Artículo original

Efecto de la angulación de impresión sobre las propiedades flexurales de una resina imprimible 3D

Effect of Build Angle on the Flexural Properties of a 3D-Printable Resin

Elizabeth Astorga-Bustamante[1] https://orcid.org/0009-0006-3351-5512
Nicolás Améstica-Fuenzalida[1*] https://orcid.org/0009-0004-6760-798X
Mauricio Toro-González[1] https://orcid.org/0000-0003-4473-5482
Francisco Reyes-Molina[2] https://orcid.org/0009-0009-9718-8946
Alain Manuel Chaple-Gil[3**] https://orcid.org/0000-0002-8571-4429

[1]Universidad de Chile, Facultad de Odontología, Departamento de Rehabilitación Oral. Santiago, Chile.
[2]Práctica privada. Santiago, Chile.
[3]Universidad Autónoma de Chile, Facultad de Ciencias de la Salud. Santiago, Chile.

*Autor para la correspondencia: namestica@odontologia.uchile.cl
**Autor para la correspondencia: alain.chaple@uautonoma.cl

RESUMEN

Introducción: La angulación de construcción es un parámetro de fabricación con potencial influencia sobre el desempeño mecánico de las resinas imprimibles 3D para restauraciones provisionales, y la evidencia disponible resulta heterogénea.

Objetivo: Comparar la resistencia y el módulo flexural de una resina imprimible 3D fabricada en siete angulaciones, utilizando ISO 10477:2020 como referencia.

Métodos: Estudio experimental *in vitro*. Se fabricaron 35 probetas (25 × 2 × 2 mm) de resina LuDent C&B TRY IN en una impresora LCD/MSLA, con cinco probetas por angulación (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°), todas en una única corrida. Tras el

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

posprocesado y 24 h en agua a 37 °C, se realizaron ensayos de flexión en tres puntos (luz 20 mm; 1 mm/min). El módulo se obtuvo por regresión lineal sobre el tramo elástico de la curva carga-deflexión (20-50 % de la carga máxima). Se aplicaron ANOVA de Fisher y de Welch con comparaciones *post hoc* (α = 0,05).

Resultados: La resistencia flexural media osciló entre 51,18 MPa (15°) y 94,94 MPa (75°), con diferencias entre grupos (Fisher p = 0,019; Welch p < 0,001) y una única comparación significativa: 75° frente a 15° (Bonferroni p = 0,006; Games-Howell p = 0,011). El módulo flexural varió entre 1,22 GPa (15°) y 1,89 GPa (75°); ante heterocedasticidad marcada (Levene p < 0,001), el ANOVA de Welch detectó diferencias (p = 0,022), localizadas nuevamente entre 75° y 15° (p = 0,010). Las angulaciones de 0°, 30°, 45°, 60° y 75° satisficieron el criterio de 50 MPa en la primera serie.

Conclusiones: En las condiciones evaluadas, y dentro de una única corrida de impresión, la angulación de 75° superó a la de 15° en ambas propiedades flexurales.

Palabras clave: impresión tridimensional; resistencia flexural; materiales dentales; diseño asistido por computadora; restauración dental temporal.

ABSTRACT

Introduction: Build angle is a manufacturing parameter that may influence the mechanical performance of 3D-printable resins for temporary restorations, and the available evidence is inconsistent.

Objective: To compare the flexural strength and modulus of a 3D-printable resin manufactured at seven different build angles, using ISO 10477:2020 as a reference.

Methods: In vitro experimental study. Thirty-five specimens (25 × 2 × 2 mm) of LuDent C&B TRY IN resin were fabricated on an LCD/MSLA printer, with five specimens per angle (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, and 90°), all in a single print run. After post-processing and 24 hours in water at 37 °C, three-point flexural tests were performed (span 20 mm; 1 mm/min). The modulus was obtained by linear regression over the elastic range of the load-deflection curve (20–50% of the

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

maximum load). Fisher's and Welch's ANOVA were applied with post hoc comparisons (α = 0.05).

Results: The mean flexural strength ranged from 51.18 MPa (15°) to 94.94 MPa (75°), with differences between groups (Fisher p = 0.019; Welch p < 0.001) and a single significant comparison: 75° versus 15° (Bonferroni p = 0.006; Games-Howell p = 0.011). The flexural modulus ranged from 1.22 GPa (15°) to 1.89 GPa (75°); in the presence of marked heteroscedasticity (Levene p < 0.001), Welch's ANOVA detected differences (p = 0.022), again localized between 75° and 15° (p = 0.010). The angles of 0°, 30°, 45°, 60°, and 75° met the 50 MPa criterion in the first series.

Conclusions: Under the evaluated conditions, and within a single impression run, the 75° angle outperformed the 15° angle in both flexural properties.

Keywords: 3D printing; flexural strength; dental materials; computer-aided design; temporary dental restoration.

Recibido: 14/07/2026

Aceptado: 11/09/2026

Introducción

Las tecnologías digitales han transformado la práctica clínica y de laboratorio en odontología, al integrar la obtención de registros, el diseño virtual y la manufactura en un flujo único de diseño y manufactura asistidos por computadora (CAD/CAM, del inglés, *Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing*).[1] Dentro de este flujo, las técnicas de manufactura aditiva han adquirido relevancia creciente por su uso eficiente de material, sus tiempos de producción reducidos y su capacidad de reproducir geometrías complejas. La polimerización en cuba (VAT, del inglés, *Vat Photopolymerization*) es la tecnología aditiva más utilizada en odontología: cura capa por capa una resina líquida fotosensible y, según la fuente lumínica y su mecanismo de proyección, se clasifica en estereolitografía (SLA), procesamiento

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

digital de luz (DLP, del inglés, *Digital Light Processing*) o pantalla de cristal líquido (LCD/MSLA, del inglés, *Liquid Crystal Display/ Masked Stereolithography*).[2,3] Entre sus aplicaciones clínicas, la confección de coronas y puentes provisionales ha impulsado el desarrollo de resinas imprimibles específicas para uso intraoral.[4,5]

El desempeño mecánico de una restauración provisional condiciona su integridad durante el período de provisionalización. La resistencia flexural constituye uno de los descriptores más utilizados para caracterizarlo, por tratarse de una propiedad del material obtenida bajo una geometría de ensayo estandarizada.[5,6] Si bien las restauraciones deben soportar las cargas generadas durante la función masticatoria, cuya magnitud en adultos jóvenes se ha descrito en el orden de varios cientos de newton,[7,8] conviene precisar que una fuerza expresada en newton no es directamente comparable con una resistencia flexural expresada en megapascales, ya que la tensión efectiva depende de la geometría de la restauración y de la distribución de esfuerzos. Por ello, en este trabajo las cargas masticatorias se mencionan únicamente como contexto clínico general, y la resistencia flexural no se interpreta como un predictor directo de la carga máxima que soportaría una restauración en boca.

La manufactura aditiva construye el objeto por superposición de capas, lo que introduce un comportamiento anisotrópico: las propiedades mecánicas pueden diferir, según la dirección en que se aplica la carga respecto de la orientación de las capas.[9] La angulación de construcción es, en consecuencia, un parámetro de fabricación con potencial influencia sobre el desempeño mecánico final. Sin embargo, la evidencia disponible resulta marcadamente heterogénea. Se han reportado los mejores resultados a 0°,[10] 45°,[11] y 90°,[12,13] con hallazgos que varían, incluso, entre resinas evaluadas en un mismo estudio y entre impresoras distintas.[11,14] Esta divergencia sugiere que el efecto de la orientación depende del material, el equipo y el protocolo de posprocesado más que de la existencia de una orientación universalmente superior. A ello se suma que la mayoría de los estudios compara únicamente tres orientaciones (0°, 45° y 90°), sin explorar el rango intermedio.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Un factor adicional es la ausencia de una norma internacional específica para resinas poliméricas dentales manufacturadas mediante impresión 3D. En la práctica, los estudios recurren a normas desarrolladas para materiales poliméricos de recubrimiento y de restauración, como la ISO 10477:2020,[15] que establece dimensiones de probeta, condiciones de ensayo y un criterio mínimo de resistencia flexural. En este trabajo dicha norma se emplea, exclusivamente, como criterio de referencia para el ensayo y para el umbral de resistencia, y no como una certificación integral de conformidad del material ni del proceso de impresión.

