntico a longo prazo (10,13).

Na abordagem clínica de um dente definitivo jovem, cujo encerramento do ápice não se efetuou, as opções de tratamento incluem a apexificação e abordagens regenerativas (14). Os protocolos regenerativos, recentemente adotados e com resultados muito promissores, contribuem para o espessamento das paredes radiculares, têm a capacidade de restituir a

vitalidade pulpar e o desenvolvimento radicular destes dentes. Desta forma, ficam estabelecidas condições para a ausência de sinais e sintomas clínicos, com evidência radiográfica de cicatrização da doença periapical (14,15).

Numa outra abordagem, a apexificação consiste numa técnica endodôntica que promove a formação de uma barreira biológica ou um *plug* apical ao nível do ápice aberto, a fim de promover o encerramento do sistema canal, estabelecer um limite para o material de obturação e prevenir a extrusão desse material para os tecidos periapicais (15). Ao contrário dos tratamentos endodônticos regenerativos, a apexificação normalmente não detém a capacidade de retomar o desenvolvimento radicular do dente, nem de promover o espessamento das paredes dentinárias (15).

As técnicas de apexificação, tanto as que envolvem a criação de uma barreira calcificada biológica como as que envolvem o encerramento artificial do ápice com materiais biocerâmicos, têm lugar na prática clínica (12).

O protocolo tradicional da apexificação consiste na aplicação sequencial de pastas de hidróxido de cálcio ($\text{Ca} [\text{OH}]_2$) em múltiplas sessões até ao surgimento de uma barreira apical formada por tecido calcificado (16,17). Algumas desvantagens inerentes ao uso de hidróxido de cálcio abrangem a imprevisibilidade do encerramento apical, a variabilidade do tempo de tratamento, a dificuldade no acompanhamento do paciente e a eventualidade de o uso prolongado do hidróxido de cálcio fragilizar a estrutura dentária. Por estes motivos, o hidróxido de cálcio tem vindo a ser substituído por outros materiais para a realização deste procedimento clínico (16,17).

A formação de um *plug* apical, que compreende a colocação de um biomaterial na região apical do canal radicular para prevenir a infiltração microbiana, apresenta-se então como uma alternativa à técnica anterior (10,18,19). *Plugs* com a extensão de 3-5 mm são referidos como adequados para a otimização da adaptação marginal e para se obter uma selagem eficiente, potenciando o sucesso terapêutico (13,20). No que respeita aos materiais usados neste procedimento clínico, estes devem ter a capacidade de fornecer uma selagem consistente, boa biocompatibilidade, uma adesão eficaz às paredes canales e estabilidade dimensional. É também crucial que esses materiais sejam hidrofílicos (21,22), apresentem baixa solubilidade, facilidade de manipulação, um curto tempo de presa e boa radiopacidade (23,24).

Nesse âmbito, ao longo do tempo foram-se desenvolvendo cimentos endodônticos inovadores à base de silicatos de cálcio como o agregado trióxido mineral (MTA) e outros cimentos biocerâmicos (25). O MTA consiste num biomaterial resultante de uma mistura de cimento de Portland e óxido de bismuto bem como de quantidades mais pequenas de SiO_2 , CaO , MgO , K_2SO_4 , and Na_2SO_4 (20). O cimento de Portland, componente principal do MTA, é uma mistura de dissilicato de cálcio, trissilicato de cálcio, trissilicato de alumínio, gesso e alumina ferrite tricálcica (20). Colocado em contacto com o tecido periapical, o MTA tem a capacidade de induzir formação de tecido duro tipo hidroxiapatite (26), evidenciando a sua capacidade indutora de diferenciação odontoblástica (27). Além dessas vantagens, apresenta ainda uma boa radiopacidade, baixa solubilidade, elevado pH, atividade antimicrobiana e expansão após tomada de presa (28). No entanto, o longo tempo de presa, as dificuldades de manipulação e a possibilidade de descoloração coronária associados ao MTA levaram à necessidade de procurar materiais que ultrapassem estas dificuldades (29,30).

Os materiais biocerâmicos têm vindo a ser introduzidos em endodontia nos últimos anos enquanto alternativas ao hidróxido de cálcio e ao MTA (13), pois as suas propriedades físicas e biológicas favoráveis colmatam algumas das limitações dos anteriores materiais, aproximando os materiais biocerâmicos daquilo que é considerado o material ideal (31). Estes cimentos consistem em compostos cerâmicos dotados de significativa biocompatibilidade dada a sua semelhança com o processo biológico de formação de hidroxiapatite. Além disso, têm a capacidade de estimular uma resposta regenerativa e osteoindutora através da absorção de substâncias osteoindutoras aquando do processo de cicatrização óssea (31,32). Compostos bioativos, nomeadamente o fosfato de cálcio, interagem com os tecidos e estimulam a regeneração tecidual (23). A sua composição compreende silicatos tricálcicos e dicálcicos, fosfatos de cálcio, hidróxido de cálcio e óxido de zircónia (32). Ainda é de realçar a interação destes materiais com a dentina, nomeadamente a infiltração de conteúdo mineral dos cimentos biocerâmicos através da dentina intertubular, formando a chamada zona de infiltração mineral (8). Assim, no âmbito da endodontia, os cimentos biocerâmicos tornaram-se muito requisitados enquanto material de reparação de perfurações e cimento endodôntico devido a incontáveis propriedades, como o pH elevado, a não reabsorção, a facilidade de manipulação, a resistência radicular, a baixa citotoxicidade, a baixa contração e ainda a estabilidade química (32).

Um dos cimentos à base de silicatos de cálcio mais recentes que apareceu no mercado europeu é o TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ (FKG, La Chaux-de-Fonds, Switzerland) (8). Trata-se de um material biocerâmico constituído por dissilicato de cálcio, trissilicato de cálcio, hidróxido de cálcio, entre outros componentes. O TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ é pré-

misturado, apresentando-se pronto a ser utilizado, tem a capacidade de absorver humidade aquando da tomada de presa (13). Adicionalmente, este cimento embora possua um tempo de presa significativo de cerca de quatro horas (13), tem demonstrado elevada biocompatibilidade, resistência, adaptação às paredes dentinárias e não provoca descoloração dentária (8). Pode apresentar-se em forma de pasta, cimento ou *putty* (13).

O objetivo deste estudo foi avaliar e comparar a adaptação marginal de dois cimentos à base de silicato de cálcio, TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ (FKG, La Chaux-de-Fonds, Switzerland) e o White ProRoot MTA® (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) usados em *plugs* apicais em dentes imaturos através da análise de dados de microscopia de varrimento. A hipótese nula é a inexistência de diferenças estatisticamente significativas da adaptação marginal entre os dois cimentos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Seleção da amostra

Para este estudo foram selecionados 24 dentes monorradiculares extraídos por motivos ortodónticos ou periodontais após autorização da Comissão de Ética da FMUC (CE_107.2017). As estruturas periodontais como ligamento periodontal e os cálculos foram removidos com curetas de Gracey. Os dentes foram desinfetados com hipoclorito de sódio a 2,5% e conservados em cloramina T a 4°C desde o momento em que foram extraídos até ao início do estudo, a fim de prevenir a colonização bacteriana.

Os critérios de inclusão da amostra compreenderam dentes com uma conformação radicular reta, raiz completamente formada e um único canal radicular permeável. Relativamente aos critérios de exclusão, foram dentes com canais calcificados ou obstruídos, reabsorções internas ou externas, tratamentos endodónticos prévios, fraturas ou fissuras radiculares, lesões de cárie ou restaurações na zona do dente localizadas da junção amelocementária até ao ápice e ainda dentes com curvaturas acentuadas.

