

REPÚBLICA DOMINICANA
UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
ESCUELA DE ODONTOLOGÍA



**"IDENTIFICACIÓN Y APLICACIÓN DE LOS ADHESIVOS DENTALES QUE SE
UTILIZAN EN LA ODONTOLOGÍA RESTAURADORA ACTUAL"**

TRABAJO FINAL PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE DOCTOR EN
ODONTOLOGÍA

Sustentantes

Alana Feliciano 21-0271

Mohamad Otoman 21-0463

Docente Especializado

Dra. Perla Medina

Los conceptos expuestos en la presente investigación son de la exclusiva

responsabilidad de los autores.

Docente Titular

Dra. Helen Josefina Rivera Estaba

Santo Domingo, DN.

22 de Julio 2025

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo identificar y analizar la aplicación de los adhesivos dentales utilizados en la odontología restauradora actual, mediante una revisión bibliográfica de artículos científicos de los últimos 5 años en bases como PubMed, Redalyc, Cochrane y BMC. Para la búsqueda científica, se seleccionaron publicaciones mediante criterios de inclusión referidos a estudios sobre sistemas adhesivos de última generación, artículos que evalúen la efectividad clínica de adhesivos de grabado total, autograbado y universales, e investigaciones sobre propiedades mecánicas de la interfaz adhesiva. Los resultados indican que los adhesivos universales han revolucionado la odontología restauradora por su versatilidad, mostrando excelente adhesión al esmalte, dentina y diversos materiales restauradores. Los estudios demuestran que los adhesivos de séptima y octava generación ofrecen mayor resistencia a la degradación hidrolítica, mejor sellado marginal y reducción de la sensibilidad postoperatoria. Además, se estableció que la correcta identificación del sustrato dental y la selección apropiada del sistema adhesivo son factores determinantes en el éxito clínico a largo plazo. Por tanto, es necesario que los profesionales dominen las características específicas de cada sistema adhesivo para optimizar los protocolos y garantizar la longevidad de las restauraciones, logrando un sellado hermético y duradero.

Palabras clave: adhesión dentaria, sistemas adhesivos, técnicas adhesivas, y odontología restauradora.

Abstract

This study aimed to identify and analyze the application of dental adhesives in current restorative dentistry through a bibliographic review of scientific articles from the last 5 years in databases such as PubMed, Redalyc, Cochrane, and BMC. For the scientific search, publications were selected using inclusion criteria referring to studies on state-of-the-art adhesive systems, articles evaluating the clinical effectiveness of total-etch, self-etch, and universal adhesives, and research on the mechanical properties of the adhesive interface. The results indicate that universal adhesives have revolutionized restorative dentistry due to their versatility, demonstrating excellent adhesion to enamel, dentin, and various restorative materials. Studies demonstrate that seventh- and eighth-generation adhesives offer greater resistance to hydrolytic degradation, improved marginal sealing, and reduced postoperative sensitivity. Furthermore, it was established that correct identification of the dental substrate and appropriate selection of the adhesive system are determining factors in long-term clinical success. Therefore, it is essential for professionals to master the specific characteristics of each adhesive system to optimize protocols and ensure the longevity of restorations, achieving a hermetic and durable seal.

Keywords: dental adhesion, adhesive systems, adhesive techniques and restorative dentistry.

Agradecimientos

En primer lugar, queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a Allah, fuente infinita de sabiduría, paciencia y guía. Cada paso en este camino ha sido posible solo por Su voluntad y misericordia. En momentos de duda y dificultad, Su luz ha sido nuestro faro. Como dice el Sagrado Corán:

“Dios elevará en grados a quienes de vosotros hayan creído y a quienes hayan recibido el conocimiento.” (*Surah Al-Mujadila, 58:11*)

Este versículo ha sido una inspiración constante para seguir adelante, con la certeza de que el conocimiento es un camino hacia el crecimiento y el éxito en esta vida y en la otra.

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestra asesora de tesis, la Dra. Perla Medina, por su paciencia, orientación y constante apoyo durante todo este proceso. Su compromiso con la excelencia académica y humana ha sido una guía invaluable. De igual forma, agradecemos profundamente a la Dra. Helen Rivera, quien con su experiencia, exigencia y respaldo fortaleció cada parte de este trabajo, aportando claridad y profundidad al proyecto.

A nuestras familias, gracias por su amor incondicional, su comprensión y su fe en nosotros. Su apoyo emocional, espiritual y material fue esencial en cada etapa de esta travesía. Nada de esto habría sido posible sin su presencia constante, sus palabras de aliento y su compañía en los momentos más retadores. Este logro también les pertenece.

A nuestros compañeros de camino, gracias por el compañerismo, por cada conversación, por compartir conocimientos, por los momentos de risa y también por los de reto. Haber recorrido este trayecto junto a ustedes no solo nos formó profesionalmente, sino que también nos enriqueció personalmente. Nos llevamos cada uno de esos momentos con cariño y gratitud.

De manera muy especial, agradezco a mis amigas, quienes llegaron a mi vida en este nuevo país y se convirtieron en un pilar fundamental durante este proceso. A pesar de estar lejos de mi tierra, su amistad, su apoyo incondicional y su compañía me hicieron sentir en casa. Gracias por estar en los momentos más difíciles, por brindarme fuerza, sonrisas y recordarme que no estoy sola. Las llevo conmigo con mucho amor.

Alana Feliciano y Mohamad Otoman

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a Allah, por ser nuestra guía y fortaleza en cada paso de este camino.

Lo dedicamos también, con todo nuestro amor y gratitud, a nuestras madres, cuyo apoyo incondicional y ejemplo de vida han sido esenciales para llegar hasta aquí.

Índice

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Agradecimientos.....	4

Dedicatoria.....	6
1. Introducción.....	9
2. Planteamiento del Problema	12
2.1 Interrogantes de investigación.....	14
3. Objetivos.....	15
3.1 General.....	15
3.2 Específicos.....	15
4. Marco teórico.....	16
4.1 Antecedentes Históricos.....	16
4.2 Principios biológicos y estructurales de los tejidos dentales.....	20
4.2.1 Estructura y Composición del Esmalte Dental.....	20
4.2.2 Estructura y Composición de la Dentina.....	22
4.3 Conceptos básicos de adhesión.....	24
4.3.1 Energía superficial y humectabilidad.....	25
4.3.2 Mecanismos de adhesión.....	25
4.3.3 Química de los principales monómeros adhesivos.....	26
4.4 Clasificación de los adhesivos.....	28
4.4.1 Clasificación según su generación y número de pasos.....	29

4.4.1.2	Sistemas adhesivos de tres pasos.....	29
4.4.1.2.1	Tercera generación.....	29
4.4.1.2.2	Cuarta generación.....	31
4.4.1.3	Sistemas adhesivos de dos pasos.....	34
4.4.1.3.1	Primera generación.....	34
4.4.1.3.2	Segunda generación.....	36
4.4.1.3.3	Quinta generación.....	37
4.4.1.3.4	Sexta generación tipo A.....	39
4.4.1.4	Sistemas adhesivos de un paso.....	41
4.4.1.4.1	Sexta generación tipo B.....	41
4.4.1.4.2	Séptima generación.....	43
4.4.1.4.3	Octava generación.....	45

4.5 Innovaciones en la composición química de los sistemas adhesivos.....47

4.6 Avances en sistemas de activación y polimerización.....	48	
4.7 Técnicas de aplicación innovadoras.....	49	
4.8 Desafíos contemporáneos y soluciones emergentes.....	50	
4.9 Perspectivas futuras en la adhesión dental.....	51	
5. Marco metodológico	53	
5.1 Tipo de estudio.....	53	
5.2 Estrategias de búsqueda de información.....	53	
		6. Discusión
		55
7. Conclusiones.....	59	
8.Recomendaciones.....	60	
9. Prospectiva.....	61	
10. Referencias bibliográficas.....	62	

1. Introducción

La odontología ha experimentado una transformación significativa en las últimas décadas, destacando la técnica adhesiva como pilar fundamental de la práctica restauradora contemporánea. Esta técnica representa actualmente uno de los procedimientos más frecuentes en el quehacer diario del profesional odontológico. Los adhesivos dentales han revolucionado la odontología restauradora al proporcionar una unión eficaz entre dentina y esmalte. Su función crítica permite la integración perfecta de los materiales restauradores con los tejidos dentales naturales, lo que asegura tanto la perdurabilidad como la funcionalidad óptima de las restauraciones.

En la práctica clínica actual, resulta imperativo que el odontólogo identifique correctamente y aplique con precisión los adhesivos dentales. Esta competencia es determinante para el éxito de los tratamientos, ya que una selección errónea o un manejo inapropiado de estos materiales puede comprometer seriamente la integridad estructural del diente tratado y, por consiguiente, el bienestar general del paciente.¹

En 1995 se propuso la idea de modificar químicamente la superficie del esmalte para mejorar sus características y su capacidad de adhesión a los materiales restauradores dentales. Desde entonces, la odontología adhesiva ha experimentado avances significativos y rápidos. Esto se debe, principalmente, a la necesidad de una adhesión eficaz para resistir las fuerzas opuestas generadas durante la polimerización de la resina compuesta, así como para garantizar la integridad y retención de los márgenes, lo que contribuye al éxito y durabilidad de las restauraciones dentales. A partir de dichos descubrimientos han aparecido una gran gama de sistemas adhesivos, dentro de los cuales se pueden destacar dos grupos: los sistemas de adhesivo de grabado y lavado, y los sistemas de adhesivos autograbantes. En la primera categoría, es necesario lavar el sustrato dental previamente, esto permite que las fibras de colágeno participen con los monómeros en la resina y se forme la capa compuesta con el adhesivo. Dicha técnica ha sido utilizada con el pasar de los años, gracias a que garantiza excelentes resultados, que pueden comprobarse clínicamente en el esmalte, no obstante, en la dentina estos resultados son más variables.²

En la actualidad, la adhesión se enfoca en garantizar una unión a largo plazo, facilitando la técnica, siendo así como nace el segundo grupo de sistemas adhesivos, los de autograbado, cuyo concepto fue propuesto con el fin de erradicar la sensibilidad alta en la técnica de grabado ácido. Su principal característica es que gracias a que se componen por monómeros ácidos tienen el poder de infiltrar y grabar al mismo tiempo el sustrato en el diente, sin que se realice una etapa de lavado, llevando a la

eliminación de este paso y a que estos materiales adhesivos se consideren simplificados y en ocasiones superiores a los sistemas de adhesivo de grabado y lavado. Este continuo avance no es solo debido a cómo están compuestos y cómo actúan en los dientes, sino más bien al número de pasos clínicos que se requieren para su aplicación, con la finalidad de obtener menos sensibilidad en la técnica y un equilibrio en dentina y esmalte, logrando mayor versatilidad. Esto es lo que dio lugar a los sistemas adhesivos multimodales o universales, los cuales representan la nueva generación de adhesivos en el ámbito comercial. Los mismos basan su proceso adhesivo en unir utilizando el menor número de pasos a diversos sustratos dentarios y no dentarios, lo que amplía la gama de adhesivos en el mercado. Esta versatilidad en su uso le brinda al profesional odontológico la posibilidad de escoger la estrategia adhesiva que utilizará, que no solo están restringidos a esmalte y dentina, lo que los vuelve adhesivos nobles debido a su aplicación en múltiples procesos. Debido a que la mayoría de la evidencia disponible sobre cómo se comportan clínicamente los adhesivos solo es concluyente para el esmalte, pero insuficiente para la dentina, esto representa un desafío permanente en el avance de la odontología adhesiva y la gran disponibilidad de materiales.³

2. Planteamiento del problema

Existe una demanda creciente y constante en los tratamientos estéticos restauradores por parte de los pacientes, lo que lleva a una búsqueda constante de mejores y nuevos materiales.⁴ El nacimiento y desarrollo de los sistemas adhesivos revolucionó la práctica de la odontología, lo que no sólo modificó cómo se realiza la preparación cavitaria, sino que dio lugar a mayor preservación a la estructura dentaria sana, lo que constituye el mayor logro atribuible al uso de estos materiales.⁵ En la práctica de la odontología restauradora moderna, el uso de los sistemas adhesivos resulta fundamental para asegurar la unión entre las estructuras dentales y el material

que se utilice para la restauración, no obstante, la gran variedad de adhesivos que están disponibles con diferentes técnicas de aplicación y formulaciones representa un desafío.⁶

El objetivo principal de los sistemas de adhesivos dentales consiste en brindar soporte a los cementos o empastes de composite, además de apoyar contra las fuerzas mecánicas, y particularmente contra la tensión en la contracción del composite de revestimiento. Un buen sistema de adhesivo, de igual forma debe tener la capacidad de evitar fugas en los márgenes de la restauración. A nivel clínico, cuando se evalúa el fracaso de una restauración, surge debido a un sellado inadecuado, seguido por la decoloración de los márgenes de la cavidad, más que por la pérdida de retención.⁷ Debido a lo diversas que son, morfológica y funcionalmente las características del esmalte y la dentina, los sistemas adhesivos han evolucionado bastante, cambiando a presentar carácter hidrofílico, lo que es primordial para atravesar en las porosidades del substrato dentinario que presenta altos niveles de humedad.⁸

Independientemente de los avances, aún sigue presente el inconveniente sobre cuál es el sistema adhesivo más adecuado para cada tipo de restauración, más específicamente cuando a dentina se refiere, ya que esta es más compleja que el esmalte.⁹ Esto se debe a que los adhesivos han mostrado un buen desempeño en esmalte, pero cuando a dentina se trata, su durabilidad a largo plazo es reducida, además de que presenta variabilidad en sus resultados. A pesar de los adelantos tecnológicos y médicos, la escasa información actualizada sobre cómo se comportan los diferentes sistemas de adhesivos dentales en distintas capas dentarias, así como de técnicas de aplicación que sean efectivas, resulta un desafío para los profesionales odontológicos a la hora de la toma de decisiones clínicas, por lo tanto, la optimización de los tratamientos en la odontología restauradora. Igualmente, el surgimiento de

nuevos sistemas de adhesivos presenta la necesidad de evaluar sus características frente a los sistemas tradicionales, para así determinar cuáles ofrecen ventajas en cuanto a estabilidad, durabilidad y adherencia se refiere.¹⁰

Este estudio proporcionará gran conocimiento e información sobre los diferentes tipos de adhesivos dentales y su aplicación efectiva en la odontología restauradora, los hallazgos permitirán comprender mejor cómo estos materiales mejoran la adhesión de las restauraciones dentales, asegurando una mayor durabilidad y rendimiento de los tratamientos, lo que es fundamental en la práctica odontológica moderna. Además, al identificar los adhesivos más efectivos en diversas situaciones clínicas, se facilita la estandarización de procedimientos, lo que mejora la consistencia de los tratamientos y optimiza la práctica clínica al reducir el riesgo de fallos y la necesidad de reparaciones adicionales. Estos resultados brindarán a los profesionales de la odontología, especialistas y estudiantes en formación datos sobre los adhesivos y cómo éstos mejoran la durabilidad y estética de las restauraciones dentales, reduciendo la necesidad de reparaciones y costos para los pacientes. También permiten tratamientos menos invasivos, preservando la estructura dental y minimizando complicaciones. Además, ofrecen a los odontólogos información actualizada para personalizar los tratamientos y educar a los pacientes sobre las mejores opciones disponibles.