El objetivo de este estudio fue comparar la resistencia flexural y el módulo flexural de una resina imprimible 3D para restauraciones provisionales fabricada en siete orientaciones de construcción, y evaluar los resultados de resistencia flexural utilizando como referencia los criterios establecidos en la norma ISO 10477:2020.

Métodos

Diseño del estudio

Se realizó un estudio experimental *in vitro*. Se fabricaron 35 probetas de resina imprimible 3D, distribuidas en siete grupos de cinco probetas según la angulación de impresión (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°). El tamaño muestral de cinco probetas por grupo fue determinado exclusivamente por el procedimiento de conformidad establecido en la norma ISO 10477:2020, sin cálculo *a priori* de potencia estadística. Se reconoce que un procedimiento normativo de aceptación y un cálculo de tamaño muestral orientado a detectar diferencias entre grupos responden a preguntas distintas, y que con cinco observaciones por grupo la capacidad para detectar diferencias moderadas es limitada. Esta condición se declara explícitamente como limitación del estudio y condiciona la interpretación de los resultados no significativos.

Dado que la totalidad de las probetas se fabricó en una única corrida de impresión, el diseño permitió comparar las orientaciones entre sí dentro de esa corrida

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

(comparación intracorrida o *within-build*), pero no posibilitó estimar la variabilidad atribuible a la repetición del proceso de fabricación (variabilidad entre corridas o *build-to-build*). Todas las conclusiones de este trabajo quedaron, por tanto, explícitamente condicionadas a la única corrida evaluada.

Material evaluado

Se empleó la resina fotopolimerizable LuDent C&B TRY IN (Luvantix ADM / 3DMaterials, Daejeon, República de Corea),[16] indicada por el fabricante para la confección de coronas y puentes provisionales de uso intraoral temporal. Se utilizó el lote 215925, con fecha de caducidad 10/2027, en el tono A1. El fabricante no publica una composición química detallada del material (no identifica públicamente monómeros específicos, fotoiniciador, números CAS ni porcentajes) y la describe como una resina fotopolimerizable hidrolavable (*water-washable*).

Respecto de la clasificación del material, es necesario distinguir dos sistemas que no son equivalentes. Por una parte, la denominación Clase I / Clase IIa que emplea el fabricante, corresponde a la clasificación regulatoria de dispositivos médicos, asociada al nivel de riesgo, la indicación clínica y la duración y el tipo de contacto con el paciente; la línea dental del fabricante declara certificación CE Clase IIa. Por otra parte, la clasificación como tipo 2, clase 2 corresponde a la norma ISO 10477:2020 y describe exclusivamente el mecanismo de polimerización: el tipo 2 agrupa los materiales que polimerizan mediante la aplicación de energía externa, como radiación visible o ultravioleta, y dentro de este, la clase 2 corresponde a los materiales que contienen un fotoiniciador. La resina evaluada se clasificó, según ISO 10477:2020, como tipo 2 clase 2.

Diseño digital y parámetros de impresión

Las probetas se modelaron con dimensiones de 25 × 2 × 2 mm (largo × ancho × alto), conforme a lo establecido en ISO 10477:2020, utilizando el *software* TinkerCAD (Autodesk Inc., San Rafael, CA, EE. UU.) y se exportaron en formato STL. TinkerCAD es una aplicación web que no maneja un esquema público de versiones,

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

por lo que no es posible consignar un número de versión. El archivo STL se procesó en CHITUBOX Basic 2.0, donde se asignaron las siete orientaciones de construcción y se generó el archivo de impresión. La impresión se realizó con una impresora Phrozen Sonic Mini 4K (Phrozen Technology, Hsinchu, Taiwán), de tecnología LCD/MSLA, con un grosor de capa de 50 μm. El detalle completo de los parámetros de fabricación se presenta en la tabla 1.

Tabla 1 - Parámetros de fabricación empleados en la impresión de las probetas

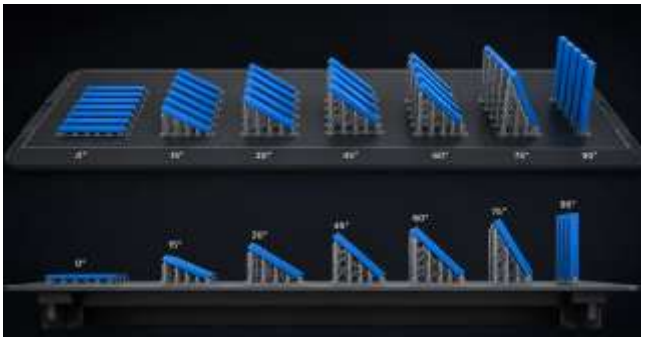
Parámetro	**Especificación**
Impresora	Phrozen Sonic Mini 4K
Tecnología	LCD / MSLA
Software de laminado	CHITUBOX Basic 2.0
Formato de archivo	STL
Grosor de capa	50 μm (0,05 mm)
Exposición de capa normal	2,5 s
Exposición de capas iniciales	30 s
Número de capas iniciales	6
Capas de transición	6
Distancia de elevación	6 mm
Velocidad de elevación	60 mm/min
Distancia de retracción	6 mm
Velocidad de retracción	150 mm/min
Longitud de onda de impresión	405 nm
Fuente lumínica	ParaLED® Matrix 2.0
Potencia del sistema óptico	≈ 40 W
Irradiancia en el plano de exposición	≈ 1,4-2,0 mW/cm² (no declarada por el fabricante)
Temperatura ambiental de fabricación	20 °C
Homogeneización de la resina	Agitación manual vigorosa durante 2 min
Posición de las muestras	Distribuidas uniformemente sobre la plataforma
Corridas de impresión	Una única corrida para las 35 probetas

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Las 35 probetas fueron fabricadas simultáneamente en una única corrida de impresión, distribuidas uniformemente sobre la plataforma de construcción. En consecuencia, las cinco probetas de cada angulación comparten condiciones de fabricación —lote de resina, exposición, temperatura ambiental y posición relativa en la plataforma— y no constituyen réplicas independientes del proceso de manufactura. Esta condición se declara explícitamente y se analiza en la sección de limitaciones.

Definición geométrica de las angulaciones

El plano de referencia respecto del cual se midió cada angulación, fue el eje X horizontal, coincidente con la plataforma de impresión. La angulación correspondió, por tanto, al ángulo formado entre el eje longitudinal de la probeta y la plataforma de construcción: 0° indicó que el eje longitudinal era paralelo a la plataforma, y 90° que era perpendicular a esta. La construcción de las capas fue siempre horizontal, de modo que la orientación de las capas respecto del eje longitudinal de la probeta varió de acuerdo con el posicionamiento de esta sobre la plataforma. En la orientación de 0° las capas quedaron paralelas al eje longitudinal y perpendiculares a la dirección de aplicación de la carga; en la de 90°, perpendiculares al eje longitudinal y paralelas a la dirección de la carga. Las siete orientaciones se representan en la figura 1.



Leyenda: Vista superior (arriba) y vista lateral (abajo). En azul, las probetas, cuyo eje longitudinal define el ángulo respecto del plano de la plataforma; en gris, las estructuras de soporte. La dirección de fabricación (eje Z) es vertical y las capas se depositan en planos horizontales.

Fig. 1 - Orientaciones de construcción de las probetas sobre la plataforma de impresión.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Estructuras de soporte y acabado

Las estructuras de soporte se generaron mediante la herramienta de posicionamiento automático de CHITUBOX Basic 2.0. Una vez posicionados los soportes de la primera probeta de cada orientación, esta se duplicó junto con sus soportes, de modo que las cinco probetas de una misma angulación resultaran idénticas entre sí en número y distribución de soportes. No obstante, dado que la generación fue automática y dependiente de la orientación, el número, la posición y el diámetro de los puntos de contacto no fueron estandarizados entre las distintas angulaciones. Esta condición se declara explícitamente, ya que constituye un potencial factor de confusión adicional al de la orientación de las capas.

El retiro de los soportes se realizó con un disco de carborundum, siguiendo la dirección longitudinal de la probeta, sin alterar ni modificar su geometría. La huella residual del soporte se eliminó con papel abrasivo al agua de grano 320, manteniendo la indemnidad de las superficies. El acabado no fue cuantificado ni estandarizado mediante rugosimetría, lo que se reconoció como limitación.

