

Fecha de recepción:

27 de marzo de 2024

Fecha de aceptación:

6 de diciembre de 2024

Fecha de publicación:

31 de enero de 2025

Cómo citar:

Soria-Sánchez F. Propiedades de los cementos endodónticos a base de silicato tricálcico Properties of endodontic cements based on tricalcium silicate. *Rev la Fac Odontol la Univ Cuenca*. 2025;3(1): 28-41

Autor de correspondencia:

Fabián Giovanni Soria Sánchez

Correo electrónico:

fabiangiannysa@hotmail.com



e-ISSN: 2960-8325

ISSN: 1390-0889

Propiedades de los cementos endodónticos a base de silicato tricálcico. Revisión de la literatura

Properties of tricalcium silicate-based endodontic cements. Literature review

DOI: <https://doi.org/10.18537/fouc.v03.n01.a03>

Fabián Giovanni Soria Sánchez¹ <https://orcid.org/0009-0000-8948-6892>

1. Investigador independiente, Quito-Ecuador

Resumen

Introducción: El cemento a base de silicato tricálcico (TCS) se usa ampliamente en el tratamiento de endodoncia debido a sus excelentes propiedades bioactivas que pueden estimular al huésped para que produzca la respuesta tisular deseada. Sin embargo, ninguno de estos materiales cumple actualmente con todas las características descritas por Grossman como sellador ideal. **Objetivo:** Esta revisión de la literatura se centra en las características y generalidades de los selladores biocerámicos, además de proporcionar información actualizada para promover futuras investigaciones sobre los mismos y sus aplicaciones en endodoncia. **Metodología:** Se buscó información basándose en términos afines a endodoncia en plataformas científicas: Elsevier, MDPI, PubMed (MEDLINE) y ResearchGate, seguido se revisó artículos relacionados con los selladores endodónticos a base de silicato tricálcico. **Conclusión:** El atractivo de los biocerámicos radica en sus excelentes propiedades físicas, químicas y biológicas, pero debido a la falta de información sobre el desempeño a largo plazo se necesitan más investigaciones para justificar su uso sobre los selladores convencionales.

Palabras clave: Sellador endodóntico; bioactividad; silicatos tricálcicos; biocerámicos; endodoncia.

Abstract

Introduction: Tricalcium silicate-based cements is widely used in endodontic treatment due to its excellent bioactive properties that can stimulate the host to produce the desired tissue response. However,

none of these materials currently meets all the characteristics described by Grossman as an ideal sealer. **Objective:** This literature review focuses on the characteristics and generalities of bioceramic sealers, in addition to providing updated information to promote future research on them and their applications in endodontics. **Methodology:** Information was searched based on terms related to endodontics in scientific platforms: Elsevier, MDPI, PubMed (MEDLINE) and ResearchGate, followed by a review of articles related to calcium silicate-based endodontic sealers. **Conclusion:** The appeal of bioceramics lies in their excellent physical, chemical and biological properties, but due to the lack of information on long-term performance, further research is needed to justify their use over conventional sealers.

Keywords: Endodontic sealant, bioactivity, tricalcium silicates, bioceramics, endodontics.

Introducción

El tratamiento endodóntico tiene como objetivo resolver las patologías pulpares y periapicales para prevenir un proceso inflamatorio o infeccioso, además permite conservar la pieza dental en boca y restaurar su función masticatoria^{1,2}. El objetivo clínico de una terapia endodóntica es el control de infecciones mediante la limpieza y eliminación de restos necróticos, microorganismos y sus toxinas del sistema de conductos radiculares mediante la acción mecánica de los instrumentos endodónticos (limas), así como la acción química de las soluciones irrigantes, para terminar con una obturación tridimensional del mismo³⁻⁶.

Las infecciones bacterianas están relacionadas directamente con el desarrollo de una necrosis pulpar y la aparición de cambios patológicos periapicales, por lo que la eliminación de la microbiota patógena en el sistema de conductos radiculares es importante para un pronóstico favorable del tratamiento endodóntico⁷. La mayoría de los fracasos del tratamiento endodóntico se deben a infecciones persistentes o secundarias asociadas con organismos anaeróbicos facultativos grampositivos tales como el *Enterococcus faecalis*, el cual ha demostrado ser resistente a un pH alto^{11,5}, esto debido a la activación

de la bomba de protones, el cual permite regular la alcalinidad de su citoplasma permitiéndole sobrevivir y colonizar los túbulos dentinarios para posteriormente causar el fracaso del tratamiento^{8,9}. Es importante considerar un nuevo enfoque que mantenga un efecto antimicrobiano duradero sobre las bacterias residuales como los selladores biocerámicos que deben su acción a su alto pH y la liberación de iones comparados con la limitada acción de los selladores convencionales^{10,11}.

Los selladores de conductos radiculares (SCR) funcionan sellando los espacios e irregularidades entre las paredes del conducto radicular y la gutapercha, llenando pequeños conductos laterales e istmos para evitar el paso de líquidos que proporcionan nutrientes a las bacterias residuales^{12,13}. Un SCR ideal debe cumplir ciertos criterios como: tolerancia tisular, estabilidad dimensional, tiempo de fraguado corto, adhesividad, radiopacidad, no pigmentación, insolubilidad en líquidos, capacidad bacteriostática y de sellado¹³. Los SCR convencionales basados en óxido de zinc, eugenol, hidróxido de calcio Ca(OH)₂ o resinas pueden experimentar problemas de sellado debido a su solubilidad o contracción al fraguar lo que puede provocar microfiltración apical y entre sus desventajas al entrar en contacto directo con los tejidos perirradiculares puede provocar irritación y retrasar la cicatrización del tejido^{13,14}. Un material obturador ideal debería cerrar las vías de comunicación entre el conducto radicular (CR) y el tejido perirradicular, ya que el ligamento periodontal es esencial para la regeneración del tejido porque contiene una población heterogénea de células con potencial de autorrenovación, incluidos fibroblastos, cementoblastos, osteoblastos, epiteliales, endoteliales vasculares, musculares lisas y ciertos tipos de células neuronales^{14,15}.

La literatura sugiere que la importancia de los cementos biocerámicos radica en su versatilidad, ya que pueden usarse para reducir la filtración bacteriana, reparar perforaciones radiculares y adaptarse a diversas técnicas de obturación¹⁶⁻¹⁹. Además, se ha demostrado que estos cementos, al estar en contacto con fluidos corporales, generan una capa de apatita en su superficie, induciendo la formación de tejido duro cuando se unen al hueso o la pulpa dental²⁰. Actualmente, algunos artículos se oponen al uso de estos cementos mientras que

otros apoyan su uso para la obturación de un CR, por lo que en esta revisión narrativa se describirán las propiedades generales y bioactivas de estos materiales para uso endodóntico^{16,17,19, 21}.

Métodos

Estrategia de búsqueda

Se realizó una búsqueda en las siguientes plataformas científicas: Elsevier, MDPI, PubMed (MEDLINE) y ResearchGate donde se buscaron las siguientes palabras clave: selladores endodónticos, obturación endodóntica, sellador bioactivo, silicato de calcio, silicato dicálcico, silicato tricálcico, biocerámico, MTA (agregado trióxido mineral).

