



Facultad de Ciencias De La Salud

Tema:

**Influencia Del Arenado Convencional Y Triboquímico En La Resistencia Adhesiva De
Zirconio-Cemento**

**Trabajo de titulación para la obtención del Título de Especialista en Rehabilitación Oral
y Prótesis Implanto Asistida**

Presentado por:

Cesar Ramsés Carvajal Villacís

Tutor:

Dr. Diego Laverde

Quito, Mayo de 2026

Declaración de aceptación de norma ética y derechos

El presente documento se ciñe a las normas éticas y reglamentarias de la Universidad Hemisferios. Así, declaro que lo contenido en este ha sido redactado con entera sujeción al respeto de los derechos de autor, citando adecuadamente las fuentes. Por tal motivo, autorizo a la Biblioteca a que haga pública su disponibilidad para lectura dentro de la institución, a la vez que autorizo el uso comercial de mi obra a la Universidad Hemisferios, siempre y cuando se me reconozca el cuarenta por ciento (40%) de los beneficios económicos resultantes de esta explotación.

Además, me comprometo a hacer constar, por todos los medios de publicación, difusión y distribución, que mi obra fue producida en el ámbito académico de la Universidad Hemisferios.

De comprobarse que no cumplí con las estipulaciones éticas, incurriendo en caso de plagio, me someto a las determinaciones que la propia Universidad plantee.

Cesar Ramses Carvajal Villacis

C.I. 171664943-7

Dedicatoria

A Dios como guía y Fortaleza

A mis padres, por ustedes mis logros pueden llegar a nuestro linaje.

Índice

Resumen	7
Abstract.....	8
Introducción.....	9
Marco Referencial	12
Investigación.....	20
Resultados	24
Conversión de fuerza a resistencia adhesiva	25
Estadística descriptiva	27
Evaluación de la distribución de los datos	30
Comparación entre los tratamientos superficiales	32
Discusión de los datos	35
Comparación con la literatura científica.....	36
Implicaciones clínicas de los resultados.....	38
Conclusiones y Recomendaciones	41
Conclusiones.....	41
Recomendaciones	43
Recomendaciones para la práctica clínica.....	43
Recomendaciones para futuras investigaciones	44
Referencias	45

Índice de tablas

Tabla 1. Características Fundamentales de la Y-TZP	13
Tabla 2. Limitación Adhesiva Crítica	14
Tabla 3. Tratamientos de Superficie y Mecanismos de Adhesión	16
Tabla 4. Factores que Modulan la Resistencia Adhesiva.....	18
Tabla 5: Datos crudos de la prueba de cizallamiento (N) – Arenado Convencional (AC)	24
Tabla 6. Datos crudos de la prueba de cizallamiento (N) – Arenado Triboquímico (AT)	25
Tabla 7. Conversión de fuerza (N) a resistencia adhesiva (MPa) – Arenado Convencional (AC)	26
Tabla 8. Conversión de fuerza (N) a resistencia adhesiva (MPa) – Arenado Triboquímico (AT).....	27
Tabla 9. Estadística descriptiva de la fuerza y la resistencia adhesiva	28
Tabla 10. Evaluación de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk.....	31
Tabla 11. Comparación de la resistencia adhesiva entre los tratamientos superficiales	33

Índice de figuras

Figura 1. Distribución de la fuerza de cizallamiento entre grupos	29
Figura 2. Distribución de la resistencia adhesiva (MPa)	30

Influencia Del Arenado Convencional Y Triboquimico En La Resistencia Adhesiva De Zirconio-Cemento

Cesar Ramsés Carvajal Villacís

ramsescarvajal95@hotmail.com

Resumen

La adhesión entre el dióxido de zirconio y los cementos resinosos constituye un factor determinante en la longevidad de las restauraciones indirectas en odontología restauradora. La modificación de la superficie cerámica mediante tratamientos mecánicos o químicos previos a la cementación busca superar la limitación adhesiva inherente a la ausencia de fase vítrea en la zirconia policristalina. El objetivo fue evaluar la influencia del arenado convencional y del recubrimiento triboquímico en la resistencia adhesiva de zirconia-cemento mediante pruebas de cizallamiento. La metodología se basó en un estudio experimental in vitro comparativo; las muestras fueron 48 especímenes de zirconia Y-TZP (n = 24 por grupo), los cuales fueron sometidos a arenado convencional con partículas de óxido de aluminio o a recubrimiento triboquímico con sílice. Posteriormente, se cementaron cilindros de resina compuesta sobre las superficies tratadas utilizando cemento resinoso, y los especímenes fueron almacenados 24 horas en agua destilada a 37 °C antes del ensayo mecánico. El resultado determinó que la zirconia tratada mediante recubrimiento triboquímico alcanzó una resistencia adhesiva media de 27,67 MPa, valor superior al obtenido con el arenado convencional, que registró 23,38 MPa. No obstante, la prueba t de Student para muestras independientes indicó que la diferencia observada no alcanzó significancia estadística ($p = 0,064$), aunque evidenció una tendencia favorable hacia el tratamiento triboquímico. La evaluación de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk confirmó distribución normal en ambos grupos, validando el empleo de pruebas paramétricas.

Palabras clave: Zirconia, Arenado convencional, Recubrimiento triboquímico,
Estudio experimental

Abstract

The adhesion between zirconium dioxide and resin cements constitutes a determinant factor in the longevity of indirect restorations in restorative dentistry. Surface modification of the ceramic substrate through mechanical or chemical treatments prior to cementation aims to overcome the inherent adhesive limitation resulting from the absence of a vitreous phase in polycrystalline zirconia. The objective was to evaluate the influence of conventional airborne-particle abrasion and tribochemical silica coating on the shear bond strength of zirconia-cement interfaces through shear bond testing. The methodology was based on a comparative in vitro experimental study; the sample comprised 48 Y-TZP zirconia specimens ($n = 24$ per group), which were subjected to either conventional alumina particle abrasion or tribochemical silica coating. Subsequently, composite resin cylinders were luted onto the treated surfaces using resin cement, and the specimens were stored in distilled water at 37 °C for 24 hours prior to mechanical testing. The results demonstrated that zirconia treated by tribochemical silica coating achieved a mean bond strength of 27.67 MPa, a value exceeding that obtained with conventional airborne-particle abrasion, which recorded 23.38 MPa. Nevertheless, the independent-samples Student's t-test indicated that the observed difference did not reach statistical significance ($p = 0.064$), although it evidenced a favorable trend toward the tribochemical treatment. Normality assessment via the Shapiro-Wilk test confirmed normal distribution in both groups, thereby validating the use of parametric tests.

Keywords: Zirconia, Airborne-particle abrasion, Tribochemical silica coating,
Experimental study.

Introducción

En odontología restauradora, la zirconia policristalina estabilizada con itria (Y-TZP) constituye el sistema cerámico de elección para restauraciones indirectas de alta exigencia mecánica y estética; su elevada resistencia a la fractura, biocompatibilidad y estabilidad química derivan del mecanismo de transformación de fase inducida por tensión, donde la transición tetragonal-monoclínica genera un aumento volumétrico que bloquea la propagación de grietas (Winter & Clarke, 2006; Silmeoglu-Yagli et al., 2024). Sin embargo, la ausencia de fase vítrea en su estructura policristalina impide la aplicación de protocolos adhesivos convencionales basados en grabado ácido y silanización, limitando la obtención de uniones adhesivas estables con sustratos resinosos (Lim et al., 2018).

Es ahí donde la modificación superficial emerge como estrategia obligatoria para superar esta limitación ya que el arenado con óxido de aluminio incrementa la rugosidad superficial y promueve retención micromecánica, aunque induce transformaciones de fase residuales y tensiones superficiales que comprometen la integridad estructural a largo plazo (Chen et al., 2020). El recubrimiento triboquímico con sílice combina rugosificación con deposición de una capa rica en SiO_2 , habilitando la silanización y potenciando la adhesión química; sin embargo, la distribución heterogénea de dicha capa genera interfaces con mecanismos de unión simultáneos y parcialmente impredecibles (Nagaoka et al., 2018). En este escenario, los cementos resinosos formulados con 10-metacrilóiloxidecil dihidrogeno fosfato (10-MDP) establecen enlaces covalentes con óxidos metálicos superficiales, constituyendo una vía adhesiva complementaria independiente de la silanización (Lim et al., 2018; Ramos et al., 2024).