Posprocesado

El posprocesado se realizó siguiendo las indicaciones del fabricante. Las probetas se sometieron a lavado ultrasónico con dos ciclos de 2 a 3 minutos en solvente TEK1960, empleado puro (100 %, sin dilución en agua, tal como lo suministra el fabricante), en un volumen de 2,5 l. Según la hoja de datos de seguridad, su composición nominal corresponde a éter monometílico de dipropilenglicol (50-100 %), succinato de dimetilo (1-5 %) y alcohol etoxilado (1-3 %). El solvente fue reutilizado entre lotes de probetas, dada su elevada capacidad de saturación, y se filtró periódicamente mediante malla fina para remover partículas en suspensión. Tras el lavado, las probetas se secaron de inmediato con aire comprimido.

A continuación se realizó el poscurado térmico en horno a 60 °C durante 10 minutos, seguido del poscurado lumínico durante 30 minutos en una unidad Anycubic Wash

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

& Cure 2.0 (Anycubic, Shenzhen, China), con una longitud de onda de 405 nm y una irradiancia estimada entre 15 y 30 mW/cm² en la plataforma giratoria de la cámara de curado.[17] La temperatura del horno se controló mediante el termostato incorporado del equipo, sin verificación instrumental independiente, lo que se declara como limitación. El orden del posprocesado fue, por tanto: lavado ultrasónico, secado, poscurado térmico y poscurado lumínico. Posteriormente, las probetas se almacenaron en agua grado 2 (ISO 3696)[18] a 37 ± 1 °C durante 24 ± 2 horas, en contenedores rotulados según angulación de impresión.

Verificación dimensional

Antes del ensayo, las probetas se retiraron del medio acuoso y se secaron con papel absorbente. El ancho y el alto de cada probeta se verificaron con un pie de metro digital EshopAngie, de rango 0-150 mm y resolución 0,01 mm. La medición se realizó en la zona central de la probeta —coincidente con el punto de aplicación de la carga— y se efectuó una única vez para cada dimensión. Dado que las probetas presentaron pequeñas variaciones dimensionales entre sí, en las ecuaciones 1 y 2 se emplearon las dimensiones reales individuales de cada probeta, y no los valores nominales de diseño. No se estableció *a priori* un rango de tolerancia dimensional para la inclusión o exclusión de probetas; la ausencia de mediciones repetidas impidió, además, estimar el error de medición del instrumento, lo que se reconoció como limitación.

Ensayo de flexión en tres puntos

El ensayo se realizó en una máquina de prueba universal DEBEN Microtest Tensile Stages (Deben UK Ltd., Suffolk, Reino Unido), provista de una plataforma de soporte compuesta por dos brazos cilíndricos separados por una luz de 20 mm y un brazo cilíndrico indentador central. Las probetas se marcaron con lápiz grafito en su punto medio, haciendo coincidir dicha marca con el indentador, y se ensayaron a una velocidad transversal constante de 1,0 ± 0,3 mm/min hasta la fractura. El registro de carga instantánea (N) y desplazamiento (mm) se obtuvo mediante el *software*

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

propietario del equipo, generando un archivo CSV independiente por cada probeta. El equipo se encontraba provisto de una celda de carga de 200 N de capacidad, y tanto los dos apoyos como el indentador presentaron un diámetro de 5 mm. La disposición del dispositivo de flexión se muestra en la figura 2.

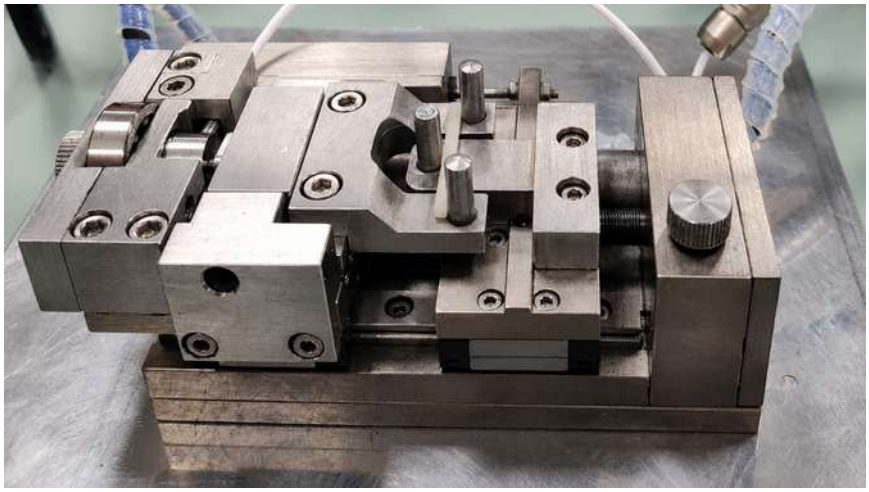


Fig. 2 - Dispositivo de flexión en tres puntos de la máquina DEBEN Microtest Tensile Stages, con una probeta rectangular de resina LuDent C&B TRY IN dispuesta entre los apoyos. La carga se aplica mediante el indentador central sobre la superficie superior de la probeta; la superficie sometida a tensión durante el ensayo es, por tanto, la cara inferior, opuesta al punto de aplicación de la carga.

Se declara como limitación de reporte que los registros de laboratorio correspondientes a la fase experimental no consignan la precisión nominal de la celda de carga, ni el procedimiento y la fecha de la última calibración previa a los ensayos. La frecuencia de muestreo consignada en los propios archivos de registro fue de 500 ms por punto (2 Hz).

Cabe precisar, además, que las cargas de fractura registradas en este estudio se situaron aproximadamente entre 11 y 24 N, lo que representa un 5,5 % a 11,9 % del fondo de escala de la celda de carga empleada. Dado que la incertidumbre relativa de una celda de carga tiende a incrementarse en el extremo inferior de su rango de medición, esta condición puede haber contribuido a la variabilidad observada. Esta consideración se retoma en la sección de limitaciones.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Cálculo de la resistencia y del módulo flexural

La resistencia flexural (σ, en MPa) se calculó mediante la ecuación 1:

$$\sigma = 3Fl / (2bh^2)$$

Donde F es la carga máxima registrada durante el ensayo (N); l, la distancia entre apoyos (20 mm); b, el ancho real de la probeta (mm); y h, su alto real (mm).

La carga máxima se definió operativamente como el valor máximo de la curva carga-desplazamiento registrada para cada probeta.

El módulo flexural (E_f, en GPa) se calculó mediante la ecuación 2:

$$Ef = ml^3 / (4bh^3)$$

Donde m es la pendiente ($\Delta F/\Delta\delta$, en N/mm) del tramo lineal de la curva carga-deflexión; l, la distancia entre apoyos (20 mm); b, el ancho real de la probeta (mm); y h, su alto real (mm).

El módulo flexural fue calculado a partir de los registros individuales carga-desplazamiento. La pendiente m se obtuvo por regresión lineal de mínimos cuadrados sobre un intervalo de la curva definido *a priori* entre el 20 % y el 50 % de la carga máxima de cada probeta, rango situado dentro de la región elástica y previo a cualquier desviación de la linealidad. El ajuste resultó satisfactorio en la totalidad de las probetas, con coeficientes de determinación comprendidos entre $R^2 = 0,985$ y $R^2 = 0,9998$ (tabla 2).