Para garantir uma correta standardização na seleção da amostra, de forma que os dentes selecionados apresentassem apenas um canal radicular e uma anatomia interna semelhante, realizaram-se radiografias ortogonais e com incidências proximais. Os dentes foram

observados ao microscópio ótico (Leica®M320, Wetzlar, Germany) com o objetivo de pesquisar a existência de fraturas, cáries ou fissuras.

2.2. Preparação da amostra

De modo a padronizar a amostra, procedeu-se à secção dos dentes ao nível da junção amelocementária perpendicularmente ao longo eixo do dente com uma broca cilíndrica diamantada (Coltène/Whaledent AG, Altstätten, Switzerland) montada em turbina, refrigerada com água, permitindo obter segmentos radiculares com 17 mm de comprimento. Nos dentes em que não foi observada exposição da câmara pulpar, foi realizada uma cavidade de acesso com recurso a uma broca esférica montada em turbina para aceder ao canal.

À porção apical dos segmentos radiculares foram seccionados e removidos 2 mm apicais, com uma broca cilíndrica (Coltène/Whaledent AG, Altstätten, Switzerland) diamantada montada em turbina, a fim de simular um dente imaturo com ápice aberto. Posteriormente, as superfícies coronárias e radiculares dos segmentos foram polidas com um disco carborundum (Dentorium Products Co. Inc., Farmingdale, NY, USA) de modo a obter segmentos com o comprimento final de 15 mm.

Posteriormente, iniciou-se a preparação químico-mecânica dos canais começando por uma exploração inicial e permeabilização dos canais radiculares utilizando limas manuais ISO k15 com 25 mm (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland). Definiu-se um comprimento de trabalho de 15 mm através da inserção de uma lima K manual ISO #10 (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) até a mesma ser visível no forâmen apical. A preparação mecânica ortógrada do canal foi primeiro efetuada com instrumentação manual e recurso a limas k manuais #10, #15, #20 e #25 (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland), seguida de instrumentação mecanizada com a lima SX do sistema Protaper Next de 25 mm (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) ao comprimento de trabalho de 15 mm, com uma velocidade constante de 250 rpm e um controlo de torque de 1.2 N/cm. Para o efeito, foi usado um motor elétrico X-SMART™ (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland). A irrigação efetuada entre cada instrumento foi à base de hipoclorito de sódio a 2,5% com uma agulha 27G, fechada e com abertura lateral. A fim de simular um ápice aberto, foi realizada uma preparação divergente retrógrada do canal, isto é, através do forâmen apical do dente com recurso a limas mecanizadas ProFile Orifice Shaper® (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) OS#1 (06/20), OS#2 (06/25) e OS#3 (06/30) sequencialmente introduzidas a 5 mm por apical com o motor elétrico X-SMART™ (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland),

velocidade constante de 250 rpm e controlo de torque a 1.2 N/cm. O protocolo de irrigação levado a cabo foi o mesmo do protocolo preconizado na instrumentação ortógrada.

O protocolo de irrigação final executou-se com recurso a 1 mL de ácido etilenodiamino tetraacético a 17% (EDTA) (Magnum Dental AS, Tartu, Estonia) durante 1 minuto e seguidamente neutralizado com 2 mL de soro fisiológico (NaCl) a 0.9%. Secaram-se os canais com cones de papel (Dentsply Johnson City, TN 37604, USA) e a integridade do canal foi observado através do microscópio ótico (Leica® M320, Wetzlar, Germany).

2.3. Formação de grupos

Realizada a preparação dos segmentos dos dentes, separaram-se os mesmos manualmente e de forma aleatória em dois grupos experimentais GMTA E GTBC, com 12 segmentos radiculares cada, de acordo com o cimento endodôntico a usar:

- Grupo GMTA: White ProRoot MTA® (GMTA, n = 12);
- Grupo GTBC: TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ (GTBC, n = 12).

2.4. Cimentos endodônticos

O TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ (FKG, La Chaux-de-Fonds, Switzerland) e o White ProRoot MTA® (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) foram os cimentos endodônticos à base de silicatos de cálcio que foram testados (Tabela 1).

Tabela 1: Fabricante, composição e lote dos cimentos endodônticos usados.

Material	White ProRoot MTA®	TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™
Fabricante	Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland;	FKG, La Chaux-de-Fonds, Switzerland;
Composição	Dissilicato de cálcio, trissilicato de cálcio, trialuminato de cálcio, óxido de bismuto, sulfato de cálcio, óxido de alumínio, óxido de magnésio e óxido de ferro;	Trissilicato de cálcio, dissilicato de cálcio, óxido de zircónia, pentóxido de tântalo, sulfato de cálcio e fosfato de cálcio monobásico;
Lote	0000337969	2201FSPS

2.5. Execução do *plug* apical

Em ambos os grupos, foram realizados *plugs* de cerca de 5 mm nos segmentos apicais dos dentes preparados. Enquanto o White ProRoot MTA® foi misturado segundo as indicações do fabricante, o TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™, sendo um material pré-misturado pronto a ser utilizado, não careceu de preparação. Os dois materiais foram introduzidos no interior dos canais dos segmentos com recurso a um MAP System (*Micro Apical Placement System*) (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) com um diâmetro de 1.1 mm. A compactação executou-se com auxílio de *Schilder Pluggers* (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) tendo-se colocado um stop inicial a marcar 15 mm de comprimento. Realizaram-se incrementos de 1 mm cada, até o stop final marcar 10 mm de comprimento, criando assim um *plug* apical de 5 mm (Figura 1). Todo este procedimento foi executado com ampliação através da observação ao microscópio cirúrgico (Leica® M320, Wetzlar, Germany).

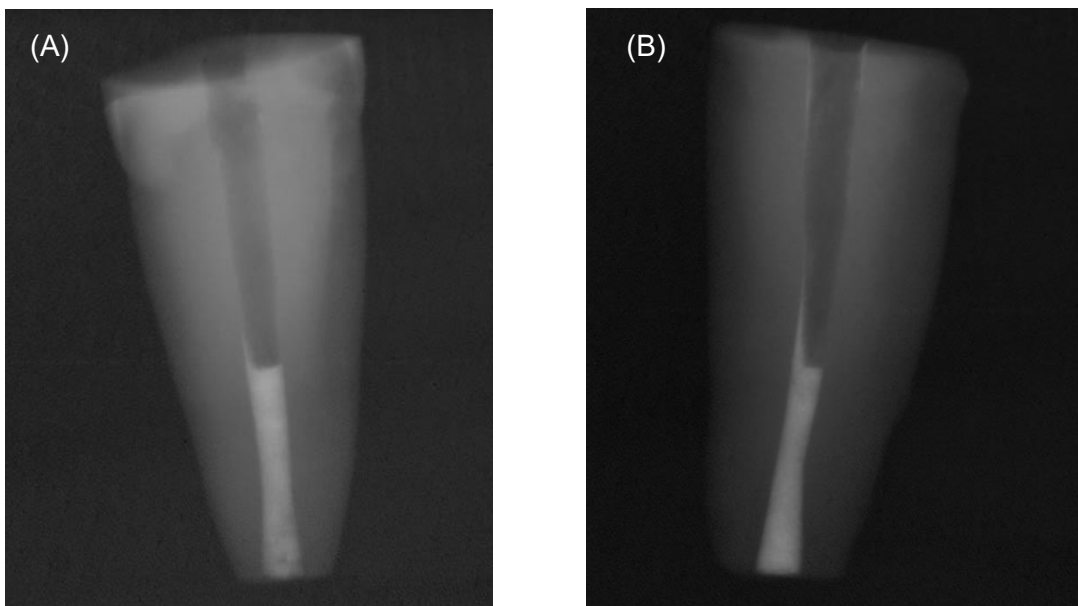


Figura 1. Imagem radiográfica após colocação de *plug* apical (A) com White ProRoot MTA® e com TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ (B)

Os segmentos dentários, separados nos respetivos grupos, foram posteriormente armazenados em recipientes contendo esponjas florais previamente embebidas em cloramina T, para simular o meio dos tecidos moles periapicais. A fim de criar uma atmosfera compatível com o ambiente *in vivo* e permitir a tomada de presa adequada dos cimentos, os espécimes foram armazenados numa divisão com temperatura ambiente e com humidade relativa de 100% durante 4 dias.

