



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD  
LEÓN**

**TEMA:**

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL  
IMPACTO EN LENTES OFTÁLMICAS  
DISEÑADAS MEDIANTE TECNOLOGÍA DE  
IMPRESIÓN 3D CON Y SIN TRATAMIENTO DE  
FOTOCURADO**

**MODALIDAD DE TITULACIÓN:**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIATURA EN OPTOMETRÍA**

**P R E S E N T A:**

**KAREN GUADALUPE HERNÁNDEZ GONZÁLEZ**



**TUTOR:  
DR. DANIEL MALACARA  
DOBLADO**

**ASESOR:  
M EN C. AMABILE ALICIA VELO  
SILVESTRE**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## **Dedicada:**

Quiero dedicar el presente trabajo a mi madre y a mi hermana mayor, quienes siempre me han brindado un constante apoyo para seguir adelante. Especialmente en los momentos más difíciles, cuando el miedo amenazaba con paralizarme, su ayuda me permitió convertir esos obstáculos en herramientas para construir cada parte de lo que he logrado hasta ahora.

## **Agradecimientos:**

Al consejo de optometría México, por la beca otorgada como apoyo al proyecto de investigación.

Al Centro de Investigaciones en Óptica por permitirme el uso de sus laboratorios, así como las asesorías constantes por parte del personal científico.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de experimentar en el laboratorio LAISOS de la ENES LEON

# 1 INDICE

<b>1</b>	<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
2.1	LENTEs .....	3
2.1.1	TIPOS DE LENTES.....	3
2.1.2	LENTEs OFTÁLMICAs.....	7
2.1.3	POTENCIA ÓPTICA .....	8
2.2	TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN 3D .....	10
2.2.1	TIPOS DE IMPRESIÓN 3D .....	10
2.2.2	IMPRESIÓN EN FORMLABS 2 .....	13
2.2.3	RESINA FOTOCURABLE .....	13
2.2.4	PROCESO DE FOTOCURADO.....	14
2.3	RESISTENCIA AL IMPACTO .....	14
2.3.1	DEFINICIÓN DE RESISTENCIA AL IMPACTO .....	14
2.3.2	NORMATIVA .....	15
2.4	FACTORES QUE INFLUYEN A LA RESISTENCIA AL IMPACTO.....	20
2.4.1	MATERIAL DE LALENTE .....	20
2.4.2	ESPEsOR CENTRAL.....	23
2.4.3	APLICACIONES DE TRATAMIENTOS ADICIONALES .....	24
<b>3</b>	<b>JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>26</b>
4.1	GENERAL.....	26
4.2	ESPECÍFICOS.....	26
<b>5</b>	<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>MARCO TEORÍCO.....</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>30</b>
7.1	TIPO DE ESTUDIO .....	30
7.2	GRUPOS .....	30
7.3	VARIABLES Y ESCALA DE MEDICIÓN .....	30
7.4	EXPERIMENTACIÓN .....	32
7.4.1	MÉTODo .....	32
<b>8</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>34</b>

9	DISCUSIÓN.....	36
10	CONCLUSIONES.....	44
11	BIBLIOGRAFÍA.....	45
12	ANEXOS.....	47

# 1 RESUMEN

En el 2021 se realizó un proyecto de investigación en la ENES LEON donde se buscó emplear la tecnología de impresión 3D por esteolitografía para fabricar lentes oftálmicas. Para ello se diseñaron 10 lentes esféricas con potencias de -5.00 a +5.00 dioptrías utilizando *Clear Resin*, una resina fotocurable y traslucida que de acuerdo a los resultados obtenidos en la experimentación, permite tener un índice de refracción (1.4915), coeficiente de transmisión (89%) y reflexión (11%) adecuados para su uso oftálmico. Sin embargo, fue imprescindible estudiar su resistencia al impacto para ser un material seguro.

El tema objetivo principal de esta investigación es la evaluación de la seguridad y resistencia de lentes oftálmicas esféricas diseñadas mediante tecnología de impresión 3D con resina fotocurable (*Clear resin*) en la prueba de Drop Ball Test, ya que esta prueba permite evidenciar que tan óptimo es implementar esta técnica de fabricación y material en lentes oftálmicas que permitan corregir las ametropías de los pacientes.

El proyecto se llevó a cabo en la misma ENES LEON, donde se experimentó con dos grupos de 10 lentes cada uno con potencias desde -5.00 a +5.00 dioptrías, siendo sometido solamente uno de los grupos a un tratamiento de poscurado que permite crear más enlaces entre los polímeros del material. Ambos grupos son comparados para conocer cuál es más seguro y tiene mejor respuesta en Drop Ball Test. Se compara también la relación en la resistencia de los dos grupos de lentes con el grosor de cada poder dióptrico.

Se obtuvo como resultado que las resinas sometidas al tratamiento de poscurado son menos resistentes al impacto a comparación de las que no tuvieron el tratamiento, influyendo en un decremento del 79.69% de su resistencia al impacto. Solamente pasaron la prueba las lentes positivas a partir de 2 dioptrías en lentes sin fotocurar y a partir de 3 dioptrías en las lentes positivas con fotocurado.

En el análisis de resultados solo las lentes oftálmicas con un grosor de 2 mm tuvieron una resistencia estadísticamente significativa al impacto a comparación de grosores mayores como los grupos de 3mm, 5mm, 8mm, 11 mm y 15 mm. Por lo tanto, un mayor grosor no asegura mayor seguridad.

Como conclusión se descartó emplear las lentes esféricas fabricadas con *clear resin* para su uso como lentes oftálmicas seguras ya que aun siendo sometidas a un tratamiento de poscurado en las pruebas de Drop Ball test el resultado no fue favorable.



## 2 INTRODUCCIÓN

La impresión en tercera dimensión es una técnica que permite materializar objetos a partir de diseños digitales utilizando impresoras computarizadas. Gracias a este mecanismo, se obtienen varias ventajas, que van desde mejorar los procesos de diseño al obtener piezas personalizadas que no serían posibles de fabricar con tecnologías tradicionales, hasta reducir los costos de producción mediante la disminución en la cantidad de recursos empleados (Bordignon, et al.,2018).

Debido a lo anterior, el desarrollo de la tecnología de impresión 3D ha despertado un gran interés en diversos sectores, como el de la salud y la medicina. Se ha implementado como una herramienta que permite ampliar la complejidad de los diseños con mayor libertad. Gracias a esta cualidad, se llevan a cabo muchas aplicaciones para mejorar procesos existentes e incluso para usos más experimentales, donde resulta fundamental la elaboración de prototipos para poner a prueba su utilidad práctica (Baudet, et al., 2019).

Recientemente, en la ENES León se ha logrado implementar esta tecnología, ya que dentro de la institución se cuenta con la impresora *Formlabs2*, la cual emplea la técnica de impresión 3D por estereolitografía, lo que ha permitido experimentar con el diseño de lentes oftálmicas para brindar apoyo en la corrección de ametropías. Sin embargo, se planteó la necesidad de determinar si el prototipo obtenido con resina translúcida "*clear resin*" podría considerarse una lente oftálmica segura para su uso en los pacientes, a pesar de poder obtener una calidad óptica adecuada (Tavarez Romero & Hernández González, 2021).

Surge así la idea de realizar el presente trabajo de investigación utilizando las mismas lentes del proyecto mencionado. El objetivo es evaluar la seguridad y resistencia al impacto de dichas lentes, con el fin de implementar su uso como prótesis para corregir errores refractivos del ojo humano, como la miopía y la hipermetropía.

Además, se pretende incorporar un proceso experimental en el cual las lentes sean sometidas a un tratamiento de fotocurado adicional al proceso de impresión. Este proceso, recomendado por el fabricante de la impresora, permite mejorar las propiedades funcionales del material existente al crear más enlaces entre los polímeros (Formlabs, 2022) .

A continuación, se presentan conceptos básicos para facilitar la comprensión de los factores y las variables relacionados con esta investigación:

## 2.1 LENTES

“Una lente es una placa de vidrio o de cualquier material refractor cuyas caras son por lo general esféricas y casi paralelas al centro de ella” (Malacara, 2015, p. 56).

Además, “las lentes son un dispositivo refractor (una discontinuidad de la luz en un medio dominante) que reconfigura la distribución de la luz emitida” (Hecht, 2016, p. 152).

### 2.1.1 TIPOS DE LENTES

#### 2.1.1.1 Lentes convergentes o positivas

“Son lentes de forma convexa (del latín *convexus*, arqueado), donde el centro es más grueso, tiende a disminuir el radio de curvatura de los frentes de onda, es decir, los haces de luz incidente convergen, se curvan un poco más hacia el eje central, por lo tanto, se le denominan lentes positivas” (Hecht, 2016, p. 155).

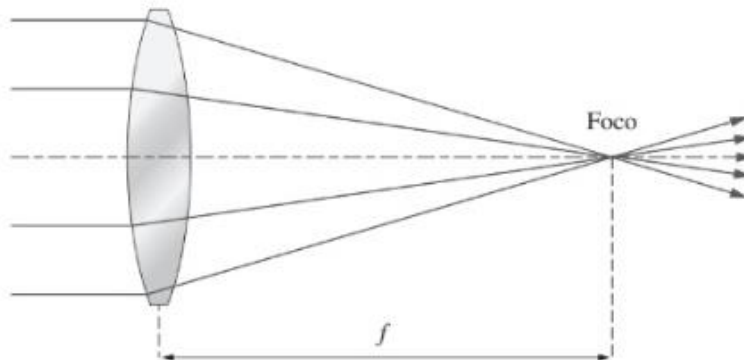


Figura 1 Lente convergente (Malacara, 2015)

#### 2.1.1.2 Lentes divergentes o negativas

“Son lentes de forma cóncava (del latín *concavus*, hueco), donde el centro es más delgado, tiende a hacer avanzar esa parte del frente de onda, es decir, que los rayos que entran como haz paralelo al eje diverjan” (Hecht, 2016, p.155).

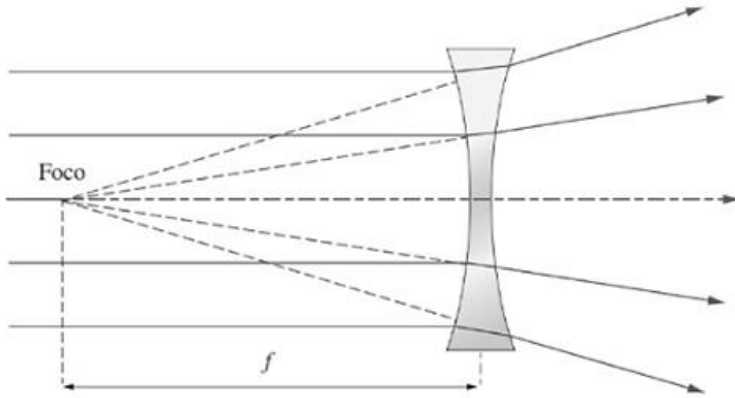


Figura 2 Lente divergente (Malacara, 2015)

### 2.1.1.3 Lentes esféricas

Las superficies curvas de las lentes pueden tener cualquier forma regular, por ejemplo, esférica. Puesto que las superficies esféricas son más fáciles de fabricarse, la mayoría de las lentes se construyen con dos superficies esféricas. Por lo tanto, el eje de las lentes es la línea que une el centro de las dos esferas. (Chaires, et al., 2015, p.34)

El estudio de las superficies esféricas resulta sencillo debido a que muestran equivalencias en todos sus meridianos implicando que tanto sus propiedades geométricas como ópticas son constantes en todas las secciones de la superficie.

Estas superficies esféricas se generan por la rotación de un arco de circunferencia alrededor de un eje de revolución que pasa por el centro de la curvatura, la intersección con la superficie de cualquier plano es una sección circular (Salvado Arques & Fresnoy Bel, 2001, p. 55)

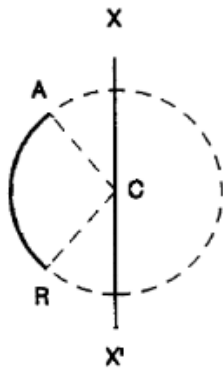


Figura 3 Generación de una superficie esférica mediante la sección que hay entre el punto A y R. (Salvado Arques & Fresnoy Bel, 2001)

Las lentes esféricas están constituidas por dos superficies esféricas o una superficie plana y otra esférica. De la combinación de estas dos superficies se obtienen los distintos tipos o formas de lentes para una misma potencia, las formas posibles son infinitas. (Salvado Arques & Fresnoy Bel, 2001, p. 55)

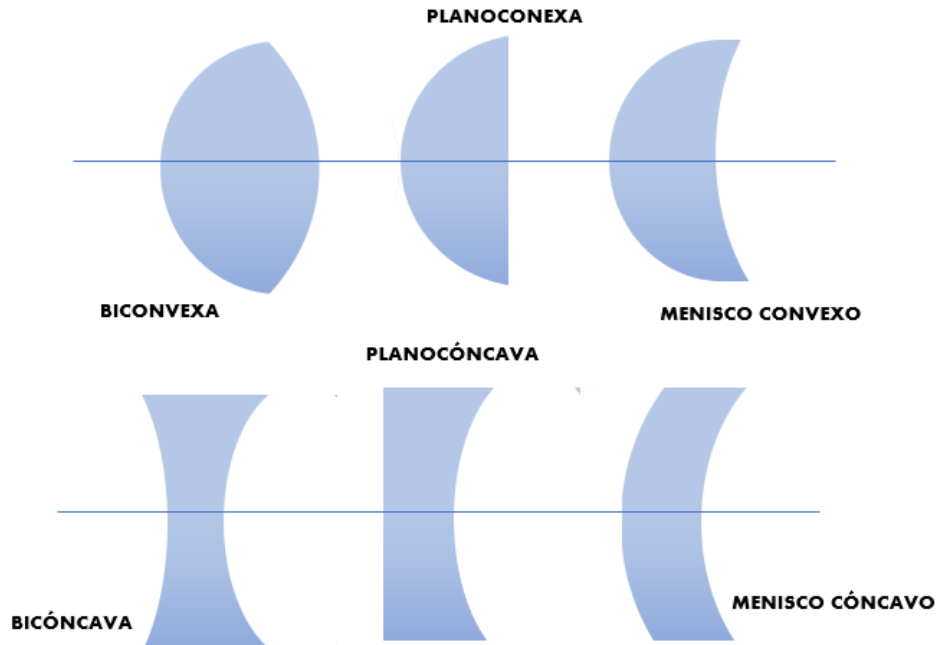


Figura 4 Tipos de lentes esféricas, Parte superior lentes convergentes y parte inferior lentes divergentes. (Imagen propia)

#### 2.1.1.4 Lentes esféricas

Las superficies esféricas conicoides o de esféricidad continua se generan por revolución de las curvas esféricas más simples, las cónicas.

