

Evaluación del efecto de diferentes protocolos de poscurado sobre la microdureza y la dureza superficial de resinas dentales impresas en 3D para uso definitivo.

Evaluation of the effect of different post-curing protocols on the microhardness and surface hardness of 3D-printed dental resins intended for permanent use.

Valentina Castañeda Portillo¹, Santiago Galvis¹, Pablo Villamil ², Camilo A. Romo Pérez³.

¹ Odontólogos. Estudiantes de la especialización en Prostodoncia Institución Universitaria Colegios de Colombia, UNICOC. Bogotá

² Odontólogo. Especialista en Rehabilitación Oral Universidad Nacional de Colombia

³ Odontólogo. Especialista en Pedagogía y Docencia, Magister en Epidemiología, Universidad del Magdalena – Fundación Universitaria del Área Andina.

RESUMEN

Introducción: El desempeño clínico de resinas dentales impresas en 3D está vinculado al protocolo de poscurado, que afecta el grado de conversión monomérica y las propiedades mecánicas del material. Existe heterogeneidad en los protocolos para el uso de resinas definitivas.

Objetivo: Evaluar el efecto de diferentes protocolos de poscurado sobre la microdureza y la dureza superficial de resinas dentales impresas en 3D para uso definitivo

Método: Estudio experimental *in vitro*. Se fabricaron 60 discos de resina Prisma 3D Bio Crown Diamond (10 mm × 2 mm), distribuidos aleatoriamente en 6 grupos (n = 10) según el protocolo de poscurado: sistema LED tipo Elegoo Mercury Plus 2.0 con y sin oxígeno durante 15 y 30 min, sistema Otofash G171 con y sin atmósfera de nitrógeno. La microdureza se evaluó mediante prueba Vickers y la

dureza superficial mediante ensayo Shore D. Los datos fueron analizados mediante ANOVA de Welch y prueba pos hoc de Games–Howell ($p < 0,05$).

Resultados: La microdureza difirió significativamente entre los protocolos de poscurado ($p < 0,001$), alcanzando los valores más altos en los grupos Elegoo con oxígeno (39,1 HV) y los más bajos en E-S15 y O-N (36,0 HV). La dureza superficial Shore D osciló entre 93,3 y 94,3, sin diferencias significativas entre los grupos ($p > 0,05$).

Conclusiones: Los protocolos de poscurado afectan las propiedades mecánicas de las resinas impresas en 3D, especialmente la microdureza. Los sistemas LED tipo Elegoo, en presencia de oxígeno, mostraron mayor microdureza y dureza superficial, sugiriendo una mejor eficiencia de polimerización y aplicación en flujos digitales restauradores.

PALABRAS CLAVE: Dureza; Pruebas de Dureza; Impresión Tridimensional; Técnicas In Vitro

ABSTRACT

Introduction: The clinical performance of 3D-printed dental resins is linked to the post-curing protocol, which affects the degree of monomer conversion and the mechanical properties of the material. There is variation in the protocols for the use of final-stage resins.

Objective: To evaluate the effect of different post-curing protocols on the microhardness and surface hardness of 3D-printed dental resins for definitive use.

Method: In vitro experimental study. Sixty discs of Prizma 3D Bio Crown Diamond resin (10 mm × 2 mm) were fabricated and randomly assigned to six groups (n = 10) according to the post-curing protocol: Elegoo Mercury Plus 2.0 LED system with and without oxygen for 15 and 30 minutes, and the Otofash G171 system with and without a nitrogen atmosphere. Microhardness was assessed using the Vickers test and surface hardness using the Shore D test. The data were analysed using Welch's ANOVA and the Games–Howell post hoc test ($p < 0.05$).

Results: Microhardness differed significantly between the post-curing protocols ($p < 0.001$), with the highest values recorded in the Elegoo groups treated with oxygen (39.1 HV) and the lowest in the E-S15 and O-N groups (36.0 HV). The Shore D surface hardness ranged from 93.3 to 94.3, with no significant differences between the groups ($p > 0.05$).

Conclusions: Post-curing protocols affect the mechanical properties of 3D-printed resins, particularly microhardness. Elegoo-type LED systems, in the presence of oxygen, exhibited higher microhardness and surface hardness, suggesting greater polymerisation efficiency and suitability for use in digital restorative workflows.

KEY WORDS: Hardness; Hardness Tests; Printing, Three-Dimensional; In Vitro Techniques

INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva ha revolucionado la odontología restauradora, pasando de aplicaciones provisionales a la creación de restauraciones definitivas como coronas y puentes. (1) Las resinas fotopolimerizables se destacan por sus propiedades estéticas y mecánicas adecuadas para el entorno oral, además de mejorar la eficiencia en los flujos de trabajo digitales.(2,3) No obstante, el rendimiento clínico de estas resinas depende significativamente de la calidad del proceso de polimerización tras la impresión tridimensional (3D).(4,5)

Las tecnologías de impresión 3D basadas en fotopolimerización, permiten la fabricación de estructuras de alta precisión y complejidad geométrica. No obstante, durante la fase de impresión no se alcanza una conversión completa de los monómeros, reportándose grados de conversión iniciales inferiores al 60–70%, lo que hace necesario un proceso posterior de poscurado para optimizar las propiedades mecánicas, fisicoquímicas y biológicas del material. (4–8)