2.6. Adaptação marginal

Todos os segmentos de ambos os grupos foram seccionados incrementalmente (1mm) com recurso a um disco de carborundum (Dentorium Products Co. Inc., Farmingdale, NY, USA) montado em peça de mão, com irrigação constante e perpendicularmente ao longo eixo do dente. Deste processo, resultaram 48 cortes que correspondem a dois fragmentos, um apical e um cervical por cada segmento. Assim, para a avaliação da adaptação marginal foram incluídas 12 amostras apicais (1 mm do ápice) e 12 amostras cervicais (2 mm do ápice) para o MTA e a mesma distribuição de amostras para o TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™.

Seguidamente, os fragmentos foram polidos com uma lixa de silicone de carbide de 800 µm (Hermes Schleifmittel GmbH, Hamburg Germany) a fim de eliminar os detritos resultantes do corte para otimizar a visualização dos canais radiculares dos segmentos.

Avaliou-se a adaptação marginal entre os cimentos endodônticos usados e as paredes dos canais com recurso a um microscópio eletrónico de varrimento (SEM, *Scanning Electron Microscopy*) (Hitachi FLEXSEM 1000-Higashitoyoi, Kudamatsu City, Yamaguchi Prefecture-Tokyo, Japan). As imagens foram obtidas com três ampliações: 190x, 250x, 270x a 10 kV (Figura 2). Para o *plug* apical de cada dente, foram recolhidas duas imagens através do SEM: uma referente ao corte apical e outro ao corte cervical, com o objetivo de avaliar uma possível diferença da adaptação do material entre as duas localizações.

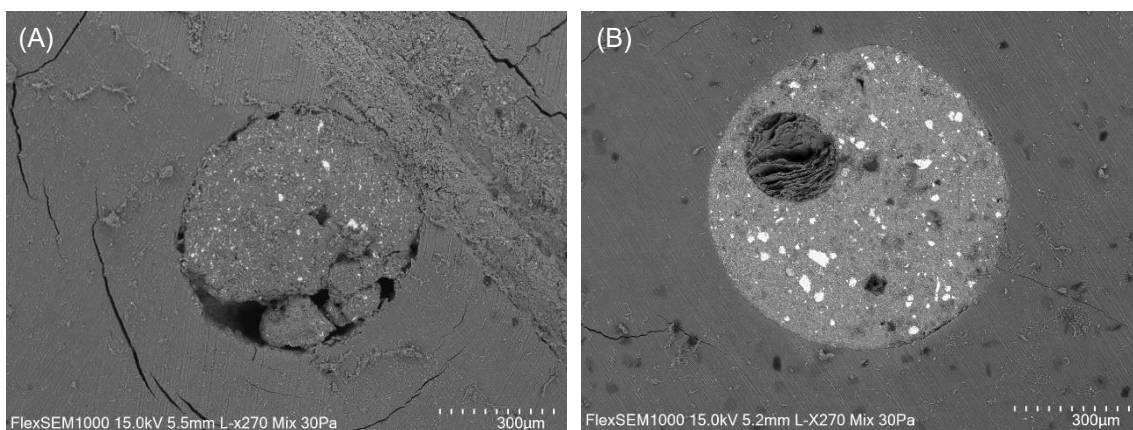


Figura 2. Imagem de microscopia eletrónica de varrimento. **(A)** *Plug* de White ProRoot MTA® em região apical; **(B)** *Plug* de TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ numa região cervical (270x).

O perímetro dos *gaps* e o perímetro do canal radicular das secções foram determinados por dois avaliadores independentes (M.M.F. e S.F.), usando o software ImageJ® (National Institutes of Health, Madison, WI, USA). A falta de adaptação marginal, foi calculada para cada amostra, de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Percentagem da falta de adaptação marginal} = (\text{perímetro dos gaps} \times 100) / \text{perímetro do canal radicular}$$

2.7. Análise estatística

A análise estatística foi executada através do teste de Mann-Whitney usando o software de estatística IBM® SPSS® (versão 27). A significância estatística foi definida para 0.05 ($p < 0.05$).

3. RESULTADOS

Foram calculados as médias percentuais e os desvios padrão de falta de adaptação marginal, medidas nas 24 amostras tendo em conta as medições da região apical e da região cervical. A consistência interna para as medições entre operadores foi avaliada com recurso ao teste do Alfa de Cronbach, tendo-se obtido um coeficiente de 0,893, que segundo a classificação qualitativa equivale a uma consistência boa.

Os resultados deste estudo consistem numa análise bipartida na qual por um lado se faz uma comparação entre regiões (apical *versus* cervical) e por outro uma comparação entre materiais (White ProRoot MTA® *versus* TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™).

Considerando a localização do corte, o White ProRoot MTA® evidenciou menor percentagem de falta de adaptação na região apical ($1,32 \pm 4,37$) do que na região cervical ($7,51 \pm 14,47$), porém, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativa entre a falta de adaptação marginal na zona apical e na zona cervical dos seus *plugs* ($p = 0,173$). De igual forma no TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™, a falta de adaptação apresentou-se ligeiramente maior na região cervical ($7,92 \pm 11,94$) do que na região apical ($7,34 \pm 14,68$), contudo ainda assim, também não se verificou diferença estatística entre as medições das zonas apicais e cervicais deste material ($p = 0,311$) (Figura 3).

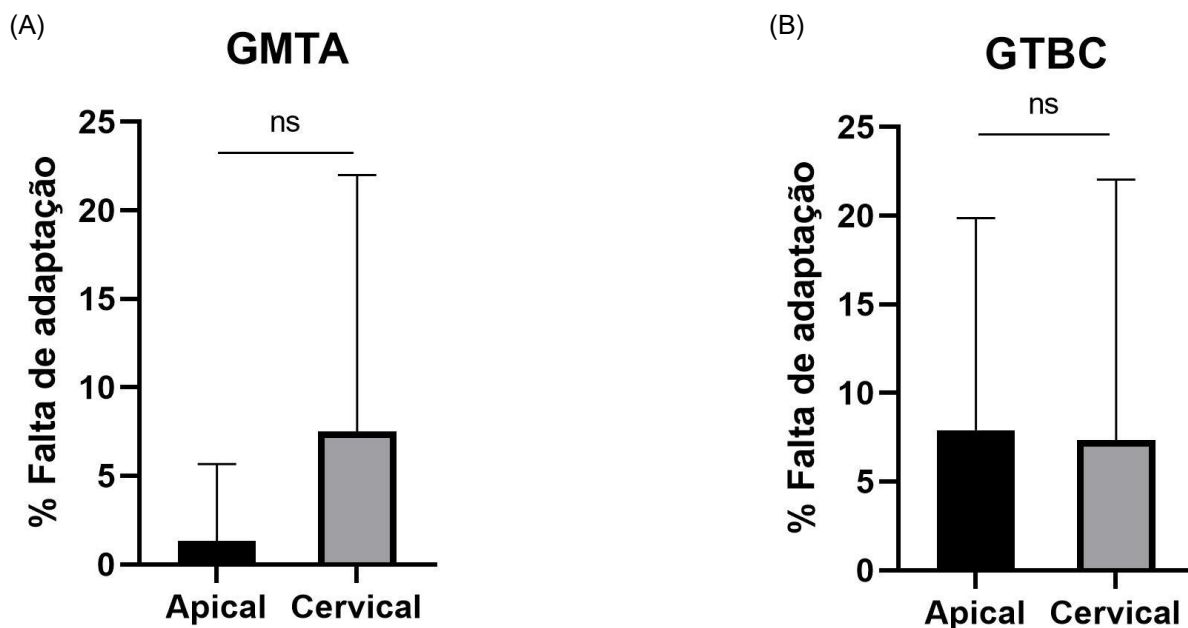


Figura 3. Representação gráfica das percentagens médias de falta de adaptação marginal, respetivos desvios-padrão e nível de significância estatística entre grupos: ns – sem significância; (A): GMTA – grupo White ProRootMTA®; (B): GTBC – grupo TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™.