Este tipo de curvas se obtiene al seleccionar un cono por distintos planos; si la sección se realiza de forma perpendicular al eje del cono la curva resultante es un círculo, si esta sección es paralela obtenemos una parábola y si el corte se realiza con una inclinación determinada se obtienen los dos tipos de elipses y las hipérbolas. (Salvado Arques & Fresnoy Bel, 2001, p. 75)

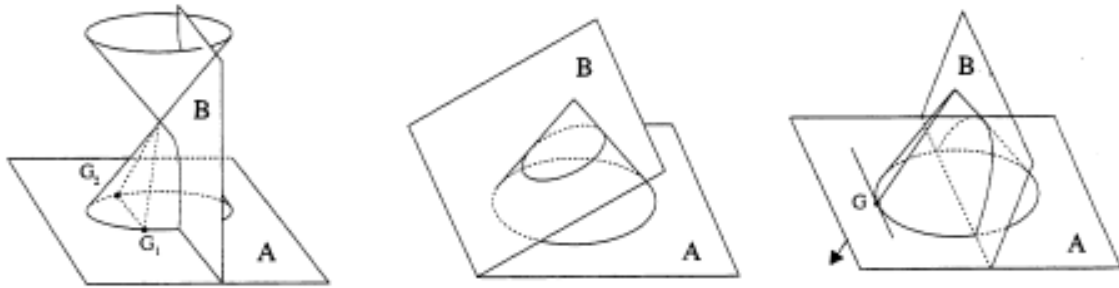


Figura 5 Demostración de la obtención de lentes esféricas a partir de elipses e hipérbolas (Salvado Arques & Fresnoy Bel, 2001)

### 2.1.1.5 Lentes cilíndricas

Al seccionar un cilindro mediante un plano paralelo a su eje de revolución se obtiene una lente cilíndrica formada por dos superficies, una de las cuales es plana y la otra cilíndrica. Estas lentes, que reciben también la denominación de planocilíndricas, se utilizan para la compensación de astigmatismos cuando uno de dos meridianos principales del ojo es emétrope.

Se denomina meridiano de una lente cilíndrica a la sección que resulta de la intersección de un plano cualquiera que pasa por el centro geométrico de la superficie cilíndrica. (Salvado Arques & Fresnoy Bel, 2001, p. 88)

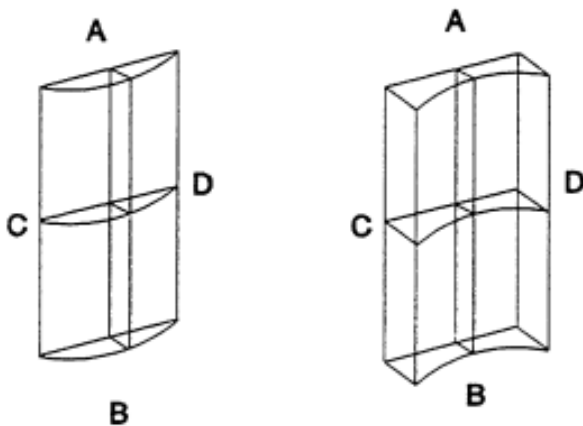


Figura 6 Lente cilíndrica positiva y negativa (Salvado Arques & Fresnoy Bel, 2001)

## 2.1.2 LENTES OFTÁLMICAS

### 2.1.2.1 Lentes monofocales

Son aquellas que tienen una graduación única en su superficie, lentes de visión única que permiten obtener un enfoque claro a la distancia que precisa el paciente, proporcionando un campo visual más amplio y claro que cualquier otro método de compensación. Aportan una graduación determinada para la distancia requerida. (Molina Bello & Bravo Sarró, 2020, p. 16)

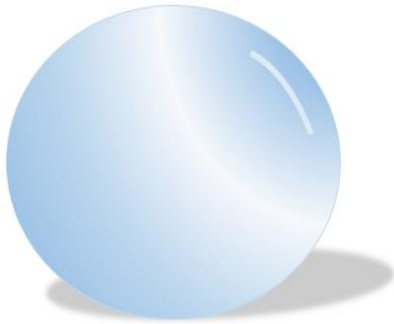


Figura 7 Esquema de un diseño monofocal (Imagen propia)

### 2.1.2.2 Lentes bifocales

Son lentes correctivas que contienen dos potencias ópticas diferentes, por lo general son utilizadas para personas con presbicia y alguna ametropía en conjunto. Llevan una ventana con una graduación para cerca y el resto de la lente es para lejos. El tamaño de la ventana suele ser de 28mm, pero las hay de 40mm para casos de zonas visuales cercanas más amplias. (Molina Bello & Bravo Sarró, 2020, p. 17)

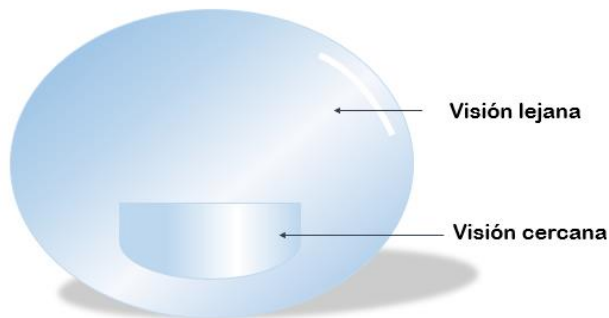


Figura 8 Esquema de un diseño bifocal (Imagen propia)

### 2.1.2.3 Lentes progresivas

Una lente progresiva tiene en el área superior la visión lejana y el área inferior para la visión cercana, y están unidas por un pasillo por el que va incrementando gradualmente la potencia positiva. Esta es la zona intermedia. (Molina Bello & Bravo Sarró, 2020, p. 17)

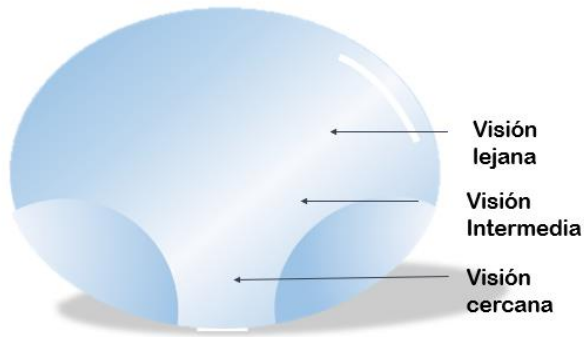


Figura 9 Esquema de un diseño progresivo (Imagen propia)

### 2.1.3 POTENCIA ÓPTICA

La potencia  $P$  de una lente se define como el recíproco o inversa de la distancia focal  $f$  de un lente, es decir, la distancia donde la imagen es enfocada:

$$P = \frac{1}{f'}$$

La potencia de una lente o sistema óptico se mide en dioptrías y es el inverso de la distancia focal, la cual debe estar expresada en metros. (Malacara, 2015, p. 56)

### 2.1.3.1 Distancia focal

El foco de una lente se define como el punto de convergencia de los rayos luminosos cuando éstos llegan a la lente en un haz de rayos paralelos entre sí y al eje de la lente. En una lente divergente el foco es el punto de convergencia de las prolongaciones de los rayos refractados. La distancia focal de una lente delgada es la distancia de la lente al foco, siendo positiva para una lente convergente y negativa para una lente divergente. (Malacara, 2015, p. 55)

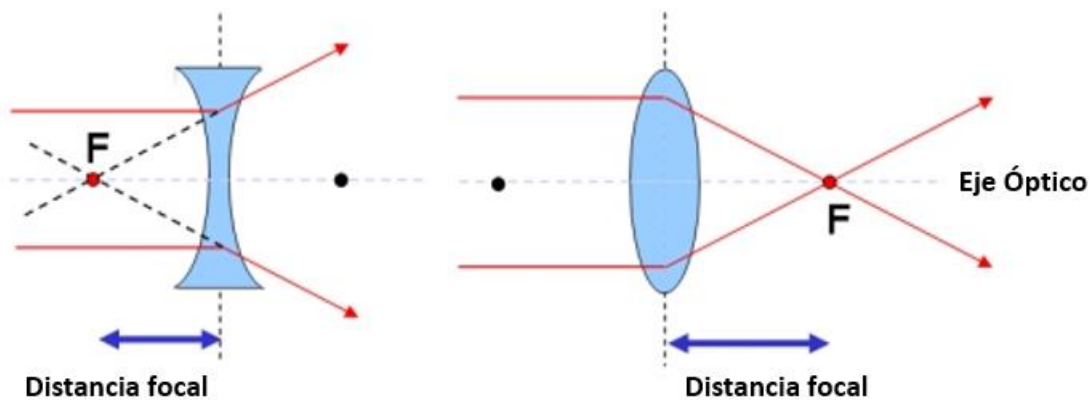


Figura 10 La distancia entre el foco "F" y la lente es la distancia focal, del lado izquierdo muestra la distancia focal de una lente negativa y del lado derecho de una lente positiva. (Swinburne University of Technology, 2022)

### 2.1.3.2 Curvatura

La curvatura (R) de una superficie es la inversa de su radio de curvatura. Si r viene expresado en metros, R se puede expresar en dioptrías o en  $m^{-1}$ , empleándose generalmente esta última y reservando la dioptría para referirnos a la potencia de la superficie. Así, una superficie de radio 1 m presenta una curvatura de  $1 m^{-1}$ , para  $r = 0.5m$  la curvatura (R) será  $2m^{-1}$ , y así sucesivamente. (Salvado Arques & Fresnoy Bel, 2001, p. 56)

$$R = \frac{1}{r}$$



## 2.2 TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN 3D

### 2.2.1 TIPOS DE IMPRESIÓN 3D

#### 2.2.1.1 Extrusión de material

La impresión 3D por extrusión de material (FDM) utiliza un polímero en forma de filamento que se expulsa a través de una boquilla cuando se aplica presión constante. La zona de la boquilla está calefactada, lo que permite fundir el material y depositarlo sobre la plataforma de construcción a una velocidad constante. Una vez depositado, el polímero se solidificará por completo y se realizará la disposición de la segunda capa.

Uno de los aspectos base de esta tecnología es la unión de las capas depositadas con el material anterior para que forme una estructura sólida y permanezca en esa estructura durante todo el proceso. Esto requiere de la optimización de los parámetros de impresión tales como la temperatura, la velocidad de extrusión o la velocidad de impresión. (León, et al.,2019, p. 3)

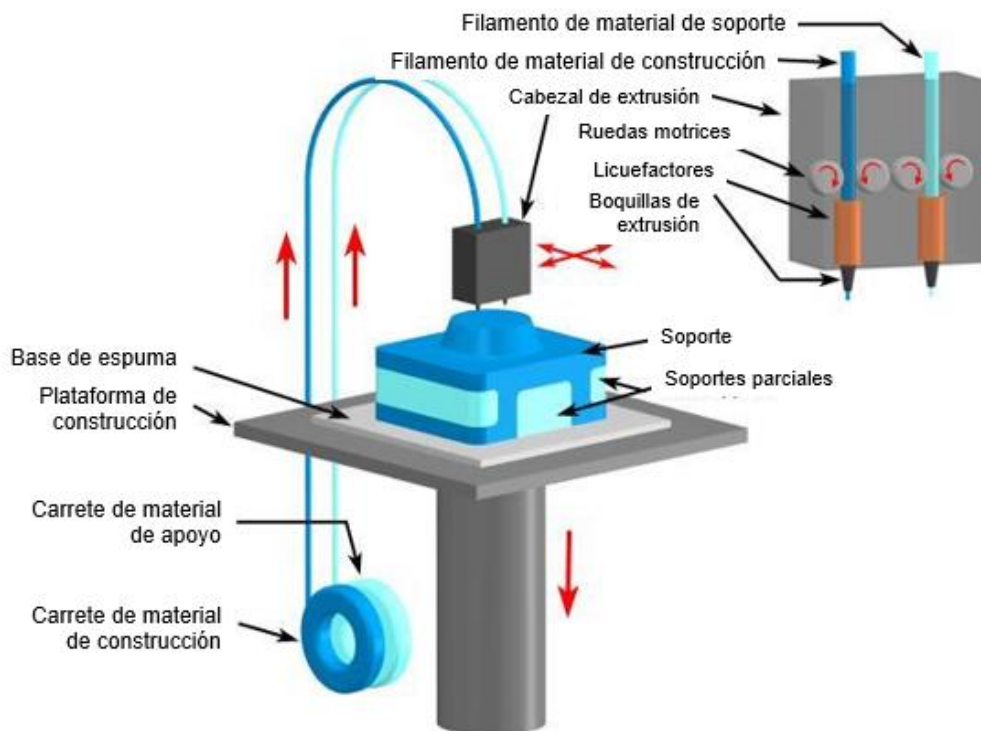


Figura 11 Impresión 3D por extrusión (GeneratePress, 2022)

### 2.2.1.2 Sintetizado o fusión selectiva de polímero en polvo

El sinterizado o fusión de polímero en polvo (SLS) es uno de los procesos de fabricación aditiva en los que se utiliza una fuente térmica como el láser para inducir la fusión parcial o total de las partículas en polvo, utilizando un rodillo para depositar el polvo en cada capa.

