

Comparative Study of the Compressive Strength of Sintered Zirconium with and without Surface Treatment and Repairs Rear Firing.

Estudio Comparativo de la Resistencia Compresiva del Zirconio Sinterizado con y sin Tratamiento de Superficie y su Posterior cocción de Reparación.

Sebastián Muñoz Zapata¹, Yesid Montoya Goez,² Martha Liliana Cubillos Galvis³, Erik Daniel Ortega Correa⁴.

- ¹ Protésista Periodontal. Universidad CES. Medellín. Master in Esthetic Dentistry. GIDE/UCLA Los Angeles-California. Dirección electrónica: sebastian@maskart.com.co. ² Ingeniero Civil. Escuela de Ingenieros de Antioquia. Medellín. Dirección electrónica: Yesid.montoya99@gmail.com. ³ Residente Rehabilitación Oral. Universidad CES. Medellín. Dirección electrónica: martha37c@hotmail.com. ⁴ Residente Rehabilitación Oral. Universidad CES. Medellín. Dirección electrónica: erik.ortega@gmail.com.

Recibido: Octubre de 2013. Aprobado: -----

Abstract

INTRODUCTION AND OBJECTIVES

The objective of this study is to compare the compressive strength of sintered zirconia, and when this material is subjected to various surface treatments such as polishing with diamond drills, polishing with diamond disc, and sandblasting with aluminum oxide particles, and after these treatments, it is subjected to repair.

MATERIALS AND METHODS

Experimental study with a total of 70 specimens, which were divided into 7 groups, a control group and the remaining 6 groups were divided into 3 groups with surface treatment (group 2: grinding with diamond bur, group 3: Polished diamond disc and group 4: sandblasting with aluminum oxide) and after this, we applied the test of resistance. The other 3 groups (group 5, 6 and 7), were treated equally to groups 2, 3 and 4, and underwent regeneration firing and once this process is finished, they were subjected to the resistance test.

RESULTS

Each group was evaluated in MPa compressive strength with increased resistance in the control group (without any treatment sintered zirconia surface and thermal) 974 ± 107 MPa compared to the other groups that showed lower compressive strength. (Sintered zirconia surface treatments and thermal), (p -value = 0.044) for the ANOVA test. With the Tukey test, the surface treatments and thermal (diamond cutter and baking repair sandblasting +) showed lower compressive strength with statistically significant differences versus the control group.

CONCLUSION

Zirconium without surface treatment showed the highest resistance values and surface treatments for the zirconium, with diamond bur and sandblasting without posterior repair cooking values increase compressive strength, whereas the ones subjected to a subsequent firing repair decrease the compressive strength of sintered zirconium.

KEY WORDS: Sintered zirconium, compressive strength, surface treatments

Resumen

Introducción y Objetivo:

El objetivo de este estudio es comparar la resistencia compresiva del zirconio sinterizado, y cuando este material es sometido a diferentes tratamientos de superficie tales como: pulido con fresas de diamante, pulido con disco diamantado, y arenado con partículas de óxido de aluminio y posterior a estos tratamientos es sometido a una reparación.

Materiales y métodos:

Estudio experimental con un total de 70 especímenes, los cuales fueron divididos en 7 grupos; un grupo control y los 6 grupos restantes se dividieron en 3 grupos que tuvieron tratamiento de superficie (grupos 2: pulido con fresa de diamante, grupo 3: pulido con piedra diamantada y grupo 4: arenado con óxido de aluminio) y posterior a esto; se aplicó la prueba de resistencia. Los otros 3 grupos (grupo 5, 6 y 7); fueron tratados igual a los grupos 2, 3 y 4, y se les realizó cocción de regeneración y una vez terminado este proceso fueron sometidos a la prueba de resistencia.

Resultados:

En cada grupo se evaluó la resistencia compresiva en MPa con una mayor resistencia en el grupo control (Zirconio sinterizado sin ningún tratamiento de superficie y térmico) 974 ± 107 MPa respecto a los demás grupos que mostraron una menor resistencia compresiva. (Zirconio sinterizado con tratamientos de superficies y térmicos), (valor $p = 0,044$) para la prueba de Anova. la prueba de Tukey, los tratamientos de superficie y térmicos (Fresa de diamante y arenado + cocción de reparación) mostraron una menor fuerza compresiva con diferencias estadísticamente significativas frente al grupo control.

Conclusión:

El zirconio sin tratamiento de superficie mostró los valores de resistencia más altos y los tratamientos de superficie para el zirconio, con fresa de diamante y arenado, sin posterior cocción de reparación aumentan los valores de resistencia compresiva, mientras que los sometidos a una posterior cocción de reparación disminuyen la resistencia compresiva del zirconio sinterizado.

Palabras claves: Zirconio sinterizado, resistencia compresiva, tratamientos de superficie, cocción de regeneración.

Introducción

La demanda estética actual, ha generado la necesidad de utilizar materiales con unas características especiales, que además de ser bio-compatibles, posean unas propiedades ópticas y mecánicas excelentes.^{1,2}

La reciente introducción de cerámica basada en óxido de zirconio y en los materiales dentales restauradores ha generado un considerable interés en la comunidad dental, debido a que el zirconio presenta las propiedades mecánicas más altas registradas por cualquier cerámica dental y sus propiedades ópticas hacen que este sea uno de los más estéticos utilizados actualmente. Motivo por el cual se hace necesario determinar su resistencia compresiva, cuando este material es sometido a diferentes tratamientos de superficie; lo que no sólo aumenta la resistencia a la flexión, sino también altera la integridad de la fase del material y aumenta la susceptibilidad al envejecimiento.^{1,2,3.}

Existen diferentes tratamientos de superficie para el pulido del zirconio, uno se realiza con fresas de diamante, otro se realiza con piedras diamantadas y otro tratamiento es el arenado de la superficie con perlas de óxido de aluminio 50 micras a 2 bares de presión.^{6,8,10,11,12,13.}