Relativamente à comparação entre os dois materiais, principal objetivo do presente estudo, os resultados foram averiguados confrontando e comparando a zona apical e a zona cervical de cada um dos materiais. Relativamente à zona apical, a percentagem média de falta de adaptação foi maior para o TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ ($7,92 \pm 11,94$) do que para o White ProRoot MTA® ($1,32 \pm 4,37$) com diferença estatisticamente significativa ($p = 0,029$). Já na região cervical, o TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ apresentou uma percentagem média de falta de adaptação menor ($7,34 \pm 14,68$) do que o White ProRoot MTA® ($7,51 \pm 14,47$), contudo, aqui não se encontrou diferença estatisticamente significativa ($p = 0,774$) (Figura 4).

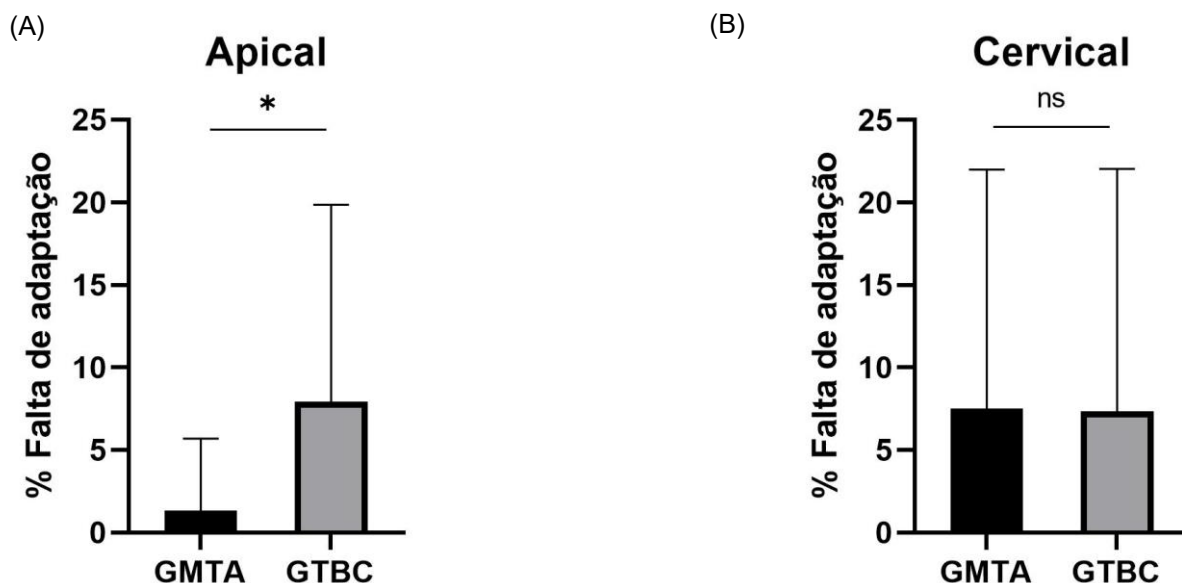


Figura 4. Representação gráfica das percentagens médias de falta de adaptação marginal, respetivos desvios-padrão e nível de significância estatística entre grupos: ns – sem significância; * - $p < 0,05$; GMTA – grupo White ProRootMTA®; GTBC – grupo TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™. (A) Região apical; (B) Região cervical.

4. DISCUSSÃO

A microinfiltração bacteriana dos canais radiculares com conseqüente infeção dos tecidos periapicais e recorrência da patologia endodôntica podem ser minimizados ou evitados se os materiais utilizados na abordagem endodôntica forem dotados de, entre outras características, adaptação às paredes canales (13). Em situações clínicas de *plugs* apicais, o cimento endodôntico deve maximizar a adaptação marginal às paredes canales a fim de selar irregularidades que possam levar a infiltração bacteriana e ao conseqüente insucesso endodôntico (33). No presente estudo, a observação a microscopia eletrónica de varrimento (SEM) teve como objetivo comparar a adaptação marginal do White ProRoot MTA® e do TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™, quando usados em *plugs* apicais no tratamento de casos clínicos cuja apexificação esteja indicada.

A correlação entre adaptação marginal e capacidade de selagem de um material tem sido controversa. Existem estudos que verificam que não existe uma relação direta entre estas duas propriedades, nomeadamente o estudo de Abdal *et al.* 1982 (34) e Yoshimura *et al.* 1990 (35). No entanto, existem estudos que estabelecem uma relação clara entre estas duas variáveis (36–41) nomeadamente Stabholz *et al.* 1985 (40), cujo principal objetivo do estudo

incluía avaliar a correlação entre adaptação marginal e capacidade de selagem, tendo-se verificando que a adaptação marginal poderá ser uma propriedade através da qual se consegue medir indiretamente a capacidade de selagem (42).

Conceber um modelo *in vitro* de ápice aberto é desafiante devido à dificuldade de simular a relação anatómica entre o dente e os tecidos periapicais (43). A metodologia deste estudo foi baseada numa técnica já descrita de instrumentação retrógrada e incluiu o uso de esponjas florais que simulam o ambiente dos tecidos periapicais, nomeadamente a barreira de colagénio (11,44). Visto que Lertmalapong *et al.* (1) concluíram que *plugs* apicais com espessuras de 4 mm exibiram melhores resultados de adaptação marginal e capacidade de selagem e que Prati *et al.* (24) afirmam que quanto maior a massa de material do *plug*, maior a sua expansão e menor a existência de *gaps*, no presente estudo foram realizados *plugs* apicais de cerca de 5 mm.

Ainda assim, mantém-se bastante contestável o valor de estudos *in vitro* derivado precisamente à questionável reprodutividade clínica, às limitações dos resultados e à carência de uniformização metodológica (10).

A fim de averiguar se existe uma diferença de falta de adaptação entre as regiões apical e cervical, os resultados mostraram que tanto dentro do grupo GMTA ($p = 0,173$) como no grupo GTBC ($p = 0,311$), não houve diferenças estatisticamente significativas entre regiões. É seguro afirmar que as condições de adaptação marginal se mantiveram relativamente as mesmas ao longo de toda a extensão dos 5 mm dos *plugs*, evidenciando uma homogeneidade e uniformidade da disposição dos dois materiais nos *plugs* das amostras.