La variabilidad de resultados reportada en la literatura (atribuible a diferencias en tipos de zirconia, sistemas cementantes, condiciones de envejecimiento y protocolos de tratamiento) evidencia la necesidad de estudios experimentales comparativos bajo

condiciones controladas. Dicha evidencia orientará la selección de protocolos clínicos optimizados para la cementación de restauraciones de Y-TZP.

A partir de los antecedentes expuestos y considerando la importancia clínica de lograr una unión adhesiva estable entre la zirconia y los cementos resinosos, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿existen diferencias significativas en la resistencia adhesiva al cizallamiento entre zirconia tratada mediante arenado convencional con partículas de óxido de aluminio y zirconia tratada mediante recubrimiento triboquímico con sílice cuando se utiliza cemento resinoso?

Con base en esta interrogante, el objetivo general del presente estudio es evaluar y comparar la resistencia adhesiva al cizallamiento entre zirconia y cemento resinoso después de la aplicación de dos tratamientos superficiales distintos: el arenado convencional con partículas de óxido de aluminio y el recubrimiento triboquímico con sílice.

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Aplicar dos protocolos de tratamiento superficial sobre muestras de zirconia: arenado convencional con partículas de óxido de aluminio y recubrimiento triboquímico con sílice.
2. Cementar cilindros de resina sobre las superficies tratadas utilizando un cemento resinoso bajo condiciones estandarizadas de laboratorio.
3. Determinar la resistencia adhesiva al cizallamiento de la interfase zirconia–cemento mediante una máquina universal de ensayos.
4. Analizar y comparar estadísticamente los valores de resistencia adhesiva obtenidos en ambos grupos experimentales.

En relación con el análisis estadístico del estudio, se plantea la siguiente hipótesis nula (H_0): no existen diferencias estadísticamente significativas en la resistencia adhesiva al cizallamiento entre zirconia tratada mediante arenado convencional con partículas de óxido

de aluminio y zirconia tratada mediante recubrimiento triboquímico con sílice cuando se utiliza cemento resinoso.

Marco Referencial

En la odontología restauradora moderna, el desarrollo de biomateriales dentales ha permitido ampliar significativamente las alternativas de tratamiento disponibles para la rehabilitación oral. A lo largo de las últimas décadas, la investigación en materiales cerámicos ha buscado mejorar tanto las propiedades mecánicas como los resultados estéticos de las restauraciones dentales. Como resultado de estos avances, las cerámicas han adquirido un papel fundamental en la práctica clínica, particularmente en restauraciones indirectas como coronas, puentes y prótesis implanto soportadas. Dentro de este grupo de materiales, el dióxido de zirconio se ha consolidado como uno de los sistemas cerámicos más utilizados en odontología restauradora debido a su elevada resistencia mecánica, su biocompatibilidad y su estabilidad estructural (Silmeoglu-Yagli et al., 2024).

La zirconia pertenece al grupo de las cerámicas policristalinas, las cuales se caracterizan por la ausencia de fase vítrea y por la presencia de una estructura cristalina altamente organizada. Desde el punto de vista estructural, este material presenta tres fases cristalinas principales que dependen de la temperatura: la fase monoclinica, estable a temperatura ambiente; la fase tetragonal, estable a temperaturas superiores a 1170 °C; y la fase cúbica, estable a temperaturas superiores a 2370 °C (Winter & Clarke, 2006). Estas transformaciones estructurales poseen una gran relevancia en la odontología restauradora, ya que influyen directamente en las propiedades físicas y mecánicas del material.

En aplicaciones odontológicas, la zirconia policristalina estabilizada con itria, conocida como Y-TZP (Yttria-stabilized Tetragonal Zirconia Polycrystal), es la forma más utilizada. La adición de óxido de itrio permite estabilizar la fase tetragonal a temperatura ambiente, lo que mejora significativamente la resistencia del material frente a la propagación de grietas. Este fenómeno, conocido como transformación de fase inducida por tensión, ocurre cuando una grieta comienza a propagarse en el material y provoca la transformación

de cristales tetragonales a fase monoclinica, generando un aumento volumétrico que dificulta la propagación de la fractura. Este mecanismo explica en gran medida la elevada resistencia mecánica de la zirconia y su capacidad para soportar cargas funcionales elevadas en el entorno oral.

Tabla 1.

Características Fundamentales de la Y-TZP

Aspecto	Descripción
Clasificación	Cerámica policristalina (sin fase vítrea)
Forma utilizada	Y-TZP (Yttria-stabilized Tetragonal Zirconia Polycrystal)
Estabilización	Óxido de itrio (Y_2O_3) estabiliza fase tetragonal a temperatura ambiente
Mecanismo de resistencia	Transformación de fase inducida por tensión (tetragonal \rightarrow monoclinica) con aumento volumétrico que bloquea grietas
Fases cristalinas	Monoclinica ($< 1170^\circ C$) \rightarrow Tetragonal ($1170-2370^\circ C$) \rightarrow Cúbica ($> 2370^\circ C$)
Ventajas clave	Alta resistencia mecánica, biocompatibilidad, estabilidad química, color blanco estético
Aplicaciones clínicas	Coronas unitarias, puentes, infraestructuras implantosoportadas, restauraciones monolíticas

Nota: Características basadas en los estudios de Winter & Clarke (2006) y de Silmeoglu-Yagli et al. (2024).

Gracias a estas características, la zirconia ha sido incorporada progresivamente en diferentes aplicaciones clínicas dentro de la odontología restauradora. Entre sus usos más frecuentes se encuentran las coronas unitarias, las prótesis parciales fijas, las infraestructuras para prótesis implanto soportadas y las restauraciones monolíticas. Además, su color blanco y su estabilidad química la convierten en una alternativa favorable frente a las restauraciones metálicas tradicionales, especialmente en zonas donde las exigencias estéticas son mayores.

A pesar de las ventajas mecánicas y estéticas que ofrece este material, la zirconia presenta una limitación importante relacionada con su comportamiento adhesivo. A diferencia de otras cerámicas dentales basadas en sílice, como las cerámicas feldespáticas o el disilicato de litio, la zirconia no contiene una fase vítrea susceptible al grabado con ácido

fluorhídrico. Este procedimiento, ampliamente utilizado en otras cerámicas, permite generar microporosidades superficiales que favorecen la retención micromecánica y la adhesión química mediante agentes silanizantes. En el caso de la zirconia, la ausencia de esta fase vítrea impide la aplicación de este protocolo adhesivo convencional, lo que dificulta la obtención de una unión adhesiva estable entre la cerámica y los materiales cementantes (Lim et al., 2018).

Tabla 2.

Limitación Adhesiva Crítica

Elemento	Descripción	Implicación clínica
Problema central	Ausencia de fase vítrea	No permite grabado con ácido fluorhídrico
Cerámicas comparables	Feldespáticas, disilicato de litio	Sí poseen fase vítrea silícica
Protocolo convencional inhabilitado	Grabado ácido + silanización	Genera microporosidades y enlaces químicos Si-O-Si
Consecuencia	Imposibilidad de retención micromecánica + adhesión química tradicional	Dificultad para obtener unión adhesiva estable

Nota: Limitaciones identificadas a partir de Lim et al. (2018)

Debido a esta limitación, la adhesión a zirconia depende principalmente de la modificación de la superficie del material mediante tratamientos mecánicos o químicos previos al proceso de cementación. Estos tratamientos buscan incrementar la rugosidad superficial del material y mejorar su energía de superficie, favoreciendo así tanto la retención micromecánica como la interacción química con los sistemas adhesivos utilizados en odontología restauradora.