Algunos investigadores han demostrado que el arenado mecánicamente incrementa el crecimiento de fisuras superficiales y defectos preexistentes y reduce la resistencia y el pronóstico a largo plazo de este material. Debido a lo

anterior el defecto superficial más insignificante podría ser lo suficientemente grande para actuar como un sitio de concentración de esfuerzos, que finalmente incrementa las posibilidades de fractura y deterioro por fatiga del material.^{6,7.}

En contraste, la superficie se tensiona de manera severa si es arenada con partículas de óxido de aluminio, produciendo estructuras precipitosas hasta con micro-cracks profundos. Los micro-cracks con bordes y defectos agudos tienen un efecto desastroso en el comportamiento frente a la fractura en cerámicas frágiles y como consecuencia se reduce la resistencia del material.^{6,7.}

Sin embargo, Garvie y col. y Kosmac y col, han estado reportando por algún tiempo que el arenado no tiene un efecto negativo sobre la resistencia del Dióxido de zirconio estabilizado con Itiro. Al contrario, ellos argumentan que inclusive se aumenta la resistencia. Este refuerzo se logra debido a la fase de transformación en la superficie desde la fase tetragonal a la fase monoclinica, (transformación martensítica) por esta razón una tensión compresiva superficial le da más resistencia a la cerámica. Es más, diferentes pruebas han probado que aparte de la fase de transformación de Al_2O_3 , estas partículas penetran dentro de la superficie.^{6.}

El tratamiento de superficie con fresas de diamante producen una estructura del ZrO_2 irregular, que se mantiene después del proceso de sinterizado. Se puede asumir que esta rugosidad en la superficie implica grandes áreas defectuosas o inclusive micro cracks, investigaciones muestran claramente que no se observan bordes con aristas afiladas dentro del patrón de fresado.^{6,8,13,14,15.}

Debido a la meta estabilidad del zirconio tetragonal, la tensión generada por los tratamientos de superficie, son los responsables de disparar la transformación martensítica (t m) de la fase tetragonal a la fase monoclinica, lo cual conduce a

una expansión de volumen del 3 . 4% del material y a la formación de tensiones superficiales de compresión, aumentando la susceptibilidad al envejecimiento y alterando la integridad de la fase final del material, e incrementan las posibilidades de un daño catastrófico final. ^{1,3,5,6,7,8,10}

Investigadores reportan que la resistencia del Dióxido de zirconio estabilizado con itrio puede ser incrementada por los tratamientos de superficie, pero reducida por tratamiento térmico, lo que se conoce con el nombre de cocción de regeneración y cocción de reparación del zirconio (massimilaino guasato) .

Estos tratamientos térmicos se diferencian uno del otro, en su tiempo de mantenimiento en el horno y de la temperatura de la muestra. El calor inicia una transformación de fases reversa de monoclinica a tetragonal, disminuyendo la fase monoclinica de la superficie del zirconio, lo cual clínicamente mejora la resistencia a la flexión y al envejecimiento. ^{6,8,9,10,11.}

El objetivo de esta investigación es comparar la resistencia compresiva del zirconio sinterizado , sin tratamiento de superficie y cuando este material es sometido a diferentes tratamientos de superficie tales como : pulido con fresas de diamante, pulido con disco diamantado, y arenado con partículas de oxido de aluminio y posterior a estos tratamientos es sometido a una cocción de reparación.

Materiales y métodos

La metodología de esta investigación se encuentra: Cuando se habla de pruebas mecánicas la norma ASTM C28 Advanced Ceramics Standards, en el catalogo de ZirCAD y las diferentes metodologías encontradas en la bibliografía referenciada en esta investigación.

Se realizaron 10 especímenes para cada grupo. Se fabricaron a partir de 10 bloques de zirconio presinterizados (IPS e.max ZirCAD for inLab MO 1 / B 40 L lote número: S11136, de Ivoclar vivadent)(Fig. 1- A).

Cada bloque se seccionó en 7 partes iguales en una Microfresadora Paraskop M 200-240 marca BEGO (Fig. 1-B), con estas dimensiones (15 mm de largo x 5 mm ancho x 2 mm de alto) (Fig 2 A-B-C).

Todos los especímenes fueron sinterizados en un horno Zirkonofen 600 de Zirkonzahn (Fig.3 A-B) , serial: No. IT/HC25010/022/050/0107, a 1560°C, durante 8 horas, luego fueron retirados del horno y durante 4 horas los especímenes procesaron su enfriamiento lento (Fig 3 . C).

Una vez terminado su período de enfriamiento, los especímenes fueron intervenidos por el mismo operador, según las variables a evaluar y distribuidos en 7 grupos así:

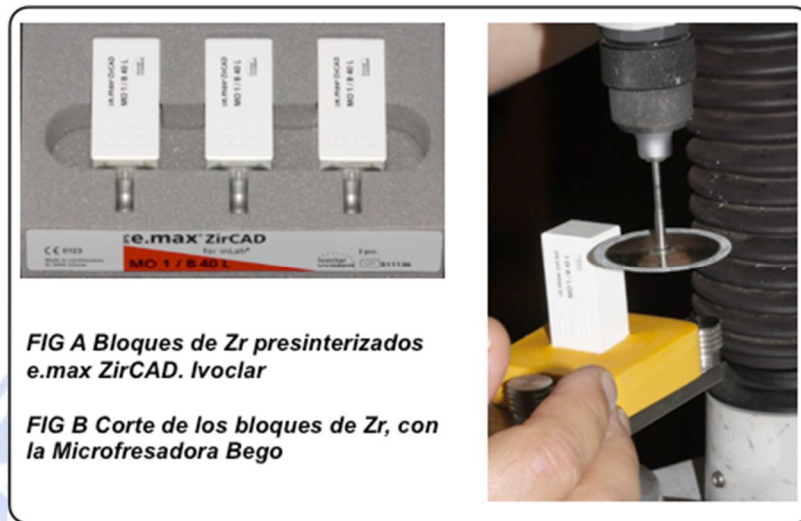


FIG. 1 muestras y cortes

Grupo 1: control: Zirconia sinterizada sin intervenciones tales como tratamiento de superficie ni cocción de reparación.