Se eligieron estudios en idioma inglés que hablen sobre propiedades físicas, químicas y biológicas de selladores biocerámicos, por lo que se consideraron tantos estudios *in vivo*, *in vitro* y revisiones de la literatura. Mediante estos criterios de inclusión se utilizó un total de 82 archivos, se priorizaron estudios de los últimos 5 años, sin embargo, debido a la limitada información se utilizó artículos primarios o de mayor antigüedad.

Historia de los biocerámicos

El desarrollo de selladores comenzó con formulaciones basadas en óxido de zinc y eugenol, pero se descubrió que el eugenol puede tener efectos tóxicos incluso después de que el material se haya fraguado, por ello, se desarrolló un sellador libre de eugenol, como por ejemplo un sellador a base de resina epóxica con propiedades adhesivas. En los últimos años, se han desarrollado selladores a base de biocerámica para lograr una mejor biocompatibilidad, una fuerte adhesión (9,48 MPa), estabilidad fisicoquímica, biocompatibilidad, capacidad de sellado y remoción en retratamientos^{1, 22}.

En 1824, Joseph Aspdin patentó el cemento Portland obtenido de la calcinación de la caliza proveniente de Portland, Inglaterra, y materiales silicio-arcillosos²³. El Dr. Torabinejad y el Sr. White fueron quienes patentaron el cemento Portland en endodoncia (Patentes N°. 5 415,547 y 5 769,638), existen registros

que Torabinejad en 1993 desarrolló el Agregado trióxido mineral (MTA) el cual poseía partículas muy finas de cemento Portland modificadas, calentadas a elevadas temperaturas para luego añadir sulfato de calcio dihidratado que influye en el fraguado y trióxido de bismuto como radiopacador²⁴⁻²⁶.

No fue hasta 1998 que el MTA obtuvo la licencia para su venta en el mercado norteamericano con el nombre de ProRoot® MTA (Dentsply Tulsa Dental, Tulsa, EE. UU.)²⁶. Según el artículo de Lee²⁵ sobre cerámicas hidráulicas en odontología se presentó a este material experimental como “agregado MT” y después se lo denominó MTA, pero este es un nombre descriptivo mas no químico. Originalmente, ProRoot® MTA era un polvo gris y a partir de 2003 pasó a ser un material blanco comercializado con el mismo nombre, en la actualidad el uso de estos cementos se ha ampliado con nuevos selladores endodónticos en el mercado^{26,27}. A pesar de que el MTA posee una buena tolerancia con el tejido circundante posee ciertas limitaciones como la decoloración dental, difícil manipulación, tiempo de fraguado prolongado, son difíciles de eliminar en retratamientos y pueden liberar metales pesados²⁸⁻³¹. Es por esto que se ha mejorado su composición con el fin de mejorar sus propiedades, tales como su biocompatibilidad, estabilidad y manipulación²⁹⁻³¹.

Según lo informado en la literatura, el primer SCR a base de TCS se comercializó en 2007 con el nombre comercial iRoot SP® (Innovate Bioceramix, Vancouver, BC, Canadá)³². Los selladores biocerámicos premezclados tienen propiedades fisicoquímicas y biológicas adecuadas porque están compuestos de sílice, alúmina, vidrios bioactivos, silicatos de calcio, hidroxiapatita, óxido de circonio y fosfato de calcio monobásico^{32,33}. No se dispone de información sobre las patentes específicas y composiciones de los distintos fabricantes, ya que son secretos comerciales celosamente guardados sobre las materias primas principales, métodos de mezcla, cocción y molienda de los cementos de silicato tri/dicálcico²⁵.

Nomenclatura de los biocerámicos

La nomenclatura de los materiales basados en silicato tri/dicálcico se ha confundido por el uso de otra

terminología no específica, como biocerámica y biosilicato, los cuales son términos de marketing²⁵. Otros artículos se refieren al MTA como cementos hidráulicos de silicato de calcio (hCSC) o silicato tricálcico (TCS), el término bifásico se ha utilizado para indicar la adición de una fase de fosfato cálcico a los silicatos tri/dicálcicos, lo cual es incorrecto ya que en estos productos están presentes más de dos fases cerámicas²⁵.

La literatura antigua reiteró el nombre agregado de trióxido mineral con tanta frecuencia que “MTA” se ha convertido en un nombre genérico para estos productos hidráulicos a base de silicato tri/dicálcico, aunque a menudo se malinterpreta. El término “mineral” el cual es adecuado para el nombre porque los minerales naturales se utilizan para crear silicatos tri/dicálcicos, los cuales no se los encuentra en la naturaleza; “trióxido” se refieren a los óxidos del cemento Portland: calcio, sílice y alúmina, sin embargo, es un nombre inapropiado ya que poseía otros óxidos en cantidades superiores al 1 %, incluidos el óxido de hierro y el óxido de bismuto “agregado” denota la adición del componente radiopaco (óxido de bismuto) o puede referirse a la agregación de partículas de silicato di/tricálcico y aluminato tricálcico²⁵.

Generalidades de los biocerámicos

El MTA es el material referente de los biocerámicos, es un polvo hidrófilo compuesto por silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaO}$) y aluminoferrita tetracálcica ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)²⁵.

Los cementos a base de silicatos utilizados en endodoncia cumplen con la norma ISO 6876:2012 y ANSI/ADA 57-2000^{34,35}. Los biocerámicos son materiales diseñados para uso médico y odontológico los cuales son inorgánicos, no metálicos, biocompatibles, no tóxicos, estables y capaces de formar hidroxiapatita en presencia de agua^{36,37}. Según la interacción de los componentes de los selladores biocerámicos con los tejidos pueden ser clasificados en bioinerte, bioactivos y biodegradables (Tabla 1)³⁷.

Tabla 1. Clasificación de los biocerámicos según su interacción

Clasificación	Interacción
Bioinertes	No interactúan con los sistemas biológicos y pueden producir una respuesta insignificante en el tejido circundante. Por ejemplo, la alúmina y el zirconio.
Bioactivos	No se degradan, pero interactúan con el tejido circundante. Por ejemplo: vidrios bioactivos, vitrocerámicas bioactivas, hidroxiapatita y silicatos de calcio.
Biodegradables	Cuando son solubles o reabsorbibles en el tejido circundante. Por ejemplo: fosfato tricálcico y vidrios bioactivos ^{23,37} .

Propiedades de los materiales biocerámicos

El silicato de calcio en estado natural es la wollastonita (CaSiO_3) la cual no fragua cuando se agrega agua²⁵. Los cementos endodónticos bioactivos pasan por una ruta sol-gel la cual es una solución fácil y económica para producir partículas de alta homogeneidad y estabilidad³⁸. Estos compuestos cerámicos son capaces de: fraguar al reaccionar a temperatura ambiente con agua, formar una masa sólida y ser tolerantes a la humedad de los tejidos (hidrófilo)²⁵.

Los biocerámicos promueven la deposición de minerales mediante la liberación de iones bioactivos, el TCS al sufrir reacciones de hidratación y cristalización al fraguar es responsable de la liberación de iones capaces de generar una respuesta regenerativa en los tejidos blandos y duros³⁸. La distribución y el tamaño de las partículas de silicato tricálcico afectan la manipulación y fraguado, ya que al ser más pequeñas penetran los túbulos dentinarios y produce una hidratación más rápida³⁰.

Propiedades físico-químicas

Radiopacidad

La norma ISO 6876:2012 exige que la radiopacidad de un sellador endodóntico sea superior a 3 mm de aluminio (mm Al) equivalente (3 veces más radiopaco que la dentina), de modo que pueda visualizarse fácilmente en una radiografía^{27,36}. La radiopacidad de los selladores de silicato tricálcico en la actualidad supera la radiopacidad mínima y, por lo general, varía de 5 a 8 mm Al, excepto para el sellador AH Plus Bioceramic, que tiene un rango de 9 a 14 mm Al²⁷.

Los valores de radiopacidad de los biocerámicos como AH Plus Bioceramic fueron de (8,6 mm Al), NeoSealer Flo (5,5 mm Al), Bioroot RCS (5,3 mm Al), y MTA Fillapex (4,6 mm Al), pero AH Plus presenta valores de radiopacidad de 11,9 mm Al debido a porcentajes altos de tungstato de calcio y óxido de circonio como radiopacadores³⁹⁻⁴¹.

Tiempo de fraguado

La reacción de fraguado variará con la humedad disponible, se tiene un tiempo promedio de 40–120 minutos, un fraguado inicial de 40–50 minutos y final de 120–170 minutos, no incluyendo al cemento TheraCal, que es fotopolimerizado en 0,3 minutos, y el Biodentine que fragua en 9 minutos^{37,42}. El cemento sellador normalmente resistirá la disolución cuando se somete a un fraguado completo, pero según la conclusión de investigaciones anteriores demostraron que se completa dentro de 58,2 horas⁴³.

Los componentes responsables del fraguado de los biocerámicos son el aluminato de calcio que junto con el sulfato de calcio reducen el tiempo de fraguado, pero el exceso de sulfato de calcio en el cemento disminuye la biocompatibilidad por la reacción del aluminato con el silicato tricálcico que agota el hidróxido de calcio formado en la reacción del silicato tricálcico⁴⁴.

Estabilidad dimensional

Los biocerámicos no presentan contracción sino una ligera expansión de fraguado, además, estos materiales cumplen con la norma ISO 6876/2001⁴⁵. La

ANSI/ADA 57:2000 requiere que los selladores endodónticos tengan una contracción lineal inferior al 1 % y una expansión inferior al 0,1 % en longitud²⁷. Según pruebas de tomografía microcomputarizada, la contracción volumétrica de los selladores de CST es del 1 % al 2 %, pero otros estudios informaron valores más altos, de más del 1 % (TotalFill BC) y en caso del cemento CeraSeal (MetaBiomed, EndoSeal) tuvieron una expansión inferior al 0,5 %²⁷. Según la literatura, los selladores TotalFill BC, Sealer Plus BC y Bio-C Sealer tienen una contracción volumétrica que superan el nivel mínimo requerido por la ANSI/ADA 57, pero los autores han sugerido que la solubilidad y la estabilidad dimensional deberían evaluarse con el mismo experimento para evitar variables²⁷.

Esterilidad

En endodoncia existen materiales estériles o esterilizables, pero no los selladores, según la norma ISO 6876:2012 no exige esterilidad para los selladores endodónticos²⁷. Es por esto que, los selladores endodónticos se deben colocar con puntas desechables o instrumentos esterilizados, con dique de goma y en conjunto con numerosos irrigantes para reducir las bacterias antes de la obturación²⁷.

Sellado

El objetivo de la obturación endodóntica es obtener un sellado hermético a los fluidos e impermeable a las bacterias, es por esto que se han utilizado muchos métodos para comparar el sellado de materiales, incluida la migración bacteriana, la infiltración de tintes, la filtración de fluidos, la adaptación a las paredes del conducto, la penetración de los túbulos, la tomografía microcomputarizada y las pruebas de fuerza de unión por expulsión²⁷. La adaptación de un sellador de CST se produce al penetrar en los túbulos dentinarios, lo que crea un sellado hermético a los fluidos, incluso es capaz de llenar los conductos laterales de manera más efectiva con condensación de onda continua que con la técnica de cono único^{27,46,47}. Bajo microscopía de barrido láser confocal, el sellador biocerámico es capaz de penetrar los túbulos dentinarios desde el 7 % hasta el 82 % en las porciones apical y coronal, pero otro estudio menciona que no hay diferencia en la microfiltración entre una pasta de silicato

tricálcico y un sellador de resina epóxica utilizando el método de filtración de fluidos^{48,49}. En un estudio de fuga de tinte, un sellador de CST tuvo menos fugas que los selladores a base de silicona o resina, aunque ninguno produjo un sello impermeable a los fluidos del agujero apical^{50,51}.

Solubilidad

Los selladores biocerámicos poseen la desventaja de tener alta solubilidad que impacta negativamente en la calidad de la obturación, promoviendo espacios entre el núcleo obturador y la dentina radicular por lo que puede aumentar la microfiltración bacteriana y eventualmente reducir la eficiencia del tratamiento^{17,21,52}. El requisito de solubilidad de la norma ISO 6876 establece que no debe exceder el 3 % en peso cuando fragua, en el caso de los selladores de CST tienen una alta solubilidad aproximada de 13,5 % de pérdida de masa en 30 días⁵³. Se informó que MTA-Fillapex tiene una alta solubilidad y no cumple con el requisito ISO 6876, pero en el caso de AH Plus Bioceramic (AHBC) presenta una solubilidad aproximada del 30 % en comparación con AH Plus (sellador de resina) con un 0,5 %²⁷. La solubilidad es mayor en la fase de fraguado inicial, donde hay precipitación de hidroxiapatita y se estabiliza a partir de los 28 días¹⁷.

Los selladores biocerámicos tienen vehículos los cuales intervienen en la solubilidad del material, como el dimetilsulfóxido el cual mejora la hidrofobicidad del material permitiendo una mejor adhesión a la dentina húmeda, además disminuye la degradación de la adhesión a largo plazo⁴⁴. El propilenglicol por otro lado es soluble en agua y reabsorbible, su desventaja es la falta de estabilidad que puede provocar retraso o falta de fraguado^{27,44}.

Estudios informan que la solubilidad de AHBC es menor a otros cementos biocerámicos debido a una menor cantidad de silicatos de calcio en su composición¹⁷. También los valores medios de solubilidad de los biocerámicos son altos (7,82 %–14,2 %) al ser sumergidos en agua, Endosequence tuvo consistentemente una alta solubilidad aproximada de 2,25 %, pero AH26 una menor solubilidad aproximada de –1,59 %⁴³.

Fluidez

Una de las propiedades más importantes de los selladores de conductos radiculares es su capacidad para fluir y penetrar en la compleja anatomía del conducto radicular, como los conductos laterales, istmos y ramificaciones para proporcionar un sellado adecuado y ejercer sus propiedades antimicrobianas⁵⁴. Según la norma ISO 6876:2001, la asociada del tamaño de partículas de un cemento debe ser de 2 μ m aproximadamente⁵⁵.

Las características superiores de los selladores biocerámicos en comparación a otros selladores en especial con el Gold standard AH Plus® (Dentsply) se debe al tamaño de sus partículas ya que el biocerámico tiene un tamaño de 0,2 μ m y AH Plus contiene partículas de tungstato de calcio y óxido de circonio más grandes: 8 μ m y 1,5 μ m, por tanto, se concluyó que el biocerámico podría penetrar fácilmente a los túbulos dentinarios y producir un sellado apical adecuado^{56,57}.

Pureza

El cemento hidráulico está sujeto a la norma ISO 9917–1 el cual incluye la ausencia de arsénico o plomo soluble (< 2 partes por millón [ppm] y < 100 ppm), ya que los primeros materiales dentales de silicato tricálcico contenían de 1 a 35 ppm de arsénico^{27,58}. No se ha encontrado alto contenido de plomo o impurezas en ningún CST, la probabilidad de impurezas es baja dada la atención prestada a los primeros productos²⁷.

El porcentaje de silicato tricálcico en todos los selladores varía entre el 5 % hasta el 35% para todas las formulaciones, incluso incluyen silicato dicálcico que aumenta la cantidad total de silicato en el producto^{27,44}.

Eliminación en retratamientos

El retratamiento se lo realiza cuando una técnica de obturación es deficiente o si ocurre una recontaminación del conducto, en el caso de los biocerámicos, estos son insolubles en disolventes orgánicos comúnmente utilizados en endodoncia, como el etanol o el cloroformo, por tal motivo,

se recomienda emplear otras técnicas como la instrumentación ultrasónica la cual retira considerablemente el sellador remanente³³. Se han utilizado métodos químicos/mecánicos, como el ácido fórmico al 10 % con instrumentación mecánica, el cual resulta un método eficaz para eliminar el silicato tricálcico fraguado⁵⁹. Las limas rotatorias de retratamiento o la activación sónica no son capaces de eliminar en la totalidad los selladores cerámicos ya que estos penetran en los túbulos dentinarios dificultando su retiro²⁷.

Propiedades biológicas

El objetivo de sellar el sistema de conductos radiculares, es conseguir un sellado hermético con materiales inertes, y mediante el uso de selladores hidráulicos potenciar la bioactividad y mejorar la adhesión al sustrato dentinario³². Se ha demostrado que los cementos hidráulicos a base de TCS poseen una buena bioactividad, por lo cual mejora el proceso de curación, la capacidad de sellado, reparación de perforaciones, el cierre de ápices abiertos, obturación retrógrada en cirugía apical, recubrimiento pulpar directo/indirecto y reparación de reabsorciones⁶⁰.

Los cementos selladores biocerámicos son materiales que tienen propiedades bioactivas que consisten en la interacción con las células madre por medio de señalización celular y molecular, produciendo así un sello biológico e induciendo la cicatrización además tienen una capacidad antimicrobiana de hasta 30 días^{29,35,61,62}.

La humedad de la dentina promueve una reacción de hidratación para producir hidrogel de silicato de calcio (SC) e Ca(OH)_2 para elevar y mantener un pH alto el cual induce una necrosis controlada de células de resorción en la superficie de la raíz, inhibe lipopolisacáridos, estimula la formación de hidroxiapatita lo que influye en la unión entre la dentina y el material de obturación^{63,64}.

Biocompatibilidad

La biocompatibilidad se define como la capacidad de un material para funcionar con una respuesta adecuada del huésped en una aplicación específica³². Los biocerámicos son materiales

biocompatibles debido a que logran una adecuada respuesta del huésped debido a la liberación de fosfato de calcio, que también es el principal componente inorgánico de los tejidos duros, además, estos materiales son inocuos para los tejidos y permiten la proliferación de fibroblastos y osteoblastos en su superficie^{65,66}. Además, Seron et al.⁶⁷ demostraron que los selladores biocerámicos redujeron el dolor endodóntico postoperatorio hasta después de 24 horas en comparación con el sellador AH Plus, esto debido a que este material, a pesar de ser el *gold standard*, libera formaldehído el cual es citotóxico⁶⁷⁻⁶⁹.

Según Alves et al.³³, la IL-6 es una citocina proinflamatoria que puede activar y modular las células relacionadas con la reacción inflamatoria y la resorción ósea, demostró que los biocerámicos promovieron un aumento de IL-6 hasta los 7 días y el sellador de resina epóxica hasta 60 días. Se concluyó que un sellador de resina epoxi retrasa el proceso de curación y que los selladores biocerámicos son menos citotóxicos y presentan biocompatibilidad después de periodos prolongados³³.

Los cementos selladores biocerámicos como Bio-C Sealer, Sealer Plus BC, NeoMTA, Endosequence BC, CeraSeal y EndoSeal MTA fueron biocompatibles y no fueron citotóxicos después del fraguado, pero en el caso del MTA-Fillapex el cual contiene principalmente resina y solo un 15 % de MTA, se demostró que su citotoxicidad es causada por la resina a una concentración de 50 mg/mL durante 2 semanas, siendo más citotóxica que los selladores de CST²⁷.

Bioactividad

La bioactividad se define como la respuesta celular inducida por la liberación de iones o sustancias biológicamente activas del biomaterial para que se produzca una biomineralización³². Sin embargo, Bramante define a la bioactividad como la capacidad de un biomaterial para inducir una respuesta biológica específica y que al hidratarse forma una capa de hidroxiapatita^{27,70}. El término bioactividad ha sido ampliamente utilizado como una característica de los materiales biocerámicos, evidenciando una falta de estandarización en la literatura respecto a la definición del concepto y las metodologías utilizadas para evaluar esta característica

en materiales dentales³². La bioactividad, según la norma ISO 23317 es la capacidad de formar una capa de apatita carbonatada en la superficie de un material después de la inmersión en fluidos corporales sintéticos²⁷. La formación de cristales de apatita en la superficie del sellador dentro del conducto radicular puede ayudar a llenar el espacio del CR y obstruir la migración bacteriana que puede provocar una infección posterior²⁷.

El Ca(OH)_2 durante mucho tiempo ha sido considerado como material bioactivo en la terapia de la pulpa vital y procedimientos de endodoncia lo que impulsó su uso y es un beneficio del sellador CST⁷¹. Los selladores de CST al hidratarse liberan Ca(OH)_2 que eleva el pH aproximadamente 10 dentro de una matriz dura de silicato tricálcico hidratado que puede persistir al menos 3 semanas⁷². La elevación de pH y los iones fosfato en los fluidos tisulares precipitan la apatita carbonatada en la superficie de los selladores fraguados e induce efectos osteogénicos²⁷. Se ha demostrado que varios selladores de silicato tricálcico son capaces de causar biomineralización, diferenciación osteoblástica, proliferación de fibroblastos, factores de crecimiento osteogénico/angiogénico y la proliferación del ligamento periodontal²⁷. Sin embargo, los cementos de resina con biocerámico como el MTA-Fillapex presentan citotoxicidad ya que este material solo contiene un 15 % de MTA y su composición es principalmente resina, por lo que no debería evaluarse en la categoría de bioactividad²⁷.

La formación de fosfato cálcico superficial promueve la cicatrización de heridas, la formación de una barrera dentinaria reparadora, hueso y cemento debido a la diferenciación de osteoblastos, fibroblastos, cementoblastos, odontoblastos, células pulpares y varias células madre^{73,74}. Además, un pH elevado induce a los odontoblastos y cementoblastos a la remineralización de tejidos⁷⁵. Según la literatura el óxido de circonio utilizado como radiopacador en los biocerámicos estimula la proliferación de fibroblastos y la formación de colágeno en el tejido subcutáneo³³. Según Song et al., en 2022 demostraron que los cementos cerámicos al elevar el pH producen la activación de vías enzimáticas de mineralización, acción antibacteriana, cristalización superficial de una capa de fosfato cálcico y la formación de apatita, además inducen el depósito

de cristales de calcita, los cuales atraen a la fibronectina permitiendo así la adhesión y diferenciación celular⁷⁶.

AH Plus Bioceramic posee una baja cantidad de TSC (5-15 %) y una alta liberación acumulativa de calcio, pero Ceraseal presenta una mayor liberación de calcio y actividad alcalinizante en comparación a NeoSealer Flo y AH Plus Bioceramic, no obstante, estos valores fueron más bajos en comparación a Totalfill BC Sealer, BioRoot RCS y Neo MTA Plus, si bien puede ser atribuido a los diferentes porcentajes de TSC y aluminato de calcio^{39,77,78}.

Capacidad antibacteriana

Los cementos selladores biocerámicos adquieren propiedades antibacterianas tras la reacción de precipitación durante el fraguado y generan superficies con nanocristales de 1–3 nm, que evita la adhesión bacteriana, la reacción de hidratación produce Ca(OH)_2 que eleva el pH hasta por 30 días lo que explicaría la continua eliminación de bacterias^{70,79}.

Un tratamiento de conducto es necesario para controlar la invasión microbiana que puede formar una biopelícula que no puede ser erradicada a través del sistema inmunológico²⁷. Es por esto la importancia del uso de los selladores de silicato tricálcico ya que poseen una acción antimicrobiana para algunas bacterias planctónicas y levaduras debido a su alto pH²⁷.

Baras et al.⁵⁴ mencionaban que los cementos biocerámicos son capaces de liberar iones calcio y fosfato los cuales mejoran potencialmente la capacidad de sellado y aumenta la resistencia a la fractura de las raíces de los dientes al remineralizar zonas desmineralizadas y fortalecer la estructura radicular, adicionalmente estos iones inhiben eficazmente la biopelícula de *Enterococcus faecalis* asociada a dientes con tratamiento endodóntico fallido.

Discusión

Los selladores a base de TSC poseen propiedades ideales de acuerdo con las normas ANSI/ADA 57:2000 e ISO 6876:2012, conforme a los resultados

de nuestra revisión las propiedades físicas de los selladores de silicato tricálcico cumplen con muchas de las propiedades ideales^{17,21,27,29,35,80,81}. Los tiempos de fraguado de todos los selladores biocerámicos premezclados son más largos que los informados por los fabricantes debido a que la humedad ambiental es la responsable del fraguado^{39,82}. Se debe considerar que es difícil evaluar clínicamente la humedad adecuada del conducto radicular y actualmente no se informa de protocolos que proporcionen un fraguado estable y reproducible de los selladores⁴¹.

Los selladores biocerámicos premezclados cumplen con una fluidez y espesor óptimos necesarios para penetrar en los túbulos dentinarios y sellar anatomías complejas proporcionando una gran ventaja en técnicas de obturación en frío, donde a menudo se recomiendan selladores de alta fluidez⁴¹. Cuando está junto a la dentina radicular forma una capa mineral de apatita en la interfaz dentina-sellador (zona de infiltración mineral) debido al intercambio de iones entre el material bioactivo y los fluidos corporales que dan lugar a una reacción de disolución-precipitación^{83,84}.

Una mayor solubilidad de un cemento biocerámico no indica un efecto perjudicial in vivo, ya que la nucleación de apatita y carbonato puede compensar el comportamiento del sellador^{41,85,86}. Los iones de calcio suministrados por la rápida disolución del Ca(OH)_2 y por la matriz de cemento reaccionan con iones de carbonato ambientales para formar una capa superficial de carbonato de calcio que limita la difusión iónica del sellador reduciendo su degradación y mejorando el sellado endodóntico al formar una capa delgada de fosfato de calcio⁴¹.

Se han desarrollado numerosos biomateriales en los cuales se ha aumentado el contenido de TSC para mejorar las propiedades biointeractivas y biológicas, mientras que los aluminatos de calcio son utilizados para reducir el tiempo de fraguado necesario para reducir la solubilidad⁴¹. Estos selladores funcionan bien clínicamente con un tiempo de trabajo y fraguado adecuados, son dimensionalmente estables con una expansión o contracción menor, poseen características antimicrobianas, capacidad única de bioactividad y biomineralización lo que respalda su uso, a pesar de ello se necesita más

investigación para determinar si las propiedades de estos materiales son comparables con los selladores convencionales^{16,41,56,87}.

Conclusión

El atractivo de los materiales biocerámicos por sus deseables propiedades sumado a su constante desarrollo los vuelven materiales con excelentes propiedades físico químicas y biológicas, pero presentan desventajas como la solubilidad, estabilidad dimensional, costo y su eliminación en retratamientos. Debido a la escasa información sobre el rendimiento clínico a largo plazo de los selladores de silicato tricálcico sus propiedades se aproximan a las de un sellador de conducto radicular ideal, pero es necesario realizar más investigaciones sobre si sus propiedades biológicas únicas justifican su uso en comparación con los selladores tradicionales.

Declaración de conflicto de interés

Los y las autores/as declaran no tener ningún conflicto de interés.

Referencias

1. Washio A, Miura H, Morotomi T, et al. Effect of Bioactive Glass-Based Root Canal Sealer on the Incidence of Postoperative Pain after Root Canal Obturation. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(23):8857. doi:10.3390/ijerph17238857
2. Wells C, Dulong C, McCormack S. Vital Pulp Therapy for Endodontic Treatment of Mature Teeth: A Review of Clinical Effectiveness, Cost-Effectiveness, and Guidelines. *Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health*; 2019. Acceso Julio 19, 2024. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK546327/>
3. Basrani B, Haapasalo M. Update on endodontic irrigating solutions: Update on endodontic irrigating solutions. *Endod Top*. 2012;27(1):74-102. doi:10.1111/etp.12031
4. Soares IJ, Goldberg F. Endodoncia, Técnicas y fundamentos. Segunda. Panamericana; 2012.

- Acceso Noviembre 6, 2022. https://www.academia.edu/8226348/Soares_and_Goldberg_ENDODONCIA_TECNICA_Y_FUNDAMENTOS
5. Tronstad L. Clinical Endodontics. Tercera. Thieme; 2009. <https://www.thieme-connect.de/products/ebooks/book/10.1055/b-002-66245>
 6. Canalda C, Brau, Esteve. Endodoncia técnicas clínicas y bases científicas. 3era ed. Elsevier; 2014. Acceso Noviembre 15, 2022. <https://booksmedicos.org/endodoncia-tecnicas-clinicas-y-bases-cientificas-canalda-3a-edicion/>
 7. Siqueira JF. Endodontic infections: concepts, paradigms, and perspectives. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2002;94(3):281-293. doi:10.1067/moe.2002.126163
 8. Zubizarreta-Macho Á, Rico-Romano C, Fernández-Aceñero MJ, et al. Adding Two Antimicrobial Glasses to an Endodontic Sealer to Prevent Bacterial Root Canal Reinfection: An In Vivo Pilot Study in Dogs. Antibiot Basel Switz. 2021;10(10):1183. doi:10.3390/antibiotics10101183
 9. Alghamdi F, Shakir M. The Influence of Enterococcus faecalis as a Dental Root Canal Pathogen on Endodontic Treatment: A Systematic Review. Cureus. 2020;12(3):e7257. doi:10.7759/cureus.7257
 10. Singh G, Gupta I, Elshamy FMM, Boreak N, Homeida HE. In vitro comparison of antibacterial properties of bioceramic-based sealer, resin-based sealer and zinc oxide eugenol based sealer and two mineral trioxide aggregates. Eur J Dent. 2016;10(3):366-369. doi:10.4103/1305-7456.184145
 11. Candeiro GTM, Moura-Netto C, D'Almeida-Couto RS, et al. Cytotoxicity, genotoxicity and antibacterial effectiveness of a bioceramic endodontic sealer. Int Endod J. 2016;49(9):858-864. doi:10.1111/iej.12523
 12. Washio A, Morotomi T, Yoshii S, Kitamura C. Bioactive Glass-Based Endodontic Sealer as a Promising Root Canal Filling Material without Semisolid Core Materials. Mater Basel Switz. 2019;12(23):3967. doi:10.3390/ma12233967
 13. Huang G, Liu SY, Wu JL, Qiu D, Dong YM. A novel bioactive glass-based root canal sealer in endodontics. J Dent Sci. 2022;17(1):217-224. doi:10.1016/j.jds.2021.04.018
 14. Rebolledo S, Alcántara-Dufeu R, Luengo Machuca L, Ferrada L, Sánchez-Sanhueza GA. Real-time evaluation of the biocompatibility of calcium silicate-based endodontic cements: An in vitro study. Clin Exp Dent Res. 2023;9(2):322-331. doi:10.1002/cre2.714
 15. Mu S, Guo S, Wang X, et al. Effects of deferoxamine on the osteogenic differentiation of human periodontal ligament cells. Mol Med Rep. 2017;16(6):9579-9586. doi:10.3892/mmr.2017.7810
 16. Godiny M, Hatam R, Khavid A, Khanlari S. Apical microleakage in root canals containing broken rotary Instruments. Iran Endod J. 2017;12(3):360-365. doi:10.22037/iej.v12i3.16656
 17. Donnermeyer D, Schemkämper P, Bürklein S, Schäfer E. Short and Long-Term Solubility, Alkalizing Effect, and Thermal Persistence of Premixed Calcium Silicate-Based Sealers: AH Plus Bioceramic Sealer vs. Total Fill BC Sealer. Mater Basel Switz. 2022;15(20):7320. doi:10.3390/ma15207320
 18. Khatib MS, Devarasanahalli SV, Aswathanarayana RM, Das P, Nadig RR. Comparison of the sealing ability of Endocem mineral trioxide aggregate and Endoseal mineral trioxide aggregate as a furcal perforation repair material under the operating microscope: An in-vitro study. Endodontology. 2019;31(1):25. doi:10.4103/endo.endo_49_18
 19. Dastorani M, Shourvarzi B, Nojoumi F, Ajami M. Comparison of bacterial microleakage of endoseal MTA sealer and Pro-Root MTA in root perforation. J Dent. 2021;22(2):96-101. doi:10.30476/DENTJODS.2020.86042.1164
 20. Elsayed MA, Hassanien EE, Elgendy AAE. Ageing of TotalFill BC Sealer and MTA Fillapex in Simulated Body Fluid. Eur Endod J. 2021;6(2):183-188. doi:10.14744/eej.2020.43043
 21. Souza LC de, Neves GST, Kirkpatrick T, Letra A, Silva R. Physicochemical and Biological Properties of AH Plus Bioceramic. J Endod. 2023;49(1):69-76. doi:10.1016/j.joen.2022.10.009
 22. Carvalho CN, Grazziotin-Soares R, de Miranda Candeiro GT, et al. Micro Push-out Bond Strength and Bioactivity Analysis of a Bioceramic Root Canal Sealer. Iran Endod J.

- 2017;12(3):343-348. doi:10.22037/iej.v12i3.16091
23. Raghavendra SS, Jadhav GR, Gathani KM, Kotadia P. Bioceramics in endodontics - a review. *J Istanbul Univ Fac Dent*. 2017;51(3 Suppl 1):S128-S137. doi:10.17096/jiufd.63659
24. Ford TR, Torabinejad M, McKendry DJ, Hong CU, Kariyawasam SP. Use of mineral trioxide aggregate for repair of furcal perforations. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 1995;79(6):756-763. doi:10.1016/s1079-2104(05)80313-0
25. Primus CM, Tay FR, Niu LN. Bioactive tri/dicalcium silicate cements for treatment of pulpal and periapical tissues. *Acta Biomater*. 2019;96:35-54. doi:10.1016/j.actbio.2019.05.050
26. Mente J. Agregado trióxido mineral Indicaciones y descripción de la aplicación clínica práctica por medio de ejemplos clínicos. *Quintessence*. 2010;23(8):366-377.
27. Aminoshariae A, Primus C, Kulild JC. Tricalcium silicate cement sealers: Do the potential benefits of bioactivity justify the drawbacks? *J Am Dent Assoc* 1939. 2022;153(8):750-760. doi:10.1016/j.ada.2022.01.004
28. Al-Haddad A, CheAb Aziz ZA. Bioceramic-based root canal sealers: A review. *Int J Biomater*. 2016;2016:9753210. doi:10.1155/2016/9753210
29. Zhekov KI, Stefanova VP. Retreatability of Bioceramic Endodontic Sealers: a Review. *Folia Med (Plovdiv)*. 2020;62(2):258-264. doi:10.3897/folmed.62.e47690
30. Toubes KS de, 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. doi:10.1590/0103-6440202103568
31. Jitaru S, Hodisan I, Timis L, Lucian A, Bud M. The use of bioceramics in endodontics - literature review. *Clujul Med* 1957. 2016;89(4):470-473. doi:10.15386/cjmed-612
32. Estivalet MS, de Araújo LP, Immich F, et al. Bioactivity Potential of Bioceramic-Based Root Canal Sealers: A Scoping Review. *Life Basel Switz*. 2022;12(11):1853. doi:10.3390/life12111853
33. Alves Silva EC, Tanomaru-Filho M, da Silva GF, Delfino MM, Cerri PS, Guerreiro-Tanomaru JM. Biocompatibility and Bioactive Potential of New Calcium Silicate-based Endodontic Sealers: Bio-C Sealer and Sealer Plus BC. *J Endod*. 2020;46(10):1470-1477. doi:10.1016/j.joen.2020.07.011
34. ISO-6876-2012.pdf. Acceso Noviembre 1, 2023. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/45117/156552b2173544abb2eco28d05f55ad9/ISO-6876-2012.pdf>
35. Guivarc'h M, Jeanneau C, Giraud T, et al. An international survey on the use of calcium silicate-based sealers in non-surgical endodontic treatment. *Clin Oral Investig*. 2020;24(1):417-424. doi:10.1007/s00784-019-02920-1
36. Abusrewil SM, McLean W, Scott JA. The use of Bioceramics as root-end filling materials in periradicular surgery: A literature review. *Saudi Dent J*. 2018;30(4):273-282. doi:10.1016/j.sdentj.2018.07.004
37. Camilleri J. Mineral Trioxide Aggregate in Dentistry: From Preparation to Application.; 2014:206. doi:10.1007/978-3-642-55157-4
38. Balbinot G de S, Leitune VCB, Nunes JS, Visioli F, Collares FM. Synthesis of sol-gel derived calcium silicate particles and development of a bioactive endodontic cement. *Dent Mater*. 2020;36(1):135-144. doi:10.1016/j.dental.2019.11.004
39. Siboni F, Taddei P, Zamparini F, Prati C, Gandolfi MG. Properties of BioRoot RCS, a tricalcium silicate endodontic sealer modified with povidone and polycarboxylate. *Int Endod J*. 2017;50 Suppl 2:e120-e136. doi:10.1111/iej.12856
40. Demirci GK, Kaval ME, Kurt SM, et al. Energy-Dispersive X-Ray Spectrometry Analysis and Radiopacity of Five Different Root Canal Sealers. *Braz Dent J*. 2021;32(5):1-11. doi:10.1590/0103-6440202104638
41. Zamparini F, Prati C, Taddei P, Spinelli A, Di Foggia M, Gandolfi MG. Chemical-Physical Properties and Bioactivity of New Premixed Calcium Silicate-Bioceramic Root Canal Sealers. *Int J Mol Sci*. 2022;23(22):13914. doi:10.3390/ijms232213914
42. Estrela C, Decurcio D de A, Rossi-Fedele G, Silva JA, Guedes OA, Borges ÁH. Root perforations: a review of diagnosis, prognosis and materials. *Braz Oral Res*. 2018;32(suppl 1):e73. doi:10.1590/1807-3107bor-2018.vol32.0073
43. Abu Zeid ST, Alnoury A. Characterisation of the Bioactivity and the Solubility of a New Root Canal Sealer. *Int Dent J*. 2023;73(5):760-769. doi:10.1016/j.identj.2023.04.003

44. Cardinali F, Camilleri J. A critical review of the material properties guiding the clinician's choice of root canal sealers. *Clin Oral Investig*. 2023;27(8):4147-4155. doi:10.1007/s00784-023-05140-W
45. Gandolfi MG, Taddei P, Modena E, Siboni F, Prati C. Biointeractivity-related versus chemi/physiosorption-related apatite precursor-forming ability of current root end filling materials. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2013;101(7):1107-1123. doi:10.1002/jbm.b.32920
46. Patri G, Agrawal P, Anushree N, Arora S, Kunjappu JJ, Shamsuddin SV. A Scanning Electron Microscope Analysis of Sealing Potential and Marginal Adaptation of Different Root Canal Sealers to Dentin: An In Vitro study. *J Contemp Dent Pract*. 2020;21(1):73-77.
47. Fernández R, Restrepo JS, Aristizábal DC, Álvarez LG. Evaluation of the filling ability of artificial lateral canals using calcium silicate-based and epoxy resin-based endodontic sealers and two gutta-percha filling techniques. *Int Endod J*. 2016;49(4):365-373. doi:10.1111/iej.12454
48. Wang Y, Liu S, Dong Y. In vitro study of dentinal tubule penetration and filling quality of bioceramic sealer. *PloS One*. 2018;13(2):e0192248. doi:10.1371/journal.pone.0192248
49. Ersahan S, Aydin C. Solubility and apical sealing characteristics of a new calcium silicate-based root canal sealer in comparison to calcium hydroxide-, methacrylate resin- and epoxy resin-based sealers. *Acta Odontol Scand*. 2013;71(3-4):857-862. doi:10.3109/00016357.2012.734410
50. Pawar SS, Pujar MA, Makandar SD. Evaluation of the apical sealing ability of bioceramic sealer, AH plus & epiphany: An in vitro study. *J Conserv Dent JCD*. 2014;17(6):579-582. doi:10.4103/0972-0707.144609
51. Kaul S, Kumar A, Badiyani BK, Sukhtankar L, Madhumitha M, Kumar A. Comparison of sealing ability of Bioceramic Sealer, AH Plus, and GuttaFlow in conservatively prepared curved Root canals obturated with single-cone technique: An in vitro study. *J Pharm Bioallied Sci*. 2021;13(Suppl 1):S857-S860. doi:10.4103/jpbs.jpbs_52_21
52. Carvalho-Junior JR, Correr-Sobrinho L, Correr AB, Sinhoreti MAC, Consani S, Sousa-Neto MD. Solubility and dimensional change after setting of root canal sealers: a proposal for smaller dimensions of test samples. *J Endod*. 2007;33(9):1110-1116. doi:10.1016/j.joen.2007.06.004
53. Tanomaru-Filho M, Torres FFE, Chávez-Andrade GM, et al. Physicochemical Properties and Volumetric Change of Silicone/Bioactive Glass and Calcium Silicate-based Endodontic Sealers. *J Endod*. 2017;43(12):2097-2101. doi:10.1016/j.joen.2017.07.005
54. Baras BH, Wang S, Melo MAS, et al. Novel bioactive root canal sealer with antibiofilm and remineralization properties. *J Dent*. 2019;83:67-76. doi:10.1016/j.jdent.2019.02.006
55. Guerrero F, Mendoza A, Ribas D, Aspiazu K. Apexification: A systematic review. *J Conserv Dent JCD*. 2018;21(5):462. doi:10.4103/JCD.JCD_96_18
56. Asawaworarit W, Pinyosopon T, Kijssamanmith K. Comparison of apical sealing ability of bioceramic sealer and epoxy resin-based sealer using the fluid filtration technique and scanning electron microscopy. *J Dent Sci*. 2020;15(2):186-192. doi:10.1016/j.jds.2019.09.010
57. Donnermeyer D, S B, T D, E S. Endodontic sealers based on calcium silicates: a systematic review. *Odontology*. 2019;107(4). doi:10.1007/s10266-018-0400-3
58. Monteiro Bramante C, Demarchi ACCO, de Moraes IG, et al. Presence of arsenic in different types of MTA and white and gray Portland cement. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2008;106(6):909-913. doi:10.1016/j.tripleo.2008.07.018
59. Garrib M, Camilleri J. Retreatment efficacy of hydraulic calcium silicate sealers used in single cone obturation. *J Dent*. 2020;98:103370. doi:10.1016/j.jdent.2020.103370
60. Jevnikar AP, Malgaj T, Radan K, Özden I, Kušter M, Kocjan A. Rheological Properties and Setting Kinetics of Bioceramic Hydraulic Cements: ProRoot MTA versus RS. *Mater Basel Switz*. 2023;16(8):3174. doi:10.3390/ma16083174
61. Ginebra MP, Fernández E, De Maeyer EA, et al. Setting reaction and hardening of an apatitic calcium phosphate cement. *J Dent Res*. 1997;76(4):905-912. doi:10.1177/00220345970760041201

62. Komabayashi T, Colmenar D, Cvach N, Bhat A, Primus C, Imai Y. Comprehensive review of current endodontic sealers. *Dent Mater J*. 2020;39(5):703-720. doi:10.4012/dmj.2019-288
63. Wang Z, Shen Y, Haapasalo M. Antimicrobial and Antibiofilm Properties of Bioceramic Materials in Endodontics. *Mater Basel Switz*. 2021;14(24):7594. doi:10.3390/ma14247594
64. Wang Z. Bioceramic materials in endodontics. *Endod Top*. 2015;32(1):3-30. doi:10.1111/etp.12075
65. Güven EP, Taşlı PN, Yalvac ME, Sofiev N, Kayahan MB, Sahin F. In vitro comparison of induction capacity and biomineralization ability of mineral trioxide aggregate and a bioceramic root canal sealer. *Int Endod J*. 2013;46(12):1173-1182. doi:10.1111/iej.12115
66. Haapasalo M, Parhar M, Huang X, Wei X, James L, Shen Y. Clinical use of bioceramic materials. *Endod Top*. 2015;32. doi:10.1111/etp.12078
67. Seron MA, Nunes GP, Ferrisse TM, et al. Postoperative pain after root canal filling with bioceramic sealers: a systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Odontology*. 2023;111(4):793-812. doi:10.1007/s10266-023-00830-z
68. Zamparini F, Lenzi J, Duncan HF, Spinelli A, Gandolfi MG, Prati C. The efficacy of premixed bioceramic sealers versus standard sealers on root canal treatment outcome, extrusion rate and post-obturation pain: A systematic review and meta-analysis. *Int Endod J*. 2024;57(8):1021-1042. doi:10.1111/iej.14069
69. Elias VV, Lima RB, Lucisano MP, et al. Inflammatory response to bioceramic and epoxy resin-based endodontic sealers implanted in mice subcutaneous tissue: An in vivo study. *Microsc Res Tech*. 2024;87(10):2447-2458. doi:10.1002/jemt.24631
70. Bramante CM, Kato MM, Assis GF de, et al. Biocompatibility and setting time of CPM-MTA and white Portland cement clinker with or without calcium sulfate. *J Appl Oral Sci Rev FOB*. 2013;21(1):32-36. doi:10.1590/1678-7757201302200
71. Sanz JL, Guerrero-Gironés J, Pecci-Lloret MP, Pecci-Lloret MR, Melo M. Biological interactions between calcium silicate-based endodontic biomaterials and periodontal ligament stem cells: A systematic review of in vitro studies. *Int Endod J*. 2021;54(11):2025-2043. doi:10.1111/iej.13600
72. Zordan-Bronzel CL, Esteves Torres FF, Tanomaru-Filho M, Chávez-Andrade GM, Bosso-Martelo R, Guerreiro-Tanomaru JM. Evaluation of Physicochemical Properties of a New Calcium Silicate-based Sealer, Bio-C Sealer. *J Endod*. 2019;45(10):1248-1252. doi:10.1016/j.joen.2019.07.006
73. Prati C, Gandolfi MG. Calcium silicate bioactive cements: Biological perspectives and clinical applications. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater*. 2015;31(4):351-370. doi:10.1016/j.dental.2015.01.004
74. López-García S, Sanz JL, Murcia L, et al. Assessment of the anti-inflammatory and biological properties of Bioroot Flow: A novel bioceramic sealer. *Tissue Cell*. 2024;88:102391. doi:10.1016/j.tice.2024.102391
75. Muramatsu T, Kashiwagi S, Ishizuka H, et al. Alkaline extracellular conditions promote the proliferation and mineralization of a human cementoblast cell line. *Int Endod J*. 2019;52(5):639-645. doi:10.1111/iej.13044
76. Song X, Díaz-Cuenca A. Sol-Gel Synthesis of Endodontic Cements: Post-Synthesis Treatment to Improve Setting Performance and Bioactivity. *Mater Basel Switz*. 2022;15(17):6051. doi:10.3390/ma15176051
77. Zamparini F, Siboni F, Prati C, Taddei P, Gandolfi MG. Properties of calcium silicate-monobasic calcium phosphate materials for endodontics containing tantalum pentoxide and zirconium oxide. *Clin Oral Investig*. 2019;23(1):445-457. doi:10.1007/s00784-018-2453-7
78. Siboni F, Taddei P, Prati C, Gandolfi MG. Properties of NeoMTA Plus and MTA Plus cements for endodontics. *Int Endod J*. 2017;50 Suppl 2:e83-e94. doi:10.1111/iej.12787
79. Han L, Kodama S, Okiji T. Evaluation of calcium-releasing and apatite-forming abilities of fast-setting calcium silicate-based endodontic materials. *Int Endod J*. 2015;48(2):124-130. doi:10.1111/iej.12290
80. Sebastian S, El-Sayed W, Adtani P, et al. Evaluation of the antibacterial and cytotoxic properties of TotalFill and NeoSEALER flo bioceramic sealers. *J Conserv Dent Endod*. 2024;27(5):491-497. doi:10.4103/JCDE.JCDE_103_24

81. Lim ES, Park YB, Kwon YS, Shon WJ, Lee KW, Min KS. Physical properties and biocompatibility of an injectable calcium-silicate-based root canal sealer: in vitro and in vivo study. *BMC Oral Health*. 2015;15(1):129. doi:10.1186/s12903-015-0112-9
82. Baldi JV, Bernardes RA, Duarte M a. H, et al. Variability of physicochemical properties of an epoxy resin sealer taken from different parts of the same tube. *Int Endod J*. 2012;45(10):915-920. doi:10.1111/j.1365-2591.2012.02049.x
83. Timis L, Gorea M, Har N, et al. Biomineralization ability of an experimental bioceramic endodontic sealer based on nanoparticles of calcium silicates. *Med Pharm Rep*. 2023;96(4):434-440. doi:10.15386/mpr-2660
84. Lim M, Jung C, Shin DH, Cho Y bum, Song M. Calcium silicate-based root canal sealers: a literature review. *Restor Dent Endod*. 2020;45(3):e35. doi:10.5395/rde.2020.45.e35
85. Gandolfi MG, Siboni F, Botero T, Bossù M, Riccitiello F, Prati C. Calcium silicate and calcium hydroxide materials for pulp capping: biointeractivity, porosity, solubility and bioactivity of current formulations. *J Appl Biomater Funct Mater*. 2015;13(1):43-60. doi:10.5301/jabfm.5000201
86. Gandolfi MG, Taddei P, Siboni F, Modena E, Ciapetti G, Prati C. Development of the foremost light-curable calcium-silicate MTA cement as root-end in oral surgery. Chemical-physical properties, bioactivity and biological behavior. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater*. 2011;27(7):e134-157. doi:10.1016/j.dental.2011.03.011
87. Manjila JC, Vijay R, Sirekha A, Santhosh L, Reddy J, Srinivasan A. Apical microleakage in root canals with separated rotary instruments obturated with different endodontic sealers. *J Conserv Dent JCD*. 2022;25(3):274-277. doi:10.4103/jcd.jcd_569_21