Tabla 2 - Valores individuales de las 35 probetas

Grupo	Probeta	b (mm)	h (mm)	F máx (N)	Resistencia (MPa)	Pendiente (N/mm)	Módulo (GPa)	R^2
0°	1	1,8	2,1	10,99	41,55	8,23	0,987	0,9892

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

0°	2	1,8	1,7	17,29	99,71	10,85	2,454	0,9973
0°	3	1,7	2,2	21,21	77,32	10,30	1,138	0,9954
0°	4	1,7	1,9	15,15	74,06	16,05	2,753	0,9998
0°	5	1,8	2,3	23,75	74,84	13,77	1,257	0,9937
15°	1	2,0	2,1	15,44	52,50	11,71	1,265	0,9949
15°	2	1,9	2,1	14,24	50,98	10,83	1,231	0,9961
15°	3	2,1	2,1	14,44	46,77	10,04	1,032	0,9969
15°	4	2,1	2,1	15,17	49,15	10,27	1,056	0,9929
15°	5	1,8	1,8	10,98	56,48	7,84	1,494	0,9981
30°	1	1,6	1,9	11,32	58,78	8,29	1,511	0,9927
30°	2	1,6	1,8	14,19	82,11	12,62	2,704	0,9985
30°	3	1,7	2,2	20,31	74,06	11,03	1,218	0,9966
30°	4	1,8	2,0	14,28	59,50	11,38	1,581	0,9918
30°	5	1,7	2,0	19,02	83,89	10,18	1,498	0,9954
45°	1	1,9	1,9	19,93	87,16	10,65	1,634	0,9973
45°	2	1,8	1,9	19,20	88,62	11,36	1,840	0,9940
45°	3	1,8	1,9	18,65	86,11	11,21	1,815	0,9961
45°	4	2,0	1,9	15,99	66,45	9,61	1,401	0,9974
45°	5	2,1	1,9	14,61	57,80	9,65	1,340	0,9981
60°	1	1,9	1,9	18,02	78,82	9,84	1,510	0,9960
60°	2	2,0	1,8	10,28	47,60	8,87	1,521	0,9984
60°	3	1,8	1,8	15,81	81,31	9,04	1,722	0,9979
60°	4	1,8	1,8	10,65	54,76	10,34	1,969	0,9995
60°	5	1,9	1,9	17,21	75,28	8,75	1,343	0,9961
75°	1	2,0	1,8	21,89	101,36	11,50	1,972	0,9979
75°	2	2,0	1,9	20,60	85,60	11,35	1,654	0,9983
75°	3	2,0	1,8	22,93	106,18	12,60	2,161	0,9984
75°	4	1,9	1,8	21,74	105,94	10,97	1,980	0,9941
75°	5	1,9	1,8	15,52	75,62	9,24	1,667	0,9973
90°	1	1,8	1,8	18,61	95,70	9,06	1,726	0,9946
90°	2	1,8	1,8	17,82	91,65	9,88	1,882	0,9965
90°	3	2,2	2,0	12,46	42,47	9,08	1,031	0,9988

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

90°	4	1,8	1,9	15,83	73,10	10,45	1,692	0,9920
90°	5	2,2	1,8	8,89	37,44	7,65	1,193	0,9854

Leyenda: b: ancho real; h: alto real; F máx: carga máxima registrada; R^2: coeficiente de determinación del ajuste lineal sobre el intervalo 20-50 % de la carga máxima.

La deflexión empleada corresponde al desplazamiento del actuador de la máquina, registrado por su encoder lineal interno, dado que el ensayo no contó con un extensómetro montado directamente sobre la probeta. No se aplicó corrección por la *compliance* del sistema de ensayo (bastidor, celda de carga y acoples mecánicos), puesto que no se dispone de un ensayo en blanco que permita estimarla retrospectivamente. Al incorporar la deformación del propio sistema, el desplazamiento registrado sobrestima la deflexión real de la probeta y, por tanto, los valores de módulo aquí informados constituyen una subestimación del módulo flexural verdadero del material. La magnitud de esta subestimación no puede cuantificarse con los datos disponibles. Los valores de módulo deben interpretarse, en consecuencia, como válidos para la comparación relativa entre orientaciones dentro de este estudio, pero no como determinaciones absolutas del módulo elástico del material, ni como valores directamente comparables con los publicados por otros autores.

Criterio de referencia ISO 10477:2020

La norma ISO 10477:2020 establece un criterio mínimo de resistencia flexural de 50 MPa para materiales poliméricos de recubrimiento de coronas y puentes, junto con un procedimiento de decisión por series. Según dicho procedimiento, un grupo en el que cuatro o cinco de cinco probetas alcanzan el umbral satisface el criterio en la primera serie; un grupo con tres de cinco requiere la evaluación de una segunda serie; y un grupo con cero a dos de cinco no satisface el criterio. En este estudio la norma se utilizó exclusivamente como criterio de referencia para las dimensiones de la probeta, las condiciones del ensayo y el umbral de resistencia flexural. Su aplicación no constituye una certificación integral de conformidad del material ni

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

del proceso de impresión, y debe considerarse que a la fecha no existe una norma internacional específica para resinas poliméricas dentales manufacturadas mediante impresión 3D.

Análisis estadístico

Los datos se procesaron con Stata 14.2 (StataCorp, College Station, TX, EE. UU.), con un nivel de significación α = 0,05. Se calcularon media, mediana, desviación estándar e intervalo de confianza del 95 % para la media de cada grupo. La normalidad se evaluó sobre los residuos del modelo ANOVA ajustado para cada variable mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la inspección gráfica de los diagramas Q-Q (fig. 3). La homogeneidad de varianzas se evaluó formalmente mediante las pruebas de Levene, centrada en la media, y de Brown-Forsythe, centrada en la mediana.

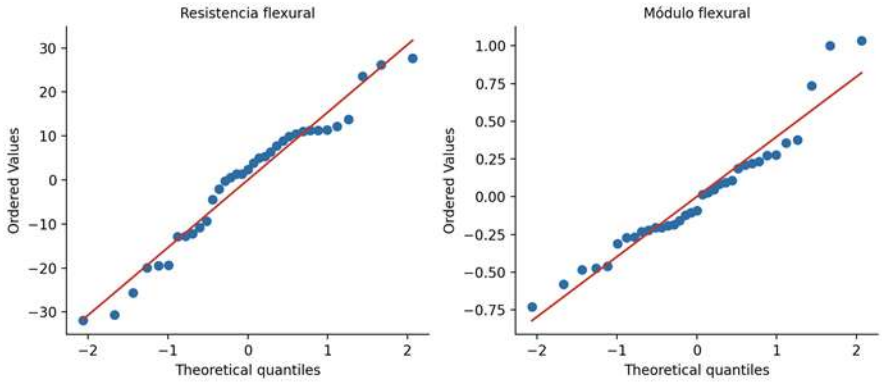


Fig. 3 - Diagramas Q-Q de los residuos del modelo ANOVA para la resistencia flexural (izquierda) y el módulo flexural (derecha).

El análisis principal consistió en un ANOVA de una vía (ANOVA de Fisher) con comparaciones múltiples *post hoc*, mediante la corrección de Bonferroni sobre las 21 comparaciones posibles entre los siete grupos, empleando la varianza combinada del modelo. Se informan el tamaño de efecto η^2, la diferencia de medias y su intervalo de confianza del 95 % para cada comparación. Dado el reducido tamaño muestral y las diferencias de dispersión observadas entre grupos, se realizó,

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

además, un análisis de sensibilidad mediante ANOVA de Welch con comparaciones *post hoc* de Games-Howell, procedimientos que no asumen homocedasticidad. Los resultados se consideran robustos únicamente cuando la interpretación se mantiene bajo ambos enfoques; cuando difieren, ambos se reportan de forma transparente. No se realizó análisis de potencia *post hoc*, por tratarse de un procedimiento poco informativo; en su lugar se privilegia la comunicación de tamaños de efecto e intervalos de confianza.

Para el módulo flexural, y dada la heterocedasticidad detectada en esta variable, el ANOVA de Welch con comparaciones de Games-Howell se adoptó como análisis principal, y se reservó el ANOVA de Fisher como referencia. Los 35 valores individuales se presentan en la tabla 2, con el fin de permitir la reproducibilidad completa del análisis. Todos los cálculos de resistencia y de módulo fueron realizados directamente sobre los archivos de registro carga-desplazamiento originales, mediante un procedimiento automatizado y uniforme para las 35 probetas.

Resultados

Estadística descriptiva

Las 35 probetas completaron el ensayo sin incidencias. Los estadísticos descriptivos de ambas variables, incluidos los intervalos de confianza del 95 % para la media, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3 - Estadística descriptiva de la resistencia flexural y del módulo flexural según angulación de impresión (n = 5 por grupo)

Grupo	Resistencia flexural Media ± DE (MPa)	IC 95 % (MPa)	Mediana (MPa)	Módulo flexural Media ± DE (GPa)	IC 95 % (GPa)
0°	73,50 ± 20,76	47,72–99,28	74,84	1,72 ± 0,82	0,70–2,74
15°	51,18 ± 3,65	46,64–55,72	50,98	1,22 ± 0,19	0,98–1,45
30°	71,67 ± 12,03	56,74–86,60	74,06	1,70 ± 0,58	0,99–2,42

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

45°	77,23 ± 14,15	59,66–94,80	86,11	1,61 ± 0,23	1,32–1,89
60°	67,55 ± 15,31	48,55–86,56	75,28	1,61 ± 0,24	1,32–1,91
75°	94,94 ± 13,68	77,95–111,93	101,36	1,89 ± 0,22	1,61–2,16
90°	68,07 ± 27,10	34,42–101,73	73,10	1,50 ± 0,37	1,05–1,96

Leyenda: DE: desviación estándar; IC 95 %: intervalo de confianza del 95 % para la media.