En este procedimiento existen dos mecanismos de unión entre las partículas. El sinterizado se aplica generalmente a un proceso de fusión parcial, mientras que la fusión se considera que es un proceso de fusión total. En la sinterización en estado sólido, las partículas se fusionan solo parcialmente y se conectan, por lo tanto, solo en la superficie. Como resultado, se obtiene una porosidad inherente de la pieza mientras que, en la fusión en estado líquido, todas las partículas se funden y fusionan completamente de manera que la pieza final es totalmente densa con una porosidad casi nula. (León, et al., 2019, p. 3)

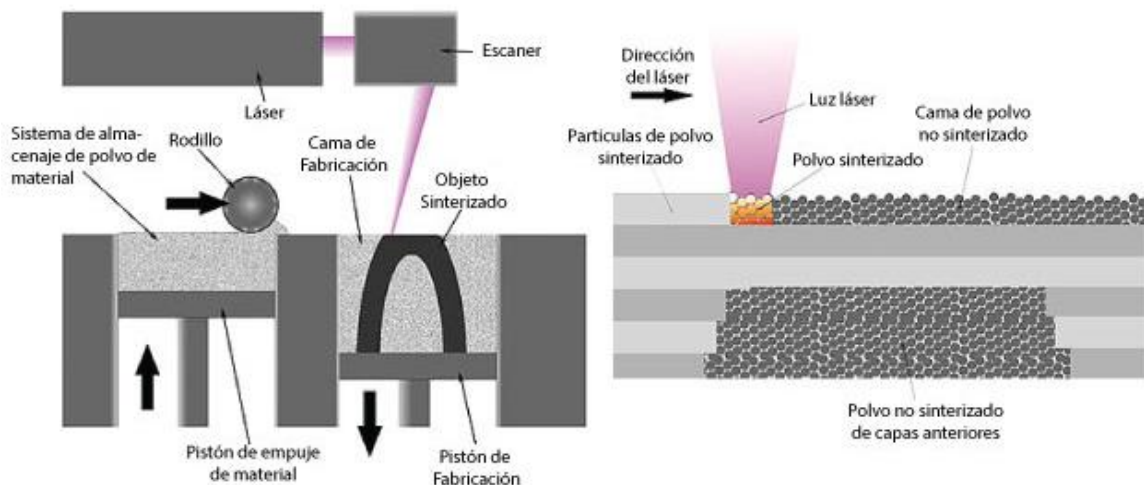


Figura 12 Impresión 3D por sinterizado láser. (Innovation & Entrepreneurship Business School, 2016)

### 2.2.1.3 Fotopolimerización

La fotopolimerización es un término general que incluye la estereolitografía y su proceso relacionado. La estereolitografía se refiere específicamente a la fotopolimerización en la que las resinas fotocurables se exponen al láser y se someten a una reacción química para volverse sólidas.

Junto con la estereolitografía (SLA), se ha desarrollado la tecnología de procesado digital de luz (DLP - Digital Light Processing) que usa un proyector para enviar la imagen de la capa del objeto que solidificará la resina. Así, mientras que la estereolitografía utiliza un rayo láser que recorre toda la capa endureciendo punto por punto, el procesado digital de luz proyecta una máscara que es toda la parte sólida del objeto en esa capa, y el resto en negro. Donde hay luz se endurece, donde no se queda igual. A partir de ahí la pieza se mueve para dar lugar a que pase resina líquida nueva y aplicar el mismo proceso con la siguiente capa.

En ambos casos, la reacción química se llama fotopolimerización, que involucra muchos compuestos químicos como fotoiniciadores, aditivos y monómeros / oligómeros reactivos. La mayoría de los fotopolímeros utilizados en los sistemas comerciales son curables en el rango UV y la fotopolimerización es un proceso fotoquímico de unión de pequeños monómeros en polímeros similares a las cadenas.

Normalmente se requiere un catalizador para que la reacción tenga lugar a un ritmo razonable. Los polímeros deben estar suficientemente reticulados para que las moléculas polimerizadas no se vuelvan a disolver en los monómeros líquidos. (León, et al., 2019, p. 3)

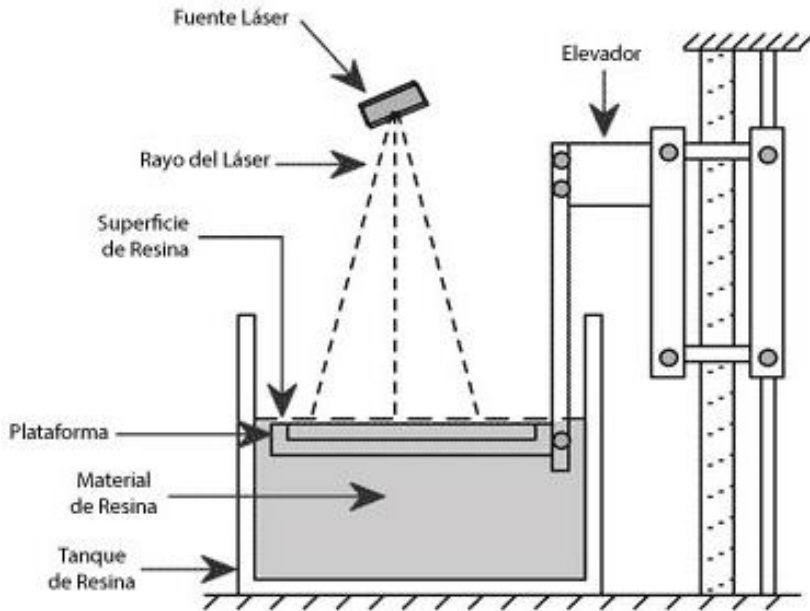


Figura 13 Impresión 3D por fotopolimerización. (Innovation & Entrepreneurship Business School, 2016)

## 2.2.2 IMPRESIÓN EN FORMLABS 2

“La Formlabs 2 es una herramienta comercial mediante estereolitografía de precisión prevista para su uso en la fabricación aditiva a partir de resina fotopolimerizable de diseños proporcionados por el usuario final” (Formlabs, 2018, p. 10)

## 2.2.3 RESINA FOTOCURABLE

Ficha técnica del fabricante de la resina fotocurable Clear Resin V4.

DATOS DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL			
	No poscurada	Poscurada	Método
Propiedades de tracción			
<b>Resistencia a la rotura por tracción</b>	38 MPa	65 MPa	ASTM D 638-14
<b>Módulo de tracción</b>	1,6 GPa	2,8 GPa	ASTM D 638-14
<b>Alargamiento de rotura</b>	12%	6%	ASTM D 638-14
Propiedades de flexión			
<b>Módulo de flexión</b>	1.3 GPa	2.2 GPa	ASTM D 790-15

Propiedades de impacto			
<b>Resiliencia IZOD entallada</b>	16 J/m	25 J/m	ASTM D 256-10
Propiedades térmicas			
<b>Temperatura de flexión bajo carga a 1,8 MPa</b>	43 °C	58 °C	ASTM D 648-16
<b>Temperatura de flexión bajo carga a 0,45 MPa</b>	50 °C	73 °C	ASTM D 648-16

Tabla 1 Características físicas de la Clear Resin (Formlabs, 2018)

## 2.2.4 PROCESO DE FOTOCURADO

La resina en su estado sin poscurar tiene algunas conexiones poliméricas que aún no han reaccionado del todo. Poscurar las piezas con luz y calor adicional refuerza la estructura de polímero y aumenta la fortaleza, la rigidez y la resistencia a la temperatura.

El aumento del número de enlaces hace que el material esté más unido. Por lo tanto, el poscurado también provoca una cierta contracción, y los ajustes de impresión de cada material están diseñados para tener en cuenta esa contracción prevista durante la impresión y el poscurado. (Formlabs, 2022, párr. 3-4)

En la página oficial Formlabs (2022) menciona que la resina “ClearV4” se comporta de forma diferente a las resinas opacas estándar de Formlabs, además de tener propiedades mecánicas ligeramente diferentes. Aunque el tiempo de poscurado recomendado es de 15 minutos a una temperatura de 60°C un poscurado de 30 minutos dará a lugar un pequeño aumento adicional del módulo de tracción. (párr.7)

## 2.3 RESISTENCIA AL IMPACTO

### 2.3.1 DEFINICIÓN DE RESISTENCIA AL IMPACTO

La resistencia al impacto es una propiedad mecánica definida como la habilidad que posee un material para resistir a la rotura y/o penetración

provocada por objetos que golpean de manera instantánea con velocidad o comprimen al mismo. Se evalúa a partir de la energía o trabajo de ruptura y es una medida de la tenacidad.

La resistencia al impacto está relacionada con la velocidad de la carga aplicada y la capacidad de deformación del material (plasticidad); dicha capacidad de deformación depende de la movilidad molecular y, por lo tanto, de la composición química, estructura, peso molecular y la presencia de aditivos. De modo que los materiales muy rígidos, incapaces de flexionarse en el punto de impacto para amortiguarlo, son frágiles y quebradizos, mientras que en los blandos pasa lo contrario. (Cavalcante Neves & Gong Chen, 2019, pp. 4-5)

### 2.3.2 NORMATIVA

La STPS (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, la SSA (Secretaría de Salud) y la SCFI (Secretaría de Economía) son dependencias competentes que emiten las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), que son regulaciones técnicas de cumplimiento obligatorio.

Existe además la (FDA) Administración de Alimentos y Medicamentos, por sus siglas en inglés, una agencia responsable de proteger la salud pública de Estados Unidos asegurando que los productos destinados al uso humano sean seguros y eficaces.

Se toma como referencia la NMX-S-001-1967 y FDA 801.410 para la aplicación de Drop Ball Test.

#### 2.3.2.1 *NORMA MEXICANA NMX-S-001-1967 CALIDAD PARA GAFAS DE COPA*

Se entiende por "Gafa de Copa", al protector, con asientos de copa que se ajusta frente a los ojos por medio de una banda elástica para protegerlos contra los riesgos que especifica esta norma.

Fundamentalmente están compuestos de las siguientes partes:

- **Copas:** Son los cuerpos del protector que asientan en la cara del usuario y tiene forma de copa.
- **Aros:** Son las partes del protector que fijan los lentes en el cuerpo de las gafas.
- **Puente:** Es la pieza que une las dos copas y es ajustable.
- **Banda:** Es la cinta ajustable, ó elástica con que se sostienen las gafas en

posición correcta.

- **Lentes:** Son las piezas transparentes, endurecidas, de cristal o resina sintética, que cumplen con la norma correspondiente. (Secretaría de Industria y comercio, 1969, pp. 2-3)

## Clasificación

- **Tipo I Gafas contra Impacto:** Son las gafas que protegen contra el riesgo mencionado.
- **Tipo II Gafas contra polvos, salpicaduras y radiaciones:** Son las gafas que además de proteger contra impacto, evitan que cualquiera de los riesgos mencionados dañe los ojos.
- **Tipo III Gafas cubreanteojos:** Son las que se colocan sobre los anteojos de corrección visual y que protegen contra cualquiera de los riesgos mencionados. (Secretaría de Industria y comercio, 1969, p. 3)

## Prueba de impacto

Se toma una copa de un lote de muestra elegido y se coloca una pieza de acero con las mismas dimensiones del lente en el lugar que ocuparía éste. En las condiciones mencionadas se coloca la copa sobre una base rígida en la que descansen perfectamente sus bordes de asiento. Colocado el conjunto sobre esta base y con la pieza de acero en posición horizontal, se le deja caer sobre el centro del lente, un balín de 44.5 milímetros de diámetro con un peso aproximado de 135 gr. desde una altura de 1.27 m. La muestra no debe registrar daño visible. (Secretaría de Industria y comercio, 1969, p. 6)

### 2.3.2.2 *NMX-S-056-SCFI-2007 SEGURIDAD-EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL-PROTECTORES FACIALES CONTRA IMPACTOS*

- **Protector facial:** Conjunto que forma el cabezal y la pantalla facial, generalmente son usados con protectores primarios (anteojos o gafas).
- **Cabezal:** Dispositivo ajustable que se asienta sobre la cabeza del usuario y sirve para sostener la pantalla frente a la cara.
- **Pantalla facial:** Protección conformada por una lámina de material transparente, de color, o una malla; puede ser también una combinación de éstas. (Secretaría de Economía, 2007, p.2)

## Requisitos ópticos.

Las pantallas faciales conformadas por lámina transparente o de color deben estar libres de estrías, burbujas, ondulaciones y otros defectos e imperfecciones visibles que afecten su calidad óptica. (Secretaría de Economía, 2007, p.5)

<b>Característica</b>	<b>Requisitos</b>
Potencia prismática	$\leq 0,25\Delta$
Potencia astigmática	$\leq 0,25D$
Transmitancia	$\geq 74.3\%$
Difusión	$< 3\%$

Tabla 2 Requisitos Ópticos de una pantalla facial (Secretaría de Economía, 2007)

### **Resistencia de la pantalla a la penetración.**

Las pantallas plásticas deben resistir la penetración de un proyectil con masa de  $44 \text{ g} \pm 0,2 \text{ g}$ , soltado desde una altura de 127 cm. La pantalla no debe ser fracturada o penetrada como resultado de esta prueba. Tampoco debe desprenderse ninguna parte desde la superficie interior de cualquiera de los componentes del protector facial y la pantalla debe mantenerse en su posición sujeta al cabezal. (Secretaría de Economía, 2007, p.15)

### **Procedimiento**

El proyectil debe ser soltado libremente a través del tubo guía, con la punta hacia abajo, desde una altura de 127 cm sobre la superficie exterior horizontal de la pantalla. Se deben probar cuatro protectores faciales. La aguja debe cambiarse por una nueva cada cuatro ensayos. Con el fin de proteger al operador, el tubo guía debe colocarse de forma que el extremo inferior del tubo se encuentre a 10 cm del punto de impacto. La pantalla debe ser colocada en una posición horizontal tal que el eje de ésta se encuentre en posición horizontal con la superficie exterior hacia arriba. El proyectil debe ser soltado sobre el ápice de la pantalla en un punto en línea con los ojos de la horma. (Secretaría de Economía, 2007, p.16)



### *2.3.2.3 FDA 801.410 USO DE LENTES RESISTENTES A IMPACTOS EN ANTEOJOS Y ANTEOJOS DE SOL*

El médico u optometrista tendrá la opción de ordenar lentes de vidrio, lentes de plástico o lentes de vidrio laminado resistentes al impacto por cualquier método; sin embargo, todos esos lentes deberán ser capaces de soportar la prueba de impacto.

Para demostrar que todos los demás tipos de lentes resistentes a los impactos, incluidos los lentes de vidrio laminado resistentes a los impactos, son capaces de resistir la prueba de impacto descrita en este reglamento, el fabricante de estos lentes deberá someter a una prueba de impacto una muestra estadísticamente significativa de lentes de cada lote de producción, y los lentes así probados deberán ser representativos de las formas terminadas que usa el usuario, incluidas las formas terminadas que tienen un grosor mínimo de lente y han sido sometidas a cualquier tratamiento utilizado para impartir resistencia al impacto.

En la prueba de impacto, se deja caer una bola de acero de 5/8 de pulgada que pesa aproximadamente 0,56 onzas desde una altura de 50 pulgadas sobre la superficie superior horizontal de la lente. La pelota golpeará dentro de un círculo de 5/8 de pulgada de diámetro ubicado en el centro geométrico de la lente. La pelota puede ser guiada pero no restringida en su caída dejándola caer a través de un tubo que se extiende hasta aproximadamente 4 pulgadas de la lente.

Para pasar la prueba, la lente no debe fracturarse; A los efectos de esta sección, se considerará que una lente se ha fracturado si se agrieta en

todo su espesor, incluida una capa laminar, si la hubiere, y en un diámetro completo en dos o más piezas separadas, o si cualquier material de la lente es visible para los ojos desnudos se separan de la superficie ocular.

La prueba se llevará a cabo con la lente sostenida por un tubo (diámetro interior de 1 pulgada, 1 1/4 de pulgada de diámetro exterior y aproximadamente 1 pulgada de alto) fijado a una placa base rígida de hierro o acero. El peso total de la placa base y sus elementos fijos rígidamente no debe ser inferior a 27 libras. Para lentes de diámetro mínimo pequeño, se puede usar un tubo de soporte que tenga un diámetro exterior de menos de 1 1/4 pulgadas. El tubo de soporte debe estar hecho de plástico acrílico rígido, acero u otra sustancia adecuada y debe tener adherido de forma segura en el borde superior una junta de neopreno de 1/8 por 1/8 de pulgada con una dureza de 40 +/-5. (FDA, 2022, párr. 7)

**2.3.2.4 NMX-S-057-SCFI-2002 SEGURIDAD-EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL-PROTECTORES OCULARES PRIMARIOS CONTRA IMPACTOS**

Los protectores deben cumplir con los requerimientos no ópticos establecidos en la tabla aplicando los métodos de prueba que se mencionan en cada caso (Secretaría de Economía, 2002).

<b>Característica</b>	<b>Requerimiento</b>
Resistencia al impacto de alta masa	Los protectores deben resistir el impacto de un proyectil con extremo en forma de punta, de 500 g de masa, soltado desde una altura de 130 cm cuando se prueben de acuerdo con el método establecido. El protector no debe ser penetrado, ni fragmentado, ni fisurado, como resultado de la prueba.
Resistencia al impacto de alta velocidad	Los protectores deben ser capaces de resistir el impacto de un balín de acero de 6,35 mm de diámetro proyectado a alguna de las velocidades indicadas a continuación: Tipo I: 45,7 m/s Tipo II: 76,2 m/s La prueba debe realizarse de acuerdo con lo establecido. El protector no debe ser penetrado, ni fragmentado, ni fisurado, ni tener contacto con el ojo de la horma como resultado de la prueba.
Resistencia a la	Los protectores deben resistir la penetración de un proyectil

penetración (únicamente para lentes plásticas)	conteniendo en uno de sus extremos una aguja 135 Nm x 17, Nm 200 ó tamaño 25, con masa total de 44,2 g + 1,0 g, soltado desde una altura de 130 cm, cuando se prueben según el método establecido. La lente no debe fracturarse ni ser penetrada como resultado de esta prueba.
Resistencia a la ignición	Los protectores no deben entrar en combustión con llama visible ni continuar incandescentes, cuando se prueben según lo establecido.
Resistencia a la corrosión	Los componentes metálicos utilizados en los protectores deben ser resistentes a la corrosión, al grado que las superficies del componente a prueba deben conservarse lisas y libres de oxidación, y la función del protector no debe ser deteriorada, una vez que se han sometido al método de prueba.

Tabla 3 Requerimientos para protectores oculares primarios. (Secretaría de Economía, 2002)

## 2.4 FACTORES QUE INFLUYEN A LA RESISTENCIA AL IMPACTO

### 2.4.1 MATERIAL DE LALENTE

#### 2.4.1.1 Monómero C3-39

El CR-39 es un compuesto orgánico compuesto por alil diglicol carbonato. Este material es ampliamente utilizado en la fabricación de la mayoría de las lentes orgánicas. Siendo esta una resina termoendurecible, se presenta en forma de un líquido monomérico que puede ser vertido en moldes y luego endurecido (polimerizado) mediante el calor y un catalizador.

Después de años de investigación, se logró desarrollar y perfeccionar el proceso de fabricación del CR39. Ante los intentos fallidos de crear lentes con materiales termoplásticos y termoendurecibles, el CR39 se estableció como el material orgánico de referencia en el campo de la óptica oftálmica. Durante la Segunda Guerra Mundial, los químicos de la Columbia Corporation descubrieron este material y lo denominaron "Columbia Resin" número 39, formando parte de una serie de monómeros estudiados específicamente para las fuerzas aéreas de los Estados Unidos.

La aplicación inicial del CR39 en la producción de lentes correctivas tuvo lugar entre los años 1955 y 1960 por parte de la compañía LOR. Fueron pioneros al combinar la ligereza y la capacidad de resistir impactos en sus lentes.

El CR39 ha demostrado tener éxito en comparación con otros materiales minerales. Teniendo como ventaja un índice de refracción de 1,5 (similar al del vidrio mineral

tradicional), una densidad de 1,32 (aproximadamente la mitad que el vidrio mineral), una baja constringencia de 58-59 (es decir, poco cromatismo), una alta resistencia a los impactos, una excelente transparencia, así como diversas opciones de coloración y tratamiento.

Este material tiene una susceptibilidad al rayado, por lo que se sugiere someter un tratamiento de endurecimiento en las superficies del material. Además, existe facilidad de aplicación en el biselado y montaje.

El CR39 es sensible al rayado, por lo que se recomienda aplicar algún tratamiento de endurecido en sus superficies. Su aplicación para el biselado y el montaje por parte de los ópticos es muy fácil (Meslin, 2010).

#### *2.4.1.2 Índice medio (1.54-1.64)*

Comparado con el CR39 convencional, este material orgánico permite la fabricación de lentes más delgadas y livianas. Las lentes elaboradas con este material tienen una densidad ligeramente menor que el CR39 (entre 1,20 y 1,32), presentan un mayor cromatismo (constringencia entre 31 y 42) y son más sensibles al calor, al mismo tiempo que brindan una mejor protección contra los rayos ultravioleta.

Estos materiales son altamente susceptibles a los arañazos y, por lo tanto, requieren un tratamiento de endurecimiento sistemático en la superficie. La mayoría de estos materiales son termoendurecibles. Se recomienda especialmente aplicar un tratamiento antirreflejante. Es posible aplicación de tintes y tratamiento fotocromático en una de sus capas (Meslin, 2010).

#### *2.4.1.3 Trivex*

El Trivex ha sido introducido después del año 2000 por PPG Industries Inc y comercializado con diferentes nombres. Es un material clasificado como semi-termoendurecible que combina características de las resinas termoendurecibles y termoplásticas. Inicialmente desarrollado para viseras de cascos militares, se presenta en forma de monómero líquido que polimeriza de manera similar a las resinas termoendurecibles. Sin embargo, su estructura química única permite controlar el nivel de interconexión de las moléculas durante la polimerización, otorgándole cualidades similares a las de una resina termoplástica.

El Trivex, nombre que refleja sus tres principales cualidades, ha sido diseñado para cumplir con las expectativas de los usuarios de lentes oftálmicas: calidad óptica,

ligereza y seguridad. Su calidad óptica se atribuye a la pureza del monómero, la transparencia y bajo cromatismo (constringencia entre 43 y 45), así como su capacidad para recibir tratamientos antirrayado y antirreflejante. La ligereza se logra gracias a su baja densidad ( $d = 1,11$ ) en combinación con un índice de refracción superior al del CR39 ( $n_e = 1,533$ ,  $n_d = 1,530$ ). Además, este material permite un hasta un grosor mínimo de 1,0 mm en el centro de las lentes cóncavas.

Por último, la seguridad del Trivex se basa en su alta resistencia a los impactos y en su capacidad inherente de protección contra los rayos ultravioleta (corte UV de 395 nm). Es también propenso a los arañazos, por lo que se recomienda un tratamiento antirrayado en ambas caras de las lentes de este material. Además, si se desea entintar, se requieren técnicas adaptadas. El biselado y ranurado del Trivex requieren manejos específicos en las biseladoras. Sin embargo, la perforación y el montaje son relativamente sencillos de realizar (Meslin, 2010).

#### 2.4.1.4 Índice alto (1.67 o mayor)

El material de alto índice se obtiene mediante la combinación de tiouretanos y tioles ricos en azufre con funciones isocianato. Tiene la capacidad de alcanzar un índice de refracción de hasta 1,67.

Para lograr un índice de refracción aún más alto, es necesario agregar átomos de azufre en concentraciones más altas a la composición química de los episulfuros, es decir, se logra aumentar el índice de refracción de los materiales orgánicos al incorporar átomos de azufre en diversas familias de moléculas. De esta forma, a medida que aumenta la proporción de azufre, el índice de refracción del material también se incrementa. La presencia de azufre en la composición de los materiales orgánicos de alto índice explica el distintivo olor que se desprende al biselar las lentes.

Esto da lugar a materiales con un índice muy elevado ( $n \geq 1,74$ ), como el 1,74. Sin embargo, es importante mencionar que, aunque estos materiales permiten la fabricación de lentes extremadamente delgadas, son más sensibles al calor, se rompen con mayor facilidad y son más difíciles de teñir.

En relación a su composición química, los materiales resultantes de la química de los tiouretanos 1,60 y 1,67 se adaptan bien al ranurado y la perforación (Meslin, 2010).

#### 2.4.1.5 Policarbonato

En la mayoría de los casos, se obtiene mediante la reacción química siguiente, denominada policondensación:

El policarbonato presenta una excelente resistencia a los impactos (la más elevada de todos los materiales oftálmicos), un índice de refracción elevado ( $n_e = 1,591$  /  $n_d = 1,586$ ), una gran ligereza (densidad = 1,20), la posibilidad de ser retallado fino (hasta 1,0 mm en el centro de las lentes cóncavas), una protección eficaz frente a los rayos ultravioleta (gracias a un aditivo que ofrece un corte UV de 385 nm) y una gran resistencia al calor (punto de ablandamiento, o de transición vítrea,  $T_g$  superior a 140 °C).

El policarbonato es un tipo de resina termoplástica perteneciente a la familia de los policarbonatos aromáticos. Prácticamente es un polímero lineal de estructura amorfa compuesto por una sucesión de secuencias de carbonato (-O-C=O-) y fenol (-C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH) en su esqueleto carbonado.

Normalmente, se consigue a través de una reacción química conocida como policondensación. El policarbonato destaca por su resistencia excepcional a los impactos, siendo el material oftálmico más resistente en este aspecto. Además, presenta un índice de refracción elevado ( $n_e = 1,591$  /  $n_d = 1,586$ ), es ligero en peso (densidad = 1,20) y permite un corte fino en su fabricación (hasta 1,0 mm en el centro de lentes cóncavas).

Asimismo, gracias a un aditivo que bloquea la radiación hasta los 385 nm bloquea los rayos ultravioletas. También destaca por su alta resistencia al calor, con un punto de ablandamiento o transición vítrea ( $T_g$ ) superior a los 140 °C.

Es necesario aplicar un tratamiento endurecido al policarbonato debido a su susceptibilidad al rayado. Aunque su constringencia es relativamente baja ( $v_e = 31$ ,  $v_d = 31$ ), esto no suele tener impacto en la mayoría de las prescripciones.

Dado que el policarbonato es naturalmente difícil de tintar, la coloración se logra principalmente mediante la impregnación de un barniz tintable aplicado en la parte posterior de la lente o mediante la exposición a rayos UV, lo que permite la difusión de colorantes en el material.

El tratamiento antirreflejante se realiza de manera similar a otros materiales orgánicos. Por otro lado, el tallado y montaje de las lentes de policarbonato requieren biselado en seco, ciclos adaptados y pulido de los bordes de las lentes (Meslin, 2010).

#### **2.4.2 ESPESOR CENTRAL**

El espesor central de los lentes varía según el poder óptico, es decir, un lente positivo se compone de dos prismas unidos por su base, teniendo un centro más grueso y una periferia más delgada. Por otro lado, los prismas de los lentes negativos están unidos por su ápice, lo que resulta en un centro más delgado y una

periferia más gruesa. En resumen, las lentes negativas el espesor es menor que en las positivas.

La Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) ha estandarizado un espesor central mínimo de 2 mm para los lentes. En el caso de los lentes positivos, se debe tener en cuenta que a medida que aumenta la potencia, aumenta la resistencia al impacto. Por otro lado, en los lentes negativos, siempre y cuando se respete el espesor central mínimo, la resistencia será constante (Cadena Ramírez & Niño Manoslava, 2015).

### **2.4.3 APLICACIONES DE TRATAMIENTOS ADICIONALES**

La presencia o ausencia del tratamiento antirreflejo se considera como un factor que afecta la resistencia de un lente.

La matriz del material no puede afectarse completamente por los factores para mejorar la adherencia de los elementos y químicos como el sometimiento de los lentes temperaturas superiores a 70°C en el proceso de desgasificación y 1.800 grados centígrados en el proceso de adherencia de los elementos, ya que se coloca una película anti-rayas que mejora la adhesión del antirreflejo a la superficie del lente.

Los lentes con revestimientos adicionales al material pueden disminuir su resistencia al impacto, a menos que cuenten con un revestimiento anti-rayas, que puede mejorar dicha resistencia. (Cadena Ramírez & Niño Manoslava, 2015)

### 3 JUSTIFICACIÓN

En la atención de salud visual se busca implementar mejoras en los materiales ópticos ya existentes para permitir a los pacientes disponer de una mayor diversidad de tratamientos a sus condiciones refractivas.

La tecnología de impresión 3D permite buscar esas nuevas alternativas para innovar en la fabricación de lentes oftálmicas, las cuales logren acoplarse a las necesidades de cada paciente y que incluso el diseño de estas pueda personalizarse para cada caso.

Actualmente las lentes son fabricadas con métodos tradicionales como fabricación por centrifugado y moldeo, pero las mismas no permiten personalizarse, o bien, obtener diseños complejos que sean personalizables para casos particulares de los pacientes como aquellos que padecen visión baja o ametropías altas.

Por lo tanto, dentro de la universidad ENES León, recientemente se llevó a cabo una investigación donde se fabricó y analizó prototipos de lentes oftálmicas diseñadas mediante tecnología de 3D donde a lo largo del año 2021 se diseñaron 2 grupos de lentes oftálmicas esféricas con potencias que van desde -5.00 D a +5.00. Se uso como material una resina fotocurable del modelo “clear resin” y como medio de fabricación una impresora 3D de la marca “Formalbs2”.

El resultado obtenido fue que estas lentes se consideraron ópticamente viables ya que contaban con las cualidades suficientes para transmitir y reflejar la luz (Tavarez Romero & Hernández González, 2021).

Sin embargo, había un punto más a deducir, se necesitaba conocer si estas eran seguras para su uso en pacientes y además si al pasarlas por un proceso de fotocurado como indicaba el fabricante de la resina, realmente mejoraba su



resistencia para el mismo fin.

Es así como con el resultado de esta investigación permite decidir si se debe descartar o implementar el uso de estas lentes oftálmicas en los pacientes que asegure una buena resistencia, creando así la oportunidad de que en un futuro se puedan dar más opciones de ayuda a pacientes con condiciones particulares.

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 GENERAL**

Conocer la seguridad y resistencia de las lentes oftálmicas diseñadas mediante tecnología de impresión en 3D para implementar su uso como prótesis para corrección de ametropías.

### **4.2 ESPECÍFICOS**

1. Imprimir 2 grupos de lentes oftálmicas esféricas con potencias de -5.00 D a +5.00 D usando como material clear resin.
2. Someter el segundo grupo de lentes a un tratamiento de fotocurado para endurecer el material.
3. Realizar la prueba de Drop Ball Test en ambos grupos.
4. Comparar la resistencia al impacto del primer grupo de lentes que no fueron fotocurados en relación con su poder dióptrico.
5. Comparar la resistencia al impacto del segundo grupo de lentes que fueron fotocurados en relación con su poder dióptrico.
6. Comparar ambos grupos de lentes negativos y positivos para interpretar la diferencia entre no usar y usar la técnica de fotocurado.

7. Comparar la resistencia al impacto en función al grosor central de cada lente con y sin tratamiento de fotocurado.

## 5 HIPÓTESIS

H1: La seguridad de las lentes oftálmicas fabricadas mediante tecnología de impresión 3D depende del diseño de cada potencia óptica, refiriéndose a la relación que hay entre grosor, diámetro y potencia de las lentes, por lo tanto, entre mayor grosor central mayor seguridad.

H2: La resistencia al impacto de las lentes oftálmicas fabricadas mediante tecnología de impresión 3D depende del proceso de manufactura del material con el que se fabrica la lente, siendo así que aquellas resinas que fueron fotocuradas son más resistentes.

## 6 MARCO TEORÍCO

Este proyecto de investigación tiene como objetivo fundamental evaluar la seguridad y resistencia al impacto de las lentes oftálmicas impresas en 3D, explorando su potencial como prótesis para corregir errores refractivos a partir de la prueba de Drop Ball Test. Con la incorporación de un proceso experimental adicional, el poscurado, buscamos mejorar las propiedades del material utilizado.

Se proporcionan las definiciones de conceptos operacionales relacionados al tema de investigación que serán fundamentales para una comprensión clara del tema:

Por poder dióptrico de una lente nos referimos a su capacidad de refracción, es decir, su capacidad para desviar la luz que pasa a través de ella. Se expresa como el inverso de la distancia focal de la lente medida en metros. Cuanto mayor sea el poder dióptrico de una lente, mayor será su capacidad para refractar la luz (Malacara, 2015).

La resistencia a impactos en Drop Ball Test es la capacidad de una lente para resistir golpes sin sufrir fracturas o daños significativos. El Drop Ball Test es un método de prueba en el que una bola de acero de 0.56 onzas y 25.4 mm de diámetro se deja caer sobre la lente desde una altura de 127 cm. La lente pasa la prueba si no se fractura ni se daña después de recibir el primer impacto (Cavalcante Neves & Gong Chen, 2020).

El grosor de una lente se define como la dimensión física que mide la distancia entre su cara anterior y su cara posterior en el centro óptico de la lente. Se expresa en milímetros y proporciona información sobre la parte central de la lente (Cadena Ramírez & Niño Manoslava, 2015).

Como revisión de literatura que ayude a presentar estudios relevantes para brindarnos un panorama del estado actual sobre el tema, se han encontrado investigaciones que evalúan la resistencia al impacto en distintos materiales oftálmicos cambiando variables como la aplicación de tratamientos antirreflejantes o antirrayas para realizar una comparativa en Drop Ball Test.

En una de las investigaciones realizadas, se obtuvieron dos conjuntos de 30 muestras de lentes de material de alto índice (1.67). Estos conjuntos se diferenciaban por la presencia o ausencia de un tratamiento antirreflejante, lo que sumaba un total de 60 lentes analizados. Cada lente tenía un diámetro de 60 mm y un espesor de 2 mm. Ambos grupos fueron sometidos a la prueba de Drop Ball Test. Los resultados revelaron que, en promedio, el material sin tratamiento antirreflejante resistió 185 golpes, mientras que aquellos con el tratamiento antirreflejante soportaron un promedio de 167 golpes (Cadena Ramírez & Niño Manoslava, 2015).

En otra investigación se analizó con una prueba de resistencia al impacto tres materiales diferentes (CR-39, policarbonato y alto índice 1.60) mediante 180 lentes esféricas de -4.00 dioptrías con 2 mm de espesor, 50 mm de diámetro y diferentes curvas bases (0,50, 2,50, 4,50, 6,50 y 8,50). Como resultado se obtuvo que el CR-39 fue el material menos resistente a comparación del policarbonato que resistió más. Además se relacionó que las curvas bases influyen con la resistencia del cualquier material ya que si el lente es más plano, menor resistencia existe. (Diallo, et al. 2001).

De acuerdo a Cavalcante Neves & Gong Chen (2020) en diversos estudios se afirma:

Que el espesor central tiene una relación directa con la resistencia al impacto en todo tipo de materiales, aumentando ésta de forma no lineal con el espesor de la lente.

Por lo tanto, la potencia refractiva también es un factor determinante, dado que está muy relacionada con el espesor; la resistencia al impacto de las lentes oftálmicas se incrementa al aumentar la potencia refractiva positiva y se reduce al aumentar la potencia refractiva negativa. Finalmente, se ha comprobado que en cuanto más plana sea la curva base menor es la resistencia al impacto, independientemente del tipo de material. (p.14)

Es así que para asegurar que los lentes oftálmicos diseñados mediante tecnología 3D empleando Clear Resin pueda ser un prototipo seguro para prevenir lesiones durante su uso, se plantea que el resultado de Drop Ball Test tiene relación entre grosor, diámetro y potencia de las lentes.

Además se formula que la resistencia al impacto de las lentes oftálmicas fabricadas

mediante tecnología de impresión 3D depende del proceso de manufactura del material con el que se fabrica la lente, siendo así que aquellas resinas que fueron fotocuradas son más resistentes.

## 7 METODOLOGÍA

### 7.1 TIPO DE ESTUDIO

Experimental.

### 7.2 GRUPOS

Se utilizan 2 grupos de 10 lentes esféricos monofocales diseñados con la tecnología 3D, el primer grupo son lentes que no han sido fotocuradas y el segundo grupo son los que sí han pasado por el tratamiento de fotocurado dando al final un total de 20 lentes.

Cada grupo se dividen las lentes por poder dióptrico, que van desde -5.00 D a +5.00 D, manteniendo un diámetro constante de 60 mm, variando únicamente el espesor central el cual debe ser mayor a 2mm.

### 7.3 VARIABLES Y ESCALA DE MEDICIÓN

VARIABLES	Definición conceptual	Definición operacional	De acuerdo con su naturaleza	Escala de medición
<b>Poder dióptrico</b>	La potencia de una lente, el cual es el recíproco o inversa de la distancia focal $f$ de un lente, es decir, la distancia	Poder de refracción de una lente equivalente al inverso de la distancia focal expresada en	Cuantitativa Continua	Dioptías

	<p>donde la imagen es enfocada:</p> $P = \frac{1}{f'}$ <p>Si la distancia focal se mide en metros, la potencia queda expresada en dioptrías. (Malacara, 2015, p. 56)</p>	metros.		
<b>Resistencia al impacto</b>	<p>“Propiedad mecánica definida como la habilidad que posee un material para resistir a la rotura y/o penetración provocada por objetos que golpean de manera instantánea con velocidad o comprimen al mismo” (Cavalcante Neves &amp; Gong Chen, 2020, pp.4-5).</p>	Numero de impactos que resiste una lente sin que presente ningún tipo de fractura.	Cuantitativa Continua	Numero de impactos recibidos
<b>Espesor central</b>	<p>Depende de la potencia óptica, en lentes positivas el espesor es mayor que las negativas, siendo que un lente positivo es la superposición de dos prismas por su base quedando el centro más grueso y perfilaría más delgada mientras que los prismas de lentes negativos van unidos por su ápice</p>	Grosor que tiene una lente en su centro óptico, desde su cara anterior a su cara posterior.	Cuantitativa Continua	Milímetros

	<p>quedando en centro más delgado y periferia más gruesa. ( Cadena Ramírez &amp; Niño Manoslava, 2015, p.15)</p>			
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	--

Tabla 4 Variables utilizadas en el proyecto

## 7.4 EXPERIMENTACIÓN

### 7.4.1 MÉTODO

El presente estudio es prospectivo, en el cual fueron diseñados los dos grupos de 5 lentes de -5.00 D a +5.00 D en el programa de simulación de óptica geométrica (Oslo) para calcular sus curvaturas, grosor y diámetro en función a su poder dióptrico, donde se pasaron estas mismas características a otro programa de modelado y renderizado 3D (Fusion 360) para proceder a su diseño digital.

El proceso de experimentación se dividió en 3 etapas:

1. Impresión de ambos grupos de lentes.
2. Realización del fotocurado en el segundo grupo de lentes.
3. Realización de prueba de resistencia al impacto en ambos grupos.

### PRIMERA ETAPA

#### Preparación del archivo para subir

1. Se descargó el programa PreForm para ver los límites de impresión y de la base de impresión que aparece invertida respecto a la orientación de la impresión.
2. Se encendió la impresora conectando el cable de alimentación.
3. Se abre el programa de PreForm confirmando el tipo de resina y la altura de la capa antes de configurar el modelo.
4. Se abre el archivo en STL u OBJ y mediante el programa se escaló, orientó y creó soportes para cada una de las piezas.
5. Se guardó la impresión como un archivo FORM antes de subirla a la

- impresora.
6. Se hizo clic en el icono naranja en forma de impresora en la barra de herramientas del PreForm para iniciar el proceso de subida.
  7. Se seleccionó en el diálogo a la impresora que para subir el archivo.

### **Confirmación de la impresión**

1. Mientras que la pantalla táctil de la impresora se muestra el progreso en vista de la cola de impresiones se seleccionó el nombre del archivo, después la opción print y se confirmó la impresión pulsando el botón de inicio.
2. La impresora se llenó y calentó automáticamente el tanque para comenzar con la impresión.

### **Retiro las piezas impresas**

1. Se colocó la base de la impresión en el soporte para retirar las piezas impresas
2. Se deslizó una espátula por debajo de la base de las piezas para desprenderlas.

### **Limpieza de las piezas**

1. Se llenó la cámara de la FormWash con 2 litros de alcohol isopropílico.
2. Se usó la FormWash para automatizar el proceso de lavado durante 15 minutos para agitar las piezas en baños de alcohol para retirar lo sobrante de la resina.

## **SEGUNDA ETAPA**

### **Proceso de fotocurado**

1. Se programó la FormCure a una temperatura de 60° C con un tiempo de poscurado de 30 minutos como lo recomienda el fabricante.
2. Se colocó el segundo grupo de 5 lentes de +5.00 a -5.00 D dentro de la cámara y se dio clic en el botón de inicio para comenzar con el proceso.
3. Posteriormente el equipo marca que el proceso termina y se sacan las piezas listas.

## **TERCERA ETAPA**

### **Drop Ball Test**



1. Se posicionó el tubo guía de 127 cm en el centro óptico de cada una de las lentes de ambos grupos dando un total de 20 lentes por examinar.
2. Se dejó caer el balón de 25.4 mm de diámetro y 0.56 onzas dentro del tubo y se empezó a contabilizar el número de impactos que resistía cada una de las lentes repitiendo el procedimiento hasta que tuvieran una fractura.

## 8 RESULTADOS

En la *tabla 6* se presentan las características del diseño de las lentes negativas sin fotocurar en conjunto con el número de impactos que resistió el material en cada una de las lentes, el grosor central de las lentes negativas depende del cálculo de los radios de curvatura en función al poder dióptrico objetivo.

<b>Lentes negativas sin fotocurar</b>				
<b>Lente</b>	<b>Dioptría</b>	<b>Espesor central</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Número de impactos resistidos</b>
<b>1</b>	-1.00 D	3 mm	60 mm	1
<b>2</b>	-2.00 D	5 mm	60 mm	1
<b>3</b>	-3.00 D	8 mm	60 mm	1
<b>4</b>	-4.00 D	11 mm	60 mm	1
<b>5</b>	-5.00 D	15 mm	60 mm	1

*Tabla 5 Resultados del Drop Ball test en el primer grupo sin fotocurar de lentes negativas.*

En la *tabla 7* se presentan las características del diseño de las lentes positivas sin fotocurar en conjunto con el número de impactos que resistió el material en cada una de las lentes, el grosor central se diseñó para que quedara igual en cada una.

<b>Lentes positivas sin fotocurar</b>				
<b>Lente</b>	<b>Dioptría</b>	<b>Espesor central</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Número de impactos resistidos</b>
<b>1</b>	+1.00 D	2 mm	60 mm	1
<b>2</b>	+2.00 D	2 mm	60 mm	3
<b>3</b>	+3.00 D	2 mm	60 mm	>20
<b>4</b>	+4.00 D	2 mm	60 mm	>20
<b>5</b>	+5.00 D	2 mm	60 mm	>20

*Tabla 6 Resultados del Drop Ball test en el primer grupo sin fotocurar de lentes positivas.*

En la *tabla 8* se presentan las características del diseño de las lentes negativas en conjunto con el número de impactos que resistió el material con tratamiento de fotocurado en cada una de las lentes, el grosor central de las lentes negativas también dependió del cálculo de los radios de curvatura en función al poder dióptrico objetivo.

<b>Lentes negativas fotocuradas</b>				
<b>Lente</b>	<b>Dioptría</b>	<b>Espesor central</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Número de impactos resistidos</b>
<b>1</b>	-1.00 D	3 mm	60 mm	1
<b>2</b>	-2.00 D	5 mm	60 mm	1
<b>3</b>	-3.00 D	8 mm	60 mm	1
<b>4</b>	-4.00 D	11 mm	60 mm	1
<b>5</b>	-5.00 D	15 mm	60 mm	1

*Tabla 7 Resultados del Drop Ball test del segundo grupo de lentes negativas con fotocurado.*

En la *tabla 9* Se presentan las características del diseño de las lentes positivas en conjunto con el número de impactos que resistió el material con tratamiento de fotocurado en cada una de las lentes, el grosor central también se diseñó para que quedara igual en cada una.

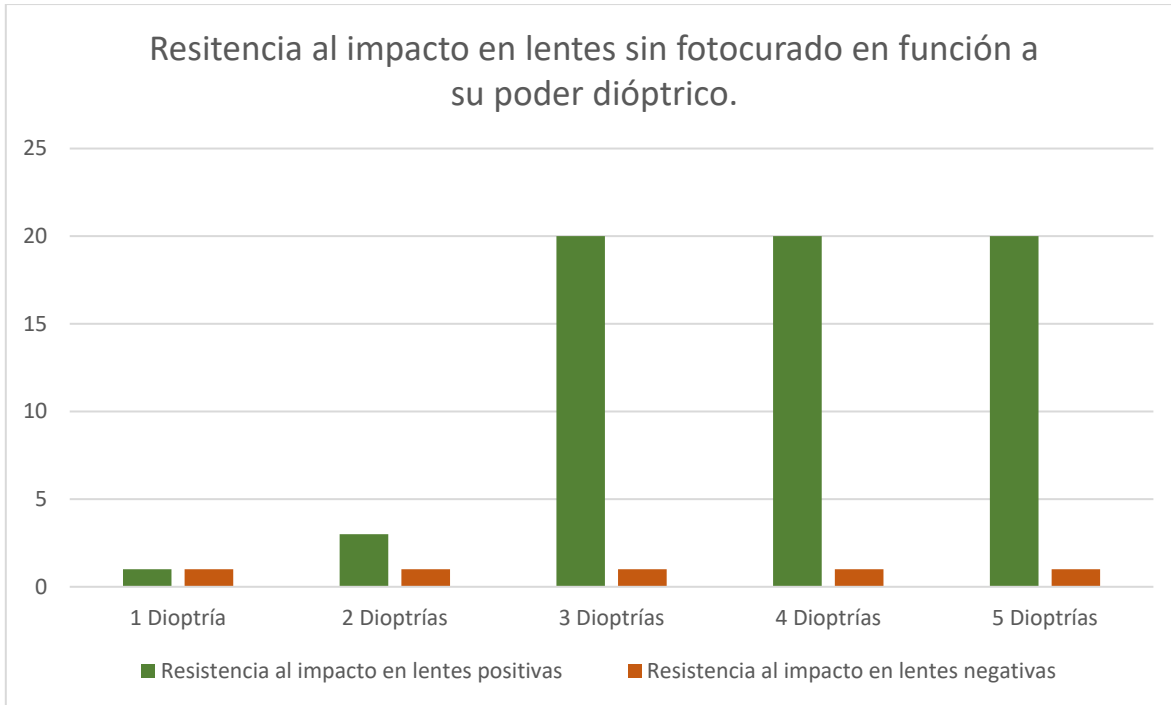
<b>Lentes positivas fotocuradas</b>				
<b>Lente</b>	<b>Dioptría</b>	<b>Espesor central</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Número de impactos resistidos</b>
<b>1</b>	+1.00 D	2 mm	60 mm	1

<b>2</b>	+2.00 D	2 mm	60 mm	1
<b>3</b>	+3.00 D	2 mm	60 mm	2
<b>4</b>	+4.00 D	2 mm	60 mm	3
<b>5</b>	+5.00 D	2 mm	60 mm	6

*Tabla 8 Resultados del Drop Ball test del segundo grupo de lentes positivas con fotocurado.*

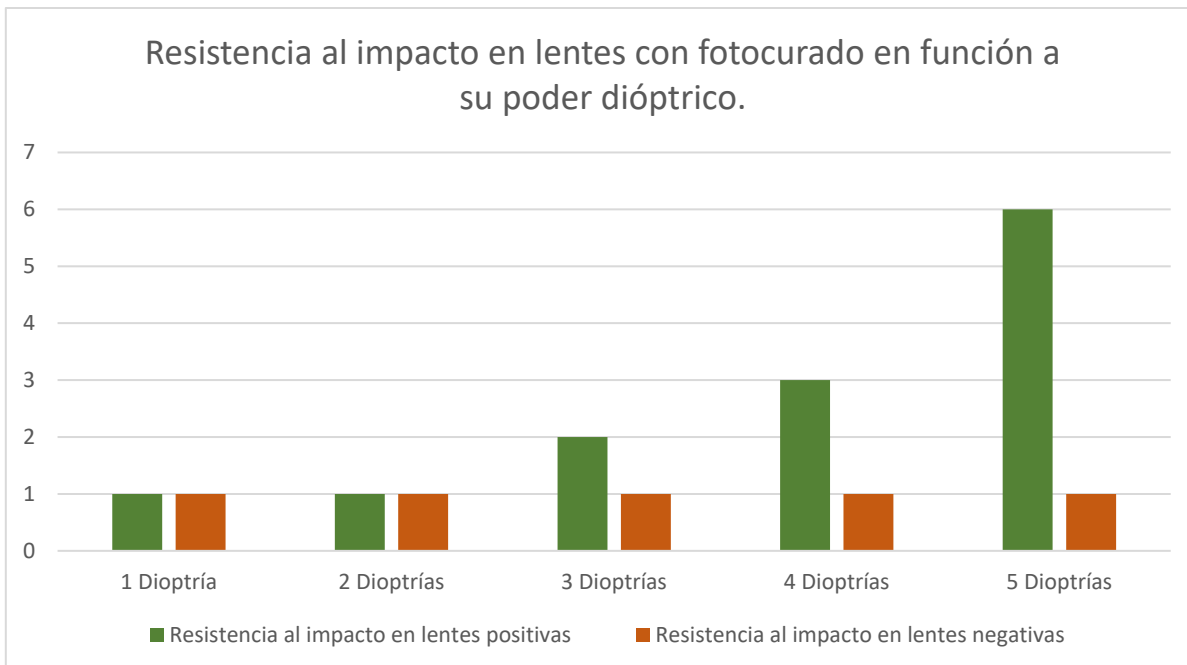
## 9 DISCUSIÓN

En la *gráfica 1* se muestra el comportamiento de la resistencia al impacto de la prueba de Drop Ball Test de las lentes positivas y negativas en relación con su potencia, las lentes positivas (verde) a partir de 2 dioptrías resiste más de un impacto, en cambio las negativas (rojas) se rompen al recibir el primer impacto.



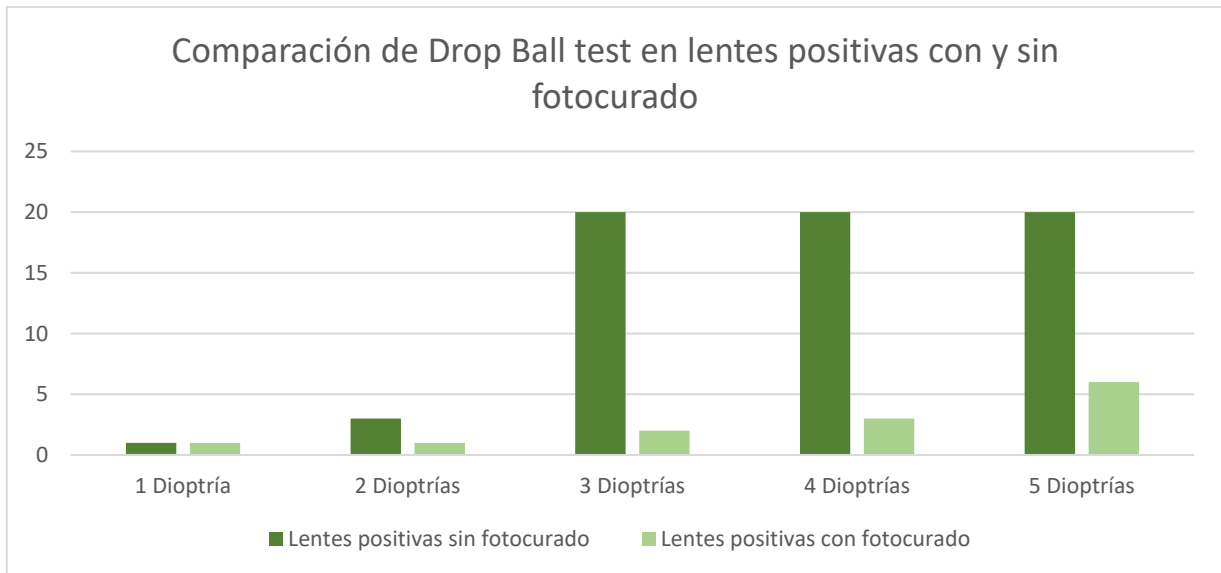
Gráfica 1 Comparación de la resistencia al impacto en lentes sin fotocurado en función a su poder dióptrico.

En la *gráfica 2* se muestra el comportamiento de la resistencia al impacto de la prueba de Drop Ball Test de las lentes positivas y negativas en relación con su potencia, las lentes positivas (verde) a partir de 3 dioptrías resiste más de un impacto, en cambio las negativas (rojas) se rompen al recibir el primer impacto.



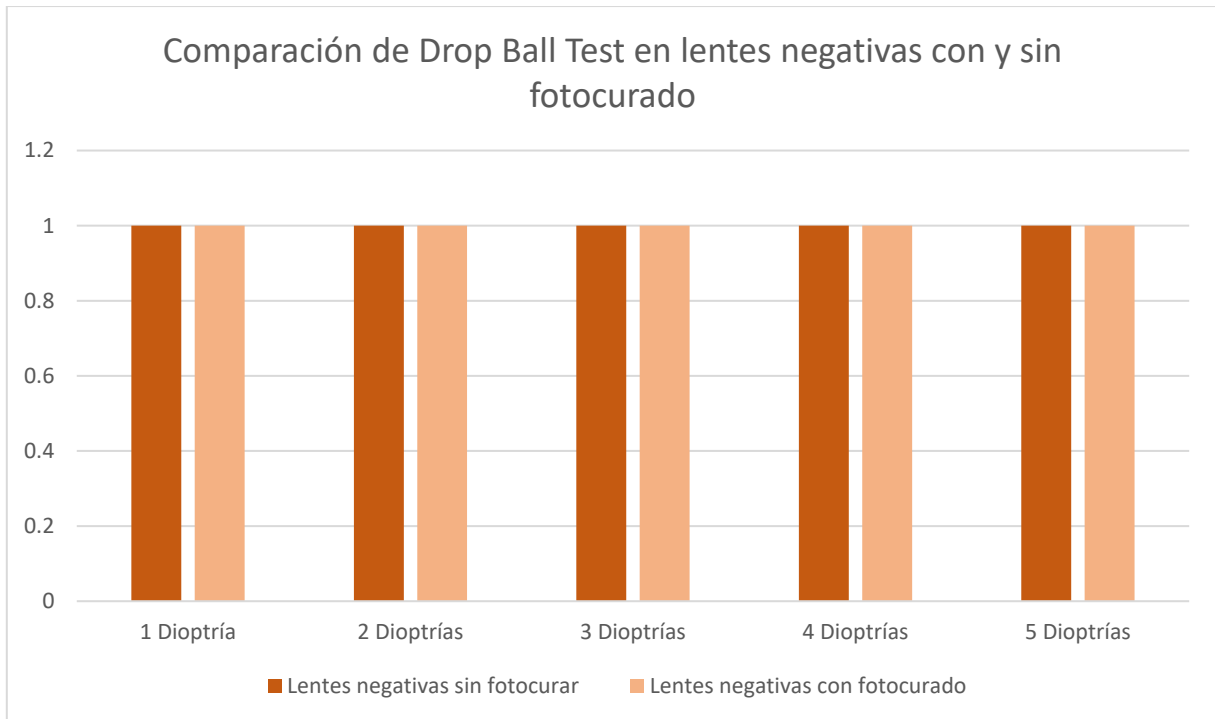
Gráfica 2 Comparación de la resistencia al impacto en lentes con fotocurado en función a su poder dióptrico.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la *gráfica 3*, existe diferencia en ambos grupos de lentes positivas con y sin el tratamiento de fotocurado, las lentes positivas sin fotocurar tuvieron mayor resistencia a diferencia de las que se sometieron al tratamiento. Solamente pasaron la prueba las lentes positivas sin fotocurar a partir de 2 dioptrías (verde oscuro), en cambio las fotocuradas pasaron la prueba a partir de las 3 dioptrías (verde claro).



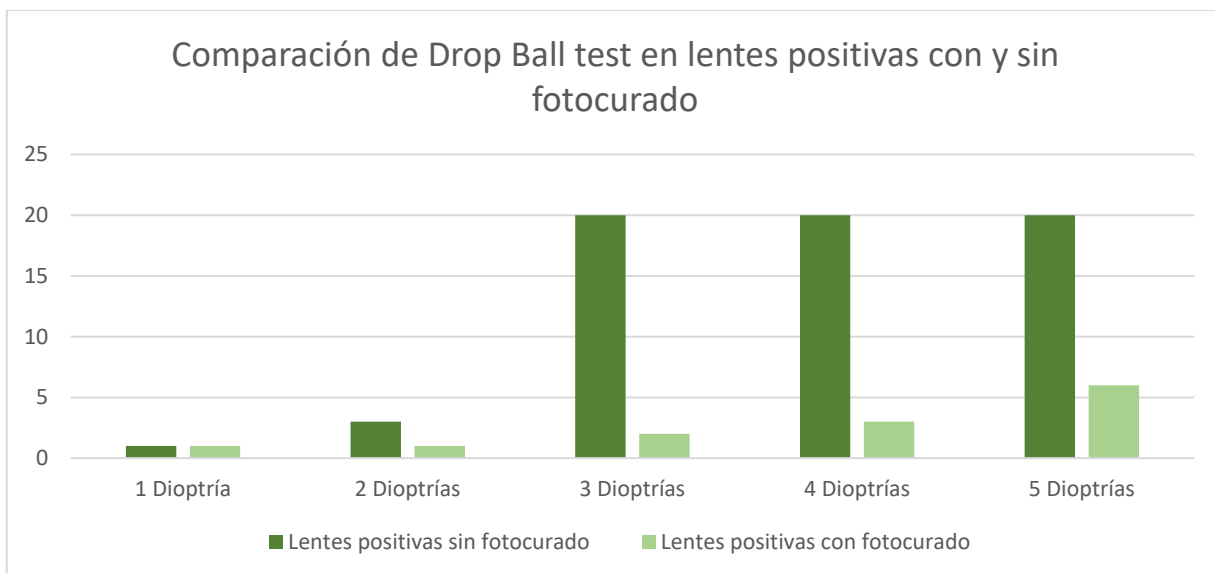
Gráfica 3 Comparación de Drop Ball Test en lentes positivas con y sin fotocurado.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la *gráfica 4*, en ambos grupos de lentes negativas con y sin el tratamiento de fotocurado no pasaron la prueba, todas las lentes se rompieron a la primera caída del balón del Drop Ball Test, siendo así que no existe diferencia en cuanto a resistencia en este grupo si el material se somete o no al tratamiento.



Gráfica 4 Comparación de Drop Ball Test en lentes negativas con y sin fotocurado.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la *gráfica 5*, existe diferencia en ambos grupos de lentes positivas con y sin el tratamiento de fotocurado, las lentes positivas sin fotocurar tuvieron mayor resistencia a diferencia de las que se sometieron al tratamiento. Solamente pasaron la prueba las lentes positivas sin fotocurar a partir de 2 dioptrías (verde oscuro), en cambio las fotocuradas pasaron la prueba a partir de las 3 dioptrías (verde claro).



Gráfica 5 Comparación de Drop Ball Test en lentes positivas con y sin fotocurado.

Se estableció en la *tabla 10*, que el total de impactos recibidos en las lentes positivas sin fotocurado hasta romperse sería el 100%, ya que se busca comparar cuantitativamente la diferencia entre aplicar y no aplicar el tratamiento de fotocurado, el cual, el total de impactos que soportaron las lentes positivas sin fotocurar hasta romperse fue menor, dando un equivalente del 20.31% del total del primer grupo. Por lo tanto, con el tratamiento de fotocurado disminuyó la resistencia de lentes positivas un 79.69%.

Lentes positivas	Número de impactos	Porcentaje
Total de impactos recibidos en lentes positivas sin fotocurado	64	100%
Total de impactos recibidos en lentes positivas con fotocurado	13	20.31%

Tabla 9 Comparación en porcentajes de lentes positivas con y sin tratamiento de fotocurado.

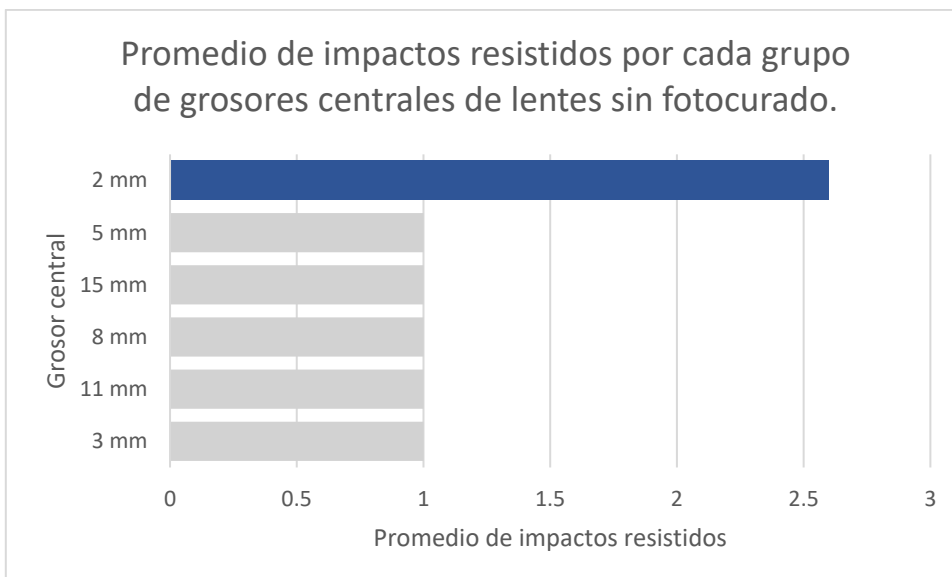
Se estableció en la *tabla 11*, que el total de impactos recibidos en las lentes negativas sin fotocurado hasta romperse sería el 100%, ya que se busca comparar cuantitativamente la diferencia entre aplicar y no aplicar el tratamiento de fotocurado, el cual, el total de impactos que soportaron las lentes negativas sin fotocurar hasta romperse fue igual, dando un equivalente del 100% del total del primer grupo. Por lo tanto, con el tratamiento de fotocurado no existe diferencia en la resistencia de lentes negativas.

Lentes negativas	Número de impactos	Porcentaje
Total de impactos recibidos en lentes negativas sin fotocurado	5	100%
Total de impactos recibidos en lentes negativas con fotocurado	5	100%

Tabla 10 Comparación en porcentaje de lentes negativas con y sin tratamiento de fotocurado.

Se promediaron el número de impactos que resistió cada grupo de lentes en función del grosor que tenía cada uno, los cuales son de 2mm, 3mm, 5mm, 8mm, 11mm y 15 mm.

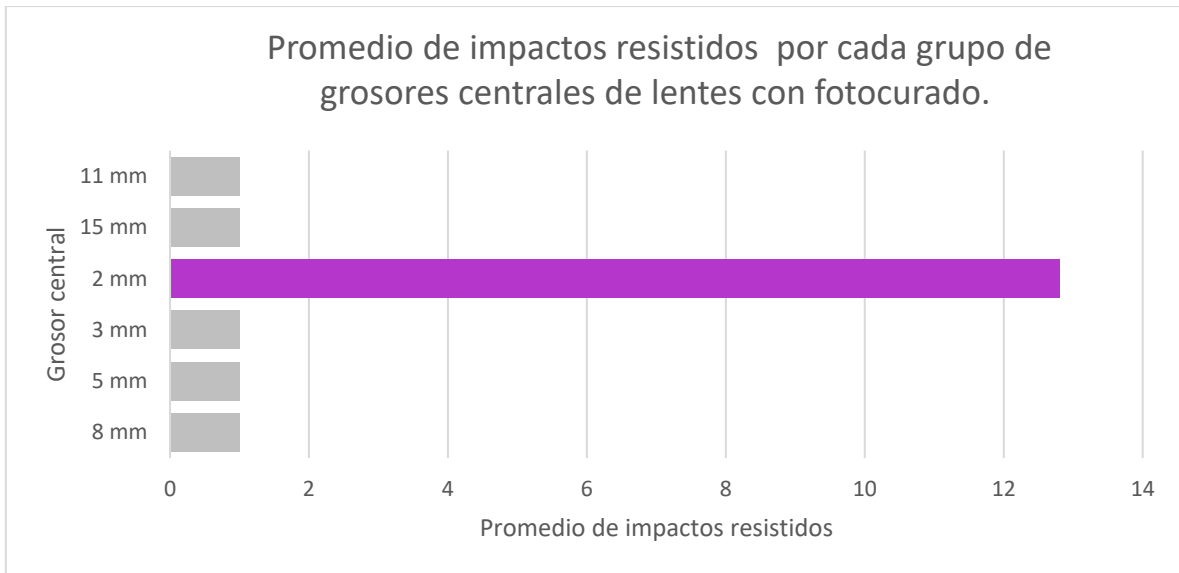
En la *gráfica 6*, las lentes sin el tratamiento de fotocurado con un grosor de 2mm (azul) tuvieron una resistencia al impacto mayor, de 2.5 impactos a comparación de los otros grosores (gris), los cuales se mantuvieron constantes con 1 impacto.



Gráfica 6 Comparación de la resistencia al impacto en relación con el grosor de las lentes sin fotocurado.

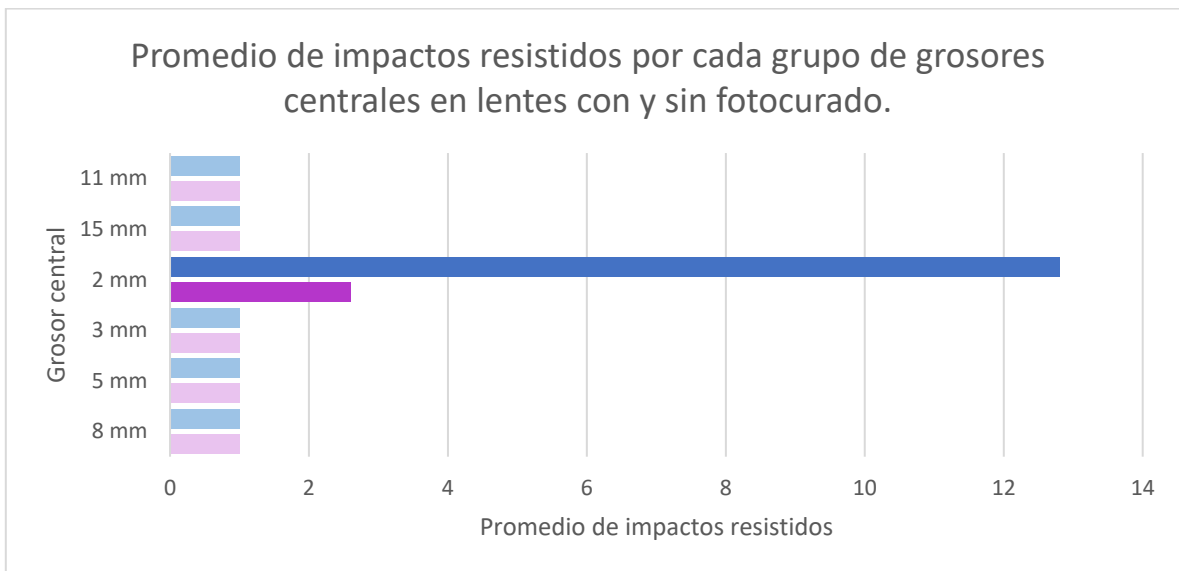
En la *gráfica 7*, las lentes con el tratamiento de fotocurado con un grosor de 2 mm (fucsia) tuvieron una resistencia al impacto notablemente mayor, de 12.8 impactos a comparación de los otros grosores (gris), los cuales se mantuvieron constantes con 1 impacto.





Gráfica 7 Comparación de la resistencia al impacto en relación con el grosor de las lentes con fotocurado.

Al final comparando ambos grosores con y sin el tratamiento de fotocurado en la *gráfica 8*, los lentes con fotocurado de 2mm (azul) tienen mayor resistencia llegando a un promedio de 12.5 impactos resistidos seguido de los que no tuvieron tratamiento con el mismo grosor (fucsia) dando un promedio de 2.5 impactos. Todos los demás grupos de grosores con (azul claro) y sin tratamiento (fucsia claro) se mantuvieron constantes solamente resistiendo un impacto.



