

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA CAPACIDADE DE
SELAMENTO APICAL DE DIFERENTES TÉCNICAS DE
OBTURAÇÕES EM DENTES COM APEX ABERTO: ESTUDO IN
VITRO.**

Trabalho submetido por

Alex Henrique Mariotto

para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

Setembro de 2025

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA CAPACIDADE DE
SELAMENTO APICAL DE DIFERENTES TÉCNICAS DE
OBTURAÇÕES EM DENTES COM APEX ABERTO: ESTUDO IN
VITRO.**

Trabalho submetido por

Alex Henrique Mariotto

para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

Trabalho orientado por

Prof. Doutor Diego António Velázquez González

Setembro de 2025

DEDICATÓRIA

Primeiramente agradeço a Deus por sempre me orientar nos caminhos correto.

À minha esposa e a meus filhos, pela dedicação, paciência e amor inabaláveis, e por terem sido o meu alicerce nos momentos mais exigentes e difíceis deste percurso.

À minha mãe e ao meu pai, agradeço a força, o amor incondicional e o apoio constante, que me acompanharam em cada etapa deste caminho.

AGRADECIMENTOS

Expresso o meu mais profundo agradecimento ao Prof. Doutor Diego Velázquez González, meu orientador, pela orientação científica rigorosa, pela disponibilidade constante o que foi de grande importancia para a concretização desta investigação.

Ao Prof. Doutor João Neves, pela colaboração na aquisição dos cimentos biocerâmicos NeoMTA® 2, indispensáveis à execução das etapas laboratoriais deste estudo. Este contributo limitou-se ao apoio material; o Prof. Doutor João Neves não teve qualquer intervenção na conceção metodológica, na recolha ou análise dos dados, na interpretação dos resultados, nem na redação do manuscrito

Agradeço igualmente ao Prof. Doutor Luís Proença e o Prof. Paulo Sobral Mascarenhas, pelo apoio técnico prestado na análise estatística, bem como pela paciência, clareza e prontidão com que sempre respondeu às minhas dúvidas.

Ao Laboratório de Prótese Dentária do Instituto Universitário Egas Moniz, deixo o meu sincero reconhecimento pelo apoio essencial na fase prática deste estudo.

Ao Instituto Universitário Egas Moniz, agradeço pela disponibilização de todas as condições materiais e logísticas que viabilizaram a realização deste projeto em ambiente académico de excelência.

À IPG Dental, pelo fornecimento do cimento biocerâmico NeoMTA® 2, imprescindível para a execução das etapas laboratoriais deste estudo. Este apoio se restringiu exclusivamente ao fornecimento de material, não tendo a IPG Dental qualquer intervenção na conceção metodológica, na recolha ou análise dos dados, nem na interpretação dos resultados ou redação do manuscrito.

Aos meus colegas de equivalência, os quais com quem partilhei desafios, conquistas e momentos de superação, expresso o meu sincero agradecimento pela amizade e pelo apoio recíproco. O percurso foi exigente, mas alcançámos juntos a meta.

RESUMO

Objetivos e hipóteses: O objetivo do estudo *in vitro* foi comparar a infiltração com corante utilizando duas técnicas de obturação em dentes com diâmetro apical artificial reproduzidos em 1,20 mm e hipotetizou-se se existe diferença ou não de infiltração apical entre as técnicas.

Materiais e Métodos: A amostra integrou 30 dentes humanos, com diâmetro apical padronizado de 1,20 mm. Distribuíram-se dois grupos experimentais (n=10): GI cone único e cimento biocerâmico; GII *plug* apical seguido de cone único, ambos com NeoMTA® 2, Incluíram-se controlos positivo (n=5) e negativo (n=5). A infiltração foi avaliada por penetração de azul de metileno a 1%, com medição linear feita após secções de 1 mm dos espécimes. Cada fragmento foi colado em lâminas microscópicas para análise e posteriormente o registo do primeiro milímetro com evidência de penetração.

Resultados: Obtiveram-se valores de infiltração em todos os espécimes experimentais. A análise estatística comparativa hierarquizou a eficácia de selamento entre GI com média de infiltração em 2,88 mm e GII com média de 3,66 mm e identificou que não existe diferença estatística porem pode se observar uma menor infiltração para o GI.

Conclusão: Dentro das limitações inerentes a este estudo *in vitro*, conclui-se que nenhuma das técnicas testadas conseguiu impedir completamente a infiltração apical, embora ambas tenham exibido níveis variáveis de penetração do corante.

Palavras-chave: Tratamento apex aberto, Plug MTA, Infiltração de corantes, Selamento apex aberto.

ABSTRACT

Objectives and Hypotheses: This in vitro study aimed to compare dye leakage using two obturation techniques in teeth with an artificially reproduced apical diameter of 1.20 mm, testing whether apical leakage differs between the techniques.

Materials and Methods: The sample comprised 30 human teeth with a standardized apical diameter of 1.20 mm. Two experimental groups were established (n = 10 each): GI, single-cone technique with a bioceramic sealer; and GII, apical plug followed by single-cone, both using NeoMTA® 2. Positive (n = 5) and negative (n = 5) controls were included. Leakage was assessed by 1% methylene blue penetration, with linear measurement performed after sectioning the specimens into 1-mm slices. Each fragment was mounted on microscope slides for analysis, and the first millimetre showing evidence of dye penetration was recorded.

Results: Leakage was observed in all experimental specimens. Comparative statistical analysis ranked sealing effectiveness between groups, with mean leakage of 2.88 mm for GI and 3.66 mm for GII and found no statistically significant difference; however, lower leakage was observed for GI.

Conclusion: Within the limitations of this in vitro study, none of the techniques completely prevented apical leakage, although both exhibited varying levels of dye penetration.

Keywords: Open apex treatment, MTA apical plug, Dye penetration, Apex open sealing.

ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	1
ABSTRACT	3
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABELAS	13
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	15
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS	17
1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Tratamento Endodôntico Padrão Em Dentes Maduros	20
1.2 Considerações Anatômicas Dos Dentes Imaturos	20
1.3 Dificuldades clínicas e terapêuticas.....	21
1.4 Abordagens atuais para dentes imaturos	21
1.5 Cimentos biocerâmicos	22
1.5.1 Definição, composição e propriedades fundamentais	23
1.5.2 Benefícios clínicos face a materiais convencionais.....	23
1.5.3 Evidência científica sobre desempenho.....	24
1.5.4 Diferenças de composição entre gerações.....	24
1.6 Desafios clínicos e importancia do selamento apical.	25
1.6.1 Mecanismos de infiltração de bactérias e fluidos.....	26
1.6.2 Consequências clínicas da infiltração.....	26
1.6.3 Sucesso e importancia selamento adequado.....	26
1.7 Técnicas de obturação endodôntica.....	27
1.7.1 Descrição das principais técnicas	27
1.7.2 Comparação crítica entre técnicas	28
1.7.3 Metodologias de avaliação do selamento apical.....	29
1.8 Justificação	29

2.	OBJETIVOS E HIPÓTESES	19
2.1	Objetivo geral	19
2.2	Objetivos específicos	19
2.3	Hipóteses	19
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1	Materiais	21
3.2	Aparatologia	23
3.3	Metodologia.....	24
3.3.1	Desenho do Estudo.	24
3.3.2	Descrição da amostra.....	24
3.3.3	CrITÉRIOS de incluso.	24
3.3.4	Grupos Experimentais	26
3.3.5	Protocolo de padronizao.....	27
3.3.6	Instrumentao.....	28
3.3.7	Ajuste do dimetro apical.	29
3.3.8	Protocolo de Obturao.	31
3.3.8.1	Selamento apical com Plug.....	32
3.3.8.2	Selamento remanescente radicular.	35
3.3.8.3	Selamento radicular dos demais grupos.	37
3.3.9	Método de Infiltrao de Corantes.	39
3.3.10	Seco dos espécimes.....	41
3.3.11	Observao e medio da infiltrao:.....	43
4.	RESULTADOS	47
5.	DISCUSSO	55
5.1	Achados principais e sua interpretao imediata.....	57
5.2	Plausibilidade biolgica e mecanismos	58
5.2.1	NeoMTA® 2 enquanto selador: mecanismos plausíveis	59

5.2.2	NeoMTA® 2 como plug apical especificidades.....	59
5.2.3	Condições do ápice aberto padronizado (1,20 mm)	60
5.2.4	Artefactos técnicos vs. propriedades do material	60
5.3	Comparação crítica com a literatura.....	61
5.3.1	Biocerâmicos/MTA enquanto seladores.....	61
5.3.2	Plugs apicais com 4 a 5 mm	61
5.3.3	Técnica de cone único em canais com ápice aberto	62
5.3.4	Modelos de infiltração: corante vs. bactérias	62
5.3.5	Conflitos e variabilidade de evidência	63
5.3.6	Síntese interpretativa por eixo temático	63
5.4	Implicações clínicas.....	64
5.5	Robustez metodológica e potenciais vieses.....	65
5.6	Limitações	68
5.7	Direções para investigação futura.....	70
6.	CONCLUSÃO.....	73
7.	BIBLIOGRAFIA	75
8.	ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Análise e seleção de espécimes: a) Vista vestibular inicial; b) Radiografia vestibular, inicial; c) Radiografia por mesial, inicial.....	38
Figura 2 - Frascos plásticos organizadores com espécime 26 acondicionado.....	38
Figura 3 - Marcação dos pontos de corte do espécime: a) Régua endodôntica utilizada; b) Espécime nº 21 com marcação.....	40
Figura 4 - Corte do espécime: a) Corte do espécime 21 com disco diamantado; b) Espécime com corte realizado.....	40
Figura 5 - Espécime nº 28 com vista da entrada do conduto inicial.....	41
Figura 6 - Limas K#10 (ISO10) utilizada para determinar comprimento de trabalho no espécime nº28.....	42
Figura 7 – Materiais utilizado no preparo inicial do conduto: a) sequência de limas manuais 1ª Série K DentSply (ISO) pelo qual o espécime foi preparado; b) Seringa hipodérmica com a ponta de irrigação utilizado no process.....	42
Figura 8 - Régua endodôntica utilizada para calibrar a broca troncocônica no diâmetro de 1,2mm.....	43
Figura 9 - Esquema do preparo dos espécimes, inicialmente com sequencia da broca passo I á III e sequencialmente preparo com broca tronco cônica: c) Comprimento de penetração do espécime em 1mm; d) Diâmetro de 1,2mm obtido com preparo da broca troncocônica.....	44
Figura 10 - Controle radiográfico após preparo do espécimenº21.....	44
Figura 11 - Espécime nº14 envolvido com fita politetrafluoroetileno.....	45
Figura 12 - Espécimes do GII fixada na esponja fenólica para garantir estabilidade e não extravasamento do plug.....	46
Figura 13 - Cimento biocerâmico NeoMTA® 2 em placa de vidro para sua manipulação do plug.....	47

Figura 14 - Material utilizado para inserção do plug: a) Aplicador porta-MTA, MAP One System 1,10mm; b) Condensador Schilder Duplo n.º 1, EndoPrime; c) Magnificação com Microscópio, EXTARO 300 Carl Zeiss.....	50
Figura 15 - Manipulação do cimento biocerâmico NeoMTA® 2 para plug: a) Cimento biocerâmico NeoMTA® 2 manipulado para consistência de plug na fase de trabalho inicial; b) Espécime nº5 G.II com plug de cimento biocerâmico NeoMTA® 2.....	50
Figura 16 - Controle radiográfico após aplicação do plug NeoMTA® 2, espécime nº5 G. II.....	51
Figura 17 - Estufa incubadora (Memmert INE400)	51
Figura 18 - Materiais usados para obturação: a) Guta-percha, Great ProTaper F3; b) Lâmina de bisturi nº15 usada para cortar os cones no seu diâmetro de travamento...52	
Figura 19 - Cimento biocerâmico NeoMTA® 2 em placa de vidro: a) Cimento proporcionado para manipulação do selador na obturação do restante dos contudo do GI, GII e G controle negativo; b) Aspeto físico do cimento pós manipulação.....	53
Figura 20 - Espécime nº20 do GII.....	54
Figura 21 - Amostra pós obturação com corte do remanescente e preparo da região coronária para selamento: a) Espécime com corte da gutta; b) Espécime com gutta-percha com remoção de aproximadamente 1mm da matéria e condensação vertical; c) Espécime com selamento coronário; d) Resina fluida Tetric EvoFlow® A2 (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein)	54
Figura 22 - Controle radiográfico com vista por vestibular do espécime nº 26 GII.....	55
Figura 23 - Espécimes do GI, GII e G controle negativo na estufa incubadora para obter presa final do cimento.....	55
Figura 24 - Espécimes do G. controle positivo com aplicação das 3 camadas de verniz	56
Figura 25 - Frasco Eppendorf® com identificação do espécime nº7 em posição de submersão: a) Frasco com espécime nº7 voltado para o topo sem azul de metileno a 1%; b) Frasco com espécime nº7 e azul de metileno 1% completamente submerso.....	57
Figura 26 - Espécimes de todos os grupos submersos em azul de metileno 1% dentro da estufa incubadora.....	58

Figura 27 - Aspeto dos espécimes após remoção do verniz: a) Espécime nº 12 G. I após lavagem, porém ainda com película de verniz; b) Espécime nº14 G. II após remoção da película de verniz.....	58
Figura 28 - Espécime fixados num suporte de corte para micrótomo: a) Espécime aglutinada por godiva e fixada na base de corte; b)Vista coronal da posição de corte do micrótomo.....	60
Figura 29 - Layout da configuração do micrótomo.....	60
Figura 30 – Resultado das secções transversais, espécime nº1 G. I e nº5 G. II com 10 fatias de amostra.....	60
Figura 31 - Visualização de corte dos espécimes; a) Secção do espécime do grupo controle positivo com pigmentação; b) Secção do espécime do grupo controle negativo, sem pigmentação.....	60
Figura 32 - Espécimes Grupo I: a) - Espécime nº 4; b) - Espécime nº22; c) - Espécime nº 30; d) - Espécime nº 12; e) - Espécime nº 13; f) - Espécime nº 2; g) - Espécime nº 28; h) - Espécime nº 7; i) - Espécime nº 24; j) - Espécime nº 1	
Figura 33 - Espécimes do Grupo II: a) - Espécime nº 19; b) - Espécime nº 5; c) - Espécime nº 17; d) - Espécime nº 23; e) - Espécime nº 29; f) - Espécime nº 14; g) - Espécime nº 20; h) - Espécime nº 6; i) - Espécime nº 10; j) - Espécime nº 26	

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Grupos experimentais inicial conforme o material obturador.....	30
Tabela 2 - Distribuição dos espécimes nos grupos propostos.....	39
Tabela 3 - Resultado com valores e média de infiltração apical dos espécimes divididos por grupo.....	40

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Representação em <i>boxplot</i> da profundidade de infiltração do corante (mm) por grupo, mostrando mediana, intervalo interquartil e valores extremos	48
Gráfico 2- Dispersão individual dos dados por grupo, com média assinalada (quadrado) e desvio-padrão representado por barras verticais	61
Gráfico 3 - Histograma da infiltração do corante (mm) no Grupo I (cone único), evidenciando distribuição mais ampla, condizente com o maior desvio-padrão e coeficiente de variação	62
Gráfico 4 - Histograma da infiltração do corante (mm) no Grupo II (plug apical de NeoMTA® 2 + cone único), revelando distribuição mais concentrada, de acordo com os menores valores de DP e CV	63
Gráfico 5 - Exibe o gráfico Q–Q do Grupo I comparado com a distribuição normal padrão; observa-se uma aproximação geral à reta teórica, com pequenos desvios nas extremidades	63
Gráfico 6 - Apresenta o Q–Q do Grupo II; o padrão em “S” indica claramente desvio em relação à normalidade	63
Gráfico 7 - Mostra a ECDF (função empírica de distribuição acumulativa) do Grupo I sobreposta à curva normal teórica, revelando uma trajetória muito próxima à esperada	63
Gráfico 8 - Regista a ECDF do Grupo II sobre a mesma curva teórica; o afastamento pronunciado confirma a não normalidade dos dados ($p < 0,05$)	63

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

- 2D/3D** - Bidimensional/Tridimensional (Modalidades De Imagem)
- CBCT** - Tomografia Computorizada De Feixe Cónico
- CLES** - Tamanho De Efeito Em Linguagem Comum (*Common Language Effect Size*)
- CV** - Coeficiente De Variação
- DP** - Desvio-Padrão
- EAL** - Electronic Apex Locator - (localizador apical eletrônico)
- ECDF** - Função de Distribuição Empírica (*Empirical Cumulative Distribution Function*)
- EDTA** - Ácido Etilenodiaminotetracético (17 %)
- EUA** - Estados Unidos Da América
- FG** - *Friction Grip* (Encaixe/Haste De Brocas Para Turbina)
- GI / GII** - Grupo I / Grupo II
- IC / IC95 %** - Intervalo De Confiança / Intervalo De Confiança A 95 %
- IQR** - Intervalo Interquartil
- ISO** - *International Organization For Standardization* (Normas Técnicas)
- MAP System** - Aplicador Porta-MTA (Sistema De Colocação Apical De Cimento)
- micro-CT** - Microtomografia Computorizada
- MTA** - Agregado De Trióxido Mineral
- NaOCl** - Hipoclorito De Sódio
- Ni-Ti** - Liga De Níquel-Titânio
- PBS** - Solução Tampão Fosfato Salina (*Phosphate-Buffered Saline*)
- pH** - Potencial De Hidrogénio
- PP** - Polipropileno
- PTFE** - Politetrafluoroetileno
- Q-Q (gráfico)** - Gráfico Quantil-Quantil
- RVG** - Radiovisiografia (Radiografia Digital)
- SPSS** - *Statistical Package For The Social Sciences* (Software De Análise Estatística)
- z-score** - Valor-Z (Escore Z)
- %** - Percentagem

°C - Graus Celsius
 α - Nível De Significância
Ca²⁺ - Ião Cálcio
D - Estatística Do Teste De Kolmogorov–Smirnov
g - Tamanho De Efeito De Hedges (G)
gl - Graus De Liberdade
H0 / H1 - Hipótese Nula / Hipótese Alternativa
n - Dimensão Amostral
p - P-Valor (Probabilidade)
p/v - Razão Peso/Volume
Q1 / Q3 - Primeiro / Terceiro Quartil
r - Tamanho De Efeito R
t - Estatística Do Teste T
U (Mann–Whitney) - Estatística U Do Teste De Mann–Whitney
 δ - Delta De Cliff (Tamanho De Efeito)
 Δ - Diferença (Delta)
Cm - Centímetro; **Mm** - Milímetro; **μm** - Micrómetro
L - Litro; **ml** - Mililitro; **μl** - Microlitro
g - grama; **mg** - miligrama; **μg** - micrograma
h - hora; **min** - minuto; **s** - segundo
kHz - Quilohertz
mm/s - Milímetros Por Segundo
rpm - Rotações Por Minuto
W – Watt^o - G

1. INTRODUÇÃO

O sucesso da terapêutica endodôntica moderna assenta em três pilares fundamentais: a eliminação total dos microrganismos do sistema de canais radiculares, a desinfecção eficiente através de métodos químicos e mecânicos, e a obturação tridimensional hermética do espaço endodôntico. A integração eficaz destas etapas permite estabelecer uma barreira contra nova contaminação bacteriana, favorecendo a regeneração dos tecidos periapicais (De-Deus et al., 2008; Chu et al., 2005).

Nos dentes com desenvolvimento radicular completo, a existência de uma constrição apical fisiológica e de paredes dentinárias espessas possibilita um controlo preciso do comprimento de trabalho, a contenção segura das soluções irrigantes no interior do canal e uma compactação previsível dos materiais de obturação. Estes fatores estão na base das elevadas taxas de sucesso clínico, que superam os 85 % (Lin et al., 2016; Chu et al., 2005).

Contudo, em situações de necrose pulpar em dentes com rizogénese incompleta, frequentemente associadas a traumatismos em indivíduos jovens, surgem alterações morfológicas marcadas. O forame apical adquire uma morfologia afunilada, com um diâmetro alargado e ausência de constrição anatómica, ao passo que as paredes radiculares, pouco mineralizadas, exibem baixa resistência à flexão (Li et al., 2023). Estas particularidades dificultam a criação de uma barreira apical eficaz, aumentam a probabilidade de extrusão das soluções irrigantes e comprometem a compactação convencional da gutta-percha (AlKahtani et al., 2005). Acresce que a fragilidade estrutural conferida pela reduzida espessura dentinária potencia a ocorrência de fraturas cervicais, comprometendo o prognóstico restaurador (Andreasen et al., 2002).

Assim, enquanto os protocolos tradicionais se revelam eficazes em dentes com ápice maduro, os dentes imaturos com forame aberto exigem abordagens alternativas que garantam simultaneamente a eficácia seladora e a preservação estrutural da raiz. A identificação de técnicas e materiais que superem estes desafios permanece uma prioridade na investigação endodôntica (AlKahtani et al., 2005).

1.1 Tratamento Endodôntico Padrão Em Dentes Maduros

Em dentes com formação radicular completa, o procedimento clínico inicia-se com a confecção de uma cavidade de acesso que respeite a morfologia coronária e facilite a localização dos canais. A instrumentação, habitualmente realizada com limas rotatórias em níquel-titânio, é acompanhada por irrigação abundante com hipoclorito de sódio (entre 2,5 % e 5,25 %) e ácido etilendiaminotetracético (EDTA) a 17 %, visando a remoção da *smear layer*, sendo concluída com lavagem com solução salina estéril (De-Deus et al., 2012).

A presença da constrição apical anatômica oferece um ponto de resistência natural que permite uma compactação controlada da gutta-percha, reduzindo o risco de extrusão das soluções irrigantes. Quando os princípios técnicos são criteriosamente seguidos, os estudos longitudinais demonstram taxas de sucesso radiográfico superiores a 85 %, mesmo após cinco anos de seguimento (Chu et al., 2005). Além disso, a espessura remanescente da dentina, geralmente acima de 1 mm, garante resistência estrutural suficiente para suportar as forças mastigatórias, tornando a fratura vertical um evento raro nestes casos, ao contrário do que se observa em dentes imaturos sujeitos a forças equivalentes (Andreasen et al., 2002).

1.2 Considerações Anatômicas Dos Dentes Imaturos

Durante a fase de rizogênese, o diâmetro do forame apical pode ultrapassar 1,1 mm, quase três vezes superior ao habitual em dentes com desenvolvimento completo. Paralelamente, as paredes dentinárias mantêm-se delgadas, com espessura média inferior a 0,7 mm na zona cervical (AlKahtani et al., 2005; Li et al., 2023). Esta anatomia traduz-se numa elevada permeabilidade tubular, o que facilita a difusão de toxinas bacterianas e dificulta a obtenção de um ambiente asséptico no canal (Wu et al., 1993).

Adicionalmente, a configuração inversamente cônica do canal desloca o ponto de maior concentração de tensões para a junção amelo-cementária, região particularmente suscetível à fratura sob cargas laterais (Li et al., 2023). Do ponto de vista biológico, a intensa vascularização e a presença de tecido conjuntivo imaturo na região apical contribuem para hemorragias intraoperatórias significativas e aumentam o risco de extrusão do material obturador (Li et al., 2023).

1.3 Dificuldades clínicas e terapêuticas

A determinação precisa do comprimento de trabalho em dentes com rizogênese incompleta constitui um desafio técnico considerável. Os localizadores apicais eletrônicos baseiam-se na detecção de uma alteração abrupta na impedância elétrica, fenómeno ausente em forames amplos e abertos. Nestas circunstâncias, torna-se imprescindível complementar a medição eletrónica com radiografias periapicais e recorrer a referências anatómicas adicionais para uma aferição fiável (Li et al., 2023).

A irrigação com hipoclorito de sódio, especialmente quando efetuada sob pressão ou sem agulhas com saída lateral, acarreta um risco aumentado de extravasamento para os tecidos periapicais, podendo provocar necrose das estruturas moles envolventes (AlKahtani et al., 2005). Outro obstáculo relevante prende-se com a necessidade de criar uma barreira apical eficaz, que permita a compactação da gutta-percha sem risco de extrusão. Tradicionalmente, esta função era assegurada pelo uso prolongado de hidróxido de cálcio, numa abordagem de apexificação em múltiplas sessões. No entanto, está comprovado que a exposição da dentina a este composto em um prazo de 1 ano resulta numa diminuição de aproximadamente 50 % da sua resistência à flexão, elevando substancialmente o risco de fratura cervical (Andreasen et al., 2002).

Neste contexto, qualquer estratégia terapêutica adotada deve alcançar um compromisso entre eficácia antimicrobiana, manutenção da integridade estrutural da raiz e estabelecimento de um selamento apical eficaz (Ribeiro et al., 2020).

1.4 Abordagens atuais para dentes imaturos

Durante décadas, o tratamento de eleição em dentes com ápice aberto consistiu na apexificação com hidróxido de cálcio, quer em sessão única, quer ao longo de múltiplas consultas. Todavia, este método implicava um tempo de tratamento prolongado, entre cinco e vinte meses, associado a um maior risco de recontaminação e degradação progressiva da estrutura radicular (AlKahtani et al., 2005).

Sempre que a polpa se mantém vital, a técnica de eleição é a apexogênese, cujo objetivo é preservar a vitalidade pulpar através de procedimentos conservadores como recobrimentos diretos ou pulpotomias parciais, utilizando materiais biocerâmicos (Li et al., 2023). A principal vantagem desta abordagem reside na possibilidade de continuidade

do desenvolvimento radicular, com espessamento das paredes e formação natural do fecho apical. Contudo, as suas limitações incluem a exigência de uma polpa ainda viável, a elevada sensibilidade técnica e o risco de insucesso decorrente de infecções bacterianas subsequentes (Li et al., 2023).

O advento da técnica do *plug* apical com *mineral trioxide aggregate* (MTA) constituiu um marco relevante. A aplicação ortógrada de uma camada de 3 a 5 mm de MTA no terço apical permite a criação de uma barreira mineralizada em sessão única. Evidência laboratorial demonstra que apenas *plugs* com 5 mm de espessura conseguem impedir totalmente a infiltração de *Actinomyces viscosus* através do forame (AlKahtani et al., 2005).

Em alternativa, têm vindo a ser implementadas terapêuticas de regeneração pulpar, conhecidas como procedimentos regenerativos endodônticos (PRE). Estas técnicas assentam numa desinfeção suave do canal, seguida pela indução de hemorragia controlada na região apical e subsequente selamento coronário hermético, com o intuito de estimular o crescimento radicular (Li et al., 2023). Os benefícios incluem alongamento da raiz, espessamento das paredes dentinárias e possibilidade de revascularização do espaço pulpar, mesmo em dentes previamente necrosados. No entanto, subsistem limitações significativas, nomeadamente a imprevisibilidade no volume e estabilidade do coágulo, a necessidade de múltiplas sessões clínicas, o risco de reabsorções internas ou externas e a falta de evidência consistente quanto à regeneração de verdadeiro tecido pulpar (Li et al., 2023).

Face a estes constrangimentos, os materiais biocerâmicos com elevada bioatividade e comportamento dimensional estável têm assumido um papel crescente. Estes materiais renovaram o interesse na técnica de obturação com cone único, a qual permite obter um selamento apical eficaz numa única sessão, mesmo em dentes com morfologia apical irregular e paredes radiculares frágeis (De-Deus et al., 2016).

1.5 Cimentos biocerâmicos

Os cimentos à base de silicato de cálcio constituem uma evolução significativa do MTA, preservando as suas propriedades bioativas, mas apresentando melhorias notórias no manuseamento e no desempenho clínico. Estas formulações modernas integram partículas ultrafinas ($\approx 0,2 \mu\text{m}$), são fornecidas sob a forma de pasta ou putty pré-

misturada e caracterizam-se por um tempo de presa hidráulica acelerado. Esta configuração favorece a sua utilização em ambiente clínico, sem comprometer a resposta biológica desejada. Durante a hidratação, o trissilicato de cálcio transforma-se em gel de silicato de cálcio hidratado e em hidróxido de cálcio, o qual se dissocia libertando iões cálcio (Ca^{2+}) e hidroxilo (OH^-), elevando o pH para valores superiores a 12. Este ambiente alcalino induz a precipitação de hidroxiapatite, que promove o selamento das microirregularidades entre o cimento e a dentina (De-Deus et al., 2016). Esta reação gera uma adesão química estável e uma libertação sustentada de cálcio, estimulando a atividade osteoblástica e cementoblástica nas zonas adjacentes (Camilleri et al., 2022; Candeiro et al., 2012; De-Deus et al., 2016).

1.5.1 Definição, composição e propriedades fundamentais

Nas formulações mais atuais podem observar distintas composições, como o BioRoot RCS, o EndoSequence BC Sealer e o Ceraseal, os quais podem incorporar, na sua constituição, trissilicato e dicalcicato de cálcio, fosfato monobásico de cálcio e óxido de zircónio, este último responsável pela radiopacidade. Durante o processo de presa, o pH permanece elevado (entre 12,2 e 12,8), enquanto a expansão higroscópica se mantém residual, inferior a 0,1 %, evitando a indução de tensões internas deletérias. Técnicas analíticas avançadas, como a espectroscopia Raman e a difração de raios X, comprovam a formação de hidroxiapatite na interface dentina-cimento após 28 dias de imersão em fluido simulador de saliva, evidenciando a bioatividade da superfície cimentante (Camilleri et al., 2022; Candeiro et al., 2012; De-Deus et al., 2016, 2016; Zamparini et al., 2022) (De-Deus et al., 2016).

1.5.2 Benefícios clínicos face a materiais convencionais

Os cimentos biocerâmicos distinguem-se pela sua elevada afinidade com a água e por apresentarem ângulos de contacto reduzidos ($< 10^\circ$), características que facilitam a infiltração de iões cálcio nos túbulos dentinários. Este fenómeno resulta na formação de uma camada híbrida mineralizada, que contribui para a retenção micromecânica. A ligeira expansão higroscópica que ocorre após a presa compensa a contração térmica da gutta-percha, particularmente em canais amplos ou de configuração oval, reduzindo a formação de espaços vazios (Bianco et al., 2020; Camilleri et al., 2022; Pontoriero et al., 2022; Zamparini et al., 2022).

Ensaio de resistência à fratura demonstraram que raízes obturadas com iRoot SP suportam cerca de 30 % mais carga até à fratura do que aquelas tratadas com o selador AH Plus, efeito atribuído à deposição de cristais de apatite nos túbulos dentinários, com consequente reforço estrutural (De-Deus et al., 2016).

Para além disso, o ambiente alcalino gerado pelos cimentos biocerâmicos confere-lhes uma ação antimicrobiana prolongada, eficaz contra microrganismos resistentes como *Enterococcus faecalis* e *Candida albicans*, ao contrário dos seladores convencionais à base de resina epoxídica ou óxido de zinco-eugenol, cuja ação antibacteriana é mais limitada e efêmera (Bose et al., 2020; Sokolonski et al., 2023).

1.5.3 Evidência científica sobre desempenho

Uma revisão de literatura demonstrou que os cimentos biocerâmicos, quando utilizados em obturações retrógradas, alcançam taxas de cicatrização radiográfica entre 86,4 % e 95,6 %, superando o desempenho do amálgama e do MTA (França et al., 2019).

Uma análise realizada por Chopra et al., (2021) revelaram descontinuidades marginais na interface biocerâmico-dentina ao nível do terço coronal, comparando com seladores à base de resina epoxídica. No terço apical, a maior espessura observada foi interpretada como um indicador de boa adaptação anatómica e escoamento eficaz do material.

Adicionalmente, estudos com microtomografia computadorizada (micro-CT) realizados por Castagnola et al., (2018) demonstraram que a técnica de cone único associada ao EndoSequence BC Sealer proporciona volumes de preenchimento e percentagens de espaços vazios equiparáveis aos obtidos com técnicas termoplásticas utilizando AH Plus. Importa salientar que, no grupo tratado com biocerâmico, a incidência de extrusão de material para os tecidos periapicais foi inferior, reforçando a segurança desta técnica em contextos clínicos de maior complexidade.

1.5.4 Diferenças de composição entre gerações

Ao longo de aproximadamente duas décadas, a literatura descreve três gerações principais de cimentos e seladores biocerâmicos. A primeira corresponde ao MTA original, fornecido em pó e ativado com água destilada ou solução salina; caracterizava-se por partículas de maior dimensão, uso de óxido de bismuto como agente radiopacificante e tempo de presa prolongado (AlKahtani et al., 2005).

A segunda geração introduziu formulações em sistema pó-líquido mais refinado ou em *putty*, como por exemplo o MTA Angelus, com partículas mais finas e teor reduzido de fases aluminato-férricas, o que diminuiu a solubilidade e melhorou o manuseamento, mantendo, ainda assim, o óxido de bismuto como elemento radiopaco (De-Deus et al., 2012).

Já os seladores de terceira geração foram desenvolvidos com alterações estruturais destinadas a melhorar o desempenho clínico, a estética e a facilidade de aplicação. Um exemplo é o NeoSealer Flo, que substituiu o óxido de bismuto, associado a alterações cromáticas, por óxido de tantálio, garantindo radiopacidade eficaz sem comprometer a estética dentária (De-Deus et al., 2016). O Ceraseal, por outro lado, mantém o óxido de zircônio como radiopacificante, mas incorpora plastificantes de cadeia longa que reduzem a viscosidade inicial, facilitando o escoamento em canais com diâmetro aumentado ou anatomia complexa (Zamparini et al., 2022).

No âmbito cirúrgico, o RetroMTA foi formulado com uma composição adaptada, substituindo parcialmente as fases aluminato-férricas por sulfato de cálcio, o que permitiu reduzir o tempo de presa para cerca de 12 minutos, sem comprometer a resistência compressiva nem a liberação de íons cálcio, mantendo a bioatividade desejável (De-Deus et al., 2016).

Estas inovações traduzem o empenho contínuo na criação de cimentos progressivamente mais versáteis, capazes de responder aos desafios clínicos e cirúrgicos da Endodontia contemporânea, sem sacrificar as propriedades mecânicas e biológicas essenciais (Camilleri et al., 2022).

1.6 Desafios clínicos e importância do selamento apical.

A falência terapêutica em Endodontia está frequentemente associada à ocorrência de microinfiltração na interface entre o material obturador e a parede dentinária. Fenômenos como a contração volumétrica do cimento durante a sua presa, a progressiva dissolução induzida pelos fluidos periapicais e as tensões cíclicas decorrentes da mastigação favorecem a formação de microfendas. Estas falhas estruturais constituem canais preferenciais para a migração de nutrientes, endotoxinas e microrganismos, comprometendo a esterilidade obtida após a desinfecção química mecânica e reativando a inflamação nos tecidos periapicais (De-Deus et al., 2008).

1.6.1 *Mecanismos de infiltração de bactérias e fluidos*

Estudos laboratoriais *ex vivo* demonstram que brechas com apenas 2 μm são suficientes para permitir a penetração de *Streptococcus sanguinis* em menos de 24 horas. Este dado evidencia que a dimensão crítica para infiltração bacteriana é inferior ao diâmetro médio dos canais laterais (De-Deus et al., 2008). A tensão superficial dos fluidos biológicos, como a saliva e o exsudado periapical, potencia a capilaridade ao longo da interface entre o cimento e a dentina, enquanto a pressão osmótica gerada pelos metabólitos bacterianos impulsiona o movimento de fluidos em direção aos tecidos periapicais. Adicionalmente, os ciclos térmicos a que a cavidade oral está sujeita provocam alterações dimensionais diferenciadas entre a dentina e o material obturador, resultando na formação de *microgaps* devido à expansão e contração assimétricas (Keleş & Keskin, 2020).

1.6.2 *Consequências clínicas da infiltração*

A presença persistente de biofilmes intrarradiculares encontra-se frequentemente associada a manifestações clínicas como dor pós-operatória prolongada, formação de fístulas e lesões periapicais de resolução complexa. Estudos de seguimento demonstram uma correlação clara entre infiltração bacteriana precoce e necessidade de retratamento endodôntico no espaço de cinco anos (Chu et al., 2005).

Nos dentes com rizogênese incompleta, a conjugação entre elevada permeabilidade apical, intensa irrigação sanguínea e paredes dentinárias fragilizadas cria condições propícias a uma inflamação persistente, ao aumento do risco de fratura cervical e ao comprometimento do prognóstico funcional a médio prazo (Li et al., 2023).

1.6.3 *Sucesso e importância selamento adequado*

A eficácia do selamento apical depende em grande medida da escolha do selador. Os cimentos biocerâmicos destacam-se por possuírem um pH alcalino estável, capacidade de expansão higroscópica controlada e libertação contínua de íons cálcio. Estas propriedades favorecem a formação de uma zona híbrida mineralizada, impregnada de hidroxiapatite, capaz de selar microfissuras e dificultar a penetração de microrganismos (De-Deus et al., 2016).

Ensaio de infiltração bacteriana demonstraram que o Bioceramic Root Repair Material apresenta um comportamento selador equivalente ao do MTA branco e superior

ao dos seladores epoxídicos tradicionais (De-Deus et al., 2008). Estudos de permeabilidade baseados na técnica de filtração de fluidos mostraram uma redução de até 60 % na passagem de líquidos quando se aplica a técnica de cone único com selador biocerâmico, em comparação com a técnica de condensação lateral com resina epoxídica (De-Deus et al., 2012). Estes dados sustentam a adoção preferencial de cimentos biocerâmicos em situações clínicas de elevado risco de reinfecção, como nos dentes com ápice aberto, onde a margem de erro é mínima (Lawley et al., 2004).

1.7 Técnicas de obturação endodôntica

A compreensão das técnicas de obturação exige, antes de mais, a clarificação do seu objetivo fundamental: após a remoção da polpa necrosada e a desinfecção adequada do sistema radicular, o espaço resultante torna-se suscetível à reinfecção bacteriana. A obturação procura, portanto, preencher tridimensionalmente essa cavidade, desde a câmara coronária até ao forame apical, criando uma barreira hermética. Para garantir esse selamento eficaz, o material utilizado deve aderir estreitamente à dentina, infiltrar-se em irregularidades anatómicas e manter estabilidade dimensional perante a presença de fluidos biológicos. Assim, a eficácia do selamento obturador constitui um fator determinante para o sucesso do tratamento endodôntico a longo prazo (Chopra et al., 2021; Gillen et al., 2011).

1.7.1 Descrição das principais técnicas

A técnica de *plug* apical com MTA consiste na inserção ortógrada de uma camada entre 3 a 5 mm de material no terço apical do canal, seguida de compactação, formando uma barreira mineralizada. A presa inicial do MTA ocorre num ambiente húmido, aproximadamente vinte e quatro horas após a sua colocação, permitindo numa consulta subsequente e após validação radiográfica a obturação restante do conduto (AlKahtani et al., 2005). A presença de trissilicato de cálcio promove a libertação de iões cálcio durante a hidratação, favorecendo a precipitação de hidroxiapatite na interface dentina-cimento, o que reforça o selamento por via química (De-Deus et al., 2008).

Por sua vez, a técnica de cone único com selador biocerâmico baseia-se na utilização de um cone ISO ou personalizado, compatível com a instrumentação mecanizada realizada. Este cone atua como um êmbolo que induz a dispersão hidráulica do selador ao longo das irregularidades anatómicas do canal (Sisli & Ozbas, 2017; Viapiana et al., 2014). O selador, sendo hidrofílico e pré-misturado, inicia a presa ao

contactar com a humidade residual da dentina, libertando iões cálcio que se precipitam como apatite, vedando eficazmente os microespaços, sem necessidade de compactação térmica ou lateral (De-Deus et al., 2016).

Outra opção é a técnica de ondas contínuas de calor, também designada como técnica de obturação termoplástica contínua. Neste método, após colocação do cone principal até ao comprimento de trabalho, um plugger aquecido plastifica a gutta-percha, que é então pressionada apicalmente para preencher os canais acessórios. A gutta-percha restante é compactada verticalmente e o terço coronal é finalizado com injeção adicional de material termoplastificado. Esta técnica oferece elevada densidade de obturação e preenchimento eficaz das irregularidades, mas exige equipamentos próprios, apresenta risco de extrusão em ápices abertos e maior complexidade técnica (Keleş & Keskin, 2020).

1.7.2 Comparação crítica entre técnicas

Estudos laboratoriais demonstram que apenas *plugs* de MTA com 5 mm de espessura conseguem bloquear completamente a passagem de *Actinomyces viscosus*, enquanto espessuras inferiores resultam em microinfiltração significativa (AlKahtani et al., 2005). Contudo, em ambiente clínico, alcançar uma espessura homogénea de 5 mm pode ser complexo, sobretudo em canais com morfologia dilatada. A presença do plug também reduz o espaço disponível para o cone de gutta-percha, o que pode comprometer a retenção das restaurações intracanaís (De-Deus et al., 2012).

Em contraste, a técnica de cone único com selador biocerâmico proporciona uma redução aproximada de 30 % no tempo operatório em comparação com técnicas de compactação lateral, reduz o risco de fratura radicular por forças laterais e preserva maior quantidade de dentina cervical, uma vantagem crítica em raízes frágeis (Keleş & Keskin, 2020). Análises por micro-CT demonstram volumes de preenchimento comparáveis aos das técnicas termoplásticas, com menor incidência de extrusão de cimento (Castagnola et al., 2018). Além disso, testes de *push-out* onde usou-se os cimento Biodentine e MTA Angelus indicam maior adesão dos cimentos biocerâmicos à dentina em comparação com o MTA, sugerindo selamentos mais estáveis (De-Deus et al., 2016).

1.7.3 Metodologias de avaliação do selamento apical

A eficácia do selamento apical tem sido tradicionalmente avaliada por infiltração de corantes como azul de metileno ou rodamina B. Apesar da sua popularidade, a fiabilidade destes testes é limitada pela influência da tensão superficial dos corantes, o que compromete a representatividade biológica dos resultados. Assim, a correlação com modelos microbiológicos é apenas moderada (De-Deus et al., 2008).

Uma alternativa mais rigorosa são os testes de filtração de fluidos, que medem alterações de pressão em sistemas herméticos. Estes testes, embora mais exigentes do ponto de vista técnico, oferecem dados mais reprodutíveis e fisiologicamente relevantes (De-Deus et al., 2012). Mais recentemente, a micro-CT tem sido empregue para observar tridimensionalmente a presença de vazios e extrusões, sem necessidade de seccionar as amostras. Apesar de não permitir a observação direta da infiltração bacteriana, permite inferir o risco com base na morfologia interna (Sisli & Ozbas, 2017). Complementarmente, a microscopia confocal de varrimento a laser tem sido aplicada para medir a profundidade de penetração de corantes fluorescentes, fornecendo dados adicionais sobre a integridade marginal do selamento (De-Deus et al., 2017).

1.8 Justificação

Nas últimas décadas, a utilização do *plug* apical de MTA afirmou-se como um padrão terapêutico consolidado para o encerramento artificial de ápices imaturos. Esta preferência decorre da sua comprovada capacidade de originar uma barreira densa, estável e biologicamente compatível (AlKahtani et al., 2005). Paralelamente, os cimentos biocerâmicos à base de silicato de cálcio surgiram como alternativas viáveis, com desempenho promissor e menor sensibilidade à técnica operatória. Estes materiais tiram partido da condensação hidráulica inerente à técnica de cone único, permitindo preencher de forma eficiente as irregularidades do canal e estabelecer uma ligação química duradoura com a dentina, através da formação de uma zona híbrida mineralizada (De-Deus et al., 2016).

Apesar do sucesso individual documentado para ambas as abordagens, persistem incertezas relevantes quando estas são aplicadas a dentes com ápices verdadeiramente abertos, condição anatômica caracterizada pela ausência de constrição apical e pela presença de um canal em forma de funil. Esta morfologia particular dificulta o controlo

da espessura do *plug* e pode favorecer o fenómeno de *wash-out* do selador (AlKahtani et al., 2005; De-Deus et al., 2017).

Duas lacunas científicas motivam, assim, a presente investigação. Em primeiro lugar, é reduzida a evidência que compare diretamente, em condições laboratoriais controladas, o desempenho de *plugs* de MTA com espessura padronizada e a técnica de cone único com cimento biocerâmico em canais que simulem a anatomia de um ápice imaturo (Viapiana et al., 2014).

Após a revisão de literatura e segundo nosso conhecimento, não encontramos publicações que aborde comparativamente o selamento apical em dentes com ápices abertos envolvendo estas duas técnicas de obturação utilizando este cimento.

Ao observar esta lacuna e atendendo ao anterior exposto foram elaborados os objetivos deste trabalho e as subjacentes hipóteses descritas a seguir.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESES

2.1 Objetivo geral

Realizar um estudo comparativo *in vitro* da capacidade de selamento apical de dentes com ápices abertos, utilizando duas técnicas de obturação em dentes com diâmetro apical artificial reproduzidos em 1,20 mm.

2.2 Objetivos específicos

- Medir e comparar a infiltração apical em milímetros de corante em dentes humanos com diâmetro apical artificial de 1,20mm selados com cimento biocerâmico (NeoMTA® 2) em consistências diferentes aplicadas em duas técnicas de obturação distintas:

Selamento apical com apexificação com *plug* NeoMTA® 2 (consistência 1) em aproximadamente 4 mm de espessura e remanescente do canal com guta-percha mais NeoMTA® 2 (consistência 2)

Técnica cone único e cimento biocerâmico NeoMTA® 2 (consistência 2).

2.3 Hipóteses

Hipótese:

- **H0:** Não existe diferença estatisticamente significativa na extensão de infiltração de corante entre as técnicas de obturação estudadas.
- **H1:** Existe diferença estatisticamente significativa na extensão de infiltração

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Azul de metileno 1 % p/v (Departamento de Microbiologia, Instituto Universitário Egas Moniz, Caparica, Portugal) - solução corante preparada internamente.

Bader® lamparina a álcool (Bader Europe Group S.L., Nigrán, Espanha) - lamparina metálica de bancada para esterilização por chama.

Broca diamantada cônica arredondada *856 Jet*, FG (Jota AG, Rüthi, Suíça) - fresa “round-end taper” em diamante galvanizado para preparo cavitário.

Broca esférica diamantada *801L-016*, FG (Komet Dental GmbH, Lemgo, Alemanha) - broca esférica de pescoço longo (Ø 1,6 mm) para acesso endodôntico e desgaste controlado.

Broca Pecho 32 mm n.º 01–03 (Microdont Ind. e Com. de Prod. Odontológicos Ltda., São Paulo, Brasil) - alargadores cervicais em aço-inox descartáveis.

Caneta de acetato azul, *Fine Tip Permanent Marker* (ref. 47-316) (Stanley Black & Decker, New Britain, CT, EUA) - marcador permanente de ponta fina.

Cloramina T 1 % p/v (Departamento de Microbiologia, IUEM, Caparica, Portugal) - solução desinfetante preparada internamente.

Condensador Schilder Duplo n.º 1 (EndoPrime Instrumentos Ltda., Santa Luzia, MG, Brasil) - plugger graduado para condensação vertical de guta-percha.

Cones de guta-percha *Great ProTaper F3 (.09)* (VIDU Dental, Valência, Espanha) - cones esterilizados D0 = 0,30 mm; conicidade 9 %.

Cones de papel *Great ProTaper F3 (9 %)* (VIDU Dental, Valência, Espanha) - pontas absorventes calibradas para secagem intracanal.

Curetas periodontais *Gracey 3-4* (Hu-Friedy Mfg. Co. LLC, Chicago, IL, EUA; distribuição UE: Frankfurt, Alemanha) - curetas em aço-inox para raspagem subgingival.

Disco diamantado para peça de mão n.º 9153-104, FG (Komet Dental GmbH, Lemgo, Alemanha) - disco diamantado Ø 22 mm para desgaste de material dentário.

EDTA 17 % (pH ≈ 7,2) (Departamento de Microbiologia, IUEM, Caparica, Portugal) - quelante preparado internamente para irrigação final.

Entellan™ medium (Merck KGaA, Darmstadt, Alemanha) - meio de montagem rápido para lâminas histológicas.

Esponja fenólica 23 × 11 × 7 mm (GroHo Garden, Alverca, Portugal) - bloco de espuma fenólica estéril para estabilização de espécimes.

Fita PTFE 12 mm × 0,075 mm (MIARCO S.L., Paterna, Valência, Espanha) - fita de politetrafluoroetileno para isolamento e vedação.

Fósforos de segurança (Auchan Retail Portugal, Amadora, Portugal) - fósforos de madeira para ignição da lamparina.

Tubo Eppendorf® de plástico 1,5 mL (Eppendorf SE, Hamburgo, Alemanha) - microtubo cónico em PP, tampa “snap-cap”.

Frasco organizador de acessórios em plástico (Fabricante genérico, China) - recipiente multipropósito para armazenamento de brocas e pontas.

Godiva – *Hoffmann's Abdruckmasse Grün* (Hoffmann Dental Manufaktur GmbH, Berlim, Alemanha) - composto termoplástico para moldagem.

Lâmina n.º 15, estéril, aço-carbono (SMI AG, Herstal, Bélgica) - lâmina cirúrgica de corte curvo.

Lâminas microscópicas *Basic Line* (SLIU-005-050) (Lab Box, Barcelona, Espanha) - lâminas de vidro 26 × 76 mm, bordas 90°.

Lima K10, 25 mm, aço *Flexofile* (ISO 10) (Dentsply Sirona / Maillefer, Ballaigues, Suíça) - lima manual inicial de instrumentação.

Limas 1.ª série, 25 mm, aço *Flexofile* (ISO 15–40) (Dentsply Sirona / Maillefer, Ballaigues, Suíça) - conjunto de limas manuais escalonadas.

NaOCl 2,5 % p/v (Departamento de Microbiologia, IUEM, Caparica, Portugal) - solução de hipoclorito de sódio preparada internamente.

NeoMTA® 2 pó + gel (Avalon Biomed Inc., Houston, TX, EUA; distribuição UE: Zarc4Endo, Gijón, Espanha) - cimento biocerâmico à base de silicato tricálcico.

Ponta de aspiração *Endo Tips* 0,014" / 0,35 mm (Angelus Ind. de Prod. Odontológicos S/A, Londrina, Brasil) - pontas flexíveis descartáveis para aspiração intrarradicular.

Resina fluida Tetric EvoFlow® A2 (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) - compósito fluido fotopolimerizável para restaurações.

Régua calibradora de guta-percha (Bader Dental S.L., Madrid, Espanha) - régua milimetrada para corte e verificação de cones.

Seringa luer-lock 20 mL, plástico (Changzhou Medical Appliances General Factory Co. Ltd., Changzhou, Jiangsu, China).

Soro fisiológico 0,9 % (500 mL) (Sonae MC, Matosinhos, Portugal) - solução isotónica estéril para irrigação e limpeza.

Suportes de corte para micrótomo (Departamento de Materiais, IUEM, Caparica, Portugal) - bases acrílicas produzidas internamente para fixação de amostras.

Verniz de unha *ANNY Speed Dry Top Coat 917* (cosnova GmbH, Sulzbach, Alemanha) - esmalte acrílico utilizado para vedação externa de espécimes.

3.2 Aparatologia

Aplicação ZEISS Observe (Carl Zeiss AG, Oberkochen, Alemanha) - software móvel para captura, organização e partilha de micrografias produzidas em microscópios ZEISS.

Contra-ângulo KaVo® INTRAccompact 2068 (1 : 1) (KaVo Dental GmbH, Biberach an der Riß, Alemanha) - peça de mão de baixa rotação (até 40 000 rpm), conexão ISO 3964.

Estufa incubadora *Memmert* INE400 (Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Alemanha) - incubadora de convecção natural, volume 53 L, faixa de 30–80 °C, humidade saturada.

Lamparina à álcool, 100 mL (AF do Brasil Produtos Odontológicos Ltda., Londrina, PR, Brasil)

Micrótomo Accutom-50 (Struers A/S, Ballerup, Dinamarca; filial USA: Struers Inc., Cleveland, OH) - cortadora-rectificadora de precisão com disco diamantado para seccionamento de espécimes dentários.

Microscópio EXTARO® 300 (Carl Zeiss Meditec AG, Oberkochen, Alemanha) - microscópio operatório com modos de fluorescência e polarização cruzada, zoom 1 : 6.

MAP System® (MAP One) (Produits Dentaires SA, Vevey, Suíça) - aplicador autoclavável de cimentos biocerâmicos com agulhas Ni-Ti triplamente anguladas para deposição controlada em regiões de acesso restrito.

Sidexis® 4 (Dentsply Sirona, Bensheim, Alemanha) - plataforma para aquisição, reconstrução e análise de imagens 2D/3D de radiologia digital e CBCT.

Turbina NSK Pana-Max PLUS® PAP2-SU B2 (Nakanishi Inc., Ratingen, Alemanha) - turbina pneumática high-speed 18 W, quatro jactos de spray, conexão Borden-2.

Ultrassom Woodpecker® UDS-E, ponta E93 (Guilin Woodpecker Medical Instrument Co. Ltd., Guilin, Guangxi, China) - gerador piezo-elétrico 30 kHz para ativação de irrigantes; ponta Ni-Ti #20 (1 % taper) autoclavável.

3.3 Metodologia

3.3.1 Desenho do Estudo.

O estudo que se apresenta foi sugerido para a obtenção do título de Mestre em Medicina Dentária. O estudo foi delineado como uma investigação *in vitro*, de natureza experimental, com distribuição dos espécimes em grupos, estabelecidos de acordo com a técnica de obturação utilizada. Foi solicitado a autorização para a realização ao Comité de Ética do Instituto Universitário Egas Moniz, o qual foi aprovado na data de 07 março de 2025 pelo processo interno: 1587 (Anexo I). Os procedimentos foram realizados na clínica Universitária Egas Moniz, laboratório de microbiologia aplicada Egas Moniz e no laboratório de Biomateriais entre os meses de maio e junho de 2025. O processo foi realizado por um único operador, o autor deste trabalho, exceto a avaliação da infiltração a qual foi realizada por dois avaliadores, (A.M e D.G.) que tem como objetivo investigar a capacidade de infiltração de corante em dentes tratados com diferentes sistemas de obturação envolvendo o uso de cimento biocerâmico NeoMTA® 2 e cone de guta-perchar *Great ProTaper F3*.

3.3.2 Descrição da amostra

A amostra foi composta por 30 dentes humanos monorradiculares, incluindo, incisivo inferior e superior, canino e pré-molar inferior. Estes dentes foram previamente extraídos por razões ortodônticas, periodontais ou protéticas e escolhidos com critério de tamanhos mais parecidos, heterogêneos. Os espécimes foram fornecidos, em 2025, pelo Banco de Dentes da Universidade Egas Moniz.

3.3.3 Critérios de inclusão.

Foi respeitado o critério de inclusão através da confirmação por observação clínica e por radiografias RVG de modo que foi realizada 2 radiografias, um no sentido méso-distal e outro no sentido vestibulo-lingual de cada dente para confirmar a morfologia interna; utilizando software Sidexis 4 (Dentsply Sirona; Bensheim, Germany) (Fig. 1).

- Dentes monorradiculares;
- Classificação de Vertucci Tipo I
- Canais retos, curvatura menor que 5°;
- Ápices sem tratamentos endodônticos; prévios;

- Ausência de reabsorções radiculares externas ou internas;
- Dentes sem fraturas radiculares.

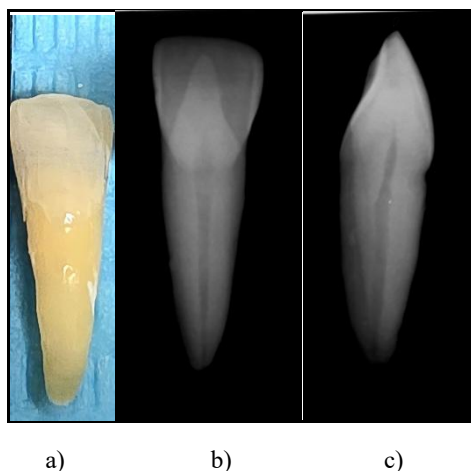


Figura 1 – Análise e seleção de espécimes: a) Vista vestibular inicial; b) Radiografia vestibular, inicial; c) Radiografia por mesial, inicial.

Após a obtenção e inspeção dos espécimes de acordo com os critérios estabelecidos, foi feito o desbridamento das superfícies radiculares externas por sistema de ultrassom (Guilin Woodpecker Medical Instrument Co. Ltd., Guilin, Guangxi, China) e curetas periodontais (Gracey 3-4 – Hu-Friedy Mfg. Co. LLC, Chicago, IL, EUA / distribuição UE: Frankfurt, Alemanha) para a remoção dos restos de cálculo dentário, ossos e de tecidos moles. Na sequência, os dentes foram acondicionados em frascos plásticos organizadores (Fabricante genérico, China. Recipiente multipropósito para armazenamento de pontas, brocas e consumíveis), e estes frascos foram codificados e identificados unicamente por algarismos arábicos de 1 a 30 com caneta de acetato azul (Fine Tip Permanent Marker, ref. 47-316) – Stanley Black & Decker, New Britain, CT, EUA) (Fig. 2).



Figura 2 - Frascos plásticos organizadores com espécime 26 acondicionado

Em um segundo momento eles foram submetidos a esterilização e acondicionados durante uma semana em cloramina T a 1% (p/v – Departamento de Microbiologia, IUEM,

Caparica, Portugal.) após este período, foram lavados e acondicionados em água destilada.

3.3.4 Grupos Experimentais

Na pesquisa proposta, foram estabelecidos dois grupos experimentais e dois grupos de controlo: um positivo e outro negativo. Para minimizar potenciais vieses, cada dente foi atribuído aos grupos experimentais ou de controlo por meio de randomização simples, utilizando um sorteio que assegurou igual probabilidade de inclusão em qualquer grupo.

Os grupos receberam a denominação de Grupo I, Grupo II e Grupo controle positivo e negativo. Assim como segue na (Tabela 1) o grupo I e o grupo II são compostos por 10 espécimes cada e o grupo controle positivo há 5 espécimes assim como no grupo negativo com 5 espécimes.

Controlo Positivo: Estes com obturação de modo propositadamente incompleto, com apenas travamento do cone de guta-percha e com selamento externo, com 3 camadas de verniz de unha deixando exposto apenas 2mm do ápice.

Controlo Negativo: Estes com obturação completa, cimento obturador mais guta-percha e totalmente selados externamente, com aplicação de três camadas de verniz de unha (ápice e toda a superfície radicular impermeabilizada), garantindo ausência de infiltração.

Tabela 1 - Grupos experimentais inicial conforme o material obturador.

Grupo	Tecnica de Obturação	Nº
G I	Cone único	10
G II	Plug + Cone único	10
Controle Positivo	Apenas cone único	5
Controle Negativo	Cone único	5

3.3.5 Protocolo de padronização.

Para padronizar os espécimes, foram realizadas duas medições a partir do ápice de cada dente. A primeira medição foi do ápice até a obtenção do comprimento de 16 mm de extensão, utilizando uma régua calibradora de guta-percha (Bader – Bader Dental S.L., Madrid, Espanha). A segunda medição foi efetuada até alcançar um comprimento de 2 mm a partir do ápice, fez-se uma marcação nestes dois pontos com a caneta de acetato azul (Fig. 3). Estes dois pontos dos espécimes foram seccionados perpendicular ao longo eixo do dente, com o auxílio de um disco diamantado para peça de mão nº9153-104 (Komet; Trophagener, Germany) e montado em peça de mão (KaVo INTRA compact 2068 (1:1) – KaVo Dental GmbH, Biberach an der Riß, Alemanha) arrefecido com água e assim desprezando as extremidades (2mm do ápice e o extremo coronário) obtendo deste modo aproximadamente 14mm de espécimes (Fig. 4). Sequencialmente, após esta etapa, foi realizado o protocolo de instrumentação e preparação do conduto.



Figura 3 – Marcação dos pontos de corte do espécime: a) Régua endodôntica utilizada; b) Espécime nº 21 com marcação.

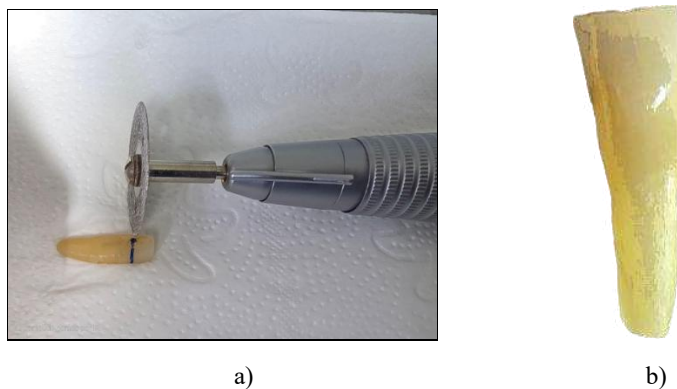


Figura 4 – Corte do espécime: a) Corte do espécime 21 com disco diamantado; b) Espécime com corte realizado.

Após a obtenção do corte do espécime pode-se observar em alguns espécimes (Fig. 5) o início propriamente do conduto e em outros não, devido ao seu comprimento natural contra o comprimento estabelecido de 16mm, quando não se observou inicialmente o conduto fez-se o acesso com broca esférica diamantada (801L-016, FG – Komet Dental GmbH, Lemgo, Alemanha.).



Figura 5 – Espécime nº 28 com vista da entrada do conduto inicial

3.3.6 Instrumentação

Sequencialmente iniciou a instrumentação dos espécimes com a lima K #10 (ISO 10) (Dentsply Maillefer, Sirona - Switzerland). Estabeleceu-se que o comprimento de trabalho se daria quando se observa a ponta da lima no forame apical e assim recuasse 0,5mm da medida aferida com régua calibradora de guta-percha (Fig. 6).



Figura 6 - Limas K#10 (ISO 10) utilizada para determinar comprimento de trabalho no espécime nº 28.

Realizou-se a ampliação do conduto ao comprimento de trabalho sequencialmente com limas manuais, K#10 (ISO 10) a K#35 (ISO 35) (Dentsply Maillefer, Sirona -

Switzerland), conforme a padronização prévia, associando irrigação abundante com 3 ml solução de hipoclorito de sódio (NaOCl) a (2,5% p/v) – Departamento de Microbiologia, IUEM, Caparica, Portugal) e inserido nos condutos com ponta de irrigação (Endo Tips 0,014" / 0,35 mm – Angelus Ind. de Prod. Odontológicos S/A, Londrina, Brasil) (Fig. 7).

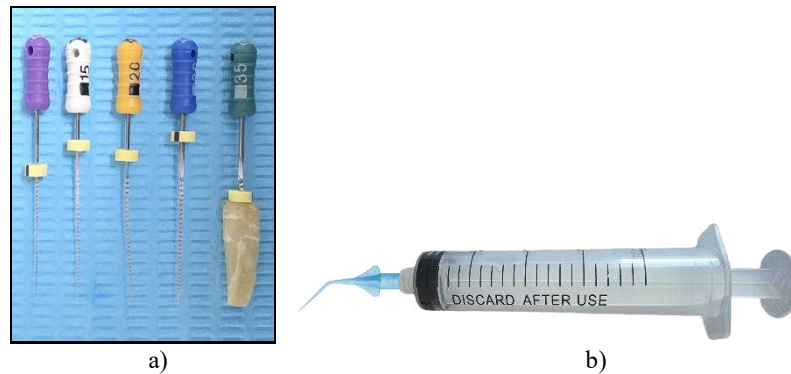


Figura 7 – Materiais utilizado no preparo inicial do conduto: a) sequência de limas manuais 1ª Série K DentSply pelo qual o espécime foi preparado; b) Seringa hipodérmica com a ponta de irrigação utilizado no processo.

3.3.7 Ajuste do diâmetro apical.

Após a instrumentação inicial necessitou ajustar o diâmetro dos espécimes de acordo com a exigência do trabalho proposto. Para atingir diâmetro de 1,1 mm, em todo comprimento do conduto, recorreu-se sequencialmente brocas Pecho 32mm n.º 1, 2 e 3 (Microdont Ind. e Com. de Prod. Odontológicos Ltda., São Paulo, Brasil). Para o preparo retrógrado nos espécimes, calibrou-se uma broca diamantada cônica arredondada 856 Jet (FG – Jota AG, Rüthi, Suíça) em uma régua calibradora de guta-percha (Fig. 8). Com auxílio de disco de corte diamantado, realizou-se uma marca indicativa do diâmetro de 1,2 mm na broca. Após calibração, introduziu-se até a marca realizada, a broca em todos os espécimes, obtendo-se diâmetro apical final de 1,2 mm, proporcionando forma de preparo com conicidade apical (Fig. 9).

Tanto o grupo controle positivo quanto o negativo, tiveram preparo sequencial igualmente ao grupo I e II.



Figura 8 – Régua endodôntica utilizada para calibrar a broca troncocônica no diâmetro de 1,2mm

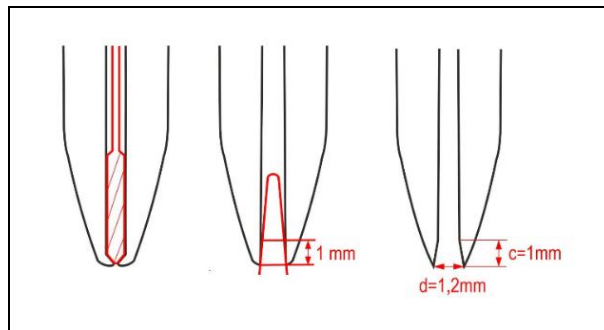


Figura 9 – Esquema do preparo dos espécimes, inicialmente com sequencia da broca pesso I á III e sequencialmente preparo com broca tronco cônica: c) Comprimento de penetração do espécime em 1mm; d) Diâmetro de 1,2mm obtido com preparo da broca troncocônica.

A cada troca de instrumento, procedeu-se à irrigação com 5ml de (NaOCl) 2,5% e ao término do preparo, realizou-se irrigação final com solução de EDTA a 17% por 1 minuto para eliminar o *smear layer*, seguida de irrigação final com 10ml de soro fisiológico (Continente Hipermercados, Portugal). (Fig. 13). A secagem do canal foi efetuada com Cones de papel (Taper Meta Biomed F3, 6%, Korea meta biomed)

Possíveis desvios ou perfurações foram acompanhados por inspeção radiográfica pós-instrumentação. Não se constatou a ocorrência de perfuração ou complicações em quaisquer espécimes. (Fig. 10).

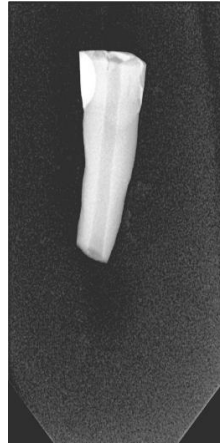


Figura 10 – Controle radiográfico após preparo do espécime nº21

Finalizando o processo de padronização dos espécimes se fez a distribuição dos mesmos através de sorteio eletrônico para cada grupo estabelecido através do site (<http://app-sorteos.com/pt,2025>) obtendo a seguinte distribuição dos espécimes para os seguintes grupos (Tabela 2):

Tabela 2 – Distribuição dos espécimes nos grupos propostos

Grupo	Espécimes	Técnica de Obturação	Nº
GI	7, 28, 22, 24, 4, 1,13, 2, 30, 12	Cone único.	10
GII	10, 14, 20, 26, 5, 19, 23, 29, 6, 17	Plug + Cone único	10
Controle Positivo	11, 8, 3, 25, 15	Apenas cone único	5
Controle Negativo	21, 18, 16, 9, 27	Cone único	5

3.3.8 Protocolo de Obturação.

Elegeram-se para o protocolo de obturação a utilização exclusivamente do cimento biocerâmico (NeoMTA® 2 (pó + gel) – Avalon Biomed Inc., Houston, TX, EUA; distribuição europeia: Zarc4Endo, Gijón, Espanha), tanto para produção do *plug* como para cimento fluido na obturação do cone de guta-percha.

3.3.8.1 Selamento apical com Plug

Cada raiz no seu extremo apical foi envolvida com fita de politetrafluoroetileno (PTFE; MIARCO, Espanha), (Fig. 11) e inserida numa esponja fenólica para jardinagem (23×11×7 mm; Alverca, Portugal), assegurando imobilização e manuseio adequados durante todo o procedimento (Fig. 12).



Figura 11 – Espécime nº14 envolvido com fita politetrafluoroetileno



Figura 12 – Espécimes do GII fixada na esponja fenólica para garantir estabilidade e não extravasamento do plug.

Para manipulação do cimento seguiu-se rigorosamente a proporção indicada pelo fabricante (Fig. 13).

- Plug apical – 0,1g de pó para 1 gota de gel, obtendo consistência densa.



Figura 13 – Cimento biocerâmico NeoMTA® 2 em placa de vidro para sua manipulação do plug.

A mistura foi preparada sobre placa de vidro e formou-se, em cada espécime, um plug apical de cimento biocerâmico (NeoMTA® 2 (pó + gel) com aproximadamente 4 mm de espessura. Para realizar a inserção do material dentro do conduto utilizou-se a magnificação com Microscópio (EXTARO 300 – Carl Zeiss Meditec AG, Oberkochen, Alemanha) e introduzido com um porta-MTA (MAP One System – Produits Dentaires SA, Vevey, Suíça) e condensado cuidadosamente por meio de condensador Schilder Duplo n.º 1, (EndoPrime Instrumentos Ltda., Santa Luzia, MG, Brasil), (Fig. 14) calibrados com cursor de stop endodôntico.

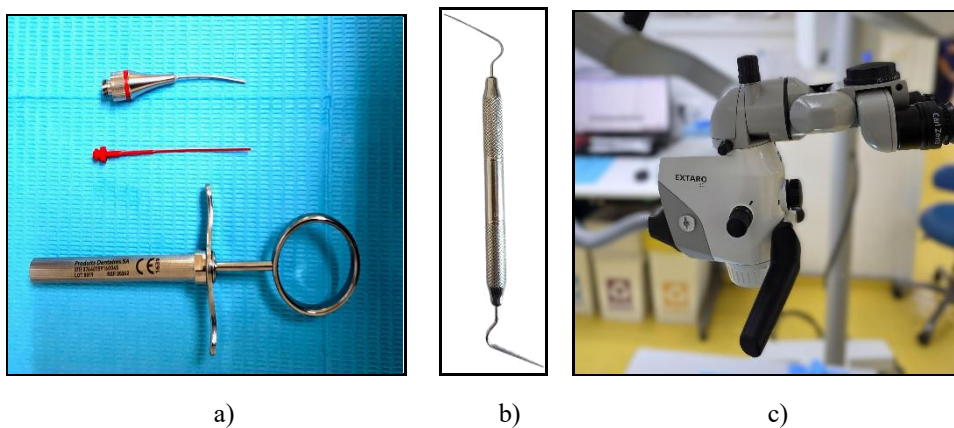


Figura 14 – Material utilizado para inserção do plug: a) Aplicador porta-MTA, MAP One System 1,10mm; b) Condensador Schilder Duplo n.º 1, EndoPrime; c) Magnificação com Microscópio, EXTARO 300 Carl Zeiss.

Durante o processo de trabalho, entre uma coleta e outra cobriu-se o cimento com uma compressa húmida para assegurar o não ressecamento do cimento e assim tendo um tempo de trabalho e textura adequada e garantindo uma execução mais precisa (Fig. 15).



a) b)
Figura 15 – Manipulação do cimento biocerâmico NeoMTA® 2 para plug: a) Cimento biocerâmico NeoMTA® 2 manipulado para consistência de plug na fase de trabalho inicial; b) Espécime nº5 G.II com plug de cimento biocerâmico NeoMTA® 2.

Segundo o fabricante para a consistência *putty* o tempo de trabalho é de aproximadamente 14 min à temperatura ambiente com presa inicial aproximadamente em 14 min a 37 °C; presa final aproximadamente 1 h 45 min.

Foi efetuado controle radiográfico para verificar a adaptação espessura adequada do *plug* as paredes dentinárias assim como ausência ou existência de bolhas de ar, para realizar as modificações necessários se for o caso antes de se concluir a obturação do canal (Fig. 16).

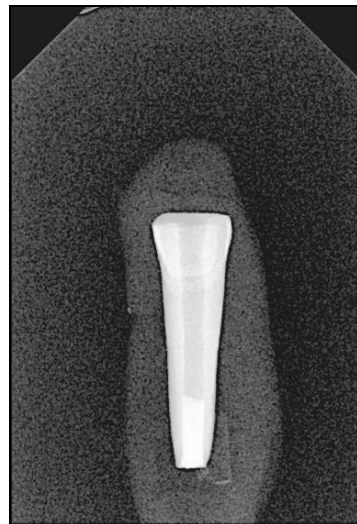


Figura 16 – Controle radiográfico após aplicação do plug NeoMTA® 2, espécime nº5 G.II

Após a aplicação do plug de NeoMTA® 2, as amostras foram armazenadas durante 7 dias em uma estufa incubadora (Memmert INE400 – Memmert GmbH + Co.

volume 53 L. KG, Schwabach, Alemanha) a 37 °C e 100 % de humidade, simulando as condições fisiológicas e permitindo a presa final do material (Fig. 17).

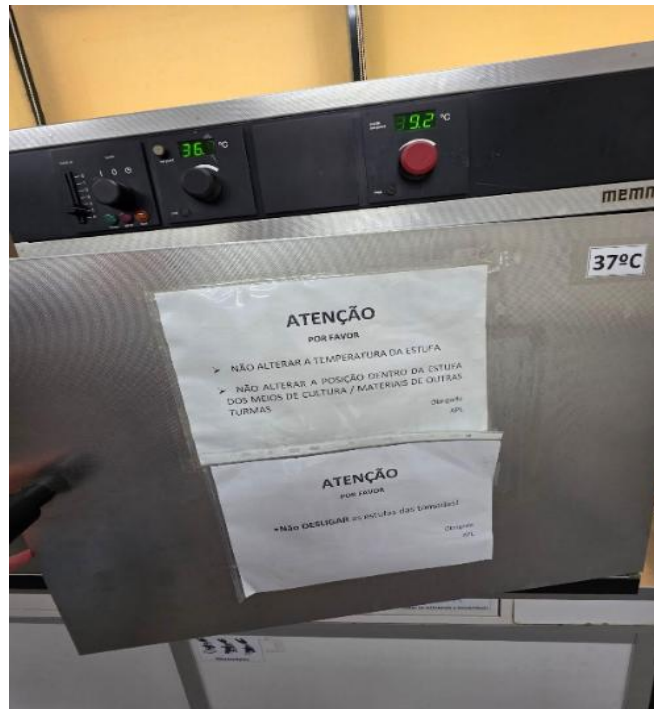


Figura 17 – Estufa incubadora (Memmert INE400)

3.3.8.2 Selamento remanescente radicular.

Decorrido o período de presa, procedeu-se à obturação final conforme a exigência do GII experimental, foi executado a obturador pela técnica de cone único.

Procedeu-se à calibração do diâmetro remanescente do canal com cones de gutapercha Great ProTaper F3 (conicidade 0,09; VIDU Dental, Valência, Espanha). Inicialmente, o cone foi medido e seccionado com o auxílio da régua calibradora de gutapercha e de uma lâmina de bisturi n.º 15 (sterile surgical blade, carbon steel; SMI AG, Herstal, Bélgica). Sempre que necessário para a adaptação final, efetuaram-se cortes adicionais em incrementos milimétricos até se obter uma adaptação adequada. A adequação foi confirmada pelo comprimento de inserção do cone, registado em 10 mm (Fig. 18).



Figura 18 – Materiais usados para obturação: a) Guta-percha, Great ProTaper F3; b) Lâmina de bisturi nº15 usada para cortar os cones no seu diâmetro de travamento.

Realizou-se a obturação associando o cone principal ao cimento biocerâmico (NeoMTA® 2 (pó + gel).

Seguiu-se rigorosamente a proporção indicada pelo fabricante:

Para o cimento selador usou-se 0,1g de pó para 2 gotas de gel, a mistura foi preparada sobre placa de vidro alcançando consistência homogênea e fluida (Fig.19).

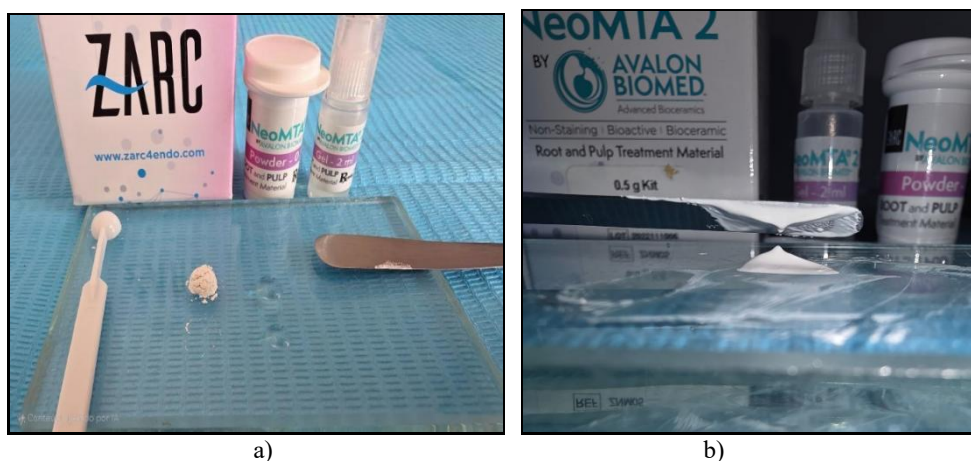


Figura 19 - Cimento biocerâmico NeoMTA® 2 em placa de vidro: a) Cimento proporcionado para manipulação do selador na obturação do restante dos contudo do GI, GII e G controle negativo; b) Aspeto físico do cimento pós manipulação.

Após a seleção e calibração do cone único de gutta-percha ao comprimento de trabalho, o cimento biocerâmico NeoMTA® 2 foi inserido no canal radicular com auxílio

do próprio cone. Verificado o preenchimento de todo o canal, o cone foi assentado e mantido em posição. (Fig. 20).



Figura 20 - Espécime nº20 do GII.

3.3.8.3 Selamento radicular dos demais grupos.

Para os demais grupos, Grupo I e Grupo controle negativo e positivo procedeu-se à calibração do cone de gutapercha (Great ProTaper F3) em 120 mm e seccionado com o auxílio da régua calibradora de gutapercha e de uma lâmina de bisturi n.º 15.

No Grupo controle positivo apenas foi travado o cone de gutapercha (Great ProTaper F3) em seu comprimento de trabalho e não houve obturação com o cimento endodôntico.

A obturação no Grupo I e Grupo controle negativo foi realizada em sua totalidade com o cimento biocerâmico NeMTA® 2 (pó + gel) e cone de gutapercha (Great ProTaper F3), pela técnica de cone único.

Segundo o fabricante a consistência selador (mistura mais fluida) tem um tempo de trabalho de aproximadamente 21 min; com sua presa em aproximadamente 1h 10min intraoral.

Após o processo de obturação, com o auxílio de um *plugger* aquecido com lamparina à álcool, 100 mL (AF do Brasil Produtos Odontológicos Ltda., Londrina, PR, Brasil) foi realizado o corte do cone de gutapercha *Great ProTaper* F3 remanescente e a

remoção de aproximadamente 1mm do material obturador coronário com uma leve compactação vertical e posteriormente feito um selamento do extremo coronário com resina fluida Tetric EvoFlow® A2 (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) (Fig. 21).

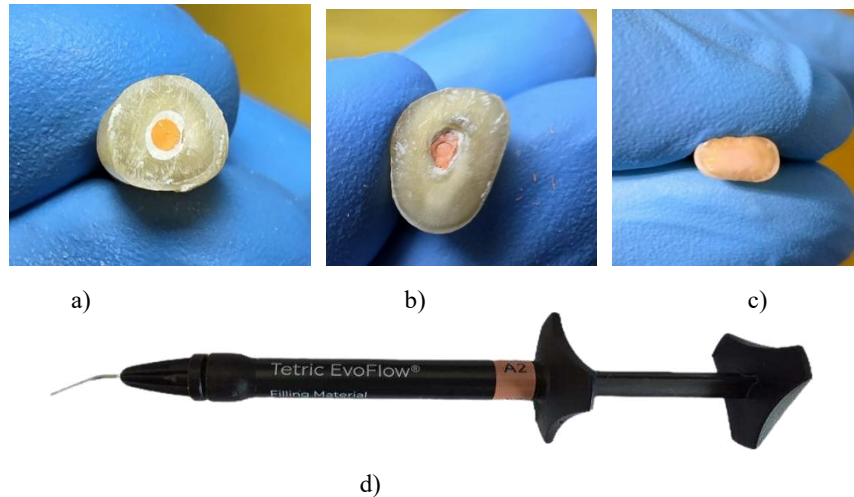


Figura 21 – Amostra pós obturação com corte do remanescente e preparo da região coronária para selamento: a) Espécime com corte da guta; b) Espécime com guta-percha com remoção de aproximadamente 1mm da matéria e condensação vertical; c) Espécime com selamento coronário; d) Resina fluida Tetric EvoFlow® A2 (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein).

Após a conclusão desta etapa foi realizado controle radiográfico por vista vestibular para confirmar a adequada obturação e excluir qualquer erro (Fig. 22).

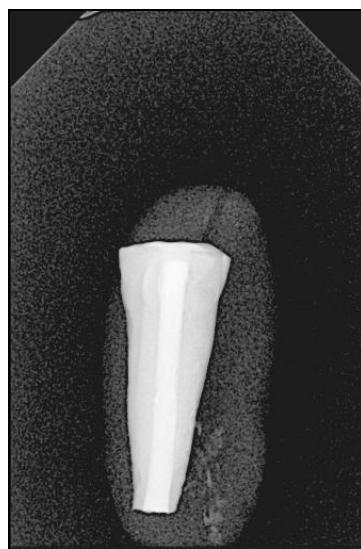


Figura 22 – Controle radiográfico com vista por vestibular do espécime nº 26 GII.

Em seguida os GI, GII e G controle negativo foram colocados novamente na estufa por 7 dias a 37 °C e 100 % de humidade para sua presa adequada e seguir para próxima etapa da investigação (Fig. 23)

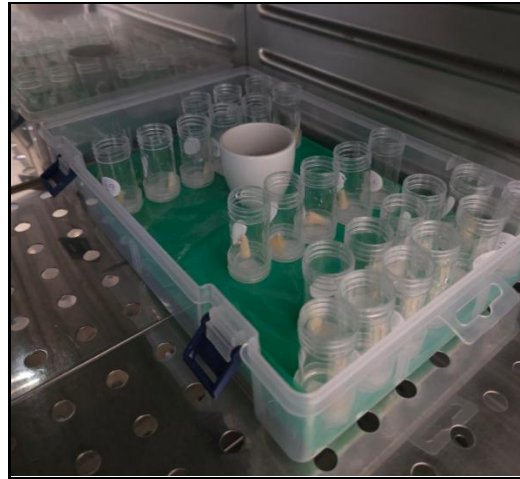


Figura 23 – Espécimes do GI, GII e G controle negativo na estufa incubadora para obter presa final do cimento.

3.3.9 Método de Infiltração de Corantes.

A fim de avaliar a eficácia do selamento apical, utilizou-se o teste de infiltração com corante Azul de metileno 1 % preparado pelo (Departamento de Microbiologia, Instituto Universitário Egas Moniz, Caparica, Portugal) conforme descrito a seguir:

Após decorrer o período determinado dos espécimes na estufa incubadora, eles foram retirados e tiveram toda sua superfície externa da raiz coberta com 3 camadas de Verniz de unha incolor *ANNY Speed Dry Top Coat 917* (cosnova GmbH, Sulzbach, Alemanha) com exceção dos 2 mm apicais onde com auxílio de uma régua foi feito a marcação com um lápis, apenas para orientação do limite de aplicação do verniz, assim como se pode ver na figura a seguir (Fig. 24).

O GI, GII e G. controle positivo foram manuseados igualmente, apenas diferenciando o G. controle negativo o qual teve aplicação de três camadas de verniz em toda extensão da superfície externa



Figura 24 – Espécimes do G. controle positivo com aplicação das 3 camadas de verniz.

Após a completa secagem do Verniz de unha incolor *ANNY Speed Dry Top Coat 917* os espécimes foram colocados em tubos Eppendorf® de plástico 1,5 mL (Eppendorf SE, Hamburgo, Alemanha) e devidamente identificados e em seguida submersos em solução de azul de metileno a 1% por um intervalo de 72 horas para que pudesse ocorrer a infiltração.

Os espécimes foram colocados com o ápice voltado para o topo do tubo Eppendorf® de modo que o corante tenha facilidade de penetração pela força da gravidade (Fig. 25).

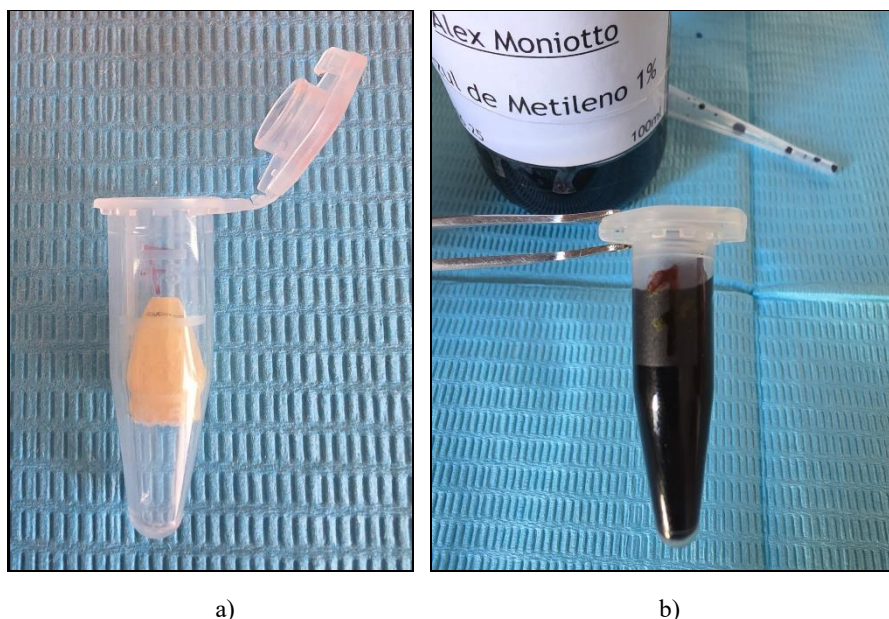


Figura 25 – Frasco Eppendorf® com identificação do espécime nº7 em posição de submersão: a) Frasco com espécime nº7 voltado para o topo sem azul de metileno a 1%; b) Frasco com espécime nº7 e azul de metileno 1% completamente submerso.

Após a verificação de que todos os espécimes estavam devidamente posicionados nos tubos Eppendorf® e com completa submersão em azul de metileno 1% as amostras foram colocadas em um suporte para frasco Eppendorf® e mantidos em uma estufa incubadora a 37°C para continuar simulando condições fisiológicas aproximadas e preservar os espécimes (Fig. 26).



Figura 26 – Espécimes de todos os grupos submersos em azul de metileno 1% dentro da estufa incubadora.

3.3.10 *Secção dos espécimes.*

Decorrido o tempo determinado para a infiltração com o corante azul de metileno a 1%, os espécimes foram lavados em água corrente durante aproximadamente 1 minuto, procedendo-se à remoção do verniz de unha incolor *ANNY Speed Dry Top Coat 917* com o auxílio de curetas periodontais (Gracey 3-4). Os espécimes foram posteriormente secos à temperatura ambiente (Fig. 27).



a) b)
Figura 27 – Aspeto dos espécimes após remoção do verniz: a) Espécime nº 12 G. I após lavagem, porém ainda com película de verniz; b) Espécime nº 14 G. II após remoção da película de verniz.

Seguidamente, os espécimes foram fixados num suporte de corte para micrótomo com godiva – *Hoffmann's Abdruckmasse Grün* (Hoffmann Dental Manufaktur GmbH, Berlim, Alemanha), de modo a formar um bloco de corte. Para garantir o paralelismo das secções, os espécimes foram posicionados de forma a manter o longo-eixo radicular perpendicular à superfície de corte (Fig. 28)



a) b)
Figura 28 – Espécime fixados num suporte de corte para micrótomo: a) Espécime aglutinada por godiva e fixada na base de corte; b) Vista coronal da posição de corte do micrótomo.

As raízes foram seccionadas em fatias utilizando um Micrótomo *Accutom-50* (Struers Inc., Cleveland, OH, EUA; sede: Ballerup, Dinamarca), operando a uma velocidade de 3200rpm e avanço de 0.350 mm/s, com irrigação contínua, e assim obtendo secções com 1 mm de espessura para análise linear (Fig. 29).

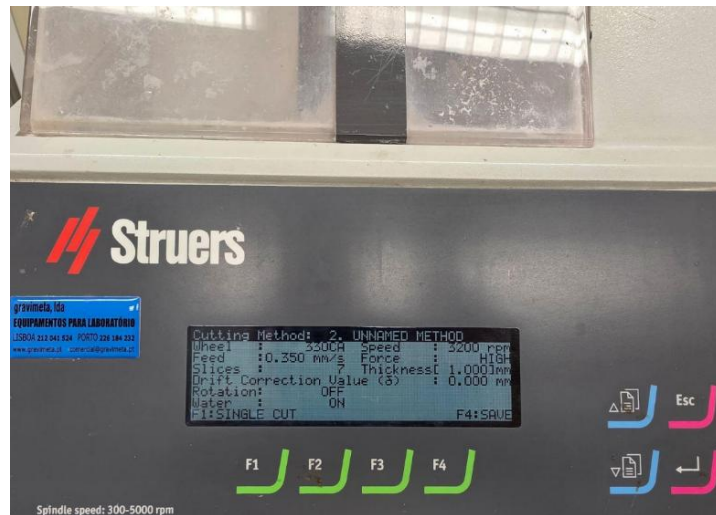


Figura 29 – Layout da configuração do micrótomo.

Seu disco de corte tem a espessura de 0,5mm sendo assim a espessura total de corte de 1,5mm, sendo assim obtivemos uma média de 10 a 11 secções por cada espécime.

3.3.11 Observação e medição da infiltração:

Após o corte com o Micrótomo *Accutom-50*, as secções dos espécimes foram cuidadosamente organizadas pela ordem em que foram obtidos. Cada fragmento foi então colado em lâminas microscópicas (Sliu-005-050; Lab box, Barcelona, Espanha) com recurso de uma cola Entellan (Merck, Darmstadt, Alemanha). Para garantir a rastreabilidade, cada uma das lâminas foram identificadas com o número correspondente do espécime e grupo experimental (Fig. 31)

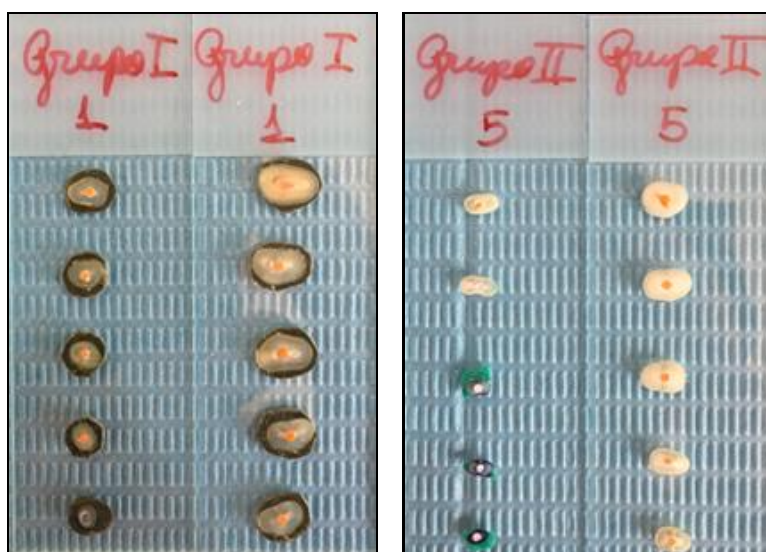


Figura 30 – Resultado das secções transversais, espécime nº1 G. I e nº5 G. II com 10 secções de amostra.

Sequencialmente, estas secções foram analisadas ao microscópio clínico (EXTARO 300 – Carl Zeiss Meditec AG, Oberkochen, Alemanha), com ampliação de 12,5x. O foco principal da observação foi a verificação da presença de corante, na interface entre a gutta-percha/cimento biocerâmico e material obturador/dentina, ao longo do canal radicular. Caso se detetasse corante em qualquer das interfases dos materiais obturadores, cimento, gutta-percha ou a dentina, a secção era considerada “positiva” (Fig. 31 a) e caso contrário, era classificada como “negativa” (Fig. 31 b). Todas as imagens produzidas com as fotografias estão disponíveis para consulta no capítulo dos Anexos.

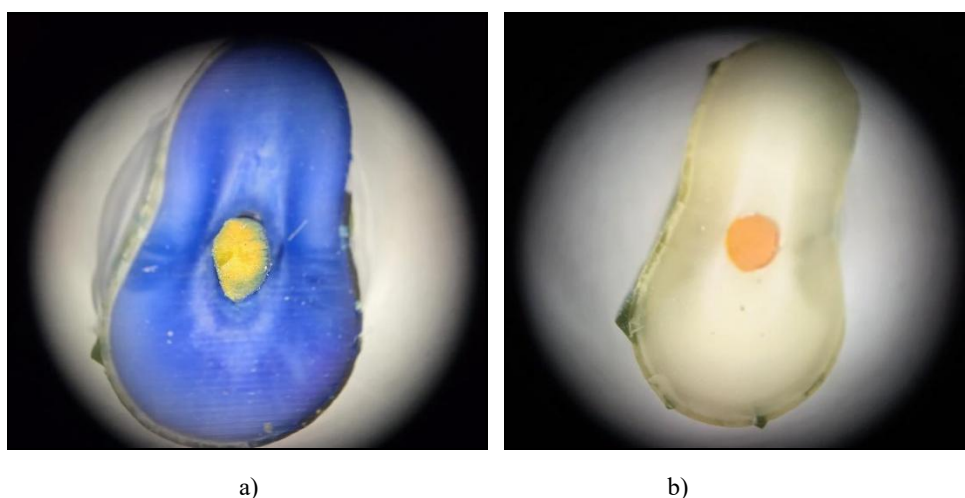


Figura 31 – Visualização de corte dos espécimes; a) Secção do espécime do grupo controle positivo com pigmentação; b) Secção do espécime do grupo controle negativo, sem pigmentação.

O propósito central deste procedimento foi perceber não só se ocorria a penetração do corante, mas também identificar exatamente a localização dessa infiltração ao longo de cada espécime.

Sequencialmente foi elaborado uma tabela para classificar os espécimes que tiveram infiltração e em qual milímetro ocorreu e assim obter uma média de infiltração entre os grupos I e II.

As secções com infiltração positiva foram atribuídas o valor de “1” e o parâmetro negativo obtido com valor de “0”.

As estatísticas descritivas, média, desvio-padrão (DP), mediana, quartis, mínimo e máximo e os gráficos (*boxplot*, histogramas e Q–Q plots) foram gerados no SPSS Statistical Package for the Social Sciences). A avaliação da normalidade utilizou o Kolmogorov–Smirnov com correção de Lilliefors e, como complemento, o Shapiro–Wilk. A comparação entre grupos foi conduzida com o Mann–Whitney U, solicitando

valores de p por Exact/Monte Carlo quando aplicável. Os intervalos de confiança obtidos por bootstrap foram produzidos com o módulo Bootstrapping (por exemplo, para a diferença de médias). Para contextualizar a magnitude do efeito, calcularam-se tamanhos de efeito r (derivado de z), Hedges' g (a partir de médias/DP).

4. RESULTADOS

O presente estudo teve como objetivo comparar a eficácia do selamento apical entre duas técnicas de obturação utilizando o mesmo cimento biocerâmico (NeoMTA® 2): a técnica de cone único com o material em consistência fluida, atuando como selador (Grupo I), e a técnica com plug apical de aproximadamente 4 mm seguido de cone único (Grupo II). Cada grupo experimental foi composto por nove espécimes válidos.

Inicialmente, procedeu-se à análise dos grupos de controlo e à identificação e gestão de valores atípicos, etapa essencial para assegurar a integridade e fidedignidade dos dados antes da comparação estatística entre os grupos experimentais.

Durante a verificação preliminar dos dados, foi identificado um valor atípico no Grupo I. O espécime 4 apresentou uma infiltração apical de 11 mm, considerado um *outlier* conforme três critérios paramétricos distintos: a regra do intervalo interquartil ($Q1 = 2$ mm; $Q3 = 4$ mm; $IQR = 2$ mm, resultando num limite superior de 7 mm), o critério da média ± 2 desvios-padrão ($3,7 \pm 2 \times 2,81$ mm, com limites entre $-1,92$ e $9,32$ mm) e o cálculo do z-score, que resultou em um valor aproximado de 2,6. Devido à violação simultânea destes três critérios, o valor foi removido da análise estatística por representar risco de enviesamento dos resultados.

No Grupo II, o espécime 19 foi excluído por apresentar características anatómicas divergentes do padrão estipulado, observadas somente após a etapa de secção. A sua morfologia incompatível com os critérios previamente definidos impossibilitou a comparação equitativa com os demais elementos do grupo.

Como esperado, os espécimes do grupo de controlo positivo revelaram infiltração máxima, dado que a técnica deliberadamente não se fez qualquer selamento em toda superfície do espécime. Por outro lado, no grupo de controlo negativo, a infiltração foi inexistente, o que era previsível tendo em conta o isolamento completo da superfície radicular e do ápice com camadas sucessivas de verniz (Tabela 3).

Após esta triagem e tratamento dos dados, foram calculadas as estatísticas descritivas de cada grupo, servindo de base para a análise comparativa subsequente.

Tabela 3 – Resultado com valores e média de infiltração apical dos espécimes dividido por grupos.

Grupo	Espécime	Tecnica de Obturação	Pigmentação em mm	Média de mm
Grupo Positivo	11	Apenas cone único	11 mm	11 mm
	8		11 mm	
	3		11 mm	
	25		11 mm	
	15		11 mm	
Grupo Negativo	21	Cone único	0 mm	0 mm
	18		0 mm	
	16		0 mm	
	9		0 mm	
	27		0 mm	
Grupo I	1	Cone único	1mm	2,88
	2		4mm	
	4		Eliminado	
	7		3mm	
	12		5mm	
	13		4mm	
	22		2mm	
	24		2mm	
	28		2mm	
30	3mm			
Grupo II	5	Plug + Cone único	3mm	3,66
	6		4mm	
	10		5mm	
	14		3mm	
	17		4mm	
	19		Eliminado	
	20		3mm	
	23		3mm	
	26		3mm	
29	5mm			

Após a exclusão do valor atípico identificado no Grupo I, foram obtidas as seguintes estatísticas (valores em mm): para o Grupo I (n = 9), a média da infiltração foi de 2,889 mm, com um desvio padrão (DP) de 1,269 mm. A mediana foi de 3,0 mm, o primeiro quartil (Q1) de 2,0 mm, o terceiro quartil (Q3) de 4,0 mm, com valores mínimos e máximos de 1,0 mm e 5,0 mm, respetivamente. No Grupo II (n = 9), a média foi de 3,667 mm, com DP de 0,866 mm, mediana de 3,0 mm, Q1 de 3,0 mm e Q3 de 4,0 mm, variando entre 3,0 mm (mínimo) e 5,0 mm (máximo).

O coeficiente de variação (CV) indicou uma dispersão maior no Grupo I (~45%) em comparação ao Grupo II (~24%).

Em termos médios, observou-se que o Grupo II apresentou uma infiltração apical superior em 0,78 mm relativamente ao Grupo I. Para auxiliar na visualização dessa

diferença, foram incluídas barras de intervalo de confiança a 95% (IC95%) em relação às médias. Importa destacar, contudo, que a comparação estatística entre os grupos foi realizada com métodos não paramétricos e de reamostragem, dado que a distribuição dos dados no Grupo II violou os pressupostos de normalidade devido aos valores que ficaram concentrados nos 3 e 4 mm, gerando um efeito de “piso” e assimetria à direita; este padrão afasta-se de uma distribuição normal. Por isso, a comparação entre grupos foi conduzida com testes robustos (permutação/Mann-Whitney).

Com o objetivo de ilustrar a dispersão e a distribuição intra-grupo de forma clara, foram construídos os gráficos descritivos: *boxplot* (Gráfico 1) e gráfico de dispersão individual (Gráfico 2), precedendo a análise formal da normalidade.

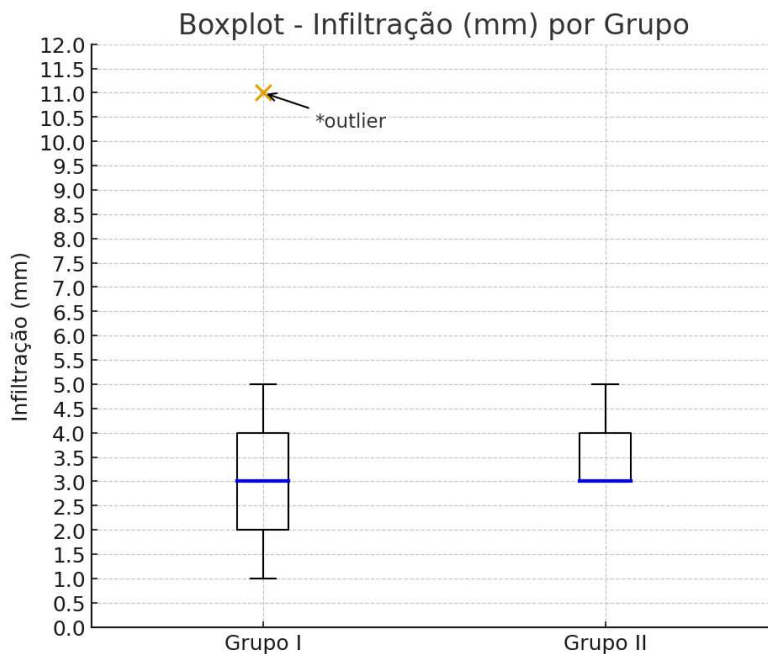


Gráfico 1 – Representação em *boxplot* da profundidade de infiltração do corante (mm) por grupo, mostrando mediana, intervalo interquartil e valores extremos.

A seguir, o gráfico 2 exhibe a dispersão individual dos valores observados para cada espécime, juntamente com a média e o desvio-padrão por grupo. Nota-se uma dispersão mais acentuada no Grupo I, enquanto os dados do Grupo II mostram maior uniformidade.

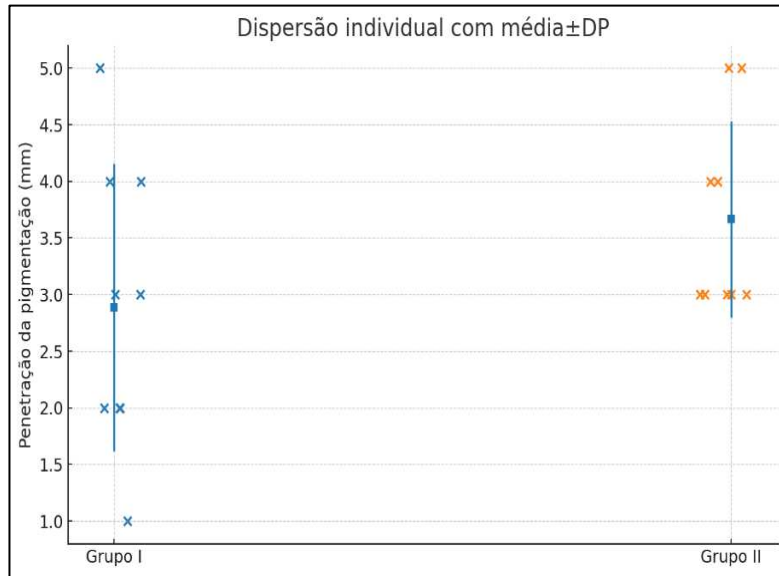


Gráfico 2 – Dispersão individual dos dados por grupo, com média assinalada (quadrado) e desvio-padrão representado por barras verticais.

As distribuições dos dois grupos foram visualizadas por histogramas: o gráfico 3 apresenta a distribuição dos valores de infiltração do Grupo I, enquanto o gráfico 4 mostra a distribuição correspondente ao Grupo II.

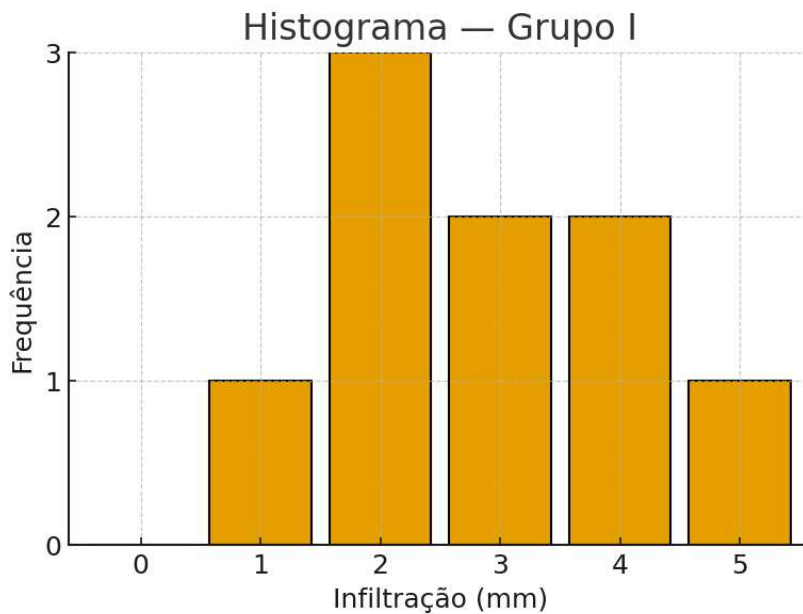


Gráfico 3 – Histograma da infiltração do corante (mm) no Grupo I (cone único), evidenciando distribuição mais ampla, condizente com o maior desvio-padrão e coeficiente de variação.

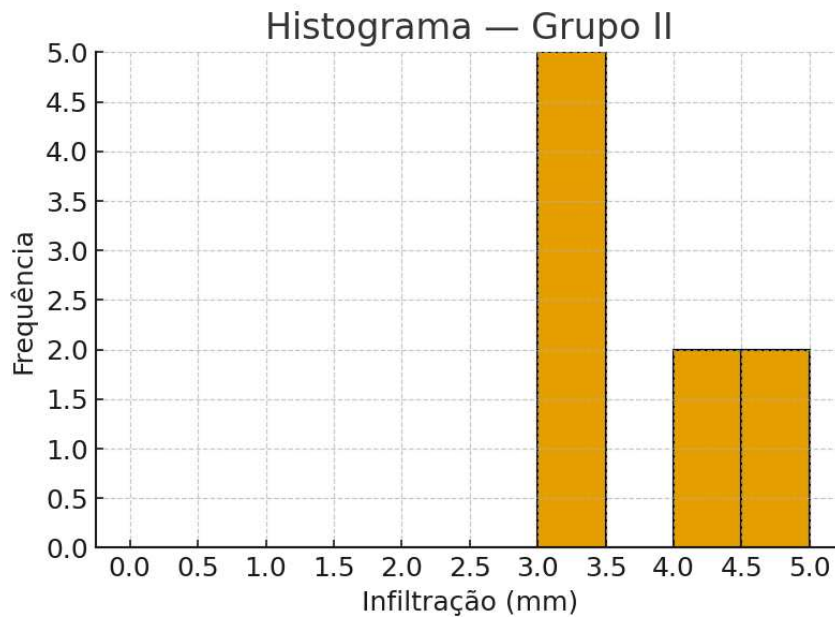


Gráfico 4 – Histograma da infiltração do corante (mm) no Grupo II (plug apical de NeoMTA® 2 + cone único), revelando distribuição mais concentrada, de acordo com os menores valores de DP e CV.

Avaliação da normalidade. Para diagnosticar a normalidade da distribuição dos dados, foi aplicado o teste de Kolmogorov–Smirnov com correção de Lilliefors, recorrendo a simulação de Monte Carlo com 20 000 réplicas para o cálculo dos p-valores. No Grupo I, obteve-se $D=0,2026$ e $p=0,3564$, não havendo evidência suficiente para rejeitar a hipótese de normalidade. Em contrapartida, no Grupo II, o valor de D foi de $0,3348$ com $p=0,0051$, indicando clara violação do pressuposto de normalidade.

Essa conclusão é corroborada pela análise gráfica: no Grupo I, o gráfico Q–Q mostra alinhamento com a reta teórica, com desvios discretos nas extremidades, compatíveis com uma distribuição aproximadamente normal. Já no Grupo II, observa-se um padrão em forma de “S” e uma ECDF afastada da curva normal teórica, o que reforça a ausência de normalidade (ver gráfico 5 a 8).

Em resumo, os dados do Grupo II não satisfazem o critério de normalidade ($p=0,0051$), ao passo que os do Grupo I não rejeitam esse pressuposto ($p=0,3564$). Diante dessa assimetria distributiva, optou-se pela aplicação de testes estatísticos robustos, incluindo métodos não paramétricos e abordagens baseadas em reamostragem.

A partir de uma leitura complementada pela função de distribuição empírica comparada à Normal (ECDF) para o Grupo I (gráfico 7) e para o Grupo II (gráfico 8).

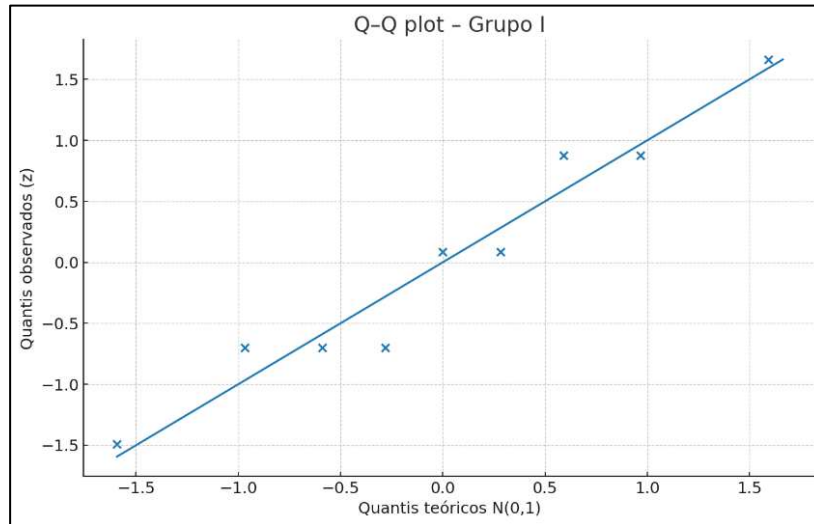


Gráfico 5 – Exibe o gráfico Q-Q do Grupo I comparado com a distribuição normal padrão; observa-se uma aproximação geral à reta teórica, com pequenos desvios nas extremidades

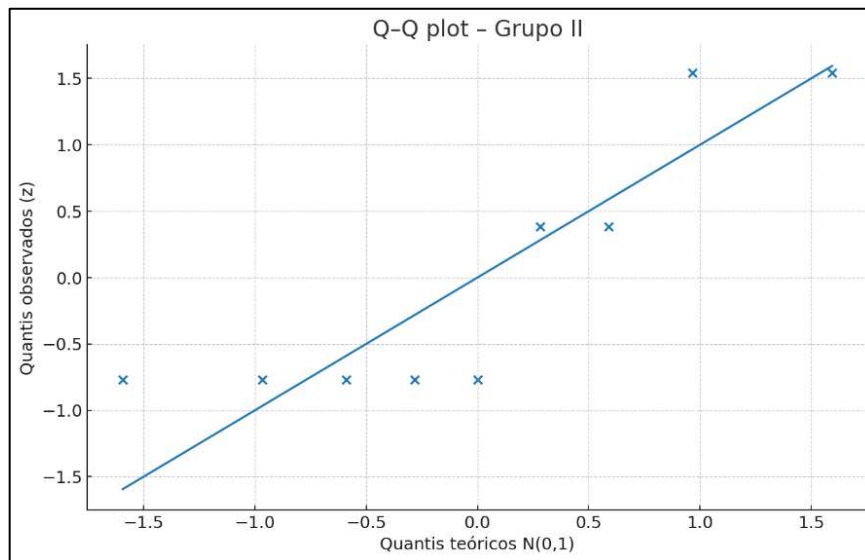


Gráfico 6 – Apresenta o Q-Q do Grupo II; o padrão em “S” indica claramente desvio em relação à normalidade.

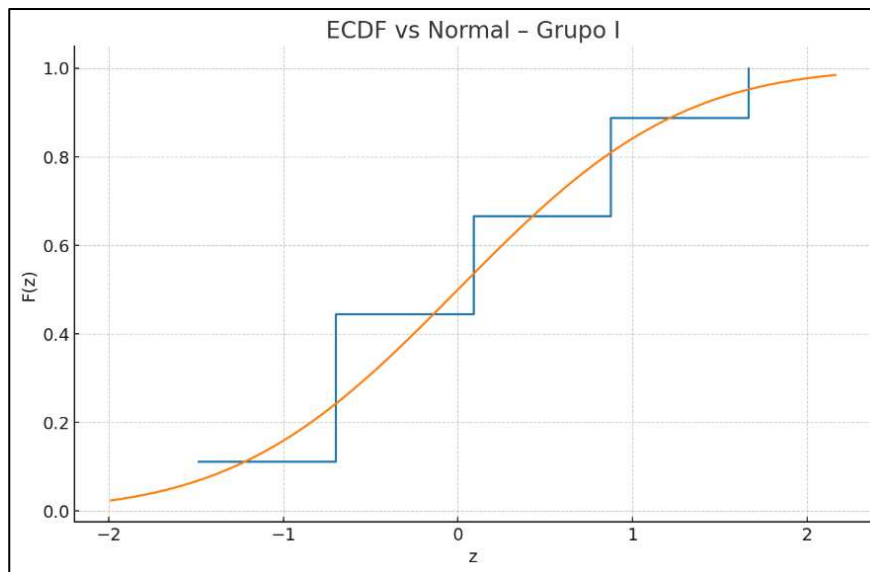


Gráfico 7 – Mostra a ECDF (função empírica de distribuição acumulada) do Grupo I sobreposta à curva normal teórica, revelando uma trajetória muito próxima à esperada.

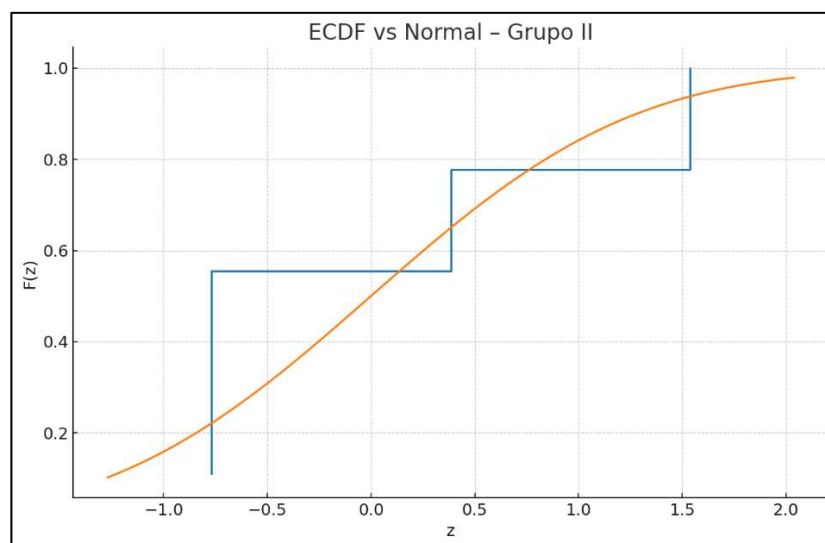


Gráfico 8 – Regista a ECDF do Grupo II sobre a mesma curva teórica; o afastamento pronunciado confirma a não normalidade dos dados ($p < 0,05$).

A comparação entre os grupos foi realizada através de um teste de permutação bicaudal de diferença de médias, resultando em uma estimativa de $\Delta = 0,78$ mm (diferença: Grupo II – Grupo I), sem evidência de diferença estatisticamente significativa ($p = 0,216$). O intervalo de confiança bootstrap para Δ (95 %) variou de $-0,11$ a $1,67$ mm, indicando possibilidade de efeito nulo ou de pequena magnitude em ambos os sentidos. Para estimar a incerteza, recorreu-se à reamostragem bootstrap/Monte Carlo, que gera réplicas sintéticas da amostra por amostragem com reposição. Essas réplicas (“clones”)

servem apenas para calcular intervalos de confiança e p-valores e não modificam o conjunto de dados original. As estatísticas principais foram obtidas na base real; as análises por bootstrap são executadas em cópias independentes. O outlier de 11 mm manteve-se excluído dos cálculos e apenas foi representado graficamente

Em concordância, o teste de Mann-Whitney U, com correção para empates, obteve $U = 25$, $z = -1,47$ e $p = 0,142$. Uma análise adicional realizada com o teste t de Welch resultou em $t = 1,52$ com graus de liberdade aproximados de 14,1. A ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos está em linha com a sobreposição visual das distribuições observadas nos *boxplots* e nos gráficos de dispersão individual (Gráficos 1 e 2).

Conclusivamente, considerando o nível de significância de $\alpha = 0,05$, não foi possível rejeitar a hipótese nula (H_0). Ambas as técnicas de obturação utilizando NeoMTA® 2 apresentaram comportamentos estatísticos semelhantes em termos de infiltração linear. Embora haja uma tendência numérica de infiltração média superior no Grupo II, o intervalo de confiança incluindo o valor zero e o tamanho reduzido da amostra limitam a capacidade de demonstrar superioridade clínica ou estatística

5. DISCUSSÃO

O tratamento endodôntico de dentes com ápice aberto mantém-se como um desafio clínico de grande relevância, sobretudo pela dificuldade em assegurar um selamento apical tridimensional eficaz e estável. A inexistência de uma constrição apical fisiológica favorece tanto a extrusão de materiais como a infiltração de fluidos e microrganismos, fatores que contribuem para a persistência de lesões periapicais e potenciais falhas terapêuticas (Delikan & Aksu, 2020; Sisli & Ozbas, 2017). Ensaio laboratoriais e estudos com micro-CT demonstram que, em modelos de ápice aberto, a qualidade do selamento depende de parâmetros como a adaptação marginal e o grau de porosidade do material obturador (Sisli & Ozbas, 2017). Assim, a avaliação de técnicas e materiais capazes de maximizar a vedação em cenários de ápice aberto assume um valor clínico e científico (Delikan & Aksu, 2020; Sisli & Ozbas, 2017).

Neste enquadramento, a análise comparativa entre o *plug* apical com MTA e a técnica de cone único com selador biocerâmico revela-se particularmente pertinente em anatomias com morfologia em funil e ausência de constrição apical. Em tais condições, o risco de extrusão e de falhas de vedação é substancialmente superior. O MTA é reconhecido pela capacidade de induzir a formação de uma barreira mineralizada; todavia, o seu desempenho depende de forma crítica da espessura do *plug* e da uniformidade da sua compactação, aspetos nem sempre exequíveis com reprodutibilidade clínica (Hachmeister et al., 2002). Por sua vez, seladores biocerâmicos, pela elevada fluidez e pela aptidão para promover zonas híbridas mineralizadas nos túbulos dentinários, podem ocupar espaços residuais mesmo em geometrias mais desafiantes (Sisli & Ozbas, 2017; Viapiana et al., 2014). Apesar da crescente utilização de ambas as abordagens, persiste uma escassez de estudos que as comparem diretamente sob condições laboratoriais controladas e em modelos que repliquem fielmente a imaturidade apical; o presente trabalho propõe-se precisamente contribuir para colmatar esta lacuna, oferecendo evidências que contribua para decisões clínicas mais fundamentadas (Bani et al., 2015).

No presente estudo, comparou-se, *in vitro*, a capacidade de selamento apical de duas técnicas aplicando o mesmo cimento biocerâmico NeoMTA® 2: (consistência 1) técnica de cone único com o material em consistência de selador; (consistência 2) *plug* apical de aproximadamente 4 mm do mesmo material, seguido da técnica de cone único.

O modelo experimental foi padronizado com forame de 1,20 mm, sendo a infiltração linear de corante em milímetros o desfecho analisado. A opção por um forame amplo acompanha a literatura que tem simulado diâmetros entre 1,0 e 1,4 mm, utilizando plugs de 4 a 5 mm para testar a eficácia de barreiras apicais (Khalilak et al., 2012; Sisli & Ozbas, 2017; Van Westerveld et al., 2019). Acresce que propriedades físico-químicas intrínsecas aos cimentos hidráulicos, nomeadamente bioatividade, libertação de iões cálcio e expansão higroscópica, podem condicionar o desempenho do material, quer na aplicação como selador fluido, quer na forma de *plug* sólido (Grech, Mallia, & Camilleri, 2013; Raman & Camilleri, 2024). Estes elementos metodológicos e materiais articulam-se com a justificação teórica acima exposta: em *plugs* de MTA, a espessura e uniformidade são determinantes (Hachmeister et al., 2002), enquanto os seladores biocerâmicos podem compensar irregularidades anatómicas pela penetração e mineralização intratubular (Sisli & Ozbas, 2017; Viapiana et al., 2014).

Os resultados evidenciaram uma diferença média $\Delta \approx +0,78$ mm, traduzindo maior infiltração no Grupo II em comparação com o Grupo I. Contudo, esta diferença não atingiu significância estatística, conforme o teste de permutação ($p = 0,216$) e o teste de Mann–Whitney ($p = 0,142$). Este comportamento é compatível com trabalhos que reportam que a técnica de mistura dos cimentos avaliados, associada à técnica de inserção e condensação, influencia diretamente a porosidade e, conseqüentemente, o selamento (Sisli & Ozbas, 2017). A metodologia de avaliação (teste de infiltração com corante versus modelos bacterianos) pode igualmente modular a magnitude das diferenças detetadas (Sisli & Ozbas, 2017). Deste modo, a extrapolação imediata para a prática clínica deve ser prudente.

A discussão encontra-se organizada em três eixos principais. Em primeiro lugar, a interpretação mecanística dos resultados e da sua magnitude, distinguindo a significância estatística da relevância clínica. Em segundo, a análise da plausibilidade biológica do NeoMTA® 2 quando aplicado como selador fluido versus *plug* sólido, contemplando aspetos como a bioatividade, a libertação de cálcio, o tempo de presa e a interação dentina-cimento (Grech et al., 2013; Raman & Camilleri, 2024). E por último, uma comparação crítica com a literatura disponível sobre o uso de biocerâmicos como seladores, *plugs* de 4 a 5 mm, aplicação da técnica de cone único em ápices amplos e métodos de infiltração (corantes versus bacterianos), discutindo pontos de convergência e divergência.

Esta abordagem permite contextualizar os resultados obtidos, avaliar a sua validade e implicações clínicas, reconhecer limitações e propor linhas de investigação futura. A mensagem central a reter é de cautela: apesar da ausência de significância estatística, observa-se uma tendência numérica desfavorável ao uso do *plug* apical ≈ 4 mm. Tal achado reabre a reflexão sobre o impacto da técnica, da espessura do *plug* e da manipulação do material no desempenho selador em dentes com ápice aberto, sobretudo considerando as propriedades inerentes dos cimentos hidráulicos e as limitações dos testes com corantes face a modelos bacterianos (Hachmeister et al., 2002).

5.1 Achados principais e sua interpretação imediata

O resultado central deste trabalho mostrou que $\Delta \approx +0,78$ mm correspondeu a uma maior infiltração linear de corante no grupo com *plug* apical de ≈ 4 mm de NeoMTA® 2, quando comparado com o grupo obturado exclusivamente pela técnica de cone único com o mesmo material em consistência de selador. Esta diferença, embora presente em termos numéricos, não alcançou significância estatística, quer no teste de permutação ($p = 0,216$), quer no teste de Mann–Whitney ($p = 0,142$), sustentando que ambas as abordagens exibiram desempenho estatisticamente semelhante no modelo utilizado. Assim, a leitura imediata é que o *plug* apical não evidenciou vantagem na sua capacidade de selamento neste cenário experimental e, inclusive, sugere uma tendência desfavorável ao seu uso isolad, padrão possivelmente associado à sensibilidade da técnica de colocação do MTA (Sisli & Ozbas, 2017) e a relatos de ocorrência de infiltração bacteriana em *plugs* de MTA, sobretudo com entrega ortógrada ou em protocolos específicos de avaliação de infiltração relacionada a técnica empregada (Hachmeister et al., 2002; Khalilak et al., 2012).

Importa sublinhar que a ausência de significância estatística não se confunde com equivalência clínica. A magnitude observada, ainda que pequena, levanta questões pertinentes sobre o papel da espessura do *plug*, da adaptação marginal e das condições de humidade no comportamento do material (Al-Kahtani et al., 2005). Tais variáveis podem explicar discrepâncias entre resultados estatisticamente não significativos e implicações clínicas relevantes, sobretudo em dentes com ápice aberto, nos quais pequenas diferenças de vedação podem ter impacto clínico amplificado.

A interpretação deve igualmente considerar a consistência interna do estudo. A adoção do teste de permutação como análise principal foi apropriada ao tamanho amostral reduzido ($n = 9$ por grupo) e evitou pressupostos de normalidade pouco robustos neste contexto. O teste secundário de Mann–Whitney apresentou resultados convergentes, reforçando a solidez do padrão de ausência de diferenças estatisticamente significativas, abordagem frequentemente empregue em amostras pequenas ou dados não paramétricos (Odabaşı Tezer et al., 2024; Roy et al., 2024; Sisli & Ozbas, 2017).

Do ponto de vista clínico, a magnitude do efeito ($\approx 0,78$ mm) pode ser entendida como um sinal direcional que justifica investigação adicional. Estudos prévios indicam que a qualidade do selamento apical e a ausência de porosidade são determinantes para a longevidade do tratamento, em especial em dentes com ápice aberto, uma vez que a porosidade influencia negativamente os resultados a longo prazo e a sobrevivência dentária (Odabaşı Tezer et al., 2024). A capacidade de diferentes materiais e técnicas em prevenir a microinfiltração tem sido amplamente estudada, frequentemente quantificada em milímetros, e variações na espessura da barreira apical (por exemplo, de 1–2 mm para 3–4 mm) mostram eficácia distinta na prevenção da infiltração (Delikan & Aksu, 2020; İnan et al., 2007a). Mesmo admitindo que entidades de escala nanométrica possam penetrar, a eficiência de selamento mantém-se crucial (Roy et al., 2024). Nesse sentido, a falta de significância estatística não exclui relevância clínica; o achado deve ser encarado como exploratório, e não como prova de equivalência entre técnicas, já que há relatos de maior falha apesar de p-valores não significativos e a literatura frequentemente aponta ausência de diferenças estatisticamente significativas na capacidade de selamento entre técnicas e materiais (Karrar et al., 2025; Odabaşı Tezer et al., 2024; Pontoriero et al., 2021, 2022).

5.2 Plausibilidade biológica e mecanismos

A análise dos dados obtidos deve ser contextualizada à luz dos mecanismos fisiológicos e físico-químicos do NeoMTA® 2, considerando quer o seu uso como selador fluido, quer como *plug* apical com espessura aproximada de 4 mm (Delikan & Aksu, 2020). Os cimentos à base de silicato de cálcio, incluindo o NeoMTA®, são reconhecidos pela sua bioatividade, evidenciada pela libertação de iões cálcio (Ca^{2+}) e pela subsequente formação de apatite na interface material-dentina (Camilleri et al., 2022; Grech et al.,

2013; Roy et al., 2024; Zamparini et al., 2022). Estes fenômenos contribuem significativamente para a vedação apical e induzem mineralização. A capacidade de absorção de água, bem como as alterações dimensionais positivas durante a presa, são características adicionais que possibilitam a compensação de *microgaps* (Viapiana et al., 2014), reforçando a viabilidade da técnica de cone único associada a selador biocerâmico.

5.2.1 *NeoMTA® 2 enquanto selador: mecanismos plausíveis*

Na sua forma fluida, os cimentos de silicato de cálcio como o NeoMTA Plus demonstram reduzida microinfiltração, tirando partido da humidade presente nos túbulos dentinários para desencadear a hidratação (Karobari et al., 2021). Esta interação promove uma boa penetração nos túbulos e uma adaptação eficaz às irregularidades da parede radicular (De-Deus et al., 2022; Roy et al., 2024), favorecendo o preenchimento uniforme e minimizando a presença de espaços vazios. As análises físico-químicas e por micro-CT (Karobari et al., 2021) evidenciam que a presa hidráulica (De-Deus et al., 2016) conduz à formação de uma interface estável com a dentina, o que poderá explicar a baixa taxa de infiltração. A fluidez do selador e a sua expressiva libertação de íons cálcio facilitam a rápida precipitação de apatite na interface, promovendo a reparação tecidual (De-Deus et al., 2022). Tais atributos justificam o desempenho observado no grupo tratado com cone único e selador, comparável ao grupo com *plug* apical.

5.2.2 *NeoMTA® 2 como plug apical especificidades*

A aplicação de *plugs* de espessura aproximada de 4 mm apresenta limitações operatórias. A introdução do material em bloco favorece a formação de microvazios se a compactação não for uniforme, dado o carácter sensível da técnica de inserção do MTA (Odabaşı Tezer et al., 2024; Sisli & Ozbas, 2017). A evidência fornecida por estudos com micro-CT reforça que tanto o desenho da cavidade como o método de condensação influenciam a porosidade final. Técnicas manuais tendem a reduzir a porosidade comparativamente às técnicas ultrassónicas ou rotatórias onde se utilizou Xp endo shaper para condensação do MTA (Odabaşı Tezer et al., 2024; Sisli & Ozbas, 2017). Embora *plugs* com 5 mm demonstrem selamento bacteriano superior face aos de 2 mm (AlKahtani et al., 2005), os de 4 mm também se revelam eficazes, proporcionando selamento adequado (Roy et al., 2024). Contudo, falhas de adaptação e porosidades continuam associadas à manipulação inadequada do material (Odabaşı Tezer et al., 2024; Sisli &

Ozbas, 2017), o que poderá explicar eventuais resultados desfavoráveis com plugs de 4 mm observados neste estudo.

5.2.3 *Condições do ápice aberto padronizado (1,20 mm)*

A uniformização do forame apical com diâmetro de 1,20 mm assegurou controle experimental, mas representa uma situação extrema em termos de desafio ao selamento. A geometria do canal, nomeadamente o seu calibre, é reconhecidamente um fator crítico na eficácia da obturação (Rechenberg & Paqué, 2013). Em ambiente *in vitro*, a técnica de penetração de corantes tende a amplificar a deteção de falhas mínimas, embora a sua correlação com o sucesso clínico permaneça incerta (Gillen et al., 2011). Reconhece-se ainda que este método possui limitações e carece de paralelismo com outras abordagens de avaliação de infiltração (Camps & Pashley, 2003). Contudo, a elevada sensibilidade dos ensaios laboratoriais e a busca constante por melhorias permite comparar de forma precisa os desempenhos dos materiais e técnicas. A utilização de microtomografia computadorizada reforça esta análise ao identificar porosidades que, em condições clínicas, poderão permitir a migração bacteriana (El-Khatib et al., 2020). Assim, apesar do desafio representado pelo ápice padronizado, o modelo permitiu uma avaliação fiável da performance seladora do NeoMTA® 2.

5.2.4 *Artefactos técnicos vs. propriedades do material*

A diferenciação entre limitações técnicas e propriedades intrínsecas do material é essencial na interpretação dos resultados. Fatores como o grau de humidade no interior do canal no momento da aplicação, que pode interferir na adesão dos seladores biocerâmicos, bem como a técnica de condensação adotada (Odabaşı Tezer et al., 2024), desempenham um papel decisivo na adaptação do plug apical. Em ápices amplamente abertos, a resistência periférica é reduzida, aumentando o risco de extrusão (Hachmeister et al., 2002) e dificultando a obtenção de uma compactação ideal. Estes fatores não estão diretamente relacionados com a composição do NeoMTA® 2, mas sim com o seu manuseamento clínico.

Adicionalmente, deve considerar-se a bioatividade como características intrínsecas dos cimentos biocerâmicos, com efeito independente da técnica aplicada. A natureza hidrofílica do NeoMTA® promove a expansão durante a presa (Alsubait et al., 2014), enquanto a bioatividade se manifesta pela formação de hidroxiapatite e interação

química com a dentina (França et al., 2019). Assim, os achados do presente trabalho podem refletir não apenas limitações operatórias na aplicação de plugs com 4 mm, sendo que a literatura recomenda uma espessura eficaz entre 3 mm e 4 mm (Delikan & Aksu, 2020, citando Bani et al., 2015), mas também a performance inerente do NeoMTA® 2

5.3 Comparação crítica com a literatura

A análise dos dados obtidos deve ser contextualizada tendo em consideração o corpo de conhecimento existente sobre cimentos biocerâmicos, utilização de *plugs* apicais, eficácia da técnica de cone único em ápices abertos e metodologias aplicadas na avaliação de infiltração. Nos tópicos seguintes, é realizada uma comparação detalhada com a literatura para cada um destes eixos.

5.3.1 Biocerâmicos/MTA enquanto seladores

A aplicação de cimentos biocerâmicos como seladores tem sido amplamente explorada, principalmente devido à sua bioatividade e à expansão higroscópica durante a presa. Dados laboratoriais sugerem que o MTA e outros compostos à base de silicato de cálcio, quando utilizados como seladores numa técnica de cone único, apresentam boa adaptação marginal e eficácia comparável, ou até superior, à de cimentos obturadores convencionais (Khalil et al., 2016; Pontoriero et al., 2022). O crescente interesse por esta técnica tem sido revitalizado com o advento de cimentos biocerâmicos, cuja formulação visa uma interação biológica com a dentina, promovendo biomineralização e redução de porosidade (Khalil et al., 2016). A sua eficácia no selamento apical de canais com forames amplos também tem sido documentada, tanto em contextos de obturação como em procedimentos de microcirurgia endodôntia, onde é essencial garantir vedação hermética (Shinbori et al., 2015). O presente estudo, ao revelar que o NeoMTA® 2, aplicado como selador fluido, demonstrou desempenho semelhante ao plug, corrobora estes achados, indicando que tal material poderá aliar simplicidade de aplicação a uma vedação eficaz.

5.3.2 Plugs apicais com 4 a 5 mm

Existe um consenso generalizado na literatura de que *plugs* apicais com espessura igual ou superior a 5 mm apresentam melhores resultados de selamento do que os de 3 e 4 mm (Bani et al., 2015). No entanto, outros estudos com recurso à micro-CT sugerem que o sucesso do selamento não depende exclusivamente da espessura, mas também da técnica de inserção e compactação do material, aspetos que influenciam diretamente a

presença de porosidades (Bani et al., 2015; Delikan & Aksu, 2020). Assim, as variações nos resultados inter-estudos poderão refletir diferenças metodológicas mais amplas do que apenas a variável “espessura”.

5.3.3 *Técnica de cone único em canais com ápice aberto*

A aplicação da técnica de cone único em canais com ápice amplamente aberto tem sido objeto de debate, dado o risco acrescido de infiltração. Estudos mais antigos demonstraram que, sem modificação ou material de apoio adequado, esta técnica poderá não assegurar um selamento apical eficaz (Pommel et al., 2001). Contudo, a sua associação com cimentos biocerâmicos tem demonstrado resultados promissores, sobretudo em canais circulares. Métodos como o cone único modificado (MS) e o cone único com ativação ultrassônica (MSUA) demonstraram menor volume de vazios em comparação com a técnica de condensação lateral, sendo a MSUA particularmente eficaz (Kim et al., 2021). Outros autores salientam a fluidez e a estabilidade dimensional dos seladores biocerâmicos, tornando-os especialmente indicados para técnicas de cone único (Candeiro et al., 2012). Resultados consistentes têm demonstrado que materiais como NeoMTA Plus e Biodentine mantêm capacidade de vedação satisfatória mesmo em dentes imaturos ou com ápices abertos (Karojari et al., 2021; El-Khatib et al., 2020). A fluidez do NeoMTA® 2, aliada à sua bioatividade, poderá, assim, compensar a ausência de constrição apical anatômica e justificar os resultados observados.

5.3.4 *Modelos de infiltração: corante vs. bactérias*

A escolha do método de avaliação da infiltração influencia significativamente a sensibilidade e a interpretação dos resultados. Modelos com corantes, como o azul de metileno, são amplamente utilizados pela sua simplicidade e baixo custo (İnan et al., 2007a). A sua elevada sensibilidade resulta do tamanho molecular reduzido, o que facilita a deteção de microfugas (Roy et al., 2024). Contudo, por serem mais sensíveis do que os modelos bacterianos, podem evidenciar infiltrações que não se traduzem em falhas clínicas (Khalilak et al., 2012). Modelos com bactérias, por outro lado, são considerados mais representativos da realidade clínica, permitindo uma avaliação mais direta da eficácia na prevenção da penetração microbiana (Khalilak et al., 2012). A literatura refere discrepâncias frequentes entre os dois métodos, atribuídas às diferenças nos mecanismos de penetração e nos critérios de avaliação (İnan et al., 2007). Assim, os resultados obtidos

com corante devem ser interpretados com cautela, reconhecendo-se que podem amplificar falhas que não têm necessariamente relevância clínica.

5.3.5 *Conflitos e variabilidade de evidência*

Embora muitos estudos realcem as vantagens do MTA como material de plug, como a sua elevada adaptação marginal (Orosco et al., 2010), resistência à fratura (Bortoluzzi et al., 2007) e adequação como alternativa ao hidróxido de cálcio em tratamentos prolongados (Ghaziani et al., s.d.), outros trabalhos apresentam resultados menos favoráveis. Por exemplo, Andelin et al. (2002) observaram maior infiltração com MTA em comparação com guta-percha e selador. Estas divergências podem resultar de fatores como o momento de avaliação (por exemplo, tempo de presa), metodologia utilizada (corante, bactérias ou microtomografia) e espessura dos *plugs* (Candeiro et al., 2012; Pommel et al., 2001). Existem evidências de que a eficácia do selamento apical com MTA melhora quando a obturação final é adiada (Candeiro et al., 2012).

5.3.6 *Síntese interpretativa por eixo temático*

No que concerne aos cimentos biocerâmicos, os dados disponíveis sustentam a sua capacidade de vedação mesmo em situações de forame alargado. O desempenho observado do NeoMTA® 2 no presente estudo, em consistência fluida, está em consonância com publicações que relatam boa adaptação marginal e propriedades bioativas benéficas (Karojari et al., 2021; Orosco et al., 2010; Tomás-Catalá et al., 2018). Quanto aos *plugs* apicais, a literatura continua dividida quanto à espessura ideal, sendo os resultados aqui obtidos coerentes com a visão de que 4 mm poderá não ser suficiente em todas as situações. No entanto, outros estudos demonstraram que espessuras de 3 e 4 mm já conferem selamento eficaz (Bani et al., 2015). A técnica de cone único, quando associada a biocerâmicos de última geração, mostrou-se eficaz em contextos desafiantes como o de ápice aberto, facto já descrito em investigações anteriores (AlHiyasat & Alfirjani, 2019; Candeiro et al., 2012; Pontoriero et al., 2022). Por fim, a avaliação metodológica destaca a relevância de se considerar o impacto da escolha do modelo de infiltração, sendo os testes com corante mais sensíveis, mais simples e com menos custo mas menos representativos da realidade clínica, enquanto os testes bacterianos oferecem melhor translação, embora também com limitações (Camps & Pashley, 2003; Oliver & Abbott, 2001; Souza et al., 2008; De-Deus et al., 2008).

5.4 Implicações clínicas

A interpretação dos resultados obtidos neste estudo apresenta relevância direta para a prática clínica endodôntica, particularmente em casos de tratamento de dentes com ápice aberto. A inexistência de uma diferença estatisticamente significativa entre as duas abordagens avaliadas indica que, no âmbito do modelo experimental utilizado, tanto a técnica de cone único com NeoMTA® 2 em forma fluida, como a combinação de *plug* apical de 4 mm seguido de cone único, se revelam opções clinicamente viáveis. Contudo, a tendência menos favorável observada com a aplicação do *plug* apical justifica uma análise crítica da sua utilização, sobretudo em contextos clínicos onde o controle de humidade e a adaptação do material são variáveis difíceis de gerir (Ghaly et al., 2025; Karobari et al., 2021).

Outro aspeto de interesse clínico é o risco de extrusão do material. A inserção de um *plug* de 4 mm em dentes com ápice amplamente aberto pode facilitar o extravasamento de cimento para os tecidos periapicais, especialmente quando não existe suporte dentinário adequado (Delikan & Aksu, 2020; Khalilak et al., 2012; Lawley et al., 2004; Martin et al., 2007). Modelos animais e ensaios clínicos têm demonstrado que a extrusão de cimentos biocerâmicos pode desencadear uma resposta inflamatória transitória, geralmente autorresolutiva (Cosme-Silva et al., 2019; Ferreira et al., 2019; Mente et al., 2013). Estes dados realçam a importância de técnicas minuciosas de inserção e condensação, bem como da realização imediata de radiografias de controlo para garantir a correta localização e adaptação do *plug* (Lawley et al., 2004; Martin et al., 2007; Sisli & Ozbas, 2017).

O controlo da humidade e o tempo necessário para a presa do NeoMTA® 2 constituem variáveis determinantes. O uso do material como selador fluido pode contribuir para reduzir falhas associadas à instabilidade dimensional dos *plugs*. Esta hipótese é apoiada pelos resultados do presente estudo, que demonstram equivalência entre os grupos em termos de infiltração linear. Estudos laboratoriais sugerem que a presença excessiva de humidade pode comprometer a integridade do material, favorecendo a formação de poros internos. Neste cenário, a técnica de cone único com biocerâmico surge como uma abordagem eficiente e menos dependente de variáveis

operatórias sensíveis (Sisli & Ozbas, 2017; Travassos et al., 2022; Yadav & Khanna, 2020), possibilitando um selamento mais rápido (Travassos et al., 2022).

A avaliação da adaptação do material deve ser realizada por meio de exames radiográficos. O profissional deve assegurar não só a extensão do material até ao limite apical, como também a sua densidade radiográfica uniforme, indicadora indireta da ausência de vazios. Técnicas imagiológicas avançadas, como a micro-CT, demonstraram que os *plugs* colocados em massa tendem a apresentar mais irregularidades internas, enquanto os seladores fluidos evidenciam uma distribuição mais homogênea (Sisli & Ozbas, 2017).

Do ponto de vista clínico, estas considerações podem ser operacionalizadas através de raciocínios heurísticos em situações com controlo de humidade comprometido, a preferência deve recair sobre o NeoMTA® 2 em forma fluida, aplicado com a técnica de cone único; se houver risco significativo de extrusão, deverão ser priorizadas técnicas que impliquem menor pressão de inserção e camadas mais delgadas de material; em cenários com anatomia favorável e isolamento eficaz, a técnica do *plug* poderá e deve ser considerada, desde que complementada com confirmação radiográfica e tempo adequado para a presa inicial (Heran et al., 2019).

Em conclusão, os resultados deste estudo sugerem que:

- (I) O uso do NeoMTA® 2 como selador representa uma opção promissora pela sua adaptabilidade fluida e resistência a variações ambientais;
- (II) O *plug* apical de 4 mm não apresentou risco de extrusão quando acompanhada das ferramentas adequadas para sua inserção.

5.5 Robustez metodológica e potenciais vieses

O delineamento inicial deste estudo previa a utilização de um total de 70 espécimes dentários, com o objetivo de aumentar a fiabilidade e a solidez estatística dos resultados. A amostragem foi estruturada por grupos conforme o diâmetro apical: Grupo I (0,70 mm), Grupo II (0,90 mm) e Grupo III (1,10 mm), cada um com 20 dentes. Estes seriam subdivididos de forma equitativa em seis subgrupos: os obturados pela técnica de cone único (GIS1, GIIS1, GIIS1; n = 10 cada) e os obturados com *plug* biocerâmico seguido de cone único (GIS2, GIIS2, GIIS2; n = 10 cada). Além disso, foram definidos dois grupos de controlo, positivo e negativo com cinco espécimes cada, respeitando

diretrizes metodológicas recomendadas para garantir grupos anatomicamente homogêneos e comparáveis em estudos laboratoriais em endodontia (Xu et al., 2016). Todos os dentes foram devidamente codificados com marcadores permanentes vermelhos para facilitar a rastreabilidade durante as várias etapas do protocolo experimental.

Após a aplicação dos materiais nos subgrupos designados e nos grupos de controlo negativo, todos os espécimes foram armazenados em uma estufa incubadora a 37 °C e 100% de humidade para assegurar a hidratação completa dos cimentos biocerâmicos, conforme práticas laboratoriais reconhecidas (Barakat et al., 2025; Casino Alegre et al., 2022; Wang et al., 2018). No entanto, decorrido um período de sete dias, constatou-se a migração da tinta utilizada na marcação, a qual penetrou nos canais radiculares, contaminando significativamente a zona de análise. Este fenómeno comprometeu a integridade dos espécimes, uma vez que a introdução de substâncias não controladas pode originar artefactos e enviesar os resultados, sobretudo em estudos que visam a análise da penetração dos materiais nos túbulos dentinários (Casino Alegre et al., 2022; Wang et al., 2018). A literatura recomenda o uso de marcadores fluorescentes controlados, como o Fluo-3 (Barakat et al., 2025) ou a Rodamina B (Casino Alegre et al., 2022), para assegurar que qualquer penetração observada corresponde exclusivamente ao material testado. Perante a possibilidade de resultados inválidos, decidiu-se pela exclusão de todos os espécimes comprometidos, em favor da preservação da validade interna do estudo.

Face à redução significativa da amostra, foi realizada uma nova análise da qualidade dos espécimes remanescentes e, em consequência, o estudo foi redefinido com um total de 30 elementos.

Este redirecionamento experimental teve como foco central avaliar a capacidade de vedação apical em condições de ápice aberto padronizado.

Importa referir que, apesar do rigor metodológico associado aos modelos *in vitro*, a sua aplicabilidade clínica permanece limitada. A literatura reconhece que ensaios laboratoriais não reproduzem integralmente a complexidade do ambiente clínico (Roy et al., 2024), sendo que modelos de infiltração por corante, embora sensíveis, carecem de validade externa consolidada (Oliver & Abbott, 2001). Fatores como a morfologia radicular, a natureza da dentina, e a influência dos fluídos biológicos são difíceis de simular. Estudos alertam ainda para o carácter semiquantitativo da infiltração por corante,

cuja interpretação deve ser cautelosa devido à influência de múltiplas variáveis (Lawley et al., 2004; Odabaşı Tezer et al., 2024).

Outro aspeto crucial reside no número reduzido de espécimes por grupo ($n = 9$), o que afeta diretamente a precisão estatística. Tamanhos amostrais diminutos aumentam o risco de erro tipo II, dificultando a deteção de efeitos reais (Bidar et al., 2010; Chala et al., 2011). Chala et al., (2011) sublinham, nomeadamente, que pequenas amostras comprometem a generalização dos dados e justificam a necessidade de estudos com maior poder estatístico. Esta limitação pode, em parte, explicar a ausência de significância estatística nos testes aplicados ($p = 0,216$ e $p = 0,142$), apesar de valores de Δ que indicam diferenças com relevância potencial.

A padronização do forame apical em 1,20 mm permitiu condições homogéneas de teste, mas implicou também um desafio adicional ao selamento. Este diâmetro simula um cenário clínico exigente, suscetível à formação de lacunas marginais (Lawley et al., 2004). Estudos prévios com canais de 1 a 1,4 mm demonstraram que a taxa de infiltração bacteriana pode não variar significativamente com a dimensão, o que sustenta a escolha deste modelo (Khalilak et al., 2012). Ainda assim, variações nas propriedades dos materiais testados podem resultar em desempenhos discrepantes, como ilustrado por Vizgirda et al. (2004) ao comparar guta-percha com MTA.

Relativamente ao método de avaliação, a infiltração por corante continua a ser amplamente utilizada pela sua simplicidade e baixo custo, mas apresenta limitações reconhecidas (İnan et al., 2007b; Oliver & Abbott, 2001). A sua sensibilidade extrema permite a deteção de microfugas de pouca ou nenhuma relevância clínica. A ausência de correlação com modelos bacterianos reduz a sua validade externa, razão pela qual a literatura sugere a complementaridade com ensaios mais realistas, como infiltração bacteriana ou testes de resistência sob ciclagem térmica e mecânica (Carneiro et al., 2013; Souza et al., 2008; De-Deus et al., 2008).

O tempo de incubação padronizado e a execução por um único operador constituem ainda variáveis metodológicas relevantes. Embora a uniformização do tempo de exposição ao corante favoreça a comparabilidade, não permite avaliar a estabilidade do selamento ao longo do tempo. Estudos com observação prolongada demonstraram falhas tardias em materiais biocerâmicos, incluindo infiltração após 60 dias (Lawley et al., 2004) e degradação da resistência adesiva (De-Deus et al., 2016). Por outro lado, a atuação de um único operador, embora reduza a variabilidade técnica, pode introduzir

viés sistemático. A aplicação manual de MTA está associada a maior propensão à microinfiltração (Lawley et al., 2004), e a experiência do operador pode influenciar de forma decisiva os resultados (Drukteinis et al., 2021).

Por fim, a exclusão de espécimes e o controlo de outliers foram criteriosamente considerados. A decisão de excluir dentes comprometidos por falhas anatómicas ou técnicas reforça a validade interna, mas agrava a limitação amostral. A literatura indica que falhas de inserção e preparação são comuns em modelos de dentes imaturos e podem enviesar os resultados se não forem criteriosamente controladas (Odabaşı Tezer et al., 2024; Orosco et al., 2010). Ainda que metodologicamente justificadas, estas exclusões contribuem para a dificuldade em alcançar significância estatística, o que deve ser tido em conta na interpretação dos dados.

5.6 Limitações

Apesar do cuidado metodológico e dos procedimentos rigorosos adotados ao longo deste estudo, é necessário reconhecer certas limitações que podem restringir a aplicabilidade direta dos resultados à prática clínica. A principal diz respeito à utilização de um modelo *in vitro*, que, embora ofereça elevado controlo experimental, não reproduz com exatidão as condições fisiológicas presentes na cavidade oral, como a influência da saliva, as forças mastigatórias e as variações térmicas naturais (Donnermeyer et al., 2021). Conforme já descrito na literatura, a infiltração detetada em ambientes laboratoriais pode não refletir fielmente os desafios reais enfrentados pelos materiais em condições *in vivo*, dado que o ambiente artificial pode exacerbar microfalhas (Abdelmotelb et al., 2021; Horhat et al., 2023).

Outra limitação refere-se ao uso exclusivo de corantes como marcador de infiltração. Ainda que este método seja sensível e amplamente utilizado, ele não representa adequadamente o comportamento das bactérias, cuja penetração é clinicamente mais relevante (Barthel et al., 1999; Tamse et al., 1998). Investigações comparativas revelam que os corantes podem detetar pequenas descontinuidades que não se manifestam em modelos microbiológicos, levantando dúvidas sobre a validade clínica desses achados (Barthel et al., 1999; Tamse et al., 1998). Além disso, a não inclusão de variáveis como a carga mecânica exercida durante a função mastigatória e a resistência

estrutural dos materiais reduz ainda mais a aplicabilidade clínica dos dados obtidos (Bortoluzzi et al., 2007; Odabaşı Tezer et al., 2024).

O tempo de observação também constitui uma restrição. A infiltração foi avaliada num único momento após a presa inicial, o que impede conclusões sobre a estabilidade dos materiais ao longo do tempo. Há evidência de que as propriedades dos cimentos biocerâmicos podem evoluir, positiva ou negativamente, com o tempo. Poggio et al. (2017), por exemplo, observaram que a contínua solubilidade de alguns seladores poderia comprometer sua eficácia seladora. Em contrapartida, estudos como os de Belal et al. (2022) e Siboni et al. (2017) demonstraram o desenvolvimento de apatite e calcite após exposição prolongada em meios simuladores de fluidos biológicos, sugerindo que certos materiais, como o NeoMTA Plus, mantêm ou até ampliam sua atividade bioativa ao longo do tempo. Tanomaru-Filho et al. (2017) também destacaram a biocompatibilidade e o estímulo à formação de nódulos de mineralização. Contudo, a ausência de avaliação longitudinal impede que se faça uma análise conclusiva sobre a durabilidade funcional do NeoMTA® 2, seja como selador ou como plug.

Outro fator limitante foi o reduzido número de espécimes por grupo (n=9), o que impacta negativamente a precisão estatística e aumenta a probabilidade de resultados falsamente negativos. Embora a dificuldade de padronização anatômica em dentes com ápices abertos justifique em parte esta amostra reduzida, estudos prévios indicam que diferenças discretas entre técnicas ou materiais requerem tamanhos amostrais mais robustos para se tornarem estatisticamente significativas. No presente trabalho, ambas as abordagens com NeoMTA® 2 demonstraram comportamento semelhante quanto à infiltração linear, em linha com achados de Karobari et al., (2021), que não identificaram variações significativas na qualidade do preenchimento entre técnicas. De igual forma, Viapiana et al. (2014) reportaram propriedades comparáveis entre diferentes seladores à base de silicato de cálcio e compostos como AH Plus e MTA Fillapex.

Por fim, a padronização do ápice em 1,20 mm, embora metodologicamente pertinente para reduzir a variabilidade, representa um cenário clínico extremo, que nem sempre corresponde às condições anatômicas reais. A literatura mostra que o diâmetro apical pode influenciar diretamente a eficácia de vedação dos materiais, e que variações naturais entre pacientes devem ser consideradas ao extrapolar resultados de laboratório para a clínica (Bidar et al., 2010; Khalilak et al., 2012). Neste sentido, a padronização

adotada, se por um lado favoreceu a comparabilidade entre os grupos, por outro restringe a generalização dos achados.

5.7 Direções para investigação futura

Do ponto de vista mecanístico, os cimentos à base de silicato de cálcio são bioativos, libertam iões cálcio (Ca^{2+}) e exibem expansão higroscópica em meio húmido, propriedades que favorecem a adaptação às paredes dentinárias quando utilizados como seladores fluidos (Candeiro et al., 2012; Yamamoto et al., 2017). Por contraste, um *plug* compacto de ≈ 4 mm pode revelar maior suscetibilidade à formação de *microgaps* caso a compactação não seja uniforme, tornando a técnica de inserção e condensação determinantes para o desempenho selador (Delikan & Aksu, 2020; Odabaşı Tezer et al., 2024). A literatura aponta ainda a espessura do plug como variável crítica, com 4–5 mm frequentemente recomendados como barreira apical fiável (Bani et al., 2015; Souza et al., 2011).

Em termos de aplicação clínica, a técnica de cone único com NeoMTA® 2 em consistência fluida surge como alternativa pragmática, sobretudo quando o controlo de humidade é subótimo ou existe risco de extrusão, beneficiando da sua elevada capacidade de adaptação (Delikan & Aksu, 2020). Quando se pretende construir uma barreira mineral robusta, a opção pelo plug apical requer controlo rigoroso da espessura e verificação imagiológica da sua extensão e adaptação, idealmente com recurso à micro-CT, para minimizar descontinuidades apicais (Odabaşı Tezer et al., 2024; Souza et al., 2011). No modelo experimental presente, o desempenho global das técnicas foi estatisticamente comparável, sem evidência de superioridade do plug; todavia, permanecem incertezas quanto à relevância clínica e à durabilidade do selamento alcançado (Carneiro et al., 2012; Fischer et al., 1998).

Para maximizar a precisão comparativa, recomenda-se testar forames apicais em passos de 0,2 mm cobrindo a faixa clínica relevante: 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 e 2 mm (Kim & Chandler, 2013; van Westerveld et al., 2019). Esta grelha abrange a variabilidade típica dos dentes imaturos ($\approx 1,0$ – $2,0$ mm) e contempla a condição “amplamente aberta” ($\geq 2,0$ mm), de interesse biológico demonstrado. Os estudos devem estratificar por diâmetro e tipo dentário e uniformizar a definição do comprimento de trabalho (EAL +

radiografia/ponto de papel) para reduzir perdas de acuidade em canais muito largos (Kim & Chandler, 2013)

No que respeita à investigação futura, recomenda-se a utilização sistemática de micro-CT para quantificar vazios internos e caracterizar a continuidade da interface dentina-cimento, comparando diretamente o NeoMTA® 2 como selador em cone único versus *plug* apical de 4–5 mm (Bani et al., 2015; Odabaşı Tezer et al., 2024; Sisli & Ozbas, 2017). Por se tratar de método não destrutivo, a micro-CT permite obter métricas volumétricas precisas de porosidade, em particular na região apical, e suportar análises estatísticas robustas com amostras moderadas (Odabaşı Tezer et al., 2024). Em paralelo, a adoção de modelos de infiltração bacteriana, avaliando, por exemplo, o tempo até à turbidez ou a proporção de tubos contaminados, é preferível aos ensaios com corantes por refletir mais fielmente a realidade clínica e a eficácia antimicrobiana (Bose et al., 2020; Khalilak et al., 2012). Para uma avaliação abrangente da sensibilidade dos métodos e da magnitude efetiva dos *microgaps*, sugere-se a combinação de múltiplas técnicas no mesmo protocolo, incluindo testes com corantes e microscopia eletrónica de varrimento, que podem revelar falhas marginais invisíveis aos modelos bacterianos (Orosco et al., 2010; Wu et al., 1994).

A durabilidade do selamento deve ser investigada por via de estudos longitudinais que integrem micro-CT e ou infiltração em diferentes momentos após a imersão dos espécimes em fluidos biológicos simulados, complementados por testes de resistência à deslocação *push-out* no terço apical. A imersão em phosphate-buffered saline (PBS) pode alterar a composição química e a integridade superficial dos cimentos biocerâmicos (De-Deus et al., 2016), sendo, por isso, crucial uma análise temporal das propriedades físico-químicas e adesivas. O efeito do tempo e da humidade na morfologia superficial dos silicatos de cálcio encontra-se documentado, com potenciais implicações clínicas (Sisli & Ozbas, 2017; Alberdi (Koki) et al., 2023). Recomenda-se a avaliação em pontos de 24 horas, 7 dias e 30 dias para captar fenómenos de expansão higroscópica e biomineralização (De Sá et al., 2021; Zamparini et al., 2022; Morita et al., 2025).

Para isolar efeitos específicos, estudos controlados devem manipular de forma independente variáveis críticas como a espessura do *plug* (4 mm vs 5 mm), mantendo constantes o diâmetro apical e a técnica de inserção. A presente investigação, que empregou ≈ 4 mm, observou uma diferença média de infiltração de 0,78 mm no Grupo II valor próximo do limiar mínimo clinicamente detetável (Punia et al., 2011; Vula et al.,

2020), reforçando a pertinência de explorar a espessura como fator de resultado, preferencialmente com medição simultânea da porosidade por micro-CT como covariável (Bianco et al., 2020).

Importa, por fim, testar a influência da consistência do NeoMTA® 2 no desempenho selador. Dadas as diferentes viscosidades possíveis de selador fluido a *plug* mais espesso, ensaios comparativos devem relacionar manipulação, vedação e porosidade micro-CT, articulando estes desfechos com propriedades físico-químicas como pH e liberação de Ca^{2+} (Zamparini et al., 2022; Morita et al., 2021, 2025). Ensaios mecânicos de *push-out* são recomendados como complemento (De Sá et al., 2021).

No modelo adotado, a técnica de cone único com NeoMTA® 2 fluido e o *plug* apical de ≈ 4 mm apresentaram desempenhos estatisticamente comparáveis. A decisão clínica deve ponderar o controle de humidade, o risco de extrusão e a necessidade de barreira mineral, assegurando execução técnica rigorosa. A consolidação da evidência requer estudos com micro-CT, modelos bacterianos, ciclagem térmica/mecânica e comparação direta de espessuras de *plugue* contra técnica de cone unico (Bani et al., 2015; Odabaşı Tezer et al., 2024).

6. CONCLUSÃO

Dentro das limitações inerentes a este estudo *in vitro*, conclui-se que nenhuma das técnicas testadas conseguiu impedir completamente a infiltração apical, embora ambas tenham exibido níveis variáveis de penetração do corante. O principal foco deste trabalho foi comparar, num modelo padronizado com forame apical de 1,20 mm, a eficácia do selamento utilizando o biocerâmico NeoMTA® 2 em duas modalidades: (1) cone único com material em consistência fluida (selador) e (2) plug apical de aproximadamente 4 mm, seguido de cone único. A hipótese nula (H_0), que postulava a inexistência de diferença estatisticamente significativa entre as duas técnicas, foi confirmada (teste de permutação, $p = 0,216$), indicando que, segundo os critérios estatísticos convencionais ($\alpha = 0,05$), ambas apresentaram desempenho selador semelhante no modelo experimental.

7. BIBLIOGRAFIA

- Abdelmotelb, M. A., Gomaa, Y. F., Khattab, N. M. A., & Elheeny, A. A. H. (2021). Premixed bioceramics versus mineral trioxide aggregate in furcal perforation repair of primary molars: In vitro and in vivo study. *Clinical Oral Investigations*, 25(8), 4915–4925. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-03800-3>
- Alberdi (Koki), J., Martin, G., Risso, L., & Kaplan, A. (2023). “Effect of Heat Generated by Endodontic Obturation Techniques on Bond Strength of Bioceramic Sealers to Dentine”. *Journal of Endodontics*, 49(11), 1565–1569. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2023.08.021>
- Al-Hiyasat, A. S., & Alfirjani, S. A. (2019). The effect of obturation techniques on the push-out bond strength of a premixed bioceramic root canal sealer. *Journal of Dentistry*, 89, 103169. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2019.07.007>
- Alkahtani, A., Shostad, S., Schifferle, R., & Bhambhani, S. (2005). In-Vitro Evaluation of Microleakage of an Orthograde Apical Plug of Mineral Trioxide Aggregate in Permanent Teeth with Simulated Immature Apices. *Journal of Endodontics*, 31(2), 117–119. <https://doi.org/10.1097/01.don.0000136204.14140.81>
- Alsubait, S. A., Hashem, Q., AlHargan, N., AlMohimeed, K., & Alkahtani, A. (2014). Comparative Evaluation of Push-out Bond Strength of ProRoot MTA, Bioaggregate and Biodentine. *The Journal of Contemporary Dental Practice*, 15(3), 336–340. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-1539>
- Andelin, W., Browning, D., Hsu, G., Roland, D., & Torabinejad, M. (2002). Microleakage of Resected MTA. *Journal of Endodontics*, 28(8), 573–574. <https://doi.org/10.1097/00004770-200208000-00002>

- Andreasen, J. O., Farik, B., & Munksgaard, E. C. (2002). Long-term calcium hydroxide as a root canal dressing may increase risk of root fracture. *Dental Traumatology*, *18*(3), 134–137. <https://doi.org/10.1034/j.1600-9657.2002.00097.x>
- Bani, M., Sungurtekin-Ekçi, E., & Odabaş, M. E. (2015). Efficacy of Biodentine as an Apical Plug in Nonvital Permanent Teeth with Open Apices: An In Vitro Study. *BioMed Research International*, *2015*, 1–4. <https://doi.org/10.1155/2015/359275>
- Barthel, C. R., Moshonov, J., Shuping, G., & Ørstavik, D. (1999). Bacterial leakage versus dye leakage in obturated root canals. *International Endodontic Journal*, *32*(5), 370–375. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.1999.00235.x>
- Barakat, R. M., Almohareb, R. A., Aleid, N., Almowais, H., Alharbi, A., Al-Sharafa, M., & Alrahlah, A. (2025). Impact of cone system compatibility on single cone bioceramic obturation in canals prepared with variable taper NiTi rotary files. *Scientific Reports*, *15*(1), 32272. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18280-8>
- Belal, R. S. I., Edanami, N., Yoshiba, K., Yoshiba, N., Ohkura, N., Takenaka, S., & Noiri, Y. (2022). Comparison of calcium and hydroxyl ion release ability and in vivo apatite-forming ability of three bioceramic-containing root canal sealers. *Clinical Oral Investigations*, *26*(2), 1443–1451. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04118-w>
- Bianco, E., Venino, P. M., Pellegatta, A., Calvelli, C., & Citterio, C. L. (2020). Evaluation with Micro-CT of the Canal Seal Made with Two Different Bioceramic Cements: Guttaflow Bioseal and Bioroot RCS. *The Journal of Contemporary Dental Practice*, *21*(4), 359–366. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-2816>
- Bidar, M., Sadeghi, G., Gharechahi, M., Mortazavi, M., & Forghani, M. (2010). In vitro comparison of apical leakage in root canals obturated with 0.04 and 0.02 tapered

- gutta-percha. 5(3). *iranian endodontic journal - IEJ* -Volume 5, Number 3
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4000685/>
- Bortoluzzi, E. A., Souza, E. M., Reis, J. M. S. N., Esberard, R. M., & Tanomaru-Filho, M. (2007). Fracture strength of bovine incisors after intra-radicular treatment with MTA in an experimental immature tooth model. *International Endodontic Journal*, 40(9), 684–691. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2007.01266.x>
- Bose, R., Ioannidis, K., Foschi, F., Bakhsh, A., Kelly, R. D., Deb, S., Mannocci, F., & Niazi, S. A. (2020). Antimicrobial Effectiveness of Calcium Silicate Sealers against a Nutrient-Stressed Multispecies Biofilm. *Journal of Clinical Medicine*, 9(9), 2722. <https://doi.org/10.3390/jcm9092722>
- Camilleri, J., Atmeh, A., Li, X., & Meschi, N. (2022). Present status and future directions: Hydraulic materials for endodontic use. *International Endodontic Journal*, 55(S3), 710–777. <https://doi.org/10.1111/iej.13709>
- Camps, J., & Pashley, D. (2003). Reliability of the Dye Penetration Studies. *Journal of Endodontics*, 29(9), 592–594. <https://doi.org/10.1097/00004770-200309000-00012>
- Candeiro, G. T. D. M., Correia, F. C., Duarte, M. A. H., Ribeiro-Siqueira, D. C., & Gavini, G. (2012). Evaluation of Radiopacity, pH, Release of Calcium Ions, and Flow of a Bioceramic Root Canal Sealer. *Journal of Endodontics*, 38(6), 842–845. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2012.02.029>
- Casino Alegre, A., Aranda Verdú, S., Zarzosa López, J. I., Plasencia Alcina, E., Rubio Climent, J., & Pallarés Sabater, A. (2022). Intratubular penetration capacity of HiFlow bioceramic sealer used with warm obturation techniques and single cone: A confocal laser scanning microscopic study. *Heliyon*, 8(9), e10388. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10388>

- Carneiro, S. M. B. S., Sousa-Neto, M. D., Rached-Júnior, F. A., Miranda, C. E. S., Silva, S. R. C., & Silva-Sousa, Y. T. C. (2012). Push-out strength of root fillings with or without thermomechanical compaction. *International Endodontic Journal*, *45*(9), 821–828. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2012.02039.x>
- Castagnola, C. L., C. Lajolo, R. Pecci, R. Bedini, M. Cordaro, E. Liborio Coppola, & C. Lajolo. (2018). Micro-CT evaluation of two different root canal filling techniques. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, *22*, 4778–4783. <https://www.europeanreview.org/wp/wp-content/uploads/4778-4783.pdf>
- Chala, S., Abouqal, R., & Rida, S. (2011). Apexification of immature teeth with calcium hydroxide or mineral trioxide aggregate: Systematic review and meta-analysis. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, *112*(4), e36–e42. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2011.03.047>
- Chopra, V., Davis, G., & Baysan, A. (2021). Physico-Chemical Properties of Calcium-Silicate vs. Resin Based Sealers—A Systematic Review and Meta-Analysis of Laboratory-Based Studies. *Materials*, *15*(1), 229. <https://doi.org/10.3390/ma15010229>
- Chu, C. H., Lo, E. C. M., & Cheung, G. S. P. (2005). Outcome of root canal treatment using Thermafil and cold lateral condensation filling techniques. *International Endodontic Journal*, *38*(3), 179–185. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2004.00929.x>
- Cosme-Silva, L., Dal-Fabbro, R., Gonçalves, L. D. O., Prado, A. S. D., Piazza, F. A., Viola, N. V., Cintra, L. T. A., & Gomes Filho, J. E. (2019). Hypertension affects the biocompatibility and biomineralization of MTA, High-plasticity MTA, and Biodentine®. *Brazilian Oral Research*, *33*, e060. <https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2019.vol33.0060>

- De Sá, M. A. B., Nunes, E., Antunes, A. N. D. G., Brito Júnior, M., Horta, M. C. R., Amaral, R. R., Cohen, S., & Silveira, F. F. (2021). Push-out bond strength and marginal adaptation of apical plugs with bioactive endodontic cements in simulated immature teeth. *Restorative Dentistry & Endodontics*, *46*(4), e53. <https://doi.org/10.5395/rde.2021.46.e53>
- De-Deus, G., Brandão, M. C., Leal, F., Reis, C., Souza, E. M., Luna, A. S., Paciornik, S., & Fidel, S. (2012). Lack of correlation between sealer penetration into dentinal tubules and sealability in nonbonded root fillings. *International Endodontic Journal*, *45*(7), 642–651. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2012.02023.x>
- De-Deus Et Al., 2016, D.-D. E. Al., 2016. (2016). Resistance of Hydraulic Calcium Silicate Cements to Dislodgment in Short- and Long-term Assessment. *The Journal of Adhesive Dentistry*, *18*(2), 157–160. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a35840>
- De-Deus, G., Leal, F., Soares, J., Luna, A. S., Murad, C., Fidel, S., & Fidel, R. A. S. (2008). Dye Extraction Results on Bacterial Leakproof Root Fillings. *Journal of Endodontics*, *34*(9), 1093–1095. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2008.06.003>
- De-Deus, G., Souza, E. M., Silva, E. J. N. L., Belladonna, F. G., Simões-Carvalho, M., Cavalcante, D. M., & Versiani, M. A. (2022). A critical analysis of research methods and experimental models to study root canal fillings. *International Endodontic Journal*, *55*(S2), 384–445. <https://doi.org/10.1111/iej.13713>
- Delikan, E., & Aksu, S. (2020). Comparison of the sealing ability of apical plug materials in simulated open apices: An in vitro study. *Journal of Oral Research and Review*, *12*(2), 70. https://doi.org/10.4103/jorr.jorr_41_19
- Donnermeyer, D., Ibing, M., Bürklein, S., Weber, I., Reitze, M. P., & Schäfer, E. (2021). Physico-Chemical Investigation of Endodontic Sealers Exposed to Simulated

- Intracanal Heat Application: Hydraulic Calcium Silicate-Based Sealers. *Materials*, 14(4), 728. <https://doi.org/10.3390/ma14040728>
- Drukteinis, S., Bilvinaite, G., Tusas, P., Shemesh, H., & Peciuliene, V. (2021). Microcomputed Tomographic Assessment of the Single Cone Root Canal Fillings Performed by Undergraduate Student, Postgraduate Student and Specialist Endodontist. *Journal of Clinical Medicine*, 10(5), 1080. <https://doi.org/10.3390/jcm10051080>
- El-Khatib, S., Moharamzadeh, K., & Martin, N. (2020). The sealing ability of biodentine and MTA as a root sealer in the management of open apices of permanent teeth. *Journal of Dental Research and Practice*. Vol.2 (4). <http://eprints.whiterose.ac.uk/170553/>
- Ferreira, C. M. A., Sassone, L. M., Gonçalves, A. S., De Carvalho, J. J., Tomás-Catalá, C. J., García-Bernal, D., Oñate-Sánchez, R. E., Rodríguez-Lozano, F. J., & Silva, E. J. N. L. (2019). Physicochemical, cytotoxicity and in vivo biocompatibility of a high-plasticity calcium-silicate based material. *Scientific Reports*, 9(1), 3933. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40365-4>
- Fischer, E. J., Arens, D. E., & Miller, C. H. (1998). Bacterial leakage of mineral trioxide aggregate as compared with zinc-free amalgam, intermediate restorative material, and super-EBA as a root-end filling material. *Journal of Endodontics*, 24(3), 176–179. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(98\)80178-7](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(98)80178-7)
- França, G. M. D., Pinheiro, J. C., Morais, E. F. D., Leite, R. B., Barboza, C. A. G., & Bueno, C. S. P. (2019). USO DOS BIOCERÂMICOS NA ENDODONTIA: REVISÃO DE LITERATURA. *Revista de Ciências da Saúde Nova Esperança*, 17(2), 45–55. <https://doi.org/10.17695/revnevol17n2p45-55>

- Ghaly, M. S., Abozena, N. I., Ghouraba, R. F., Kabbash, I. A., & EL-Desouky, S. S. (2025). Clinical and radiographic evaluation of premixed bioceramic putty as an apical plug in nonvital immature anterior permanent teeth. *Scientific Reports*, *15*(1), 26487. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11407-x>
- Ghaziani, P., Rastegar, A. F., Bidar, M., Sadeghi, G., & Chegin, P. (2005). *Clinical and Radiographic Evaluation of Success Rate with MTA Plug in Open Apices*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3909610/>
- Gillen, B. M., Looney, S. W., Gu, L.-S., Loushine, B. A., Weller, R. N., Loushine, R. J., Pashley, D. H., & Tay, F. R. (2011). Impact of the Quality of Coronal Restoration versus the Quality of Root Canal Fillings on Success of Root Canal Treatment: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Endodontics*, *37*(7), 895–902. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2011.04.002>
- Grech, L., Mallia, B., & Camilleri, J. (2013). Characterization of set Intermediate Restorative Material, B iodentine, B ioaggregate and a prototype calcium silicate cement for use as root-end filling materials. *International Endodontic Journal*, *46*(7), 632–641. <https://doi.org/10.1111/iej.12039>
- Hachmeister, D., Schindler, W., Walkeriii, W., & Deneethomas, D. (2002). The Sealing Ability and Retention Characteristics of Mineral Trioxide Aggregate in a Model of Apexification. *Journal of Endodontics*, *28*(5), 386–390. <https://doi.org/10.1097/00004770-200205000-00010>
- Horhat, R. M., Bumbu, B. A., Orel, L., Velea-Barta, O., Cirligeriu, L., Chicin, G. N., Pricop, M., Rivis, M., Dinu, S., Horhat, D. I., Bratosin, F., Fericean, R. M., Negrean, R. A., & Nica, L. M. (2023). Assessing the Sealing Performance and Clinical Outcomes of Endodontic Treatment in Patients with Chronic Apical

- Periodontitis Using Epoxy Resin and Calcium Salicylate Seals. *Medicina*, 59(6), 1137. <https://doi.org/10.3390/medicina59061137>
- İnan, U., Aydemir, H., & Taşdemir, T. (2007a). Leakage evaluation of three different root canal obturation techniques using electrochemical evaluation and dye penetration evaluation methods. *Australian Endodontic Journal*, 33(1), 18–22. <https://doi.org/10.1111/j.1747-4477.2007.00050.x>
- İnan, U., Aydemir, H., & Taşdemir, T. (2007b). Leakage evaluation of three different root canal obturation techniques using electrochemical evaluation and dye penetration evaluation methods. *Australian Endodontic Journal*, 33(1), 18–22. <https://doi.org/10.1111/j.1747-4477.2007.00050.x>
- Karobari, M. I., Basheer, S. N., Sayed, F. R., Shaikh, S., Agwan, M. A. S., Marya, A., Messina, P., & Scardina, G. A. (2021). An In Vitro Stereomicroscopic Evaluation of Bioactivity between Neo MTA Plus, Pro Root MTA, BIODENTINE & Glass Ionomer Cement Using Dye Penetration Method. *Materials*, 14(12), 3159. <https://doi.org/10.3390/ma14123159>
- Karrar, R. N., Craig, S. G., Duncan, H. F., Abushouk, S. A., Elfiel, S. Y., Lundy, F. T., Clarke, M., El-Karim, I. A., & Reliability Assessment Group. (2025). Clinical validation of a proposed diagnostic classification for pulpitis. *International Endodontic Journal*, 58(8), 1158–1171. <https://doi.org/10.1111/iej.14254>
- Keleş, A., & Keskin, C. (2020). Presence of voids after warm vertical compaction and single-cone obturation in band-shaped isthmuses using micro-computed tomography: A phantom study. *Microscopy Research and Technique*, 83(4), 370–374. <https://doi.org/10.1002/jemt.23423>

- Khalil, I., Naaman, A., & Camilleri, J. (2016). Properties of Tricalcium Silicate Sealers. *Journal of Endodontics*, 42(10), 1529–1535. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.06.002>
- Khalilak, Z., Vali, T., Danesh, F., & Vatanpour, M. (2012). The effect of one-step or two-step MTA plug and tooth apical width on coronal leakage in open apex teeth. *Iranian Endodontic Journal, IEJ*, 7(1), 10–14. <https://europepmc.org/article/MED/23060907>
- Kim, Y. -J. A., & Chandler, N. P. (2013). Determination of working length for teeth with wide or immature apices: A review. *International Endodontic Journal*, 46(6), 483–491. <https://doi.org/10.1111/iej.12032>
- Lawley, G., Schindler, W., Walkeriii, W., & Kolodrubetz, D. (2004). Evaluation of Ultrasonically Placed MTA and Fracture Resistance with Intracanal Composite Resin in a Model of Apexification. *Journal of Endodontics*, 30(3), 167–172. <https://doi.org/10.1097/00004770-200403000-00010>
- Lin, J., Zeng, Q., Wei, X., Zhao, W., Cui, M., Gu, J., Lu, J., Yang, M., & Ling, J. (2017). Regenerative Endodontics Versus Apexification in Immature Permanent Teeth with Apical Periodontitis: A Prospective Randomized Controlled Study. *Journal of Endodontics*, 43(11), 1821–1827. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.06.023>
- Li, J., Cheng, J., Yang, F., Yu, J., & Song, G. (2023). Treatment outcomes of immature permanent necrotic evaginated teeth: A retrospective study comparing regenerative endodontic procedures with apexification. *International Journal of Paediatric Dentistry*, 33(6), 595–606. <https://doi.org/10.1111/ipd.13079>
- Martin, R., Monticelli, F., Brackett, W., Loushine, R., Rockman, R., Ferrari, M., Pashley, D., & Tay, F. (2007). Sealing Properties of Mineral Trioxide Aggregate Orthograde Apical Plugs and Root Fillings in an In Vitro Apexification Model.

Journal of Endodontics, 33(3), 272–275.
<https://doi.org/10.1016/j.joen.2006.11.002>

Mente, J., Hage, N., Pfefferle, T., Koch, M. J., Dreyhaupt, J., Staehle, H. J., & Friedman, S. (2009). Mineral Trioxide Aggregate Apical Plugs in Teeth with Open Apical Foramina: A Retrospective Analysis of Treatment Outcome. *Journal of Endodontics*, 35(10), 1354–1358. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.05.025>

Mente, J., Leo, M., Panagidis, D., Ohle, M., Schneider, S., Lorenzo Bermejo, J., & Pfefferle, T. (2013). Treatment Outcome of Mineral Trioxide Aggregate in Open Apex Teeth. *Journal of Endodontics*, 39(1), 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2012.10.007>

Morita, M., Kitagawa, H., Nakayama, K., Kitagawa, R., Yamaguchi, S., & Imazato, S. (2021). Antibacterial activities and mineral induction abilities of proprietary MTA cements. *Dental Materials Journal*, 40(2), 297–303. <https://doi.org/10.4012/dmj.2019-351>

Odabaşı Tezer, E., Buyuksungur, A., Celikten, B., Dursun, P. H., & Sevimay, F. S. (2024). Effects of Access Cavity Design and Placement Techniques on Mineral Trioxide Aggregate Obturation Quality in Simulated Immature Teeth: A Micro-Computed Tomography Study. *Medicina*, 60(6), 878. <https://doi.org/10.3390/medicina60060878>

Oliver, C. M., & Abbott, P. V. (2001). Correlation between clinical success and apical dye penetration. *International Endodontic Journal*, 34(8), 637–644. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.2001.00442.x>

Orosco, F. A., Bramante, C. M., Garcia, R. B., Bernardineli, N., & Moraes, I. G. D. (2010). Sealing ability, marginal adaptation and their correlation using three root-

- end filling materials as apical plugs. *Journal of Applied Oral Science*, 18(2), 127–134. <https://doi.org/10.1590/S1678-77572010000200006>
- Palczewska-Komsa, M., Kaczor-Wiankowska, K., & Nowicka, A. (2021). New Bioactive Calcium Silicate Cement Mineral Trioxide Aggregate Repair High Plasticity (MTA HP)—A Systematic Review. *Materials*, 14(16), 4573. <https://doi.org/10.3390/ma14164573>
- Poggio, C., Dagna, A., Ceci, M., Meravini, M., Colombo, M., & Pietrocola, G. (2017). Solubility and pH of bioceramic root canal sealers: A comparative study. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, e1189–e1194. <https://doi.org/10.4317/jced.54040>
- Pommel, L., Jacquot, B., & Camps, J. (2001). Lack of Correlation among Three Methods for Evaluation of Apical Leakage. *Journal of Endodontics*, 27(5), 347–350. <https://doi.org/10.1097/00004770-200105000-00010>
- Pontoriero, D. I. K., Ferrari Cagidiaco, E., Cardinali, F., Fornara, R., Amato, M., Grandini, S., & Ferrari, M. (2022). Sealing ability of two bioceramic sealers used in combination with three obturation techniques. *Journal of Osseointegration*, 14(3), 143–148. <https://doi.org/10.23805/JO.2022.14.26>
- Pontoriero, D. I. K., Madaro, G., Vanagolli, V., Benedicenti, S., Verniani, G., Cagidiaco, E. F., Grandini, S., & Ferrari, M. (2012). Sealing ability of a bioceramic sealer used in combination with cold and warm obturation techniques. *Journal of Osseointegration*, 13(4), 248–255. <https://doi.org/10.23805%2520/JO.2021.13.04.11>
- Punia, S., Punia, V., & Nadig, P. (2011). An in vitro assessment of apical microleakage in root canals obturated with gutta-flow, resilon, thermafil and lateral

- condensation: A stereomicroscopic study. *Journal of Conservative Dentistry*, 14(2), 173. <https://doi.org/10.4103/0972-0707.82629>
- Raman, V., & Camilleri, J. (2024). Characterization and Assessment of Physical Properties of 3 Single Syringe Hydraulic Cement–based Sealers. *Journal of Endodontics*, 50(3), 381–388. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2024.01.001>
- Rechenberg, D. -K., & Paqué, F. (2013). Impact of cross-sectional root canal shape on filled canal volume and remaining root filling material after retreatment. *International Endodontic Journal*, 46(6), 547–555. <https://doi.org/10.1111/iej.12027>
- Roy, M., Bailwad, S. A., Bhatnagar, A., Singh, S., Assiry, A. A., Mohamed, R. N., Basha, S., Snigdha, N. T., & Karobari, M. I. (2024). Evaluation of microleakage of mineral trioxide aggregate and biodentine as apical barriers in simulated young permanent teeth. *BMC Oral Health*, 24(1), 1100. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04817-2>
- Shinbori, N., Grama, A. M., Patel, Y., Woodmansey, K., & He, J. (2015). Clinical Outcome of Endodontic Microsurgery That Uses EndoSequence BC Root Repair Material as the Root-end Filling Material. *Journal of Endodontics*, 41(5), 607–612. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.12.028>
- Siboni, F., Taddei, P., Prati, C., & Gandolfi, M. G. (2017). Properties of Neo MTA Plus and MTA Plus cements for endodontics. *International Endodontic Journal*, 50(S2). <https://doi.org/10.1111/iej.12787>
- Sisli, S. N., & Ozbas, H. (2017). Comparative Micro–computed Tomographic Evaluation of the Sealing Quality of ProRoot MTA and MTA Angelus Apical Plugs Placed with Various Techniques. *Journal of Endodontics*, 43(1), 147–151. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.09.017>

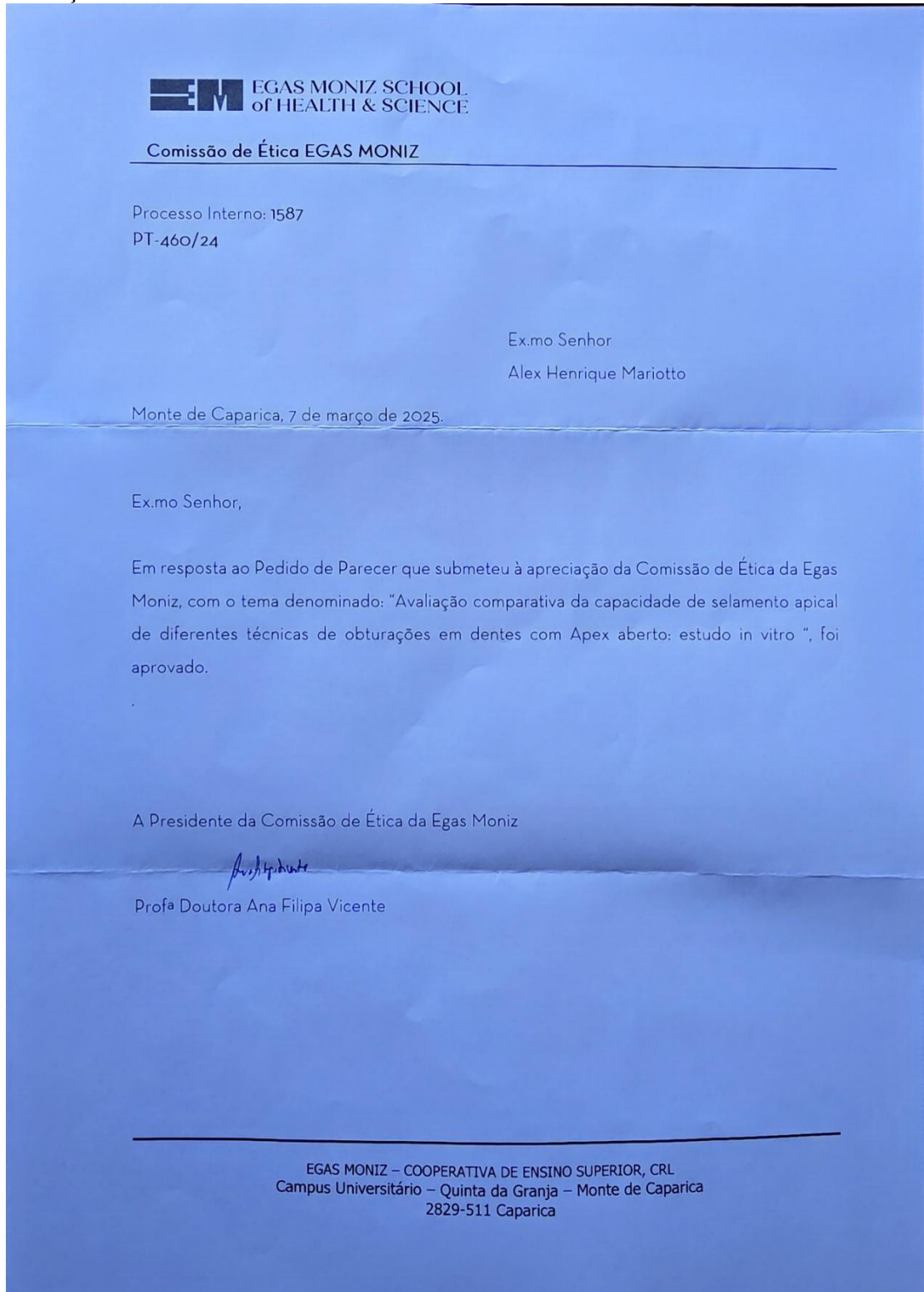
- Sokolonski, A. R., Amorim, C. F., Almeida, S. R., Lacerda, L. E., Araújo, D. B., Meyer, R., & Portela, R. D. (2023). Comparative antimicrobial activity of four different endodontic sealers. *Brazilian Journal of Microbiology*, *54*(3), 1717–1721. <https://doi.org/10.1007/s42770-023-01003-4>
- Souza, E. M., Wu, M.-K., Shemesh, H., Bonetti-Filho, I., & Wesselink, P. R. (2008). Comparability of results from two leakage models. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, *106*(2), 309–313. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2008.02.025>
- Souza, M. A., Barbizam, J. V., Cecchin, D., & Scarparo, R. K. (2011). Mineral trioxide aggregate as an apical plug in infected immature teeth: A case series. *Revista Odonto Ciência*, *26*(3), 262–266. <https://revistaseletronicas.pucrs.br/fo/article/view/8651>
- Tamse, Katz, & Kablan. (1998). Comparison of apical leakage shown by four different dyes with two evaluating methods. *International Endodontic Journal*, *31*(5), 333–337. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.1998.00154.x>
- Tanomaru-Filho, M., Andrade, A. S., Rodrigues, E. M., Viola, K. S., Faria, G., Camilleri, J., & Guerreiro-Tanomaru, J. M. (2017). Biocompatibility and mineralized nodule formation of Neo MTA Plus and an experimental tricalcium silicate cement containing tantalum oxide. *International Endodontic Journal*, *50*(S2). <https://doi.org/10.1111/iej.12780>
- Tewari, N., Devi, P., Sampath, S., Mathur, V. P., Tsilingaridis, G., Wikström, A., Rahul, M., & Bansal, K. (2025). Comparative Effectiveness of Regenerative Endodontic Treatment Versus Apexification for Necrotic Immature Permanent Teeth With or Without Apical Periodontitis: An Umbrella Review. *Dental Traumatology*, *41*(3), 263–282. <https://doi.org/10.1111/edt.13028>

- Tong, H. J., Rajan, S., Bhujel, N., Kang, J., Duggal, M., & Nazzal, H. (2017). Regenerative Endodontic Therapy in the Management of Nonvital Immature Permanent Teeth: A Systematic Review—Outcome Evaluation and Meta-analysis. *Journal of Endodontics*, 43(9), 1453–1464. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.04.018>
- Travassos, R. M. C., Acioli, A. C. R., Barbosa, A. M. C., Cruz, G. V., Melo, J. A., Souza, J. V. M. D., & Menezes, M. L. S. D. (2022). Apicificação de dente com ápice aberto utilizando MTA: Relato de caso. *E-Acadêmica*, 3(1), e2431115. <https://doi.org/10.52076/eacad-v3i1.115~>
- Van Westerveld, K. J. H., Verweij, J. P., Fiocco, M., Mensink, G., & Van Merkesteyn, J. P. R. (2019). Root Elongation After Autotransplantation in 58 Transplanted Premolars: The Radiographic Width of the Apex as a Predictor. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 77(7), 1351–1357. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2019.02.019>
- Viapiana, R., Flumignan, D. L., Guerreiro-Tanomaru, J. M., Camilleri, J., & Tanomaru-Filho, M. (2014). Physicochemical and mechanical properties of zirconium oxide and niobium oxide modified Portland cement-based experimental endodontic sealers. *International Endodontic Journal*, 47(5), 437–448. <https://doi.org/10.1111/iej.12167>
- Vizgirda, P., Liewehr, F., Patton, W., Mcpherson, J., & Buxton, T. (2004). A Comparison of Laterally Condensed Gutta-Percha, Thermoplasticized Gutta-Percha, and Mineral Trioxide Aggregate as Root Canal Filling Materials. *Journal of Endodontics*, 30(2), 103–106. <https://doi.org/10.1097/00004770-200402000-00010>

- Vula, V., Ajeti, N., Kuçi, A., Stavileci, M., & Vula, V. (2020). An In Vitro Comparative Evaluation of Apical Leakage Using Different Root Canal Sealers. *Medical Science Monitor Basic Research*, 26. <https://doi.org/10.12659/MSMBR.928175>
- Xu, J., Shao, M. Y., Pan, H. Y., Lei, L., Liu, T., Cheng, L., Hu, T., & Dummer, P. M. H. (2016). A proposal for using contralateral teeth to provide well-balanced experimental groups for endodontic studies. *International Endodontic Journal*, 49(10), 1001–1008. <https://doi.org/10.1111/iej.12553>
- Wu, M., De Gee, A. J., & Wesselink, P. R. (1994). Fluid transport and dye penetration along root canal fillings. *International Endodontic Journal*, 27(5), 233–238. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1994.tb00261.x>
- Wang, Y., Liu, S., & Dong, Y. (2018). In vitro study of dentinal tubule penetration and filling quality of bioceramic sealer. *PLOS ONE*, 13(2), e0192248. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192248>
- Yadav, A., & Khanna, R. (2020). Comparative Evaluation of Mineral Trioxide Aggregate, Biodentine, and Calcium Phosphate Cement in Single Visit Apexification Procedure for Nonvital Immature Permanent Teeth: A Randomized Controlled Trial. *International Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 13(S1), S1–S13. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10005-1830>
- Yamamoto, S., Han, L., Noiri, Y., & Okiji, T. (2017). Evaluation of the Ca ion release, pH and surface apatite formation of a prototype tricalcium silicate cement. *International Endodontic Journal*, 50(S2). <https://doi.org/10.1111/iej.12737>
- Zamparini, F., Prati, C., Taddei, P., Spinelli, A., Di Foggia, M., & Gandolfi, M. G. (2022). Chemical-Physical Properties and Bioactivity of New Premixed Calcium Silicate-Bioceramic Root Canal Sealers. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), 13914. <https://doi.org/10.3390/ijms232213914>

8. ANEXOS

I. Autorização da comissão de ética da IUEM



II. Anexo da infiltração apical de corante

Grupo I:

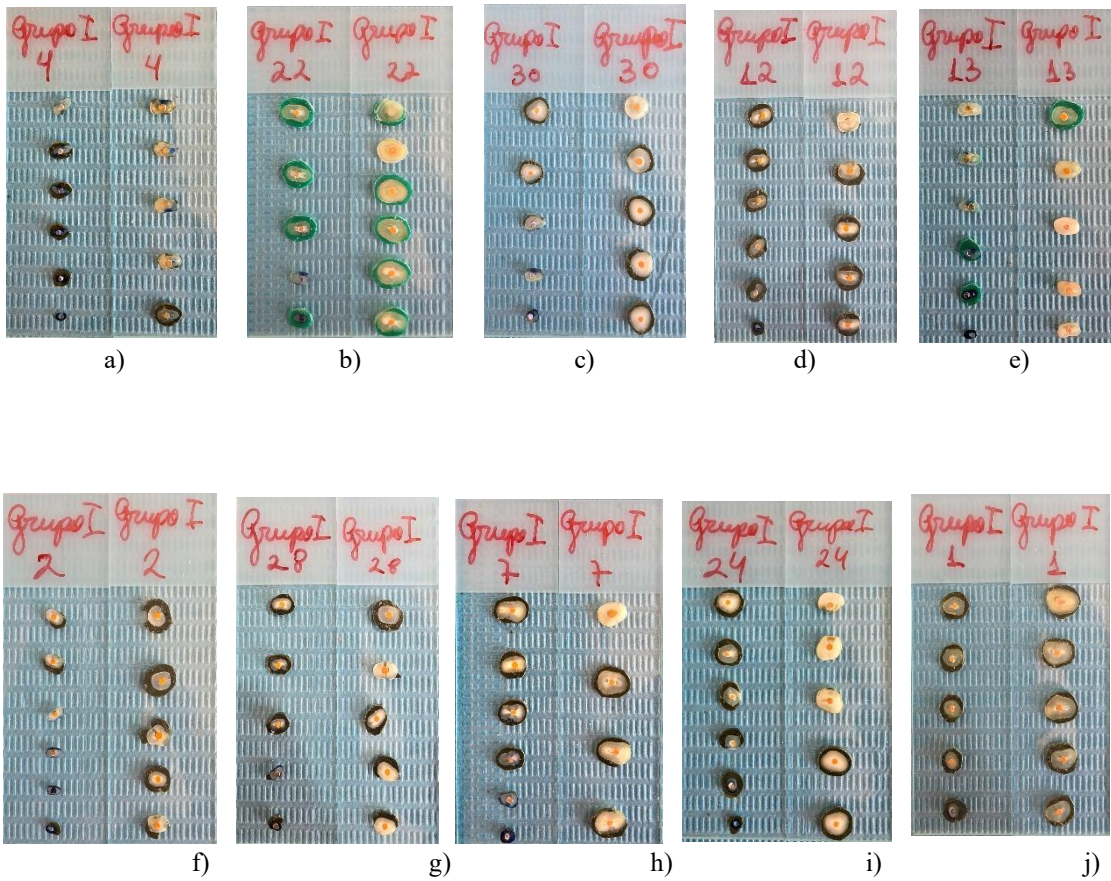


Figura 33 - Espécimes Grupo I: a) - Espécime nº 4; b) - Espécime nº22; c) - Espécime nº 30; d) - Espécime nº 12; e) - Espécime nº 13; f) - Espécime nº 2; g) - Espécime nº 28; h) - Espécime nº 7; i) - Espécime nº 24; j) - Espécime nº 1

Grupo II:

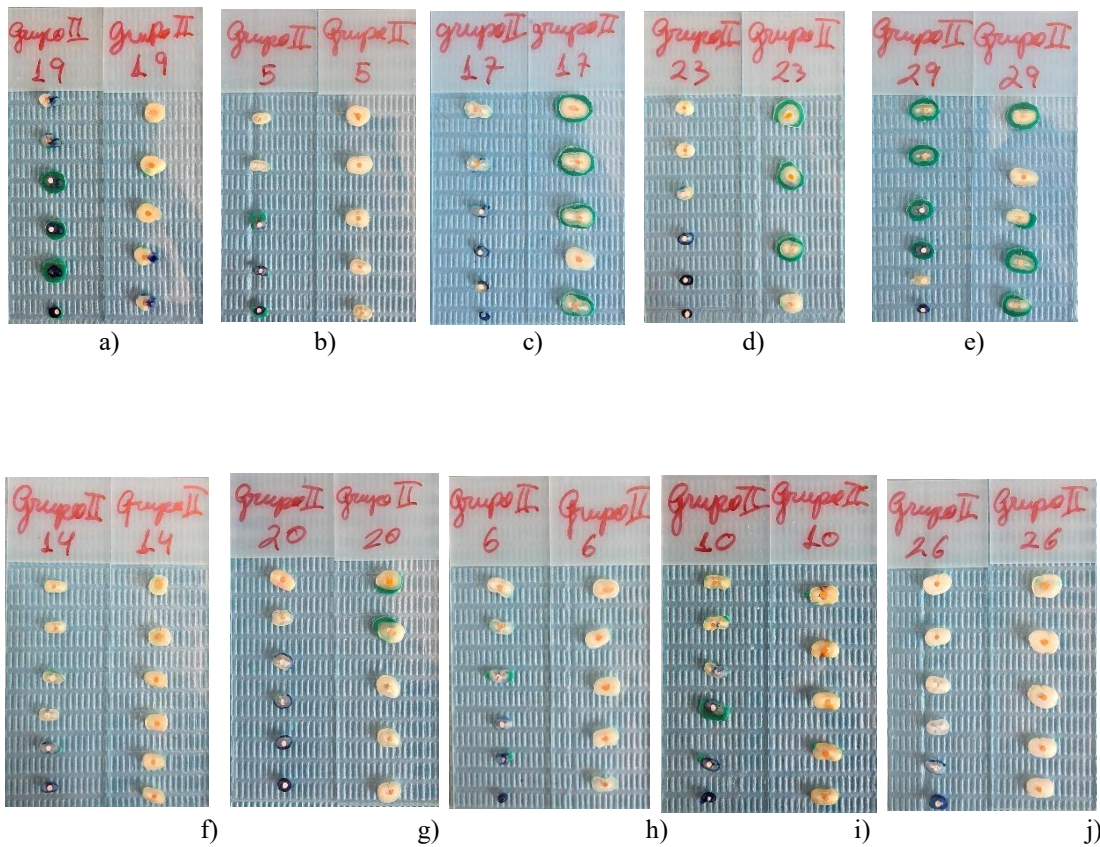


Figura 34 - Espécimes do Grupo II: a) - Espécime nº 19; b) - Espécime nº 5; c) - Espécime nº 17; d) - Espécime nº 23; e) - Espécime nº 29; f) - Espécime nº 14; g) - Espécime nº 20; h) - Espécime nº 6; i) - Espécime nº 10; j) - Espécime nº 26.