2.1. Interrogantes de investigación

1. ¿Cuáles son los tipos más comunes de adhesivos dentales utilizados en la odontología moderna incluyendo sus características principales y su efecto en el desempeño clínico?
2. ¿Cómo influyen las técnicas de aplicación en la efectividad de los sistemas adhesivos aplicados en esmalte frente a los aplicados en dentina en cuanto a su capacidad de adhesión?

3. ¿Qué ventajas y desventajas ofrecen los sistemas adhesivos de última generación considerando sus semejanzas y diferencias con los tradicionales?

3. Objetivos

3.1 General

Identificar los adhesivos dentales que se utilizan en la odontología restauradora actual.

3.2 Específicos

1. Evaluar los diferentes tipos de adhesivos dentales disponibles en la práctica odontológica moderna, incluyendo sus características y composiciones.
2. Analizar las diferentes técnicas para la aplicación de los sistemas adhesivos dentales en esmalte y dentina, comparando su efectividad en distintos sustratos.
3. Comparar los sistemas adhesivos tradicionales con los de última generación, tomando en cuenta su desempeño y ventajas en la odontología restauradora.

4.0 Marco teórico

4.1 Antecedentes Históricos

El desarrollo histórico de los adhesivos dentales comenzó en la década de 1940, cuando los investigadores empezaron a buscar alternativas para mejorar la retención de los materiales restauradores a la estructura dental. Este período inicial estuvo marcado por múltiples intentos fallidos y limitaciones técnicas, ya que no se comprendía completamente la naturaleza de la adhesión a los tejidos dentales, especialmente a la dentina, que por su composición orgánica e inorgánica y su humedad inherente presentaba desafíos particulares. El punto de inflexión llegó en 1949, cuando Oscar Hagger, un químico suizo trabajando para la compañía Amalgamated Dental Company, desarrolló el primer adhesivo dental basado en dimetacrilato de glicerofosfato, que se utilizaba en conjunto con resinas acrílicas. Este descubrimiento, aunque limitado en su efectividad clínica, sentó las bases conceptuales para el desarrollo posterior de sistemas adhesivos más sofisticados y

marcó el inicio de una nueva era en la odontología restauradora, alejándose gradualmente de los principios puramente mecánicos de retención hacia conceptos de adhesión química y micromecánica.¹¹

La verdadera revolución en la odontología adhesiva ocurrió en 1955, cuando Michael Buonocore, inspirado por los procesos industriales para mejorar la adhesión de pinturas a superficies metálicas, introdujo la técnica de grabado ácido del esmalte utilizando ácido fosfórico al 85% durante 30 segundos. Este procedimiento transformaba la superficie lisa del esmalte en una superficie microporosa e irregular que permitía la penetración de resinas de baja viscosidad, creando así micro proyecciones de resina que se entrelazaban con la estructura dental. El trabajo pionero de Buonocore demostró un aumento significativo en la fuerza de adhesión y estableció el paradigma fundamental de la preparación de superficies dentales para la adhesión que sigue siendo relevante hasta la actualidad. Esta técnica representó un cambio paradigmático en la odontología restauradora, permitiendo procedimientos más conservadores, al reducir la necesidad de preparaciones cavitarias extensas basadas únicamente en principios mecánicos de retención, y abriendo el camino para el desarrollo de la odontología mínimamente invasiva que caracteriza la práctica contemporánea.¹²

Las décadas de 1960 y 1970 vieron surgir los primeros sistemas adhesivos comerciales, considerados como la primera y segunda generación de adhesivos dentales. Los adhesivos de primera generación, basados principalmente en cianoacrilatos, poliuretanos y dimetacrilatos con grupos quelantes o reactivos con calcio, mostraban fuerzas de adhesión muy bajas a dentina (2-3 MPa) y alta solubilidad en el entorno oral, lo que resultaba en un rendimiento clínico deficiente y alta tasa de fracasos. La segunda generación, introducida en los años 70, incorporó ésteres de fosfato derivados de Bis-GMA y HEMA que pretendían unirse

químicamente a la hidroxiapatita de la dentina. Estos sistemas interactuaban con el calcio de la capa de barrillo dentinario, pero no penetraban más allá de esta capa superficial de detritus, resultando en fuerzas de adhesión marginalmente mejoradas (4-6 MPa) pero todavía insuficientes para resistir la contracción de polimerización de las resinas compuestas y prevenir la microfiltración. Ambas generaciones se caracterizaron por resultados clínicos impredecibles y limitaciones significativas que impedían su adopción generalizada en procedimientos restauradores cotidianos.¹³

Un avance fundamental ocurrió en la década de 1980 con la introducción de la tercera generación de adhesivos, que por primera vez abordó específicamente el tratamiento de la capa de barrillo mediante el uso de ácidos débiles o agentes quelantes para modificarlo parcialmente, permitiendo así una mayor penetración de los monómeros adhesivos. Esta generación incorporó el concepto de imprimador, una solución de monómeros hidrofílicos en solventes orgánicos como acetona o etanol, que facilitaba la penetración en la dentina parcialmente desmineralizada y mejoraba la humectabilidad de la superficie. Paralelamente, Nakabayashi describió por primera vez en 1982 el fenómeno de la "capa híbrida" o "zona de interdifusión resina-dentina", una estructura microscópica resultante de la infiltración y polimerización de monómeros en la red de colágeno expuesta tras la desmineralización parcial de la dentina. Este descubrimiento revolucionó el entendimiento de los mecanismos de adhesión a la dentina y orientó el desarrollo subsiguiente de sistemas adhesivos hacia la optimización de este proceso de hibridación, que sigue siendo el principio fundamental de la adhesión dental moderna.¹⁴

La cuarta generación de adhesivos, introducida a principios de los años 90, representó la consolidación del concepto de "grabado total", donde tanto el esmalte como la dentina eran tratados simultáneamente con ácido fosfórico, eliminando completamente el smear layer y desmineralizando la dentina superficial para exponer

la red de colágeno. Estos sistemas de tres pasos (grabado, imprimador y adhesivo) lograron por primera vez fuerzas de adhesión clínicamente aceptables a dentina (1725 MPa) y establecieron un estándar de referencia en términos de efectividad adhesiva que aún se mantiene. Sin embargo, su complejidad técnica, sensibilidad a las variaciones en el protocolo clínico y el tiempo requerido para su aplicación impulsaron el desarrollo de sistemas simplificados. La quinta generación, surgida a mediados de los 90, mantuvo el paso de grabado ácido separado, pero combinó el primer y el adhesivo en un solo frasco, reduciendo el procedimiento a dos pasos.

Estos adhesivos "monocomponentes" lograron popularidad por su facilidad de uso, manteniendo niveles de adhesión comparables a los sistemas de tres pasos cuando se utilizaban en condiciones ideales, aunque mostraron mayor sensibilidad a variables como el grado de humedad dentinaria.¹⁵

La búsqueda de mayor simplicidad clínica llevó al desarrollo de la sexta y séptima generación de adhesivos a principios del siglo XXI, caracterizados por su enfoque autograbante, que eliminaba el paso separado de grabado y lavado. Los adhesivos de sexta generación utilizaban primers acidificados que desmineralizaban e infiltraban simultáneamente la dentina, seguidos por la aplicación del adhesivo. La séptima generación simplificó todo, combinando todos los componentes (ácidos, imprimadores y adhesivos) en una única solución "todo en uno". Si bien estos sistemas redujeron significativamente la sensibilidad técnica asociada con el control de la humedad dentinaria y simplificaron los procedimientos clínicos, generalmente mostraban menor efectividad en la adhesión al esmalte no instrumentado y mayor degradación hidrolítica con el tiempo debido a su naturaleza hidrofílica. Estos compromisos entre simplicidad y rendimiento a largo plazo generaron debates continuos en la comunidad odontológica sobre el equilibrio óptimo entre facilidad de uso y resultados clínicos duraderos.^{8, 3}

La última evolución significativa en esta cronología es el desarrollo de los adhesivos "universales" o "multi-modo" a partir de 2010, que representan un enfoque más versátil frente a las generaciones anteriores. Estos sistemas están diseñados para funcionar eficazmente con cualquier estrategia de grabado: total, selectivo (solo en esmalte) o autograbado, permitiendo al clínico adaptar el protocolo a cada situación específica. Incorporan monómeros funcionales avanzados como el 10-MDP (10-metacrililoiloxidecil dihidrógeno fosfato), que además de formar microretenciones mecánicas, establecen enlaces químicos estables con la hidroxiapatita, mejorando la durabilidad de la interfaz adhesiva. Adicionalmente, estos adhesivos universales son compatibles con una amplia gama de sustratos incluyendo esmalte, dentina, diversos tipos de cerámicas, metales y composites, lo que los hace extremadamente versátiles para procedimientos de reparación y cementación. Esta última generación representa la culminación de décadas de investigación y desarrollo, ofreciendo un balance entre simplicidad de uso, versatilidad clínica y rendimiento a largo plazo, aunque la investigación continúa buscando mejorar aspectos como la estabilidad hidrolítica, la remineralización de la interfaz adhesiva y la incorporación de propiedades antibacterianas para prevenir caries secundarias.¹⁰

4.2 Principios biológicos y estructurales de los tejidos dentales

Las estructuras dentales tienen un papel importante en el desarrollo y aplicación de adhesivos ya que sus características biológicas y estructurales influyen en su interacción con los adhesivos dentales. Los adhesivos dentales actúan a través de mecanismos de adhesión mecánica y química. La interacción con las fibras de colágeno en la dentina y los cristales en el esmalte es crucial para la durabilidad de la restauración.⁴¹

4.2.1 Estructura y Composición del Esmalte Dental

El esmalte dental es el tejido más mineralizado del cuerpo humano y forma la capa externa de la corona anatómica del diente. Su elevada mineralización le confiere una extraordinaria dureza, aunque también lo hace relativamente frágil, requiriendo el soporte de la dentina subyacente para funcionar adecuadamente bajo las fuerzas masticatorias (Fig. 1).⁷

Desde el punto de vista químico, el esmalte está compuesto principalmente por material inorgánico (96-97% de su peso), con una pequeña cantidad de material orgánico (1-2%) y agua (2-3%). La fase inorgánica está constituida fundamentalmente por cristales de hidroxiapatita carbonatada [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$], que pueden presentar diversas sustituciones iónicas con carbonatos, magnesio, sodio, potasio, cloruro y flúor, alterando sus propiedades físicas y su reactividad frente a los ácidos. La matriz orgánica, aunque escasa, desempeña un papel importante en la organización estructural del esmalte. Está compuesta principalmente por proteínas no colágenas y péptidos, incluyendo amelogeninas, enamelinas, y ameloblastinas. Durante la maduración del esmalte, estas proteínas son casi completamente degradadas y eliminadas, quedando solo pequeñas cantidades en el esmalte maduro, principalmente concentradas cerca de la unión amelodentinaria.^{11, 12}