El poscurado desempeña un papel determinante al incrementar la conversión de monómeros residuales mediante la aplicación de luz y, en algunos casos, calor. Factores como el tiempo de exposición, temperatura, intensidad lumínica, longitud de onda y tipo de dispositivo de curado influyen significativamente en la cinética de polimerización y en propiedades mecánicas como la microdureza, dureza superficial y resistencia mecánica.(3–5,9) Se ha reportado que protocolos de poscurado optimizados pueden incrementar hasta en un 20–35% la microdureza y mejorar significativamente la resistencia mecánica de las resinas impresas en 3D. Asimismo, el aumento del tiempo y la temperatura de poscurado favorece un mayor grado de conversión monomérica, alcanzando posteriormente una fase de estabilización de las propiedades mecánicas.(4,5)

La atmósfera de poscurado influye en la eficiencia de la polimerización, ya que el oxígeno inhibe esta reacción por radicales libres, formando especies menos reactivas.(10,11) Este proceso genera una capa superficial parcialmente polimerizada de menor densidad de entrecruzamiento y propiedades mecánicas inferiores, con un espesor que varía entre 2 y 40 μm .(11,12) La exposición al

oxígeno también se relaciona con menor dureza superficial, microdureza y la formación de una capa superficial pegajosa.(13)

En contraste, El uso de atmósferas inertes como el nitrógeno mejora la polimerización al desplazar el oxígeno, lo que elimina su efecto inhibidor. Esto resulta en mayores grados de conversión y mejores propiedades mecánicas, especialmente en dureza superficial y microdureza.(11,14)

La dureza superficial y la microdureza son propiedades mecánicas críticas, directamente relacionadas con la resistencia al desgaste, abrasión, capacidad de comúnmente evaluada mediante métodos como Vickers o Knoop, se considera un indicador indirecto del grado de conversión de los monómeros y de la densidad de entrecruzamiento de la red polimérica.(7,8) En este sentido, mayores grados de conversión se asocian con mejores propiedades mecánicas y mayor estabilidad clínica de las restauraciones impresas en 3D.

Pese a los avances en las resinas impresas en 3D, persiste una marcada heterogeneidad en los protocolos de poscurado, lo que limita la estandarización y compromete la reproducibilidad de los resultados.(1,3) Esta variabilidad puede derivar en un poscurado subóptimo, disminuyendo la dureza superficial y la microdureza, y afectando negativamente la resistencia al desgaste y la longevidad clínica de las restauraciones.(7,8) Además, aunque las resinas impresas en 3D han mostrado mejoras en sus propiedades fisicomecánicas, aún presentan valores inferiores en comparación con materiales CAD-CAM convencionales.(1) Por otra parte, la evidencia científica reciente se ha centrado principalmente en materiales restaurativos temporales, existiendo una producción científica limitada orientada a resinas de uso definitivo.(1,2,15)

Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes protocolos de poscurado sobre la microdureza y la dureza superficial de resinas dentales impresas en 3D para uso definitivo.

MÉTODO

preparación de la muestra

El presente estudio experimental *in vitro* fue aprobado por el Comité de Ética de la Institución Universitaria Colegios de Colombia (UNICOC), Bogotá. Inicialmente, se fabricaron 120 discos de resina fotopolimerizable Prizma 3D Bio Crown Diamond (MakertechLabs, Tatuí, SP, Brasil) con dimensiones de 2 mm de espesor y 10 mm de diámetro. Los especímenes fueron diseñados mediante el software Autodesk Meshmixer (Autodesk Inc., San Rafael, CA, EE. UU.) y fabricados mediante impresión 3D. Posteriormente, cada disco fue inspeccionado visualmente y sus dimensiones fueron verificadas con un calibrador metálico para estandarizar el espesor y el diámetro de las muestras (Figura 3).(16) Aquellos especímenes que presentaron defectos de impresión, irregularidades superficiales, deformaciones o desviaciones dimensionales fueron excluidos del estudio. Tras la aplicación de estos criterios de selección, se obtuvieron 60 discos que cumplieron con los requisitos establecidos y conformaron la muestra final del estudio. Posteriormente, las muestras seleccionadas se sometieron a limpieza ultrasónica mediante inmersión en alcohol isopropílico al 90% durante 3 minutos, con el fin de eliminar residuos de material no curado (Figura 3).(16) Las características y especificaciones de los materiales y equipos empleados en el estudio se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Materiales y equipos utilizados en el estudio.

