

ESTRATEGIAS PARA EL TRATAMIENTO DE LA DENTINA AFECTADA POR CARIES.

Revisión narrativa

Strategies for the treatment of dentin affected by caries.

Narrative review

POR

LUIS ALONSO **CALATRAVA ORAMAS¹**

1. Profesor Titular Jubilado, Universidad Central de Venezuela (UCV).
M Sc. University of Michigan. Dr. en Odontología, UCV. Decano
fundador USM.

 orcid.org/0009-0003-9500-4847.

Citar: Calatrava Oramas LA. Estrategias para el tratamiento de la dentina
afectada por caries. Revisión narrativa. ROLA 2026; 21(1): 166-178.



Resumen

La mayoría de los estudios en esta área se han centrado en la dentina sana como sustrato para la unión; sin embargo, en entornos clínicos, es común encontrar dentina afectada por caries, que presenta características morfológicas, químicas y físicas distintas. El objetivo de esta revisión narrativa es indagar sobre mejoras en la resistencia y durabilidad de esta unión, en un enfoque integral que considere las características de las superficies expuestas durante la preparación, como las propiedades de los adhesivos utilizados, facilitando decisiones informadas y promoviendo el impulso de materiales dentales eficaces y seguros. Se realizaron búsquedas en bases de datos electrónicas hasta julio de 2025 para localizar artículos relevantes, evaluando la calidad y solidez de la evidencia. La hibridación de la dentina afectada por caries se ve comprometida por enzimas colagenolíticas endógenas, lo que afecta la durabilidad y reduce propiedades mecánicas como el módulo elástico y la nanodureza. Se han sugerido nanomateriales que pueden inducir y regular la mineralización biomimética del tejido duro dental; sin embargo, su adición a adhesivos y resinas podría afectar las propiedades mecánicas. Se destacan los inhibidores de las MMP como la clorhexidina, un inhibidor confiable que podría mejorar la unión en DAC. Es fundamental un esfuerzo colaborativo entre clínicos, investigadores e industrias para entender la relación entre el comportamiento bioactivo, las limitaciones biomecánicas y la biomimética, con el fin de desarrollar materiales restauradores adecuados para la DAC.

PALABRAS CLAVE: dentina afectada por caries, resistencia y durabilidad, hibridación, módulo elástico, nanodureza, comportamiento bioactivo, biomimética.

Abstract

Most studies in this area have focused on sound dentin as a bonding substrate; however, in clinical settings, caries-affected dentin is commonly encountered, presenting distinct morphological, chemical, and physical characteristics. The objective of this narrative review is to investigate improvements in the strength and durability of this bond, using a comprehensive approach that considers the characteristics of the surfaces exposed during preparation, such as the properties of the adhesives used, facilitating informed decisions and promoting the development of effective and safe dental materials. Electronic databases were searched up to July 2025 to locate relevant articles, assessing the quality and strength of the evidence. CAD hybridization is compromised by endogenous collagenolytic enzymes, affecting durability and reducing mechanical properties such as elastic modulus and nanohardness. Nanomaterials that can induce and regulate biomimetic mineralization of dental hard tissue have been suggested; However, their addition to adhesives and resins could affect mechanical properties. Of note are MMP inhibitors such as chlorhexidine, a reliable inhibitor that could improve bonding in CAD. A collaborative effort between clinicians, researchers, and industry is essential to understand the relationship between bioactive behavior, biomechanical constraints, and biomimicry to develop suitable restorative materials for CAD.

KEYWORDS: caries-affected dentin, resistance and durability, hybridization, elastic modulus, nanohardness, bioactive behavior, biomimetics.

Introducción

La caries dental (CD) es una enfermedad multifactorial y dinámica, mediada por biopelículas y estimulada por azúcares. Este proceso provoca la desmineralización y remineralización de los tejidos duros dentales, afectando principalmente la corona del diente y, en etapas posteriores de la vida, las superficies radiculares expuestas. El equilibrio entre los factores patológicos y protectores es crucial para la iniciación y progresión de la caries. Esta interacción permite clasificar a individuos y grupos en categorías de riesgo, facilitando un enfoque más personalizado en la atención dental¹.

El tejido duro dental está altamente mineralizado, compuesto por cristales de hidroxiapatita (HA), moléculas orgánicas (principalmente proteínas colágenas y no colágenas) y una pequeña cantidad de agua. La desmineralización dental, que afecta al esmalte, la dentina y el cemento, es provocada por bacterias cariogénicas, dietas ácidas y reflujo ácido. La desmineralización del esmalte puede dar lugar a manchas blancas o caries incipientes, que afectan tanto la estética como la función dental. La desmineralización leve de la dentina, causada por erosión, puede resultar en hipersensibilidad, mientras que la desmineralización severa puede llevar a CD profundas y afectación pulpar².