Los 35 valores individuales se encuentran disponibles en la tabla 2.

Verificación de supuestos

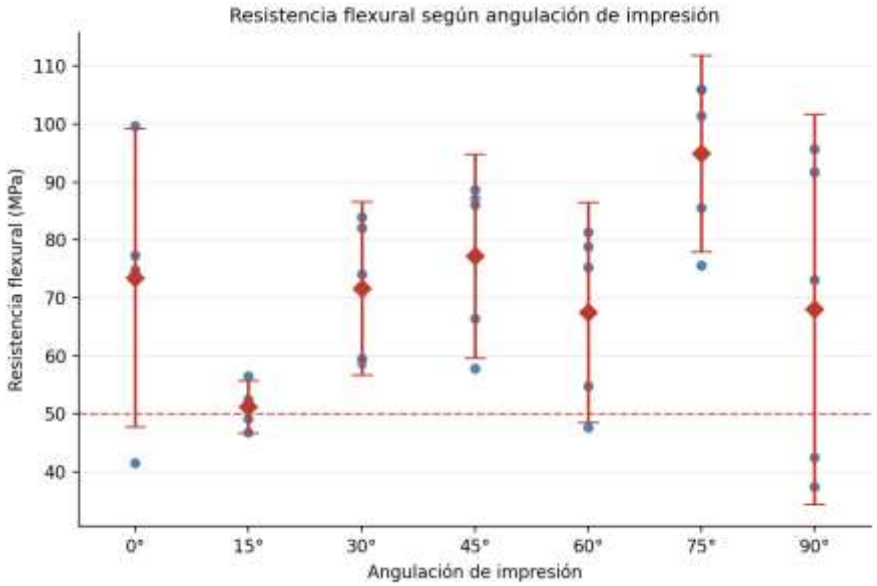
La prueba de Shapiro-Wilk aplicada sobre los residuos del modelo ANOVA no detectó evidencia suficiente para rechazar el supuesto de normalidad en ninguna de las dos variables (resistencia flexural: W = 0,959; p = 0,214; módulo flexural: W = 0,943; p = 0,069). Cabe precisar que una prueba de normalidad no significativa no demuestra que los datos sean normales, especialmente con tamaños muestrales reducidos; la formulación adecuada es que no se detectó evidencia estadística suficiente para rechazar el supuesto de normalidad de los residuos. La inspección de los diagramas Q-Q (fig. 3) resultó consistente con este resultado.

La homogeneidad de varianzas mostró un comportamiento distinto en cada variable. Para la resistencia flexural, la prueba de Levene detectó heterogeneidad moderada (F = 2,87; p = 0,026), atribuible a la mayor dispersión de los grupos de 0° y 90° frente a la del grupo de 15°. Para el módulo flexural, la heterogeneidad fue marcada (Levene F = 6,07; p = 0,0004). En ambos casos se privilegió, en consecuencia, la lectura conjunta del análisis clásico y del análisis robusto.

Resistencia flexural

El ANOVA de Fisher detectó diferencias estadísticamente significativas entre las angulaciones evaluadas (F = 3,07; gl = 6, 28; p = 0,019), con un tamaño de efecto grande (η^2 = 0,40). El análisis de sensibilidad confirmó y reforzó este hallazgo: el ANOVA de Welch detectó diferencias con mayor intensidad (F = 9,68; gl = 6; 11,5; p = 0,0006). La distribución de los valores individuales, junto con la media y su intervalo de confianza del 95 % para cada grupo, se presentan en la figura 4.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES



Leyenda: Cada punto azul representa una probeta; el rombo rojo indica la media del grupo y las barras su intervalo de confianza del 95 %. La línea discontinua señala el criterio de referencia de 50 MPa adoptado a partir de ISO 10477:2020.

Fig. 4 - Valores individuales de resistencia flexural según angulación de impresión (n = 5 por grupo).

Las comparaciones *post hoc* de Bonferroni identificaron una única diferencia estadísticamente significativa, entre 75° y 15° (diferencia de medias 43,76 MPa; IC 95 % 22,16 a 65,36; p = 0,006). Esta diferencia se mantuvo bajo el procedimiento robusto de Games-Howell (p = 0,011), lo que la convierte en el único contraste que supera ambos enfoques analíticos. Ninguna de las restantes comparaciones alcanzó significación estadística tras el ajuste; las más próximas fueron 60° frente a 75° (p = 0,311) y 75° frente a 90° (p = 0,349). La tabla 4 presenta las 21 comparaciones.

Tabla 4 - Comparaciones múltiples *post hoc* para la resistencia flexural (21 comparaciones)

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Comparación	Diferencia de medias (MPa)	IC 95 %	*p* sin ajustar	*p* ajustado	Diferencia Estadísticamente Significativa
15° *vs* 75°	-43,76	-65,36; -22,16	0,0003	0,006	*
60° *vs* 75°	-27,39	-48,98; -5,79	0,0148	0,311	
75° *vs* 90°	26,87	5,27; 48,46	0,0166	0,349	
15° *vs* 45°	-26,05	-47,65; -4,45	0,0198	0,417	
30° *vs* 75°	-23,27	-44,87; -1,67	0,0357	0,749	
0° *vs* 15°	22,32	0,72; 43,92	0,0433	0,909	
0° *vs* 75°	-21,44	-43,04; 0,16	0,0516	1,000	
15° *vs* 30°	-20,49	-42,09; 1,11	0,0621	1,000	
45° *vs* 75°	-17,71	-39,31; 3,89	0,1042	1,000	
15° *vs* 90°	-16,89	-38,49; 4,70	0,1203	1,000	
15° *vs* 60°	-16,37	-37,97; 5,22	0,1316	1,000	
45° *vs* 60°	9,68	-11,92; 31,28	0,3666	1,000	
45° *vs* 90°	9,16	-12,44; 30,76	0,3925	1,000	
0° *vs* 60°	5,94	-15,65; 27,54	0,5774	1,000	
30° *vs* 45°	-5,56	-27,16; 16,03	0,6019	1,000	
0° *vs* 90°	5,42	-16,17; 27,02	0,6110	1,000	
30° *vs* 60°	4,11	-17,49; 25,71	0,6994	1,000	
0° *vs* 45°	-3,73	-25,33; 17,87	0,7260	1,000	
30° *vs* 90°	3,59	-18,00; 25,19	0,7358	1,000	
0° *vs* 30°	1,83	-19,77; 23,43	0,8634	1,000	
60° *vs* 90°	-0,52	-22,12; 21,08	0,9610	1,000	

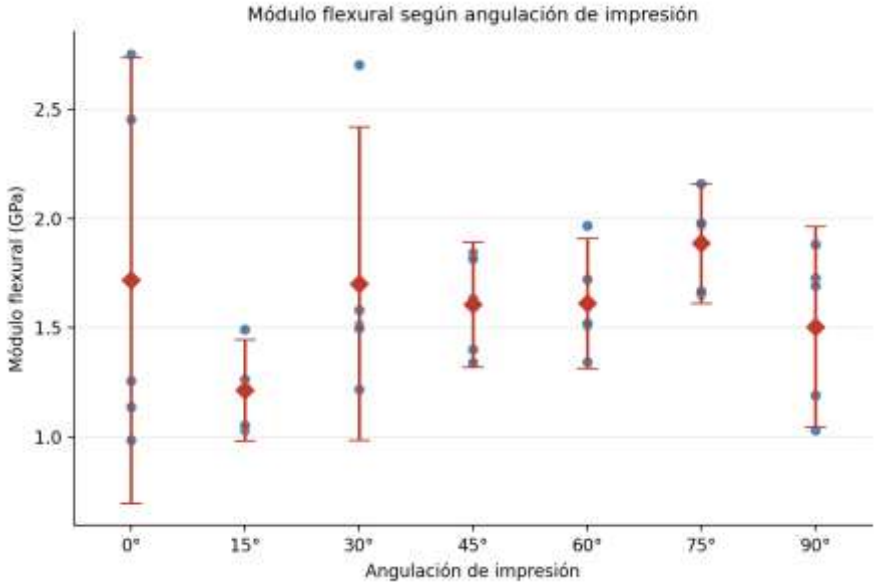
Leyenda: Corrección de Bonferroni sobre 21 comparaciones, con varianza combinada del ANOVA (MSE = 277,936; gl = 28; error estándar de la diferencia = 10,544). Los intervalos de confianza del 95 % se presentan sin ajustar por comparaciones múltiples (t crítico bilateral, gl = 28). (*): diferencia estadísticamente significativa tras el ajuste.