Material / Equipo	Tipo	Fabricante	Composición química / especificaciones
Prizma 3D Bio Crown Diamond	Resina fotopolimerizable para restauraciones definitivas impresas en 3D	Makertechlabs, Tatuí, SP, Brasil	• Monómeros acrilados (> 10 % en peso) • Oligómeros acrilados (< 65 % en peso) • Pigmento o carga ($\leq$ 10 % en peso) • Óxido de difenil(2,4,6-trimetilbenzoil) • Fosfina (< 5 % en peso)
AccuFab-L4K	Impresora 3D LCD	SHINING 3D	• Longitud de onda de 405 nm • Fuente de luz UV LED + LCD,

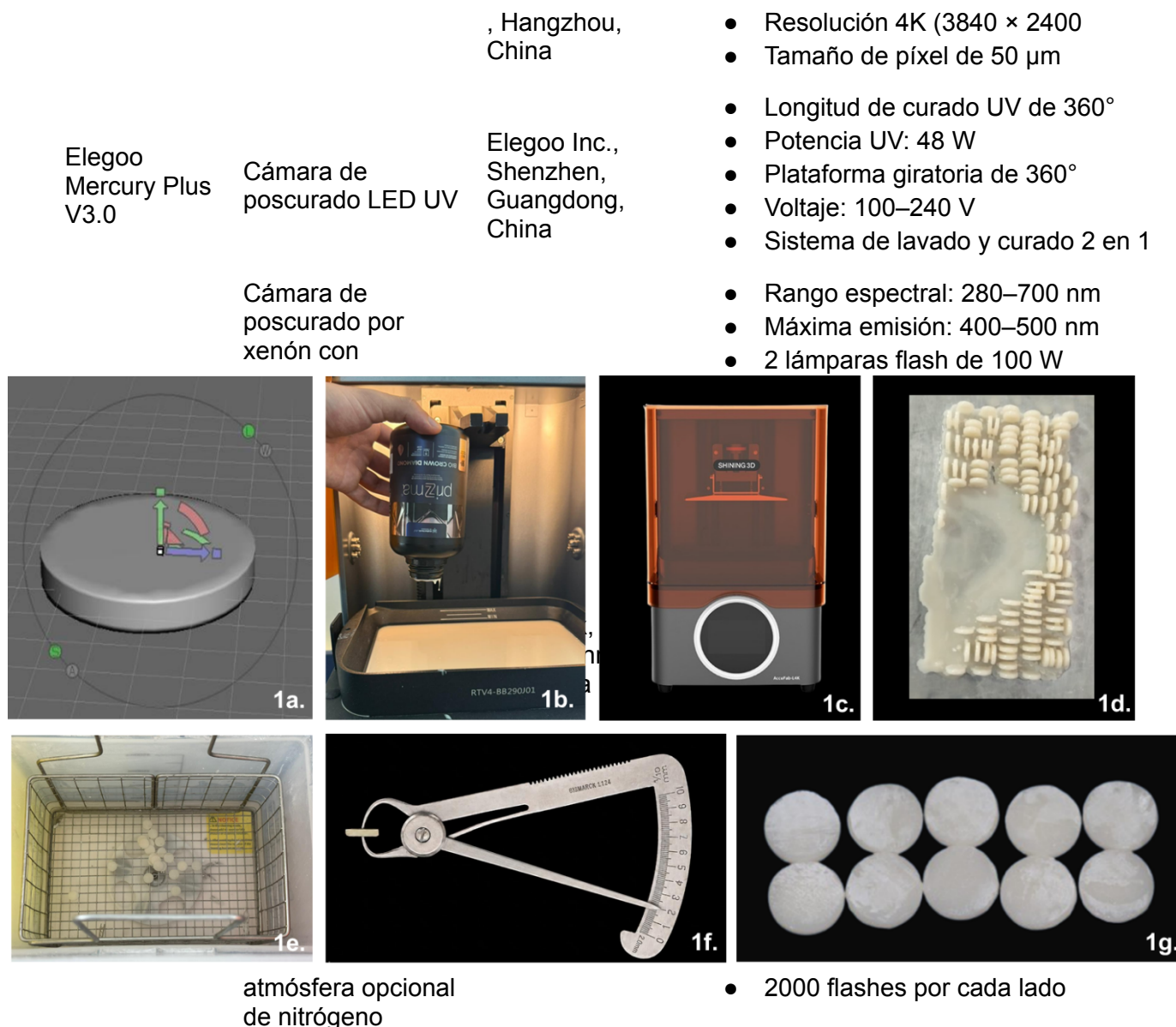
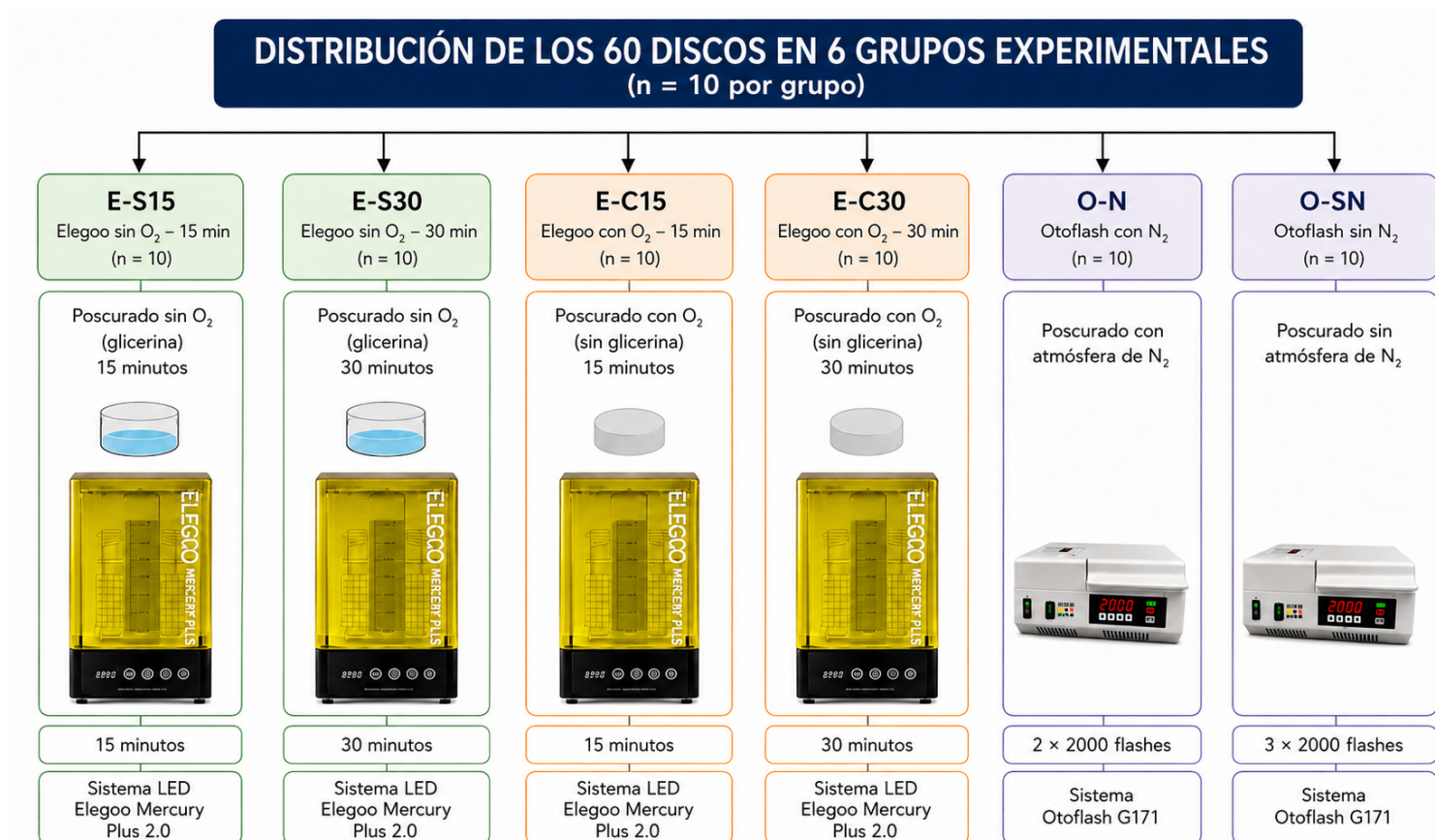


Figura 1. Preparación de la muestra. 1a. Diseño del disco; 1b. Vertimiento resina fotopolimerizable Prizma 3D Bio Crown Diamond (MakertechLabs, Tatuí, SP, Brasil); 1c. Impresora AccuFab-L4K (SHINING 3D Technology Inc., Hangzhou, China); 1d. Discos posterior a la impresión; 1e Inmersión discos alcohol isopropílico; 1f. Calibración discos; 1g. Discos impresos.

agrupación de la muestra



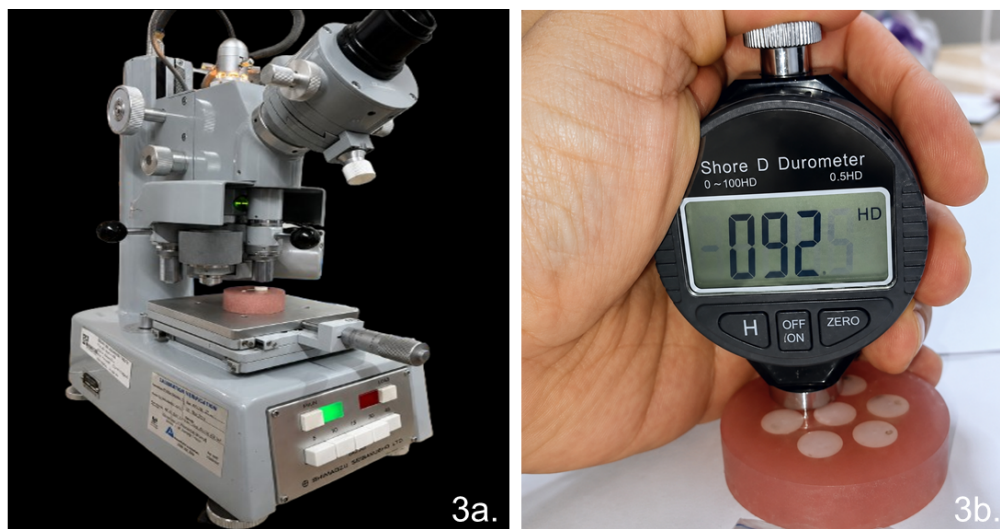
Los 60 discos obtenidos se asignaron mediante aleatorización simple en seis grupos experimentales (n = 10 por grupo), de acuerdo con el sistema de poscurado empleado (Figura 2).

Figura 2. Diagrama de flujo agrupación de la muestra.

evaluación dureza

La dureza de las muestras se evaluó mediante pruebas de microdureza y dureza superficial. La microdureza se determinó con un microdurómetro Shimadzu HMV (Shimadzu Corporation, Tokio, Japón), aplicando una carga de 500 g durante 10 s. En cada espécimen se realizaron cinco indentaciones en diferentes puntos del

disco y los valores de dureza Vickers (HV) fueron registrados en Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corp., Redmond, WA, EE. UU.). La dureza superficial se evaluó mediante ensayo Shore D, según la norma ASTM D2240, utilizando un durómetro digital Shore D Modelo 560-10D (Gain Express Holdings Ltd., Hong Kong, China). Cada muestra fue sometida a indentación durante 10 s en múltiples puntos de la superficie, calculándose posteriormente el valor promedio. Los resultados se expresaron en una escala de 0 a 100 unidades Shore D, donde valores mayores



indican una mayor dureza del material (Figura 3).

Figura 3. Evaluación dureza. 3a. Microdurómetro; 3b. Prueba Shore D.

análisis estadístico

Se utilizó un programa de software estadístico Stata v14 (Stata Corp, Texas, EE. UU.). Las diferencias entre los valores de dureza entre los distintos protocolos de poscurado se evaluaron con la prueba ANOVA de Welch. Para las comparaciones múltiples por pares entre los grupos experimentales, se utilizó la prueba post hoc de Games–Howell. Las comparaciones se realizaron de manera bilateral, considerando estadísticamente significativo un valor de $p < 0,05$. Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar e intervalos de confianza del 95%. La normalidad de la distribución de los datos se verificó mediante la prueba de Shapiro–Wilk, evidenciándose una distribución normal en todos los grupos ($p > 0,05$) con un valor mínimo de 0,871 y máximo de 0,976. La homogeneidad de varianzas se evaluó con la prueba de Levene, la cual mostró heterogeneidad entre los grupos experimentales ($p < 0,001$).

RESULTADOS

Los resultados de microdureza se presentan en la Tabla 2. Los valores más altos se registraron en los grupos E-C15 y E-C30, ambos con una media de 39,1 HV. En contraste, los grupos E-S15 y O-N mostraron los valores más bajos de microdureza, con una media de 36,0 HV.

Tabla 2. Promedios de microdureza según protocolo de poscurado.

Grupo	Media	DE	EE	IC 95%
E-S15	36,0	1,7	0,6	34,75 – 37,25
E-S30	38,3	1,1	0,3	37,53 – 39,07
E-C15	39,1	0,9	0,3	38,47 – 39,81
E-C30	39,1	1,2	0,4	38,23 – 39,91
O-N	36,0	0,7	0,2	35,54 – 36,52
O-SN	36,9	0,5	0,2	36,57 – 37,29

DE: Desviación estándar; EE: Error Estándar de la media; IC: intervalo de confianza

A nivel de la dureza superficial EC-15 presentó el valor promedio más alto de dureza superficial, con una media de $94,3 \pm 0,68$ Shore D. El grupo O-SN exhibió

el valor promedio más bajo de dureza superficial, correspondiente a $93,3 \pm 0,48$ Shore D (Tabla 3).

Tabla 3. Promedios dureza superficial Shore D según protocolos de poscurado.

Grupo	Media	DE	EE	IC 95%
E-S15	93,5	0,53	0,17	93,12 – 93,88
E-S30	93,9	0,32	0,1	93,67 – 94,13
E-C15	94,3	0,68	0,21	93,82 – 94,78
E-C30	93,7	0,48	0,15	93,36 – 94,04
O-N	93,6	0,84	0,27	93,00 – 94,20
O-SN	93,3	0,48	0,15	92,96 – 93,64

DE: Desviación estándar; EE: Error Estándar de la media; IC: intervalo de confianza

La prueba post hoc de Games–Howell mostró diferencias estadísticamente significativas entre los grupos E-SN15 y E-SN30, E-SN15 y O-N, E-SN15 y O-SN, E-SN30 y O-N, E-SN30 y O-SN, así como entre O-N y O-SN ($p < 0,05$). Las diferencias de medias observadas en estas comparaciones oscilaron entre 0,03 y 2,30 HV. Asimismo, los grupos E-C15 y E-C30 presentaron valores de microdureza significativamente superiores a los de los grupos O-N y O-SN ($p < 0,001$), con diferencias de medias comprendidas entre 2,14 y 3,11 HV (Tabla 4).

Tabla 4. Comparación de los promedios de microdureza entre los diferentes protocolos de poscurado.

Grupo	E-SN15	E-SN30	E-C15	E-C30	O-N	O-SN
E-SN 15		2,3 *	3,14 ***	3,07***	0,03 *	0,93*
E-SN30		0,84		0,77	2,27*	1,37*
E-C15				0,07	3,11***	2,21***
E-C30					3,04***	2,14***
O-N						0,9*
O-SN						

Prueba pos-hoc Games–Howell; Estadísticamente significativo a $*P<0.05$; $**P<0.01$; $***P<0.001$.

Grupo	E-SN15	E-SN30	E-C15	E-C30	O-N	O-SN
E-SN15	-	0,8	-	-	-	-
E-SN30	-	-	-	-	-	-
E-C15	-	-	-	-0,6	-	-
E-30	-	-	-	-	-	-
O-N	-	-	-	-	-	0,3
O-SN	-	-	-	-	-	-

El análisis post hoc de Games–Howell no mostró diferencias estadísticamente significativas en la dureza superficial Shore D entre los protocolos de poscurado evaluados ($p> 0,05$). No obstante, se observaron diferencias de medias de 0,8 unidades entre los grupos E-SN15 y E-SN30, de $-0,6$ unidades entre los grupos E-C15 y E-C30, y de 0,3 unidades entre los grupos O-N y O-SN (Tabla 5)

Tabla 5. Comparación de los promedios de dureza superficial Shore D entre los diferentes protocolos de poscurado.

Prueba pos-hoc Games–Howell; Estadísticamente significativo a $*P<0.05$; $**P<0.01$; $***P<0.001$.

DISCUSIÓN

El presente estudio evaluó el efecto de diferentes protocolos de poscurado sobre la microdureza y la dureza superficial de resinas dentales impresas en 3D para uso definitivo. Los resultados evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en los valores de microdureza entre los protocolos evaluados; sin embargo, no se observaron diferencias estadísticamente significativas en la dureza superficial. En consecuencia, la hipótesis nula fue parcialmente rechazada.

Frente a la dureza superficial Shore D, la ficha técnica de la resina PriZma 3D Bio Crown Diamond reporta un valor de referencia de 92,5 Shore D, inferior a los valores obtenidos en el presente estudio, que oscilaron entre 92,9 y 94,3 Shore D.(17) Los hallazgos indican que todos los protocolos de poscurado evaluados fueron capaces de alcanzar un grado de conversión adecuado, permitiendo obtener propiedades superficiales iguales o superiores a las reportadas por el fabricante. Esto indicaría que los protocolos empleados favorecieron una mayor

densidad de entrecruzamiento polimérico y, en consecuencia, mejores propiedades mecánicas superficiales del material.(5,7,18) Pese a que se observaron diferencias entre grupos, estas fueron mínimas y no alcanzaron significancia estadística, lo que sugiere que la dureza superficial podría ser menos sensible a las variaciones en las condiciones de poscurado evaluadas. De manera similar, Aguilar et al.(19) reportaron valores promedio de dureza Shore D de 92,2 y 92,6 para tiempos de polimerización de 10 y 15 minutos, respectivamente. Resultados concordantes con el presente estudio, especialmente en los grupos sometidos a mayores tiempos de poscurado, donde se observaron valores superiores de dureza superficial.

Estudios previos (4–6) han demostrado que el incremento del tiempo de poscurado mejora significativamente las propiedades mecánicas de las resinas impresas en 3D al favorecer un mayor grado de conversión monomérica y la estabilización de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales fotopolimerizables. Asimismo, se ha reportado que variaciones en las condiciones de poscurado, particularmente la temperatura, influyen directamente en el comportamiento mecánico y la biocompatibilidad de estas resinas, debido a una polimerización más eficiente de la matriz resinosa.(5) Una revisión reciente (20) revisión reciente señaló que protocolos de poscurado optimizados incrementan la microdureza, estabilidad dimensional y resistencia mecánica de las resinas impresas en 3D, especialmente cuando se reduce la inhibición por oxígeno durante la polimerización.

A nivel de microdureza, los valores promedio oscilaron entre $36,0 \pm 0,7$ HV y $39,1 \pm 1,2$ HV, siendo superiores a los reportados por Vasques et al. .(8), quienes informaron valores de dureza Knoop entre 11,8 y 18,7 KHN para resinas fotopolimerizables sometidas a diferentes protocolos de posprocesamiento, y por Rodríguez et al.(21), quienes registraron valores de $17,4 \pm 2,5$ KHN para BioCrown y $17,8 \pm 1,5$ KHN para BioProv. Aunque las diferencias metodológicas entre los ensayos Vickers y Knoop, así como la variabilidad en los materiales y

protocolos evaluados, limitan la comparación directa entre estudios, estos resultados sugieren que las condiciones de poscurado empleadas favorecieron una adecuada conversión polimérica y el desarrollo de propiedades mecánicas favorables.

Los grupos sometidos a poscurado en la unidad Elegoo en presencia de oxígeno durante 15 y 30 minutos presentaron los mayores valores de microdureza, lo que sugiere que tiempos prolongados de irradiación favorecen una polimerización más completa y, en consecuencia, una mayor resistencia superficial del material. Estos hallazgos coinciden con los reportados por Alharbi et al.(22), quienes señalaron que tiempos de pospolimerización de hasta 40 minutos mejoran significativamente las propiedades mecánicas de las resinas impresas en 3D. De manera similar, Aktug Karademir et al. (23) observaron que el aumento del tiempo de poscurado de 5 a 30 minutos incrementa progresivamente la microdureza y el grado de conversión monomérica, alcanzando valores de hasta 29,1 VHN y un 74,6 % de conversión. En conjunto, estos resultados podrían explicarse por una mayor conversión de los enlaces carbono-carbono remanentes y la formación de una red polimérica más densa y estable, asociadas a mejores propiedades mecánicas superficiales.

Investigaciones previas(10–14) han señalado que la exclusión del oxígeno durante la polimerización puede favorecer las propiedades mecánicas de las resinas al disminuir la formación de la capa inhibida por oxígeno. Sin embargo, en el presente estudio los grupos sometidos a atmósferas reducidas de oxígeno no mostraron mayores valores de microdureza en comparación con los demás protocolos evaluados. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Soares et al.(24), quienes evaluaron la aplicación de gel de glicerina como barrera física al oxígeno durante el poscurado y observaron valores de microdureza Knoop para la resina Prizma 3D Bio Crown entre $18,0 \pm 2,9$ y $20,1 \pm 2,8$ KHN, sin diferencias estadísticamente significativas entre las condiciones analizadas. Lo anterior plantea que la microdureza podría estar más influenciada por factores como las

características intrínsecas del material y condiciones generales del sistema de poscurado,

Por otra parte, los grupos sometidos a poscurado mediante Otofash con y sin nitrógeno presentaron valores promedios similares de microdureza. Una revisión sistemática reciente (25) concluyó que las atmósferas ricas en nitrógeno no modifican significativamente la mayoría de las propiedades mecánicas de los materiales dentales impresos en 3D. En consecuencia, la incorporación de nitrógeno durante el poscurado podría no generar beneficios clínicamente relevantes en la microdureza y dureza superficial de resinas impresas.

Los resultados del presente estudio deben interpretarse considerando que la evidencia disponible sobre resinas definitivas impresas en 3D continúa siendo limitada. Entre las fortalezas del presente estudio destaca la evaluación simultánea de microdureza y dureza superficial en una resina definitiva impresa en 3D, así como la comparación de distintos sistemas y condiciones de poscurado, incluyendo atmósferas con y sin oxígeno. Así mismo las muestras fueron fabricadas bajo condiciones estandarizadas previamente evaluados en estudios previos (16,23). Adicionalmente, todas las pruebas se realizaron en el mismo laboratorio y fueron ejecutadas por un operador previamente calibrado. Sin embargo, el estudio presenta limitaciones relacionadas con la evaluación de una única resina comercial y un número limitado de protocolos de poscurado, lo que restringe la extrapolación de los resultados a otros materiales y sistemas disponibles en el mercado. Asimismo, al tratarse de un estudio in vitro, no reproduce completamente las condiciones clínicas del medio oral.

Desde el punto de vista clínico, los resultados sugieren que la optimización de los protocolos de poscurado puede mejorar la microdureza y la dureza superficial de las resinas impresas en 3D para uso definitivo, propiedades relacionadas con la resistencia al desgaste y la longevidad clínica. Sin embargo, la variabilidad observada evidencia la necesidad de estandarizar los protocolos de poscurado

según el tipo de resina y el dispositivo utilizado. Se requieren futuros estudios que incluyan análisis del grado de conversión, termociclado y evaluación de otras propiedades mecánicas y biológicas para establecer protocolos clínicamente predecibles.

Conclusiones

- Los diferentes protocolos de poscurado influyeron significativamente en la microdureza de la resina Prizma 3D Bio Crown Diamond, evidenciando que las condiciones de pospolimerización pueden modificar las propiedades mecánicas de las resinas impresas en 3D para uso definitivo.
- El sistema de poscurado LED tipo Elegoo en presencia de oxígeno, aplicado durante 15 y 30 minutos, presentó los mayores valores de microdureza en la resina evaluada, lo que sugiere una mayor eficiencia en el proceso de pospolimerización.
- Los protocolos de poscurado evaluados no mostraron diferencias significativas en la dureza superficial, lo que indica que todos permitieron alcanzar niveles similares de polimerización superficial.
- La incorporación de atmósferas con bajo contenido de oxígeno o enriquecidas con nitrógeno no produjo mejoras relevantes en la microdureza ni en la dureza superficial de la resina evaluada.

REFERENCIAS

1. Flottes Y, Smail Y, Palomino-Durand C, Attal JP, Ceinos R, François P, et al. Properties of 3D printed resins for definitive dental restorations: A systematic review. J Prosthet Dent. 2026;135(4):e6-27.
2. Lozada MIT, Rondón AKA, Cordeiro IB, Borella PS, Junqueira PC, Mendonça G, et al. Physicomechanical properties of 3D printed resins for producing definitive dental crowns. J Prosthet Dent. 2025;S0022-3913(25)00611-0.

3. Li P, Lambart AL, Stawarczyk B, Reymus M, Spintzyk S. Postpolymerization of a 3D-printed denture base polymer: Impact of post-curing methods on surface characteristics, flexural strength, and cytotoxicity. *J Dent*. 2021;115:103856.
4. Kim D, Shim JS, Lee D, Shin SH, Nam NE, Park KH, et al. Effects of Post-Curing Time on the Mechanical and Color Properties of Three-Dimensional Printed Crown and Bridge Materials. *Polymers*. 2020;12(11):2762.
5. Bayarsaikhan E, Lim JH, Shin SH, Park KH, Park YB, Lee JH, et al. Effects of Postcuring Temperature on the Mechanical Properties and Biocompatibility of Three-Dimensional Printed Dental Resin Material. *Polymers*. 2021;13(8):1180.
6. Lee EH, Ahn JS, Lim YJ, Kwon HB, Kim MJ. Effect of post-curing time on the color stability and related properties of a tooth-colored 3D-printed resin material. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2022;126:104993.
7. Perea-Lowery L, Gibreel M, Vallittu PK, Lassila L. Evaluation of the mechanical properties and degree of conversion of 3D printed splint material. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2021;115:104254.
8. Vasques MT, Mulder JN, Machado DS, Lagana DC. The influence of the post-processing method on knoop hardness of photosensitive resins for 3D SLA printer used in Dentistry. *Clin Lab Res Dent*. 2019.
9. Sahrir CD, Ruslin M, Lee SY, Lin WC. Effect of various post-curing light intensities, times, and energy levels on the color of 3D-printed resin crowns. *J Dent Sci*. 2024;19(1):357-63.
10. Aromaa MK, Vallittu PK. Delayed post-curing stage and oxygen inhibition of free-radical polymerization of dimethacrylate resin. *Dent Mater*. 2018;34(9):1247-52.
11. Gauthier MA, Stangel I, Ellis TH, Zhu XX. Oxygen inhibition in dental resins. *J Dent Res*. 2005;84(8):725-9.
12. Bijelic-Donova J, Garoushi S, Lassila LVJ, Vallittu PK. Oxygen inhibition layer of composite resins: effects of layer thickness and surface layer treatment on the interlayer bond strength. *Eur J Oral Sci*. 2015;123(1):53-60.
13. Zhao Z, Mu X, Wu J, Qi HJ, Fang D. Effects of oxygen on interfacial strength of incremental forming of materials by photopolymerization. *Extreme Mech Lett*. 2016;9:108-18.
14. Sawada Y, Haruyama Y, Kanda K, Matsui S, Okada M, Miyake H, et al. Evaluation of the curing process of UV resins in a 1,1,1,3,3-pentafluoropropane

gas environment by photo differential scanning calorimetry and Fourier transform infrared spectroscopy. *J Vac Sci Technol B*. 2011;29(6):06FC05.

15. Simoneti DM, Pereira-Cenci T, Dos Santos MBF. Comparison of material properties and biofilm formation in interim single crowns obtained by 3D printing and conventional methods. *J Prosthet Dent*. 2022;127(1):168-72.
16. Hwangbo NK, Nam NE, Choi JH, Kim JE. Effects of the Washing Time and Washing Solution on the Biocompatibility and Mechanical Properties of 3D Printed Dental Resin Materials. *Polymers*. 2021;13(24):4410.
17. Makertech Labs. Resina 3D priZma Bio Crown Makertech - LCD e DLP [Internet]. [citado 13 de mayo de 2026]. Disponible en: <https://www.makertechlabs.com.br/>
18. Büyükpolat M, Çal İK, Eryılmaz B, Ersöz B, Aydın N, Karaoğlanoğlu S. Mechanical and optical effects of post-curing time and device type in two 3D-printed resin systems. *BMC Oral Health*. 2025;25:1401.
19. Aguilar AGC, Cholango JOC, Vaca DGC. Efectos del tiempo de polimerización de la resina nano hibrida Bio Crown con impresión 3D. *Anatomía Digit*. 2025;8(2):48-68.
20. Hassanpour M, Narongdej P, Alterman N, Moghtadernejad S, Barjasteh E. Effects of Post-Processing Parameters on 3D-Printed Dental Appliances: A Review. *Polymers*. 1 de octubre de 2024;16(19):2795.
21. Rodrigues BT, Paraguassu SP, Freitas DI de SM, Ishikiriama SK, Maenosono RM. Surface hardness evaluation of a 3D printable resin designed for final restorations. *Braz Dent Sci*. 2024;27(3).
22. Alharbi S, Alshabib A, Algamaiah H, Aldosari M, Alayad A. Influence of Post-Printing Polymerization Time on the Elution of Residual Monomers and Water Sorption of 3D-Printed Resin Composite. *Materials*. 19 de junio de 2025;18(12):2905.
23. Aktug Karademir S, Atasoy S, Akarsu S, Karaaslan E. Effects of post-curing conditions on degree of conversion, microhardness, and stainability of 3D printed permanent resins. *BMC Oral Health*. 26 de febrero de 2025;25(1):304.
24. Soares L de M, Romano B de C, André CB, Giannini M. Effect of glycerin gel application for post-curing process on the flexural strength, elastic modulus, and microhardness of 3D printing resins. *Braz Dent J*. 2025;36:e236361.
25. Rajasekaran A, Chaudhari PK, Haldar P, Vaiid N, Ludwig B. Are the properties of 3D printed dental materials affected by nitrogen-rich

postpolymerization? A systematic review and meta-analysis. J Prosthet Dent.
2025;133(4):981.e1-981.e13.