Grupos 2: Zirconia sinterizada y tratada con fresa de diamante y pieza de mano de alta velocidad, alto torque y triple irrigación, referencia: W&H Alegria TE-95 BC. Las condiciones del fresado fueron: A 150.000 rpm, con irrigación y durante 8 segundos (FIG. 4- A) grupo 2, 3 y 4 no poseen cocción de reparación.

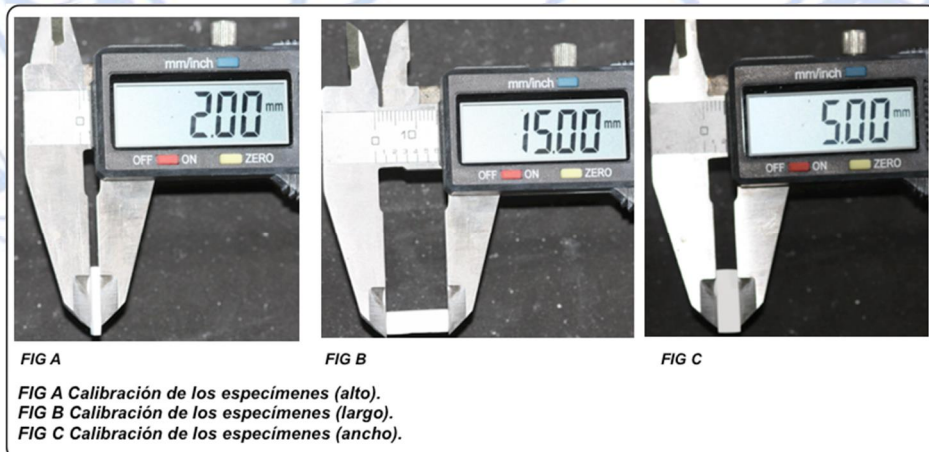


FIG. 2 medidas muestrales.

Grupo 3: Especímenes sinterizados y pulidos con disco diamantado color verde Referencia Zironia Abrasive-diamond Impregnated Green Stones, marca Shark Supply Inc., (Fig. 4- B), la cual se montó en motor de baja velocidad referencia: MF-PERFECTA marca W&H de 35.000 rpm. Las condiciones del fresado fueron: A 15.000 rpm, a una distancia de 2 cm y durante 8 segundos.

Grupo 4: Especímenes sinterizados y arenado con partículas de óxido de aluminio (Fig. 4- C): los especímenes fueron arenados con partículas de óxido de aluminio de 50 micras a una distancia de 2 cm con una presión de 2 bares y durante 8 segundos.

Una vez realizados los tratamientos de superficie a los grupos 2, 3 y 4 respectivamente, y antes de ser sometidos al test de resistencia compresiva, se realizaron registros de microfotografía por medio de microscopía electrónica para lo cual se utilizó un microscopio óptico marca Instrom referencia eclipse LB100 hasta de 100 aumentos en modo de luz reflejada. El análisis de las imágenes se realizó por medio del software Eclipse marca Nikon.

Posterior a este registro, los especímenes se colocaron en una máquina Instrom referencia 3345 que tiene una celda de carga con capacidad de 5000 Nw y con una resolución mínima del 5% de su carga. Se les aplicó la carga de forma vertical a una velocidad de 5 mm por minuto hasta que se produjo la falla (Fig. 5- A-B).

Terminada la prueba, se recuperaron los fragmentos resultantes de la misma, los cuales fueron almacenados en bolsas plásticas herméticas para cada grupo.

Grupos 5, 6 y 7: Tratamientos de superficie con cocción de regeneración.

Una vez realizados los diferentes tratamientos de superficie a cada grupo, los especímenes de los grupos 5, 6 y 7 respectivamente, fueron sometidos a la

cocción de reparación en un horno Sintramat de Ivoclar vivadent AG, a una temperatura de 1150°C , durante 60 minutos, según protocolo descrito en el manual de Ivoclar Vivadent.

Una vez la temperatura del horno disminuyó a 200°C, los especímenes fueron retirados del mismo y colocados en un soporte para su enfriamiento lento por espacio de 4 horas.

Posterior a este procedimiento y antes de ser sometidos al test de resistencia compresiva, se realizaron registros de microfotografía por medio de microscopia electrónica para lo cual se utilizó un microscopio óptico marca Instrom referencia eclipse LB100 hasta de 100 aumentos en modo de luz reflejada.

El análisis de las imágenes se realizó por medio del software Eclipse marca Nikon.

Después de este registro, los especímenes, se sometieron test de resistencia aplicado para los grupos 2, 3 y 4.



FIG. 3 Horno Zirkonofen 600 y especímenes.

La información se obtendrá a partir de una fuente primaria mediante la realización de las pruebas de resistencia del zirconio procesado en el Laboratorio de Biomateriales de la Universidad CES, sede Sabaneta.

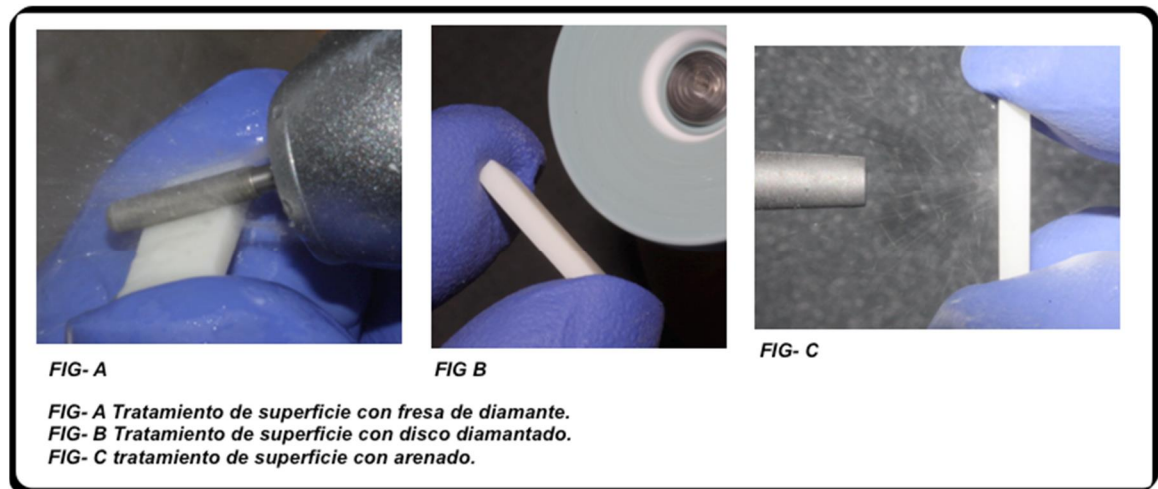


FIG. 4 Tratamiento de superficie

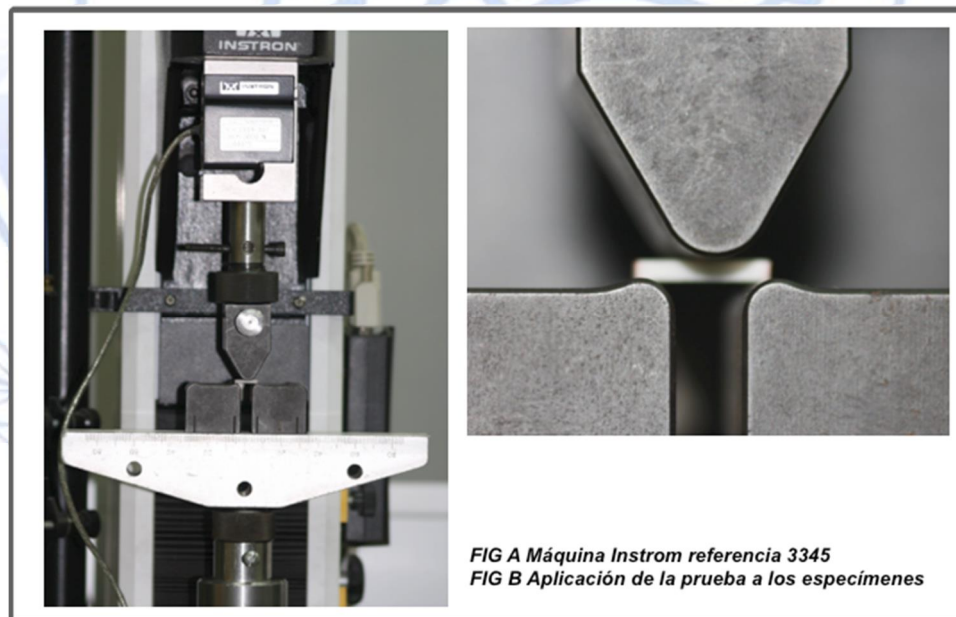


FIG. 5 Maquina Instron

Resultados

Se evaluaron siete grupos de bloques de zirconio sinterizados cada uno de ellos con 10 unidades para un total de 70 unidades. En la Tabla 1. se observa la resistencia compresiva en los diferentes grupos mostrando los promedios y su respectiva variación mediante la desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV), además del intervalo de confianza del 95% con sus valores mínimos y máximos para cada tratamiento.

En cada grupo se evaluó la resistencia compresiva en MPa con una mayor resistencia en el grupo control (Zirconio sinterizado sin ningún tratamiento de superficie y térmico) 974 ± 107 MPa respecto a los demás grupos que mostraron una menor resistencia compresiva. (Zirconio sinterizado con tratamientos de superficies y térmicos), (valor $p = 0,044$) para la prueba de Anova. (ver tabla 1).

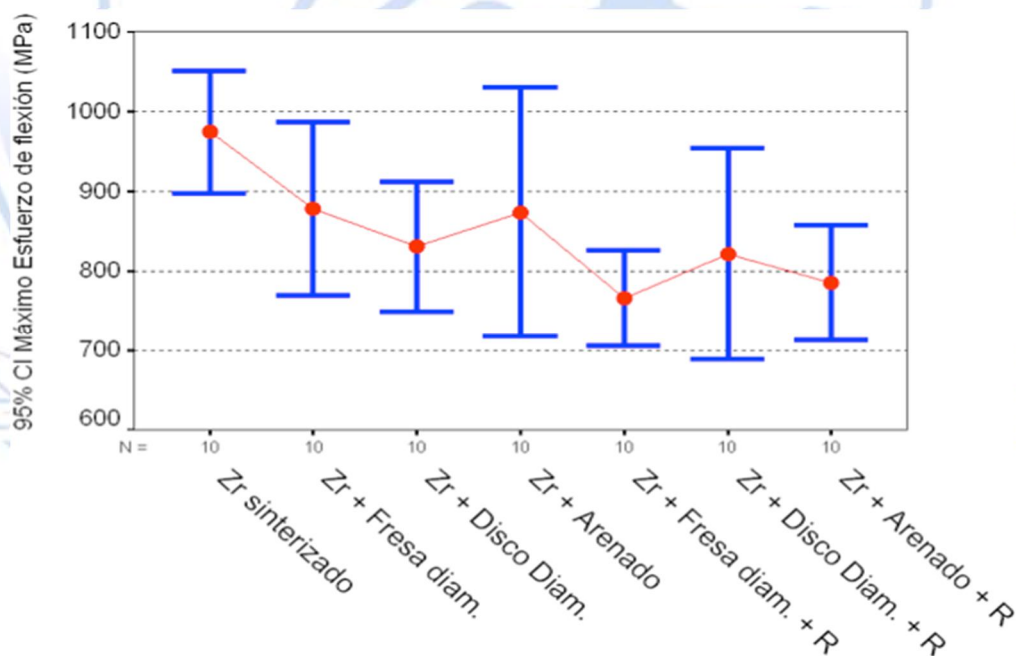
Como análisis complementario se hizo un análisis de rangos múltiples mediante la prueba de Tukey, donde se observa que los tratamientos de superficie y térmicos (Fresa de diamante y arenado + cocción de reparación) mostraron una menor fuerza compresiva con diferencias estadísticamente significativas frente al grupo control. (ver tabla 1 y fig. 6).

TABLA1. Esfuerzo flexural (MPa) en bloques de zirconio sinterizados según los tratamientos de superficie aplicados

Tratamientos	n	$\bar{X} \pm DE$	CV	Min	Max	Valor p	IC 95%	
							Lim inf.	Lim. sup.
1	10	974,10 ± 107,04	10,99%	843,94	1176,64	----	897,53	1050,68
2	10	877,97 ± 151,66	17,27%	627,32	1109,72	0,662	769,48	986,46
3	10	831,20 ± 113,63	13,67%	641,91	1053,66	0,109	749,91	912,49
4	10	874,03 ± 217,50	24,88%	443,61	1138,98	0,838	718,44	1029,62
5	10	766,75 ± 84,05	10,96%	626,90	868,67	0,002	706,63	826,88
6	10	821,29 ± 185,43	22,58%	533,74	1052,47	0,326	688,64	953,94
7	10	785,08 ± 101,09	12,88%	606,05	936,00	0,011	712,76	857,40

Valor p: (comparación del tratamiento 1 frente a los demás tratamientos).

Grafica 1. Fuerza de flexión en Bloques de Zirconio Sinterizados según los Tratamientos de Superficie Aplicados.



En la (fig. 6), se observan las diferentes texturas de las superficies de los especímenes, con los diferentes tratamientos aplicados, antes de ser sometidos al test de resistencia compresiva.

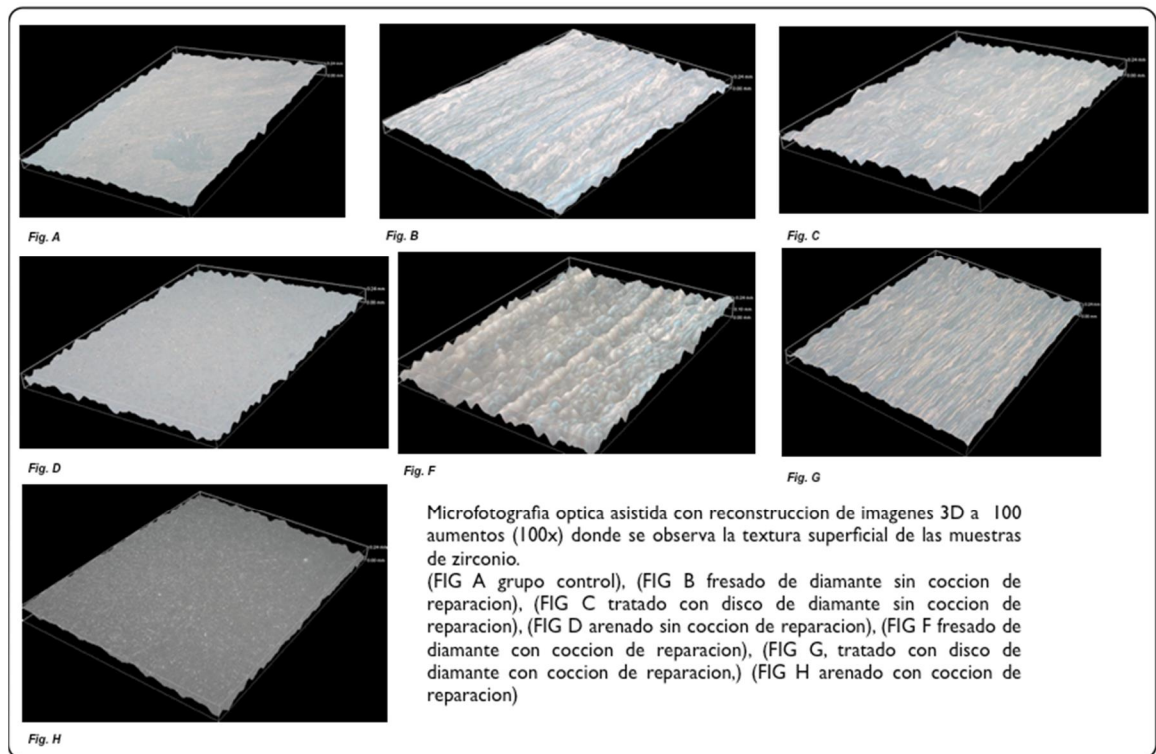


FIG. 6 Microfotografía óptica a 100 X de aumento

Discusión

El Dióxido de zirconio es sometido a diferentes tipos de tratamiento superficiales durante su fabricación, el maquinado u otros tipos adicionales de procedimientos en los laboratorios dentales como son el arenado, ó el pulido con fresa de diamante o de carburo.

La tensión generada por los tratamientos de superficie, son los responsables de disparar la transformación martensítica (t_m) de la fase tetragonal a la fase monoclinica, lo cual conduce a la formación de tensiones superficiales de compresión, aumentando la susceptibilidad al envejecimiento y a su fracaso.

Existe la necesidad de realizar diferentes tratamientos de superficie para el pulido del zirconio, uno se realiza con fresas de diamante, otro se realiza con discos diamantados y otro tratamiento es el arenado de la superficie con perlas de óxido de aluminio 50 micras a 2 bares de presión según los fabricantes.

El pulido con fresa de diamante y de partículas de arena en la superficie del Zirconio sinterizado, y sometido posteriormente a una cocción de reparación según este estudio causó un daño significativo en cuanto a la disminución de su resistencia compresiva, Sin embargo cuando este zirconio es sometido al arenado sin una posterior cocción de reparación su comportamiento cambia notablemente y aumenta su resistencia compresiva de una forma similar a la del grupo control (Gráfica 1)

La mejora de la resistencia a la flexión se ha relacionado con la cantidad significativa de fase monoclinica detectada después de arenado.

La fase monoclinica transformada crea una capa de esfuerzos de compresión, lo que contrarresta la degradación de la resistencia causada por los defectos inducidos por arenado.

La literatura reporta, que el tratamiento térmico, específicamente la cocción de reparación, por la transformación inversa de la fase monoclinica a la tetragonal, libera los esfuerzos y aumenta la resistencia flexural.

Los resultados arrojados por esta investigación fueron contrarios a lo que varios estudios han reportado, debido a que este tratamiento térmico no tuvo una significancia en el aumento de la resistencia compresiva, por contrario, los grupos sometidos a este tratamiento (grupo 5,6 y 7) mostraron una disminución de la misma^{6,8,9,10,11}.

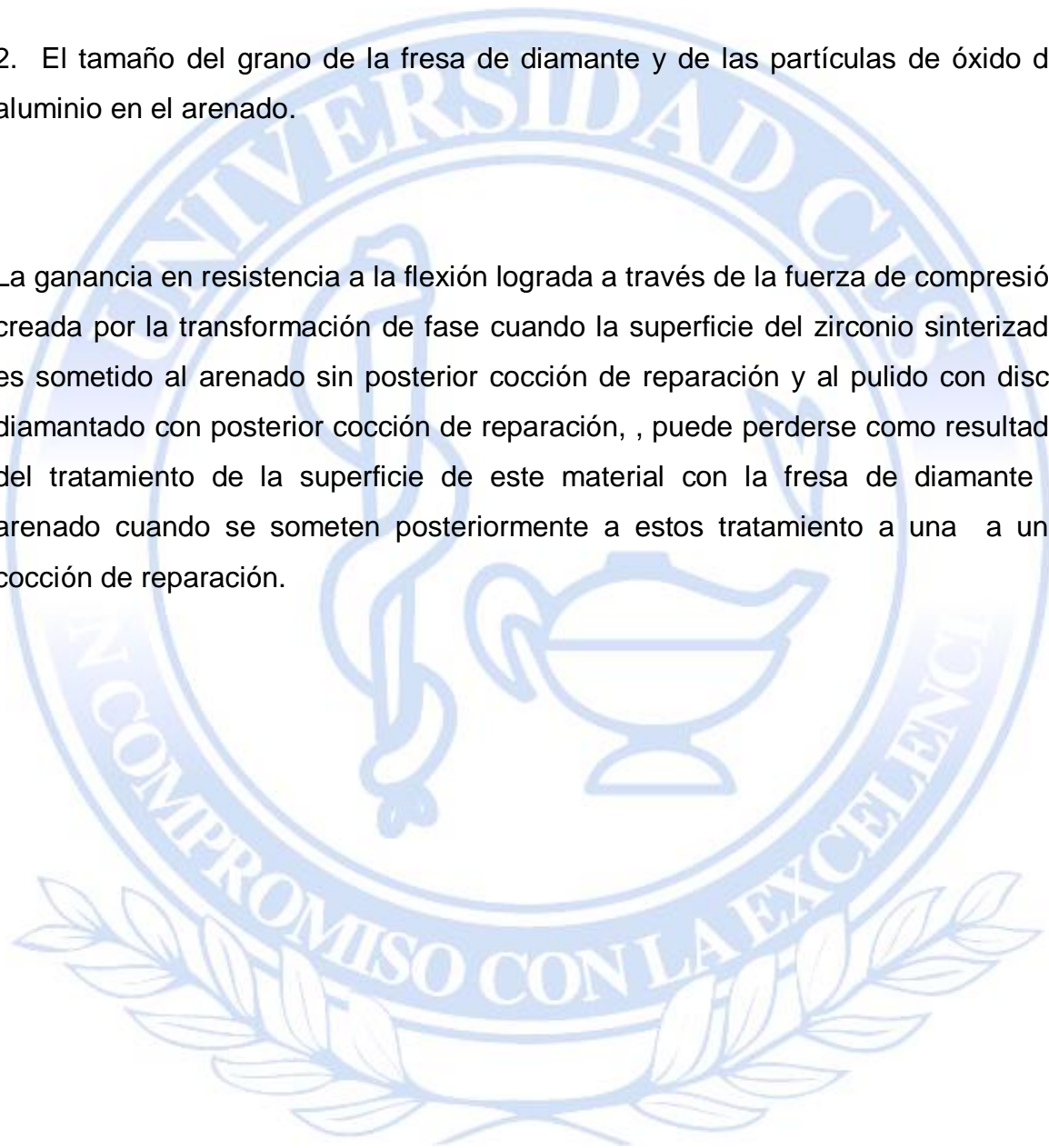
Entre las variables posibles a evaluar que pudieron haber influenciado estos resultados están:

1. La rata de enfriamiento que maneja el programa de cocción de reparación del horno de Ivoclar, en cuanto al tiempo posiblemente no es la ideal ya que este

programa descende su temperatura, afectando la resistencia flexural del zirconio, creando microcrack y predisponiéndola a la falla.

2. El tamaño del grano de la fresa de diamante y de las partículas de óxido de aluminio en el arenado.

La ganancia en resistencia a la flexión lograda a través de la fuerza de compresión creada por la transformación de fase cuando la superficie del zirconio sinterizado es sometido al arenado sin posterior cocción de reparación y al pulido con disco diamantado con posterior cocción de reparación, , puede perderse como resultado del tratamiento de la superficie de este material con la fresa de diamante y arenado cuando se someten posteriormente a estos tratamiento a una a una cocción de reparación.



Conclusiones

El presente estudio demostró que el zirconio sin tratamiento de superficie (grupo control) resulto con valores de resistencia compresiva mas altos y para el zirconio sinterizado con tratamiento de superficie con fresa de diamante y arenado (grupo 2 y 4), sin posterior cocción de reparación mostraron valores de resistencia compresiva similares al control.

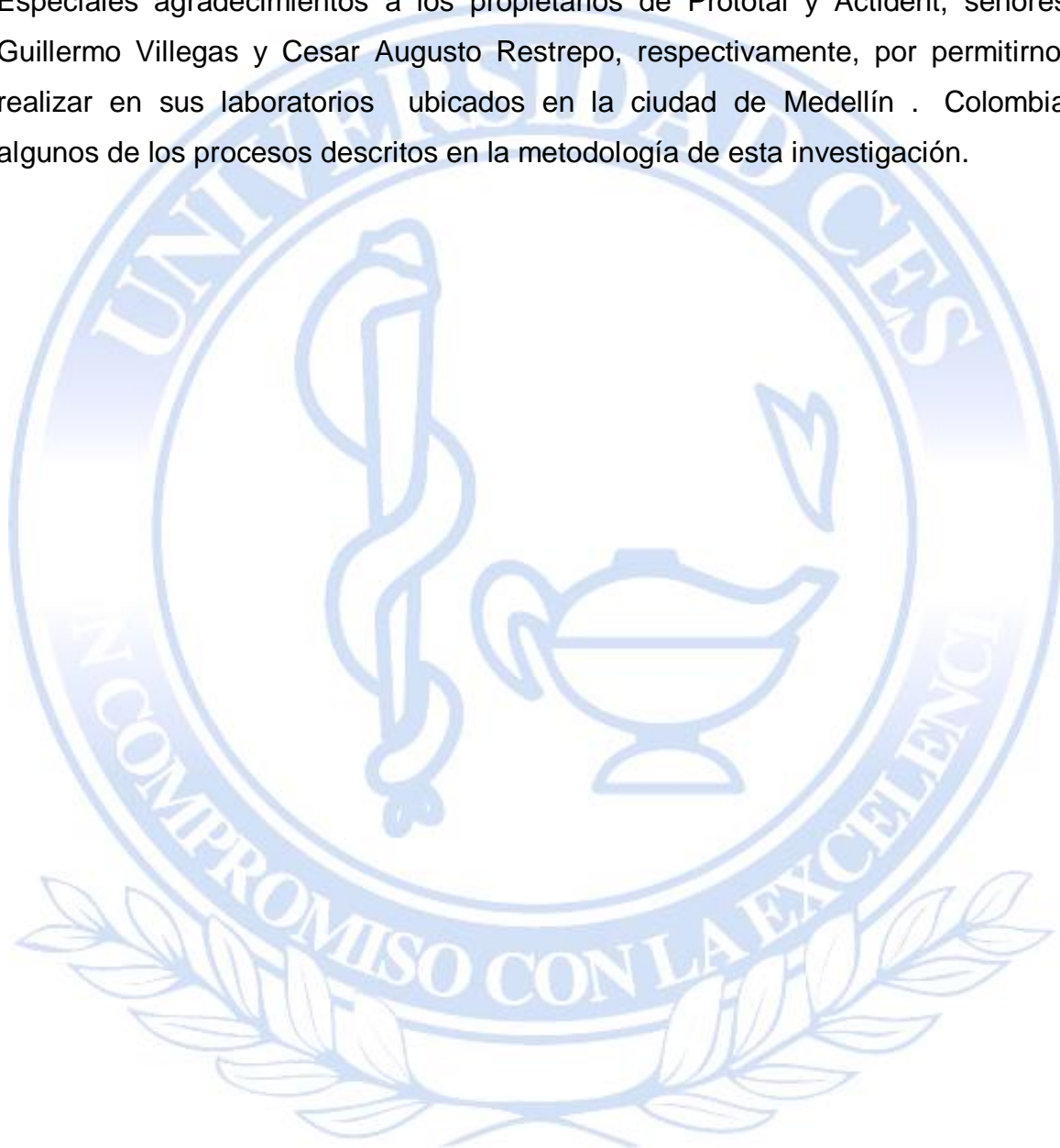
Los grupos con tratamientos de superficie fresado con diamante, pulido con disco de diamante y arenado sometidos a una posterior cocción de reparación (grupos 5, 6 y 7) mostraron la resistencia compresiva mas baja.

Por otra parte, la influencia específica de cada tratamiento puede ser algo diferente de lo que estaba previsto por otros estudios, como resultado de las variaciones mínimas de las condiciones experimentales y de las propiedades de los materiales investigados.

Por lo tanto, se necesitan más estudios para investigar la meta estabilidad de la transformación de fase y el comportamiento del zirconio sinterizado, antes de sacar conclusiones sobre el tratamiento de superficie más favorable.

Agradecimientos

Especiales agradecimientos a los propietarios de Prototal y Actident, señores: Guillermo Villegas y Cesar Augusto Restrepo, respectivamente, por permitirnos realizar en sus laboratorios ubicados en la ciudad de Medellín . Colombia, algunos de los procesos descritos en la metodología de esta investigación.



Bibliografía

1. Vagkopoulou T, Koutayas SO, Koidis P, Strub JR. Zirconia in dentistry: Part 1. Discovering the nature of an upcoming bioceramic. Eur. J. Esthet. Dent. Off. J. Eur. Acad. Esthet. Dent. 2009;4(2):130. 51.
2. Koutayas SO, Vagkopoulou T, Pelekanos S, Koidis P, Strub JR. Zirconia in dentistry: part 2. Evidence-based clinical breakthrough. Eur. J. Esthet. Dent. Off. J. Eur. Acad. Esthet. Dent. 2009;4(4):348. 80.
3. Denry I, Kelly JR. State of the art of zirconia for dental applications. Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater. 2008 Mar;24(3):299. 307.
4. Chevalier J. What future for zirconia as a biomaterial? Biomaterials. 2006 Feb;27(4):535. 43.
5. Kelly JR, Denry I. Stabilized zirconia as a structural ceramic: an overview. Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater. 2008 Mar;24(3):289. 98.
6. Frank Rothbrust IPS e.max ZirCAD óxido de zirconio %ro blanco+ Report No. 17 June 2006 Research and Development Ivoclar Vivadent AG FL-9494 Schaan / Liechtenstein. pags. 17 a 25. [cited 2006 Jun 17]. Available from: Frank Rothbrust IPS e.max ZirCAD óxido de zirconio %ro blanco+ Report No. 17 June 2006 Research and Development Ivoclar Vivadent AG FL-9494 Schaan / Liechtenstein. pags. 17 a 25
7. Wang H, Aboushelib MN, Feilzer AJ. Strength influencing variables on CAD/CAM zirconia frameworks. Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater. 2008 May;24(5):633. 8.

8. Guazzato M, Quach L, Albakry M, Swain MV. Influence of surface and heat treatments on the flexural strength of Y-TZP dental ceramic. *J. Dent.* 2005 Jan;33(1):9. 18.
9. Mochales C, Maerten A, Rack A, Cloetens P, Mueller WD, Zaslansky P, et al. Monoclinic phase transformations of zirconia-based dental prostheses, induced by clinically practised surface manipulations. *Acta Biomater.* 2011 Jul;7(7):2994. 3002.
10. Denry IL, Holloway JA. Microstructural and crystallographic surface changes after grinding zirconia-based dental ceramics. *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.* 2006 Feb;76(2):440. 8.
11. Sato H, Yamada K, Pezzotti G, Nawa M, Ban S. Mechanical properties of dental zirconia ceramics changed with sandblasting and heat treatment. *Dent. Mater. J.* 2008 May;27(3):408. 14.
12. Fischer J, Grohmann P, Stawarczyk B. Effect of zirconia surface treatments on the shear strength of zirconia/veneering ceramic composites. *Dent. Mater. J.* 2008 May;27(3):448. 54.
13. Kosmac T, Oblak C, Jevnikar P, Funduk N, Marion L. The effect of surface grinding and sandblasting on flexural strength and reliability of Y-TZP zirconia ceramic. *Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater.* 1999 Nov;15(6):426. 33.
14. machining characteristics and surface integrity of yttria stabilized tetragonal zirconia in high speed deep grinding. singapore; 2002.
15. L.Yin,S.Jahanmir,L.K.Ives. abrasive machining of porcelain and zirconia with a dental handpiece. National Institute of Standards and Technology; 8521.

16. Curtis AR, Wright AJ, Fleming GJP. The influence of surface modification techniques on the performance of a Y-TZP dental ceramic. J. Dent. 2006 Mar;34(3):195. 206.
17. Zhang Y, Lawn BR, Rekow ED, Thompson VP. Effect of sandblasting on the long-term performance of dental ceramics. J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater. 2004 Nov 15;71(2):381. 6.
18. Sundh A, Sjögren G. Fracture resistance of all-ceramic zirconia bridges with differing phase stabilizers and quality of sintering. Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater. 2006 Aug;22(8):778. 84.
19. Papanagiotou HP, Morgano SM, Giordano RA, Pober R. In vitro evaluation of low-temperature aging effects and finishing procedures on the flexural strength and structural stability of Y-TZP dental ceramics. J. Prosthet. Dent. 2006 Sep;96(3):154. 64.
20. Aboushelib MN, de Jager N, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Effect of loading method on the fracture mechanics of two layered all-ceramic restorative systems. Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater. 2007 Aug;23(8):952. 9.
21. Oilo M, Gjerdet NR, Tvinnereim HM. The firing procedure influences properties of a zirconia core ceramic. Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater. 2008 Apr;24(4):471. 5.
22. Coelho PG, Bonfante EA, Silva NRF, Rekow ED, Thompson VP. Laboratory simulation of Y-TZP all-ceramic crown clinical failures. J. Dent. Res. 2009 Apr;88(4):382. 6.
23. Zinelis S, Thomas A, Syres K, Silikas N, Eliades G. Surface characterization of zirconia dental implants. Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater. 2010 Apr;26(4):295. 305.

24. Sundh A, Sjögren G. A comparison of fracture strength of yttrium-oxide-partially-stabilized zirconia ceramic crowns with varying core thickness, shapes and veneer ceramics. J. Oral Rehabil. 2004 Jul;31(7):682. 8.
25. Piconi C, Maccauro G. Zirconia as a ceramic biomaterial. Biomaterials. 1999 Jan;20(1):1. 25.
26. Ling Yin and Han Huang. Ceramic Response to High speed grinding. 2004.
27. Chevalier J. The Tetragonal - Monoclinic Transformation in Zirconia: Lessons Learned and Future Trends. 2009; Te American Ceramic Society.
28. Deville Sylvain. Martensitic Transformation in zirconia Part I. Nanometer scale prediction and measurement of transformation induced relief. Acta Materialia 52 - 2004;
29. Patrick M. Kelly. The Martensitic Transformation in ceramics its role in transformation toughening. Progress in Materials Science 47 (2002) 463-557;
30. Sato K, Abe H, Ohara S. Selective growth of monoclinic and tetragonal zirconia nanocrystals. J. Am. Chem. Soc. 2010 Mar 3;132(8):2538. 9.