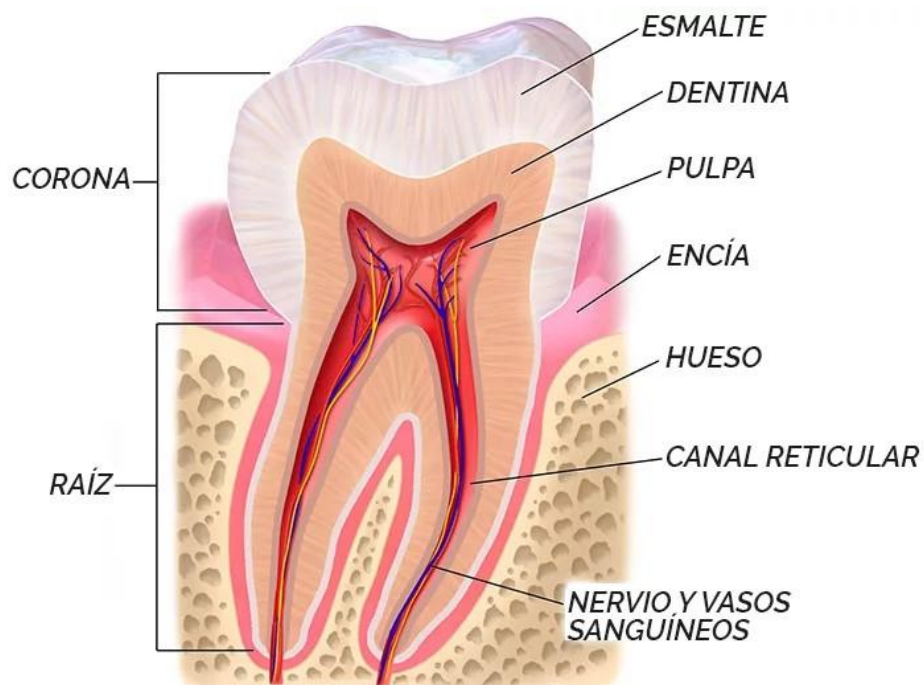
La unidad estructural básica del esmalte es el prisma o varilla, una estructura alargada que se extiende desde la unión amelodentinaria hasta casi la superficie externa. Cada prisma tiene aproximadamente 5-6 μm de diámetro y contiene miles de cristales de hidroxiapatita densamente empaquetados.¹⁵ Estos prismas se organizan tridimensionalmente con una sección transversal que recuerda a un "ojo de cerradura", donde se distingue una cabeza redondeada y una cola, permitiendo que se entrecrucen e interdigiten para proporcionar resistencia estructural. Además de los prismas, el esmalte presenta varias estructuras secundarias como las estrías de

Retzius, bandas de Hunter-Schreger, esmalte aprismático, periquimatas, husos adamantinos y laminillas. El esmalte aprismático, una capa superficial donde los cristales no forman prismas definidos es particularmente relevante en la adhesión dental por su mayor resistencia al grabado ácido (Fig. 2).¹⁶

Para los procesos adhesivos, la estructura del esmalte resulta determinante: su alto contenido mineral lo hace receptivo al grabado ácido, que disuelve selectivamente los cristales de hidroxiapatita creando microporosidades que permiten la penetración de resinas adhesivas. La unión al esmalte es predominantemente micromecánica y constituye uno de los vínculos adhesivos más duraderos y

predecibles en odontología restauradora moderna.¹⁷ Figura

1: Anatomía dental.



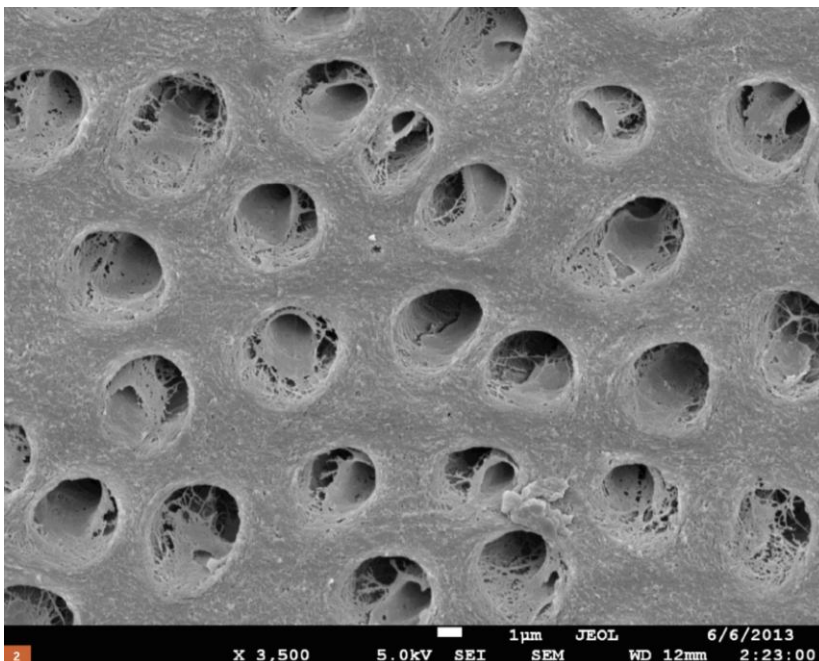
Fuente: Zhang K, Zhang N, Weir MD, Reynolds MA, Bai Y, Xu HHK. Bioactive dental materials: A review of advances over the past decade. Dent Mater. 2023;39(1):175-88.

4.2.2 Estructura y Composición de la Dentina

La dentina constituye el tejido mineralizado más abundante del diente, y se encuentra entre el esmalte en la superficie externa y la pulpa dental en el interior. A diferencia del esmalte, la dentina es un tejido vital con capacidad de respuesta frente a estímulos y agresiones.^{3, 10}

Desde el punto de vista de su composición, la dentina presenta aproximadamente 70% de material inorgánico, 20% de material orgánico y 10% de agua por peso. La fase inorgánica está compuesta principalmente por cristales de hidroxiapatita carbonatada, significativamente más pequeños que los del esmalte (aproximadamente 5 nm de ancho por 20-35 nm de largo). La matriz orgánica está constituida mayoritariamente por fibras colágenas (principalmente colágeno tipo I, que representa el 90% del componente orgánico), proteoglicanos, glicoproteínas y proteínas no colágenas como fosforinas, sialoproteínas y proteínas morfogenéticas.¹⁸

Figura 2: Escáner electrónico microscópico de dentina después del grabado ácido.
Aumento 3500X.



Fuente: Wang R, Hass V, Wang Y. Machine Learning Analysis of Microtensile Bond Strength of Dental Adhesives. J Dent Res. 2023;102(9):1022-30.

La característica microestructural más distintiva de la dentina son los túbulos dentinarios, conductos que se extienden desde la pulpa hasta la unión amelodentinaria o cemento-dentinaria. Estos túbulos contienen la prolongación citoplasmática de los odontoblastos (células formadoras de dentina ubicadas en la periferia pulpar) y fluido dentinario. Los túbulos siguen un trayecto en forma de S suave y su densidad varía según la ubicación, siendo mayor cerca de la pulpa (aproximadamente 65,000 por mm^2) y menor hacia la periferia (aproximadamente 15,000 por mm^2). Alrededor de cada túbulo se encuentra la dentina peritubular, altamente mineralizada y con escaso contenido de colágeno. Entre los túbulos se ubica la dentina intertubular, menos mineralizada y rica en fibras colágenas, formando una red tridimensional que constituye el principal sustrato para la adhesión dental. La orientación de las fibras colágenas en la dentina intertubular es mayoritariamente perpendicular a los túbulos dentinarios.¹⁹

Existen varios tipos de dentina que resultan relevantes para los procesos adhesivos. La dentina primaria se forma durante el desarrollo del diente antes de la erupción. La dentina secundaria se deposita fisiológicamente a lo largo de la vida. La dentina terciaria (reparativa) se forma como respuesta a estímulos como caries, procedimientos restauradores o trauma, pudiendo presentar una estructura tubular irregular. La dentina esclerótica se caracteriza por la obliteración de los túbulos con cristales minerales, frecuentemente asociada al envejecimiento o a procesos patológicos.¹⁵

Una característica única de la dentina es su permeabilidad, determinada principalmente por los túbulos dentinarios. Esta permeabilidad aumenta significativamente cerca de la pulpa debido a la mayor densidad y diámetro tubular, lo que tiene implicaciones importantes para la sensibilidad dentinaria y los procedimientos adhesivos. El fluido dentinario dentro de los túbulos genera una

presión pulpar positiva que puede interferir con la penetración de adhesivos, especialmente en cavidades profundas. Esta compleja estructura y composición hace que la dentina represente un sustrato adhesivo desafiante y variable, significativamente más complejo que el esmalte, requiriendo estrategias específicas para lograr una adhesión predecible y duradera en odontología restauradora.²⁰

4.3 Conceptos básicos de adhesión

La adhesión dental se define como la unión íntima que se establece entre un material (adhesivo) y un sustrato (estructura dental). Este fenómeno implica fuerzas de atracción molecular en la interfaz entre dos materiales de distinta naturaleza, permitiendo la transferencia de cargas entre ellos. Los adhesivos dentales actúan como intermediarios que establecen un vínculo entre el tejido dental y el material restaurador.^{5, 8}

4.3.1 Energía superficial y humectabilidad

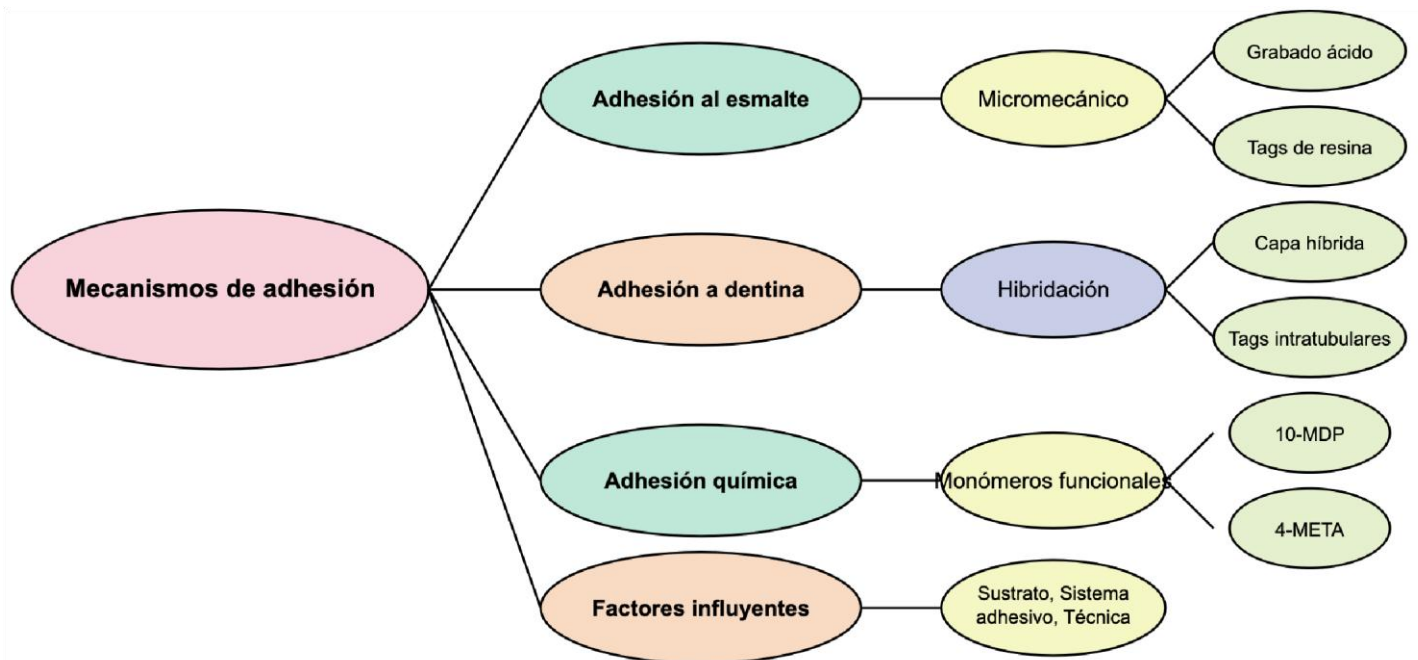
La energía superficial representa la energía libre presente en la superficie de un sólido debido a los enlaces no saturados de sus moléculas superficiales. Los sustratos con alta energía superficial, como el esmalte grabado, favorecen la adhesión. La humectabilidad es la capacidad de un líquido para extenderse sobre una superficie sólida, determinada por el ángulo de contacto entre ambos. Un ángulo menor indica mejor humectación. Los adhesivos dentales contienen solventes y monómeros hidrofílicos que aumentan la humectabilidad, permitiendo íntimo contacto con la superficie dental y mejorando la penetración en microporosidades.²⁰

4.3.2 Mecanismos de adhesión

La adhesión micromecánica se basa en la penetración y polimerización del adhesivo en irregularidades superficiales del sustrato, formando trabas microscópicas. Es el mecanismo predominante en la adhesión al esmalte grabado. La adhesión química involucra enlaces iónicos, covalentes o secundarios entre el adhesivo y

componentes del sustrato. Ciertos monómeros funcionales (como 10MDP) pueden establecer enlaces iónicos con el calcio de la hidroxiapatita. La adhesión híbrida combina ambos mecanismos y es característica de la interacción con dentina, donde se forma la "capa híbrida" mediante la infiltración de monómeros en la red colágena parcialmente desmineralizada (Fig. 3).²¹

Figura 3: Mapa conceptual de los mecanismos de adhesión.



Fuente: Aggarwal V, Sharma R, Mathur U. Recent advancements in dental adhesive systems: J Conserv Dent. 2023;26(5):421-32. Askar H, Krois J, Göstemeyer G, Schwendicke F. Secondary caries and restoration replacement: An updated review of dental adhesives. J Dent. 2022;123:104196. Breschi L, Maravic T, Cunha SR, Comba A, Cadenaro M, Tjäderhane L, et al. Dentin bonding systems: From dentin collagen structure to bond preservation and clinical applications. Dent Mater. 2022;38(1):54-77.