La remineralización se produce en la superficie del esmalte afectado por ácidos, pero no en la dentina. Esta diferencia se atribuye a la menor cantidad de cristales minerales residuales y a la exposición de la matriz orgánica (principalmente colágeno tipo I) en la dentina tratada. En general, se considera que las proteínas de la matriz extracelular desempeñan un papel crucial en el control de la nucleación y el crecimiento de la apatita durante el proceso de biomineralización de la dentina³.

El tratamiento más importante para la CD en la práctica clínica contemporánea consiste en restauraciones con resina. Aunque la unión adhesiva al esmalte ha mostrado buenos resultados, diversos factores pueden llevar al fracaso de la unión a la dentina. Estos incluyen: Enzimas endógenas: como las metaloproteinasas de matriz, que degradan la dentina desmineralizada expuesta. Enzimas bacterianas y salivales: que afectan el adhesivo. Hidrólisis química y enzimática: que degrada la unión adhesiva/dentina. Las bacterias penetran la interfaz degradada, acumulándose en la placa cariogénica dentro de la dentina desmineralizada expuesta, causando que la CD sea inevitable, como lo demuestran diversos estudios clínicos^{1,2,4,5}.

Se ha destacado la importancia de preservar la dentina afectada por caries (DAC) en la odontología conservadora y mínimamente invasiva, protegiendo tanto la estructura dental como la vitalidad de la pulpa en las restauraciones, ya sean directas o indirectas. La unión a la DAC presenta varios desafíos debido a: alteraciones químicas y mecánicas, la presencia de una capa gruesa e irregular con estructuras similares a fibrillas y túbulos dentinarios estrechos y ocluidos⁶.

Metodología de revisión narrativa de literatura

Se revisaron tres bases de datos: PubMed, Scielo y Google Académico. Se incluyeron artículos publicados hasta julio de 2025, sin restricciones sobre el tipo de metodología (cualitativa, cuantitativa, mixta o teórica). Se realizó una búsqueda electrónica inicial, seguida de una revisión manual de las listas de referencias de los artículos seleccionados para identificar estudios adicionales. Se revisaron títulos y resúmenes, y posteriormente se analizaron los textos completos en función de los criterios de inclusión predeterminados.

Desmineralización de la dentina

La dentina es un tejido mineralizado compuesto por: 70% de apatita carbonatada; 20% de matriz orgánica; 10% de agua (en peso). Los componentes de la matriz orgánica son: fibrillas de colágeno, glicoproteínas y proteínas no colágenas (NCP); aunque representan un bajo porcentaje, son cruciales para la regulación de la mineralización. Las proteínas de la matriz no colágena son esenciales para la mineralización intrafibrilar; sin análogos biomiméticos de estas proteínas, no se logra la deposición de apatita intrafibrilar⁷. Las enzimas en la dentina son metaloproteinasas de matriz (MMP), importantes en procesos fisiológicos y patológicos. Y catepsinas de cisteína, otra familia de proteasas también presentes en la dentina⁸. La mineralización de la dentina y su remineralización es vital para controlar la caries dentinaria y mejorar la estabilidad de la unión; es fundamental implementar estrategias eficaces para restaurar su integridad y prevenir la progresión de la enfermedad⁹.

El proceso de grabado de la dentina en las técnicas restauradoras se realiza con ácidos o monómeros de resina ácidos, exponiendo las fibrillas de colágeno. La formación de enlaces se logra por retención micromecánica, donde la resina penetra en el enredo de fibrillas de colágeno desmineralizadas, creando lo que se conoce como capa híbrida. Es imposible que los monómeros de resina desplacen completamente el agua en los compartimentos extrafibrilares e intrafibrilares de la matriz de colágeno desmineralizada, resultando en regiones de infiltración incompleta, que son susceptibles a la degradación, afectando la integridad y fuerza de unión¹⁰.

Desmineralización en la dentina cariada afectada

La desmineralización en las lesiones cariosas iniciales afecta la fase mineral de la dentina, exponiendo las fibras de colágeno, creando condiciones propicias para la rápida destrucción de la red dentinaria, resultando en la degradación de las fibrillas de colágeno y una disminución de las propiedades mecánicas de la dentina. La remineralización de esta dentina es más compleja y menos efectiva que la del esmalte, ya que en las lesiones dentinarias no hay cristales minerales residuales¹¹. Por lo tanto, en condiciones patológicas, la desmineralización supera a la remineralización.