Uno de los tratamientos superficiales más utilizados para mejorar la adhesión a zirconia es la abrasión con partículas de óxido de aluminio, conocida clínicamente como arenado convencional. Este procedimiento consiste en la proyección de partículas abrasivas

sobre la superficie cerámica mediante aire a presión, lo que genera irregularidades microscópicas capaces de aumentar la rugosidad superficial del material. Estas irregularidades permiten mejorar el anclaje micromecánico del cemento resinoso, lo que puede incrementar la resistencia adhesiva de la restauración.

Sin embargo, diversos estudios han señalado que la abrasión con partículas de alúmina puede producir modificaciones estructurales en la superficie de la zirconia. Chen et al. (2020) demostraron que el impacto de las partículas abrasivas puede inducir transformaciones de fase de tetragonal a monoclinica en la superficie del material, fenómeno que depende de factores como el tamaño de partícula, la presión aplicada y la distancia de arenado. Aunque estas transformaciones pueden contribuir a un aumento inicial en la resistencia adhesiva debido al incremento de la rugosidad superficial, también se han asociado con la generación de tensiones residuales y defectos superficiales que podrían afectar el comportamiento mecánico del material a largo plazo.

Como alternativa al arenado convencional, se ha propuesto el recubrimiento triboquímico con sílice como una estrategia que combina mecanismos de retención micromecánica y adhesión química. Este procedimiento consiste en la proyección de partículas de óxido de aluminio recubiertas con sílice sobre la superficie de la zirconia. Durante este proceso, además de generarse rugosidad superficial, se deposita una capa rica en sílice que permite posteriormente la aplicación de agentes silanizantes, los cuales pueden formar enlaces químicos entre la superficie cerámica y las matrices resinosas (Chen et al., 2020).

Tabla 3.*Tratamientos de Superficie y Mecanismos de Adhesión*

Tratamiento	Mecanismo principal	Ventajas	Limitaciones / Riesgos
Arenado convencional (Al₂O₃)	Rugosificación micromecánica	Incrementa rugosidad superficial y anclaje mecánico	Induce transformación tetragonal→monoclínica; genera tensiones residuales y defectos superficiales que comprometen integridad a largo plazo
Recubrimiento triboquímico (Rocatec / CoJet)	Rugosificación + deposición de capa rica en sílice (SiO ₂)	Habilita silanización posterior; combina retención micromecánica y adhesión química	Distribución heterogénea de sílice (cobertura parcial); adhesión depende de mecanismos simultáneos e impredecibles
Láser femtosegundo	Modificación topográfica y energética	Potencialmente superior en rugosidad y resistencia adhesiva	Fase experimental; no protocolo clínico habitual
Recubrimiento nano-hidroxiapatita	Modificación bioactiva superficial	—	Fase experimental; no protocolo clínico habitual

Nota: referenciado desde Chen et al. (2020); Nagaoka et al. (2018) y Alkhudhairy & Shono, (2025)

No obstante, estudios microscópicos han demostrado que la capa de sílice generada mediante el recubrimiento triboquímico no siempre se distribuye de forma homogénea sobre la superficie de la zirconia. Nagaoka et al. (2018) observaron que algunas áreas de la superficie tratada presentan cobertura parcial de sílice, mientras que otras zonas permanecen expuestas. Esta característica sugiere que la adhesión obtenida mediante este tratamiento puede depender de diferentes mecanismos simultáneos, incluyendo la silanización en las zonas recubiertas de sílice y la interacción química directa entre los monómeros funcionales de los cementos resinosos y los óxidos metálicos presentes en la superficie de la zirconia.

En este contexto, el monómero funcional 10-metacrililoiloxidecil dihidrogen fosfato (10-MDP) ha demostrado desempeñar un papel importante en la adhesión a zirconia. Este

monómero posee la capacidad de formar enlaces químicos estables con los óxidos metálicos presentes en la superficie cerámica, lo que contribuye a mejorar la resistencia adhesiva cuando se utilizan sistemas cementantes que lo contienen. Lim et al. (2018) demostraron que la aplicación continua de un primer y un cemento resinoso que contienen 10-MDP puede incrementar significativamente la resistencia de unión a zirconia tratada mediante recubrimiento triboquímico.

De manera similar, Ramos et al. (2024) señalaron que algunos cementos resinosos que contienen este monómero funcional pueden generar valores de resistencia adhesiva comparables incluso sin la utilización de primers cerámicos específicos. Estos resultados sugieren que la composición química del cemento resinoso también desempeña un papel relevante en el comportamiento adhesivo de la zirconia. Sin embargo, los autores también destacan que el tratamiento superficial previo continúa siendo un factor determinante para lograr una unión estable y duradera.

Diversos estudios han evaluado la resistencia adhesiva de zirconia tratada mediante diferentes protocolos de superficie. Thammajarak et al. (2020) compararon la resistencia al cizallamiento de cementos resinosos sobre zirconia tratada con abrasión por partículas de alúmina y sobre zirconia tratada mediante recubrimiento triboquímico con sílice. Los autores observaron diferencias entre ambos tratamientos, lo que sugiere que el tipo de modificación superficial puede influir de manera significativa en el comportamiento adhesivo de la interfase zirconia-cemento.

Además de estos métodos convencionales, investigaciones recientes han explorado técnicas alternativas de modificación superficial, como el tratamiento con láser femtosegundo o el recubrimiento con nano-hidroxiapatita. Alkhudhairi y Shono (2025) evaluaron la rugosidad superficial y la resistencia adhesiva de zirconia tratada mediante diferentes métodos, observando que algunas de estas técnicas pueden generar valores superiores de

rugosidad y resistencia adhesiva en comparación con los tratamientos convencionales. Sin embargo, estos métodos aún se encuentran en fases experimentales y no forman parte de los protocolos clínicos habituales.

Tabla 4.

Factores que Modulan la Resistencia Adhesiva

Factor	Efecto sobre la adhesión
10-MDP en cementos/primers	Forma enlaces químicos estables con óxidos metálicos de la zirconia; incrementa resistencia de unión incluso sin primers cerámicos específicos
Tipo de zirconia	Diferentes composiciones/grados de tetragonalidad alteran respuesta a tratamientos
Sistema cementante	Composición química (presencia/ausencia de 10-MDP) determina interacción con superficie
Condiciones de envejecimiento	Simulación del entorno oral (termociclado, almacenamiento) afecta durabilidad de la unión
Protocolo de tratamiento superficial	Tipo, presión, distancia, tamaño de partícula, homogeneidad de deposición
Interacción tratamiento-cemento	Sinergia o antagonismo entre mecanismos micromecánicos y químicos

Nota: Factores de Resistencia explicados desde Lim et al. (2018); Ramos et al. (2024)

Chen et al. (2020) y Thammajaruk et al. (2020)

En conjunto, la evidencia científica disponible indica que tanto el arenado convencional con partículas de óxido de aluminio como el recubrimiento triboquímico con sílice pueden mejorar la adhesión a zirconia. Sin embargo, los resultados reportados en la literatura muestran cierta variabilidad en relación con la eficacia de cada método. Estas diferencias pueden deberse a múltiples factores experimentales, como el tipo de zirconia utilizado, el sistema cementante empleado, las condiciones de envejecimiento y los protocolos de tratamiento superficial aplicados.

Debido a esta variabilidad en los resultados, resulta necesario realizar estudios experimentales que permitan comparar de manera directa el comportamiento adhesivo de distintos tratamientos de superficie bajo condiciones controladas de laboratorio. Este tipo de

estudios contribuye a comprender mejor la influencia de los tratamientos superficiales en la resistencia adhesiva y permite generar evidencia que pueda orientar la selección de protocolos clínicos más adecuados para la cementación de restauraciones de zirconia.