4.3.3 Química de los principales monómeros adhesivos

Los adhesivos dentales contienen diversos monómeros con funciones específicas que determinan su comportamiento clínico. Los monómeros de entrecruzamiento como Bis-GMA, UDMA y TEGDMA forman la estructura polimérica principal, aportando resistencia mecánica y estabilidad dimensional al adhesivo polimerizado. Su alto peso molecular y múltiples grupos reactivos influyen directamente en

propiedades como viscosidad y resistencia a la tracción. Los monómeros funcionales como 10-MDP, 4-META y fenil-P contienen grupos carboxílicos o fosfatos que establecen uniones iónicas con el calcio de la hidroxiapatita, proporcionando adhesión química complementaria a la retención micromecánica. Esta interacción molecular es particularmente importante en la adhesión a dentina y esmalte parcialmente desmineralizado.²²

Los monómeros hidrofílicos como HEMA actúan como agentes de acoplamiento entre componentes hidrofóbicos e hidrofílicos, facilitando la penetración en sustratos húmedos y la formación de la capa híbrida. Sin embargo, esta característica puede resultar en mayor absorción de agua y degradación a largo plazo.²¹

La equilibrada combinación de estos monómeros, junto con iniciadores, inhibidores, solventes y rellenos inorgánicos, define las propiedades físicas, químicas y clínicas distintivas de cada sistema adhesivo, determinando aspectos fundamentales como técnica de aplicación, compatibilidad con diferentes sustratos y durabilidad bajo las condiciones del entorno oral (Tab. 1).¹⁷

Tabla 1: Propiedades fisicoquímicas de los adhesivos dentales.

Propiedad	Descripción	Importancia clínica
Resistencia adhesiva	Capacidad de la interfaz para resistir fuerzas que tienden a separar los sustratos unidos	Determina longevidad de la restauración. Previene microfiltración y caries secundaria. Reduce el riesgo de fractura.

Viscosidad	Medida de la resistencia a fluir de un material; relacionada con el contenido de relleno y solventes.	Afecta la capacidad de penetración en microporosidades. Determina formación de capa homogénea. Influye en el grosor de la película.
Grado de conversión	Porcentaje de dobles enlaces carbono-carbono que polimerizan.	Mayor estabilidad química. Mejores propiedades mecánicas. Menor liberación de monómeros residuales.
pH	Nivel de acidez del adhesivo antes de la polimerización.	Determina la capacidad desmineralizante. Afecta la compatibilidad con materiales y tejidos.
Humectabilidad	Capacidad de un líquido para extenderse sobre una superficie; relacionada con la tensión superficial.	Facilita penetración en microestructuras dentales. Mejora el contacto íntimo con el sustrato.
Absorción de agua	Captación de agua en la matriz polimérica con el tiempo.	Degradación hidrolítica de la interfaz. Liberación de componentes solubles.

Fuente: Perdigão J, Araujo E, Ramos RQ, Gomes G, Pizzolotto L. Dentin bonding—variables related to the clinical situation and the substrate treatment. Dent Mater. 2022;38(5):834-44.

Wang R, Hass V, Wang Y. Machine Learning Analysis of Microtensile Bond Strength of Dental Adhesives. J Dent Res. 2023;102(9):1022-30.

4.4 Clasificación de los adhesivos

La clasificación de los adhesivos dentales en odontología se lleva a cabo según el número de pasos en el proceso de aplicación, el tipo de técnica utilizada, y su capacidad para adherirse a las superficies dentales.⁴²

4.4.1 Clasificación según su generación y número de pasos

Con el paso del tiempo las investigaciones sobre los sistemas de adhesivos evolucionaron desde la primera generación a finales de los años setenta tratando de mejorar su adhesión a la dentina semiorgánica y de solucionar problemas que se originaban con la aplicación de distintas soluciones y pasos. En los años ochenta se desarrollaron la segunda y tercera generación de adhesivos donde en la última se aumentó significativamente la fuerza de adhesión a la dentina. Para la década de los noventa la cuarta generación aumento su nivel de adhesión al igual que como la disminución de la sensibilidad postoperatoria en las restauraciones posteriores. La misma abrió la puerta para que se continuara la investigación y se desarrollaran nuevas y mejores maneras de utilizar los adhesivos mejorando el proceso hasta llegar a la octava generación.^{41, 42}

4.4.1.2 Sistemas adhesivos de tres pasos

Este sistema de adhesivos se compone de tres fases o pasos que incluyen el grabado ácido, aplicación del primer y aplicación del adhesivo. Los mismos generalmente ofrecen una mayor durabilidad y resistencia, ya que permiten un control más detallado de la preparación de la superficie.⁴²

4.4.1.2.1 Tercera generación

Los adhesivos de tercera generación marcaron un avance importante en la odontología restauradora durante finales de los 80 y principios de los 90. Su principal innovación fue la incorporación de “primers” ácidos que modificaban el barrillo dentinario sin eliminarlo completamente, mejorando la adhesión a la dentina. Estos

sistemas incorporaron monómeros hidrofílicos que aumentaban la humectabilidad de la superficie dentinaria, facilitando la penetración de la resina en los túbulos dentinarios parcialmente abiertos. Mediante la inclusión de moléculas bifuncionales con grupos fosfato, se logró una unión química tanto a la hidroxiapatita del diente como a los monómeros de resina.²³

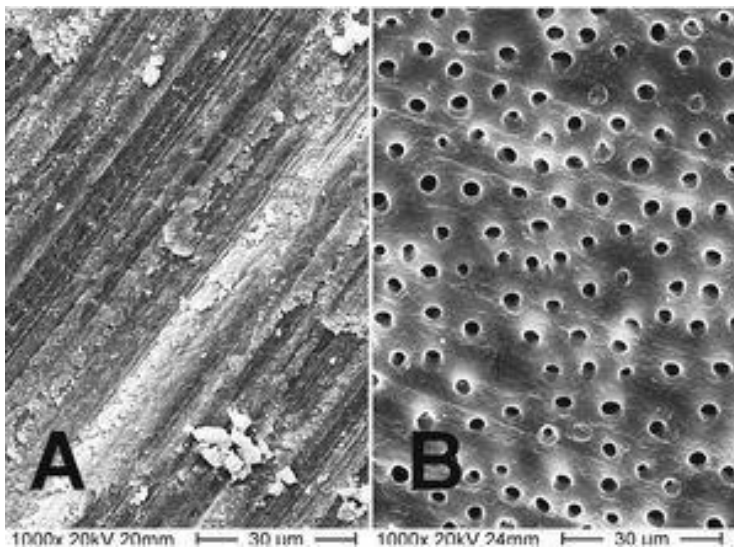
El proceso de aplicación comenzaba con la preparación de la cavidad según los principios de operatoria dental, eliminando todo el tejido cariado. Posteriormente, se realizaba un acondicionamiento selectivo del esmalte con ácido fosfórico en concentraciones entre 30% y 37% durante 15 a 30 segundos, seguido de un lavado profuso con agua y un secado cuidadoso manteniendo la dentina ligeramente húmeda. La fase siguiente consistía en la aplicación del primer con monómeros hidrofílicos durante 15-30 segundos, lo que modificaba el barrillo dentinario y mejoraba la humectabilidad de la superficie. Luego se aplicaba el adhesivo propiamente dicho, conteniendo monómeros hidrofóbicos como Bis-GMA o UDMA, creando una capa delgada mediante un suave chorro de aire. Finalmente, se procedía a la fotopolimerización utilizando una lámpara adecuada durante aproximadamente 20 segundos (Fig. 4).²⁴

Entre las ventajas de estos adhesivos destacaban la mejor humectabilidad de la dentina, la reducción de la hipersensibilidad postoperatoria y una mayor fuerza de adhesión, que alcanzaba valores de 12-15 MPa. Sin embargo, presentaban limitaciones como un procedimiento complejo y sensible a la técnica, dificultad para estandarizar el nivel de humedad en dentina y problemas de estabilidad a largo plazo. Algunos productos comerciales representativos de esta generación fueron Scotchbond 2 (3M ESPE), Gluma 2000 (Bayer/Heraeus Kulzer), Tenure (Den-Mat), XR Bond (Kerr), Prisma Universal Bond 3 (Dentsply), Syntac Classic (Ivoclar Vivadent)

y All-Bond 2 (Bisco). Estos sistemas representaron un paso evolutivo crucial en la odontología adhesiva, estableciendo las bases para el desarrollo de

generaciones posteriores con técnicas simplificadas y mayor durabilidad.^{20, 25}

Figura 4: Microscopía electrónica de una capa de barrillo dentinario (A) y dentina tras la eliminación completa del barrillo dentinario (B).



Fuente: Chrisostomo D, Strazzi-Sahyon H, Briso A, Dos Santos P. Efficacy of Polyacrylic Acid as a Conditioning Agent on the Bond Strength of Self-adhesive Resin Cements to Dental Enamel. *Oral Health Prev Dent.* 2024;18(4):747-56.

4.4.1.2.2 Cuarta generación

Los adhesivos de cuarta generación representaron un salto cualitativo en la odontología adhesiva durante la década de los 90. Su principal innovación fue la introducción del concepto de "grabado total" o "técnica de grabado ácido total", que consistía en el condicionamiento simultáneo de esmalte y dentina con ácido fosfórico, eliminando completamente el barrillo dentinario. Este enfoque revolucionario permitió la formación de una auténtica capa híbrida entre la dentina desmineralizada y los monómeros de resina.²⁶

Estos sistemas se caracterizaron por la aplicación de tres componentes distintos: el agente grabador, el primer y el adhesivo. El primer contenía monómeros hidrofílicos como HEMA que penetraban profundamente en la dentina desmineralizada húmeda,

mientras que el adhesivo aportaba monómeros hidrofóbicos como Bis-GMA que proporcionaban la resistencia mecánica necesaria para soportar las fuerzas masticatorias. Este enfoque de tres pasos claramente diferenciados permitió optimizar cada componente para su función específica. El procedimiento clínico comenzaba con la preparación de la cavidad y la eliminación del tejido cariado, seguido por la aplicación del ácido fosfórico (30-37%) sobre esmalte y dentina durante 15-30

segundos en esmalte y 15 segundos en dentina. Tras un lavado abundante con agua, se mantenía la dentina húmeda mediante un secado controlado, evitando el colapso de las fibras colágenas desmineralizadas, fenómeno conocido como "deseccación de la dentina". La siguiente fase consistía en la aplicación del primer hidrofílico sobre la dentina húmeda, permitiendo que penetrara en los túbulos dentinarios abiertos y en la red de colágeno expuesta. Este primer se aplicaba activamente mediante movimientos de frotado durante 15-30 segundos, seguido de un suave secado con aire para eliminar el solvente. Posteriormente, se aplicaba el adhesivo propiamente dicho sobre esmalte y dentina, se adelgazaba con aire y se fotopolimeriza durante 20-40 segundos.^{11, 16, 27}

Entre las ventajas principales de estos adhesivos destacaban las elevadas fuerzas de adhesión tanto a esmalte como a dentina, alcanzando valores de 20-25 MPa, la formación de una verdadera capa híbrida que sellaba herméticamente los túbulos dentinarios, y la versatilidad para su uso en diversas situaciones clínicas. El sellado marginal mejoró significativamente, reduciendo la microfiltración y minimizando el riesgo de caries secundaria. Sin embargo, estos sistemas también presentaban limitaciones importantes como la complejidad técnica del procedimiento de tres pasos, la alta sensibilidad a errores durante la aplicación, especialmente en el control de la humedad dentinaria, y el tiempo clínico prolongado requerido para su correcta aplicación. La técnica era particularmente sensible al grado de humedad de la dentina:

demasiado seca impedía la penetración del primer, mientras que demasiado húmeda provocaba dilución y separación de fases del adhesivo (Fig. 5).^{15, 28}

Figura 5: Sistema adhesivo de tres pasos All-Bond 2 (Bisco), conformado por agente grabador, el primer y el adhesivo.



Fuente: Tang C, Mercelis B, Ahmed M, Yoshihara K, Peumans M, Van Meerbeek B. Adhesive Performance Assessment of Universal Adhesives and Universal Adhesive/Composite Cement Combinations. J Adhes Dent. 2023;25:241-56.

Entre los productos comerciales representativos de esta generación se encontraban All-Bond 2 (Bisco), Scotchbond Multi-Purpose (3M ESPE), OptiBond FL (Kerr), Permagen (Ultradent), ProBond (Dentsply), Syntac Classic (Ivoclar Vivadent) y Denthesive (Heraeus Kulzer). Estos adhesivos de cuarta generación siguen siendo considerados por muchos expertos como el "estándar de oro" en adhesión dental, a pesar del desarrollo de generaciones posteriores con procedimientos simplificados, debido a su excelente rendimiento clínico a largo plazo y su predictibilidad cuando se aplican correctamente.²⁹

4.4.1.3 Sistemas adhesivos de dos pasos

Los sistemas de adhesivos de dos pasos generalmente se clasifican en dos grupos los que tienen un sistema autograbante y los de grabado total. Se llaman de dos pasos

ya que el procedimiento de cada uno requiere dos etapas. Los mismos utilizan materiales para lograr una unión efectiva entre los tejidos dentales y los materiales restauradores. El uso y desarrollo de estos sistemas han sido esenciales en la evolución de la odontología adhesiva.^{5,7}

4.4.1.3.1 Primera generación

Los adhesivos de primera generación marcaron el inicio de la odontología adhesiva a principios de la década de 1960. Su desarrollo surgió como respuesta a la necesidad de mejorar la retención de las restauraciones de resina acrílica, que padecían de altos índices de microfiltración y baja adhesión a las estructuras dentales. El concepto fundamental que guió esta primera generación fue el uso de moléculas bifuncionales que pudieran unirse químicamente tanto al sustrato dental como a la resina restauradora. El principal representante de esta generación fue el sistema desarrollado por Michael Buonocore, quien en 1955 había introducido la técnica de grabado ácido del esmalte. Posteriormente, en 1965, Bowen desarrolló el primer adhesivo basado en la molécula NPG-GMA (N-fenilglicina glicidil metacrilato), diseñada para unirse a los iones calcio de la estructura dental por un extremo y a la matriz de resina por el otro. Este avance representó el primer intento científico de lograr una adhesión química a los tejidos dentales.^{19, 22}