Gráfica 8 Comparación de resistencia al impacto en relación con el grosor de las lentes con y sin fotocurado.

De acuerdo con los resultados obtenidos lo que hace el tratamiento de fotocurado no es endurecer el material, si no hacer más rígida la resina. Lo que necesita un material para que sea más resistente es tener cierta flexibilidad que permita en los impactos poder cambiar un poco más su estructura para

absorber y disipar el impacto evitando romperse.

Contrastando estos resultados con estudios similares como el de Cadena Ramírez & Niño Manoslava (2015) donde se analizaron dos grupos de 30 lentes de alto índice con y sin atirreflejante, se obtiene una diferencia significativa, ya que en el material de alto índice el promedio de ambos grupos sin y con AR fue de 185 y 167 golpes resistidos a diferencia del Clear Resin que sin fotocurar en promedio se resisten 6.9 golpes y con fotocurado 1.8 golpes.

De acuerdo a Cavalcante Neves & Gong Chen (2020) en diversos estudios se ha demostrado que el espesor central tiene una relación directa con la resistencia al impacto en todo tipo de materiales, aumentando ésta de forma no lineal con el espesor de la lente.

Por lo tanto, la potencia refractiva también es un factor determinante, dado que está muy relacionada con el espesor; la resistencia al impacto de las lentes oftálmicas se incrementa al aumentar la potencia refractiva positiva y se reduce al aumentar la potencia refractiva negativa. Finalmente, se ha comprobado que en cuanto más plana sea la curva base menor es la resistencia al impacto, independientemente del tipo de material. (p.14)

En la *gráfica 8*, los resultados contradicen las afirmaciones del artículo mencionado, ya que los lentes de menor grosor son los que han resistido mejor la prueba de Drop Ball Test, en contraste con los de mayor grosor.

De acuerdo a la *gráfica 2*, se cumple el hecho de que al aumentar la potencia refractiva positiva incrementa la resistencia al impacto, aunque esta se mantiene sin un aumento lineal. Sin embargo, en las potencias negativas no se observa un decremento en la resistencia al impacto conforme mayor potencia negativa se examina, mostrándose constante.

## 10 CONCLUSIONES

En el análisis de resultados solo las lentes oftálmicas con un grosor de 2 mm tuvieron una mayor resistencia significativa al impacto a comparación de grosores mayores como los grupos de 3mm, 5mm, 8mm, 11 mm y 15 mm.

Por lo tanto, se anula la hipótesis 1 donde se postulaba que la seguridad de las lentes oftálmicas fabricadas mediante tecnología de impresión 3D depende del diseño como el grosor central, es decir, a que si hay mayor grosor central no tendremos mayor seguridad.

Las resinas sometidas al tratamiento de fotocurado fueron menos resistentes al impacto a comparación de las que no tuvieron el tratamiento, influyendo en un decremento del 79.69% de su resistencia. Es así como se anula la hipótesis 2 donde se decreta que la resistencia de las lentes oftálmicas fabricadas mediante tecnología de impresión 3D depende del proceso de manufactura del material con el que se fabrica la lente, siendo así que las resinas que fueron fotocuradas no son más resistentes al impacto.

Se descarta entonces que sea funcional someter las lentes oftálmicas del material *clear resin* diseñadas con tecnología 3D al tratamiento de fotocurado para que

puedan ser seguras para su uso oftálmico, ya que aumenta la rigidez del material y no su resistencia al impacto.

Así como que al diseñar las lentes con un mayor grosor central se obtenga mayor seguridad ya que este no influye del todo.

Por el momento de acuerdo con las propiedades ópticas de la resina estadounidense Clear Resin® V4 de Formlabs solo puede ser óptimo este material para su uso como fabricación de herramientas de diagnóstico optométrico u oftálmico como oftalmoscopios, microscopios o lupas, en el cual estos lentes formen parte de sistemas ópticos utilizando la tecnología 3D para su diseño.

Se recomienda buscar otras alternativas de manufactura si se desea usar clear resin como material para diseñar las lentes oftálmicas o bien experimentar con otros materiales que nos permita obtener las ventajas ópticas pero que pueda ser seguro para su uso oftálmico. Teniendo en cuenta que lo que se necesita para que un material sea más resistente es tener cierta flexibilidad que permita que al momento de los impactos se pueda cambiar su estructura para absorber y disipar el impacto evitando romperse el lente.

## 11 BIBLIOGRAFÍA

- Baudet, E., Ledemi, Y., Larochelle, P., Morency, S., & Messaddeq, Y. (2019). 3D-printing of arsenic sulfide chalcogenide glasses. *Optical materials Express*, 2307-2317.
- Bordignon, F., Iglesias, A. A., & Hahn, Á. (2018). *Diseño e impresión de objetos 3D: una guía de apoyo a escuelas* (Primera ed.). Buenos Aires: UNIPE.
- Cadena Ramírez, L. A., & Niño Manoslava, L. F. (2015). *Comparación de la resistencia al impacto en lentes oftálmicos con índice de refracción 1.67 con y sin tratamiento antirreflejo*. Obtenido de Universidad de la salle: <https://ciencia.lasalle.edu.co/optometria/213>
- Cavalcante Neves, D. A., & Gong Chen, F. (16 de Junio de 2020). *Resistencia al impacto de materiales para lentes oftálmicas*. Obtenido de Universidad Complutense de Madrid: [https://eprints.ucm.es/id/eprint/61676/7/TFG%20IMPACTO\\_Danilo\\_Cavalcante-Felipe\\_Gong\\_repositorio.pdf](https://eprints.ucm.es/id/eprint/61676/7/TFG%20IMPACTO_Danilo_Cavalcante-Felipe_Gong_repositorio.pdf)
- Chaires Garza, H. N., Chávez Ramírez, K. G., & Lerma Díaz, M. R. (2015). Análisis de conceptos de la luz en su enfoque de reflexión, refracción y lentes en la didáctica con el uso de TIC's. *Proyectos institucionales y de vinculación*(5), 25-38. Obtenido de <http://www.proyectosinstitucionalesydevinculacion.com/pdf/nuevos/PIV5%20-%20C7%20-%20Linea.pdf>
- Chandrinos, A. (2021). A Review of Polymers and Plastic High Index Optical. *Journal of Materials Science Research and Reviews*, 1-14. Obtenido de

- <https://journaljmsrr.com/index.php/JMSRR/article/view/124/247>
- Diallo, M., Simonet, P., Frenette, B., & Sanschagrín, B. (2001). Resistance of plastic ophthalmic lenses: the effect of base curve on different materials during static load testing. *Optometry and Vision Science*, 518-524. doi:10.1097/00006324-200107000-00015
- FDA. (29 de Marzo de 2022). *Title 21--Food and drugs, Department of health and human services, subchapter-Medical devices, Sec. 801.410 Use of impact-resistant lenses in eyeglasses and sunglasses*. Obtenido de U.S Food & Drug Administration (FDA): <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?fr=801.410>
- Formlabs. (Noviembre de 2018). *Instrucciones de instalación y uso form2*. Obtenido de <https://media.formlabs.com/m/12961991e1c5ba68/original/-ES-Form-2-Manual.pdf>
- Formlabs. (Noviembre de 2018). Instrucciones de instalación y uso Form2, Impresora 3D de esteolitografía de sobremesa. Obtenido de <https://media.formlabs.com/m/12961991e1c5ba68/original/-ES-Form-2-Manual.pdf>
- Formlabs. (2018). *Resinas de uso general*. Obtenido de <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/1801089-TDS-ES-0P.pdf>
- Formlabs. (Septiembre de 2022). *Form Cure: ajustes de tiempo y temperatura*. Obtenido de <https://support.formlabs.com/s/article/Form-Cure-Time-and-Temperature-Settings?language=es>
- Formlabs. (11 de Mayo de 2022). *Introducción al poscurado de impresiones*. Obtenido de Formlabs: <https://support.formlabs.com/s/article/Introduction-to-Post-Curing-Prints?language=es>
- GeneratePress. (22 de Mayo de 2022). *Modelado por deposición fundida (FDM)*. Obtenido de CompralImpresoras-3D.com!: <https://comprarimpresoras-3d.com/tipo/fdm/>
- Hecht, E. (2016). *Óptica* (Quinta ed.). Madrid: Pearson.
- Innovation & Entrepreneurship Business School. (2 de Noviembre de 2016). Obtenido de Comunidad IEBS: <https://comunidad.iebschool.com/impresoras3d/2016/11/02/la-impresion-3d-que-es-y-sus-tecnicas-de-impresion/>
- León, M., Fernández, A., & Rodríguez Hernández, J. (2019). Impresión 3D con materiales elastómeros. *Plásticos modernos*, 118, 1-11. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/335320270\\_Impresion\\_3D\\_con\\_materiales\\_elastomericos](https://www.researchgate.net/publication/335320270_Impresion_3D_con_materiales_elastomericos)
- Malacara, D. (2015). *Óptica básica* (Tercera ed.). Ciudad de México: Ediciones científicas universitarias.
- Meslin, D. (2010). *Compendio de óptica oftálmica: Materiales y tratamientos*. Obtenido de Essilor: <https://docplayer.es/113093912-Compendio-de-optica-oftalmica.html>
- Molina Bello, J., & Bravo Sarró, M. (2020). *Compensación y tratamiento de la presbicia*. [Tesis de Grado, Universidad Complutense de Madrid]. Obtenido de [https://eprints.ucm.es/id/eprint/65205/1/TFGPRESBICIA\\_JENNIFER\\_MOLINA\\_MARIA\\_BRAVO.pdf](https://eprints.ucm.es/id/eprint/65205/1/TFGPRESBICIA_JENNIFER_MOLINA_MARIA_BRAVO.pdf)
- Optisalud. (9 de Mayo de 2022). *Optisalud*. Obtenido de <https://optisalud.cl/pages/lentes-multifocales>
- Reyes Domínguez, J. (2013). Resistencia a los impactos: una mirada óptica. *Ciencia y tecnología para la salud visual y ocular*, 11(2), 113-125. doi:<https://doi.org/10.19052/sv.2368>
- Salvado Arques, J., & Fresnoy Bel, M. (2001). *Tecnología óptica: Lentes oftálmicas, diseño y adaptación*. Barcelona: Politecnos.
- Secretaría de Economía. (12 de Diciembre de 2002). *NMX-S-057-SCFI-2002 Seguridad-equipos de protección personal -protectores oculares primarios contra impactos*.

Obtenido de Diario Oficial de la Federación:  
[https://caisatech.net/uploads/XXI\\_2\\_MXD\\_MISH%204\\_NMX-S-057-SCFI-2002\\_R0\\_12DIC2002.pdf](https://caisatech.net/uploads/XXI_2_MXD_MISH%204_NMX-S-057-SCFI-2002_R0_12DIC2002.pdf)

Secretaría de Economía. (6 de Marzo de 2007). *NMX-S-056-SCFI-2007 Seguridad-equipos de protección personal-protectores faciales contra impactos-requisitos y métodos de prueba*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación:  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/240382/Nom-017.pdf>

Secretaría de Industria y comercio. (18 de Agosto de 1969). *Norma Oficial Mexicana. "Lentes de Seguridad para Anteojos de Protección contra Impactos y Radiaciones"*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación:  
[https://caisatech.net/uploads/XXI\\_2\\_MXD\\_MISH%204\\_NMX-S-001-1967\\_R0\\_18AGO1969.pdf](https://caisatech.net/uploads/XXI_2_MXD_MISH%204_NMX-S-001-1967_R0_18AGO1969.pdf)

Swinburne University of Technology. (10 de Mayo de 2022). *Focal length*. Obtenido de Cosmos: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/f/Focal+Length>

Tavarez Romero, S., & Hernández González, K. (Diciembre de 2021). Diseño de lentes esféricas oftálmicas mediante tecnología de impresión 3D con resina fotocurable. León.

## 12 ANEXOS





Figura 14 Diseño de las lentes ópticas en 3D

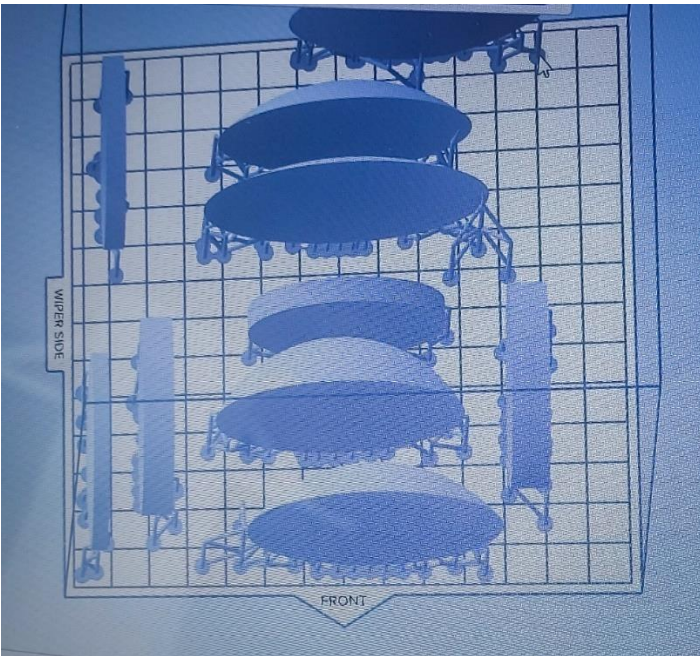


Figura 15 Disposición de las lentes ópticas en 3D.



Figura 16 Lentes esféricas diseñadas en 3D recién impresas y con estructura de soporte.



Figura 17 Lentes esféricas diseñadas con impresión 3D sin fotocurar.





Figura 18 Lentes esféricas diseñadas con impresión 3D en cabina de Formwash para lavado con alcohol isopropílico.



Figura 19 Lentes esféricas diseñadas en impresión 3D en proceso de fotocurado.



*Figura 20 Lente esférica con fotocurado después de la prueba de Drop Ball Test.*