Investigación

El presente estudio corresponde a una investigación experimental *in vitro* de tipo comparativo, cuyo propósito fue evaluar la resistencia adhesiva al cizallamiento entre zirconia y cemento resinoso después de la aplicación de dos protocolos distintos de tratamiento superficial. Este tipo de diseño experimental permite analizar el comportamiento mecánico de la interfase adhesiva bajo condiciones controladas de laboratorio, reduciendo la influencia de variables clínicas que podrían afectar los resultados. Asimismo, el enfoque experimental facilita la comparación directa entre los tratamientos superficiales evaluados, permitiendo determinar si las modificaciones en la superficie del material influyen significativamente en la resistencia de unión entre la zirconia y el cemento resinoso.

La muestra estuvo constituida por 48 especímenes de zirconia, los cuales fueron distribuidos en dos grupos experimentales independientes de 24 muestras cada uno. La determinación de este tamaño de muestra se realizó considerando la naturaleza experimental del estudio y tomando como referencia investigaciones previas en el campo de la odontología restauradora y de los materiales dentales, en las cuales los ensayos de resistencia adhesiva suelen emplear tamaños de muestra que oscilan entre 10 y 25 especímenes por grupo experimental. En este contexto, la utilización de 24 muestras por grupo permite contar con un número adecuado de observaciones para realizar comparaciones estadísticas entre tratamientos superficiales, reduciendo al mismo tiempo el efecto de la variabilidad experimental inherente a los ensayos mecánicos de laboratorio. Este tamaño de muestra proporciona una base suficiente para detectar diferencias potenciales en la resistencia adhesiva entre los grupos estudiados y contribuye a mejorar la precisión de las estimaciones obtenidas.

Las muestras fueron asignadas a dos grupos experimentales de acuerdo con el tratamiento superficial aplicado a la zirconia. En el primer grupo se realizó un tratamiento de

arenado convencional con partículas de óxido de aluminio, procedimiento ampliamente utilizado en odontología restauradora con el objetivo de generar irregularidades microscópicas en la superficie del material. Estas irregularidades incrementan el área de contacto y favorecen la retención micromecánica del cemento resinoso, contribuyendo potencialmente a mejorar la adhesión entre ambos materiales.

En el segundo grupo experimental se aplicó un recubrimiento triboquímico con sílice, técnica que consiste en la proyección de partículas recubiertas de sílice sobre la superficie de la zirconia. Este procedimiento no solo produce una modificación mecánica de la superficie, sino que además genera una modificación química que facilita la interacción entre el material cerámico y los sistemas adhesivos utilizados en la cementación. El recubrimiento triboquímico ha sido propuesto como una estrategia para mejorar la unión entre zirconia y cementos resinosos mediante la incorporación de componentes que favorecen la adhesión química.

Una vez realizado el tratamiento superficial correspondiente en cada grupo, se procedió a la cementación de cilindros de resina sobre las superficies de zirconia tratadas, utilizando un cemento resinoso de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Todos los procedimientos de cementación fueron realizados bajo condiciones estandarizadas de laboratorio con el objetivo de garantizar la uniformidad del proceso y evitar variaciones que pudieran afectar los resultados. Posteriormente, las muestras fueron preparadas para la realización de la prueba mecánica de resistencia adhesiva.

La resistencia adhesiva al cizallamiento fue evaluada mediante el uso de una máquina universal de ensayos mecánicos, equipo diseñado para aplicar cargas controladas sobre los materiales y medir su comportamiento frente a diferentes tipos de fuerzas. Durante la prueba, cada espécimen fue sometido a una carga progresiva aplicada sobre la interfase zirconia–cemento hasta producir la falla del sistema adhesivo. El valor máximo de fuerza registrado en

el momento de la fractura fue medido y registrado en Newtons (N) para cada una de las muestras analizadas. Estos valores representan la fuerza necesaria para provocar la separación entre los materiales, constituyendo así la medida de la resistencia adhesiva al cizallamiento.

Los datos obtenidos a partir de las pruebas mecánicas fueron organizados en una base de datos para su posterior análisis estadístico. El procesamiento de la información se realizó utilizando el software IBM SPSS Statistics (Statistical Package for the Social Sciences), en su versión más reciente disponible al momento del análisis. En una primera etapa se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo, mediante el cual se calcularon medidas de tendencia central y de dispersión, incluyendo la media, la desviación estándar, así como los valores mínimos y máximos registrados en cada grupo experimental. Este análisis permitió caracterizar el comportamiento general de los datos y observar posibles diferencias preliminares entre los grupos evaluados.

Posteriormente, se evaluó el comportamiento y la distribución de los datos mediante pruebas de normalidad, con el objetivo de determinar si los valores obtenidos seguían una distribución normal. Esta etapa es fundamental para seleccionar adecuadamente las pruebas estadísticas inferenciales que se aplicarán en la comparación entre los grupos experimentales.

En función de los resultados obtenidos en el análisis de normalidad, se seleccionaron las pruebas estadísticas más adecuadas para la comparación entre grupos independientes, considerando las características y el comportamiento de los datos. De esta manera, se aplicaron pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas según correspondiera, con el propósito de identificar posibles diferencias estadísticamente significativas en la resistencia adhesiva entre los tratamientos superficiales evaluados.

El nivel de significancia estadística adoptado para todas las pruebas fue $p < 0,05$. La selección de las pruebas estadísticas específicas, así como la interpretación de los resultados obtenidos, se presentan y analizan de forma detallada en la sección de resultados y análisis

estadístico, donde se explica el procedimiento aplicado y la justificación de cada prueba utilizada de acuerdo con el comportamiento de los datos.

Resultados

El análisis de los resultados se realizó con el objetivo de comparar la resistencia adhesiva entre la zirconia y el cemento resinoso después de aplicar dos tipos de tratamiento superficial: arenado convencional (AC) y arenado triboquímico (AT).

Los valores obtenidos durante la prueba de cizallamiento fueron registrados inicialmente en Newtons (N), que corresponden a la fuerza máxima necesaria para provocar la falla adhesiva entre los materiales.

Posteriormente, estos valores fueron convertidos a Megapascuales (MPa), que es la unidad utilizada en estudios de materiales para expresar resistencia mecánica, ya que considera la fuerza aplicada en relación con el área de adhesión.

En esta sección se presentan primero los datos crudos obtenidos durante el ensayo, y posteriormente se explica el procedimiento utilizado para convertir estos valores en resistencia adhesiva, lo que permitirá realizar el análisis estadístico comparativo entre los grupos.

Tabla 5:

Datos crudos de la prueba de cizallamiento (N) – Arenado Convencional (AC)

Muestra	N	Muestra	N	Muestra	N
1	49	9	26	17	25
2	50	10	23	18	39
3	46	11	27	19	20
4	27	12	43	20	45
5	13	13	46	21	29
6	25	14	20	22	32
7	14	15	52	23	27
8	15	16	34	24	42

Nota: Elaboración Propia

Estas tablas presentan los valores registrados directamente por la máquina universal de ensayos. Cada valor corresponde a la fuerza máxima (en Newtons) necesaria para

provocar la falla adhesiva en cada muestra. Se muestran los resultados separados por tipo de tratamiento superficial.

Tabla 6.

Datos crudos de la prueba de cizallamiento (N) – Arenado Triboquímico (AT)

Muestra	N	Muestra	N	Muestra	N
1	28	9	37	17	30
2	20	10	38	18	41
3	45	11	27	19	47
4	40	12	32	20	35
5	42	13	35	21	45
6	59	14	27	22	43
7	50	15	44	23	27
8	34	16	38	24	46

Nota: Elaboración Propia

Conversión de fuerza a resistencia adhesiva

Los valores presentados en la tabla anterior corresponden a fuerza aplicada (N). Sin embargo, para evaluar la resistencia adhesiva entre materiales es necesario considerar también el área de adhesión, ya que la misma fuerza puede producir diferentes niveles de estrés dependiendo del tamaño del área donde se aplica.

Por esta razón, los valores de fuerza fueron convertidos a resistencia adhesiva, expresada en Megapascuales (MPa). Esta unidad representa la presión necesaria para provocar la falla del sistema adhesivo, lo que permite comparar los resultados entre diferentes estudios y materiales.