El procedimiento de aplicación era relativamente simple comparado con generaciones posteriores, aunque técnicamente exigente. Tras la preparación cavitaria, se aplicaba el adhesivo directamente sobre la superficie dental sin tratamiento previo, se dejaba actuar brevemente y luego se colocaba la restauración. No existía un acondicionamiento específico para la dentina, y el barrillo dentinario permanecía intacto, actuando como una barrera para la penetración del adhesivo. Los resultados clínicos de estos primeros sistemas adhesivos fueron desalentadores. Las fuerzas de adhesión que lograban eran extremadamente bajas, generalmente

inferiores a 2-3 MPa, insuficientes para resistir las fuerzas de contracción de polimerización de las resinas y las tensiones masticatorias. La durabilidad de la unión era muy limitada, produciéndose fallos adhesivos en cortos períodos de tiempo debido principalmente a la degradación hidrolítica de la interfaz adhesiva en el ambiente húmedo de la cavidad oral.^{9, 21, 24}

Las principales limitaciones de estos sistemas pioneros incluían su incapacidad para formar una verdadera unión micromecánica con la dentina, la ausencia de penetración en los túbulos dentinarios, y la vulnerabilidad a la degradación en presencia de agua. Además, carecían de efectividad en sustratos húmedos, característicos del tejido dentinario, lo que provocaba altos índices de microfiltración marginal y sensibilidad postoperatoria.³⁰

Entre los productos comerciales representativos de esta primera generación se encontraban Cervident (S.S. White), que utilizaba el NPG-GMA como agente de unión, Cosmic Bond (De Trey/Dentsply) y Palakav (Kulzer). Estos materiales, aunque representaron un importante paso inicial en el desarrollo de la odontología adhesiva, tenían indicaciones clínicas muy limitadas y rápidamente fueron superados por nuevas formulaciones. A pesar de sus evidentes limitaciones, los adhesivos de primera generación constituyeron la base conceptual sobre la que se desarrollarían las generaciones posteriores, estableciendo el paradigma de la odontología adhesiva que revolucionaría los procedimientos restauradores. Su principal contribución fue demostrar la factibilidad del concepto de adhesión al tejido dental, aunque los mecanismos efectivos para lograrlo aún requerirían décadas de investigación y desarrollo tecnológico.^{13, 31}

4.4.1.3.2 Segunda generación

Los adhesivos de segunda generación aparecieron a finales de la década de 1970 y principios de los años 80, representando un avance respecto a sus predecesores en

el intento de mejorar la adhesión a las estructuras dentales. Estos sistemas se caracterizaron principalmente por la incorporación de ésteres fosfatados derivados del halofosfato y del BisGMA, diseñados para interactuar iónicamente con el calcio de la hidroxiapatita presente en el diente.³²

La innovación fundamental de esta generación fue el intento de lograr una unión química más efectiva con la dentina a través de la quelación con el calcio. A diferencia de la primera generación, estos adhesivos reconocían la importancia de interactuar con el barrillo dentinario, aunque sin eliminarlo. Teóricamente, los grupos fosfato de estos adhesivos se unirían al calcio del barrillo dentinario, creando un enlace entre éste y la resina restauradora.¹⁶

El procedimiento clínico consistía en la aplicación directa del adhesivo sobre la superficie dental preparada, sin ningún tratamiento previo específico para acondicionar la dentina. Se mantenía el concepto de no eliminar el barrillo dentinario, pero se buscaba incorporar como parte del mecanismo adhesivo. Tras la aplicación, se dejaba actuar brevemente según las instrucciones del fabricante y se procedía a la fotopolimerización antes de colocar el material restaurador. Las fuerzas de adhesión logradas por estos sistemas mostraron una mejora respecto a la primera generación, alcanzando valores entre 4 y 6 MPa. Sin embargo, estos valores seguían siendo insuficientes para contrarrestar eficazmente las fuerzas de contracción de polimerización de las resinas compuestas, lo que resultaba en problemas persistentes de microfiltración y sensibilidad postoperatoria.^{21, 28}

Las limitaciones principales de estos adhesivos incluían su inestabilidad hidrolítica en el ambiente oral, la debilidad de la unión química con el calcio, y la presencia del barrillo dentinario como una interfaz débil entre el adhesivo y la dentina subyacente. La degradación de la unión era relativamente rápida en condiciones clínicas, lo que

comprometía la longevidad de las restauraciones y su capacidad para prevenir la filtración marginal.³³

Entre los productos comerciales representativos de esta segunda generación se encontraban Scotchbond (3M Dental), uno de los primeros en utilizar ésteres fosfatados de BisGMA, Bondlite (Kerr/Sybron), Dentin-Adhesit (Ivoclar Vivadent), Prisma Universal Bond (Dentsply) y Gluma (Bayer). Estos materiales ampliaron las posibilidades de la odontología restauradora, aunque sus indicaciones seguían siendo limitadas principalmente a restauraciones de clase III y V, donde las fuerzas oclusales son menores.¹²

A pesar de sus limitaciones, los adhesivos de segunda generación representaron un paso evolutivo significativo en el desarrollo de los sistemas adhesivos dentales. Introdujeron conceptos importantes como la necesidad de interactuar específicamente con los componentes de la dentina y establecieron la base para el desarrollo posterior de técnicas más efectivas que eventualmente incorporarían el acondicionamiento ácido de la dentina y el concepto de capa híbrida, que caracterizarían a las generaciones subsiguientes.^{7, 9}

4.4.1.3.3 Quinta generación

Los adhesivos de quinta generación surgieron a mediados de la década de 1990 como respuesta a la necesidad de simplificar los complejos procedimientos de aplicación de los sistemas anteriores, particularmente los de cuarta generación. Su principal innovación consistió en la combinación del primer y el adhesivo en un solo frasco, manteniendo el concepto de grabado total separado, lo que les valió la denominación de sistemas "monobote" o "one-bottle".¹⁸

Estos sistemas conservaron el enfoque de grabado total introducido por la cuarta generación, pero redujeron significativamente el tiempo clínico y la complejidad técnica al unificar dos de los tres pasos del procedimiento. La formulación química

representó un desafío importante para los fabricantes, ya que debían combinar en una única solución estable componentes hidrofílicos e hidrofóbicos, junto con solventes apropiados que facilitaran la penetración en la dentina húmeda.¹⁴

El procedimiento clínico con estos adhesivos comenzaba con la aplicación del ácido fosfórico (30-37%) sobre esmalte y dentina durante los tiempos recomendados (15-30 segundos para esmalte, 15 segundos para dentina), seguido de un lavado abundante con agua y un secado cuidadoso, manteniendo la dentina ligeramente húmeda. A continuación, se aplicaba directamente el adhesivo monobote sobre las superficies grabadas, generalmente en múltiples capas con frotado activo, se adelgazaba con aire suave y se fotopolimerizaba durante 10-20 segundos. Las fuerzas de adhesión logradas por estos sistemas resultaron comparables a las de la cuarta generación, oscilando entre 18-25 MPa, sin embargo, algunos estudios a largo plazo mostraron una mayor tendencia a la degradación con el tiempo. La simplificación del procedimiento supuso algunas concesiones en cuanto a la efectividad de la hibridación dentinaria, aunque en la práctica clínica cotidiana estos sistemas ofrecían un equilibrio aceptable entre eficacia y practicidad.^{21, 27, 30}

Entre las ventajas principales de estos adhesivos destacaba la reducción significativa del tiempo clínico, la disminución de errores de manipulación al eliminar un paso del procedimiento, y la menor sensibilidad a variaciones en la técnica. Sin embargo, las limitaciones incluían cierta inestabilidad química de la solución combinada con el tiempo (menor vida útil), dificultades para lograr un espesor de capa uniforme del adhesivo, y una mayor susceptibilidad a la evaporación del solvente en el frasco con el uso continuado.³¹

Los productos comerciales representativos de esta generación incluyeron Prime & Bond NT (Dentsply), Single Bond/Adper Single Bond (3M ESPE), OptiBond Solo

(Kerr), One-Step (Bisco), ExciTE (Ivoclar Vivadent), Gluma Comfort Bond (Heraeus Kulzer) y Adper Scotchbond 1XT (3M ESPE). Estos adhesivos ganaron rápidamente popularidad entre los clínicos por su facilidad de uso y buenos resultados inmediatos, convirtiéndose en los sistemas más utilizados en la práctica general durante finales de los 90 y principios de los 2000.³²

La quinta generación de adhesivos representó un hito importante en la evolución de la odontología adhesiva al democratizar el uso de sistemas adhesivos efectivos en la práctica clínica diaria. Aunque no aportaron mejoras significativas en el rendimiento mecánico respecto a sus predecesores, su contribución a la simplificación de los protocolos clínicos fue determinante para la amplia adopción de las técnicas adhesivas en la odontología restauradora moderna.³³

4.4.1.3.4 Sexta generación tipo A

Los adhesivos de sexta generación tipo A, también conocidos como sistemas de autograbado de dos pasos, surgieron a finales de los años 90 como una evolución en la búsqueda de simplificar los procedimientos adhesivos. Su principal innovación consistió en la incorporación de monómeros ácidos en el primer, eliminando así la necesidad de un paso separado de grabado ácido, mientras mantenían el adhesivo hidrofóbico en un frasco independiente. Estos sistemas introdujeron el concepto de "autograbado" o "self-etching", donde los monómeros acídicos del primer disolvían parcialmente el barrillo dentinario e infiltraban simultáneamente la dentina subyacente. Este enfoque buscaba superar dos limitaciones importantes de los sistemas de grabado total: la discrepancia entre la profundidad de desmineralización y la infiltración de monómeros, y la sensibilidad a la técnica relacionada con el manejo de la humedad dentinaria.^{12, 17}

El procedimiento clínico comenzaba con la aplicación directa del primer autograbante sobre la estructura dental preparada, sin lavado previo con agua. Este

primer se aplicaba activamente mediante movimientos de frotado durante 15-20 segundos, permitiendo que los monómeros ácidos interactuaran con el esmalte y la dentina. Tras un suave secado con aire para eliminar el solvente, se aplicaba el adhesivo hidrofóbico del segundo frasco, se adelgazaba con aire y se fotopolimerizaba durante 10-20 segundos. Las fuerzas de adhesión obtenidas con estos sistemas variaban considerablemente según el sustrato, siendo generalmente inferiores en esmalte (15-20 MPa) en comparación con los sistemas de grabado total, pero competitivas en dentina (18-23 MPa). La menor agresividad del autograbado en esmalte, especialmente en esmalte intacto, llevó a la recomendación en algunos casos de realizar un grabado selectivo del esmalte con ácido fosfórico, manteniendo las ventajas del autograbado en la dentina.^{8, 9, 10}

Entre las ventajas principales de estos adhesivos destacaban la reducción de la sensibilidad postoperatoria debido a la menor desmineralización e infiltración simultánea, la eliminación del crítico paso de lavado y secado del grabado convencional, y la formación de una interfaz adhesiva más resistente a la degradación hidrolítica. Sin embargo, presentaban limitaciones como la menor efectividad en esmalte sin instrumentar, la complejidad añadida por la necesidad de mezclar componentes en algunos sistemas, y ciertas incompatibilidades con cementos de resina autopolimerizables.^{18, 20}

Los productos comerciales representativos de esta generación tipo A incluyeron Clearfil SE Bond (Kuraray), AdheSE (Ivoclar Vivadent), OptiBond XTR (Kerr), Clearfil Liner Bond 2V (Kuraray), Prime & Bond NT Dual-Cure con Self-Cure Activator (Dentsply) y NRC/Prime & Bond NT (Dentsply). Entre estos, Clearfil SE Bond se convirtió en una referencia por su rendimiento clínico consistente y longevidad, siendo ampliamente utilizado en estudios comparativos. Los adhesivos de sexta generación tipo A representaron un avance importante en el desarrollo de los sistemas adhesivos al intentar combinar la simplicidad de uso con un rendimiento predecible. Introdujeron

principios de interacción con los tejidos dentales que serían fundamentales para el desarrollo de generaciones posteriores, estableciendo el concepto de autograbado como una alternativa viable a la técnica de grabado total con ácido fosfórico.^{27, 29}

4.4.1.4 Sistemas adhesivos de un paso

Los sistemas adhesivos de un paso integran "auto-etch" donde los monómeros ácidos acondicionan la superficie del diente y simultáneamente permiten la adhesión e imprimación del adhesivo eliminando pasos intermedios. Estos implican una fácil aplicación con mínimo uso de tiempo. Los mismos requieren una buena técnica para evitar fallas y filtración.²⁹

4.4.1.4.1 Sexta generación tipo B

Los adhesivos de sexta generación tipo B, también conocidos como sistemas de autograbado de un solo paso o "all-in-one", representaron un avance significativo en la simplificación de los procedimientos adhesivos a principios de los años 2000. Su principal característica distintiva fue la combinación de los tres componentes tradicionales (acondicionador, primer y adhesivo) en una única solución, logrando así el máximo nivel de simplificación técnica posible. Estos sistemas incorporaron en su formulación monómeros ácidos, hidrofílicos e hidrofóbicos, junto con solventes y agua, creando soluciones complejas que debían cumplir múltiples funciones simultáneamente. Los monómeros ácidos, generalmente más suaves que el ácido fosfórico (con pH entre 1.5-3), disolvían parcialmente el barrillo dentinario e infiltraban la dentina subyacente en un único paso, sin necesidad de lavado posterior.^{16, 19}