Módulo flexural

El módulo flexural medio osciló entre 1,22 GPa (15°) y 1,89 GPa (75°) (tabla 3). Dada la marcada heterocedasticidad de esta variable, el análisis principal correspondió al ANOVA de Welch, que detectó diferencias estadísticamente significativas entre las angulaciones evaluadas (F = 3,82; gl = 6; 12,3; *p* = 0,022). El ANOVA de Fisher,

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

informado como referencia, no las detectó (F = 1,15; gl = 6, 28; p = 0,361; η^2 = 0,20), resultado esperable, dado que este procedimiento pierde potencia cuando las varianzas son desiguales. Las comparaciones *post hoc* de Games-Howell localizaron la diferencia entre las orientaciones de 75° y 15° (diferencia de medias 0,671 GPa; p = 0,010). La distribución de los valores individuales de módulo flexural, junto con la media y su intervalo de confianza del 95 % para cada grupo, se presentan en la figura 5.



Leyenda: Cada punto azul representa una probeta; el rombo rojo indica la media del grupo y las barras su intervalo de confianza del 95 %. Valores obtenidos por regresión lineal sobre el tramo elástico de la curva carga-deflexión.

Fig. 5 - Valores individuales de módulo flexural según angulación de impresión (n = 5 por grupo).

Este resultado converge con el observado para la resistencia flexural: ambas propiedades identifican el mismo contraste (75° frente a 15°) bajo el mismo procedimiento robusto. La concordancia entre dos variables mecánicas obtenidas de registros independientes dentro de la misma curva refuerza la consistencia interna del hallazgo. No obstante, y por las razones instrumentales expuestas en Métodos —en particular la ausencia de corrección por *compliance* del sistema—, los valores absolutos de módulo deben interpretarse con la cautela señalada.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Resultado con respecto al criterio de referencia ISO 10477:2020

El número de probetas que alcanzó el umbral de 50 MPa en cada grupo, y la clasificación resultante según el procedimiento por series, se presentan en la tabla 5.

Tabla 5 - Resultado de cada angulación de impresión respecto del criterio de resistencia flexural ≥ 50 MPa

Grupo	Probetas ≥ 50 MPa	Media (DE), MPa	Clasificación
0°	4 / 5	73,50 (20,76)	Satisface el criterio en la primera serie
15°	3 / 5	51,18 (3,65)	Requiere segunda serie: resultado indeterminado
30°	5 / 5	71,67 (12,03)	Satisface el criterio en la primera serie
45°	5 / 5	77,23 (14,15)	Satisface el criterio en la primera serie
60°	4 / 5	67,55 (15,31)	Satisface el criterio en la primera serie
75°	5 / 5	94,94 (13,68)	Satisface el criterio en la primera serie
90°	3 / 5	68,07 (27,10)	Requiere segunda serie: resultado indeterminado

Nota: La clasificación se refiere exclusivamente a dicho criterio, utilizado como referencia a partir de ISO 10477:2020, y no constituye una certificación integral de conformidad del material ni del proceso de impresión. Los grupos de 15° y 90° obtuvieron 3 de 5 probetas conformes, condición que según el propio procedimiento normativo exige la evaluación de una segunda serie; dado que esta no fue realizada, su resultado es indeterminado y no equivale a un incumplimiento del criterio.

Discusión

La orientación de construcción modificó el comportamiento flexural de la resina evaluada, pero lo hizo de manera acotada: de las veintiuna comparaciones posibles, solo el contraste entre 75° y 15° resultó consistente bajo procedimientos clásicos y robustos, y lo hizo simultáneamente en la resistencia y en el módulo. Esta convergencia entre dos descriptores mecánicos obtenidos de la misma curva sugiere que lo observado no responde a una fluctuación aleatoria de una variable

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

aislada, sino a una diferencia real de rigidez y de capacidad de carga entre ambas orientaciones extremas del rango evaluado. La lectura razonable no es, sin embargo, que exista una angulación óptima: es que la orientación importa allí donde la disposición de las interfases entre capas respecto de la dirección de la carga difiere de forma más acusada, mientras que en el rango intermedio las diferencias quedan por debajo de lo que este diseño puede resolver.

Conviene subrayar que, aunque 75° presentó la media más elevada en ambas propiedades, solo fue significativamente superior a 15° y no al resto de las orientaciones. El estudio evaluó, además, una única resina, una única impresora, un único protocolo de posprocesado, un único grosor de capa, una única geometría experimental y una única corrida de impresión. Por estas razones, los resultados no permiten sostener que 75° constituya una orientación óptima, ideal o clínicamente recomendable en términos generales, sino únicamente que presentó el mejor desempeño flexural medio en las condiciones experimentales aquí descritas.

Comparación con la literatura

Väyrynen y otros[19] evaluaron una resina para dispositivos oclusales impresa mediante SLA en 0°, 45° y 90°, con un grosor de capa de 150 *µ*m —tres veces mayor que el empleado en el presente estudio (50 *µ*m)—, y reportaron diferencias significativas entre 0°/90° y 0°/45° para la resistencia flexural, y entre todos los grupos para el módulo flexural. Los autores identificaron el almacenamiento en agua, más que la orientación de construcción, como la variable más influyente. Una posible explicación de la divergencia con los presentes hallazgos podría relacionarse con el grosor de capa, ya que se ha propuesto que este parámetro y la resistencia flexural mantienen una relación inversa, atribuida a diferencias en el grado de conversión polimérica alcanzado durante el curado;[9] no obstante, dicho mecanismo no fue evaluado directamente en este trabajo.

Unkovskiy y otros[12] emplearon probetas de dimensiones no ajustadas a la norma ISO (5 × 5 × 30 mm; grosor de capa de 50 *µ*m) y reportaron mejor desempeño flexural a 90° y 45° que a 0°. Los autores argumentaron que las dimensiones de 2 × 2 × 25

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

mm establecidas por ISO 10477 resultarían inadecuadas, porque el retiro de los soportes y el desprendimiento de la plataforma podrían distorsionar las probetas. Este argumento no resulta plenamente aplicable, dado que, con independencia de las dimensiones utilizadas, la eliminación de las estructuras de soporte constituye un paso ineludible de cualquier flujo de manufactura aditiva. En el mismo sentido, *Mudhaffer* y otros[13] evaluaron cinco resinas restauradoras en probetas de 2 × 2 × 25 mm impresas a 0°, 45° y 90°, y reportaron una mayor resistencia flexural en la orientación de 90°, con un efecto adicional del envejecimiento artificial.

Derban y otros[10] utilizaron dimensiones de probeta conformes a la norma ISO y el mismo grosor de capa empleado en este estudio, pero una marca de resina distinta, y reportaron el mejor desempeño flexural a 0°. *Casucci* y otros[11] evaluaron cuatro resinas impresas a 0°, 45° y 90° y observaron que el efecto de la angulación dependía del material: una de las resinas alcanzó su mayor resistencia flexural a 45°, mientras que en otras el desempeño a 90° fue el más bajo. Resultados igualmente divergentes han sido descritos por *Sfondrini* y otros[14] al comparar dos resinas fotopolimerizables procesadas en dos impresoras distintas, y por de *Castro* y otros,[20] quienes evaluaron conjuntamente exactitud dimensional y propiedades mecánicas. *Keßler* y otros[21] incorporaron además el análisis fractográfico y observaron que la dirección de impresión modificaba el patrón de falla.

El conjunto de esta evidencia no permite establecer una relación general entre angulación de impresión y desempeño mecánico. Las diferencias metodológicas impiden una comparación directa entre:

- Estudios
- Material
- Impresora
- Tecnología de polimerización
- Grosor de capa
- Geometría de la probeta
- Protocolo de posprocesado

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

- Condiciones de envejecimiento

La conclusión más sólida que sustenta la literatura disponible, y a la que contribuyen los presentes hallazgos, es:

> El efecto de la orientación de construcción es dependiente del material, del equipo y del protocolo empleados, más que de la identificación de una angulación universalmente superior.