La resistencia adhesiva se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

- σ = resistencia adhesiva (MPa)
- F = fuerza registrada (N)

- $A = \text{área de adhesión (mm}^2\text{)}$

El área de adhesión fue calculada a partir del diámetro del cilindro de resina utilizado en la prueba, que fue de 1.32 mm. A partir de este valor se calculó el radio (0.66 mm) y posteriormente el área utilizando la fórmula del área del círculo:

$$A = \pi r^2 = 1,37\text{mm}^2$$

Por lo tanto, la conversión utilizada fue:

$$\text{MPa} = \frac{N}{1,37}$$

Tabla 7.

Conversión de fuerza (N) a resistencia adhesiva (MPa) – Arenado Convencional (AC)

Muestra	MPa	Muestra	MPa	Muestra	MPa
1	35,77	9	18,98	17	18,25
2	36,5	10	16,79	18	28,47
3	33,58	11	19,71	19	14,6
4	19,71	12	31,39	20	32,85
5	9,49	13	33,58	21	21,17
6	18,25	14	14,6	22	23,36
7	10,22	15	37,96	23	19,71
8	10,95	16	24,82	24	30,66

Nota: Elaboración Propia

Estas tablas muestran los valores de resistencia adhesiva obtenidos después de convertir la fuerza registrada en Newtons a Megapascuales, considerando el área de adhesión del cilindro de resina. Estos valores serán utilizados para el análisis estadístico comparativo entre los grupos.

Tabla 8.*Conversión de fuerza (N) a resistencia adhesiva (MPa) – Arenado Triboquímico (AT)*

Muestra	MPa	Muestra	MPa	Muestra	MPa
1	20,44	9	27,01	17	21,9
2	14,6	10	27,74	18	29,93
3	32,85	11	19,71	19	34,31
4	29,2	12	23,36	20	25,55
5	30,66	13	25,55	21	32,85
6	43,07	14	19,71	22	31,39
7	36,5	15	32,12	23	19,71
8	24,82	16	27,74	24	33,58

Nota: Elaboración Propia**Estadística descriptiva**

Con el propósito de comprender el comportamiento general de los datos antes de realizar comparaciones estadísticas entre los grupos experimentales, se llevó a cabo un análisis de estadística descriptiva. Este tipo de análisis permite resumir la información obtenida en cada grupo y proporciona una primera aproximación sobre la tendencia central y la variabilidad de los resultados registrados durante el ensayo mecánico.

Para cada grupo experimental se calcularon diferentes medidas estadísticas, entre ellas el número de muestras analizadas (n), el valor promedio o media, la desviación estándar, así como los valores mínimo y máximo registrados. La media representa el valor promedio de la fuerza necesaria para producir la falla adhesiva, mientras que la desviación estándar permite estimar el grado de dispersión de los valores alrededor del promedio. Por su parte, los valores mínimo y máximo permiten identificar el rango de variación observado en cada grupo.

Este análisis descriptivo constituye un paso fundamental dentro del análisis estadístico, ya que permite identificar de manera preliminar posibles diferencias entre los grupos estudiados, así como evaluar la variabilidad de los resultados antes de aplicar pruebas estadísticas inferenciales.

La tabla presenta un resumen estadístico de las dos variables obtenidas en el estudio: la fuerza registrada durante la prueba de cizallamiento (N) y la resistencia adhesiva calculada (MPa). Se incluyen el número de muestras analizadas, el valor promedio, la desviación estándar y los valores mínimo y máximo observados en cada grupo experimental. Este resumen permite comprender el comportamiento general de los datos antes de realizar el análisis estadístico comparativo.

Tabla 9.

Estadística descriptiva de la fuerza y la resistencia adhesiva

Tipo de arenado	n	Medi a (N)	Desv. est. (N)	Mín (N)	Máx (N)	Media (MPa)	Desv. est. (MPa)	Mín (MPa)	Máx (MPa)
Arenado convencional (AC)	24	32,04	12,17	13	52	23,38	8,89	9,49	37,96
Arenado triboquímico (AT)	24	37,92	8,94	20	59	27,68	6,53	14,6	43,07

Nota: Elaboración Propia

Los resultados muestran que el grupo sometido a arenado triboquímico presentó valores promedio de fuerza y resistencia adhesiva superiores al grupo de arenado convencional. En términos de fuerza aplicada durante la prueba de cizallamiento, el grupo triboquímico alcanzó una media de 37,92 N, mientras que el grupo convencional presentó una media de 32,04 N. Cuando estos valores se expresan como resistencia adhesiva (MPa), el grupo triboquímico presentó una media de 27,67 MPa, mientras que el grupo convencional presentó 23,38 MPa.

Además, se observa que el grupo de arenado convencional presenta mayor dispersión en los datos, reflejada en una desviación estándar mayor. Esto indica que los resultados obtenidos en este grupo fueron más variables entre las muestras evaluadas.

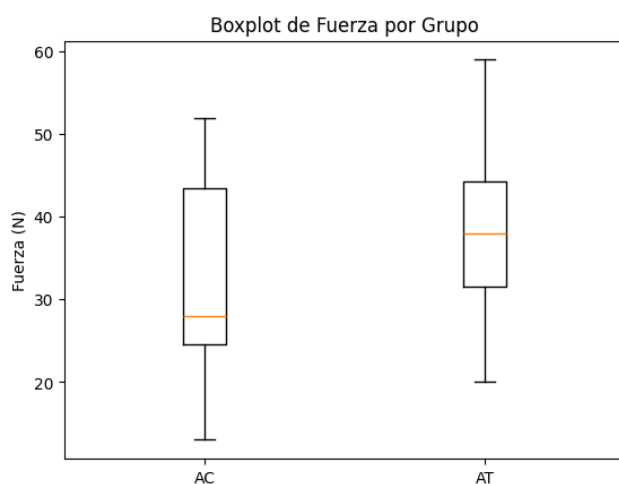
A partir de los resultados presentados en la tabla se puede observar que el grupo correspondiente al arenado triboquímico (AT) presenta valores promedio mayores tanto en fuerza registrada como en resistencia adhesiva calculada, en comparación con el grupo de

arenado convencional (AC). Asimismo, el grupo sometido a arenado convencional presenta una mayor desviación estándar, lo que indica una mayor variabilidad en los valores obtenidos durante el ensayo. En contraste, el grupo triboquímico muestra una distribución de resultados más homogénea.

En términos clínicos, estos resultados sugieren que el tratamiento triboquímico podría generar una unión adhesiva más resistente, aunque para confirmar esta diferencia es necesario realizar pruebas estadísticas que permitan determinar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas.

Figura 1.

Distribución de la fuerza de cizallamiento entre grupos

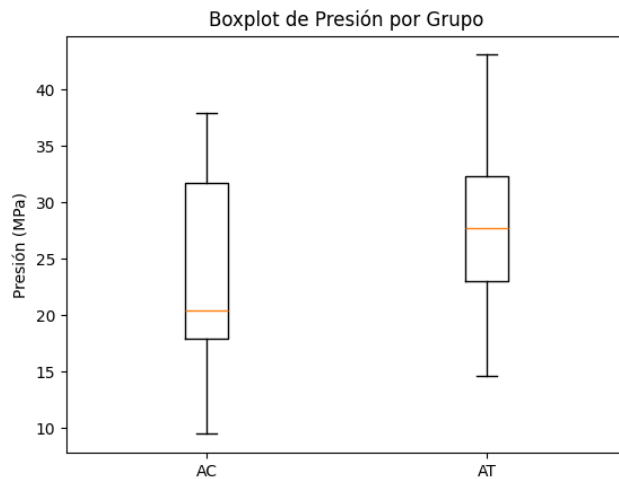


Fuente: Elaboración Propia

El diagrama de caja (boxplot) muestra la distribución de los valores de fuerza registrados durante la prueba de cizallamiento para cada tratamiento superficial. Este tipo de gráfico permite visualizar la mediana, la dispersión de los datos y la presencia de valores extremos. El gráfico evidencia que el grupo de arenado triboquímico tiende a presentar valores de fuerza más altos, con una mediana superior al grupo de arenado convencional. También se observa que la dispersión de los valores es mayor en el grupo convencional.