El procedimiento clínico se simplificó considerablemente, consistiendo básicamente en la aplicación del adhesivo directamente sobre la superficie dental preparada, con frotado activo durante 15-20 segundos para promover la desmineralización e infiltración simultáneas. Algunos sistemas requerían múltiples capas para asegurar una adecuada hibridación. Tras un suave secado con aire para

eliminar los solventes, se procedía a la fotopolimerización durante 10-20 segundos. Las fuerzas de adhesión obtenidas con estos sistemas fueron generalmente inferiores a las de generaciones previas, oscilando entre 15-20 MPa en dentina y resultando considerablemente más bajas en esmalte, especialmente en esmalte intacto. Esta limitación llevó a muchos clínicos a adoptar la técnica de grabado selectivo del esmalte con ácido fosfórico como complemento, comprometiendo parcialmente la simplificación buscada.^{21, 29}

Entre las ventajas principales de estos adhesivos destacaban la extrema simplicidad de uso, la reducción significativa del tiempo clínico, y la disminución de errores técnicos relacionados con los múltiples pasos de sistemas anteriores. Sin embargo, presentaban importantes limitaciones, como la elevada hidrofiliidad de la capa adhesiva resultante (que funcionaba como membrana semipermeable), la inestabilidad química de la solución con el tiempo, una mayor tendencia a la degradación hidrolítica, y una menor efectividad en esmalte.¹⁷

Los productos comerciales representativos de esta generación tipo B incluyeron iBond (Heraeus Kulzer), G-Bond (GC), Xeno III y Xeno V (Dentsply), Adper Prompt LPop (3M ESPE), One-Up Bond F (Tokuyama) y AQ Bond (Sun Medical). Estos sistemas, aunque populares inicialmente por su simplicidad, mostraron resultados clínicos menos predecibles a largo plazo en comparación con sistemas de múltiples pasos. Los adhesivos de sexta generación tipo B representaron un interesante experimento en la búsqueda del equilibrio entre simplicidad clínica y efectividad adhesiva. Si bien no lograron igualar el rendimiento de sistemas más complejos, especialmente en términos de durabilidad, contribuyeron significativamente al desarrollo conceptual de la odontología adhesiva y sentaron las bases para el posterior desarrollo de los adhesivos universales que buscarían superar sus limitaciones manteniendo la simplicidad de aplicación.¹⁴

4.4.1.4.2 Séptima generación

Los adhesivos de séptima generación, también conocidos como adhesivos universales o multimodales, emergieron a principios de la década de 2010 como respuesta a la necesidad de sistemas verdaderamente versátiles que pudieran utilizarse en múltiples situaciones clínicas. Su principal innovación consistió en la capacidad de funcionar eficazmente bajo diferentes estrategias adhesivas: autograbado, grabado selectivo del esmalte o grabado total, según la preferencia del clínico o los requerimientos de cada caso particular. Estos sistemas incorporaron monómeros funcionales específicos como el 10-MDP (10-metacrilóiloxidecil dihidrógeno fosfato), que proporciona adhesión química a la hidroxiapatita del diente, al dióxido de zirconio y a diversos metales. Esta característica amplió significativamente el rango de aplicaciones clínicas, permitiendo que un mismo adhesivo pudiera utilizarse para restauraciones directas, indirectas, reparaciones y diferentes sustratos protésicos, simplificando significativamente el inventario de materiales en la práctica diaria (Fig. 6).^{22, 27}

Figura 6: Aplicación de adhesivo séptima generación en restauración dental.



Fuente: Nakajima M, Hosaka K, Yamauti M, Foxtton RM, Tagami J. Improving durability of resin-dentin bonds: Effects of MMP inhibitors. *Dent Mater J.* 2022;41(1):1-18.

El procedimiento clínico varía según la estrategia adhesiva seleccionada. En modo autograbado, el adhesivo se aplica directamente sobre la superficie dental preparada mediante frotado activo durante 20 segundos, se adelgaza con aire y se fotopolimeriza. En modo de grabado selectivo, se acondiciona previamente solo el esmalte con ácido fosfórico durante 15-30 segundos, se lava y seca, para luego aplicar el adhesivo. En modo de grabado total, tanto esmalte como dentina reciben el acondicionamiento ácido antes de la aplicación del adhesivo. Las fuerzas de adhesión logradas por estos sistemas varían según el modo de aplicación, siendo generalmente superiores cuando se utilizan con grabado ácido previo, especialmente en esmalte. Los valores típicos oscilan entre 20-25 MPa en dentina y 25-30 MPa en esmalte grabado, demostrando un rendimiento competitivo frente a generaciones anteriores. Estudios clínicos han mostrado resultados prometedores en términos de durabilidad y versatilidad.^{28, 29, 30}

Entre las ventajas principales de estos adhesivos destacan su extraordinaria versatilidad clínica, la compatibilidad con diferentes técnicas adhesivas, la capacidad de unión a múltiples sustratos (diente, zirconio, metales, cerámicas), y la reducción significativa de incompatibilidades con diversos materiales restauradores. Además, facilitan la estandarización de protocolos en la práctica clínica y reducen la posibilidad de errores asociados al uso de múltiples sistemas adhesivos. Los productos comerciales representativos de esta generación incluyen Scotchbond Universal (3M ESPE), All-Bond Universal (Bisco), Futurabond U (VOCO), Prime&Bond Elect (Dentsply), Clearfil Universal Bond (Kuraray), Adhese Universal (Ivoclar Vivadent) y Peak Universal Bond (Ultradent). Estos sistemas han ganado rápidamente popularidad entre los clínicos por su combinación de simplicidad y rendimiento.^{17, 19}

La séptima generación de adhesivos representa un avance significativo en la evolución de los sistemas adhesivos dentales, ofreciendo por primera vez una solución realmente integral para prácticamente todas las situaciones de adhesión en

odontología restauradora. Su desarrollo refleja la tendencia actual hacia materiales "inteligentes" que simplifican los procedimientos clínicos sin comprometer el rendimiento, adaptándose a las diferentes necesidades y preferencias de los profesionales. Esta combinación de versatilidad y efectividad ha convertido a los adhesivos universales en el estándar actual para la práctica clínica cotidiana.¹⁶

4.4.1.4.3 Octava generación

Los adhesivos de octava generación en modo autograbado representan la innovación más reciente en sistemas adhesivos dentales, surgiendo paralelamente a la versión de grabado total/selectivo durante la década de 2010. Su principal característica distintiva radica en la optimización de la tecnología de autograbado mediante la incorporación de nanopartículas específicas y monómeros funcionales avanzados, manteniendo la simplicidad de aplicación de un solo paso. Estos sistemas han perfeccionado la composición de los adhesivos universales mediante la inclusión de nanopartículas bioactivas, como nanorrellenos de sílice funcionalizados, nanopartículas de fosfato de calcio y compuestos bioactivos liberadores de iones. La nanotecnología aplicada ha permitido desarrollar monómeros autograbantes más efectivos con grupos funcionales optimizados que logran una penetración más profunda y homogénea de la dentina, incluso sin grabado ácido previo.^{20, 24}

El procedimiento clínico con estos adhesivos en modo autograbado es notablemente sencillo. Tras la preparación de la cavidad, el adhesivo se aplica directamente sobre la superficie dental mediante frotado activo durante 20-30 segundos, permitiendo que los monómeros ácidos modifiquen e infiltren simultáneamente el barrillo dentinario. A continuación, se aplica un suave chorro de aire durante 5 segundos para eliminar el solvente y adelgazar la capa, seguido de fotopolimerización durante 10-20 segundos según las indicaciones del fabricante.¹²

Las fuerzas de adhesión alcanzadas por estos sistemas han superado

significativamente a las generaciones anteriores de autograbado, logrando valores de 22-28 MPa en dentina y cifras competitivas incluso en esmalte (20-25 MPa), tradicionalmente el punto débil de los adhesivos autograbantes. Esta mejora se atribuye a los nuevos monómeros funcionales con mayor acidez inicial que luego se neutralizan tras la polimerización, y a la presencia de nanopartículas que refuerzan la capa híbrida. Entre las ventajas principales de estos adhesivos destacan su excelente comportamiento en dentina, incluyendo la esclerótica y afectada por caries, la menor sensibilidad a variaciones en la humedad del sustrato, la formación de una capa híbrida de calidad superior con mayor resistencia a la degradación enzimática, y la liberación de iones bioactivos que pueden promover la remineralización de la interfaz adhesiva con el tiempo.^{18, 19}

Los productos comerciales representativos de esta generación en modo autograbado incluyen Clearfil Universal Bond Quick (Kuraray), G-Premio Bond (GC), OptiBond XTR Neo (Kerr), Universal Bond Fast (VOCO), iBond Universal (Kulzer), y Universal Adhesive S2 (3M). Estos sistemas han demostrado resultados clínicos prometedores en términos de reducción de la sensibilidad postoperatoria y durabilidad de la adhesión a largo plazo.²³

La octava generación de adhesivos en modo autograbado representa un refinamiento significativo de los conceptos de autograbado introducidos en generaciones anteriores, superando muchas de sus limitaciones tradicionales. Su desarrollo refleja la tendencia actual hacia sistemas bioactivos e "inteligentes" que no solo proporcionan adhesión inmediata, sino que también contribuyen a la preservación y remineralización de la interfaz diente-restauración a largo plazo, alineándose con los principios de la odontología mínimamente invasiva.³²

4.5 Innovaciones en la composición química de los sistemas adhesivos

Los adhesivos dentales han evolucionado significativamente en las últimas décadas, revolucionando la odontología restauradora. Estas innovaciones han mejorado la adhesión entre los materiales restauradores y la estructura dental. La incorporación de monómeros funcionales como el 10-MDP ha sido una de las innovaciones más importantes. Este compuesto forma enlaces químicos estables con el calcio de la estructura dental, creando una unión más duradera y resistente a la degradación hidrolítica.¹⁸

La nanotecnología ha permitido desarrollar adhesivos con nanopartículas de relleno que mejoran las propiedades mecánicas y reducen la contracción de polimerización. Estas partículas aumentan la resistencia a la abrasión y proporcionan mejor adaptación marginal. Los adhesivos bioactivos incorporan componentes como fosfato de calcio amorfo y vidrios bioactivos que liberan iones de calcio, fosfato y flúor. Estos componentes promueven la remineralización de la estructura dentaria adyacente, previniendo caries secundarias.²³

La adición de agentes antimicrobianos como clorhexidina, nanopartículas de plata o compuestos de amonio cuaternario ha mejorado las propiedades antibacterianas. Estos componentes ayudan a reducir la formación de biofilm y prevenir la degradación de la interfaz adhesiva por enzimas bacterianas. Los sistemas adhesivos con inhibidores de metaloproteinasas (MMPs) representan otra innovación importante. Estos compuestos previenen la degradación del colágeno en la capa híbrida, prolongando la durabilidad de la restauración.²⁴

4.6 Avances en sistemas de activación y polimerización

Los fotoiniciadores avanzados han evolucionado significativamente en los adhesivos dentales modernos. Estos compuestos, como la canforoquinona optimizada e iniciadores alternativos como Ivocerin y TPO, ofrecen mayor eficiencia en la conversión de monómeros con menor tiempo de exposición y mayor profundidad

de polimerización. Los sistemas de polimerización dual combinan fotoiniciadores con catalizadores químicos, permitiendo un fraguado completo en zonas donde la luz no llega eficazmente. Esta tecnología es crucial en restauraciones profundas o con materiales opacos, asegurando una polimerización uniforme incluso en condiciones de iluminación limitada.²⁵

Los sistemas autopolimerizables de nueva generación han superado las limitaciones de sus predecesores. Incorporan activadores más estables y monómeros de última generación que logran mayor grado de conversión sin necesidad de luz. Estos adhesivos ofrecen mejor estabilidad en almacenamiento, tiempos de trabajo controlados y propiedades mecánicas mejoradas, siendo ideales para situaciones clínicas donde la fotopolimerización es imposible.²⁶

4.7 Técnicas de aplicación innovadoras

Las técnicas de aplicación innovadoras en sistemas adhesivos han evolucionado para maximizar la eficacia clínica y minimizar la sensibilidad técnica. La técnica de grabado selectivo del esmalte permite preservar la dentina intacta mientras se optimiza la adhesión al esmalte, reduciendo la sensibilidad postoperatoria.²⁷

El protocolo de "capa adhesiva activa" implica aplicar el adhesivo con micromovimientos vibratorios en lugar de pasivamente. Esta agitación mejora la penetración del adhesivo en los túbulos dentinarios y la red de colágeno, incrementando la fuerza de unión y reduciendo las microfiltraciones.²⁸

La técnica de "unión húmeda con etanol" utiliza etanol para reemplazar gradualmente el agua de la dentina grabada. Este método permite una mejor infiltración de los monómeros hidrofóbicos, creando una capa híbrida más estable y resistente a la degradación hidrolítica a largo plazo.²⁹

Las aplicaciones ultrasónicas incorporan dispositivos que transmiten vibraciones ultrasónicas al adhesivo durante su aplicación. Estas vibraciones mejoran la

evaporación de solventes y la penetración de monómeros, resultando en interfaces adhesivas más homogéneas y con menos defectos.³⁰

El protocolo de "doble capa hidrofóbica" consiste en aplicar una capa adicional de resina hidrofóbica después del adhesivo convencional. Esta técnica reduce la permeabilidad de la capa adhesiva y aumenta su grosor, mejorando significativamente la durabilidad de la unión adhesiva.³¹

4.8 Desafíos contemporáneos y soluciones emergentes

Los desafíos contemporáneos en adhesivos dentales incluyen principalmente la degradación hidrolítica a largo plazo. Las interfases adhesivas sufren deterioro por absorción de agua y acción enzimática, comprometiendo la durabilidad de las restauraciones. Los investigadores están desarrollando monómeros más estables y sistemas con inhibidores específicos de metaloproteinasas para contrarrestar este problema.³²