La dentina cariada se puede dividir en dos capas: Capa Externa: infectada por bacterias, altamente desmineralizada y difícil de remineralizar. Las fibrillas de colágeno se desnaturalizan irreversiblemente y deben eliminarse. Capa Interna (Dentina Afectada por Caries - DAC): reversible, con alteraciones en la estructura secundaria del colágeno, no está infectada y puede ser remineralizada¹². La odontología mínimamente invasiva (MID) enfatiza la preservación de la DAC, buscando maximizar la retención de los tejidos dentales durante la terapia vital de la pulpa a través de la remineralización¹².

Durante la preparación de una cavidad profunda con restauraciones adhesivas, el sustrato suele ser DAC, no es dentina normal, lo que impacta directamente en la fuerza de unión, siendo menor su cualidad mecánica en comparación con la superficial sana¹³. La desmineralización libera metaloproteinasas de matriz (MMP) que destruyen las fibrillas de colágeno expuestas, disminuyendo la durabilidad de la adhesión resina-dentina. Aunque la inhibición de la actividad de las MMP puede evitar la degradación de las fibrillas de colágeno temporalmente, estas aún pueden degradarse por el envejecimiento natural.

Solo las fibrillas de colágeno mineralizadas pueden detener la degradación causada por las MMP y el envejecimiento, restaurando la dureza de la dentina mineralizada natural, eliminando el mecanismo enzimático y manteniendo la estabilidad de la interfaz resina-dentina.

Remineralización

La remineralización es un proceso fundamental que implica la deposición de iones minerales en cristales desmineralizados; este proceso se lleva a cabo mediante la interacción de minerales inorgánicos con la matriz orgánica de la dentina. Se han explorado diversas estrategias para remineralizar la dentina desmineralizada, entre las cuales se encuentran: resinas que liberan flúor, fosfato de calcio amorfo (ACP) y adhesivos a base de resina con vidrio bioactivo¹⁴. Estas técnicas buscan mejorar la resistencia de las restauraciones a la caries secundaria. Sin embargo, la mayoría de los estudios se han enfocado en la remineralización de dentina cariada parcialmente desmineralizada, utilizando la deposición epitaxial de iones de calcio y fosfato sobre cristales de apatita existentes¹⁴.

Un desafío significativo es que la remineralización no ocurre en áreas donde no hay cristales de apatita; la abundante matriz orgánica en la dentina complica la remineralización de las zonas desmineralizadas restantes. Esta mineralización se clasifica en: Mineralización extrafibrilar: ocurre entre las fibrillas de colágeno y Mineralización intrafibrilar: en las zonas de separación, extendiéndose hacia las fibrillas. Zhang Q *et al.*¹⁵ destacan que estabilizar el fosfato de calcio amorfo (ACP) es crucial para inducir la mineralización

intrafibrilar, llevándola al espacio intersticial de 40 nm de longitud de la fibrilla de colágeno.

Si la mineralización solo afecta el exterior de las fibrillas de colágeno sin lograr una mineralización intrafibrilar, no se replica la estructura jerárquica de los minerales naturales de la dentina, con resultados terapéuticos subóptimos a largo plazo; por lo tanto, replicar el proceso natural de mineralización se ha convertido en un objetivo clave en la investigación de la remineralización, reconociendo que la biomineralización es un proceso mediado por sustancias orgánicas¹⁶.

Remineralización biomimética

La remineralización biomimética se refiere a estrategias que imitan los procesos naturales de biomineralización para restaurar la dentina afectada por CD.

Concepto Clásico: la cristalización basada en iones no es aplicable en la superficie de la dentina lesionada por caries, debido a la falta de cristales de apatita disponibles para la nucleación homogénea¹⁴.

Materiales Bioactivos: se han desarrollado diversos materiales que incorporan partículas bioactivas para inducirla: Rellenos liberadores de flúor, Nanopartículas de dióxido de sílice de amonio cuaternario, Vidrio bioactivo, Hidroxiapatita, Fosfatos de calcio amorfos, Nanofosfatos de calcio, Fosfatos mono-, di- y tetracálcicos. Los cementos de ionómero de vidrio (CIV) y cementos de silicato de calcio también son utilizados para la remineralización en cavidades profundas¹⁷.

DMP-1: esta proteína de matriz dentinaria es crucial en la regulación de la remineralización. Tiene una estructura rica en serina y treonina, y puede quelar iones de calcio, estabilizando la ACP (calcio amorfo) en solución¹⁵. Se ha demostrado que análogos biomiméticos como el ácido poliaspártico (PASP) y el ácido poliacrílico (PAA) pueden iniciar el proceso de remineralización al formar nanoprecursores amorfos. Esta proposición de remineralización biomimética representa un avance significativo utilizando materiales y procesos que imitan la naturaleza para restaurar la salud dental¹⁵.

Fosfato de Calcio Amorfo (ACP): es un precursor crucial de la hidroxiapatita (HAP) y desempeña un papel vital en la mineralización biomimética. A continuación, se destacan sus características y funciones: la remineralización de la dentina, la promoción de la mineralización intrafibrilar. Su acción está regulada por varios estabilizadores, principalmente proteínas no colágenas y sus análogos. Según Schweikle M *et al.*¹⁸, el ACP ha ganado atención signifi-

cativa en la investigación dental y ha permitido avanzar en el estudio de la mineralización biomimética de la dentina.

El ACP puede infiltrarse y depositarse dentro de las fibrillas de colágeno, transformándose en HAP intrafibrilar. El ACP es termodinámicamente inestable y tiende a convertirse en cristales de HAP más estables, que no pueden infiltrarse en las fibrillas de colágeno. Durante el desarrollo biológico, el ACP requiere estabilización por proteínas no colágenas (NCP) para facilitar la biomineralización de la dentina. Para la reparación de dentina dañada, se necesitan materiales alternativos que estabilicen el ACP y promuevan la mineralización biomimética¹⁹. La presencia de estabilizadores de ACP es crucial para lograr la mineralización intrafibrilar in vitro, dada la inestabilidad del ACP sin aditivos. Esto resalta la importancia de seguir investigando y desarrollando métodos para estabilizar el ACP en aplicaciones biomédicas¹⁶.

Péptidos Modificados Genéticamente para la Mineralización Intrafibrilar. La biomineralización dental es un proceso clave en la formación y mantenimiento de los tejidos duros dentales. Recientemente, se han explorado nuevas estrategias para desarrollar análogos que faciliten la nucleación y el crecimiento de cristales de hidroxiapatita¹⁹. Un enfoque prometedor implica la utilización de proteínas no colágenas y péptidos enriquecidos en aminoácidos ácidos. Estos compuestos son cruciales para estabilizar la mineralización y prevenir la degradación en las interfaces de tejido blando-duro, como la interfaz dentina/adhesivo²⁰.

El diseño biomimético ha acelerado el desarrollo de materiales para reparaciones de tejidos dentales. Cementos a base de silicato de calcio, como Biodentin, han demostrado una bioactividad mejorada. Este material no solo proporciona calcio, sino que también forma una capa interfacial rica en minerales, acelerando la formación de apatita y ofreciendo remineralización efectiva^{17,18}. La investigación biomimética y su aplicación en la biomineralización dental representan un avance significativo en la odontología, con el potencial de mejorar las estrategias de reparación y remineralización dental.

Discusión

La comprensión de la interacción entre los sistemas adhesivos y la dentina ha marcado un hito en la investigación odontológica contemporánea; sin embargo, en el ámbito clínico, la adhesión a la DAC aún representa un desafío significativo. La dentina sana proporciona un sustrato más estable y muestra mejores resultados en términos de resistencia adhesiva inmediata, tanto en sistemas de autograbado como en los de grabado y lavado^{4,5,10}.

La DAC presenta un menor contenido mineral debido al proceso carioso, lo que provoca la disolución de cristales de apatita y la degradación del colá-

geno por la acción de enzimas bacterianas y del huésped, como las metaloproteinasas de matriz (MMP) y las catepsinas de cisteína. Estas alteraciones estructurales afectan la calidad de la adhesión, comprometiendo la hibridación de la dentina^{6-8,21}. Además, la capa de desechos es más rica en componentes orgánicos y parece más gruesa que la de la dentina sana, lo que reduce la permeabilidad a los monómeros y dificulta la infiltración homogénea del adhesivo en la dentina subyacente, afectando así la calidad de la unión²².

También hay un aumento en la humedad de la dentina intertubular debido a la sustitución del contenido mineral por agua, elevando su proporción de agua entre un 14% y un 53%, en comparación con el 10% presente en la dentina sana. La pérdida de minerales en la matriz intertubular, reduce significativamente la resistencia a la tracción y la dureza Knoop, afectando el módulo elástico medio y su nanodureza. Esta disminución de las propiedades mecánicas favorece la inestabilidad y la hidrólisis de la capa híbrida, debido a la nanofiltración y la degradación^{11,13,21}.

Una revisión sistemática analizó el efecto de las MMP sobre la hibridación de la DAC, evaluando su impacto en la resistencia adhesiva microtensil (μ TBS) y en la integridad a largo plazo de la unión dentina-adhesivo²³. Los hallazgos sugieren que la actividad de estas enzimas compromete la estabilidad y durabilidad de la capa híbrida, lo que resalta la necesidad de desarrollar estrategias para mejorar la adhesión en dentina afectada. Un enfoque prometedor es el uso de agentes químicos que inhiban o retrasen la degradación de la capa híbrida recién formada, optimizando así la unión adhesiva²².

El avance de la nanotecnología ha abierto nuevas oportunidades en la regeneración y reparación del tejido dental. Diversos estudios han demostrado que los nanomateriales (NM) pueden inducir y regular la mineralización biomimética del tejido dentario; gracias a su tamaño a nanoescala y su capacidad de diseño, se han propuesto como elementos clave para la remineralización^{24,25}. También se han estudiado proteínas no colágenas y péptidos enriquecidos en aminoácidos ácidos como agentes estabilizadores de la mineralización, con el objetivo de prevenir la degradación en las interfaces de tejido blando-duro, incluida la interfaz dentina/adhesivo^{14-20,26,27}.

Scaffa *et al.*²⁸ afirman que los monómeros basados en acrilamida pueden preservar la capa híbrida al reforzar la estructura del colágeno, contribuyendo así a la estabilidad de la unión en restauraciones adhesivas. No obstante, Dai *et al.*²⁴ advierten que la adición de nanomateriales a adhesivos y resinas podría alterar sus propiedades mecánicas, como la fuerza de unión y el grado de polimerización, por lo que se requieren estudios adicionales para evaluar estos efectos de manera sistemática. Sin duda estas innovaciones representan avances prometedores, que podrían facilitar la penetración rápida, la liberación controlada e inteligente y la liberación prolongada de los agentes remineralizantes²⁴.

Los modelos *in vitro* utilizados en la mayoría de las investigaciones simulan la dentina “hipomineralizada” afectada por caries, la cual tiene potencial de remineralización. Sin embargo, estos modelos no reproducen completamente la respuesta pulpar ante la lesión cariosa ni los fenómenos de fluidos tisulares dentro de los túbulos dentinarios. El uso de dentina cariada real, con una caracterización precisa del grado de eliminación de caries y de la ubicación de la lesión, permitiría obtener resultados más consistentes y clínicamente relevantes¹⁷.

Sin ninguna duda es esencial mejorar la hibridación de la dentina dañada mediante el uso de agentes que inhiban la degradación de la capa híbrida recién formada. En este sentido, el uso de inhibidores de MMP como pretratamiento en la DAC podría mejorar la estabilidad y durabilidad de la unión adhesiva, reduciendo la frecuencia de fallas adhesivas en restauraciones dentales²³. Para lograrlo, se requiere una mayor colaboración entre clínicos, investigadores e industrias, con el fin de comprender la relación entre el comportamiento bioactivo de los materiales, sus limitaciones biomecánicas y su aplicación en la práctica clínica²⁵.

Entre los inhibidores de metaloproteinasas de matriz (MMP) utilizados en odontología adhesiva, la clorhexidina (CHX) destaca como la más estudiada. Además de su capacidad para inhibir las MMP, la CHX bloquea la acción de las catepsinas de cisteína (CC), lo que ayuda a preservar parcialmente la integridad de la capa híbrida y favorece la durabilidad de la unión adhesiva. Kiuru, *et al.*²⁶, en un metaanálisis señalan que es un material antibacteriano de bisguanida catiónica de uso común en odontología; puede prevenir el crecimiento bacteriano y la formación de biopelículas, inducir la muerte celular bacteriana e inhibir las MMP; concluyen que, la resistencia de los enlaces en el grupo CHX fue significativamente mayor que en el grupo de control después del envejecimiento ($P < 0,001$), recomendando su uso para aumentar la longevidad de la fuerza de unión entre la resina y la dentina.

Sin embargo, algunos estudios sugieren que la efectividad de la CHX en la dentina afectada podría verse reducida debido a la disolución del mineral extrafibrilar durante el grabado ácido, que genera una distribución no homogénea del mineral intrafibrilar, lo que disminuye la eficacia de la CHX³⁰⁻³². De la misma manera, un estudio concluyó que el pretratamiento con CHX al 2% durante 30-60 segundos no mejoró significativamente la resistencia adhesiva en comparación con los controles, ni de forma inmediata ni tras el envejecimiento a largo plazo³³. Pero, por otro lado, Breschi *et al.*³⁴ demostraron que, *in vitro*, la CHX permanece en la capa híbrida incluso después de 10 años, conservando su efecto inhibidor sobre las MMP. Esto respalda su uso para mejorar la estabilidad de la interfaz resina-dentina. Así mismo, varios estudios recomiendan el uso de CHX como inhibidor de MMP, consi-

derándola la opción más confiable para mejorar la adhesión en la dentina afectada^{22,23,35,36}.

En la técnica de grabado total, se sugiere aplicar CHX en concentraciones entre 0,2% y 2% después del lavado del grabado ácido. A continuación, se debe aplicar aire para eliminar el exceso de solución, evitando el enjuague antes de continuar con la aplicación del adhesivo según las indicaciones del fabricante. En el caso de los adhesivos autograbadores, se recomienda limitar el grabado únicamente al esmalte³⁷.

Recientemente un estudio evaluó la resistencia de adhesión a la microten- sión de un agente adhesivo dentinario con clorhexidina en comparación con un adhesivo estándar. El adhesivo con clorhexidina mostró un éxito clínico prometedor y mejoró la resistencia de adhesión *in vitro*. Señalan los autores que se requieren seguimientos más prolongados clínicos para confirmar su durabilidad a largo plazo³⁸.

Es conveniente destacar que, los materiales adhesivos se han vuelto más resistentes y menos sensibles para el operador, y una buena técnica puede estar en manos de cualquier profesional³⁹. pero también es cierto que, durante la aplicación de un material restaurador, los clínicos se enfrentan a numero- sos desafíos o situaciones que requieren enfoques específicos adicionales, como la contaminación previa al material restaurador o factores relaciona- dos con las propiedades de ese material, que pueden afectar la interacción entre el diente y el material, lo que afecta la supervivencia a largo plazo. Asi- mismo, las diferencias entre los métodos de prueba y análisis pueden afectar los resultados de la resistencia de adhesión⁴⁰.

Por lo anterior, se requiere una investigación más exhaustiva de la de- gradación a largo plazo, especialmente en condiciones *in vivo*, dado que las investigaciones *in vitro* no pueden replicar todas las condiciones específicas a las que se somete una restauración en la cavidad oral.

Conclusiones

- Una mejor comprensión de los mecanismos y vulnerabilidad de la CAD permitirá avanzar en estrategias para mejorar la calidad y longe- vidad de la adhesión de las restauraciones dentales, beneficiando a los pacientes. Los profesionales de la odontología deben familiarizarse con las causas subyacentes de las fallas y aplicar estrategias disponi- bles para preservarlas.
- La CAD tiene un menor contenido mineral y una mayor degradación del colágeno, lo que afecta negativamente la adhesión y la hibridación de la dentina. Además, un aumento en la humedad intertubular, lo que disminuye las propiedades mecánicas y favorece la hidrólisis de la capa híbrida.

- La actividad de las MMP compromete la estabilidad de la unión dentina-adhesivo, lo que resalta la necesidad de estrategias para mejorar la adhesión.
 - Los avances en Nanotecnología ofrecen oportunidades para mejorar la hibridación del colágeno dentinario, proteger las fibrillas de colágeno de la degradación enzimática e inhibir la actividad enzimática endógena, aunque se requieren más investigaciones para evaluar su impacto en la clínica.
 - La clorhexidina es una opción con efecto inhibidor sobre las MMP; estudios han demostrado que puede permanecer en la capa híbrida durante largos períodos, por lo cual se recomienda su aplicación en concentraciones adecuadas tras el grabado ácido, aunque es crucial considerar sus limitaciones y aplicarla de manera adecuada para maximizar sus beneficios.
- › **Aprobación de ética:** no requirió.
- › **Financiamiento:** ninguno.

Bibliografía

1. Pitts NB, Zero DT, Marsh PD, Ekstrand K, Weintraub JA, Ramos-Gomez F, Tagami J, Twetman S, Tsakos G, Ismail A. Dental caries. Nat Rev Dis Primers. 2017 May 25; 3: 17030.
2. Featherstone JD. Dental caries: a dynamic disease process. Aust Dent J. 2008 Sep; 53(3): 286-91.
3. Pashley DH, Tay FR, Yiu C, Hashimoto M, Breschi L, Carvalho RM, Ito, S. Collagen degradation by host-derived enzymes during aging J Dent Res 2004; 83(3): 216-21
4. Ferracane JL, Hilton TJ. Polymerization stress--is it clinically meaningful? Dent Mater. 2016 Jan; 32(1): 1-10.
5. Isolan CP, Sarkis-Onofre R, Lima GS, Moraes RR. Bonding to Sound and Caries-Affected Dentin: A Systematic Review and Meta-Analysis. J Adhes Dent. 2018; 20(1): 7-18.
6. Meraji N, Nekoofar MH, Yazdi KA, Sharifian MR, Fakhari N, Camilleri J. Bonding to caries affected dentine. Dent Mater. 2018 Sep; 34(9): e236-e245
7. Liu Y, Mai S, Li N, Yiu CK, Mao J, Pashley DH, Tay FR. Differences between top-down and bottom-up approaches in mineralizing thick, partially demineralized collagen scaffolds. Acta Biomater. 2011 Apr; 7(4): 1742-51.
8. Mazzoni A, Tjäderhane L, Checchi V, Di Lenarda R, Salo T, Tay FR, Pashley DH, Breschi L. Role of dentin MMPs in caries progression and bond stability. J Dent Res. 2015 Feb; 94(2): 241-51.
9. Madhubala MM, Nayantara GS, Jayasree R, Locs J, Mahalaxmi S. Biogenic amorphous calcium phosphate: a sustainable alternative for dentin remineralization. BMC Oral Health. 2025 Jul 11; 25(1): 1149.
10. Carvalho RM, Manso AP, Geraldini S, Tay FR, Pashley DH. Durability of bonds and clinical success of adhesive restorations. Dental Materials. 2012; 28: 72-86.
11. Cao CY, Mei ML, Li QL, Lo EC, Chu CH. Methods for biomimetic remineralization of human dentine: a systematic review. Int J Mol Sci. 2015 Mar 2; 16(3): 4615-27.
12. Calatrava O Luis Alonso En el ámbito de la invasión mínima. Dentina afectada e infectada Acta Odont Venez 2013. 51(4):
13. Kumari RV, Siddaraju K, Nagraj H, Poluri RK. Evaluation of shear bond strength of newer bonding systems on superficial and deep dentin. J. Int. Oral. Health. 2015; 7: 31-35.

14. Niu LN, Zhang W, Pashley DH, Breschi L, Mao J, Chen JH, Tay FR. Biomimetic remineralization of dentin. *Dent Mater.* 2014 Jan; 30(1): 77-96.
15. Zhang Q, Guo J, Huang Z, Mai S. Promotion Effect of Carboxymethyl Chitosan on Dental Caries via Intrafibrillar Mineralization of Collagen and Dentin Remineralization. *Materials (Basel).* 2022 Jul 12; 15(14): 4835.
16. Yang Q, Zheng W, Zhao Y, Shi Y, Wang Y, Sun H, Xu X. Advancing dentin remineralization: Exploring amorphous calcium phosphate and its stabilizers in biomimetic approaches. *Dent Mater.* 2024 Aug; 40(8): 1282-1295.
17. Kuru E, Eronat N, Türkün M, Çoğulu D. Comparison of remineralization ability of tricalcium silicate and of glass ionomer cement on residual dentin: an in vitro study. *BMC Oral Health.* 2024 Jun 26; 24(1): 732.
18. Schweikle M, Bjørnøy SH, van Helvoort ATJ, Haugen HJ, Sikorski P, Tiainen H. Stabilisation of amorphous calcium phosphate in polyethylene glycol hydrogels. *Acta Biomater.* 2019 May; 90: 132-145.
19. Ye Q, Spencer P, Yuca E, Tamerler C. Engineered Peptide Repairs Defective Adhesive–Dentin Interface. *Macromol. Mater. Eng.* 2017; 302: 1600487.
20. Cloyd AK, Boone K, Ye Q, Snead ML, Spencer P, Tamerler C. Engineered Peptides Enable Biomimetic Route for Collagen Intrafibrillar Mineralization. *Int J Mol Sci.* 2023 Mar 28; 24(7): 6355.
21. Lewis NV, Aggarwal S, Dhatavkar P. Comparative evaluation of the degree of conversion of an 8th-generation bonding agent when applied to normal dentin or caries-affected dentin, pre- treated with MMP inhibitors - An in vitro study. *J Oral Biol Craniofac Res.* 2024 Nov-Dec; 14(6): 808-814.
22. Pinna R, Maioli M, Eramo S, Mura I, Milia E. Carious affected dentine: its behaviour in adhesive bonding. *Aust Dent J.* 2015 Sep; 60(3): 276-93.
23. Lewis NV, Aggarwal S, Borse NN, Sonawane S, Dhatavkar P, Digholkar R, Agarwal D. The Effect of Matrix Metalloproteinase Inhibitors on the Microtensile Bond Strength of Dentin Bonding Agents in Caries Affected Dentin: A Systematic Review. *J Int Soc Prev Community Dent.* 2023 Jun 29; 13(3): 173-184.
24. Dai D, Li D, Zhang C. Unraveling Nanomaterials in Biomimetic Mineralization of Dental Hard Tissue: Focusing on Advantages, Mechanisms, and Prospects. *Adv Sci (Weinh).* 2024 Oct; 11(40): e2405763.
25. Attik N, Richert R, Garoushi S. Biomechanics, Bioactive and Biomimetic philosophy in restorative dentistry— Quo vadis? *J Dent.* 2024 Sep; 148: 105036.
26. Kiuru O, Sinervo J, Vähäniikkilä H, Anttonen V, Tjäderhane L. MMP Inhibitors and Dentin Bonding: Systematic Review and Meta-Analysis. *Int J Dent.* 2021 May 27; 2021: 9949699.
27. Sarikaya R, Song L, Yuca E, Xie SX, Boone K, Misra A, Spencer P, Tamerler C. Bioinspired multifunctional adhesive system for next generation bio-additively designed dental restorations. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2021 Jan; 113: 104135.
28. Fu Y, Ekambaram M, Li KC, Zhang Y, Cooper PR, Mei ML. In Vitro Models Used in Cariology Mineralisation Research-A Review of the Literature. *Dent J (Basel).* 2024 Oct 8; 12(10): 323.
29. Scaffa P, Logan MG, Icimoto MY, Fugolin A, Tsuzuki FM, Lewis SH, Pfeifer CS. Mechanistic study of the stabilization of dentin-bonded restorative interfaces via collagen reinforcement by multi-acrylamides. *Dent Mater.* 2024 Aug; 40(8): 1128-1137.
30. Mobarak EH. Effect of chlorhexidine pretreatment on bond strength durability of caries-affected dentin over 2-year aging in artificial saliva and under simulated intrapulpal pressure. *Oper Dent.* 2011 Nov-Dec; 36(6): 649-60.
31. Garcia, A; Lopez Jordi, M; Fabruccini, AY Liberman, J. Efecto del pretratamiento con clorhexidina en la resistencia de unión a dentina desmineralizada. *Odontoestomatología.* 2023; 25(42).
32. Almutairi B. Aloe-Emodin activated by Photodynamic therapy and diode laser on carious affected dentin and survival of *S. mutans*. An-invitro SEM assessment. *Photodiagnosis Photodyn Ther.* 2025 Jun; 53: 104611.

33. Jamal H, Yaghmoor R, Abed H, Young A, Ashley P. Impact of Dentine Pretreatment with Matrix Metalloproteinase Inhibitors on Bond Strength of Coronal Composite Restorations: A Systematic Review and Meta-analysis of In Vitro Studies. *Eur J Dent.* 2023 Oct; 17(4): 974-999.
34. Breschi L, Maravic T, Comba A, Cunha SR, Loguercio AD, Reis A, Hass V, Cadenaro M, Mancuso E, Mayer-Santos E, Niu L, Pashley DH, Tay FR, Mazzoni A. Chlorhexidine preserves the hybrid layer in vitro after 10-years aging. *Dent Mater.* 2020 May; 36(5): 672-680.
35. Matos AB, Trevelin LT, Silva BTFD, Francisconi-Dos-Rios LF, Siriani LK, Cardoso MV. Bonding efficiency and durability: current possibilities. *Braz Oral Res.* 2017 Aug 28; 31(suppl 1): e57.
36. Zheng P, Zaruba M, Attin T, Wiegand A. Effect of different matrix metalloproteinase inhibitors on microtensile bond strength of an etch-and-rinse and a self-etching adhesive to dentin. *Oper Dent.* 2015 Jan-Feb; 40(1): 80-6.
37. Atalay C, Ozgunaltay G, Yazici AR. Thirty-six-month clinical evaluation of different adhesive strategies of a universal adhesive. *Clin Oral Investig.* 2020 Apr; 24(4): 1569-1578.
38. Altıntop H, Kuru HE, Ertuğrul F, Türkün M, Küçükylmaz E. A prospective randomized clinical trial and an in vitro evaluation of the microtensile bond strength of a chlorhexidine-containing dentin bonding agent and a bulk fill composite material in primary teeth. *BMC Oral Health.* 2025 Apr 13; 25(1): 566.
39. Breschi L, Maravic T, Mazzitelli C, Josic U, Mancuso E, Cadenaro M, Pfeifer CS, Mazzoni A. The evolution of adhesive dentistry: From etch-and-rinse to universal bonding systems. *Dent Mater.* 2025 Feb; 41(2): 141-158.
40. Batu Eken Z, Ilie N. A Critical Review on the Factors Affecting the Bond Strength of Direct Restorative Material Alternatives to Amalgam. *Materials (Basel).* 2024 Oct 1; 17(19): 4853.