Una revisión sistemática reciente sobre los factores que afectan la resistencia flexural de las resinas imprimibles converge en esta interpretación.[9]

Interpretación de los hallazgos del módulo flexural

Los valores medios de módulo flexural se situaron entre 1,22 y 1,89 GPa, lo que resulta coherente con el comportamiento esperable de una resina metacrílica fotopolimerizada para uso provisional.

La diferencia estadística se localiza entre 75° y 15°, es decir, exactamente el mismo par identificado para la resistencia flexural. Esta coincidencia es la que permite sostener con mayor confianza que la orientación de construcción afecta al comportamiento mecánico de este material, y no solo a uno de sus descriptores.

Dada la ausencia de corrección por *compliance* del sistema de ensayo, los valores de módulo conservan validez para la comparación relativa entre las orientaciones evaluadas dentro de este experimento, pero no deben emplearse como valores de referencia absolutos del material ni contrastarse directamente con los publicados por otros autores.

Consideraciones sobre la extrapolación clínica

La resistencia flexural media obtenida a 75° (94,94 MPa) se sitúa en un rango comparable al descrito para materiales provisionales convencionales y por fresado.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Wechkunanukul y otros[6] compararon, en probetas de idénticas dimensiones (25 × 2 × 2 mm) y bajo condiciones de ensayo equivalentes, restauraciones provisionales de PMMA convencional (109,74 ± 14,14 MPa), fresado (125,16 ± 6,83 MPa) e impresas en 3D (71,09 ± 9,09 MPa). Esta comparación resulta metodológicamente aceptable por la coincidencia en geometría y protocolo, aunque el material impreso evaluado por dichos autores es distinto del utilizado aquí.

Ahora bien, esta comparación no autoriza a afirmar la idoneidad clínica del material. Una barra sometida a carga monotónica en flexión durante un ensayo de laboratorio no reproduce:

- La geometría de una corona
- La distribución real de tensiones
- La interfaz de cementación
- La fatiga cíclica
- El termociclado
- El envejecimiento hidrolítico
- Las fuerzas parafuncionales
- Ni los defectos introducidos durante la manipulación clínica

Los valores observados sugieren un comportamiento mecánico potencialmente compatible con aplicaciones provisionales, aunque su relevancia clínica requiere confirmación mediante ensayos de fatiga, envejecimiento y geometrías restauradoras.

Limitaciones

Este estudio presenta limitaciones que deben considerarse al interpretar sus resultados. En relación con el diseño y el tamaño muestral, se emplearon cinco probetas por grupo, número determinado exclusivamente por el procedimiento de

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

conformidad de ISO 10477:2020 y no por un cálculo *a priori* de potencia estadística, lo que limita la capacidad para detectar diferencias de magnitud moderada; en consecuencia, los resultados no significativos no deben interpretarse como evidencia de ausencia de efecto.

En relación con la independencia experimental, las 35 probetas fueron fabricadas en una única corrida de impresión simultánea. Esta condición define con precisión el alcance de los resultados. El diseño permite comparar las siete orientaciones entre sí bajo condiciones de fabricación idénticas —lo que constituye, de hecho, una fortaleza para el contraste intracorrida, pues elimina la variabilidad entre lotes como fuente de confusión—, pero no permite estimar la variabilidad asociada a la repetición del proceso de impresión. Las cinco probetas de cada angulación constituyen réplicas técnicas y no réplicas independientes del proceso de manufactura, lo que configura una situación de pseudorreplicación en la que el número de corridas, y no el de barras, representa la unidad experimental relevante. En consecuencia, los hallazgos son válidos para la corrida evaluada y no pueden generalizarse a la variabilidad esperable entre corridas sucesivas; su confirmación exige replicar el experimento con múltiples corridas independientes por orientación.

En relación con la fabricación, se evaluó:

- Una única resina
- Una única impresora
- Un único protocolo de posprocesado
- Un único grosor de capa (50 μm)

Por lo que los resultados no son extrapolables a otros materiales, equipos o parámetros. Las estructuras de soporte fueron idénticas entre las probetas de una misma angulación, pero no fueron estandarizadas entre angulaciones distintas, de modo que el número, la posición y el diámetro de los puntos de contacto varían entre grupos; parte de las diferencias mecánicas observadas podría relacionarse con el procedimiento de soporte y de acabado, y no exclusivamente con la anisotropía

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

asociada a la orientación de las capas. El acabado superficial posterior al retiro de los soportes no fue cuantificado ni estandarizado mediante rugosimetría.

En relación con la medición, las cargas de fractura se situaron entre el 5,5 % y el 11,9 % del fondo de escala de la celda de carga de 200 N empleada, rango en el que la incertidumbre relativa del transductor tiende a ser mayor; una celda de menor capacidad habría resultado más apropiada para la magnitud de las cargas involucradas. Los registros disponibles no consignan la precisión nominal de la celda ni la fecha de la última calibración del equipo, lo que impide cuantificar la contribución instrumental a la variabilidad observada. Cada dimensión se midió una única vez en la zona central de la probeta, sin repeticiones que permitieran estimar el error del instrumento, y no se estableció *a priori* un rango de tolerancia dimensional. La temperatura del poscurado térmico se controló mediante el termostato del propio equipo, sin verificación instrumental independiente.

De manera especialmente relevante, la deflexión empleada para obtener el módulo procede del desplazamiento del actuador y no de un extensómetro montado sobre la probeta, sin corrección por la *compliance* del sistema de ensayo. Los valores de módulo informados constituyen, por tanto, una subestimación del módulo flexural verdadero del material, de magnitud no cuantificable con los datos disponibles, y son válidos para la comparación relativa entre orientaciones, pero no como determinaciones absolutas.

En relación con las condiciones de ensayo, no se realizó termociclado, envejecimiento prolongado, fatiga mecánica ni análisis fractográfico, y el almacenamiento se limitó a 24 horas en agua a 37 °C. En relación con el marco normativo, no existe a la fecha una norma internacional específica para resinas poliméricas dentales manufacturadas mediante impresión 3D, de modo que ISO 10477:2020 se aplicó como criterio de referencia adaptado; su alcance es limitado y la extrapolación desde barras estandarizadas hacia restauraciones clínicas conserva un grado importante de incertidumbre.

Perspectivas para investigaciones futuras

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

A partir de las limitaciones señaladas, la línea de trabajo más pertinente consiste en replicar este diseño incorporando varias corridas de impresión independientes por orientación, de modo que la corrida constituya la unidad experimental y pueda estimarse la variabilidad entre lotes de fabricación. Resultaría igualmente valioso ampliar la evaluación a múltiples resinas e impresoras, contrastar distintos espesores de capa, estandarizar y cuantificar las estructuras de soporte y el acabado superficial, e incorporar envejecimiento hidrolítico, termociclado y fatiga mecánica, junto con geometrías restauradoras representativas. En el plano metodológico, el paso pendiente consiste en la medición directa de la deformación mediante extensómetro axial o, alternativamente, en la determinación experimental de la *compliance* del sistema para su corrección, junto con el empleo de una celda de carga, cuya capacidad se ajuste mejor a la magnitud de las cargas esperadas, en línea con lo establecido por las normas de referencia para ensayos de flexión de materiales poliméricos.[22,23]

Se concluye que en las condiciones experimentales evaluadas, y dentro de la única corrida de impresión analizada, la angulación de 75° produjo valores de resistencia flexural significativamente más altos que la angulación de 15° (Bonferroni p = 0,006), diferencia que se mantuvo bajo un procedimiento robusto a la heterogeneidad de varianzas (Games-Howell p = 0,011). No se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre el resto de las angulaciones evaluadas.

El módulo flexural, calculado por regresión lineal sobre el tramo elástico de la curva carga-deflexión, mostró diferencias entre angulaciones mediante ANOVA de Welch (p = 0,022), localizadas igualmente entre 75° y 15° (Games-Howell p = 0,010). La coincidencia del contraste identificado en ambas propiedades refuerza la consistencia interna del hallazgo. Los valores absolutos de módulo deben interpretarse con cautela, dado que la deflexión no fue corregida por la *compliance* del sistema de ensayo.