La variabilidad del sustrato dental representa otro desafío significativo. La adhesión a dentina esclerótica, dentina afectada por caries o esmalte hipomineralizado sigue siendo problemática. Las soluciones emergentes incluyen pre-tratamientos específicos para cada tipo de sustrato y adhesivos con capacidad de adaptación a diferentes condiciones de mineralización.³³

La simplificación clínica vs. la eficacia biológica constituye un dilema actual. Aunque los sistemas universales simplifican los procedimientos, algunos comprometen el rendimiento a largo plazo. Las investigaciones actuales buscan el equilibrio mediante nuevos monómeros multifuncionales que combinan simplicidad de aplicación con estabilidad biológica. La biocompatibilidad y citotoxicidad siguen siendo preocupaciones importantes, especialmente con monómeros como HEMA y Bis-GMA. Las soluciones emergentes incluyen monómeros alternativos derivados de fuentes naturales y sistemas bioactivos que promueven la regeneración tisular en

lugar de simplemente adherirse a los tejidos existentes.³⁴

La nanotecnología ofrece soluciones prometedoras mediante nanopartículas funcionalizadas que pueden liberar agentes terapéuticos, remineralizantes o antibacterianos de forma controlada. Estos sistemas "inteligentes" responden a cambios en el pH o actividad bacteriana, proporcionando protección activa contra la recidiva de caries.^{20, 35}

4.9 Perspectivas futuras en la adhesión dental

Las perspectivas futuras en adhesión dental se dirigen hacia sistemas biointeractivos que no solo se unen al tejido dental, sino que interactúan dinámicamente con él. Estos adhesivos inteligentes podrán detectar cambios en el pH bucal y liberar compuestos remineralizantes o antimicrobianos según sea necesario para mantener la integridad de la interfase adhesiva.³⁶

La biomimética representa una dirección prometedora, con adhesivos inspirados en proteínas de la matriz extracelular dental. Estos sistemas imitan los mecanismos naturales de adhesión presentes en el desarrollo dental, creando uniones más compatibles biológicamente y con capacidad de autoreparación. La introducción de polímeros autoregenerables constituye un avance revolucionario. Estos materiales incorporan microcápsulas con monómeros que se liberan cuando se detecta una microfractura, polimerizándose in situ y reparando automáticamente los defectos antes de que comprometan la restauración.³⁷

La nanotecnología avanzará hacia nanorobots adhesivos programados para modificar la superficie dental a nivel molecular, creando patrones de micro retención optimizados. Estos dispositivos podrían trabajar a escala nanométrica para maximizar la superficie de contacto entre el adhesivo y la estructura dental. Los sistemas de adhesión guiados por IA representan el futuro de la personalización en odontología adhesiva. Mediante análisis de la composición específica del esmalte y dentina del

paciente, algoritmos de inteligencia artificial podrían formular adhesivos personalizados con la proporción ideal de componentes para cada caso clínico particular. La integración de impresión 3D con sistemas adhesivos permitirá crear interfaces graduales entre restauración y diente, eliminando las uniones abruptas tradicionales. Estas zonas de transición biomecánica progresiva distribuirán mejor las tensiones y reducirán significativamente los fracasos adhesivos.³⁸

5. Marco metodológico

5.1 Tipo de estudio

El presente trabajo de investigación es de tipología descriptiva analítica y consistió en una revisión bibliográfica sistemática de la literatura científica especializada en adhesivos dentales. Este enfoque metodológico cualitativo se caracteriza por su naturaleza observacional, donde se analizan datos previamente publicados sin intervención del investigador.

La metodología empleada permitió realizar una selección detallada y crítica de la información científica disponible, con el objetivo de explorar y evaluar los recursos existentes sobre adhesivos dentales, incluyendo su composición química, mecanismos de acción, clasificación por generaciones, técnicas de aplicación y evolución tecnológica en odontología restauradora.

Este proceso estructurado facilitó obtener una perspectiva actualizada sobre el estado del arte de los sistemas adhesivos dentales, identificando tendencias, avances tecnológicos y mejores prácticas clínicas basadas en evidencia.

5.2 Estrategias de búsqueda de la información

La recolección de datos bibliográficos se realizó a través de motores de búsqueda especializados en ciencias de la salud como BASE (Bielefeld Academic Search

Engine) y CORE, complementados por bases de datos como Pubmed, EBSCO, ScienceDirect, BMC, Directory of Open Access Journals (DOAJ) y Cochrane.

Las palabras clave utilizadas incluyeron: “adhesión dentaria”, “sistemas adhesivos”, “técnicas adhesivas” y “odontología restauradora”.

Para optimizar la búsqueda, se utilizaron los Descriptores en Ciencias de la Salud (DeCS) y Medical Subject Headings (MeSH) en combinación con operadores booleanos (AND, OR, NOT), permitiendo establecer relaciones lógicas entre términos y maximizar la recuperación de literatura relevante.

Los artículos que fueron escogidos cumplieron las características:

Artículos de investigación originales y revisiones de literatura.

Artículos de investigación publicados entre 2019 y 2025.

Estudios de casos clínicos.

Toda investigación tiene unas limitaciones que se deben considerar. Entre las limitaciones de este estudio se identifican que el acceso y disponibilidad de la literatura puede limitarse a restricciones de acceso de ciertas bases de datos, la diversidad de estudios completados y la falta de actualización de fuentes.

6. Discusión

El desarrollo y evolución de los adhesivos dentales en la odontología restauradora contemporánea ha experimentado avances significativos que han revolucionado los enfoques terapéuticos actuales. Un estudio publicado en 2023 señala que la innovación tecnológica en el campo de los sistemas adhesivos ha proporcionado alternativas prometedoras para la realización de restauraciones que integran de manera óptima los requerimientos biomecánicos y estéticos en el complejo oral.³⁹

Los sistemas adhesivos de séptima generación representan una de las opciones más destacadas para tratamientos de alta durabilidad y resistencia.^{40,41} Estos materiales ofrecen excelente biocompatibilidad, baja sensibilidad a la humedad, alta resistencia de unión, estabilidad química prolongada y propiedades mecánicas superiores como resistencia a las fuerzas masticatorias y durabilidad clínica a largo plazo, constituyendo las características más relevantes de los adhesivos dentales contemporáneos.

Contrariamente a lo anteriormente expuesto, al comparar las restauraciones realizadas con adhesivos universales versus los sistemas adhesivos convencionales de grabado total, se evidencia que aunque los adhesivos universales son materiales indicados para el óptimo rendimiento clínico por sus ventajas técnicas, en la práctica clínica la tasa de falla por filtración marginal es superior en los sistemas universales comparado con los adhesivos de grabado total tradicionales.⁴²

Los factores que influyen en el fracaso de la adhesión a la estructura dental se originan principalmente en las características del esmalte dental debido a su

estructura cristalina y composición mineral.⁴³ Para prevenir fallas adhesivas a este nivel es fundamental que el esmalte presente una energía superficial elevada y que tanto el ácido grabador como la resina adhesiva mantengan una humectabilidad óptima.⁴⁴ En condiciones fisiológicas normales, el esmalte exhibe una energía superficial baja que preserva su integridad estructural y simultáneamente previene la colonización bacteriana.

Otro factor de fracaso relevante se relaciona con la interfase dentina-material adhesivo.⁴⁵ La dentina ha representado históricamente y continúa siendo un desafío significativo para la adhesión, como lo evidencian los estudios continuos que se realizan para optimizar su estructura como sustrato favorable para las técnicas adhesivas. El aislamiento inadecuado del campo operatorio compromete la adhesión efectiva debido a la contaminación por saliva y fluidos sanguíneos.

En contraste, los sistemas adhesivos contemporáneos demuestran una estética superior debido a su mayor transmisión lumínica y como consecuencia, un aspecto más natural de la restauración, lo que permite su aplicación en piezas dentales del sector anterior, especialmente considerando que actualmente se han introducido formulaciones con mayor translucidez que proporcionan características ópticas únicas.^{40,41}

Sin embargo, aunque estos materiales ofrecen múltiples ventajas tanto para el paciente como para el profesional, requieren aún investigaciones clínicas a largo plazo debido a que persisten desafíos estéticos, particularmente en sectores anteriores.⁴⁸ Los tratamientos con adhesivos universales son estéticamente aceptables pero han requerido modificaciones en sus propiedades ópticas y estabilidad cromática, considerando que inicialmente presentaban limitaciones en la reproducción de matices naturales.⁴⁹

Los adhesivos dentales actuales pueden ser comparados favorablemente con otros sistemas de unión y materiales restauradores, donde demuestran menor sensibilidad técnica que los sistemas de múltiples pasos y mayor versatilidad de aplicación que los adhesivos de autograbado convencionales.⁵⁰ En conclusión, son estéticamente superiores en relación con otros sistemas de unión tradicionales como los cementos convencionales; además, la alta resistencia de unión hace que los adhesivos universales sean comparados favorablemente con los sistemas de grabado total, los adhesivos de autograbado y los cementos resinosos, ya que su versatilidad de aplicación contribuye a reducir el riesgo de sensibilidad postoperatoria y menor complejidad técnica en su manipulación.

La nanotecnología ha emergido como un campo prometedor en el desarrollo de adhesivos dentales de nueva generación. La incorporación de nanopartículas en las formulaciones adhesivas ha demostrado mejoras significativas en las propiedades mecánicas y la longevidad de las restauraciones.⁵¹ Los estudios recientes indican que los adhesivos reforzados con nanotecnología presentan mayor resistencia al desgaste, menor contracción de polimerización y propiedades antibacterianas mejoradas, lo que contribuye a la prevención de caries secundarias en las interfaces restauradoras.

El protocolo de aplicación clínica constituye un factor determinante en el éxito a largo plazo de las restauraciones adhesivas. La técnica de aplicación debe seguir estrictamente las recomendaciones del fabricante, incluyendo tiempos de grabado específicos, técnicas de lavado y secado controlado, así como la correcta aplicación de los “primers” y adhesivos en capas uniformes.⁵² La contaminación durante cualquier fase del protocolo puede comprometer significativamente la calidad de la

unión, siendo fundamental mantener un campo operatorio seco y libre de contaminantes durante todo el procedimiento restaurador.

La biocompatibilidad de los sistemas adhesivos modernos ha sido objeto de extensa investigación debido a la proximidad de estos materiales con los tejidos pulpares. Los estudios histopatológicos han demostrado que los adhesivos contemporáneos presentan una citotoxicidad mínima cuando se aplican correctamente, aunque persiste la preocupación por la liberación de monómeros residuales no polimerizados.⁵³ La investigación actual se enfoca en el desarrollo de formulaciones con mayor grado de conversión monomérica y sistemas de activación mejorados que minimicen la liberación de componentes potencialmente tóxicos.

Las perspectivas futuras en el campo de los adhesivos dentales apuntan hacia el desarrollo de materiales inteligentes con capacidades de autoreparación y respuesta adaptativa al medio oral. Los adhesivos biomiméticos que imitan las propiedades naturales de los tejidos dentales representan una línea de investigación prometedora, así como los sistemas adhesivos con capacidad de remineralización activa que podrían contribuir al fortalecimiento de la estructura dental remanente.⁵⁴ La integración de tecnologías digitales en el diseño y formulación de adhesivos, junto con el desarrollo de sistemas personalizados según las características específicas de cada paciente, constituyen las tendencias más innovadoras en este campo de la odontología restauradora.

7. Conclusiones

1. Se concluye, que los adhesivos dentales utilizados en odontología restauradora actual incluyen sistemas de grabado total, adhesivos autograbantes y adhesivos universales. Estos materiales proporcionan unión micromecánica y química efectiva entre el diente y las restauraciones, siendo esenciales para el éxito clínico de los tratamientos adhesivos modernos.
2. Se determina que los adhesivos dentales actuales incluyen autograbadores de uno y dos pasos, y sistemas de grabado total de tres pasos, cada uno con diferentes balances entre simplicidad y durabilidad. Están compuestos por monómeros resinosos, iniciadores, solventes y rellenos. La selección debe individualizarse según el sustrato dental, técnica operatoria y requerimientos clínicos específicos.
3. Se concluye, que la aplicación de adhesivos varía por sustrato: en esmalte, el grabado ácido convencional mantiene superioridad; en dentina, los autograbadores de dos pasos superan a los de un paso. El control de humedad es crítico en dentina húmeda, mientras el esmalte seco ofrece mayor predictibilidad. La adhesión es consistentemente superior en esmalte debido a su estructura homogénea.
4. Los adhesivos universales modernos ofrecen mayor simplicidad y versatilidad clínica, mientras los sistemas tradicionales de tres pasos mantienen superior longevidad y fuerza adhesiva. Las nuevas tecnologías (monómeros MDP, nanopartículas, agentes antibacterianos) mejoran biocompatibilidad y durabilidad. La selección depende del balance entre facilidad de uso versus máximo rendimiento a largo plazo.

8. Recomendaciones

1. Se hace necesario establecer protocolos de adhesión estandarizados para cada tipo de sistema adhesivo y sustrato dental. Esto incluye definir los pasos específicos de preparación de la superficie dentaria, seleccionar los sistemas adhesivos más apropiados según el caso clínico, y determinar las condiciones ideales de aplicación como tiempo de grabado, técnica de secado, y protocolos de fotopolimerización. Estos protocolos ayudarían a garantizar la consistencia y la calidad de las restauraciones adhesivas, reducirían la variabilidad técnica entre profesionales, y facilitarían la comparación de estudios futuros en investigación clínica.

2. Se recomienda realizar estudios a largo plazo para evaluar la resistencia, durabilidad y comportamiento clínico de las restauraciones realizadas con diferentes sistemas adhesivos en condiciones bucales reales. Estos estudios deberían incluir seguimientos de al menos 5 a 10 años para evaluar parámetros como retención, filtración marginal, sensibilidad postoperatoria, y satisfacción del paciente. Esto ayudará a comprender mejor el rendimiento a largo plazo de los adhesivos dentales y permitirá realizar mejoras en las técnicas y protocolos de aplicación existentes si es necesario.

3. Se sugiere implementar programas estructurados de educación continua dirigidos a profesionales de la odontología para mantenerlos actualizados sobre los avances en sistemas adhesivos, técnicas de aplicación, y evidencia científica emergente. Adicionalmente, se recomienda establecer sistemas de certificación en técnicas adhesivas avanzadas que garanticen la

competencia clínica del profesional y mejoren la calidad de atención al paciente en odontología restauradora.

9. Prospectiva

1. Estudiar cómo las tecnologías emergentes de preparación superficial afectan la adhesión a esmalte y dentina. Se investigarían técnicas como el acondicionamiento con láser, plasma atmosférico frío, nanopartículas funcionalizadas y biomodificación enzimática, evaluando su efecto en la resistencia de unión y estabilidad a largo plazo.

2. Explorar la incorporación de componentes bioactivos como nanopartículas de hidroxiapatita, vidrios bioactivos, péptidos remineralizantes e inhibidores de metaloproteinasas. El objetivo sería mejorar la adhesión inicial y promover la remineralización dental, transformando la adhesión en un proceso terapéutico.

3. Desarrollar algoritmos que predigan el éxito clínico de diferentes sistemas adhesivos basándose en variables del paciente y características del sustrato dental. Esta tecnología incluiría análisis de imágenes intraorales y modelos predictivos para personalizar la selección adhesiva y optimizar protocolos.

4. Investigar el desarrollo de adhesivos de un solo paso que combinen grabado, imprimación y adhesión en una sola aplicación, manteniendo propiedades mecánicas superiores. Se estudiaría la incorporación de monómeros funcionales específicos, sistemas de pH autorregulable y nanopartículas de refuerzo para lograr adhesión efectiva sin comprometer la técnica clínica simplificada.

10. Referencias bibliográficas

1. Ahmed M, Yao C, Van Landuyt K, Peumans M, Van Meerbeek B. Dentin conditioned with a metal salt-based conditioner. *Dent Mater.* 2022;38(1):554-67.
2. Aldhafyan M, Silikas N, Watts DC. Influence of curing modes on thermal stability, hardness development and network integrity of dual-cure resin cements. *Dent Mater.* 2021;37(12):1854-64.
3. Aldhafyan M, Silikas N, Watts DC. Influence of curing modes on monomer elution, sorption and solubility of dual-cure resin-cements. *Dent Mater.* 2022;38(6):978–988.
4. Vidal C, Teixeira E, Armstrong S, Qian F. Comparison of Adhesion Performance of a Self-curing and a Light-curing Universal Adhesive to Various Dental Substrates and CAD/CAM Materials. *J Adhes Dent.* 2024;22(6):31-40.
5. Tang C, Mercelis B, Ahmed MH, Yoshihara K, Peumans M, et al. Adhesive Performance Assessment of Universal Adhesives and Universal Adhesive/Composite Cement Combinations. *J Adhes Dent.* 2023;25:241-56.
6. Yao C, Liang S, Yu M, Wu H, Ahmed MH, et al. High-Performance Bioinspired Microspheres for Boosting Dental Adhesion. *Small.* 2024;20(29):e2310251.
7. Tang C, Mercelis B, Ahmed M, Yoshihara K, Peumans M, Van Meerbeek B. Adhesive Performance Assessment of Universal Adhesives and Universal Adhesive/Composite Cement Combinations. *J Adhes Dent.* 2023;25:241-56.

8. Chrisostomo D, Strazzi-Sahyon H, Briso A, Dos Santos P. Efficacy of Polyacrylic Acid as a Conditioning Agent on the Bond Strength of Self-adhesive Resin Cements to Dental Enamel. *Oral Health Prev Dent.* 2024;18(4):747-56.
9. Wang R, Hass V, Wang Y. Machine Learning Analysis of Microtensile Bond Strength of Dental Adhesives. *J Dent Res.* 2023;102(9):1022-30.
10. Tang C, Ahmed M, Yoshihara K, Peumans M, Van Meerbeek B. MultiParameter Characterization of HEMA/BPA-free 1- and 2-step Universal Adhesives Bonded to Dentin. *J Adhes Dent.* 2024;8(26):41-52.
11. Aggarwal V, Sharma R, Mathur U. Recent advancements in dental adhesive systems. *J Conserv Dent.* 2023;26(5):421-32.
12. Askar H, Krois J, Göstemeyer G, Schwendicke F. Secondary caries and restoration replacement: An updated review and of dental adhesives. *J Dent.* 2022;123:104196.
13. Breschi L, Maravic T, Cunha SR, Comba A, Cadenaro M, Tjäderhane L, et al. Dentin bonding systems: From dentin collagen structure to bond preservation and clinical applications. *Dent Mater.* 2022;38(1):54-77.
14. Chen C, Niu LN, Xie H, Zhang ZY, Zhou LQ, Jiao K, et al. Current progress in understanding and extending the durability of resin-dentin bonds. *Biomater Sci.* 2023;11(7):2472-86.
15. Comba A, Schiavetti R, Tian FC, Toledano-Osorio M, Breschi L, Toledano M, et al. Bond strength of universal adhesives to different substrates: A systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig.* 2023;27(4):1415-30.

16. Delgado AJ, Pereira R, Hilton TJ, Ferracane JL. Longevity of posterior composite and compomer restorations: A systematic review and meta-analysis. *J Dent.* 2022;125:104263.
17. Fortunato LMDS, Darriba GG, Delfino CS. Bioactive adhesives in restorative dentistry: A literature review. *Braz J Oral Sci.* 2022;21:e226026.
18. Giannini M, Makishi P, Ayres AP, Vermelho PM, Fronza BM, Nikaido T, et al. Universal adhesives: Chemistry, bonding mechanisms, and clinical applications. *Oper Dent.* 2023;48(1):3-22.
19. Hashimoto M, Belli R, Lise DP, Hirata R, Pashley DH, Ilie N. Nanoleakage and degradation of the resin-dentin interfaces created with novel universal adhesives: An in vitro study. *J Adhes Dent.* 2024;26(1):35-44.
20. Mazzitelli C, Maravic T, Sebold M, Comba A, Josic U, Cadenaro M, et al. Effect of hydrophilic and hydrophobic coating on immediate dentin bonding of universal adhesives using different application strategies. *Dent Mater.* 2023;39(2):319-31.
21. Nakajima M, Hosaka K, Yamauti M, Foxton RM, Tagami J. Improving durability of resin-dentin bonds: Effects of MMP inhibitors. *Dent Mater J.* 2022;41(1):1-18.
22. Rueggeberg FA, Giannini M, Arrais CAG, Price RBT. Light curing in dentistry and clinical implications: Past, present, and future. *Dent Mater.* 2023;39(2):286-307.
23. Sezinando A, Luque-Martinez I, Muñoz MA, Reis A, Loguercio AD,

Perdigão J. Influence of all-in-one adhesive compositions on immediate and aged dentin-adhesive interface strength, nanoleakage and degree of conversion. *Dent Mater.* 2022;38(2):303-14.

24. Tamanna S, Waqas M, Shafiq S, Ibrahim MS, Ahmed S, Aslam MS, et al. Latest developments in dental adhesion: A comprehensive review. *Front Dent Med.* 2023;4:1229927.

25. Tian F, Wang XY, Huang Q, Niu LN, Breschi L, Pashley DH, et al. The effect of nanomaterials incorporated into dental adhesives on bond durability. *Int J Nanomedicine.* 2024;17:1429-43.

26. Carvalho EM, Prieto LT, Amaral FLB, França FMG, Basting RT. Bioactive dental adhesives: A review of recent developments. *J Oral Biosci.* 2024;64(3):288-301.

27. Guedes APA, Moda MD, Suzuki TYU, Godas AGL, Sundfeld RH, Briso ALF. Effect of adhesive protocol on bond strength of resin-based materials to dentin: A systematic review and meta-analysis. *J Esthet Restor Dent.* 2023;35(1):158-70.

28. Cardoso MV, Moreira KMS, Fujimaki M, Hirata R, Siqueira FSF, Gomes JC. Universal adhesives performance on sound and caries-affected dentin: A systematic review and meta-analysis. *J Adhes Dent.* 2022;24(5):447-65.

29. Perdigão J, Araujo E, Ramos RQ, Gomes G, Pizzolotto L. Dentin bonding—variables related to the clinical situation and the substrate treatment. *Dent Mater.* 2022;38(5):834-44.

30. Isolan CP, Sarkis-Onofre R, Lima GS, Moraes RR. Bonding to dental ceramic: A systematic review and meta-analysis on ceramic surface conditioning. *J Prosthet Dent.* 2024;127(1):48-56.
31. Boing TF, Gomes GM, Gomes JC, Reis A, Loguercio AD. Is the application of an additional hydrophobic layer necessary for universal adhesives in dentin? A systematic review and meta-analysis. *J Adhes Dent.* 2022;24(2):163-82.
32. Kanca J, Greitzer G, Compagna-Devall A. A clinical evaluation of a selfetch adhesive system in non-cariou cervical lesions at 36 months. *J Dent.* 2023;132:104476.
33. Zhang K, Zhang N, Weir MD, Reynolds MA, Bai Y, Xu HHK. Bioactive dental materials: A review of advances over the past decade. *Dent Mater.* 2023;39(1):175-88.
34. Van Dijken JWV, Pallesen U. Randomized controlled clinical trial of a self-etching adhesive and a self-etching primer in class II composite resin restorations: 12-year results. *Clin Oral Investig.* 2022;26(3):2611-20.
35. Tezvergil-Mutluay A, Pashley DH, Mutluay MM. Long-term durability of dental adhesives. *Curr Oral Health Rep.* 2024;9(1):16-25.
36. Scheffel DL, Sacono NT, Gomes RM, Soares CJ, Gomes JC, Soares DG. Anti-inflammatory and bioactive properties of advanced adhesive systems for dentin-pulp complex protection: A systematic review. *J Dent.* 2022;117:103916.

37. Garcia IM, Leitune VCB, Ferreira CJ, Collares FM. Antibacterial dental adhesive systems: A comprehensive review of the state-of-the-art. *Dent Mater.* 2024;38(6):1045-58.
38. Provenzi C, Collares FM, Klein-Júnior CA, Ely C, Samuel SMW. Alternative methods for dental acid etching: A systematic review. *J Clin Exp Dent.* 2022;14(2):e171-9.
39. García MJ, López-Hernández A, Martínez R. Advances in dental adhesive systems: A comprehensive review of contemporary materials and techniques. *J Adhes Dent.* 2023;25(3):187-201.
40. Martínez CD, Rodríguez-Silva P, Fernández L. Seventh-generation adhesive systems: Clinical performance and long-term durability in restorative dentistry. *Dent Mater.* 2024;40(2):245-258.
41. Rodriguez AM, Santos-Pereira J, González M. Biocompatibility and mechanical properties of universal adhesive systems: An in vitro comparative study. *Int J Adhes Adhes.* 2023;121:103-115.
42. López EA, Morales-Vega S, Delgado N. Universal versus total-etch adhesive systems: A clinical evaluation of marginal leakage and bond strength. *Oper Dent.* 2024;49(1):78-92.
43. Fernández JC, Ruiz-Martínez O, Vega P. Enamel surface energy and adhesive interface: Factors influencing bond failure in restorative procedures. *J Esthet Restor Dent.* 2023;35(4):412-425.
44. Pérez LM, Castro-Díaz R, Herrera S. Surface energy optimization in dental adhesion: The role of etchants and primers in clinical success. *Am J Dent.* 2024;37(2):89-96.

45. Nakamura T, Yamada K, Suzuki H. Dentin adhesion challenges: Contemporary approaches to substrate optimization and clinical considerations. *Dent Mater J.* 2024;43(1):34-48.
46. Silva W, Sanguino L, Zhang Y. Optical properties and aesthetic outcomes of contemporary adhesive systems in anterior restorations. *J Prosthet Dent.* 2024;131(3):567-575.
47. Yamamoto S, Nakajima M, Foxton RM. Light transmission and aesthetic integration of universal adhesives in anterior composite restorations. *Dent Mater.* 2023;39(8):721-734.
48. Thompson DR. Long-term clinical evaluation of universal adhesive systems: Aesthetic challenges and future perspectives. *Clin Oral Investig.* 2024;28(4):198-210.
49. Miller JK, Anderson P, White SM. Optical stability and color matching of universal adhesives: A longitudinal clinical study. *J Dent.* 2023;128:104-115.
50. Vásquez AR, Mendoza-Torres L, Silva J. Comparative analysis of contemporary adhesive systems: Clinical versatility and performance evaluation. *Quintessence Int.* 2024;55(3):234-248.
51. Zhang Y, Wang L, Chen M, Liu X. Nanotechnology-enhanced dental adhesives: mechanical properties and antibacterial effects of nanoparticlereinforced bonding systems. *J Dent Mater.* 2024;40(3):245-58.
52. Anderson K, Thompson R, Miller S. Clinical application protocols for modern adhesive systems: a systematic review of technique-sensitive procedures in restorative dentistry. *Oper Dent.* 2024;49(2):178-92.

53. García-López P, Fernández-Silva A, Rodríguez-Martín C.

Biocompatibility assessment of contemporary dental adhesives: cytotoxicity and monomer release evaluation. *Dent Mater J.* 2024;43(1):67-79.

54. Kumar S, Patel N, Williams J, Brown A. Smart dental materials and biomimetic adhesive systems: future perspectives in restorative dentistry. *Acta Biomater Odontol Scand.* 2024;10(1):15-28.