

UNIVERSIDADE PAULISTA

ALINE DE ASSIS

OBTURADORES BIOCERÂMICOS NA ENDODONTIA:
revisão de literatura

CAMPINAS
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

CIP - Catalogação na Publicação

Assis, Aline

Obturadores Biocerâmicos na Endodontia / Aline Assis. - 2025.
510 f. + Não.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) apresentado ao Instituto de Ciência da Saúde da Universidade Paulista, Campinas, 2025.

Área de Concentração: Endodontia.

Orientador: Prof. Danilo Moraes.

1. Seladores biocerâmicos. 2. AH Plus. 3. Resistência de união. I. Moraes, Danilo (orientador). II. Título.

ALINE DE ASSIS

OBTURADORES BIOCERÂMICOS NA ENDODONTIA:
revisão de literatura

Trabalho de conclusão de curso
para obtenção do título de
graduação em Odontologia
apresentado à Universidade
Paulista – UNIP

Orientador: Prof. Danilo Kirschner de Camargo Moraes

CAMPINAS
2025

ALINE DE ASSIS

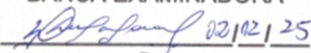
OBTURADORES BIOCERÂMICOS NA ENDODONTIA:
revisão de literatura

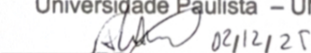
Trabalho de conclusão de curso
para obtenção do título de
graduação em Odontologia
apresentado à Universidade
Paulista – UNIP

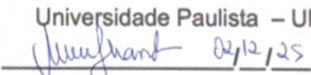
Aprovado em: 02/12/25

NOTA 9,0

BANCA EXAMINADORA


Prof. Danilo Kirschner de Camargo Moraes
Universidade Paulista – UNIP


Prof. Fábio Henrique Lozano Monteiro
Universidade Paulista – UNIP


Profa. Maria Paula Maciel Rando Meirelles
Universidade Paulista – UNIP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Francisco, à minha mãe Kelly e à minha irmã Camila, que caminharam comigo mesmo quando o percurso parecia interminável e cheio de desafios. Cada passo que dei até aqui foi sustentado pelo amor, pela paciência e pela força que encontrei em vocês.

Francisco, agradeço por seu apoio, por cada sacrifício feito em meu nome e pelo exemplo de caráter que sempre me guiou. Saber que eu era seu orgulho me deu coragem para continuar quando tudo parecia difícil demais.

Kelly, obrigada por me acolher nos momentos de maior cansaço, por oferecer o ombro que tantas vezes segurou meu desânimo e transformou lágrimas em equilíbrio. Você foi meu ponto de calma em meio ao caos, aquela voz que sempre dizia que eu era capaz mesmo quando eu mesma duvidava.

Camila, minha irmã, obrigada pela cumplicidade leve que tornava os dias mais suportáveis, pelas brincadeiras que arrancavam sorrisos nos momentos de tensão, e pelas palavras espontâneas que me lembravam de que eu nunca estava sozinha. Obrigada por sempre aprender minhas matérias para estudar comigo e me deixar mais calma.

Este TCC é resultado de muito esforço, dedicação e renúncias, mas ele só existe porque vocês estiveram comigo em cada fase desta jornada. Cada linha aqui escrita carrega ao carinho e o apoio que recebi de vocês ao longo de todos esses anos.

Com todo o amor e profunda gratidão, dedico esta conquista a vocês três, que são meu alicerce, minha motivação e minha maior inspiração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a cada pessoa que caminhou ao meu lado durante essa jornada. Sem vocês nada disso seria possível.

Agradeço primeiramente à Deus, pela direção, pela proteção, por me sustentar nos momentos difíceis e pela oportunidade de concluir mais essa etapa da minha vida.

Aos meus pais, Kelly e Francisco, por tornarem este sonho possível, sempre estarem ao meu lado, me encorajando a enfrentar todos os desafios e nunca desistir. Serei eternamente grata.

À minha irmã, Camila, que foi minha confidente e companheira durante toda essa caminhada, me apoiando, me ouvindo e comemorando cada pequena conquista comigo.

Aos meus familiares, em especial, à minha tia Cristiane e ao meu tio Ricardo, por sempre me apoiarem e me ajudarem.

As minhas amigas e amigos, que estiveram ao meu lado durante esses 4 anos, que tornaram essa trajetória tão especial. Vou sentir falta de ver vocês todos os dias.

Também gostaria de agradecer aos meus professores, que ao longo dessa trajetória compartilharam muitos ensinamentos, aprendizados que contribuíram para o meu conhecimento acadêmico e pessoal. Um agradecimento especial ao meu professor orientador, deixo minha profunda gratidão por acreditar no meu potencial, me guiar com sabedoria e compartilhar o seu conhecimento de forma tão generosa. Sua orientação foi essencial para que eu alcançasse essa conquista. Eu tenho profunda admiração pelo profissional e pessoa que você é.

RESUMO

Este estudo analisa os obturadores biocerâmicos à base de silicato de cálcio em comparação com o selador AH Plus, com foco em aspectos como resistência de união, adesão e capacidade seladora. Os resultados mostram que a eficácia dos biocerâmicos depende de fatores como a presença de umidade e a espessura do cimento. No entanto, um desafio importante é o risco de “wash out” (lavagem) do cimento biocerâmico, que pode ocorrer quando o material é exposto a fluidos corpóreos ou irrigantes antes de endurecer, comprometendo o selamento marginal e aumentando o risco de infiltração bacteriana. Na interface com a dentina, os biocerâmicos têm uma boa capacidade de penetração e podem fortalecer a ligação ao longo do tempo. Já na interface com a guta-percha, a ligação é mais física e depende da técnica utilizada. A capacidade seladora dos biocerâmicos é semelhante à do AH Plus, especialmente após a maturação em meio iônico. No entanto, a remoção dos biocerâmicos pode ser mais difícil devido à sua integração química com a dentina. A escolha do selador depende do cenário clínico: os biocerâmicos são ideais quando há controle hídrico e busca por bioatividade, enquanto o AH Plus é mais indicado quando a retratibilidade e a previsibilidade imediata são prioritárias.

Palavras-chave: Seladores biocerâmicos; AH Plus; Resistência de união (*push-out*).

ABSTRACT

This study analyzes calcium silicate-based bioceramic sealers in comparison to the AH Plus sealer, focusing on aspects such as bond strength, adhesion, and sealing ability. The results show that the effectiveness of bioceramics depends on factors like the presence of moisture and the cement thickness. However, a significant challenge is the risk of bioceramic cement 'wash out,' which can occur when the material is exposed to body fluids or irrigants before setting, compromising the marginal seal and increasing the risk of bacterial infiltration. At the dentin interface, bioceramics have a good penetration capacity and can strengthen the bond over time. At the gutta-percha interface, the bond is more physical and depends on the technique used. The sealing ability of bioceramics is similar to that of AH Plus, especially after maturation in an ionic medium. However, the removal of bioceramics can be more difficult due to their chemical integration with the dentin. The choice of sealer depends on the clinical scenario: bioceramics are ideal when there is moisture control and a quest for bioactivity, while AH Plus is more indicated when retreatability and immediate predictability are priorities.

Keywords: Bioceramic sealers; AH Plus; Push-out bond strength.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	METODOLOGIA	13
3	REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1	Composição e mecanismos dos seladores biocerâmicos	14
3.2	Propriedades físico – químicas	17
3.3	Desempenho biológico	20
3.4	Resistência de união	22
3.5	Adesão cimento – dentina e cimento – guta – percha	28
3.6	Capacidade seladora e microinfiltração	33
3.7	Retratamento	35
3.8	Resistência à fratura radicular	37
3.9	Alteração de cor	39
3.10	Wash – out	40
4	DISCUSSÃO	42
5	CONCLUSÃO	48

1. INTRODUÇÃO

A obturação tridimensional do sistema de canais radiculares é um passo decisivo para o sucesso endodôntico. Nas últimas décadas, os seladores biocerâmicos à base de silicato de cálcio ganharam espaço clínico por combinarem propriedades físico-químicas compatíveis com a obturação e potencial bioatividade liberando íons de cálcio e formando apatita, reposicionando o debate sobre desempenho adesivo, vedamento apical e retratibilidade em relação aos seladores epóxi consagrados, como o AH Plus ¹⁻³. Revisões destacam que, embora a família de cimentos biocerâmicos compartilhe a base de silicato de cálcio, há diferenças relevantes de formulação que podem modular seu comportamento na interface dentinária e frente aos diferentes cenários operatórios ^{1,4}.

A literatura descreve que o desempenho clínico de um selador resulta do balanço entre propriedades antimicrobianas, propriedades físico-químicas, interação com a dentina e estabilidade do conjunto obturador. Estudos *in vitro* mostram que materiais de obturação submetidos a desafio bacteriano exibem respostas estruturais e antimicrobianas distintas, sugerindo que a resistência do sistema cimento–guta-percha ao ataque microbiano pode influenciar resultados de selamento ao longo do tempo ⁵. Avaliações comparativas de seladores novos indicam variações importantes nesses atributos, o que reforça a necessidade de análises focadas por tipo de cimento e por protocolo clínico ^{6,7}.

No centro das discussões, estão a resistência de união e os padrões de adesão nas interfaces cimento–dentina e cimento–guta-percha. Ensaio de molhabilidade e adesão indicam que biocerâmicos podem apresentar boa molhabilidade em dentina intrarradicular, o que teoricamente favorece a penetração em túbulos e a formação de uma zona de infiltração mineral; todavia, a qualidade dessa interface é sensível à condição superficial do substrato e à presença de umidade residual ⁸. Modelos experimentais que usam “tubos de dentina” reforçam a capacidade de bioatividade e a formação de uma interface íntima em seladores prontos para uso, mas também revelam porosidade intrínseca que pode afetar propriedades mecânicas e de selamento ⁹. Como desfecho laboratorial, o teste de

micro push-out tem sido amplamente utilizado para estimar a resistência de união, permitindo comparar biocerâmicos com epóxi sob diferentes condições ¹⁰.

Entre os moduladores críticos do desempenho adesivo, a umidade do canal e o protocolo de secagem merecem destaque. Em condições controladas, variações na umidade dentinária alteram significativamente a força de *push-out* de seladores biocerâmicos, sinalizando que o manejo da umidade é uma variável operatória que precisa ser padronizada e explicitada nos estudos e na clínica ¹¹. De forma convergente, investigação específica com o Bio-C Sealer mostrou que protocolos de secagem distintos impactam tanto as propriedades físico-químicas quanto a resistência de *push-out*, reforçando a interdependência entre substrato e cimento ¹². Soma-se a isso a influência da classificação e da composição dos cimentos higroscópicos comerciais — diferenças de matriz, aditivos e radiopacificantes — que ajudam a explicar resultados heterogêneos entre marcas ¹³. Em paralelo, a técnica de obturação também interfere no vedamento apical e no comportamento interfacial, devendo ser considerada nas comparações entre materiais ¹⁴.

No comparativo com o AH Plus, frequentemente tratado como padrão de referência, meta-análise recente indica que a capacidade seladora de seladores à base de epóxi pode superar a dos biocerâmicos em determinados modelos, embora as diferenças variem conforme método de avaliação e desenho experimental ¹⁵. Estudos físico-químicos atualizados que incluem AH Plus Bioceramic, Bio-C Sealer e ADSeal mostram perfis distintos de solubilidade, escoamento e tempo de presa, atributos que afetam diretamente a adaptação marginal e a estabilidade do obturador ¹⁶. Por sua vez, revisão sistemática específica sobre seladores premix à base de silicato de cálcio sugere desempenho comparável aos convencionais em vários desfechos, indicando que a equivalência ou superioridade depende do contexto operatório e do desfecho avaliado ¹⁷. Revisões de escopo nacionais também pontuam vantagens (bioatividade, pH alcalino, potencial de selamento químico) e desvantagens (retrabalhabilidade e custo) desses cimentos na prática clínica ¹⁸.

Do ponto de vista biológico e físico-químico, comparações entre epóxi e biocerâmicos confirmam que ambos conseguem atingir parâmetros mínimos de

radiopacidade, fluxo e manipulação, com nuances que devem orientar a seleção do material caso a caso ^{7,19}. Casos clínicos e séries de casos ampliam a evidência translacional do uso de biocerâmicos em situações complexas, como perfurações radiculares, reforçando sua aplicabilidade em cenários desafiadores, embora com nível de evidência inerente a relatos ²⁰. Um ponto sensível, especialmente para planejamento a longo prazo, é a retratabilidade: trabalhos clássicos indicam que seladores biocerâmicos podem demandar instrumentais específicos para remoção durante o retratamento, atribuindo-se essa dificuldade à sua interação química com a dentina ²¹.

A complexidade anatômica do sistema de canais adiciona camadas de variabilidade à adaptação do obturador e ao acesso às interfaces durante testes laboratoriais e procedimentos clínicos. Avaliações mostram que diferentes técnicas e instrumentos de preparo modificam a geometria do canal de maneiras distintas, o que tem implicações diretas para os resultados de push-out e selamento ²².

Diante desse panorama, observa-se heterogeneidade metodológica e variabilidade de composições comerciais, que explicam parte das divergências de resultados entre estudos. Diante disso, quando é necessário bioatividade e reparação tecidual o biocerâmico é a melhor opção. A escolha do material deve considerar as necessidades biológicas e clínicas de cada caso ^{1,4,17}.

Objetivos: comparar o desempenho dos seladores biocerâmicos ao AH Plus com foco em resistência de união, adesão às interfaces e implicações clínicas, sintetizar evidências sobre o efeito de umidade e secagem do canal na adesão de biocerâmicos, analisar a influência da técnica de obturação nos desfechos de *push-out* e vedamento, comparar propriedades físico-químicas pertinentes (pH, escoamento, tempo de presa, radiopacidade) e sua relação com desempenho adesivo, discutir retratabilidade e aplicações clínicas específicas dos biocerâmicos

2. METODOLOGIA

Este trabalho é uma revisão de literatura, com foco em comparar o desempenho de seladores biocerâmicos com o AH Plus (epóxi). A escolha por revisão de literatura foi feita pela diversidade de composições, protocolos e métodos de ensaio reportados na literatura sobre seladores à base de silicato de cálcio, condição que reforça a inadequação de uma síntese exclusivamente quantitativa frente à complexidade dos dados ^{1,2,15,17}.

Realizou-se busca nos sites PubMed/MEDLINE, SciELO. O período definido foi 2001–2025.

Utilizaram-se descritores e combinações em inglês e português, adaptados às teses da área e aos termos empregados nas revisões: bioceramic root canal sealer, calcium silicate-based sealer, hydraulic calcium silicate cement, AH Plus, epoxy resin sealer, push-out bond strength, adhesion, dentin, gutta-percha, sealing ability, apical leakage, retreatability, fracture resistance, discoloration, obturation technique ^{2,15,17}.

Foram elegíveis estudos originais in vitro e ex vivo, revisões sistemáticas e meta-análises que (i) avaliassem seladores biocerâmicos comparados a seladores à base de epóxi como o AH Plus.

Para cada estudo, registraram-se: (i) material; (ii) substrato e preparo; (iii) condição do canal ^{11,12}; (iv) técnica de obturação ¹⁴; (v) armazenamento/envelhecimento ; (vi) método de ensaio ^{5–7,9–10,15–16,20–21}; e (vii) resultados ^{10,21}.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 COMPOSIÇÃO E MECANISMOS DOS SELADORES BIOCERÂMICOS

Os seladores biocerâmicos utilizados em endodontia pertencem ao grupo dos materiais hidráulicos à base de silicato de cálcio. Sua matriz principal (tricalcium e/ou dicalcium silicate) hidrata-se na presença de água do canal ou da dentina, formando gel C–S–H e hidróxido de cálcio, o que eleva o pH e libera $\text{Ca}^{2+}/\text{OH}^-$ para o meio. Essa reação depende da disponibilidade hídrica local e da reatividade do pó, além de aditivos que controlam presa e trabalhabilidade, diferindo de seladores epóxi como o AH Plus, cuja polimerização ocorre por reação amina–epóxido sem necessidade de água livre ^{1,7,22}. A heterogeneidade de formulações (premisturados “ready-to-use” versus pó-líquido; tipo e fração de radiopacificantes) explica variações relevantes de desempenho entre marcas comerciais ^{1,2,4}.

A moisture-dependence é central ao mecanismo de presa desses cimentos. Em termos práticos, a água remanescente na dentina radicular funciona como “ativador” do processo de hidratação; por isso, níveis diferentes de umidade no substrato alteram o curso da reação e, por consequência, as propriedades mecânicas e adesivas observadas *in vitro* ^{1,11}. Evidências específicas mostram que a força de push-out de seladores biocerâmicos varia com o grau de umidade dentinária, reforçando que o comportamento do material é intrinsecamente sensível ao estado hídrico da parede do canal ¹¹. Protocolos de secagem mais ou menos agressivos também modulam propriedades físico-químicas e adesivas, como documentado para o Bio-C Sealer ¹².

O subproduto $\text{Ca}(\text{OH})_2$ confere alcalinidade inicial e sustentada, condição que favorece efeitos antimicrobianos e a precipitação de fosfatos de cálcio quando íons fosfato estão disponíveis, criando um microambiente propício à nucleação de apatita sobre a superfície do cimento e na interface com a dentina ^{1,5}. Esse fenômeno é frequentemente interpretado como um dos pilares da chamada bioatividade dos biocerâmicos, potencialmente contribuindo para o selamento químico da interface ao longo do tempo ^{2,6}. A literatura ultraestrutural demonstra

modificações de superfície e depósitos minerais após desafio bacteriano, compatíveis com esse mecanismo de defesa e maturação interfacial ⁵.

A interação com a dentina resulta de um acoplamento físico-químico. Do ponto de vista físico, a molhabilidade em dentina intrarradicular e a penetração em túbulos aumentam a área de contato e a ancoragem mecânica; quimicamente, a liberação de $\text{Ca}^{2+}/\text{OH}^-$ promove infiltração mineral em zonas desmineralizadas, com formação de apatita carbonatada na fronteira cimento–dentina ^{8–10}. Estudos com modelo de tubo de dentina mostram que seladores prontos para uso conseguem estabelecer uma interface íntima com depósitos minerais, embora apresentem porosidade intrínseca que precisa ser considerada ao interpretar resistência e selamento ⁹. Ensaio de micro push-out com biocerâmicos também evidenciam traços de bioatividade na interface, sugerindo contribuição além do simples “molde” mecânico ¹⁰.

As partículas e adições das formulações comerciais variam em tamanho, morfologia e química de superfície (p. ex., óxidos de zircônio, tântalo ou bismuto como radiopacificantes), o que influencia escoamento, radiopacidade, tempo de presa e solubilidade — propriedades diretamente ligadas à adaptação marginal e à estabilidade do obturador ^{1,7,13,16}. Classificações atuais dos cimentos higroscópicos organizam o mercado em subgrupos conforme matriz e aditivos, facilitando a correlação entre composição e comportamento clínico/laboratorial ¹³. Essas diferenças estruturais justificam que materiais biocerâmicos não sejam tratados como uma entidade única em comparações com seladores epóxi ⁴.

Comparações físico-químicas recentes entre AH Plus Bioceramic (silicato de cálcio), Bio-C Sealer (silicato de cálcio premisturado) e ADseal (epóxi) ilustram bem o papel da composição: apesar de todos atingirem radiopacidade mínima e apresentarem escoamento adequado, há nuances de tempo de presa e solubilidade que impactam diretamente o comportamento interfacial e a espessura da camada de cimento após a obturação ¹⁶. Em contraste, seladores epóxi como AH Plus clássico exibem polimerização por reação orgânica, menor dependência de água livre e um padrão de contração/preservação de volume distinto dos hidráulicos ⁷. Assim, diferenças de mecanismo de presa explicam, ao menos em parte,

discrepâncias observadas nos desfechos de push-out e vedamento entre famílias de materiais ^{1,7,16}.

A bioatividade dos biocerâmicos é frequentemente discutida em três eixos: aumento de pH e liberação de Ca^{2+} , formação de apatita na superfície/na interface (com potencial para “autossalvamento” de microdefeitos), e respostas biocompatíveis dos tecidos apicais e periapicais ^{1,2,6}. Ensaios in vitro com materiais mais novos corroboram biocompatibilidade adequada e sugerem capacidade de indução mineral na fronteira com a dentina, embora ressaltem que porosidade e microestrutura devem ser otimizadas para maximizar desempenho mecânico sem sacrificar a troca iônica que sustenta a bioatividade ^{6,9}. Em síntese, o mecanismo pretendido é o de selamento dinâmico, em que a interface tende a mineralizar com o tempo ^{1,2}.

A molhabilidade e a energia de superfície da dentina condicionam a extensão da penetração em túbulos e a qualidade da camada de contato. Estudos comparativos demonstram que biocerâmicos podem apresentar ângulos de contato favoráveis e adesão satisfatória em dentina intrarradicular, cenário que, aliado à precipitação mineral, ajuda a explicar a ocorrência de falhas coesas em alguns ensaios de push-out — indicativas de uma interface relativamente robusta ⁸. Entretanto, tais vantagens podem ser mitigadas por excesso de umidade, smear layer residual ou espessura excessiva de cimento, reforçando a importância de protocolos controlados de irrigação e secagem ^{1,11,12}.

Do ponto de vista microestrutural, a presença de poros abertos e fechados dentro da matriz hidratada influencia difusão iônica, resistência e selamento. O modelo de tubo de dentina revelou que alguns seladores prontos para uso exibem porosidade distribuída e microvazios que podem atuar como caminhos de difusão, ao mesmo tempo em que a precipitação de apatita na interface contribui para o bloqueio gradual dessas vias ao longo do envelhecimento ⁹. Esse balanço dinâmico entre troca iônica (necessária à bioatividade) e densificação da matriz é parte do “modo de ação” esperado dos biocerâmicos ^{1,2,9}.

A composição também dialoga com a capacidade antimicrobiana intrínseca. A alcalinidade decorrente da liberação de OH^- e as alterações ultraestruturais

observadas após desafio bacteriano sugerem que biocerâmicos podem oferecer resiliência adicional à colonização, sobretudo em microgaps residuais, ainda que esse efeito seja dependente do ambiente e do tempo de exposição ⁵. Tais achados não substituem o papel do selamento mecânico e da higiene química do preparo, mas ajudam a explicar diferenças de comportamento frente ao desafio microbiano durante o envelhecimento ^{5,6}.

No espectro das novas gerações de seladores, revisões comparativas e de idealidade destacam que a convergência desejada inclui: fluidez controlada para wetting adequado, tempo de presa clinicamente conveniente, baixa solubilidade após cura, radiopacidade suficiente e bioatividade mensurável, sem comprometer retrabalhabilidade e estabilidade cromática ^{4,6}. Embora várias marcas já atendam a parte desses requisitos, diferenças de matriz, radiopacificantes e tamanho de partícula ainda resultam em perfis mecânicos e interfaciais não equivalentes, justificando a avaliação caso a caso ^{1,4,16,22}.

3.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

As propriedades físico-químicas dos seladores determinam tanto a manipulação clínica quanto a qualidade do vedamento após a obturação. Em materiais hidráulicos à base de silicato de cálcio, a hidratação gera gel C–S–H e hidróxido de cálcio, elevando o pH e liberando $\text{Ca}^{2+}/\text{OH}^-$; já seladores epóxi como o AH Plus curam por reação amina–epóxido, com outra dinâmica volumétrica e menor dependência de água livre ^{1,7}. Diretrizes e revisões recentes destacam que diferenças de formulação (premisturados versus pó-líquido; natureza e fração de radiopacificantes) modulam esses parâmetros e, por consequência, os desfechos de adaptação marginal e estabilidade do conjunto obturador ^{1,2,4}.

O pH alcalino dos biocerâmicos é considerado um atributo funcional, pois favorece atividade antimicrobiana e a precipitação de fosfatos de cálcio na interface, com potencial de mineralização progressiva do contato cimento–dentina ^{1,5}. Ensaios sob desafio bacteriano mostram alterações ultraestruturais compatíveis com esse mecanismo, sugerindo que a elevação de pH e a disponibilidade de Ca^{2+} participam de uma resposta de “maturação” superficial que pode contribuir para o vedamento

ao longo do tempo ⁵. No entanto, o benefício químico precisa ser equilibrado com a integridade microestrutural do selador, sob pena de perdas mecânicas se houver porosidade excessiva ^{6,9}.

O tempo de presa é outro ponto crítico. Nos biocerâmicos, ele depende da disponibilidade hídrica e da reatividade do cimento; em condições clínicas, isso significa que a umidade remanescente do canal pode acelerar, retardar ou heterogeneizar a cura ¹. Comparações contemporâneas entre AH Plus Bioceramic, Bio-C Sealer e ADseal evidenciam tempos de presa distintos e clinicamente relevantes, que se refletem na manipulabilidade e no momento seguro para condensação e corte de cones ¹⁶. Como o AH Plus clássico cura por polimerização orgânica, seu tempo de presa tende a ser menos sensível à umidade, o que explica parte das diferenças de comportamento interfacial observadas entre famílias ^{7,16}.

O escoamento (flow) precisa ser suficiente para molhar a dentina, penetrar irregularidades e reduzir vazios, mas sem produzir filmes espessos de cimento que se tornem pontos de fragilidade. Estudos comparativos relatam variações de escoamento entre epóxi e biocerâmicos e também entre biocerâmicos de marcas distintas, associando tais diferenças a tamanho de partículas, veículo e radiopacificantes ^{6,7}. Em termos de efeito clínico, maior escoamento pode melhorar a adaptação marginal em anatomias complexas, desde que o tempo de presa e a solubilidade não comprometam a integridade do filme após a cura ^{6,7,16}.

A radiopacidade adequada é imprescindível para controle por imagem e avaliação de preenchimento. A literatura mostra que ela é fortemente influenciada pelo tipo e pela concentração do radiopacificante (p. ex., óxido de zircônio, tântalo, bismuto) incorporado à matriz do cimento ¹³. Avaliações recentes com AH Plus Bioceramic, Bio-C Sealer e ADseal confirmam perfis de radiopacidade compatíveis com o uso clínico e destacam que escolhas de radiopacificante impactam não só a visualização radiográfica, mas também tempo de presa e estabilidade ¹⁶. Essa relação composição-propriedade ajuda a explicar divergências entre estudos quando marcas diferentes são comparadas sob um mesmo desfecho.

A solubilidade e a estabilidade dimensional após a cura completam o quadro. Biocerâmicos podem exibir troca iônica e porosidade superficial capazes de

sustentar bioatividade sem, necessariamente, comprometer a integridade volumétrica; contudo, a microestrutura precisa ser densa o suficiente para resistir ao envelhecimento em meios aquosos ^{2,6}. Comparativos físico-químicos contemporâneos mostram nuances de solubilidade entre materiais hidráulicos e epóxi, reforçando que estabilidade, escoamento e tempo de presa devem ser interpretados em conjunto para prever a performance clínica ^{7,16}.

A porosidade intrínseca dos biocerâmicos prontos para uso, observada em modelos de tubo de dentina, influencia tanto a difusão iônica quanto a resistência mecânica e o vedamento. Estudos recentes demonstram bioatividade e interface íntima com a dentina, mas também revelam microvazios que, se excessivos, podem atuar como caminhos de infiltração antes de serem potencialmente bloqueados por precipitados de apatita durante o envelhecimento ⁹. Achados de micro push-out com seladores biocerâmicos sugerem que a mineralização interfacial pode mitigar parte desses riscos, reforçando o caráter dinâmico do selamento nesses materiais ¹⁰.

A umidade e o protocolo de secagem do canal se conectam diretamente a pH, tempo de presa e escoamento. Evidências controladas mostram que diferentes níveis de umidade alteram a força de push-out de biocerâmicos, o que implica que variações físico-químicas induzidas pela água se traduzem em efeitos adesivos mensuráveis ¹¹. De forma convergente, o ajuste do protocolo de secagem modificou propriedades físico-químicas e adesão do Bio-C Sealer, reforçando a necessidade de padronização operatória ao comparar materiais ¹². Em síntese: a gestão da umidade é uma alavanca clínica direta sobre a performance físico-química.

Essas propriedades também devem ser lidas à luz do método de preparo e da geometria do canal, que definem espessura do filme e distribuição do cimento. Estudos por micro-CT demonstram que técnicas e instrumentos de preparo alteram a morfologia de maneiras distintas, o que influencia a capacidade do cimento (com seu escoamento e tempo de presa específicos) de preencher istmos e reentrâncias sem gerar acúmulos indesejados ²¹. Assim, a combinação material + técnica determina, na prática, o ambiente físico que o selador encontra para expressar suas propriedades.

No comparativo funcional, revisões sistemáticas e meta-análises sobre capacidade seladora sugerem que seladores epóxi podem apresentar vantagem em determinados modelos, enquanto biocerâmicos tendem a ganhar relevância quando a bioatividade e a interação química com a dentina são valorizadas ^{2,15}. Em paralelo, estudos físico-químicos recentes mostram que diferentes biocerâmicos já alcançam radiopacidade e escoamento adequados, com tempos de presa e estabilidade que variam por formulação ¹⁶. Portanto, a seleção clínica deve considerar cenário operatório (gestão da umidade, técnica de obturação) e prioridades do caso (vedamento imediato, potencial de mineralização, previsibilidade de retratamento).

3.3 DESEMPENHO BIOLÓGICO

A biocompatibilidade dos seladores hidráulicos à base de silicato de cálcio é um dos principais argumentos a favor de sua adoção clínica. Revisões amplas descrevem que essas formulações, ao hidratarem, liberam $\text{Ca}^{2+}/\text{OH}^-$ e elevam o pH local, criando um microambiente geralmente favorável à resposta dos tecidos e à reparação apical, com citotoxicidade baixa a moderada em modelos in vitro quando corretamente manipuladas ^{1,2}. Em contraste com seladores orgânicos, a matriz inorgânica e a troca iônica contínua dos biocerâmicos tendem a modular a resposta celular no sentido de mineralização da interface, o que tem respaldo laboratorial e plausibilidade mecânica ¹.

A bioatividade tem sido demonstrada por precipitação de fosfatos de cálcio/apatita na superfície e na região de contato com a dentina quando há disponibilidade de fosfato, sugerindo um “selamento dinâmico” que pode evoluir com o tempo ^{1,2}. Em avaliação sob desafio bacteriano, materiais de obturação exibiram mudanças ultraestruturais e propriedades antimicrobianas que sustentam a hipótese de que a alcalinidade e a liberação de íons participam de uma resposta de defesa da interface, com potencial para reduzir a viabilidade microbiana remanescente em microgaps ⁵.

Modelos experimentais mais recentes, como o tubo de dentina, permitiram observar simultaneamente biocompatibilidade, bioatividade e a microarquitetura da interface cimento–dentina em seladores “ready-to-use”. Esses estudos mostram

depósitos minerais contínuos na fronteira, indicativos de infiltração/precipitação mineral, mas também revelam porosidade e microvazios intracimento que precisam ser controlados para não comprometer a resistência e o selamento inicial ⁹. Esse balanço entre troca iônica (que sustenta a bioatividade) e densificação da matriz é central para o desempenho biológico e mecânico desses materiais ^{1,2,9}.

Do ponto de vista citotóxico, comparações entre novas e antigas gerações de seladores indicam que biocerâmicos tendem a apresentar perfil celularmente mais favorável do que algumas formulações à base de resina, sobretudo após a presa, quando a liberação de componentes solúveis diminui ^{6,7}. Entretanto, revisões de idealidade alertam que diferenças de composição (matriz, radiopacificantes, solventes/veículo) e de granulometria influenciam a resposta tecidual, razão pela qual não se deve extrapolar achados de uma marca para toda a classe ^{4,6}.

A molhabilidade e a energia de superfície em dentina intrarradicular contribuem para a adesão inicial e para a extensão da penetração em túbulos, aumentando a área de contato para trocas iônicas e precipitação mineral. Ensaios específicos demonstram boa molhabilidade e adesão em dentina para diferentes biocerâmicos, o que, aliado ao pH elevado, constitui um ambiente propício à biointegração da interface ⁸. Ainda assim, a presença de smear layer e a umidade do substrato modulam esses fenômenos, devendo o protocolo de irrigação e secagem ser cuidadosamente definido ^{1,11,12}.

Na perspectiva clínica, relatos e séries de casos ilustram a tolerabilidade tecidual e o potencial de reparação quando biocerâmicos são empregados em situações críticas, como perfurações radiculares, com manutenção de função e ausência de sinais de irritação persistente ¹⁹. Embora o nível de evidência de relatos seja limitado, eles dialogam com a base laboratorial e ajudam a sustentar a plausibilidade biológica do uso desses materiais em ambientes desafiadores.

Uma síntese do corpo de evidências indica, portanto, que biocerâmicos combinam: (i) biocompatibilidade adequada; (ii) bioatividade mensurável (elevação de pH, liberação de Ca^{2+} e formação de apatita); e (iii) interação interfacial compatível com mineralização progressiva — atributos que, em conjunto, podem favorecer a manutenção do selamento ao longo do tempo, desde que a

microestrutura (porosidade/solubilidade) e as condições operatórias (umidade, preparo superficial) sejam cuidadosamente controladas ^{1,2,4–6,9,11–12}.

3.4 RESISTÊNCIA DE UNIÃO

A resistência de união medida por push-out é o indicador laboratorial mais empregado para estimar a estabilidade mecânica do conjunto cimento–guta-percha–dentina e, portanto, sua resiliência ao deslocamento sob tensões funcionais. Nos seladores biocerâmicos (EndoSequence/TotalFill BC, BioRoot RCS, CeraSeal, Bio-C Sealer, entre outros), esse desempenho resulta da combinação entre molhabilidade e ancoragem física com interações químicas decorrentes da liberação de $\text{Ca}^{2+}/\text{OH}^-$ e da precipitação de apatita na interface; já nos seladores epóxi como o AH Plus, predomina a polimerização orgânica e o entrelaçamento físico com a superfície dentinária. Revisões e sínteses de materiais hidráulicos registram grande variação de valores entre marcas e protocolos, o que exige que a comparação seja feita material-a-material e condição-a-condição, evitando generalizações de classe ^{1,2,4,7}.

Quando se reúnem estudos comparativos, emergem três padrões recorrentes: cenários em que o AH Plus apresenta push-out superior, trabalhos que apontam equivalência e, em condições específicas, situações de vantagem dos biocerâmicos. Em nível de idealidade e de desempenho, as diferenças de formulação (premix versus pó-líquido, tipo de radiopacificante e granulometria) ajudam a explicar por que EndoSequence/TotalFill e BioRoot, em protocolos controlados, frequentemente se aproximam dos resultados de epóxi, enquanto outras formulações podem apresentar desempenho inferior ^{1,2,4,17}. Embora o desfecho “capacidade seladora” não seja idêntico ao push-out, meta-análise sobre selamento sugeriu vantagem média dos epóxi em determinados modelos, sinalizando que a interface criada pelo AH Plus pode oferecer coesão e continuidade superiores em parte das condições testadas; ainda assim, a própria síntese destaca a heterogeneidade metodológica como fator limitante para conclusões taxativas ¹⁵.

As explicações para vantagem do AH Plus, quando observada, incluem seu tempo de presa pouco sensível à umidade e a formação de um filme coeso após a polimerização, menos dependente do ambiente hídrico do canal ^{7,16}. Em contrapartida, os biocerâmicos tendem a apresentar push-out menor quando a hidratação não é favorecida, quando há filmes espessos de cimento ou quando a porosidade intrínseca permanece elevada no período inicial, condições que prejudicam a coesão interna e a continuidade da interface ^{6,9,16}. Por outro lado, quando umidade e superfície dentinária são manejadas adequadamente — com secagem padronizada, remoção apropriada da smear layer e controle da espessura do filme —, registram-se valores equivalentes ou mesmo superiores para biocerâmicos, coerentes com sua molhabilidade favorável e com a mineralização interfacial demonstrada em modelos experimentais e de tubo de dentina ^{8–12}.

A leitura dos padrões de falha é crucial para interpretar os números de push-out. Em biocerâmicos, não é raro observar falhas mistas ou coesas após envelhecimento, compatíveis com ancoragem em túbulos e precipitação de apatita que “deslocam” a fraqueza para dentro do cimento. Já falhas predominantemente adesivas na interface cimento–dentina costumam aparecer quando a umidade é inadequada, a smear layer persiste ou a camada de cimento é espessa e irregular, situações que diminuem a área efetiva de contato e reduzem a resistência medida ^{9–10,1,8,11–12}. Assim, o modo de falha funciona como marcador indireto da qualidade interfacial obtida pelo protocolo adotado.

A técnica de obturação também modula o push-out ao alterar espessura do filme, contato efetivo com a dentina e distribuição de vazios. Comparações entre condensação lateral fria, técnicas aquecidas e monocone mostram diferenças de selamento apical que, por analogia mecânica, ajudam a explicar variações de push-out: técnicas que reduzem vazios, sem gerar excesso de cimento, tendem a favorecer melhores valores, enquanto termoplastificação sem controle pode aumentar a espessura do cimento e predispor a falhas coesas no material ^{10,14}. Em termos práticos, a escolha da técnica precisa ser considerada variável de controle em qualquer comparação entre materiais.

A geometria do canal após o preparo, mapeada por micro-CT, acrescenta outro nível de variabilidade, pois diferentes sistemas e técnicas de instrumentação produzem morfologias distintas (istmos, ovalizações, paredes não tocadas), influenciando a continuidade e a espessura da camada de cimento e, por consequência, o padrão de tensões aplicado no ensaio. Em terços apicais, onde o acesso é restrito e a espessura de cimento tende a aumentar, observam-se com frequência valores menores e mais falhas adesivas; já nos terços cervical e médio, filmes delgados e contato mais homogêneo favorecem a coesão ^{21,10}. Qualquer síntese responsável deve, portanto, estratificar resultados por terço radicular.

No plano fisicoquímico, tempo de presa, escoamento e solubilidade — além de aspectos de radiopacidade que refletem carga de radiopacificantes — diferem entre AH Plus Bioceramic, Bio-C Sealer e ADSeal e ajudam a compreender desempenhos contrastantes. Escoamento maior favorece molhamento e preenchimento de microirregularidades; tempo de presa adequado evita perturbações durante a condensação; e baixa solubilidade após a cura preserva a coesão durante o envelhecimento. A microestrutura mais densa reduz vias potenciais de infiltração e de falha, enquanto porosidade excessiva penaliza a resistência mecânica; por isso, a interpretação do push-out precisa integrar propriedades do material ao protocolo operatório ^{6,7,16}.

Quando a discussão se organiza por material, observa-se que os seladores premisturados do tipo EndoSequence/TotalFill BC tendem a alcançar valores equivalentes ao AH Plus quando a umidade é controlada e a camada de cimento permanece delgada; sob secagem excessiva ou películas espessas, o desempenho decai. O BioRoot RCS, em sistema pó-líquido, aproxima-se de epóxi quando sua hidratação é favorecida, mas é sensível ao tempo de presa e à espessura do filme. Já CeraSeal e outros silicatos de cálcio mostram resultados dependentes da formulação e do protocolo, com relatos de equivalência em parte dos cenários e de inferioridade ou superioridade em outros, conforme variam umidade, técnica e parâmetros de teste ^{1,2,4,8,11–12,16–17}.

A tradução clínica desses achados é direta: maximiza-se o push-out de biocerâmicos ao padronizar a secagem para manter umidade controlada —

evitando tanto o canal encharcado quanto a dessiccação extrema —, ao escolher técnica de obturação que minimize vazios e espessura de cimento, e ao selecionar a formulação de acordo com tempo de presa e escoamento requeridos pelo caso, respeitando o período de maturação antes de submeter o dente a cargas significativas ^{11–12,14,16}. Em síntese, o comparativo biocerâmicos versus AH Plus é fortemente contexto-dependente: há trabalhos que favorecem os epóxi, outros que mostram equivalência e, sob condições que privilegiam hidratação e mineralização interfacial, estudos que demonstram vantagem biocerâmica. O denominador comum é que variáveis operatórias controláveis no consultório respondem por parcela substancial da variabilidade entre estudos e devem integrar o raciocínio clínico tanto quanto a escolha do material ^{1,2,4,7–12,14–17,21}.

A heterogeneidade metodológica dos ensaios de push-out é um ponto central para interpretar comparações entre biocerâmicos e AH Plus. Parâmetros como espessura do disco de dentina, diâmetro/velocidade do pino de carga, tempo de armazenamento e meio de envelhecimento (água, PBS, fluido corpóreo simulado) alteram o padrão de tensões e o grau de maturação/precipitação mineral antes do teste, podendo deslocar a direção do efeito entre materiais avaliados sob protocolos distintos ^{1,2,9}. Assim, estudos com envelhecimento mais prolongado e meios ricos em fosfato tendem a favorecer a mineralização interfacial dos hidráulicos, ao passo que janelas curtas de cura ou meios pobres em íons podem subestimar seu potencial ^{1,5,9}.

Revisões de materiais hidráulicos apontam que a remoção adequada do smear amplia a área de contato e a molhabilidade, favorecendo a penetração em túbulos; em compensação, protocolos muito agressivos de desidratação podem comprometer a hidratação inicial do cimento e reduzir o push-out dos biocerâmicos ¹. Esse equilíbrio explica por que protocolos de secagem padronizada têm mostrado impacto direto sobre a resistência de união do Bio-C Sealer e de outras formulações dependentes de umidade ^{11,12}.

A distribuição de estresse no ensaio é influenciada pela geometria do canal gerada durante o preparo. Avaliações por micro-CT demonstram que diferentes sistemas produzem paredes não tocadas, istmos e ovalizações, o que leva a filmes

de cimento mais espessos em áreas específicas e, por consequência, a maior probabilidade de falhas coesas em vez de adesivas ²¹. Esse efeito é especialmente notável no terço apical, onde a combinação de acesso restrito e espessura de cimento costuma reduzir os valores de push-out em comparação aos terços cervical e médio ^{10,21}.

No eixo técnica de obturação, as evidências sugerem que condensação lateral fria, monocone e técnicas aquecidas criam ambientes físicos distintos para o cimento. Técnicas que minimizam vazios e evitam filmes espessos costumam associar-se a melhores resultados; já a termoplastificação sem controle pode aumentar a espessura do cimento e predispor a falhas coesas no material, mesmo quando o selamento apical aparente é satisfatório ¹⁴. A mensagem prática é que a técnica deve ser tratada como variável crítica, não apenas como detalhe operacional.

A composição e os radiopacificantes modulam propriedades que repercutem no push-out. Formulações com óxido de zircônio ou tântalo, tamanho de partícula otimizado e veículos que preservam umidade disponível tendem a equilibrar escoamento, tempo de presa e estabilidade, enquanto escolhas de matriz/adições menos favoráveis podem elevar solubilidade inicial e porosidade, com impacto negativo na coesão ^{13,16}. Essa relação composição-propriedade ajuda a entender por que EndoSequence/TotalFill (premix) e BioRoot (pó-líquido) oscilam de desempenho conforme o protocolo e o “fit” com suas janelas ideais de hidratação ^{1,2,4,17}.

Do ponto de vista mecânico-químico, o tempo de presa dirige a integração do filme de cimento à microtopografia dentinária e à guta-percha, enquanto o escoamento governa o molhamento e o preenchimento de microirregularidades. Em biocerâmicos, atrasos ou heterogeneidade de presa por umidade insuficiente/excessiva podem resultar em filmes menos coesos; em contrapartida, no AH Plus a polimerização orgânica é menos sensível à água livre, o que explica a vantagem pontual observada em cenários de canal excessivamente seco ou super-desidratado ^{7,16}.

É relevante notar que push-out e capacidade seladora são desfechos correlatos, porém distintos. Meta-análise recente reportou vantagem média de epóxi para selamento em alguns modelos, mas reconheceu heterogeneidade elevada entre métodos de avaliação, o que limita inferências diretas para push-out ¹⁵. Ainda assim, quando estudos controlam umidade, técnica e terço radicular, não é incomum observar equivalência entre biocerâmicos (EndoSequence/TotalFill, BioRoot, CeraSeal/Bio-C) e AH Plus, ou até superioridade biocerâmica em situações que privilegiam mineralização interfacial após período adequado de cura ^{1,2,8-12,17}.

No nível ultraestrutural, modelos de tubo de dentina e ensaios in vitro mostram depósitos de apatita na interface e dentro de túbulos após envelhecimento, com transição de falha para padrões misto/coeso em alguns cenários, coerente com integração química progressiva do filme ^{9,10}. Esse comportamento “dinâmico” distingue os hidráulicos de seladores epóxi e reforça a importância de janelas de avaliação que considerem maturação antes da medição do push-out.

Em termos de planejamento clínico, três decisões ajudam a “puxar para cima” o push-out dos biocerâmicos: controle fino da umidade (evitar tanto o canal encharcado quanto a dessiccação extrema), técnica que reduza vazios sem gerar acúmulo de cimento e seleção da formulação alinhada ao tempo de presa/fluxo exigidos pelo caso (p. ex., canais longos/estreitos ou anatomias com istmos) ^{11-12,14,16,21}. Esse tripé material-técnica-umidade explica boa parte da variabilidade entre estudos e deve entrar no raciocínio clínico com o mesmo peso da escolha do cimento.

Também é prudente integrar o push-out com outros desfechos do trabalho: penetração em túbulos e capacidade seladora ajudam a compor a fotografia da interface; retrabalhabilidade importa para dentes com maior probabilidade de retratamento; e alteração de cor pesa em áreas estéticas. Em síntese, push-out forte não garante, isoladamente, melhor prognóstico, mas, combinado a bom selamento e estabilidade, aumenta a robustez do conjunto obturador ^{1,2,9,15,20}.

Em conjunto, esses elementos reforçam que a comparação “biocerâmicos versus AH Plus” não é binária; ela depende do casamento entre material, técnica e

ambiente hídrico. Quando esse casamento é bem-feito, os biocerâmicos tendem a expressar molhabilidade, integração química e coesão suficientes para igualar — e, em contextos específicos, superar — o desempenho do AH Plus em push-out, mantendo o benefício adicional de bioatividade na interface ^{1,2,8–12,14–17}.

3.5 ADESÃO CIMENTO–DENTINA E CIMENTO–GUTA-PERCHA

A adesão dos seladores biocerâmicos à dentina decorre de um acoplamento físico-químico: o componente físico envolve molhabilidade adequada e penetração em irregularidades e túbulos; o componente químico está ligado à hidratação do silicato de cálcio, com liberação de $\text{Ca}^{2+}/\text{OH}^-$ e subsequente precipitação de apatita na fronteira, criando uma zona de infiltração/mineralização interfacial que tende a se consolidar com o tempo ^{1,2}. Em seladores epóxi como o AH Plus, a ligação é predominantemente física, dependente de espalhamento, microretenções e entrelaçamento superficial após a polimerização amina-epóxido, com menor participação de mecanismos químicos com a dentina ⁷. Essas diferenças de modo de ação ajudam a explicar por que a qualidade da interface biocerâmica é particularmente sensível a variáveis operatórias (umidade, smear layer, técnica) e composicionais (veículo, radiopacificantes) ^{1,4,7,13}.

A molhabilidade em dentina intrarradicular é, em geral, favorável aos biocerâmicos e se associa à redução do ângulo de contato e maior área de contato efetivo, facilitando a ancoragem e a difusão iônica inicial; isso foi demonstrado em ensaios de molhabilidade/adesão com diferentes formulações ⁸. Estudos com modelo de tubo de dentina e análises ultraestruturais confirmam a presença de depósitos minerais contínuos na interface e dentro de túbulos após envelhecimento, ao mesmo tempo em que evidenciam porosidade intracimento que precisa ser controlada para não comprometer a coesão e a continuidade da camada ^{9,6}. Essa bioatividade interfacial é um diferencial dos hidráulicos e sustenta a hipótese de selamento dinâmico, desde que o ambiente favoreça a hidratação e a precipitação mineral ^{1,2,5,9}.

O papel da smear layer é central. A sua remoção tende a expor túbulos e aumentar a energia de superfície, favorecendo tanto a penetração do selador

quanto a difusão de $\text{Ca}^{2+}/\text{OH}^-$ — condições desejáveis para biocerâmicos ¹. Por outro lado, o excesso de desidratação após a irrigação pode inibir a hidratação do cimento, reduzindo a qualidade da interface; evidências controladas demonstram que níveis de umidade e protocolo de secagem modulam significativamente a resistência de união e, por implicação, a adesão efetiva dos biocerâmicos ^{11,12}. Assim, o equilíbrio entre remoção do smear e umidade residual controlada parece ser a janela operatória ótima para maximizar a infiltração mineral e a coesão interfacial ^{1,11,12}.

Na interface cimento–guta-percha, tanto biocerâmicos quanto epóxi dependem sobretudo de interações físicas (molhabilidade do polímero, microretenções e compatibilidade superficial do cone), já que a gutapercha é quimicamente inerte. Ajustes de escoamento e tempo de presa influenciam a molhagem do cone e a formação de um filme contínuo ao redor do material termoplástico ^{6,7,16}. Em biocerâmicos, uma cura heterogênea por umidade inadequada pode gerar poros no filme junto ao cone e facilitar falhas coesas no cimento; em epóxi, perturbações durante a polimerização podem deixar microgaps na periferia do cone ^{6,7,16}. Em ambos os casos, filmes espessos e vazios favorecem infiltração e instabilidade, reforçando a importância de técnicas que controlem volume e distribuição do selador ¹⁴.

A comparação entre interfaces revela que biocerâmicos tendem a formar zonas mineralizadas na dentina, o que desloca, com o envelhecimento, o ponto fraco para o interior do cimento (falhas coesas ou mistas); quando a janela hídrica é inadequada, prevalecem falhas adesivas na fronteira dentina-cimento. Em epóxi, é comum observar falhas mistas/adesivas dependendo do preparo superficial e da espessura do filme, mas sem o componente de mineralização progressiva ^{9,10,1,7}. Em síntese, padrões de falha funcionam como marcadores: mais coesa/mista sugere interface mais integrada; mais adesiva indica fragilidade do contato, com maior risco de microinfiltração.

No que concerne à microinfiltração e estabilidade, meta-análise recente reportou vantagem média de seladores epóxi em alguns modelos, embora reconheça ampla heterogeneidade de métodos e tempos de avaliação — o que

limita extrapolações diretas para todas as interfaces e materiais ¹⁵. Em contrapartida, revisões sobre seladores premisturados e estudos que controlam umidade, remoção do smear e técnica apontam desempenho equivalente entre biocerâmicos (EndoSequence/TotalFill, BioRoot, CeraSeal/Bio-C) e AH Plus, com relatos de vantagem biocerâmica quando há tempo de maturação suficiente para mineralização interfacial ^{1,2,17}. Assim, a estabilidade do sistema está menos vinculada a uma “classe” de cimento e mais ao ajuste fino do protocolo e à compatibilidade material-substrato.

A técnica de obturação interfere diretamente na qualidade das interfaces. Condensação lateral fria, técnicas aquecidas e monocone produzem espessuras de filme e distribuições de vazios distintas; técnicas que reduzem vazios e promovem filmes delgados/contínuos tendem a melhorar a adesão em ambas as interfaces, enquanto termoplastificação sem controle pode aumentar o volume de selador e predispor a falhas coesas no cimento, mesmo com aparente bom selamento radiográfico ^{14,10}. Em canais com morfologia complexa, mapeada por micro-CT, a presença de istmos e ovalizações favorece acúmulos de cimento e discontinuidades na interface, principalmente no terço apical, onde o acesso é restrito ²¹.

Do ponto de vista fisicoquímico, escoamento e tempo de presa modulam a aderência ao cone e a umidificação da dentina. Comparativos recentes entre AH Plus Bioceramic, Bio-C Sealer e ADseal mostram perfís distintos desses atributos, que se traduzem em interfaces mais ou menos contínuas conforme formulação e ambiente hídrico ¹⁶. Em biocerâmicos, o controle de umidade é decisivo para que a hidratação gere matriz densa e sustentada; em epóxi, a estabilidade volumétrica pós-polimerização ajuda a manter a continuidade da película, desde que não haja contração significativa ou manipulação excessiva durante a cura ^{7,16}.

A implicação clínica direta é que estratégias de irrigação/ativação seguidas de secagem padronizada — evitando tanto o canal encharcado quanto a dessiccação extrema — favorecem a adesão dentinária de biocerâmicos e reduzem microgaps junto ao cone ^{11,12,14}. Aliado a isso, a escolha de técnica que gere filmes delgados e vazios mínimos diminui a probabilidade de falhas coesas no cimento e melhora a estabilidade global do obturador ¹⁴. Em casos com expectativa de retrabalho,

lembrar que a maior integração química dos biocerâmicos à dentina pode aumentar o desafio de remoção, exigindo protocolos específicos no retratamento ²⁰.

A seguir, um resumo comparativo que ajuda a decidir como manejar a interface conforme o material e o alvo de adesão:

Em síntese, a adesão cimento–dentina dos biocerâmicos depende de janela hídrica e superfície favoráveis para expressar sua bioatividade e formar uma interface mineralizada estável; a adesão ao cone permanece um elo fisicamente mediado, que exige escoamento e tempo de presa compatíveis com a técnica. Em epóxi, a previsibilidade decorre de uma polimerização menos sensível à água, mas sem os ganhos de mineralização; desse modo, a estabilidade a longo prazo de cada sistema será resultado do ajuste fino do protocolo (irrigação, secagem, técnica) aliado à compatibilidade material–substrato ^{1,2,5–9,11–16,20–21}.

A condição química e topográfica da dentina após a irrigação é determinante para a adesão. A remoção da smear layer com EDTA expõe túbulos e aumenta a energia de superfície, favorecendo molhabilidade e difusão iônica — cenário particularmente benéfico para biocerâmicos, cujo mecanismo inclui infiltração/mineralização interfacial ^{1,8}. Contudo, desidratação excessiva após a irrigação (p. ex., ar por tempo prolongado) pode reduzir a hidratação do cimento e “quebrar” o ciclo de pega, piorando a qualidade da interface; estudos controlados demonstram queda mensurável da resistência de união quando a umidade sai da janela ideal ^{11,12}. Em contraste, o AH Plus depende menos da água livre para polimerizar, o que explica sua maior resiliência quando o substrato é inadvertidamente dessicado ⁷.

A heterogeneidade ao longo dos terços radiculares também afeta a interface. Diferenças naturais de densidade e diâmetro de túbulos e a morfologia pós-preparo (istmos, áreas não tocadas) tendem a produzir camadas de cimento mais espessas e descontínuas no terço apical, com maior probabilidade de falhas adesivas e valores inferiores de push-out ^{10,21}. Nos terços cervical e médio, onde o acesso e a compactação são mais favoráveis, é mais comum encontrar filmes delgados/contínuos e falhas mistas/coesas, sugerindo interface mais integrada ¹⁰.

Por isso, interpretações e protocolos clínicos devem considerar estratificação por terço, tanto para análise quanto para tomada de decisão.

Na interface com a guta-percha, a adesão é essencialmente física em ambas as famílias de seladores; logo, escoamento, tempo de presa e técnica comandam a continuidade do filme. Técnicas que aumentam vazios ou geram excesso de selador ao redor do cone (p. ex., termoplastificação sem controle) elevam o risco de falha coesa no cimento e de microgaps periféricos ¹⁴. Comparativos físico-químicos recentes indicam que AH Plus Bioceramic, Bio-C Sealer e ADseal exibem perfis distintos desses atributos, o que se traduz em interfaces com o cone mais ou menos contínuas conforme formulação e ambiente hídrico do canal ^{16,7,22}. Em síntese, o manejo da quantidade de selador e do timing de condensação é tão importante quanto a escolha do material.

Os efeitos do envelhecimento e do meio de armazenamento completam o quadro. Em meios com fosfato, biocerâmicos tendem a formar precipitados de apatita na fronteira com a dentina, fenômeno observado em análises ultraestruturais e modelos de tubo de dentina; isso sustenta a noção de selamento dinâmico com potencial de reduzir microgaps ao longo do tempo ^{1,5,9}. Já em janelas curtas de cura ou em meios pouco iônicos, esse potencial pode ser subestimado, resultando em interfaces ainda imaturas e mais vulneráveis ^{1,9}. Embora push-out e microinfiltração não sejam sinônimos, meta-análise sugere vantagem média de epóxi em alguns modelos de selamento, lembrando que a heterogeneidade metodológica limita generalizações e que a maturação interfacial dos hidráulicos pode alterar o quadro em avaliações tardias ¹⁵.

Do ponto de vista clínico-estratégico, a escolha entre biocerâmico e epóxi deve conjugar adesão desejada com viabilidade de retratamento, estética e previsibilidade operatória. Em dentes com alta probabilidade de retrabalho, a interface quimicamente integrada dos biocerâmicos com a dentina pode tornar a remoção mais desafiadora, demandando técnicas específicas, ao passo que seladores epóxi tendem a ser mais retratáveis ²⁰. Por outro lado, quando se busca bioatividade na interface e potencial de mineralização progressiva, os biocerâmicos ganham apelo, desde que a equipe controle irrigação, secagem e técnica para

manter a janela hídrica ideal ^{1,2}. Em última análise, microinfiltração e estabilidade derivam menos de “qual marca é melhor” e mais de compatibilizar material, protocolo e anatomia — um ajuste fino que a literatura aponta como determinante para o sucesso da interface cimento–dentina e cimento–guta-percha ^{1,2,14–16,20–21}.

3.6 CAPACIDADE SELADORA E MICROINFILTRAÇÃO

A “capacidade seladora” do sistema obturador é, em última análise, a habilidade de impedir o fluxo de fluídos e microrganismos através das interfaces cimento–dentina e cimento–guta-percha ao longo do tempo. Por não existir um método-padrão ouro universalmente aceito, a literatura utiliza diferentes abordagens experimentais, cada qual com forças e limitações, e isso explica parte dos resultados aparentemente conflitantes entre biocerâmicos e seladores epóxi como o AH Plus ^{1,2,4}.

Nos ensaios com corantes, mede-se a penetração linear (ou volumétrica) de soluções como azul de metileno, rodamina B ou nitrato de prata ao longo do material/parede do canal. A técnica é simples e barata, mas sofre com variáveis como tensão superficial da solução, desmineralização durante o preparo da amostra e artefatos de corte e descalcificação; além disso, revela trajetos potenciais de infiltração, sem quantificar fluxo real. Mesmo com essas limitações, esses testes oferecem triagem útil para comparar protocolos e materiais quando o desenho é cuidadoso ^{2,4}. Em biocerâmicos, a formação tardia de precipitados de apatita pode reduzir trajetórias marcadas inicialmente por corantes, o que reforça a necessidade de janelas de avaliação adequadas ao fenômeno de mineralização interfacial ^{1,2,9}.

A fluidofiltração é considerada mais reprodutível por quantificar permeabilidade hidráulica (p. ex., $\mu\text{L}/\text{min}$ sob determinada coluna d’água). Como o método é não destrutivo, permite medidas repetidas na mesma amostra e avaliação de envelhecimento. Em biocerâmicos, oscilações de umidade e tempo de presa modificam a permeabilidade medida, o que dialoga diretamente com a dependência hídrica desses cimentos ^{11,12,16}. Seladores epóxi, por sua vez, costumam apresentar permeabilidade estável após a cura, por dependerem menos da água livre para polimerizar ^{7,16}. Assim, diferenças inter-materiais observadas por fluidofiltração

tendem a diminuir quando o controle de umidade e a maturação dos hidráulicos são respeitados ^{11,12}.

Os modelos microbiológicos (vazamento bacteriano, difusão de endotoxina, penetração de glicose como marcador) aproximam-se mais do evento clínico de reinfecção, mas incorporam grande variabilidade: espécie/cepa utilizada, densidade bacteriana, tempo de exposição e geometria do dispositivo influenciam fortemente os resultados. Ainda assim, há convergência de que técnicas de obturação que reduzem vazios e filmes espessos de cimento melhoram o desempenho, independentemente do selador, e que biocerâmicos podem ganhar selamento com o tempo em ambientes iônicos favoráveis ^{5,14}. Ensaaios microbiológicos, portanto, são valiosos para comparar cenários, mas devem ser interpretados em conjunto com métricas físico-químicas e estruturais ^{1,2}.

A micro-CT não mede “infiltração” diretamente; ela quantifica vazios (volume, localização) e descreve a morfologia do preenchimento em 3D. Como a geometria obtida após o preparo transforma a distribuição do selador (istmos, ovalizações, paredes não tocadas), a micro-CT é essencial para explicar por que certas combinações material+técnica falham: filmes espessos e vazios concentram tensões e predispoem à infiltração e a falhas coesas no cimento ²¹. Trabalhos recentes com modelos de tubo de dentina e análises interfaciais mostram que biocerâmicos podem apresentar porosidade intrínseca inicial, compensada parcialmente por precipitação mineral subsequente — algo que a micro-CT ajuda a correlacionar com a evolução do selamento ⁹.

Quanto ao panorama comparativo, a meta-análise mais recente focada em selamento indica vantagem média dos epóxi (como AH Plus) em alguns modelos, mas ressalta heterogeneidade elevada de métodos e tempos de avaliação, o que impede conclusões absolutas ¹⁵. Em paralelo, revisões que contemplam seladores biocerâmicos premisturados relatam desempenho equivalente aos convencionais quando umidade, técnica e maturação são controladas, com vantagem biocerâmica descrita em cenários que favorecem mineralização interfacial ^{1,2,17}. Em termos práticos, o ranking entre materiais muda conforme o método (corante vs

fluidofiltração vs bacteriano), o tempo de cura, a técnica e o ambiente hídrico ^{11,12,14-17}.

Os determinantes operatórios discutidos nas seções de adesão e push-out repetem-se aqui. Controle fino da umidade e secagem padronizada modulam permeabilidade e continuidade do filme de biocerâmicos; técnicas que minimizam vazios e acúmulo de selador (especialmente no terço apical) tendem a reduzir trajetórias de corante e fluxo hidráulico; e propriedades físico-químicas (tempo de presa, escoamento, solubilidade) influenciam a estabilidade do selamento ao longo do envelhecimento ^{11,12,14,16,21}. Em condições controladas, não é raro observar aproximação de desempenhos entre biocerâmicos (EndoSequence/TotalFill, BioRoot, CeraSeal/Bio-C) e AH Plus, sobretudo após maturação adequada ^{1,2,9,17}.

Ensaio de corante imediatamente após a obturação são sensíveis, mas podem superestimar microgaps que tendem a fechar nos biocerâmicos com a precipitação de apatita; fluidofiltração oferece medida quantitativa e seriada de permeabilidade; modelos microbiológicos são clinicamente pertinentes, mas variáveis; e a micro-CT explica a mecânica do fracasso, embora não capture a dinâmica química do selamento ^{1,2,5,9,15,21}.

Quando a janela hídrica e a técnica favorecem os biocerâmicos, o selamento tende a melhorar com a maturação; quando o protocolo pende para desidratação extrema, excesso de selador ou filmes espessos, o AH Plus frequentemente mantém vantagem inicial. O planejamento clínico mais seguro é, portanto, combinar seleção do selador com controle rigoroso de umidade, técnica e tempo de cura — e avaliar o desempenho não por um único teste, mas pela convergência entre métodos ^{11-12,14-17}.

3.7 RETRATAMENTO

O retratamento endodôntico depende da remoção máxima possível do material obturador, e diferentes estudos mostram que os seladores biocerâmicos tendem a apresentar maior dificuldade de remoção ^{1,2,7}. Evidências laboratoriais clássicas demonstram que, mesmo com instrumentação, ativação ultrassônica e irrigação intensiva, permanecem resíduos aderidos às paredes do canal,

especialmente em reentrâncias e no terço apical ²⁰. Revisões comparativas entre formulações biocerâmicas (pré-misturadas ou pó-líquido) apontam que a removibilidade varia entre produtos, mas ainda assim, de forma geral, exige maior esforço clínico ^{1,2,17}.

Quanto ao uso de solventes, sua ação é previsível sobre guta-percha e seladores epóxi, porém bastante limitada sobre biocerâmicos. Assim, a remoção desses materiais depende primordialmente da instrumentação mecânica — limas NiTi de retratamento, complementação manual em áreas curvas — associada ao uso de ultrassom e ao aumento controlado do preparo, que permite alcançar istmos e superfícies antes não tocadas ^{1,2}.

Exames por micro-CT mostram que a remoção completa é rara para qualquer selador, já que porções significativas da dentina permanecem não instrumentadas, principalmente em canais ovais e com istmos. Nessas regiões, acúmulos de cimento e “ilhas” de material tendem a persistir, e isso é particularmente evidente em retratamentos envolvendo biocerâmicos ²¹.

A irrigação deve combinar NaOCl para dissolução orgânica e EDTA para remoção da smear layer, com ativação sônica ou ultrassônica para melhorar a penetração da solução e a desagregação de resíduos. Essa ativação tem papel auxiliar, pois não dissolve o selador, mas favorece o deslocamento mecânico do material remanescente ^{1,2}.

Ferramentas específicas — limas NiTi de retratamento com ponta ativa, brocas Gates ou Peeso utilizadas com cautela, e pontas ultrassônicas — ajudam na desagregação da guta-percha e no rompimento de colos de cimento. Um protocolo previsível costuma iniciar pela remoção coronária do material, seguida pela progressão das limas de retratamento até obter patência, e então o ajuste do calibre apical quando a anatomia permitir, ampliando o alcance da instrumentação sem comprometer a estrutura radicular ^{21,14}.

O tempo desde a obturação também influencia: intervalos maiores tendem a resultar em material mais difícil de remover, enquanto retratamentos precoces podem encontrar seladores ainda menos densos e, portanto, mais facilmente desobturáveis ^{1,2,9}.

A técnica de obturação original pesa diretamente na removibilidade. Métodos que produzem filmes delgados e menos volumosos deixam menor quantidade de cimento a ser retirada, ao passo que técnicas termoplastificadas podem aumentar o volume de selador e criar acúmulos apicais, dificultando a remoção tanto de biocerâmicos quanto de resinas epóxi ¹⁴.

Do ponto de vista clínico, reconhece-se que biocerâmicos normalmente exigem mais etapas, mais energia mecânica e maior calibração do preparo para permitir remoção eficaz, embora a eliminação completa seja incomum em qualquer cenário. O uso criterioso de solventes (voltados à guta-percha), instrumentação ativa, ativação ultrassônica e ampliação seletiva do preparo apical melhora a previsibilidade, mas não elimina a possibilidade de resíduos persistentes preparo apical melhora a previsibilidade, mas não elimina a possibilidade de resíduos persistentes.

3.8 RESISTÊNCIA À FRATURA RADICULAR

A resistência à fratura de um dente tratado endodonticamente é multifatorial e depende, sobretudo, da quantidade de dentina remanescente, do design de preparo, da presença de defeitos pré-existentes e da configuração coronária. O selador contribui como parte do sistema obturador, mas seu efeito geralmente é secundário aos fatores geométricos e estruturais ²¹.

Biocerâmicos, por promoverem alcali-liberação e mineralização interfacial, são teoricamente capazes de aumentar a coesão do conjunto, desde que o filme seja delgado e contínuo. Quando essas condições são atendidas, estudos laboratoriais apontam que biocerâmicos não fragilizam a raiz e podem mostrar desempenho equivalente ao de seladores epóxi; em contrapartida, filmes espessos e porosidade inicial (sob hidratação inadequada) atuam como concentradores de tensão, reduzindo a resistência global ^{1,2,9}.

A técnica de obturação modula diretamente a espessura e a distribuição do selador. Técnicas aquecidas sem controle tendem a gerar maior volume de cimento, sobretudo no apical, enquanto lateral fria e monocone bem conduzidas tendem a

manter camadas finas; essas diferenças se refletem na resposta mecânica ao carregamento, independentemente da família do selador ¹⁴.

O preparo do canal é um determinante maior. Análises por micro-CT mostram que diferentes técnicas e sistemas removem quantidades distintas de dentina e deixam paredes não tocadas, criando morfologias (istmos, ovalizações) que alteram a espessura de parede e, portanto, a resistência. Em canais com paredes delgadas, o tipo de selador tem influência marginal frente ao risco geométrico intrinsicamente elevado ²¹.

No plano físico-químico, tempo de presa, escoamento e solubilidade influenciam a integridade do filme de cimento. Em biocerâmicos, hidratação subótima pode deixar microvazios que servem como iniciadores de trinca; com umidade controlada e maturação adequada, a densificação do gel C-S-H e a precipitação de apatita podem mitigar esses defeitos ao longo do tempo ^{1,2,9,16}.

A carga oclusal e a configuração coronária (pino, núcleo, coroa) são cofatores críticos, frequentemente negligenciados em ensaios. A rigidez do conjunto restaurador e o módulo dos materiais coronários redistribuem tensões; nessas circunstâncias, diferenças sutis entre seladores (biocerâmico vs epóxi) tendem a perder relevância clínica, desde que o vedamento e a continuidade do obturador estejam preservados ^{1,2}.

Nos terços radiculares, o apical é mais suscetível a concentração de tensão por acúmulo de cimento e menor espessura de dentina. Estratégias para reduzir risco incluem preparo conservador, condensação que evite excesso de selador e escolha de cones compatíveis com o preparo (para minimizar filme) — recomendações válidas para qualquer selador ^{14,21}.

Comparações indiretas sugerem que diferenças de resistência entre biocerâmicos e epóxi são frequentemente menores do que as diferenças induzidas por design de preparo e técnica. Assim, ao planejar casos com alto risco de fratura (raiz estreita, curva acentuada, grande perda coronária), a prioridade deve ser preservar dentina, controlar o volume de selador e otimizar a restauração coronária, mais do que trocar de selador esperando efeito protetor relevante ^{21,14}.

Em síntese, o selador não compensa paredes delgadas ou preparos agressivos. Biocerâmicos podem contribuir positivamente quando hidratados e maturados em filmes finos, mas a geometria e a técnica dominam o desfecho. Epóxi como AH Plus, por sua vez, oferecem coerência volumétrica após polimerização, sem a potencial mineralização interfacial dos hidráulicos; clinicamente, ambos podem alcançar resultados equivalentes quando integrados a protocolos que minimizem vazios e preservem estrutura ^{1,2,14,21}.

3.9 ALTERAÇÃO DE COR

A descoloração dentária associada a materiais endodônticos depende da composição (especialmente do radiopacificante), do ambiente químico (irrigantes, sangue) e do contato do cimento com a câmara coronária. Em biocerâmicos, compostos à base de bismuto estão mais ligados a escurecimento pela formação de óxidos/sais escuros e por reações com NaOCl; substitutos como zircônia ou tântalo reduzem o risco, embora não o eliminem por completo ^{1,4,6,13}.

O mecanismo proposto envolve reação do bismuto com componentes oxidantes/halogenados, sorção/difusão de produtos escuros na dentina coronária e, em casos com hemorragia intracoronária, a infiltração de pigmentos sanguíneos. A alcalinidade dos biocerâmicos não é, por si, causadora de mancha, mas pode alterar equilíbrios iônicos que favoreçam a precipitação de compostos escurecidos na superfície ^{1,4,6}.

Seladores epóxi também podem pigmentar quando retidos na câmara, sobretudo se há contaminação sanguínea ou exposição a agentes cromogênicos; entretanto, a associação com bismuto é o fator de risco mais repetidamente implicado entre os hidráulicos ^{6,13}. Por isso, a seleção de formulações sem bismuto é recomendada em zonas estéticas, sem dispensar o controle de técnica ^{1,4}.

A prevenção é essencial: barreira coronária (ionômero/adensivo) antes do uso de irrigantes oxidantes, remoção cuidadosa de excesso de selador da câmara, selamento coronário imediato e, quando possível, evitar extravasamento coronário do cimento. Em biocerâmicos, manter o material apenas no canal e minimizar o contato com a câmara reduz marcadamente o risco ^{1,4,6}.

Se a mancha ocorrer, o clareamento interno com perborato/sistemas de peróxido pode ser eficaz, desde que a obturação esteja íntegra e haja barreira adequada para prevenir difusão do agente oxidante ao periodonto. Em casos associados a bismuto, o clareamento pode exigir múltiplas sessões, com prognóstico variável ^{1,4,6}. O tempo é variável importante: parte das alterações de cor torna-se visível semanas a meses após a obturação, o que explica relatos tardios. Esse intervalo reflete a cinética das reações químicas e a difusão pela dentina, especialmente em dentes jovens com túbulos amplos ¹.

Para documentação clínica, recomenda-se registro fotográfico pré- e pós-tratamento e anotação da marca/composição do selador. Essa informação ajuda na tomada de decisão caso um clareamento seja necessário e facilita a discussão prognóstica com o paciente ^{1,4}. A seleção de caso deve ponderar estética vs benefícios da bioatividade. Em dentes anteriores com demanda estética alta, optar por biocerâmicos sem bismuto ou por epóxi pode ser prudente; em dentes posteriores, onde estética pesa menos, o risco relativo diminui ^{1,4,6,13}.

3.10 WASH OUT

O fenômeno denominado wash-out descreve a perda de material, desagregação ou dissolução superficial de cimentos hidráulicos quando expostos à umidade antes de atingirem um grau adequado de presa. Em Endodontia, esse conceito é especialmente relevante para seladores biocerâmicos à base de silicato de cálcio, cuja reação de presa é dependente de hidratação. Se essa hidratação ocorre em ambiente excessivamente úmido ou em condições desfavoráveis, o material pode sofrer instabilidade superficial, perda de massa ou alteração de suas.

A fase inicial de presa dos cimentos biocerâmicos é sensível ao teor de umidade presente no canal radicular, o que pode favorecer desagregação superficial quando a exposição ao fluido excede o ideal para a reação hidráulica ¹. De forma complementar, estudos afirmam que a cinética de hidratação e a

composição dos silicatos de cálcio determinam variações na estabilidade inicial e podem influenciar a tendência ao wash-out ².

Estudos que avaliam propriedades físico-químicas ajudam a compreender o risco de wash-out durante a presa. Diferenças importantes de solubilidade e resistência à água entre seladores epóxi e biocerâmicos, demonstram que os materiais hidráulicos podem apresentar maior variação de estabilidade nos estágios iniciais da reação ⁷. Certas formulações biocerâmicas apresentaram maior perda de massa em água, o que reforça a importância da composição e do tempo de maturação na resistência ao wash-out ⁶. Alterações estruturais e químicas após exposição prolongada a fluidos, sugerindo que a integridade inicial do material pode ser comprometida em condições de elevada umidade ⁵. A porosidade e a formação da matriz de hidratação influenciam a interface dentinária e a estabilidade do material, ampliando a compreensão do comportamento dos biocerâmicos em meio aquoso ⁹.

4. DISCUSSÃO

A leitura integrada dos achados evidencia que o desempenho de seladores biocerâmicos, quando comparado ao epóxi AH Plus, não segue uma direção única: há cenários de superioridade de epóxi, de equivalência e de vantagem biocerâmica, e a variação decorre sobretudo de fatores operatórios (umidade e técnica), de diferenças de formulação entre marcas e da geometria final do canal preparada antes da obturação^{1,2,11-12,14,16,21,22}. Essa constatação desloca a discussão do rótulo do material para o “acoplamento” entre material, técnica e ambiente, que no fim define adesão, selamento e previsibilidade clínica.

Em push-out, a interpretação cuidadosa dos modos de falha ajuda a explicar discrepâncias numéricas: aumento de falhas coesas/mistas em biocerâmicos após envelhecimento sugere mineralização interfacial e ancoragem em túbulos; predomínio de falhas adesivas indica janela hídrica inadequada, smear layer residual ou filme de cimento espesso e heterogêneo⁹⁻¹². No AH Plus, a menor sensibilidade à água livre favorece a manutenção da coesão do filme mesmo com secagens mais agressivas, o que explica parte da vantagem observada em protocolos com controle de umidade impreciso^{7,16}.

Quando o desfecho é capacidade seladora, o método de avaliação pesa tanto quanto o material. Ensaio com corantes tendem a ser mais sensíveis a microgaps iniciais; a fluidofiltração quantifica permeabilidade de modo seriado; modelos microbiológicos aproximam-se do evento clínico, mas exibem alta variabilidade; e a micro-CT não mede infiltração, porém revela vazios e espessura do filme que explicam fracassos mecânicos^{9,15,21}. Considerando essa diversidade, não surpreende que uma meta-análise aponte vantagem média de epóxi em alguns modelos, enquanto revisões mais amplas encontrem equivalência quando variáveis operatórias são controladas e a maturação dos biocerâmicos é respeitada^{1,2,15,17}.

A sensibilidade dos biocerâmicos à umidade é, talvez, a variável clínica de maior impacto e a mais “ajustável” pelo operador. Estudos controlados mostram que níveis distintos de umidade e protocolos de secagem alteram significativamente resistência de união e permeabilidade, tanto por influenciarem a hidratação e o tempo de presa quanto por modularem a porosidade inicial da matriz^{11,12}. Em

ambientes iônicos favoráveis e com tempo, a precipitação de apatita tende a reduzir trajetórias de infiltração, aproximando o selamento ao observado com epóxi ^{1,2,5,9}.

Quadro 1 — Interação adesiva por interface e implicações clínicas (biocerâmicos × epóxi)

Interface	Mecanismo dominante	Moduladores críticos	Padrão de falha mais provável	Implicação para microinfiltração/estabilidade	Ref.
Biocerâmico-dentina	Molhabilidade + infiltração/mineralização ($\text{Ca}^{2+}/\text{OH}^- \rightarrow \text{apatita}$)	Remoção do <i>smear</i> , umidade controlada, tempo de maturação	Mista/Coesa (com envelhecimento)	Redução progressiva de microgaps; selamento dinâmico se a janela hídrica for adequada	1,2,5,8–12
Biocerâmico-guta-percha	Molhagem do cone e filme contínuo (ligação física)	Escoamento, tempo de presa, volume de selador, técnica	Coesa se filme espesso; adesiva se molhagem ruim	Risco de microvazios periféricos; controlar volume e manipulação	6,7,14,16
Epóxi-dentina (AH Plus)	Polimerização orgânica + entrelaçamento físico	Preparação superficial, escoamento, estabilidade volumétrica	Adesiva/Mista	Selamento inicial consistente; sem mineralização progressiva	7,15,16
Epóxi-guta-percha	Molhagem do cone + polimerização	Escoamento e manuseio durante a cura	Adesiva/Mista	Microgaps se manipulado em excesso; atenção à espessura do filme	7,14,16

Fonte: síntese dos estudos e revisões citados.

A técnica de obturação é o segundo grande modulador e atua sobre a distribuição de vazios e a espessura do filme de cimento. Lateral fria e monocone, quando bem executadas, costumam gerar filmes delgados e contínuos; técnicas

aquecidas elevam o risco de acúmulos de selador se o volume não for rigorosamente controlado, predispondo a falhas coesas no material e piora de push-out e selamento, independentemente da família do selador ¹⁴. A mensagem prática é simples: controlar volume e evitar vazios traz ganhos maiores do que trocar de cimento.

No retratamento, a literatura converge para maior dificuldade de remoção dos biocerâmicos em comparação ao AH Plus, atribuindo-se o fenômeno à integração química com a dentina e à possível infiltração mineral interfacial ^{1,2,20}. Solventes auxiliam sobretudo na guta-percha e nas resinas; já a matriz hidratada responde melhor à re-instrumentação ativa e à ativação de irrigantes. Mesmo assim, resíduos são frequentes em regiões apicais e istmos, como evidencia a micro-CT, o que recomenda planejamento conservador e expectativas realistas ²¹.

No eixo estético, o risco de descoloração é maior quando a formulação biocerâmica contém bismuto como radiopacificante; substitutos como zircônia ou tântalo mitigam o problema, e medidas como barreira coronária, remoção de excessos e selamento imediato da câmara reduzem substancialmente a chance de mancha ^{1,4,6,13}. Em dentes anteriores com alta exigência estética, optar por biocerâmicos sem bismuto ou por epóxi é estratégia prudente.

Quanto à resistência à fratura radicular, o selo do material tem efeito marginal diante de determinantes geométricos como espessura de parede e design de preparo. Biocerâmicos podem contribuir positivamente se o filme for delgado e a matriz estiver densificada; por outro lado, acúmulos de selador e porosidade inicial funcionam como concentradores de tensão, penalizando qualquer sistema ^{1,2,9,14,21}. Preservar dentina e controlar o volume de cimento valem mais do que a diferença entre famílias.

Durante a fase inicial de hidratação, esses materiais podem ser mais suscetíveis ao wash-out, especialmente em ambientes com umidade excessiva, devido à maior solubilidade inicial quando comparados aos seladores epóxi ^{2,6,7}. Além disso, fatores como composição e controle clínico da umidade influenciam significativamente essa vulnerabilidade ^{5,9,11}. Assim, embora os biocerâmicos

ofereçam desempenho favorável a longo prazo, seu comportamento inicial exige atenção para evitar desagregação ou perda de material durante a presa ^{1,2,7}.

Diante desse mosaico, a seleção do selador por cenário torna-se mais racional. Biocerâmicos ganham apelo quando se busca bioatividade e potencial de mineralização da interface, quando há bom controle de irrigação/umidade e quando é possível aguardar maturação antes de cargas intensas; nessas condições, o desempenho tende a ser equivalente ou superior ao do epóxi em adesão e selamento ^{1,2,8-12,17}. O AH Plus, por sua vez, é vantajoso quando se antevê retrabalho, quando o controle de umidade é difícil ou quando a alternativa biocerâmica disponível contém bismuto em zona estética ^{7,13,15-16,20}.

Para a conduta clínica diária, um roteiro enxuto ajuda: padronizar irrigação com ativação; alcançar remoção eficaz do smear sem dessicar o canal; perseguir umidade controlada (nem encharcado, nem seco); eleger técnica que minimize vazios e filmes espessos; respeitar o tempo de presa/maturação antes de etapas restauradoras. Esse conjunto de decisões costuma estreitar diferenças entre famílias e transformar a variabilidade experimental em resultados reprodutíveis ^{11-12,14,16}.

No plano da qualidade da evidência, o corpo de provas é sólido para mecanismos, propriedades e tendências laboratoriais (hidratação, liberação de íons, sensibilidade à umidade, padrões de falha, retratabilidade), mas ainda limitado em ensaios clínicos de longo prazo que correlacionem protocolos padronizados a desfechos clínicos (dor persistente, reinfecção, necessidade de retratamento) ^{1,2,15,17}. Essa lacuna explica por que conclusões absolutas pró-material A ou B soam prematuras.

Uma agenda de pesquisa útil inclui a padronização de push-out (espessura do disco, diâmetro/velocidade do pino, meio/tempo de envelhecimento e relato explícito de umidade/secagem), reduzindo a heterogeneidade que hoje limita as meta-análises ^{1,2,9,11-12}. Estudos que integrem micro-CT (vazios/espessura) com fluidofiltração (permeabilidade) e modos de falha capturam, em conjunto, a mecânica e a dinâmica química do selamento ^{9,15,21}.

Também são desejáveis ensaios clínicos randomizados comparando biocerâmicos e AH Plus sob técnicas e janelas hídricas controladas, com acompanhamento radiográfico e clínico padronizado; sem isso, permaneceremos projetando resultados in vitro para a clínica com margem de incerteza maior do que gostaríamos ^{1,2,15,17}. Em paralelo, investigações específicas sobre descoloração associada a radiopacificantes e sobre retrabalhabilidade (tempo, resíduo por micro-CT, perda de dentina) ajudariam a ancorar decisões em cenários estéticos e de retratamento ^{13,20–21}.

Em termos de comunicação com o paciente, vale discutir que materiais diferentes possuem perfis de desempenho distintos e que o protocolo escolhido — especialmente controle de umidade e técnica — é determinante para o resultado, tanto quanto a marca do cimento. Essa transparência melhora a adesão ao plano de tratamento e alinha expectativas quanto a prazos de restauração definitiva e necessidade de retornos.

No fluxo restaurador, respeitar o tempo de maturação do selador antes de procedimentos adesivos coronários é uma medida simples com impacto real em microinfiltração e estabilidade, sobretudo para biocerâmicos; a pressa em concluir a restauração pode neutralizar o ganho potencial de mineralização interfacial ^{1,2,16}. Coordenação entre endodontia e prótese é, portanto, parte do sucesso do caso.

Em dentes jovens com túbulos amplos e maior permeabilidade, o potencial de troca iônica e mineralização dos biocerâmicos pode ser clinicamente vantajoso, desde que a estética seja considerada e que se evitem formulações com bismuto em áreas visíveis ^{1,4}. Já em molares com anatomia complexa e maior probabilidade de retrabalho, a retrabalhabilidade do epóxi pode pesar mais na decisão, sem prejuízo de selamento quando a técnica é bem executada ^{20–21}.

Com irrigação ativada, umidade na janela ideal, técnica que evita vazios e filmes espessos e respeito à maturação, biocerâmicos tendem a oferecer selamento e adesão tão bons quanto — e, em certos cenários, melhores que — o AH Plus, com o bônus da bioatividade; quando esse controle é incerto ou a retrabalhabilidade é prioridade, o AH Plus mantém previsibilidade superior. Em todas as escolhas, documentar protocolo e tempos de cura deixa de ser detalhe e passa a ser parte do

tratamento, transformando evidência de bancada em resultado clínico reprodutível
1,2,7,11-12,14-17,20-21 .

5. CONCLUSÃO

Os seladores biocerâmicos podem alcançar excelente adesão e selamento quando a umidade, a limpeza dentinária e a técnica de obturação são rigorosamente controladas, oferecendo ainda o benefício da bioatividade. O AH Plus tende a ser mais previsível quando o controle hídrico é limitado, quando se antecipa retratamento ou quando a estética é prioridade. Independentemente do selador, a combinação adequada entre material, técnica e condições operatórias é o que determina a performance clínica.

REFERÊNCIAS

1. Camilleri J, Atmeh A, Li X, Meschi N. Present status and future directions: hydraulic materials for endodontic use. *Int Endod J*. 2022;55(Suppl 3):710-777.
2. Donnermeyer D, Bürklein S, Dammaschke T, Schäfer E. Endodontic sealers based on calcium silicates: a systematic review. *Odontology*. 2019;107:421-436.
3. Lima NFF, Santos PRN, Pedrosa MS, Delboni M. Cimentos biocerâmicos em endodontia: revisão de literatura. *RFO*. 2017;22(2):248-254.
4. Ortega MA, Alvarado E, Fernandez J, et al. Bioceramic versus traditional biomaterials for endodontic sealers according to the ideal properties. *Histol Histopathol*. 2024;39:279-292.
5. Long J, Kreft JU, Camilleri J. Antimicrobial and ultrastructural properties of root canal filling materials exposed to bacterial challenge. *J Dent*. 2020;97:103283.
6. Colombo M, Poggio C, Dagna A, Meravini MV, Riva P, Trovati F, et al. Biological and physico-chemical properties of new root canal sealers. *J Clin Exp Dent*. 2018;10(2):e120-e126.
7. Lee JK, Kwak SW, Ha JH, Lee W, Kim HC. Physicochemical properties of epoxy resin-based and bioceramic-based root canal sealers. *Bioinorg Chem Appl*. 2017;2017:2582849.
8. Ha JH, Kim HC, Kim YK, Kwon TY. An evaluation of wetting and adhesion of three bioceramic root canal sealers to intraradicular human dentin. *Materials (Basel)*. 2018;11(8):1286.
9. Inada LC, Silva-Sousa YTC, Steier L, et al. Biocompatibility, bioactivity, porosity, and sealer–dentin interface of bioceramic ready-to-use sealers using a dentin-tube model. *Sci Rep*. 2024;14:16768.
10. Carvalho CN, Grazziotin-Soares R, Candeiro GTM, Martinez LG, Souza JP, Oliveira PS, et al. Micro push-out bond strength and bioactivity analysis of a bioceramic root canal sealer. *Iran Endod J*. 2017;12(3):343-348.
11. Wang JS, Bai W, Wang Y, Liang YH. Effect of different dentin moisture on the push-out strength of bioceramic root canal sealer. *J Dent Sci*. 2023;18:129-134.
12. Pelozo AP, Bandeca MC, Alves FRF, et al. Influence of root canal drying protocol on the physicochemical properties and push-out bond strength of Bio-C Sealer. *J Endod*. 2023;49(9):1154-1160.

13. Ha W, Kahler B, Walsh LJ. Classification and nomenclature of commercial hygroscopic dental cements. *Eur Endod J.* 2017;2:27.
14. Akhtar H, Ahmed A, Sabir S, et al. Exploring the most effective apical seal: an in-vitro assessment of different obturation techniques. *Medicina (Kaunas).* 2023;59(3):567.
15. Khan S, Sohail M, Shah M, et al. Sealing ability of epoxy-resin-based versus calcium silicate-based root canal sealers: a systematic review and meta-analysis. *J Oral Biol Craniofac Res.* 2023;13:28-35.
16. Hamdy TM, Ismail AG, Galal M, Saber S. Physicochemical properties of AH Plus Bioceramic Sealer, Bio-C Sealer, and ADseal root canal sealer. *Head Face Med.* 2024;20:2.
17. Almeida LHS, Gomes BPFA, Ferraz CCR, Souza-Filho FJ, Zaia AA. Are premixed calcium silicate-based endodontic sealers comparable to conventional root canal sealers? A systematic review. *J Endod.* 2017;43(4):527-536.
18. Lage CA, Farias JP, Gama RN, Lopes LPB. Aplicações clínicas dos cimentos biocerâmicos, vantagens e desvantagens do seu uso em tratamentos endodônticos: revisão de literatura. *Braz J Health Rev.* 2023;6(5):23397-23413.
19. Toubes KS, Tonelli SQ, Girelli CFM, et al. Bio-C Repair – a new bioceramic material for root perforation management: two case reports. *Braz Dent J.* 2021;32(1):104-110.
20. Hess D, Solomon E, Spears R, He J. Retreatability of a bioceramic root canal sealing material. *J Endod.* 2011;37(11):1547-1549.
21. Peters OA, Schönenberger K, Laib A. Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J.* 2001;34:221-230.
22. Melo GRC, Oliveira ALA de, Cavalcante FVO, Oliveira LG de S, Alves MEV, Oliveira AP de, Lins FF, Lemos IPL, Santos ES dos. Utilização dos cimentos biocerâmicos na obturação dos canais radiculares. REAS [Internet]. 19ago.2025



TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DIVULGAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Eu, abaixo identificado(a), autorizo a inclusão do meu trabalho de conclusão de curso (TCC) no Repositório Digital da UNIP, conforme as condições estabelecidas.

Dados do Autor

- Nome completo: Aline de Assis
- RA: G48JGE5 CPF: 53180608897 RG: 396069666
- Telefone para contato: 19988731607 E-mail: aline.assis2203@gmail.com
- Título do Trabalho: Obturadores Biocerâmicos na Endodontia
- Tipo de Material: TCC



AUTORIZO

Autorizo a disponibilização do texto integral do meu no Repositório Digital da UNIP para fins de leitura, impressão e/ou download, sem que me seja devido pagamento por direitos autorais, desde que a reprodução tenha como finalidade exclusiva o uso por quem consulta e a divulgação da produção acadêmica. Estou ciente de que, em caso de coautoria, assumo total responsabilidade pelas informações e confirmo que todos os demais autores concordam com a submissão e a modalidade de acesso escolhida.



NÃO AUTORIZO

Caso não autorize a divulgação integral do meu trabalho, estou ciente de que o resumo e os metadados (referencial teórico, objetivos e métodos) permanecerão disponíveis. A não divulgação se justifica pela proteção ao sigilo industrial ou ético.

Direitos Autorais e Proteção de Dados:

Esta autorização está em conformidade com a Lei nº 9.610/98, que regulamenta os direitos autorais no Brasil, e com a Lei nº 13.709/2018 (LGPD), que protege os direitos fundamentais de liberdade e privacidade.

São Paulo, 02 de Dezembro de 2025

Aline de Assis

Assinatura do(a) Aluno(a)