Las orientaciones de 0°, 30°, 45°, 60° y 75° alcanzaron en la primera serie el criterio de resistencia flexural ≥ 50 MPa utilizado como referencia a partir de la norma ISO

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

10477:2020. Los grupos de 15° y 90° requirieron una segunda serie de evaluación, que no fue realizada, por lo que su resultado quedó indeterminado y no constituyó un incumplimiento definitivo del criterio.

Dado que la totalidad de las probetas procede de una única corrida de impresión, estas conclusiones describen el comportamiento comparativo de las orientaciones dentro de dicha corrida y no incorporan la variabilidad esperable entre corridas sucesivas de fabricación.

Referencias bibliográficas

1. Blatz MB, Conejo J. The current state of chairside digital dentistry and materials. Dent Clin North Am. 2019 [acceso 03/03/2026];63(2):175-97. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.cden.2018.11.002

2. Andjela L, Abdurahmanovich VM, Vladimirovna SN, Mikhailovna GI, Yurievich DD, Alekseevna MY. A review on Vat Photopolymerization 3D-printing processes for dental application. Dent Mater. 2022;38(11):e284-96. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.09.005

3. Tian Y, Chen C, Xu X, Wang J, Hou X, Li K, *et al*. A review of 3D printing in dentistry: technologies, affecting factors, and applications. Scanning. 2021;2021:9950131. DOI: https://doi.org/10.1155/2021/9950131

4. Piedra-Cascón W, Krishnamurthy VR, Att W, Revilla-León M. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: a narrative review. J Dent. 2021;109:103630. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103630

5. Saini RS, Gurumurthy V, Quadri SA, Bavabeedu SS, Abdelaziz KM, Okshah A, *et al*. The flexural strength of 3D-printed provisional restorations fabricated with different resins: a systematic review and meta-analysis. BMC Oral Health. 2024;24(1):66. DOI: https://doi.org/10.1186/s12903-023-03826-x

6. Wechkunanukul N, Klomjit K, Kumtun T, Jaikumpun P, Kengtanyakich S, Katheng A. Comparison of mechanical and surface properties between conventional and

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

CAD/CAM provisional restorations. Eur J Dent. 2025;19(3):697-703. DOI: https://doi.org/10.1055/s-0044-1791965

7. Curiqueo A, Salamanca C, Borie E, Navarro P, Fuentes R. Evaluación de la fuerza masticatoria máxima funcional en adultos jóvenes chilenos. Int J Odontostomatol. 2015;9(3):443-7. DOI: https://doi.org/10.4067/S0718-381X2015000300014

8. Sivaraman K, Chopra A, Venkatesh SB. Clinical importance of median mandibular flexure in oral rehabilitation: a review. J Oral Rehabil. 2016;43(3):215-25. DOI: https://doi.org/10.1111/joor.12361

9. Gad MM, Fouda SM. Factors affecting flexural strength of 3D-printed resins: a systematic review. J Prosthodont. 2023;32(S1):96-110. DOI: https://doi.org/10.1111/jopr.13640

10. Derban P, Negrea R, Rominu M, Marsavina L. Influence of the printing angle and load direction on flexure strength in 3D printed materials for provisional dental restorations. Materials (Basel). 2021;14(12):3376. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14123376

11. Casucci A, Verniani G, Sami Haichal W, Manfredini D, Ferrari M, Ferrari Cagidiaco E. Influence of printing angulation on the flexural strength of 3D printed resins: an *in vitro* study. Appl Sci. 2024;14(21):10067. DOI: https://doi.org/10.3390/app142110067

12. Unkovskiy A, Bui PH, Schille C, Geis-Gerstorfer J, Huettig F, Spintzyk S. Objects build orientation, positioning, and curing influence dimensional accuracy and flexural properties of stereolithographically printed resin. Dent Mater. 2018;34(12):e324-33. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.09.011

13. Mudhaffer S, Haider J, Satterthwaite J, Silikas N. Effects of print orientation and artificial aging on the flexural strength and flexural modulus of 3D printed restorative resin materials. J Prosthet Dent. 2025;133(5):1345-57. DOI: https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.08.008

14. Sfondrini MF, Gariboldi F, Cerri M, Todaro C, Pascadopoli M, Casiraghi G, *et al*. Influence of printing orientation on the flexural strength of different light-cured

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

resins manufactured with two 3D printers: in vitro study. Materials (Basel). 2025;18(13):3029. DOI: https://doi.org/10.3390/ma18133029

15. International Organization for Standardization. ISO 10477:2020. Dentistry — Polymer-based crown and veneer materials. Ginebra: ISO; 2020 [acceso 20/07/2023]. Disponible en: https://www.iso.org/standard/82472.html

16. Luvantix ADM / 3DMaterials. LuDent C&B TRY IN — Biocompatible resin. Daejeon: Luvantix ADM; 2023 [acceso 20/07/2023]. Disponible en: https://ludent.com/biocompatible-resin/

17. 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 (Basel). 2020;12(11):2762. DOI: https://doi.org/10.3390/polym12112762

18. International Organization for Standardization. ISO 3696:1987. Water for analytical laboratory use — Specification and test methods. Ginebra: ISO; 1987 [acceso 20/07/2023]. Disponible en: https://www.iso.org/standard/9169.html

19. Väyrynen VO, Tanner J, Vallittu PK. The anisotropicity of the flexural properties of an occlusal device material processed by stereolithography. J Prosthet Dent. 2016;116(5):811-7. DOI: https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2016.03.018

20. de Castro EF, Nima G, Rueggeberg FA, Giannini M. Effect of build orientation in accuracy, flexural modulus, flexural strength, and microhardness of 3D-printed resins for provisional restorations. J Mech Behav Biomed Mater. 2022;136:105479. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105479

21. Keßler A, Hickel R, Ilie N. *In vitro* investigation of the influence of printing direction on the flexural strength, flexural modulus and fractographic analysis of 3D-printed temporary materials. Dent Mater J. 2021;40(3):641-9. DOI: https://doi.org/10.4012/dmj.2020-147

22. International Organization for Standardization. ISO 178:2019. Plastics — Determination of flexural properties. Ginebra: ISO; 2019 [acceso 20/07/2023]. Disponible en: https://www.iso.org/standard/70513.html

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

23. ASTM International. ASTM D790-17. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. West Conshohocken: ASTM International; 2017 [acceso 20/07/2023]. Disponible en: https://store.astm.org/d0790-17.html

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Conceptualización: Elizabeth Astorga-Bustamante y Nicolás Améstica-Fuenzalida.

Metodología: Elizabeth Astorga-Bustamante, Nicolás Améstica-Fuenzalida y Mauricio Toro-González.

Investigación: Francisco Reyes-Molina y Mauricio Toro-González.

Análisis formal: Nicolás Améstica-Fuenzalida y Alain Manuel Chaple-Gil.

Curación de datos: Francisco Reyes-Molina.

Supervisión: Nicolás Améstica-Fuenzalida y Elizabeth Astorga-Bustamante.

Redacción del borrador original: Francisco Reyes-Molina y Elizabeth Astorga-Bustamante. *Redacción, revisión y edición:* Elizabeth Astorga-Bustamante, Mauricio Toro-González, Alain Manuel Chaple-Gil y Nicolás Améstica-Fuenzalida.

Declaraciones

Declaración de financiamiento

Este estudio se adscribe al Proyecto PRI-ODO DIFO 2023/02 de la Facultad de Odontología de la Universidad de Chile. El proyecto no recibió fondos externos de ninguna institución, empresa privada o persona. Los materiales e insumos empleados en la investigación fueron costeados íntegramente por los propios investigadores. La Universidad de Chile proporcionó, sin costo, la infraestructura y el equipamiento del Laboratorio de Biomateriales de la Facultad de Odontología, lo que constituye un aporte institucional de carácter no monetario.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Disponibilidad de los datos

Los 35 valores individuales de resistencia flexural y módulo flexural que sustentan los resultados de este estudio se presentan íntegramente en la tabla 2 y se encuentran además depositados en acceso abierto en Zenodo, bajo el DOI https://doi.org/10.5281/zenodo.22710580, junto con los 35 archivos de registro carga-desplazamiento originales en formato CSV, de modo que el procedimiento de cálculo del módulo resulta íntegramente reproducible por terceros.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES