

Racionalización y efectividad de la adhesión al óxido de zirconio: revisión narrativa

Tomás Giraldo Betancur¹. Mateo Posada Castaño². Sebastián Muñoz Zapata³

1. Residente de posgrado Rehabilitación Oral Universidad CES. 2. Docente de posgrado Rehabilitación Oral Universidad CES. 3. Jefe Posgrado de Rehabilitación Oral Universidad CES.

Universidad CES, Facultad de Odontología, Posgrado de Rehabilitación Oral, Medellín, Colombia.

Abstract

Introducción: La adhesión del óxido de zirconio a los tejidos dentales y otros materiales sintéticos es desafiante debido a su inercia química y resistencia a agentes químicos. Existen diversos métodos y protocolos para lograr una adhesión química duradera, sin que ninguno sea universalmente aprobado, generando una confusión en los clínicos. Sin embargo, lo más aceptado es que la combinación de los tratamientos mecánicos y químicos previos a la cementación es lo que genera mejores valores adhesivos y logra una durabilidad en la unión. La cementación adhesiva con cementos resinosos luego del tratamiento de grabado con ácido fluorhídrico y la silanización en las cerámicas vítreas como es el disilicato de litio se considera el gold standard en cuanto a la adhesión de restauraciones cerámicas y debido a esto, se utilizó dicho material para comparar resultados de adhesión con el óxido de zirconio.

Materiales y Métodos: Se realizó una revisión de literatura con artículos de los últimos años de relevancia científica en cuanto a temas que abarcan la adhesión al óxido de zirconio, resultado de una búsqueda en diferentes bases de datos indexadas como PubMed.

Resultados: Se encontraron 71 artículos, en los cuales se mencionan todos los aspectos relacionados a la adhesión al óxido de zirconio

Conclusiones: El uso de tratamiento mecánico por medio del arenado con óxido de aluminio en conjunto con el tratamiento químico de una imprimación de MDP puro produce los valores de resistencia más altos y genera una unión estable y duradera. Los procedimientos para adherirse al óxido de zirconio convencional son también los recomendados para adherirse al óxido de zirconio translúcido. No se recomienda usar MDP en un sistema multicomponente, ya que los diversos componentes de estas formulaciones pueden afectar y reducir significativamente los valores adhesivos en el tiempo. Además, se demostró que la resistencia al cizallamiento del óxido de zirconio es comparable e igual de buena a la del disilicato de litio.

Palabras clave: óxido de zirconio, 10-MDP, monómeros fosfatados, arenado, óxido de aluminio, adhesión, unión química, unión micro-mecánica, cerámicas vítreas, silanos, cementación adhesiva.

Introducción

La adhesión, definida como la unión íntima de dos superficies, es un fenómeno muy importante en odontología restauradora. Se divide en adhesión mecánica, que crea una superficie rugosa para una unión física, y adhesión química, que modifica a nivel molecular la superficie para una unión fuerte. A menudo, se busca combinar ambas para una unión duradera en restauraciones dentales, considerando factores como la ubicación y los materiales utilizados (1). La introducción de sistemas de unión adhesiva y cementos de resina en odontología permite a los profesionales mejorar la retención de coronas y lograr resultados estéticos óptimos en rehabilitaciones orales. La clave para el éxito es una fuerte unión química entre la cerámica, el cemento y el diente. Esto se ve influenciado por factores como la humectabilidad de la cerámica, su rugosidad, la composición de la resina y la prevención de la contaminación durante los procedimientos. La adhesión del óxido de zirconio (ZrO_2) a los tejidos dentales y otros materiales sintéticos es desafiante debido a su inercia y resistencia a agentes químicos. Se utilizan métodos mecánicos y adhesivos para lograr la unión en cerámicas que contienen vidrio o son a base de sílice. La adhesión mecánica implica crear una conexión micromecánica con ácido fluorhídrico para modificar la superficie de la cerámica. La adhesión química se logra con compuestos bifuncionales como los silanos, que mejoran la unión y la humectabilidad de las superficies cerámicas. Los métodos tradicionales de adhesión utilizados en cerámicas vítreas no son aplicables al ZrO_2 debido a su falta de sílice en la estructura, lo que impide el grabado y el uso de silanos para lograr una unión mecánica y química. Para lograr una unión fuerte y duradera, es crucial que la superficie de unión esté rugosa, activada químicamente y libre de contaminantes. Aunque hay varias opciones para lograr dicho fin, es importante considerar que en condiciones orales, la adhesión puede verse comprometida. Por lo tanto, en situaciones críticas, la elección del método adhesivo debe enfocarse en dos aspectos clave: Una alta resistencia inicial de adhesión y a largo plazo en la interfaz ZrO_2 -resina (11).

Debido a la diversidad de métodos mecánicos y químicos informados en la literatura en relación a la adhesión al ZrO_2 , todavía no se ha establecido un protocolo adhesivo que garantice resultados consistentes y aceptados universalmente. Esto ha llevado a confusión entre los profesionales al momento de cementar restauraciones de este tipo. Por lo tanto, el objetivo de esta revisión es destacar los aspectos más relevantes en relación a la adhesión, explorar posibles protocolos que puedan lograr una unión química genuina, duradera a largo plazo que contribuya a la supervivencia de las restauraciones de ZrO_2 y realizar una comparación de los valores adhesivos de este material con el disilicato de litio, que es el material que se utiliza como control debido a su excelente adhesión.

¿Qué es el óxido de zirconio?

Es un compuesto de zirconio oxidado que forma una cerámica policristalina sin matriz vítrea (2, 3). Puede existir en tres fases: monoclinica (hasta 1.170 °C), tetragonal (1.170-2.370 °C) y cúbica (temperaturas superiores a 2.370 °C). Cada fase tiene propiedades distintas. Cuando pasa de su fase tetragonal a la fase monoclinica al enfriarse, experimenta una deformación por cizallamiento y un aumento de volumen del 4%. Este aumento de volumen puede cerrar grietas y mejorar la resistencia a la fractura, un fenómeno conocido como endurecimiento por transformación. Los estímulos mecánicos, como la formación de grietas en la superficie, desencadenan esta transformación de fase debido a la acumulación de tensión en la punta de la grieta. El aumento de volumen genera una tensión de compresión, aumentando la resistencia a la fractura y dispersando la energía, deteniendo su propagación. Sin embargo, la propagación de la grieta puede reanudarse cuando la tensión es lo suficientemente alta. Para aprovechar este endurecimiento por transformación, es necesario estabilizar las fases tetragonal y cúbica a temperatura ambiente. Esto se logra mediante la aleación de la zirconia con óxidos de itrio, magnesio, cerio. El de itrio es la elección preferida debido a sus mejores propiedades mecánicas en comparación con otros óxidos. Esto mejora la capacidad del ZrO₂ para resistir la fractura y lo hace valioso en aplicaciones donde la resistencia a la fractura es crítica (3).

Clasificación del óxido de zirconio

Según su microestructura

Se clasifica en: (3)

- Óxido de zirconio totalmente estabilizado (FSZ): contiene principalmente la fase cúbica y requiere más de 8 moles de óxido de itrio para lograr esta estabilización completa.
- Óxido de zirconio parcialmente estabilizado (PSZ): La matriz es cúbica, pero también puede contener regiones en fase tetragonal o monoclinica en tamaño nanométrico.
- Policristales de óxido de zirconio tetragonal (TZP): Estos materiales están formados principalmente por fase tetragonal, que se encuentra estabilizada por la adición de itrio (Y-TZP). Es especialmente resistente y se utiliza en odontología debido a esta propiedad.

Según el contenido de óxido de itrio

Los policristales tetragonales estabilizados con itrio se pueden clasificar en función del porcentaje en moles de óxido de itrio, lo que afecta a sus propiedades mecánicas y ópticas (3).

- 3% de moles de itrio (3Y-TZP): Esta variante es la más opaca y resistente, con aproximadamente un 85-90% de su fase en estado tetragonal.
- 4% de moles de itrio (4Y-TZP): Contiene alrededor del 25% de fase cúbica, lo que le otorga algunas propiedades distintivas como una mayor translucidez en comparación con la variante de 3% de itrio.

- 5% de moles de itrio (5Y-TZP): Es mucho más translúcida en comparación con las otras dos variantes y contiene aproximadamente un 50% de fase cúbica. Esto le confiere propiedades ópticas especiales y una mayor translucidez, lo que puede ser deseable en ciertas aplicaciones, como en la odontología estética.

El porcentaje de itrio influye en el tamaño del grano y, por lo tanto, en las propiedades mecánicas y ópticas del material. La elección entre estas variantes dependerá de las necesidades específicas de la aplicación y las propiedades deseadas (3).

Limpieza de una superficie de zirconio contaminada y su efecto en los valores adhesivos

La eliminación de contaminantes es crucial para lograr una adhesión duradera en aplicaciones clínicas. En el caso del ZrO₂, la contaminación por saliva afecta negativamente la adhesión del cemento de resina, ya que los depósitos orgánicos de la saliva forman una capa que no se elimina fácilmente y reduce la energía de adhesión (4-5). En contraste, las cerámicas vítreas se pueden limpiar con ácido fosfórico al 37% después de la contaminación salival para restaurar la adhesión, aunque esto puede dejar un residuo que perjudica la resistencia de adhesión al cemento de resina (6). Garantizar una adhesión fiable entre el diente y el material restaurador requiere un enfoque cuidadoso y específico. Existen diversas técnicas y métodos para limpiar y eliminar los contaminantes orgánicos de las superficies de restauración antes de la cementación:

- **Arenado:** El arenado con partículas de óxido de aluminio es altamente efectivo para eliminar contaminantes salivales. Un tratamiento de 30 segundos puede restaurar la resistencia de adhesión a su valor original (6) y ha demostrado ser el método más efectivo, con una fuerza de adhesión al cizallamiento de 21 MPa, en comparación con otros métodos de limpieza (7).
- **Ivoclean:** Este es un limpiador universal alcalino extraoral que contiene una solución hipersaturada de partículas de zirconio. Funciona atrayendo los contaminantes de la superficie de la restauración hacia la solución debido al gradiente químico, eliminando los contaminantes. Es especialmente eficaz para eliminar fosfatos de la superficie cerámica, puesto que está diseñado para atraer y retenerlos de manera efectiva (4).
- **Katana Cleaner:** Este limpiador tiene un pH de 4,5 y se puede aplicar tanto extraoral como intraoral. Contiene una sal de MDP como ingrediente activo que actúa atrayendo y debilitando los contaminantes orgánicos. Los extremos hidrófobos de la molécula de MDP se adhieren a los contaminantes, mientras que las cabezas de fosfato hidrófilas los rodean, permitiendo su eliminación con agua (7).
- **ZirClean:** Es un limpiador alcalino con un pH muy alto (>13) debido al hidróxido de potasio. Su alcalinidad interrumpe los enlaces iónicos formados entre los contaminantes y la superficie del óxido de zirconio, lo

que facilita su eliminación (7). Neutraliza los ácidos de los contaminantes orgánicos y los elimina (8).

- **Ácido fluorhídrico:** Esta sustancia altamente reactiva interactúa con los contaminantes orgánicos y los disuelve de la superficie de óxido de zirconio. Después de su aplicación, se lavan los residuos con agua, logrando resultados satisfactorios con una fuerza de adhesión al cizallamiento de 19,1 MPa (7).
- **Hipoclorito de sodio:** Se compararon concentraciones de hipoclorito de sodio al 4% (irrigante endodóntico) y cloro doméstico con una concentración de 7,5%. Se observó que el aumento de la concentración de hipoclorito de sodio no tuvo un efecto significativo en la resistencia de la unión al cizallamiento. Además, se investigó con diferentes tiempos de aplicación (20 y 60 segundos), encontrando que el tiempo incrementa la de la unión de 14,7 a 16 MPa (7).
- **Ácido ortofosfórico:** Aunque este ácido elimina con éxito los contaminantes basados en el carbono, se observó que dejaba un residuo de contaminantes basados en el fósforo. Estos contaminantes compiten con los sitios de unión del MDP, lo que reduce la fuerza de adhesión entre el cemento de resina y la superficie del óxido de zirconio (6). En este caso, la fuerza de adhesión resultó ser la más baja entre todos los métodos de limpieza, con 10 MPa (7).

El MDP se emplea como medida preventiva contra la contaminación inicial en las superficies de óxido de zirconio. Si la contaminación salival ocurre después de la imprimación con MDP, el lavado con agua puede recuperar los valores originales de resistencia de adhesión (6).

Efecto del arenado en la fuerza de adhesión a diferentes tipos de óxido de zirconio

En las últimas dos décadas, se han propuesto múltiples métodos para mejorar la adhesión al ZrO_2 en odontología. Algunos enfatizan la unión resina-cerámica a nivel micromecánico, como el arenado con alúmina, mientras que otros se basan en la activación fisicoquímica de la superficie mediante partículas de alúmina recubiertas de sílice seguido de silanización (9). También se han investigado enfoques con grabado selectivo con láser, la irradiación láser, el tratamiento con llama, la deposición de silano y el uso de cementos con 10-MDP. Sin embargo, no hay un consenso sobre el protocolo óptimo para la adhesión al óxido de zirconio, lo que ha causado confusión en la comunidad odontológica respecto a qué cemento y método de acondicionamiento deben combinarse para la cementación (10). Estudios anteriores han mencionado que el arenado con alúmina es el tratamiento mecánico más popular para preparar la superficie de la zirconia. Este proceso implica el uso de partículas de óxido de aluminio para limpiar y aumentar la rugosidad de la superficie, lo que aumenta el enclavamiento mecánico, mejora los valores adhesivos, la humectabilidad de la superficie, la resistencia al cizallamiento y a la flexión y previene el envejecimiento a largo plazo (12, 18, 20, 21). Luego del arenado, se puede conseguir un aumento de la superficie en

aproximadamente un 80%. Esto proporciona más puntos de adhesión disponibles para una reacción química con los adhesivos. En odontología se utilizan diferentes tamaños de partículas para el arenado, generalmente en el rango de 30 a 250 μm . Es importante destacar que la rugosidad de la superficie solo contribuye a la adhesión a través de la retención micromecánica (11). La resistencia del ZrO_2 tras este proceso depende del equilibrio entre la formación de microfisuras y la acumulación de tensiones de compresión (19).

Por otra parte, el arenado con perlas de vidrio parece tener efectos diferentes en comparación con el arenado con óxido de aluminio. Las perlas de vidrio no parecen causar cambios visibles en la topografía y rugosidad superficial debido a que estas partículas tienen menor dureza que las partículas de alúmina y además, conducen a una resistencia de adhesión significativamente inferior en comparación con el arenado con óxido de aluminio después del envejecimiento (14, 15).

Otro de los métodos que se han analizado para la modificación de la superficie son los tratamientos triboquímicos, donde la superficie cerámica se somete a un arenado con partículas de óxido de aluminio modificadas con sílice, lo que resulta en inclusiones de sílice en las superficies cerámicas. Después del recubrimiento de sílice, puede ocurrir una unión química a través de una silanización. No obstante, no existe consenso sobre si el sílice está unido químicamente o simplemente está débilmente adherido (17). Este método es efectivo en cerámicas con base de vidrio infiltrado y su eficacia parece ser menor en las cerámicas policristalinas debido a su mayor dureza, lo que dificulta la impregnación del sílice en la superficie. Como resultado, los agentes de silano no se adhieren adecuadamente al ZrO_2 (16). Es posible que la capa de sílice solo se adhiera a través de uniones mecánicas y/o químicas secundarias (uniones de van der Waals), que son menos fuertes que las uniones covalentes entre el silano y el cemento de resina. En este caso, la absorción de agua en la interfaz entre las capas podría reducir la fuerza de adhesión de la capa de sílice. También es factible que la capa de sílice sea no uniforme en la superficie de adhesión, lo que podría resultar en una variación en la resistencia de adhesión (11).

Los valores adhesivos en el proceso de arenado del óxido de zirconio están influenciados por varios parámetros clave, que incluyen la morfología y el tamaño de las partículas, la duración, la distancia, la presión del arenado y el diámetro de la boquilla (9). Cuando se ajustan adecuadamente estos parámetros, se pueden lograr mejoras en la resistencia a la flexión. Es importante tener en cuenta que una transformación excesiva de fase tetragonal a monoclinica puede afectar negativamente a la morfología de la superficie y a las propiedades mecánicas del material. Por lo tanto, es fundamental encontrar un equilibrio óptimo en la configuración de estos parámetros para obtener resultados de adhesión deseables. La cantidad máxima aceptable de fase monoclinica, según la norma ISO 13356, es del 25%, para poder garantizar la calidad y la durabilidad de las restauraciones de óxido de zirconio (9). La fase monoclinica parece estar relacionada con el tamaño de partícula, sugiriendo la importancia de elegir el

tamaño adecuado de partículas de óxido de aluminio para obtener las propiedades deseadas en el ZrO₂ (32).

Un arenado con partículas de óxido de aluminio de 250 micras reduce significativamente la resistencia a la flexión y aumenta la fase monoclinica en un 10% y un arenado con partículas de óxido de aluminio de 50 micras aumenta la resistencia a la flexión y disminuye la fase monoclinica alrededor del 5%. En general, la resistencia a la flexión tiende a aumentar con el tamaño de las partículas de óxido de aluminio utilizadas, excepto en el caso de partículas de 250 micras, que reducen la resistencia.

Aunque se ha debatido si las nuevas generaciones de materiales alta translucidez requieren protocolos de adhesión diferentes debido a sus diferentes composiciones y propiedades físicas, la fuerza de adhesión en el ZrO₂ translucido (5Y) es similar a la del ZrO₂ convencional (3Y) bajo las mismas estrategias de adhesión (26, 30). Las superficies de los materiales translúcidos están cubiertas principalmente por una capa de óxido metálico. El monómero de fosfato (MDP) puede adherirse directamente a estas capas de óxido metálico en dichas superficies (25).

En cuanto al efecto del arenado con partículas de alúmina, se ha observado que reduce la resistencia a la flexión de los materiales translucidos en estudios anteriores, pero no se ha medido su impacto en la resistencia a la fractura de las coronas después de las pruebas de fatiga al ser cementadas con cementos resinosos. Investigaciones más recientes han encontrado que el arenado con partículas de alúmina no afecta significativamente la resistencia a la fractura en las coronas 5Y. Se ha observado una adaptación estrecha del cemento en la interfaz, lo que sugiere que el cemento puede ayudar a transferir tensiones al muñón y prevenir la propagación de grietas en la corona. El arenado con alúmina a diferentes presiones afecta la resistencia y durabilidad de la unión en el ZrO₂ 5Y. Se recomienda el arenado a 0,2 MPa para mejorar la resistencia a la flexión. Se sugiere un enfoque inicial de arenado a baja presión, seguido de la aplicación de una imprimación y un cemento de resina para lograr una óptima resistencia de adhesión (12, 14, 19, 27, 28, 29, 31).

La recomendación en materiales 5Y es arenar con óxido de aluminio de 50 micras a 0,1-0,2 MPa por 10 segundos a 10mm de distancia en un ángulo de 70-90 grados (13).

Por su parte, el arenado del ZrO₂ convencional tiene un efecto positivo en su resistencia a la flexión, ya que induce transformaciones de fase tetragonal a monoclinica, creando capas compresivas en la superficie. Estas capas compresivas son más profundas que los defectos superficiales causados por el arenado, lo que justifica la mejora de las propiedades mecánicas (16). Este endurecimiento por transformación que puede detener la propagación de grietas (27). Es importante destacar que el óxido de zirconio convencional y el óxido de zirconio translúcido tienen composiciones químicas y propiedades mecánicas diferentes, lo que influye en los efectos del arenado. El arenado del ZrO₂

convencional mejora la humectabilidad de la superficie, aumenta el entrelazamiento micromecánico y mejora la reacción química con el cemento de resina (31). La recomendación en materiales 3Y es arenar con óxido de aluminio de 50 micras a 0,2-0,3 MPa por 10 segundos a 10mm de distancia en un ángulo de 70-90 grados (13).

Aunque el arenado con óxido de aluminio es efectivo como tratamiento mecánico, su durabilidad puede verse afectada por la degradación hidrolítica. Para mejorarla, es necesario combinar el arenado con una imprimación a base de MDP, que aumenta la resistencia de adhesión y reduce el envejecimiento hidrolítico (12, 22, 24.) Un estudio sugiere que la combinación de arenado con óxido de aluminio y una imprimación monocomponente (Z-PRIME Plus) proporciona la mayor resistencia de adhesión al cizallamiento en restauraciones de ZrO₂ (16). A pesar de investigarse diversos enfoques de adhesión, solo se obtuvo un rendimiento óptimo en las superficies que fueron sometidas a arenado y luego tratadas con una imprimación que contenía MDP (23). Por lo tanto, la combinación de ambos métodos de pretratamiento es un enfoque eficaz para obtener una mayor resistencia de adhesión (21).

Qué es el MDP y cómo funciona un imprimador para el óxido de zirconio

Debido a la ausencia de fase vítrea y partículas cristalinas de relleno que puedan ser grabadas selectivamente, la aplicación convencional de ácido fluorhídrico no mejora la resistencia de la unión con el cemento resinoso (33). La naturaleza no polar e inerte del material dificulta la formación de una red de siloxano entre el silano y el sustrato. Para mejorar la unión a materiales resinosos, se ha recomendado ampliamente el uso de una imprimación que contiene 10-MDP para acondicionar la superficie. Este monómero fosfatado busca crear una superficie reactiva en el ZrO₂ que facilite la unión química con los grupos fosfato del MDP (34, 35). Los imprimadores diseñados específicamente para óxidos que no son de sílice, como la zirconia y la alúmina son altamente beneficiosos para restauraciones cuando la retención o resistencia está comprometida.

El MDP tiene una estructura molecular polar que combina un grupo fosfato hidrófilo en un extremo y una cadena de carbono hidrófoba en el otro. Esta cadena hidrófoba se une al cemento, mientras que el grupo fosfato hidrófilo forma enlaces químicos estables con el óxido de zirconio mediante enlaces covalentes (12, 36, 37). Además, el MDP es relativamente estable a la hidrólisis debido a su larga cadena carbonílica (38). Las imprimaciones que contienen agentes de acoplamiento, como monómeros de fosfato como el MDP, funcionan de dos maneras: mediante la humectación y la adhesión química. La humectación por sí sola tiende a aumentar la fuerza de adhesión (40).

Existen cinco imprimaciones a base de monómeros de fosfato/fosfonato disponibles en el mercado, cada una con su composición química específica: Clearfil Ceramic Primer y Monobond Plus que contienen MDP como ingrediente activo; Metal/Zirconia Primer contiene ésteres de ácido fosfónico como compuesto

activo; AZ Primer que contiene un monómero de ácido fosfónico como ingrediente activo y por último, Z-PRIME PLUS que contiene una fórmula que combina MDP y monómeros de dimetacrilato de ácido bifenílico (BPDM). El BPDM actúa sinérgicamente con el monómero de fosfato (MDP), lo que mejora significativamente la resistencia de adhesión. La elección de la imprimación adecuada puede depender de la aplicación específica y las necesidades clínicas del procedimiento dental (35).

Existen tres modelos de interacción del MDP con el óxido de zirconio; el primero es la adsorción mediante enlaces de hidrógeno donde el 10-MDP se adsorbe en la superficie del óxido de zirconio mediante enlaces de hidrógeno entre el grupo P=O (grupo oxo) y el grupo Zr-OH. El segundo es mediante un enlace iónico, donde el 10-MDP puede interactuar con la zirconia a través de enlaces iónicos. Los grupos OH del 10-MDP pueden desprotonar H⁺ para formar grupos P-O⁻, lo que facilita su interacción, y por último, un enlace de hidrógeno adicional, que además del enlace iónico, los monómeros de 10-MDP adsorbidos pueden tener interacciones de enlace de hidrógeno con el zirconio a través del grupo P=O (grupo oxo) (41).

El ángulo de contacto es un parámetro que mide cómo un líquido interactúa con una superficie sólida. En el caso del ZrO₂, el arenado de su superficie interna la vuelve hidrofílica, lo que significa que el agua tiene una alta afinidad por ella, lo que se refleja en un ángulo de contacto bajo. Sin embargo, al aplicar una imprimación química, esta superficie hidrofílica se transforma en una superficie hidrófoba con una afinidad reducida por el agua, lo que se traduce en un ángulo de contacto más alto. Las mediciones del ángulo de contacto por sí solas no pueden confirmar la existencia de un enlace químico, pero la espectrometría de masas de iones secundarios de tiempo de vuelo (TOF-SIMS) puede revelar la estructura molecular. Esta técnica es altamente sensible y puede detectar elementos en concentraciones extremadamente bajas. Se ha demostrado que la zirconia imprimada con MDP muestra picos de fragmentación orgánica característicos, lo que indica la formación de enlaces covalentes P-O-Zr. La imprimación modifica la superficie del óxido de zirconio de una manera que la hace más adecuada para la adhesión. La fuerza de adhesión también se ve mejorada en el ZrO₂ imprimado en comparación con el no imprimado (36, 40). Como se ha mencionado anteriormente, los imprimadores de MDP tienen la capacidad de establecer enlaces químicos fuertes con la superficie del óxido de zirconio, incluyendo enlaces covalentes y de hidrógeno, así como interacciones más débiles como fuerzas de van der Waals. Cuando se realiza una limpieza ultrasónica con disolventes orgánicos, las moléculas fuertemente unidas permanecen en la superficie, formando una capa monomolecular químicamente unida. Los productos que contienen MDP, como Monobond Plus y Z-Prime Plus, son más efectivos que las imprimaciones a base de fosfonato en el tratamiento de la superficie del óxido de zirconio, lo que mejora significativamente la resistencia de adhesión, aumentando de 4 MPa a aproximadamente 20 MPa (40).

El ángulo de contacto medido en la superficie del ZrO₂ sin imprimir fue insignificante. Tras la aplicación de Z-Prime Plus (10 segundos de tiempo de reacción) y la limpieza ultrasónica en un baño de etanol, el ángulo de contacto aumentó significativamente y continuo con esa tendencia con el incremento del tiempo de reacción hasta 5 minutos. Después de 5 minutos (hasta 6 meses), los ángulos de contacto no fueron estadísticamente diferentes con distintos tiempos de reacción. En general, el uso de imprimaciones que contienen MDP se considera efectivo para mejorar la resistencia de adhesión entre el óxido de zirconio y el cemento de resina (17, 25, 40, 42, 44). Además, se observa un aumento significativo en la resistencia de adhesión a medida que se incrementa la concentración de 10-MDP (41). La importancia de la estabilidad de la unión química radica en que el ZrO₂ puede sufrir degradación a baja temperatura (LTD), lo que implica la transformación de fase tetragonal a monoclinica y la pérdida de propiedades mecánicas en presencia de agua. La imprimación con MDP reduce la posibilidad de que el material sea atacado por moléculas de agua, lo que probablemente evita o disminuye la LTD y ayuda mantener la durabilidad de la unión entre el óxido de zirconio y el cemento de resina (40, 43).

¿Puede el uso de adhesivos universales con MDP reemplazar la imprimación con MDP puro?

La amplia variedad de imprimaciones y adhesivos basados en MDP puede complicar la elección para los clínicos en situaciones específicas. Para abordar esta complejidad, se han desarrollado adhesivos universales que contienen monómeros fosfatados y silanos y pueden utilizarse con una amplia gama de materiales. Estos adhesivos simplifican el proceso de adhesión eliminando la necesidad de acondicionamiento específico de las superficies, lo que los hace más prácticos en ciertas situaciones clínicas (43, 45).

Cuando el MDP se encuentra en un adhesivo multicomponente la estabilidad del siloxano funcional se ve afectada por el pH del MDP, y la eficacia del MDP también puede disminuir debido a la presencia del silano. La aplicación secuencial de imprimaciones de silano y MDP puede dar lugar a resultados de adhesión diferentes (36), debido a que las variaciones en la formulación química de los adhesivos con MDP pueden competir por la adhesión al ZrO₂, ya que los ingredientes pueden interactuar entre sí (43). Es posible que el efecto del MDP sea inhibido por los componentes del adhesivo, como las moléculas de silano que forman enlaces Si-O-P. Además, el pH ácido (<2,5) de este adhesivo puede reducir la capacidad de unión del MDP. En los ensayos de adhesión al cizallamiento, la presencia de silano en los sistemas adhesivos multicomponentes mejoró la humectabilidad de la superficie del óxido de zirconio y aumentó los valores iniciales de adhesión. Sin embargo, se observó una resistencia al cizallamiento inferior después de un almacenamiento en agua, lo que indicó la hidrofiliidad del silano y su impacto negativo en la longevidad de la unión debido a la degradación hidrolítica de la interfaz. A pesar de que la resistencia inicial de la unión puede ser alta, no existe un consenso sobre la durabilidad de la unión con la

zirconia. El efecto sinérgico o antagónico de la combinación de moléculas de MDP y silano en la adhesión no se ha aclarado completamente (33, 36,43, 48, 50).

Silanización del disilicato de litio

Las cerámicas de matriz vítrea son ampliamente utilizadas en restauraciones totalmente cerámicas debido a sus propiedades ópticas. Estas cerámicas tienen una matriz vítrea compuesta principalmente de dióxido de silicio (sílice o cuarzo) con diferentes cantidades de alúmina. La presencia de sílice permite que estos materiales sean grabados con ácido fluorhídrico antes de la adhesión. Para lograr una adhesión efectiva y duradera es necesario utilizar mecanismos de adhesión que combinen retención micromecánica y tratamiento químico. La retención micromecánica se logra mediante el grabado con ácido fluorhídrico que disuelve selectivamente la matriz vítrea. Este proceso crea una topografía y rugosidad en la superficie que favorece la retención micromecánica. Pero durante este proceso, pueden formarse sales insolubles de sílice-fluoruro como subproductos que se precipitan en la superficie y pueden inhibir la correcta unión del silano y el cemento, reduciendo la fuerza de adhesión. Estas sales pueden eliminarse mediante limpieza en ultrasonido o mediante un grabado con ácido ortofosfórico al 37% antes de aplicar el silano. El ácido ortofosfórico limpia la superficie y no aumenta la rugosidad ni la fuerza de adhesión (51). Por su parte, el tratamiento químico desempeña un papel crucial en la adhesión a largo plazo. Este se consigue mediante de agentes de acoplamiento (silanos), que son moléculas bifuncionales que facilitan una reacción química entre la cerámica inorgánica y el cemento de resina orgánica. Estos agentes se hidrolizan en agua, formando un grupo silanol que se une a los grupos hidroxilo de la superficie de la cerámica, creando un enlace siloxano. Además, el grupo funcional metacrilato puede polimerizar con la resina orgánica, estableciendo un enlace covalente. El silano también aumenta la hidrofobicidad y humectabilidad de la superficie tratada, mejorando su interacción con los cementos de resina hidrófobos (51, 53, 54). La fuerza de adhesión del silano varía según el material. Los sustratos más fuertemente adheridos son sílice, vidrio y cuarzo, que establecen enlaces de siloxano mediante la condensación con grupos hidroxilo presentes en la superficie del sustrato. La formación de la unión entre el silano y el sustrato implica dos pasos críticos activados por procesos diferentes (52): Primero, se activa el silano mediante ácido para generar grupos silanol que reaccionan con los grupos hidroxilo en la superficie del sustrato mediante una reacción de condensación y posteriormente, se activa la unión entre la resina y el silano mediante la fotopolimerización.

Resistencia de la unión al cizallamiento del disilicato de litio comparado con el óxido de zirconio

El arenado con óxido de aluminio combinado con el cemento de resina que contiene MDP produjo una alta resistencia inmediata al cizallamiento en la zirconia, de 38 Mpa, que fue similar a la resistencia al cizallamiento en el disilicato de litio, que fue de 35 Mpa. Sin embargo, después del termociclado, la resistencia en el óxido de zirconio disminuyó drásticamente, mientras que en el disilicato de

litio se mantuvo alta, posiblemente debido a que en este estudio no se utilizó una imprimación con MDP por separado (55). En otro estudio, se evaluó el efecto de las modificaciones de la superficie de la cerámica y de la dentina en la resistencia de adhesión de las muestras cementadas de disilicato de litio y ZrO₂. Se encontró que éste último material tenía una fuerza de adhesión a la dentina similar al disilicato de litio cuando se utilizaba un cemento resinoso (56).

Cementación adhesiva de restauraciones de óxido de zirconio

Se pueden distinguir dos categorías principales de cementos resinosos (67):

- **Cementos tradicionales:** la fuerza de adhesión en estos cementos está vinculada a la eficacia de los tratamientos previos. Son menos viscosos y esto puede favorecer la penetración en las microporosidades superficiales y la resistencia a lo largo del tiempo. Para lograr una adhesión efectiva se requiere un tratamiento mecánico adecuado y la aplicación de imprimaciones previas.
- **Cementos autoadhesivos:** estos cementos pueden unirse al óxido de zirconio, pero por sí solos no pueden mantener una adhesión estable a largo plazo, ya que son más susceptibles a la hidrólisis. La composición puede variar y algunos autores sugieren que los cementos que contienen 10-MDP ofrecen una mejor adhesión. Sin embargo, no existe una superioridad clara entre ambas categorías de cemento en términos de adhesión, ya que los resultados pueden variar según el estudio. Aunque funcionan bien en coronas completas y se adhieren adecuadamente a la dentina, pueden tener problemas de adhesión al esmalte en restauraciones parciales.

La cementación adhesiva se recomienda en situaciones clínicas específicas, como cuando existe una retención comprometida (pilares cortos), se requieren opciones de tratamiento adhesivas (como carillas y prótesis parciales fijas), se enfrentan a fuerzas de desprendimiento elevadas, o cuando se trata de cerámicas de sílice sin soporte estructural adicional. Los cementos de resina ofrecen ventajas como una mejor retención, una menor disolución en el ambiente oral, menos microfiltraciones, alta resistencia a la tensión, facilidad de manejo, compatibilidad biológica, excelente estética, potencial para igualar el color y un desempeño clínico aceptable en comparación con los materiales de cementación convencionales (57, 63).

Cementación convencional de restauraciones de óxido de zirconio

Las coronas de óxido de zirconio pueden cementarse con éxito utilizando cementos convencionales si la preparación proporciona suficiente retención y resistencia (59, 65). La elección entre cementos convencionales y agentes de cementación adhesivos depende de la situación clínica y las cargas oclusales (66).

Cementos multi-pasos

Han demostrado un excelente rendimiento clínico a largo plazo, pero su procedimiento de cementación es complejo y sensible a la técnica. Por esta razón,

se han desarrollado cementos de resina autoadhesivos que simplifican significativamente los procedimientos de cementación. Sin embargo, los cementos multipasos proporcionan valores más altos de resistencia de adhesión a la dentina coronal, tanto al principio como después del envejecimiento artificial, en comparación con los cementos de resina autoadhesivos. Estos cementos tienen propiedades mecánicas superiores, menos desgaste y menor hidrofiliidad, lo que los hace menos propensos a la absorción de agua (57, 62). En un estudio que evaluó la resistencia de adhesión al cizallamiento de dos cementos, se observó una diferencia significativa en la resistencia de las muestras de óxido de zirconio unidas con RelyX Ultimate y RelyX U200 con y sin termociclado, favoreciendo el uso del RelyX Ultimate (63).

Cementos autoadhesivos

Han sido desarrollados para simplificar los procedimientos de cementación adhesiva en odontología al eliminar la necesidad de tratamientos previos como el grabado y la imprimación. Su capacidad de adhesión al óxido de zirconio es limitada en comparación con las imprimaciones actuales. Aunque son adecuados para aplicaciones con valores moderados de resistencia de adhesión, no son la elección adecuada para restauraciones que dependen de la adhesión (35, 58, 59, 62). Estos cementos han demostrado un buen desempeño clínico en restauraciones retentivas como coronas totalmente metal-cerámicas y totalmente cerámicas, con durabilidad de hasta 6 y 10 años, respectivamente. Para restauraciones parciales indirectas y en presencia de esmalte como sustrato, no se recomienda el uso de estos cementos, ya que no garantizan un resultado clínico óptimo y una retención duradera. Además, los monómeros ácidos presentes en su composición pueden inhibir los aceleradores de amina necesarios para la fotopolimerización (57). Durante la reacción ácido/base, el consumo de grupos ácidos reduce el número de zonas reactivas en las que es probable que se produzca una unión satisfactoria con las moléculas de agua en la estructura del polímero. Lo crucial en términos de polaridad no es la cantidad inicial de grupos ácidos en el material, sino la cantidad de grupos ácidos restantes que no han sido neutralizados durante el fraguado. Si la reacción ácido/base no se realiza eficientemente o si la relación entre grupos ácidos y rellenos lixiviables por iones es alta, quedará un número significativo de grupos ácidos intactos. Esto puede dar lugar a una alta sorción de agua en el material. La solubilidad del cemento es un factor crucial para el éxito de las restauraciones, ya que la disolución del agente de cementación puede conducir a defectos marginales, microfiltraciones, hipersensibilidad, caries secundaria y problemas pulpares, lo que a menudo requiere la sustitución de las restauraciones existentes (61).

Los cementos autoadhesivos no son capaces de proporcionar una adhesión adecuada sin un tratamiento previo y muestran una menor resistencia de adhesión cuando se aplican sobre superficies de ZrO₂ no tratadas (17, 60). Es importante destacar que estos materiales interactúan de manera superficial con el tejido dentinario mineralizado y no logran desmineralizar completamente la capa de barrillo dentinario. Esto significa que no se forma una capa híbrida, ya que la

interacción se basa más en enclavamiento químico que micromecánico, y como resultado, no se observan marcas de resina en la capa híbrida (58). Los agentes de cementación e imprimación que contienen MDP ofrecen una mayor resistencia de adhesión. La elección del tipo de cemento parece tener un impacto limitado en la durabilidad de la unión al óxido de zirconio, especialmente cuando se utilizan cementos resinosos. Además, las resistencias de adhesión de los cementos de resina autoadhesivos a las cerámicas de óxido de zirconio son variables y mejoran con el arenado, siendo los cementos que contienen monómeros adhesivos como el MDP los que proporcionan mejores resultados (24, 68, 69, 70).

Que cemento usar: ¿dual, auto o fotocurado?

Es esencial utilizar cementos de polimerización dual al cementar restauraciones de ZrO₂, ya que la transmisión de luz puede verse reducida en este tipo de restauraciones (59, 64). El modo de autopolimerización en los cementos es especialmente relevante cuando se trabaja con restauraciones opacas que limitan la transmisión de luz. La interacción entre la amina terciaria y el peróxido de benzoilo es esencial para garantizar una polimerización adecuada en áreas con exposición insuficiente a la luz (71). El aumento del grosor del óxido de zirconio monolítico puede afectar negativamente la polimerización de los cementos de polimerización dual, ya que presentan una menor dureza si no se fotoactivan adecuadamente, lo que implica una conversión incompleta, por lo que se recomienda realizar una fotopolimerización prolongada en estos casos (71).

Conclusiones

- El uso de tratamiento mecánico por medio del arenado con óxido de aluminio en conjunto con el tratamiento químico de una imprimación de MDP puro produce los valores de resistencia más altos y genera una unión estable y duradera.
- Los procedimientos para adherirse al óxido de zirconio convencional son también los recomendados para adherirse a los materiales translucidos.
- No se recomienda usar MDP en un sistema multicomponente, ya que los diversos componentes de estas formulaciones pueden afectar y reducir significativamente los valores adhesivos en el tiempo.

Bibliografía

1. Zakir M, Ashraf U, Tian T, Han A, Qiao W, Jin X, et al. The Role of Silane Coupling Agents and Universal Primers in Durable Adhesion to Dental Restorative Materials - a Review. *Curr Oral Health Rep.* septiembre de 2016;3(3):244-53.
2. The Glossary of Prosthodontic Terms. *J Prosthet Dent.* mayo de 2017;117(5):C1-e105.
3. Talibi M, Kaur K, Parmar H. Do you know your ceramics? Part 5: zirconia. *Br Dent J.* 11 de marzo de 2022;232(5):311-6.

4. Ishii R, Tsujimoto A, Takamizawa T, Tsubota K, Suzuki T, Shimamura Y, et al. Influence of surface treatment of contaminated zirconia on surface free energy and resin cement bonding. *Dent Mater J*. 2015;34(1):91-7.
5. Yang B, Scharnberg M, Wolfart S, Quaas AC, Ludwig K, Adelung R, et al. Influence of contamination on bonding to zirconia ceramic. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. mayo de 2007;81B(2):283-90.
6. Angkasith P, Burgess JO, Bottino MC, Lawson NC. Cleaning Methods for Zirconia Following Salivary Contamination: Cleaning Methods for Zirconia. *J Prosthodont*. julio de 2016;25(5):375-9.
7. Sulaiman TA, Altak A, Abdulmajeed A, Rodgers B, Lawson N. Cleaning Zirconia Surface Prior To Bonding: A Comparative Study of Different Methods and Solutions. *J Prosthodont*. marzo de 2022;31(3):239-44.
8. Hajjaj MS, Alzaharani SJ. Effect of Different Cleaning Methods on Shear Bond Strength of Resin Cement to Contaminated Zirconia. *Materials*. 21 de julio de 2022;15(14):5068.
9. Özcan M. Airborne Particle Abrasion of Zirconia Fixed Dental Prostheses: Contemporary Issues. Swift EJ, editor. *J Esthet Restor Dent*. noviembre de 2014;26(6):359-62.
10. Adhesion to Zirconia Used for Dental Restorations: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Adhes Dent*. 24 de febrero de 2015;17(1):7-26.
11. Obradovic-Djuricic K, Medic V, Dodic S, Gavrilov D, Antonijevic D, Zrilic M. Dilemmas in zirconia bonding: A review. *Srp Arh Celok Lek*. 2013;141(5-6):395-401.
12. Effect of Airborne-Particle Abrasion Protocols and MDP-based Primer on the Bond Strength of Highly Translucent Zirconia. *J Adhes Dent*. 1 de octubre de 2021;23(5):437-46.
13. Yang B, Barloi A, Kern M. Influence of air-abrasion on zirconia ceramic bonding using an adhesive composite resin. *Dent Mater*. enero de 2010;26(1):44-50.
14. McLaren EA, Maharishi A, White SN. Influence of yttria content and surface treatment on the strength of translucent zirconia materials. *J Prosthet Dent*. abril de 2023;129(4):638-43.
15. Khanlar LN, Takagaki T, Abdou A, Inokoshi M, Ikeda M, Takahashi A, et al. Effect of Air-Particle Abrasion Protocol and Primer on The Topography and Bond Strength of a High-Translucent Zirconia Ceramic. *J Prosthodont*. marzo de 2022;31(3):228-38.
16. Zandparsa R, Talua NA, Finkelman MD, Schaus SE. An In Vitro Comparison of Shear Bond Strength of Zirconia to Enamel Using Different Surface Treatments: Zirconia Bonding to Enamel Using Different Surface Treatments. *J Prosthodont*. febrero de 2014;23(2):117-23.
17. Yi YA, Ahn JS, Park YJ, Jun SH, Lee IB, Cho BH, et al. The Effect of Sandblasting and Different Primers on Shear Bond Strength Between Yttria-tetragonal Zirconia Polycrystal Ceramic and a Self-adhesive Resin Cement. *Oper Dent*. 1 de enero de 2015;40(1):63-71.
18. Blatz MB, Sadan A, Martin J, Lang B. In vitro evaluation of shear bond strengths of resin to densely-sintered high-purity zirconium-oxide ceramic after

- long-term storage and thermal cycling. *J Prosthet Dent.* abril de 2004;91(4):356-62.
19. Inokoshi M, Shimizubata M, Nozaki K, Takagaki T, Yoshihara K, Minakuchi S, et al. Impact of sandblasting on the flexural strength of highly translucent zirconia. *J Mech Behav Biomed Mater.* marzo de 2021;115:104268.
 20. Aurélio IL, Marchionatti AME, Montagner AF, May LG, Soares FZM. Does air particle abrasion affect the flexural strength and phase transformation of Y-TZP? A systematic review and meta-analysis. *Dent Mater.* junio de 2016;32(6):827-45.
 21. Shin YJ, Shin Y, Yi YA, Kim J, Lee IB, Cho BH, et al. Evaluation of the shear bond strength of resin cement to Y-TZP ceramic after different surface treatments: Y-TZP surface treatments for bonding strength improvement. *Scanning.* septiembre de 2014;36(5):479-86.
 22. Inokoshi M, Shimizu H, Nozaki K, Takagaki T, Yoshihara K, Nagaoka N, et al. Crystallographic and morphological analysis of sandblasted highly translucent dental zirconia. *Dent Mater.* marzo de 2018;34(3):508-18.
 23. Wolfart M, Lehmann F, Wolfart S, Kern M. Durability of the resin bond strength to zirconia ceramic after using different surface conditioning methods. *Dent Mater.* enero de 2007;23(1):45-50.
 24. Inokoshi M, De Munck J, Minakuchi S, Van Meerbeek B. Meta-analysis of Bonding Effectiveness to Zirconia Ceramics. *J Dent Res.* abril de 2014;93(4):329-34.
 25. Yagawa S, Komine F, Fushiki R, Kubochi K, Kimura F, Matsumura H. Effect of priming agents on shear bond strengths of resin-based luting agents to a translucent zirconia material. *J Prosthodont Res.* abril de 2018;62(2):204-9.
 26. Alammar A, Blatz MB. The resin bond to high-translucent zirconia—A systematic review. *J Esthet Restor Dent.* enero de 2022;34(1):117-35.
 27. Lawson NC, Jurado CA, Huang C, Morris GP, Burgess JO, Liu P, et al. Effect of Surface Treatment and Cement on Fracture Load of Traditional Zirconia (3Y), Translucent Zirconia (5Y), and Lithium Disilicate Crowns. *J Prosthodont.* julio de 2019;28(6):659-65.
 28. Aung SSMP, Takagaki T, Lyann SK, Ikeda M, Inokoshi M, Sadr A, et al. Effects of alumina-blasting pressure on the bonding to super/ultra-translucent zirconia. *Dent Mater.* mayo de 2019;35(5):730-9.
 29. Yoshida K. Influence of alumina air-abrasion for highly translucent partially stabilized zirconia on flexural strength, surface properties, and bond strength of resin cement. *J Appl Oral Sci.* 2020;28:e20190371.
 30. Effects of Tribochemical Silica Coating and Alumina-Particle Air Abrasion on 3Y-TZP and 5Y-TZP: Evaluation of Surface Hardness, Roughness, Bonding, and Phase Transformation. *J Adhes Dent.* 24 de julio de 2020;22(4):373-82.
 31. Zhao P, Yu P, Xiong Y, Yue L, Arola D, Gao S. Does the bond strength of highly translucent zirconia show a different dependence on the airborne-particle abrasion parameters in comparison to conventional zirconia? *J Prosthodont Res.* enero de 2020;64(1):60-70.
 32. Garcia Fonseca R, De Oliveira Abi-Rached F, Dos Santos Nunes Reis JM, Rambaldi E, Baldissara P. Effect of particle size on the flexural strength and phase transformation of an airborne-particle abraded yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal ceramic. *J Prosthet Dent.* diciembre de 2013;110(6):510-4.

33. De Souza G, Hennig D, Aggarwal A, Tam LE. The use of MDP-based materials for bonding to zirconia. *J Prosthet Dent.* octubre de 2014;112(4):895-902.
34. Xie H, Tay FR, Zhang F, Lu Y, Shen S, Chen C. Coupling of 10-methacryloyloxydecylidihydrogenphosphate to tetragonal zirconia: Effect of pH reaction conditions on coordinate bonding. *Dent Mater.* octubre de 2015;31(10):e218-25.
35. Byoung Suh. *Principles of Adhesion Dentistry: A Theoretical and Clinical Guide for Dentists.* Chapter 7. Bonding to zirconia. En.
36. Chuang SF, Kang LL, Liu YC, Lin JC, Wang CC, Chen HM, et al. Effects of silane- and MDP-based primers application orders on zirconia–resin adhesion—A ToF-SIMS study. *Dent Mater.* agosto de 2017;33(8):923-33.
37. Shimoe S, Hirata I, Otaku M, Matsumura H, Kato K, Satoda T. Formation of chemical bonds on zirconia surfaces with acidic functional monomers. *J Oral Sci.* 2018;60(2):187-93.
38. De Oyagüe RC, Monticelli F, Toledano M, Osorio E, Ferrari M, Osorio R. Influence of surface treatments and resin cement selection on bonding to densely-sintered zirconium-oxide ceramic. *Dent Mater.* febrero de 2009;25(2):172-9.
39. Van Landuyt KL, Snauwaert J, De Munck J, Peumans M, Yoshida Y, Poitevin A, et al. Systematic review of the chemical composition of contemporary dental adhesives. *Biomaterials.* septiembre de 2007;28(26):3757-85.
40. Chen L, Suh BI, Brown D, Chen X. Bonding of primed zirconia ceramics: evidence of chemical bonding and improved bond strengths. *Am J Dent.* abril de 2012;25(2):103-8.
41. Nagaoka N, Yoshihara K, Feitosa VP, Tamada Y, Irie M, Yoshida Y, et al. Chemical interaction mechanism of 10-MDP with zirconia. *Sci Rep.* 30 de marzo de 2017;7(1):45563.
42. Yue X, Hou X, Gao J, Bao P, Shen J. Effects of MDP-based primers on shear bond strength between resin cement and zirconia. *Exp Ther Med.* mayo de 2019;17(5):3564-72.
43. Lima RBW, Barreto SC, Alfrisany NM, Porto TS, De Souza GM, De Goes MF. Effect of silane and MDP-based primers on physico-chemical properties of zirconia and its bond strength to resin cement. *Dent Mater.* noviembre de 2019;35(11):1557-67.
44. Magne P, Paranhos MPG, Burnett LH. New zirconia primer improves bond strength of resin-based cements. *Dent Mater.* abril de 2010;26(4):345-52.
45. Amaral M, Belli R, Cesar PF, Valandro LF, Petschelt A, Lohbauer U. The potential of novel primers and universal adhesives to bond to zirconia. *J Dent.* enero de 2014;42(1):90-8.
46. Xie H, Li Q, Zhang F, Lu Y, Tay FR, Qian M, et al. Comparison of resin bonding improvements to zirconia between one-bottle universal adhesives and tribochemical silica coating, which is better? *Dent Mater.* marzo de 2016;32(3):403-11.
47. Can Application of Universal Primers Alone Be a Substitute for Airborne-Particle Abrasion to Improve Adhesion of Resin Cement to Zirconia? *J Adhes Dent.* 12 de mayo de 2015;17(2):169-74.
48. Kim JH, Chae SY, Lee Y, Han GJ, Cho BH. Effects of Multipurpose,

Universal Adhesives on Resin Bonding to Zirconia Ceramic. *Oper Dent.* 1 de enero de 2015;40(1):55-62.

49. Llerena-Icochea A, Costa R, Borges A, Bombonatti J, Furuse A. Bonding Polycrystalline Zirconia With 10-MDP-containing Adhesives. *Oper Dent.* 1 de mayo de 2017;42(3):335-41.

50. Seabra B, Arantes-Oliveira S, Portugal J. Influence of multimode universal adhesives and zirconia primer application techniques on zirconia repair. *J Prosthet Dent.* agosto de 2014;112(2):182-7.

51. Jin-Ho Phark, Neimar Sartori, Sillas Duarte, Jr. Bonding to Silica-Based Glass-Ceramics: A Review of Current Techniques and Novel Self-Etching Ceramic Primers. *QDT* 2016. 2016;

52. Matinlinna JP, Lung CYK, Tsoi JKH. Silane adhesion mechanism in dental applications and surface treatments: A review. *Dent Mater.* enero de 2018;34(1):13-28.

53. Abduljabbar T, AlQahtani MA, Al Jeaidi Z, Vohra F. Influence of silane and heated silane on the bond strength of lithium disilicate ceramics - An in vitro study. *Pak J Med Sci [Internet].* 7 de mayo de 2016 [citado 22 de septiembre de 2023];32(3). Disponible en: <http://pjms.com.pk/index.php/pjms/article/view/9851>

54. Romanini-Junior JC, Kumagai RY, Ortega LF, Rodrigues JA, Cassoni A, Hirata R, et al. Adhesive/silane application effects on bond strength durability to a lithium disilicate ceramic. *J Esthet Restor Dent.* julio de 2018;30(4):346-51.

55. Shen D, Wang H, Shi Y, Su Z, Hannig M, Fu B. The Effect of Surface Treatments on Zirconia Bond Strength and Durability. *J Funct Biomater.* 7 de febrero de 2023;14(2):89.

56. Aker Sagen M, Vos L, Dahl JE, Rønold HJ. Shear bond strength of resin bonded zirconia and lithium disilicate – effect of surface treatment of ceramics and dentin. *Biomater Investig Dent.* 31 de diciembre de 2022;9(1):10-9.

57. Maravić T, Mazzitelli C, Mancuso E, Del Bianco F, Josić U, Cadenaro M, et al. Resin composite cements: Current status and a novel classification proposal. *J Esthet Restor Dent.* 16 de marzo de 2023;jerd.13036.

58. Gundogdu M, Aladag L. Effect of adhesive resin cements on bond strength of ceramic core materials to dentin. *Niger J Clin Pract.* 2018;21(3):367.

59. Blatz MB, Vonderheide M, Conejo J. The Effect of Resin Bonding on Long-Term Success of High-Strength Ceramics. *J Dent Res.* febrero de 2018;97(2):132-9.

60. Le M, Larsson C, Papia E. Bond strength between MDP-based cement and translucent zirconia. *Dent Mater J.* 29 de mayo de 2019;38(3):480-9.

61. Water Sorption and Solubility of Four Self-etching, Self-adhesive Resin Luting Agents. *J Adhes Dent.* 12 de febrero de 2010;12(1):39-43.

62. Miotti L, Follak A, Montagner A, Pozzobon R, Da Silveira B, Susin A. Is Conventional Resin Cement Adhesive Performance to Dentin Better Than Self-adhesive? A Systematic Review and Meta-Analysis of Laboratory Studies. *Oper Dent.* 1 de septiembre de 2020;45(5):484-95.

63. Kansal R, Rani S, Kumar M, Kumar S, Issar G. Comparative Evaluation of Shear Bond Strength of Newer Resin Cement (RelyX Ultimate and RelyX U200) to Lithium Disilicate and Zirconia Ceramics as Influenced by Thermocycling. *Contemp*

Clin Dent. 2018;9(4):601-6.

64. Blatz MB, Alvarez M, Sawyer K, Brindis M. How to Bond Zirconia: The APC Concept. *Compend Contin Educ Dent Jamesburg NJ* 1995. octubre de 2016;37(9):611-7; quiz 618.

65. Blatz MB, Conejo J, Alammar A, Ayub J. Current Protocols for Resin-Bonded Dental Ceramics. *Dent Clin North Am.* octubre de 2022;66(4):603-25.

66. Zarone F, Di Mauro MI, Ausiello P, Ruggiero G, Sorrentino R. Current status on lithium disilicate and zirconia: a narrative review. *BMC Oral Health.* diciembre de 2019;19(1):134.

67. Scaminaci Russo D, Cinelli F, Sarti C, Giachetti L. Adhesion to Zirconia: A Systematic Review of Current Conditioning Methods and Bonding Materials. *Dent J.* 1 de agosto de 2019;7(3):74.

68. Quigley NP, Loo DSS, Choy C, Ha WN. Clinical efficacy of methods for bonding to zirconia: A systematic review. *J Prosthet Dent.* febrero de 2021;125(2):231-40.

69. Bonding of Resin-based Luting Cements to Zirconia With and Without the Use of Ceramic Priming Agents. *J Adhes Dent.* 15 de agosto de 2012;14(4):385-92.

70. Blatz MB, Phark JH, Ozer F, Mante FK, Saleh N, Bergler M, et al. In vitro comparative bond strength of contemporary self-adhesive resin cements to zirconium oxide ceramic with and without air-particle abrasion. *Clin Oral Investig.* abril de 2010;14(2):187-92.

71. Turp V, Turkoglu P, Sen D. Influence of monolithic lithium disilicate and zirconia thickness on polymerization efficiency of dual-cure resin cements. *J Esthet Restor Dent.* julio de 2018;30(4):360-8.