Figura 2.

Distribución de la resistencia adhesiva (MPa)



Fuente: Elaboración Propia

Este gráfico muestra la distribución de los valores de resistencia adhesiva expresados en megapascuales para cada grupo experimental. La representación permite comparar visualmente las diferencias entre tratamientos. Se observa nuevamente que el grupo de arenado triboquímico presenta valores generalmente más altos de resistencia adhesiva, lo que sugiere una mejor interacción entre el tratamiento superficial y el sistema adhesivo evaluado. No obstante, existe cierto solapamiento entre los rangos de ambos grupos.

Evaluación de la distribución de los datos

Antes de realizar la comparación estadística entre los grupos experimentales, es necesario evaluar el comportamiento de los datos obtenidos. En estadística, muchas pruebas comparativas asumen que los datos siguen una distribución normal, es decir, que los valores se distribuyen de forma simétrica alrededor de una media.

Verificar este supuesto es importante porque determina qué tipo de prueba estadística debe utilizarse posteriormente para comparar los grupos. Cuando los datos presentan distribución normal se pueden utilizar pruebas paramétricas, mientras que si este supuesto no

se cumple es necesario utilizar pruebas no paramétricas. Para evaluar la normalidad de los datos se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, la cual es ampliamente recomendada cuando el tamaño de muestra es menor a 50 observaciones por grupo, como ocurre en el presente estudio. Esta prueba calcula un estadístico denominado W, acompañado de un valor p, que permite determinar si la distribución de los datos se aleja significativamente de la normalidad.

La interpretación del valor p es la siguiente:

- p mayor a 0,05: los datos pueden considerarse normalmente distribuidos.
- p menor a 0,05: los datos no siguen una distribución normal.

Dado que el estudio analiza tanto la fuerza registrada durante la prueba de cizallamiento (N) como la resistencia adhesiva expresada como presión (MPa), la evaluación de normalidad se realizó para ambas variables en cada grupo experimental.

La tabla presenta los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk aplicada a las variables fuerza (N) y resistencia adhesiva (MPa) en los grupos de arenado convencional y arenado triboquímico. Se reporta el estadístico W y el valor p correspondiente.

Tabla 10.

Evaluación de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk

Variable	Grupo	Estadístico W	p
Fuerza (N)	Arenado convencional	0,936	0,13
Fuerza (N)	Arenado triboquímico	0,982	0,931
Presión (MPa)	Arenado convencional	0,936	0,13
Presión (MPa)	Arenado triboquímico	0,982	0,931

Nota: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos muestran que todos los valores de p son superiores a 0,05, lo que indica que no existen desviaciones significativas respecto a una distribución normal en ninguno de los grupos evaluados. En términos prácticos, esto significa que los valores de fuerza y resistencia adhesiva se distribuyen de forma relativamente simétrica alrededor de la media en ambos tratamientos superficiales.

Este resultado es relevante desde el punto de vista metodológico, ya que permite utilizar pruebas estadísticas paramétricas para la comparación entre grupos, las cuales poseen mayor potencia estadística para detectar diferencias reales cuando estas existen.

Comparación entre los tratamientos superficiales

Una vez verificado el comportamiento de la distribución de los datos, se procedió a comparar los dos tratamientos superficiales evaluados en el estudio:

- Arenado convencional (AC)
- Arenado triboquímico (AT)

El objetivo de esta comparación fue determinar si el tipo de tratamiento superficial aplicado al dióxido de zirconio influye en la resistencia adhesiva obtenida durante la prueba de cizallamiento.

Debido a que los datos presentaron distribución normal y los grupos son independientes entre sí, se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes. Esta prueba permite comparar las medias de dos grupos y determinar si las diferencias observadas pueden atribuirse al azar o si reflejan un efecto real del tratamiento experimental.

La tabla presenta la comparación estadística entre los grupos de arenado convencional (AC) y arenado triboquímico (AT). Se muestran las medias y desviaciones estándar de la fuerza registrada durante la prueba de cizallamiento y de la resistencia adhesiva expresada en megapascales (MPa). La comparación se realizó mediante la prueba t de Student para muestras independientes, debido a que los datos presentaron distribución normal según la prueba de Shapiro-Wilk.

Tabla 11.

Comparación de la resistencia adhesiva entre los tratamientos superficiales

Variable	Grupo AC (media ± DE)	Grupo AT (media ± DE)	Estadístico t	p
Fuerza (N)	32,04 ± 12,17	37,92 ± 8,94	-1,91	0,064
Resistencia adhesiva (MPa)	23,38 ± 8,89	27,67 ± 6,53	-1,91	0,064

Nota: Elaboración Propia

Los resultados muestran que el grupo sometido a arenado triboquímico presentó valores promedio superiores tanto de fuerza de cizallamiento como de resistencia adhesiva en comparación con el grupo de arenado convencional.

En términos de resistencia adhesiva, el grupo triboquímico alcanzó una media de 27,67 MPa, mientras que el grupo convencional presentó una media de 23,38 MPa. Esta diferencia representa un incremento aproximado del 18 % en la resistencia adhesiva a favor del tratamiento triboquímico.

Sin embargo, el valor de $p = 0,064$ es ligeramente superior al nivel de significancia estadística establecido ($\alpha = 0,05$). Esto indica que, aunque existe una tendencia hacia una mayor resistencia adhesiva en el grupo triboquímico, la diferencia observada no alcanza significancia estadística bajo los criterios convencionales.

El análisis descriptivo mostró que el grupo tratado mediante arenado triboquímico presentó valores promedio superiores tanto en la fuerza necesaria para producir la falla adhesiva como en la resistencia adhesiva expresada en megapascuales. Estos resultados sugieren una tendencia hacia un mejor desempeño adhesivo cuando se emplea este tipo de tratamiento superficial.

Los diagramas de distribución también evidenciaron que, aunque los valores del grupo triboquímico tienden a ser mayores, existe un cierto grado de solapamiento entre los

resultados de ambos grupos, lo que indica que la variabilidad entre las muestras puede influir en los valores obtenidos.

La evaluación de normalidad realizada mediante la prueba de Shapiro-Wilk confirmó que los datos siguen una distribución aproximadamente normal, lo que permitió utilizar pruebas estadísticas paramétricas para la comparación entre grupos.

La comparación inferencial realizada mediante la prueba t de Student para muestras independientes indicó que las diferencias observadas entre los tratamientos superficiales no alcanzaron significancia estadística, aunque los valores obtenidos sugieren una tendencia hacia una mayor resistencia adhesiva en el grupo de arenado triboquímico.

Desde una perspectiva clínica, estos resultados podrían indicar que el tratamiento triboquímico tiene el potencial de mejorar la interacción entre el dióxido de zirconio y el sistema adhesivo utilizado. No obstante, la ausencia de significancia estadística sugiere que se requieren estudios adicionales con tamaños de muestra mayores o con variaciones en los protocolos de tratamiento superficial para confirmar este posible efecto.

En el capítulo siguiente se realizará una discusión detallada de estos hallazgos, contrastando los resultados obtenidos con investigaciones previas relacionadas con los mecanismos de adhesión, el efecto de los tratamientos superficiales sobre la topografía del sustrato y su impacto en la resistencia adhesiva de los sistemas de cementación utilizados en odontología restauradora.

Discusión de los datos

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de dos tratamientos superficiales del dióxido de zirconio, arenado convencional y arenado triboquímico, sobre la resistencia adhesiva obtenida mediante una prueba de cizallamiento. La adhesión entre la cerámica policristalina y sistemas cementantes constituye un aspecto fundamental en la estabilidad y longevidad de múltiples restauraciones indirectas utilizadas en odontología restauradora y prostodóntica. En este contexto, comprender cómo los diferentes protocolos de acondicionamiento superficial influyen en la resistencia adhesiva resulta esencial para optimizar los procedimientos clínicos.