No que refere à comparação da adaptação marginal entre o White ProRoot MTA[®] e TotalFill[®] BC RRM Fast Set Putty[™] o presente estudo mostrou diferenças estatisticamente significativas ($p = 0,029$) para a região apical, onde o White ProRoot MTA[®] exibiu uma média de falta de adaptação ($1,32 \pm 4,37$) menor do que o TotalFill[®] BC RRM Fast Set Putty[™] ($7,92 \pm 11,94$). Já para a região cervical, foram ténues as diferenças encontradas entre o White ProRoot MTA[®] ($7,51 \pm 14,47$) e o TotalFill[®] BC RRM Fast Set Putty[™] ($7,34 \pm 14,68$) em termos de falta de adaptação marginal, não tendo sido encontradas diferenças estatisticamente significativas ($p = 0,774$). Os grandes desvios-padrão obtidos devem-se em particular ao reduzido tamanho da amostra, bem como ao facto de, em várias medições, não se observar qualquer falta de adaptação marginal. Esta limitação estatística seria contornável se o tamanho da amostra tivesse sido de cerca de o dobro. Contudo, é importante ressaltar a baixa percentagem média

de falhas de adaptação marginal na globalidade das amostras e, portanto, nos dois materiais, encontrando-se entre 1-8%.

Os resultados obtidos neste estudo podem divergir dos resultados provenientes de outros estudos devido não só ao processamento ou preparação da amostra bem como da metodologia de avaliação. A falta de diferença estatisticamente significativa entre os dois materiais na região cervical está de acordo com alguns estudos que concluíram não haver diferença entre os materiais e com alguns que concluíram que o TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ apresenta melhor adaptação ou melhor capacidade de selagem que o White ProRoot MTA® (33,45–50).

As diferenças significativas encontradas neste estudo, relativas à adaptação marginal dos dois materiais, podem estar associados às propriedades físicas e químicas dos mesmos, nomeadamente às alterações volumétricas e à solubilidade, bem como à sua forma de apresentação e método de colocação do *plug* apical.

Os melhores resultados associados ao White ProRoot MTA® na região apical podem decorrer especialmente da estabilidade dimensional ou até capacidade de expansão volumétrica e baixa força de compressão deste material aquando da tomada de presa (28,51). Pelo contrário, o TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ demonstrou em Guo *et. al* 2016 (52), uma elevada força compressiva ao longo da tomada de presa, nomeadamente superior ao White ProRoot MTA®, o que poderá constituir uma causa para a maior falta de adaptação marginal encontrada neste material no presente estudo. Outro motivo plausível para a menor adaptação do TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ em comparação com o White ProRoot MTA® neste estudo pode ser devido ao tempo de trabalho que idealmente tem de ser curto e à consistência do material que se pode revelar relativamente difícil de inserir e manusear no canal radicular (10). O TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ consta num material com reduzida porosidade (53), facto que pode estar na origem da elevada compressibilidade deste material (52).

De acordo com a *The American National Standards Institute (ANSI) / American Dental Association (ADA)* especificação 57, a solubilidade de um cimento não deve exceder os 3% da massa pois caso contrário, irá permitir a formação de *gaps* entre o material e as paredes canulares, diminuindo a adaptação marginal (23). Portanto, a solubilidade dos cimentos endodônticos é uma propriedade que nestes materiais deve ser bastante baixa, objetivando evitar a sua dissolução para os tecidos periapicais (54). O TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ apresentou, em vários estudos, uma solubilidade acima dos 3%(55–57). Torres *et. al* (2020)

(57) realizou a avaliação da solubilidade do TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ tanto em água destilada como em solução de PBS, uma solução salina cuja concentração simula a do ser humano. Apesar de baixa, a solubilidade deste cimento biocerâmico permanece acima do mínimo recomendado pela ISO 6876 (57,58). Pelo contrário, o White ProRoot MTA® demonstra ser um material cuja solubilidade é baixa, inclusive em fluidos biológicos (51,59,60), facto que pode explicar os resultados obtidos no presente estudo, nomeadamente no que respeita à comparação na zona apical entre o White ProRoot MTA® e o TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™.

A composição química dos cimentos biocerâmicos desempenha um papel importante na penetração tubular. Materiais hidrofílicos penetram mais fundo nos túbulos dentinários do que materiais hidrofóbicos (21), tendo sido comprovado que os cimentos biocerâmicos adotam uma maior adaptação marginal do que, por exemplo, as resinas epóxicas (22). Isto pode dever-se ao pequeno tamanho das partículas dos materiais biocerâmicos, permitindo assim uma maior penetração dos mesmos através dos túbulos dentinários (22). Esta característica dos materiais biocerâmicos pode estar na base dos bons resultados obtidos neste estudo, em ambos os materiais.

As metodologias utilizadas para averiguar a capacidade de selagem dos materiais incluem, para além da avaliação da adaptação marginal, a infiltração bacteriana (61), o uso de corantes (62), filtração de fluidos (63) e uso de radioisótopos (10). A observação com microscópio de varrimento de eletrões para averiguar a adaptação marginal foi a metodologia selecionada para o presente estudo, com o propósito de avaliar o perímetro dos *gaps* entre o material usado nos *plugs* e as paredes canulares. A justificação para a seleção deste método prende-se às características deste microscópio que incluem maior precisão, resolução e capacidade de ampliação na interface comparativamente ao microscópio ótico (38,64) bem como o facto de ser uma das metodologias menos exploradas nos estudos com o mesmo tema. Muitos estudos usam a metodologia da penetração de corante para averiguar a adaptação marginal e a microinfiltração, porém, a dissolução do corante ao longo do processo e a dificuldade de observação da máxima penetração são limitações documentadas (65). Além disso, as dimensões moleculares, o pH e a reatividade química do corante podem interferir com o grau de penetração, afetando os resultados (66). Assim, a microscopia eletrónica de varrimento constitui uma das metodologias para averiguar adaptação marginal (67).

Relativamente aos microscópios eletrónicos, e aos seus efeitos nas amostras, quanto maior a sua potência maior a probabilidade de ocorrência de artefactos ou cracks nos tecidos duros das amostras (38,68–70). Este fenómeno sucede devido a vários fatores como a contração e

expansão tanto do material como do dente, (13). Uma vez que neste estudo o uso do SEM pode levar à ocorrência desses artefactos que constituem um potencial viés aquando da interpretação das imagens recolhidas, as amostras foram várias vezes observadas o microscópio ótico (antes e depois da observação a SEM) e foram descartadas as amostras com cracks que afetaram a zona de interface material-dentina, tal como foi feito em Ayatollahi *et al.* 2016 (64). Outras imagens recolhidas, apesar de apresentarem cracks, os mesmos não ocorreram na zona alvo do estudo, ou seja, na interface dentina canal e material. Assim, não comprometendo minimamente os resultados, essas imagens foram consideradas viáveis para o estudo. Este problema pode ser colmatado usando um modelo de estudo alternativo com réplicas de resina das amostras, usado em vários estudos, que consiste numa impressão das amostras originais com recurso, por exemplo, a resina epóxica (38,71) ou a um polisiloxano (68) Porém, Shokouhinejad *et al.* 2014 (71) obteve resultados que contradizem Badr 2010 (68) e Torabinejad *et al.* 1995 (38), mostrando que a média dos gaps das réplicas em resina foi similar à superfície das amostras originais realizadas com MTA. De qualquer forma, é importante ressaltar que a metodologia com réplicas não elimina a interferência dos artefactos ou cracks assim como das alterações dimensionais do material, pois os mesmos podem também decorrer da tomada de impressão para obtenção das réplicas e do corte das amostras (43). Apesar da existência de artefactos ou cracks e das variações da angulação do corte que podem constituir limitações, o presente estudo obteve uma concordância boa entre avaliadores ($\alpha=0,893$).

Apesar de este estudo indicar que o White ProRoot MTA[®] apresenta uma adaptação marginal superior ao TotalFill[®] BC RRM Fast Set Putty[™], é necessário realizar mais pesquisas com uma amostra maior, bem como incluir medições volumétricas de forças de compressão, além de avaliar diretamente a solubilidade dos dois materiais. Seria interessante ainda, preconizar mais estudos além dos que já existem, que associassem o tipo de corte do presente estudo ao corte longitudinal das amostras, a fim de averiguar com mais exatidão a adaptação marginal ao longo das três dimensões dos *plugs*. Paralelamente, seria pertinente adicionar o fator tempo, com cortes temporalmente desfasados, com o objetivo de avaliar o papel do decorrer do tempo na evolução das propriedades dos materiais. Somente assim poderemos obter uma conclusão mais confiável sobre como esses materiais realmente se comportam em contextos *in vivo*. Portanto, uma vez que o MTA é considerado o *gold-standard* nesse tipo de procedimento, o seu uso continua a ser uma escolha legítima e respaldada por evidências científicas.

5. CONCLUSÃO

Considerando as limitações deste estudo conduzido em ambiente laboratorial, é possível concluir que o White ProRoot MTA® apresenta uma adaptação marginal superior ao TotalFill® BC RRM Fast Set Putty™ quando usados no tratamento de apexificação em dentes com ápices abertos que necessitam de um *plug* apical.

A técnica usada para realizar esta avaliação e comparação é válida e reproduzível, permitindo mimetizar, *in vitro*, o contexto de ápice aberto e o procedimento de apexificação. Assim, pode dizer-se também que os resultados obtidos neste estudo são fiáveis e bastante promissores no que refere às percentagens de adaptação destes dois materiais à base de silicatos de cálcio.

Houve efetivamente uma diferença estatisticamente significativa na adaptação marginal na região apical entre os dois cimentos à base de silicato de cálcio, o que levou à rejeição da hipótese nula. Na região cervical, não houve diferenças entre os dois materiais o que nos leva a aceitar a hipótese nula.

No entanto, tendo em conta a diversidade de metodologias para averiguar a adaptação marginal e a capacidade de selagem dos cimentos endodônticos, são necessários mais estudos para obter uma conclusão mais robusta.

AGRADECIMENTOS

“O homem primeiro tropeça, depois anda, depois corre, um dia voará.”

José Saramago

Dirijo-me primeiro ao meu orientador, Professor Doutor Manuel Marques Ferreira. Estou muito grata pela sua constante disponibilidade, empatia, motivação e conhecimentos transmitidos, tanto científicos como de cariz pessoal. Foi uma honra para mim trabalhar consigo e que tenha acompanhado de perto todos os meus projetos ao longo dos últimos 2 anos.

Ao meu coorientador, Dr. José Pedro Martinho, pela permanente disponibilidade e flexibilidade no esclarecimento de todas as minhas questões bem como pelo empenho na elaboração deste projeto. Agradeço-lhe ainda todas as palavras conselheiras, apaziguadoras e amigas que foram cruciais ao longo deste percurso.

À Dra. Mónica Zuzarte e à Dra. Salomé Pires pelo indispensável contributo, supervisão e assistência nos procedimentos laboratoriais e na análise estatística deste estudo.

Aos docentes, não docentes, assistentes e auxiliares do Departamento de Medicina Dentária da FMUC com os quais tive o prazer de privar ao longo destes 5 anos e que, de uma maneira ou de outra, marcaram o meu percurso.

À Associação Nacional de Estudantes de Medicina Dentária, estrutura que tenho o prazer de presidir desde o início do ano letivo, que me honrou com tantas experiências, competências e pessoas únicas. Embora tenha sido responsável por muito tempo “roubado” à elaboração deste trabalho, este projeto que trabalha para e pelos estudantes do MIMD a nível nacional, tem sido para mim uma fonte de orgulho sem fim e uma das minhas maiores realizações pessoais e profissionais.

Aos meus colegas e amigos de ciências farmacêuticas e aos meus colegas do curso que agora termino. Levo comigo e com eterna saudade todos os momentos que partilhámos, os quais constituem das páginas mais bonitas do meu percurso académico.

À Bruna, ao Mendes, à Ana Laura, ao Luís Vicente, à Sara Santos, aos meus colegas de casa, aos meus amigos de infância e aos meus amigos dos tempos de escola, cuja preciosa

amizade, apoio, preocupação, compreensão e flexibilidade foram indispensáveis para a conclusão desta etapa da minha vida.

Aos meus avós, às minhas tias e os meus primos, que de forma indireta contribuíram para este trabalho acreditando sempre em mim e nas minhas capacidades.

Às minhas irmãs, Mariana e Beatriz que foram e são a pedra basilar do meu constructo enquanto pessoa, nunca conseguirei agradecer todo o suporte e sobretudo paciência. São duas das minhas maiores referências, a nível transversal.

Aos meus pais Pedro e Lúcia, a quem devo tudo o que sou e tenho hoje, pelo amor e apoio incondicionais, pelos valores transmitidos e por estarem na fila da frente a realizar o aplauso mais alto em todos os “espetáculos” da minha vida.

REFERÊNCIAS

1. Mohammadi Z, Dummer PMH. Properties and applications of calcium hydroxide in endodontics and dental traumatology. *Int Endod J*. 2011 Aug;44(8):697–730.
2. Camargo RV de, Silva-Sousa YTC, Rosa RPF da, Mazzi-Chaves JF, Lopes FC, Steier L, et al. Evaluation of the physicochemical properties of silicone- and epoxy resin-based root canal sealers. *Braz Oral Res*. 2017 Aug 21;31:e72.
3. Waltimo T, Trope M, Haapasalo M, Ørstavik D. Clinical efficacy of treatment procedures in endodontic infection control and one year follow-up of periapical healing. *J Endod*. 2005 Dec;31(12):863–6.
4. Marques Ferreira M, Martinho JP, Duarte I, Mendonça D, Craveiro AC, Botelho MF, et al. Evaluation of the Sealing Ability and Bond Strength of Two Endodontic Root Canal Sealers: An In Vitro Study. *Dent J (Basel)*. 2022 Oct 26;10(11):201.
5. Barbizam JVB, Trope M, Tanomaru-Filho M, Teixeira ECN, Teixeira FB. Bond strength of different endodontic sealers to dentin: push-out test. *J Appl Oral Sci*. 2011;19(6):644–7.
6. Pinto JC, Torres FFE, Pivoto-João MMB, Cirelli JA, Guerreiro-Tanomaru JM, Tanomaru-Filho M. Filling ability and flow of root canal sealers: A microcomputed tomographic study. *Braz Dent J*. 2020 Sep 1;31(5):499–504.
7. Madhuri GV, Varri S, Bolla N, Mandava P, Akkala LS, Shaik J. Comparison of bond strength of different endodontic sealers to root dentin: An in vitro push-out test. *J Conserv Dent*. 2016;19(5):461–4.
8. Reszka P, Nowicka A, Dura W, Marek E, Lipski M. SEM and EDS study of totalfill BC sealer and guttaflow bioseal root canal sealers. *Dent Med Probl*. 2019 Apr 1;56(2):167–72.
9. Lee JK, Kwak SW, Ha JH, Lee W, Kim HC. Physicochemical Properties of Epoxy Resin-Based and Bioceramic-Based Root Canal Sealers. *Bioinorg Chem Appl*. 2017;2017:2582849.
10. Pereira IR, Carvalho C, Paulo S, Martinho JP, Coelho AS, Paula AB, et al. Apical sealing ability of two calcium silicate-based sealers using a radioactive isotope method: An in vitro apexification model. *Materials*. 2021;14(21):1–12.

11. Hachmeister DR, Schindler WG, Walker WA, Thomas DD. The sealing ability and retention characteristics of mineral trioxide aggregate in a model of apexification. *J Endod.* 2002 May;28(5):386–90.
12. Waterhouse P, Whitworth J, Camp J, Fuks A. Pediatric endodontics: Endodontic treatment for the primary and young permanent dentition. In: Hargreaves KM, Berman LH, editors. *Cohen's Pathways Of The Pulp*. 11th Edition. Saint Louis: Elsevier; 2015.
13. Lertmalapong P, Jantararat J, Srisatjaluk RL, Komoltri C. Bacterial leakage and marginal adaptation of various bioceramics as apical plug in open apex model. *J Investig Clin Dent.* 2019 Feb 1;10(1):e12371.
14. Almutairi W, Yassen GH, Aminoshariae A, Williams KA, Mickel A. Regenerative Endodontics: A Systematic Analysis of the Failed Cases. *J Endod.* 2019 May 1;45(5):567–77.
15. Songtrakul K, Azarpajouh T, Malek M, Sigurdsson A, Kahler B, Lin LM. Modified Apexification Procedure for Immature Permanent Teeth with a Necrotic Pulp/Apical Periodontitis: A Case Series. *J Endod.* 2020 Jan 1;46(1):116–23.
16. Santos JM, Diogo P, Dias S, Marques JA, Palma PJ, Ramos JC. Long-Term Outcome of Nonvital Immature Permanent Teeth Treated With Apexification and Corono-Radicular Adhesive Restoration: A Case Series. *J Endod.* 2022 Sep 1;48(9):1191–9.
17. Agrafioti A, Giannakoulas DG, Filippatos CG, Kontakiotis EG. Analysis of clinical studies related to apexification techniques. *Eur J Paediatr Dent.* 2017;18(4):273–84.
18. Simon S, Rilliard F, Berdal A, Machtou P. The use of mineral trioxide aggregate in one-visit apexification treatment: a prospective study. *Int Endod J.* 2007 Mar;40(3):186–97.
19. Kandemir Demirci G, Kaval ME, Güneri P, Çalışkan MK. Treatment of immature teeth with nonvital pulps in adults: a prospective comparative clinical study comparing MTA with Ca(OH)₂. *Int Endod J.* 2020 Jan;53(1):5–18.
20. Roberts HW, Toth JM, Berzins DW, Charlton DG. Mineral trioxide aggregate material use in endodontic treatment: a review of the literature. *Dent Mater.* 2008 Feb;24(2):149–64.
21. Mathew J, Theruvil R, Baby A, George S, Paul M, Jacob J, et al. Evaluation and Comparison of the Marginal Adaptation of an Epoxy, Calcium Hydroxide-based, and Bioceramic-based Root Canal Sealer to Root Dentin by SEM Analysis: An In Vitro Study. *Conservative Dentistry and Endodontic Journal.* 2019 Jun 1;4(1):6–13.

22. Najafzadeh R, Fazlyab M, Esnaashari E. Comparison of bioceramic and epoxy resin sealers in terms of marginal adaptation and tubular penetration depth with different obturation techniques in premolar teeth: A scanning electron microscope and confocal laser scanning microscopy study. *J Family Med Prim Care*. 2022;11(5):1794.
23. Al-Haddad A, Aziz ZACA. Bioceramic-Based Root Canal Sealers: A Review. Vol. 2016, *International Journal of Biomaterials*. Hindawi Limited; 2016.
24. Mousavi SA, Khademi A, Soltani P, Shahnaseri S, Poorghorban M. Comparison of sealing ability of ProRoot mineral trioxide aggregate, biodentine, and ortho mineral trioxide aggregate for canal obturation by the fluid infiltration technique. *Dent Res J (Isfahan)*. 2018;15(5):307–12.
25. Agrafioti A, Koursoumis AD, Kontakiotis EG. Re-establishing apical patency after obturation with Gutta-percha and two novel calcium silicate-based sealers. *Eur J Dent*. 2015;9(4):457–61.
26. Pace R, Giuliani V, Nieri M, Di Nasso L, Pagavino G. Mineral trioxide aggregate as apical plug in teeth with necrotic pulp and immature apices: A 10-year case series. *J Endod*. 2014;40(8):1250–4.
27. Vidal K, Martin G, Lozano O, Salas M, Trigueros J, Aguilar G. Apical Closure in Apexification: A Review and Case Report of Apexification Treatment of an Immature Permanent Tooth with Biodentine. *J Endod*. 2016 May 1;42(5):730–4.
28. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part I: chemical, physical, and antibacterial properties. *J Endod*. 2010 Jan;36(1):16–27.
29. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral Trioxide Aggregate: A Comprehensive Literature Review-Part III: Clinical Applications, Drawbacks, and Mechanism of Action. Vol. 36, *Journal of Endodontics*. 2010. p. 400–13.
30. Chng HK, Islam I, Yap AUJ, Tong YW, Koh ET. Properties of a new root-end filling material. *J Endod*. 2005 Sep;31(9):665–8.
31. Colombo M, Poggio C, Dagna A, Meravini MV, Riva P, Trovati F, et al. Biological and physico-chemical properties of new root canal sealers. *J Clin Exp Dent*. 2018 Feb 1;10(2):e120–6.
32. Lima NFF, Dos Santos PRN, Pedrosa MDS, Delboni MG. Cimentos biocerâmicos em endodontia: revisão de literatura. *Revista da Faculdade de Odontologia - UPF*. 2017 Dec 19;22(2).

33. Patri G, Agrawal P, Anushree N, Arora S, Kunjappu JJ, Shamsuddin S V. A scanning electron microscope analysis of sealing potential and marginal adaptation of different root canal sealers to dentin: An In Vitro study. *Journal of Contemporary Dental Practice*. 2020 Jan 1;21(1):73–7.
34. Abdal AK, Retief DH. The apical seal via the retrosurgical approach: I. A preliminary study. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*. 1982 Jun 1;53(6):614–21.
35. Yoshimura M, Marshall FJ, Tinkle JS. In vitro quantification of the apical sealing ability of retrograde amalgam fillings. *J Endod*. 1990 Jan 1;16(1):9–12.
36. Shani J, Friedman S, Stabholz A, Abed J. A radionuclidic model for evaluating sealability of retrograde filling materials. *Int J Nucl Med Biol*. 1984 Jan 1;11(1):46–52.
37. Bidar M, Moradi S, Jafarzadeh H, Bidad S. Comparative SEM study of the marginal adaptation of white and grey MTA and Portland cement. *Australian Endodontic Journal*. 2007;33(1):2–6.
38. Torabinejad M, Smith PW, Kettering JD, Pitt Ford TR. Comparative investigation of marginal adaptation of mineral trioxide aggregate and other commonly used root-end filling materials. *J Endod*. 1995 Jun 1;21(6):295–9.
39. Baranwal AK, Paul ML, Mazumdar D, Adhikari H Das, Vyavahare NK, Jhajharia K. An ex-vivo comparative study of root-end marginal adaptation using grey mineral trioxide aggregate, white mineral trioxide aggregate, and Portland cement under scanning electron microscopy. *J Conserv Dent*. 2015;18(5):399–404.
40. Stabholz A, Friedman S, Abed J. Marginal adaptation of retrograde fillings and its correlation with sealability. *J Endod*. 1985 May;11(5):218–23.
41. Bidar M, Disfani R, Asgary S, Forghani M, Gharagozlo S, Rouhani A. Effect of calcium hydroxide premedication on the marginal adaptation of calcium-enriched mixture cement apical plug. *Dent Res J (Isfahan)*. 2012 Nov;9(6):706–9.
42. Reyes-Carmona JF, Felipe MS, Felipe WT. Biomineralization ability and interaction of mineral trioxide aggregate and white portland cement with dentin in a phosphate-containing fluid. *J Endod*. 2009 May;35(5):731–6.
43. Tran D, He J, Glickman GN, Woodmansey KF. Comparative analysis of calcium silicate-based root filling materials using an open apex model. *J Endod*. 2016 Apr 1;42(4):654–8.

44. Matt GD, Thorpe JR, Strother JM, McClanahan SB. Comparative study of white and gray mineral trioxide aggregate (MTA) simulating a one- or two-step apical barrier technique. *J Endod.* 2004 Dec;30(12):876–9.
45. Nair U, Ghattas S, Saber M, Natera M, Walker C, Pileggi R. A comparative evaluation of the sealing ability of 2 root-end filling materials: an in vitro leakage study using *Enterococcus faecalis*. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2011 Aug;112(2):e74-7.
46. Antunes HS, Gominho LF, Andrade-Junior C V, Dessaune-Neto N, Alves FRF, Rôças IN, et al. Sealing ability of two root-end filling materials in a bacterial nutrient leakage model. *Int Endod J.* 2016 Oct;49(10):960–5.
47. Jeevani E, Jayaprakash T, Bolla N, Vemuri S, Sunil CR, Kalluru RS. “Evaluation of sealing ability of MM-MTA, Endosequence, and biodentine as furcation repair materials: UV spectrophotometric analysis”. *J Conserv Dent.* 2014 Jul;17(4):340–3.
48. Lagiseti AK, Hegde P, Hegde MN. Evaluation of bioceramics and zirconia-reinforced glass ionomer cement in repair of furcation perforations: An in vitro study. *J Conserv Dent.* 2018;21(2):184–9.
49. Hirschberg CS, Patel NS, Patel LM, Kadouri DE, Hartwell GR. Comparison of sealing ability of MTA and EndoSequence Bioceramic Root Repair Material: a bacterial leakage study. *Quintessence Int.* 2013 May;44(5):e157-62.
50. Rencher B, Chang AM, Fong H, Johnson JD, Paranjpe A. Comparison of the sealing ability of various bioceramic materials for endodontic surgery. *Restor Dent Endod.* 2021 Aug;46(3):e35.
51. Torabinejad M, Hong CU, McDonald F, Pitt Ford TR. Physical and chemical properties of a new root-end filling material. *J Endod.* 1995 Jul 1;21(7):349–53.
52. Guo YJ, Du TF, Li HB, Shen Y, Mobuchon C, Hieawy A, et al. Physical properties and hydration behavior of a fast-setting bioceramic endodontic material. *BMC Oral Health.* 2016 Feb 20;16(1).
53. Zamparini F, Siboni F, Prati C, Taddei P, Gandolfi MG. Properties of calcium silicate-monobasic calcium phosphate materials for endodontics containing tantalum pentoxide and zirconium oxide. *Clin Oral Investig.* 2019 Jan 29;23(1):445–57.
54. Urban K, Neuhaus J, Donnermeyer D, Schäfer E, Dammaschke T. Solubility and pH Value of 3 Different Root Canal Sealers: A Long-term Investigation. *J Endod.* 2018 Nov 1;44(11):1736–40.

55. Tanomaru-Filho M, Torres FFE, Chávez-Andrade GM, de Almeida M, Navarro LG, Steier L, et al. Physicochemical Properties and Volumetric Change of Silicone/Bioactive Glass and Calcium Silicate-based Endodontic Sealers. *J Endod.* 2017 Dec 1;43(12):2097–101.
56. Poggio C, Dagna A, Ceci M, Meravini MV, Colombo M, Pietrocola G. Solubility and pH of bioceramic root canal sealers: A comparative study. *J Clin Exp Dent.* 2017 Oct;9(10):e1189–94.
57. Torres FFE, Zordan-Bronzel CL, Guerreiro-Tanomaru JM, Chávez-Andrade GM, Pinto JC, Tanomaru-Filho M. Effect of immersion in distilled water or phosphate-buffered saline on the solubility, volumetric change and presence of voids within new calcium silicate-based root canal sealers. *Int Endod J.* 2020 Mar;53(3):385–91.
58. Colombo M, Poggio C, Dagna A, Meravini MV, Riva P, Trovati F, et al. Biological and physico-chemical properties of new root canal sealers. *J Clin Exp Dent.* 2018 Feb;10(2):e120–6.
59. Gandolfi MG, Siboni F, Primus CM, Prati C. Ion release, porosity, solubility, and bioactivity of MTA Plus tricalcium silicate. *J Endod.* 2014 Oct;40(10):1632–7.
60. Poggio C, Lombardini M, Alessandro C, Simonetta R. Solubility of Root-end-Filling Materials: A Comparative Study. *J Endod.* 2007 Sep 1;33(9):1094–7.
61. Shahriari S, Faramarzi F, Alikhani MY, Farhadian M, Hendi SS. Apical Sealing Ability of Mineral Trioxide Aggregate, Intermediate Restorative Material and Calcium Enriched Mixture Cement: A Bacterial Leakage Study. *Iran Endod J.* 2016;11(4):336–40.
62. Kaul S, Kumar A, Badiyani BK, Sukhtankar L, Madhumitha M, Kumar A. Comparison of Sealing Ability of Bioceramic Sealer, AH Plus, and GuttaFlow in Conservatively Prepared Curved Root Canals Obturated with Single-Cone Technique: An In vitro Study. *J Pharm Bioallied Sci.* 2021 Jun;13(Suppl 1):S857–60.
63. Asawaworarit W, Pinyosopon T, Kijsamanmith K. Comparison of apical sealing ability of bioceramic sealer and epoxy resin-based sealer using the fluid filtration technique and scanning electron microscopy. *J Dent Sci.* 2020 Jun 1;15(2):186–92.
64. Ayatollahi F, Tabrizzadeh M, Zare Bidoki F, Ayatollahi R, Hazeri Baqdad Abad M. Comparison of marginal adaptation of MTA and CEM cement apical plugs in three different media. *Iran Endod J.* 2016 Sep 1;11(4):332–5.

65. Ravichandra, PV, Vemisetty H, K D, Reddy S J, D R, Krishna M JN, et al. Comparative Evaluation of Marginal Adaptation of Biodentine(TM) and Other Commonly Used Root End Filling Materials-An Invitro Study. *J Clin Diagn Res.* 2014 Mar;8(3):243–5.
66. Veríssimo DM, do Vale MS. Methodologies for assessment of apical and coronal leakage of endodontic filling materials: a critical review. *J Oral Sci.* 2006 Sep;48(3):93–8.
67. Küçükkaya Eren S, Görduysus MÖ, Şahin C. Sealing ability and adaptation of root-end filling materials in cavities prepared with different techniques. *Microsc Res Tech.* 2017 Jul;80(7):756–62.
68. Badr AE. Marginal adaptation and cytotoxicity of bone cement compared with amalgam and mineral trioxide aggregate as root-end filling materials. *J Endod.* 2010;36(6):1056–60.
69. Fitzpatrick EL, Steiman HR. Scanning electron microscopic evaluation of finishing techniques on IRM and EBA retrofillings. *J Endod.* 1997 Jul 1;23(7):423–7.
70. Moodnik RM, Levey MH, Besen MA, Borden BG. Retrograde amalgam filling: a scanning electron microscopic study. *J Endod.* 1975 Jan;1(1):28–31.
71. Shokouhinejad N, Nekoofar MH, Ashoftehyazdi K, Zahraee S, Khoshkhounnejad M. Marginal adaptation of new bioceramic materials and mineral trioxide aggregate: a scanning electron microscopy study. *Iran Endod J.* 2014;9(2):144–8.