Los resultados obtenidos muestran que el grupo sometido a arenado triboquímico presentó valores promedio superiores de resistencia adhesiva en comparación con el grupo tratado mediante arenado convencional. Específicamente, el grupo triboquímico presentó una resistencia adhesiva media de 27,67 MPa, mientras que el grupo de arenado convencional mostró una media de 23,38 MPa. Estos resultados representan una diferencia aproximada del 18 % a favor del tratamiento triboquímico.

A pesar de esta diferencia en los valores promedio, el análisis estadístico realizado mediante la prueba t de Student para muestras independientes indicó que la diferencia observada no alcanzó significancia estadística ($p = 0,064$) bajo el nivel de significancia convencional ($\alpha = 0,05$). Este resultado indica que, desde un punto de vista estrictamente estadístico, no es posible afirmar con suficiente evidencia que el tratamiento triboquímico produzca una mejora significativa en la resistencia adhesiva en comparación con el arenado convencional bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Sin embargo, es importante señalar que el valor de p obtenido se encuentra muy cercano al umbral de significancia estadística, lo que sugiere la presencia de una tendencia hacia una mayor resistencia adhesiva en el grupo triboquímico. En investigaciones

experimentales con tamaños de muestra relativamente limitados, es posible que efectos reales no alcancen significancia estadística debido a limitaciones en la potencia estadística del estudio.

Por lo tanto, aunque los resultados no permiten confirmar una diferencia estadísticamente significativa, los valores observados sugieren un posible efecto favorable del arenado triboquímico que podría confirmarse en estudios futuros con un mayor tamaño de muestra o mediante protocolos experimentales adicionales.

Comparación con la literatura científica

Los resultados del presente estudio pueden analizarse en el contexto de investigaciones previas que han evaluado el efecto de los tratamientos superficiales sobre la adhesión en cerámica policristalina y restauraciones indirectas.

Diversos estudios han demostrado que la modificación de la superficie de materiales restauradores mediante técnicas abrasivas constituye una estrategia efectiva para mejorar la adhesión. El arenado convencional con partículas abrasivas genera irregularidades microscópicas en la superficie del material, lo que incrementa el área de contacto entre el sustrato y el agente cementante. Este aumento en la rugosidad superficial favorece la penetración del cemento en las microirregularidades generadas, lo que contribuye al mecanismo de retención micromecánica.

Por otro lado, el arenado triboquímico ha sido descrito como un procedimiento que combina efectos mecánicos y químicos. Durante este proceso, partículas recubiertas con sílice impactan sobre la superficie del material, lo que permite la deposición de sílice en el sustrato. Esta capa superficial rica en sílice puede posteriormente reaccionar con agentes silanos, facilitando la formación de enlaces químicos entre el material restaurador y el cemento o sistema adhesivo utilizado.

La literatura científica ha reportado en múltiples ocasiones que los tratamientos triboquímicos tienden a generar valores superiores de resistencia adhesiva en comparación con los tratamientos abrasivos convencionales. No obstante, también se ha señalado que la magnitud de este efecto puede variar considerablemente dependiendo de diversos factores, entre ellos el tipo de material restaurador, la composición del cemento adhesivo, el protocolo de acondicionamiento superficial utilizado y las condiciones de envejecimiento a las que se someten las muestras.

En este sentido, los resultados obtenidos en el presente estudio, que muestran una tendencia hacia valores superiores de resistencia adhesiva en el grupo triboquímico sin alcanzar significancia estadística, se encuentran dentro del rango de resultados reportados en estudios experimentales similares. Esta variabilidad observada en la literatura refleja la complejidad de los procesos adhesivos y la influencia de múltiples variables en el comportamiento adhesivo de los materiales restauradores.

El arenado convencional actúa principalmente mediante un mecanismo de abrasión mecánica. Las partículas abrasivas impactan sobre la superficie del material, generando microirregularidades y aumentando la rugosidad superficial. Este aumento en la rugosidad permite que el cemento fluya hacia las irregularidades creadas, generando un efecto de anclaje micromecánico cuando el material cementante polimeriza. Sin embargo, este mecanismo depende en gran medida de la capacidad del cemento para penetrar adecuadamente en las microirregularidades generadas y de la estabilidad de estas irregularidades a lo largo del tiempo.

Por otro lado, el arenado triboquímico no solo modifica la topografía superficial del material, sino que también introduce un componente químico adicional en el proceso adhesivo. La deposición de sílice sobre la superficie del material permite la posterior aplicación de agentes silanos, los cuales pueden formar enlaces químicos entre la superficie

tratada y el material cementante. Este doble mecanismo, retención micromecánica combinada con adhesión química, podría explicar la tendencia hacia valores superiores de resistencia adhesiva observada en el grupo triboquímico en el presente estudio. La presencia de enlaces químicos adicionales podría contribuir a una interfaz adhesiva más estable y resistente.

No obstante, la ausencia de una diferencia estadísticamente significativa en el presente estudio sugiere que el efecto del componente químico podría depender de variables adicionales, como la calidad de la deposición de sílice, la eficacia del agente silano utilizado o la compatibilidad química entre el sustrato y el sistema cementante.

Implicaciones clínicas de los resultados

Las implicaciones clínicas de los resultados obtenidos en el presente estudio son particularmente relevantes para los procedimientos restauradores que involucran materiales como el dióxido de zirconio. Este material es ampliamente utilizado en odontología para la fabricación de restauraciones provisionales, estructuras protésicas y diversas aplicaciones en rehabilitación oral.

En la práctica clínica, la durabilidad de estas restauraciones depende en gran medida de la calidad de la adhesión entre el material restaurador y el cemento utilizado. Una adhesión deficiente puede conducir a complicaciones clínicas como descementación, microfiltración, infiltración bacteriana, fractura del material o pérdida de la restauración. En este contexto, la optimización de los protocolos de acondicionamiento superficial representa un aspecto crítico para mejorar la estabilidad y longevidad de las restauraciones indirectas.

Los resultados del presente estudio sugieren que el arenado triboquímico podría ofrecer ventajas potenciales en términos de resistencia adhesiva, al presentar valores promedio superiores en comparación con el arenado convencional. Aunque esta diferencia no alcanzó significancia estadística, la tendencia observada podría tener relevancia clínica en determinadas situaciones.

Desde una perspectiva clínica, incluso incrementos moderados en la resistencia adhesiva pueden traducirse en una mayor estabilidad de la restauración, especialmente en situaciones donde las restauraciones están sometidas a cargas masticatorias significativas o a condiciones funcionales complejas. Además, el uso de tratamientos superficiales que combinan mecanismos de adhesión mecánica y química podría contribuir a mejorar la estabilidad de la interfaz adhesiva a largo plazo, reduciendo el riesgo de fallas adhesivas.

Otro aspecto clínicamente relevante es la posible reducción de complicaciones asociadas a la pérdida de adhesión. La descementación de restauraciones provisionales o definitivas puede generar incomodidad para el paciente, aumentar el riesgo de daño en los tejidos dentales y requerir intervenciones clínicas adicionales. Por lo tanto, la implementación de protocolos de acondicionamiento superficial que optimicen la adhesión podría contribuir a mejorar los resultados clínicos y reducir la necesidad de intervenciones correctivas.

Sin embargo, también es importante considerar que la aplicación clínica de tratamientos triboquímicos puede implicar mayores requerimientos técnicos y equipamiento especializado, lo que podría limitar su uso en determinados entornos clínicos. En este sentido, la decisión de utilizar este tipo de tratamiento debe basarse en una evaluación equilibrada entre los beneficios potenciales y la complejidad del procedimiento.

Asimismo, los resultados obtenidos en estudios *in vitro* deben interpretarse con cautela al extrapolarlos a la práctica clínica. Las condiciones experimentales utilizadas en laboratorio no reproducen completamente el entorno oral, donde factores como la humedad, las variaciones térmicas, la carga masticatoria y el envejecimiento del material pueden influir significativamente en el comportamiento adhesivo.

Por esta razón, los resultados obtenidos en el presente estudio deben considerarse como una aproximación experimental al comportamiento adhesivo del dióxido de zirconio bajo diferentes tratamientos superficiales. Para confirmar la relevancia clínica de estos

hallazgos, sería necesario realizar estudios adicionales que evalúen el comportamiento adhesivo bajo condiciones de envejecimiento artificial o mediante estudios clínicos longitudinales.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Las conclusiones del presente estudio se elaboran en función de los objetivos planteados en la investigación y de los resultados obtenidos durante el análisis experimental de la resistencia adhesiva del dióxido de zirconio sometido a diferentes tratamientos superficiales. El objetivo general de esta investigación fue evaluar la influencia del tratamiento superficial sobre la resistencia adhesiva obtenida mediante un sistema de cementación adhesiva.

- Los resultados obtenidos indican que el tratamiento superficial mediante arenado triboquímico presentó valores promedio superiores de resistencia adhesiva en comparación con el tratamiento de arenado convencional. Sin embargo, el análisis estadístico inferencial mostró que la diferencia observada no alcanzó significancia estadística bajo el nivel de significancia establecido ($p = 0,064$). Por lo tanto, bajo las condiciones experimentales del presente estudio, no se puede afirmar que el tratamiento triboquímico genere una mejora estadísticamente significativa en la resistencia adhesiva del dióxido de zirconio en comparación con el arenado convencional.
- No obstante, la tendencia observada hacia valores superiores en el grupo triboquímico sugiere la posible existencia de un efecto favorable asociado a este tratamiento superficial.

El primer objetivo específico consistió en medir la fuerza necesaria para producir la falla adhesiva entre el dióxido de zirconio y el sistema cementante evaluado.

- Los resultados de la prueba de cizallamiento mostraron que el grupo tratado mediante arenado triboquímico presentó valores promedio mayores de fuerza en comparación

con el grupo sometido a arenado convencional. Este comportamiento sugiere que la modificación superficial producida por el tratamiento triboquímico podría favorecer la estabilidad de la interfaz adhesiva entre la cerámica policristalina y el cemento utilizado.

El segundo objetivo específico consistió en calcular la resistencia adhesiva expresada en megapascales (MPa) a partir de los valores de fuerza registrados durante la prueba de cizallamiento.

- Los resultados obtenidos indicaron que el grupo de arenado triboquímico alcanzó una resistencia adhesiva media de 27,67 MPa, mientras que el grupo de arenado convencional presentó una media de 23,38 MPa. Estos valores reflejan una tendencia hacia una mayor resistencia adhesiva en el grupo triboquímico, lo que podría atribuirse a los mecanismos combinados de adhesión micromecánica y adhesión química asociados a este tipo de tratamiento superficial.

El tercer objetivo específico fue comparar estadísticamente la resistencia adhesiva obtenida entre ambos tratamientos superficiales.

- El análisis estadístico realizado mediante la prueba t de Student para muestras independientes indicó que las diferencias observadas entre los grupos no fueron estadísticamente significativas. Este resultado sugiere que, bajo las condiciones experimentales evaluadas, ambos tratamientos superficiales presentan un comportamiento adhesivo comparable en términos estadísticos. Sin embargo, la tendencia observada hacia valores superiores en el grupo triboquímico sugiere que este tratamiento podría tener el potencial de mejorar la resistencia adhesiva, lo cual debería investigarse en estudios futuros con mayor tamaño de muestra o mediante protocolos experimentales adicionales.

Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio y considerando las limitaciones inherentes a la investigación experimental *in vitro*, se proponen las siguientes recomendaciones para la práctica clínica y para futuras investigaciones.

Recomendaciones para la práctica clínica.

- Los resultados obtenidos sugieren que el tratamiento superficial mediante arenado triboquímico podría representar una alternativa favorable para mejorar la adhesión entre el dióxido de zirconio y los sistemas cementantes utilizados en odontología restauradora, debido a la tendencia observada hacia valores mayores de resistencia adhesiva.
- Desde una perspectiva clínica, la implementación de protocolos de acondicionamiento superficial adecuados puede contribuir a mejorar la estabilidad de las restauraciones indirectas y reducir la probabilidad de fallas adhesivas, tales como descementación o microfiltración.
- Sin embargo, dado que las diferencias observadas en el presente estudio no alcanzaron significancia estadística, la elección del tratamiento superficial debe considerar también otros factores clínicos, como la disponibilidad de equipamiento, la simplicidad del procedimiento y la experiencia del operador.
- En este sentido, el arenado convencional continúa siendo una técnica válida y ampliamente utilizada en la práctica clínica, mientras que el arenado triboquímico podría emplearse en situaciones donde se busque optimizar al máximo la adhesión entre la cerámica policristalina y el cemento utilizado.

Recomendaciones para futuras investigaciones.

- Se recomienda que futuras investigaciones amplíen el tamaño de muestra utilizado en el presente estudio con el fin de aumentar la potencia estadística y evaluar con mayor precisión las posibles diferencias entre los tratamientos superficiales evaluados.
- Asimismo, sería conveniente incorporar protocolos de envejecimiento artificial, como termociclado o carga mecánica cíclica, con el objetivo de evaluar la estabilidad de la interfaz adhesiva bajo condiciones que simulen de manera más realista el entorno oral.
- Otra línea de investigación relevante consiste en analizar el efecto de diferentes sistemas adhesivos y cementos resinosos en combinación con los tratamientos superficiales evaluados, ya que la interacción entre estos factores puede influir significativamente en la resistencia adhesiva obtenida.
- Finalmente, se recomienda realizar estudios clínicos longitudinales que permitan evaluar el comportamiento a largo plazo de las restauraciones realizadas con diferentes protocolos de acondicionamiento superficial, con el fin de confirmar la relevancia clínica de los resultados obtenidos en estudios experimentales.

Referencias

- Alkudhairy, F., & Shono, N. (2025). An investigation of Y-TZP surface characteristics and adhesive properties following treatment with tribochemical silica coating, femtosecond laser, and nano-hydroxyapatite: A scanning electron microscopy evaluation. *Pakistan Journal of Medical Sciences*, 41(3), 758–762.
<https://doi.org/10.12669/pjms.41.3.11302>
- Chen, B., Yan, Y., Xie, H., Meng, H., Zhang, H., & Chen, C. (2020). 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. *Journal of Adhesive Dentistry*, 22(4). <https://doi.org/10.3290/j.jad.a44868>
- Janson, M., et al. (2025). Composite repair on zirconia: Influence of different sandblasting pretreatments and various universal adhesives on shear bond strength. *Journal of Adhesive Dentistry*, 27, 53–64. https://doi.org/10.3290/j.jad.c_1988
- Lim, M., Yu, M., & Lee, K. (2018). The effect of continuous application of MDP-containing primer and luting resin cement on bond strength to tribochemical silica-coated Y-TZP. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 43(2).
- Nagaoka, N., et al. (2018). Ultrastructure and bonding properties of tribochemical silica-coated zirconia. *Dental Materials Journal*, 38(1), 107–113.
- Ramos, R. Q., et al. (2024). Bonding of composite cements containing 10-MDP to zirconia ceramics without dedicated ceramic primer. *Journal of Adhesive Dentistry*, 26(1), 135–145.

Silmeoglu-Yagli, O., Talay Cevlik, E., & Kurklu Arpacay, D. (2024). The impact of aging and thickness on flexural strength of various zirconia ceramics. *BMC Oral Health*, 24(1), 967.

Sirkiä, S. V., et al. (2022). Physicochemical and biological characterization of silica-coated alumina particles. *Dental Materials*, 38(12), 1878–1885.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.09.012>

Thammajaruk, P., et al. (2020). Shear bond strength of composite cement to alumina-coated versus tribochemical silica-treated zirconia. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 105, 103710. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103710>

Winter, M., & Clarke, D. (2006). Thermal conductivity of yttria-stabilized zirconia–hafnia solid solutions. *Acta Materialia*, 54(19), 5051–5059.