

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN ESPEJO ÓPTICO LIGERO CON
APLICACIÓN ASTRONÓMICA**

Por:

ANA MARÍA BAUTISTA HERNÁNDEZ

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTORADO EN INGENIERÍA FÍSICA**

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L., 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
POSGRADO EN INGENIERÍA FÍSICA



**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN ESPEJO ÓPTICO LIGERO CON
APLICACIÓN ASTRONÓMICA**

PRESENTA:

ANA MARÍA BAUTISTA HERNÁNDEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORADO EN INGENIERÍA FÍSICA**

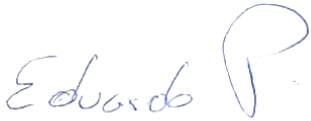
Eduardo Gerardo Pérez Tijerina
Director de Tesis

Daniel Aguirre Aguirre
Director de Tesis Externo


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Diseño y fabricación de un espejo óptico ligero con aplicación astronómica”, presentada por la alumna, **Ana María Bautista Hernández**, con número de matrícula **1878689**, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Física.


El Comité de Tesis



Dr. Eduardo Gerardo Pérez Tijerina
FCFM – UANL
Director



Dr. Daniel Aguirre Aguirre
ICAT – UNAM
Codirector



Dr. Francisco José Solís Pomar
FCFM – UANL
Vocal 1



Dr. Andrés Alberto Avilés Alvarado
FCFM – UANL
Vocal 2



Dr. Claudio Davet Gutiérrez Lazos
FCFM – UANL
Vocal 3



Dra. Flor Araceli García Castillo
FCFM – UANL
Vocal 4

Dr. Álvaro Eduardo Cordero Franco
Subdirector de Posgrado

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

A la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas (FCFM).

Al CONACYT

Por la beca otorgada durante el tiempo de duración de mis estudios de Doctorado.

A la DGAPA-UNAM, por el apoyo a través del PAPIIT No: IT100321, "Evaluación de superficies ópticas de forma libre fabricadas mediante manufactura aditiva".

Agradezco inmensamente el apoyo incondicional del Dr. Eduardo Pérez Tijerina, por siempre creer en mí. Gracias por el apoyo, tanto en el aspecto personal como en el profesional, que me ha ayudado siempre para salir triunfante ante la adversidad. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar y compartir su amplio conocimiento ha sido un aporte invaluable. Le agradezco el haberme facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo las actividades propuestas durante el desarrollo de esta tesis.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Daniel Aguirre Aguirre, por su importante aporte y participación en el desarrollo de esta tesis. Así mismo destacar su disponibilidad y paciencia en este trabajo.

Agradezco a cada uno de mis revisores de tesis ya que sin sus comentarios y sugerencias no hubiesen hecho posible este trabajo.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y a todas las personas que me han brindado su apoyo incondicional para completar exitosamente esta tarea.

.

ÁREA DE TRABAJO

El diseño de las piezas que se llevó a cabo, en el Laboratorio de Instrumentación Astronómica y Manufactura Avanzada (**LIAMA**) en la Facultad Ciencias Físico Matemáticas de la **UANL**.

La impresión de las piezas poliméricas se realizó en el Laboratorio de Instrumentación y Metrología Óptica (**LIMO**) en la Unidad de Investigación y Tecnología Aplicadas (**UNITA**) de la **UNAM**, ubicado en el Parque de Investigación e Innovación Tecnológica (PIIT), Apodaca, Nuevo León.

El pulido y metrología de las superficies poliméricas (PS), se realizó en las instalaciones del Taller de Óptica “Dr. Alejandro Cornejo Rodríguez “, perteneciente al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (**INAOE**), Puebla, Puebla.

El depósito de películas de aluminio se realizó en el Laboratorio de Nanociencias y Nanotecnología (**LN²**) de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la **UANL**.

Las caracterizaciones ópticas y el análisis de SEM y DRX se realizó en el laboratorio de caracterizaciones de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la **UANL**.

El análisis de XPS y AFM de las películas delgadas de aluminio se realizó en el Centro de Investigación de Matemáticas (**CIMAT**) subsede Monterrey, Nuevo León.

INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
ÁREA DE TRABAJO	VI
INDICE DE CONTENIDO	VII
INDICE DE TABLAS	IX
INDICE DE FIGURAS	X
SÍMBOLOS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIV
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
1. INTRODUCCIÓN	1
2 ANTECEDENTES	4
2.1 Espejos ópticos	4
2.2 Componentes ópticos	7
2.3 Fabricación tradicional de espejos ópticos	9
2.4 Manufactura aditiva (MA)	14
2.5 Aluminizado	21
2.5.1 Técnicas de fabricación de películas delgadas	22
2.5.2 Magnetron sputtering	26
3 HIPÓTESIS	31
4 OBJETIVOS	32
4.1 Objetivo General	32
4.2 Objetivo Especifico	32
5 ESTRATEGIA GENERAL	33
6 MATERIALES Y MÉTODOS	34
6.1 Materiales	34
6.2 Fabricación de piezas	35
6.2.1 Diseño CAD	35
6.2.2 Impresión	37
6.2.3 Post-procesado	38
6.2.4 Acabado final de piezas poliméricas	38

6.3 Pegado de la PS a la herramienta	39
6.3.1 Pegado del pad a la herramienta de vidrio	40
6.3.2 Proceso de esmerilado de PS.....	42
6.3.3 Proceso de Pulido de PS	44
6.4 Metrología óptica	45
6.4.1 Mediciones de irregularidades de la superficie	48
6.4 Aluminizado por Sputtering DC	49
6.5 Técnicas de caracterización	53
6.5.1 UV-Visible espectroscopia	53
6.5.2 Difracción de Rayos X (XRD).....	55
6.5.3 Espectroscopia de Foto electrónica de Rayos X (XPS).....	57
6.5.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	60
6.5.5 Microscopia de fuerza atómica (AFM)	62
7 RESULTADOS	65
7.1 Evaluación de la calidad superficial de PS.....	65
7.2 Aluminizado por Sputtering	72
7.3 Caracterización óptica de las películas de Al.....	73
7.3.1 UV-Visible	73
7.4 Caracterizaciones morfológicas de las películas de Al	74
7.4.1 Difracción de Rayos X (XRD).....	74
7.4.2 Espectroscopia de fotoelectrones dispersados (XPS)	76
7.5 Análisis de imágenes de Microscopia	78
7.5.1 Microscopio electrónico de barrido (SEM)	78
7.5.2 Microscopio de fuerza atómica (AFM)	79
8 CONCLUSIONES	80
9 RECOMENDACIONES	81
10 REFERENCIAS	82
11 FICHA BIBLIOGRÁFICA	91
12 LOGROS ALCANZADOS	92

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tecnologías de fabricación 3D ^{45,46}	15
Tabla 2. Descripción de las piezas de diseño en 3D.	38
Tabla 3. Tiempos de esmerilado.....	43
Tabla 4. Índice de refracción.....	70
Tabla 5. Comparación del el peso y la densidad de la resina con el vidrio Bk7.71	
Tabla 6. Comparación de las piezas poliméricas y el vidrio Bk7 sólido.	71

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de los espejos ópticos ¹	5
Figura 2. Comparación de las escalas de los Telescopios.	6
Figura 3. Representación esquemática de una Lente.....	7
Figura 4. Esquema de un rayo de luz incidente sobre una superficie reflectora. 8	
Figura 5. Cortadora de vidrio ⁴⁰	9
Figura 6. Esquema de proceso de generado sobre espejo de vidrio ⁴¹	10
Figura 7. Máquina pulidora.	11
Figura 8. Esquema de pulido tradicional de superficies ópticas.	12
Figura 9. Es quema del interferómetro Zygo®.....	13
Figura 10. Esquema del proceso de impresión 3D.	17
Figura 11. Temperatura tiempo de curado para resina utilizada en SLA ⁵⁰	19
Figura 12. Partes del funcionamiento de una impresora 3D SLA ⁵¹	20
Figura 13. Técnicas de deposición de películas delgadas ⁵⁸	23
Figura 14. Esquema de pulverización catódica.....	27
Figura 15. Cámara de deposición por pulverización catódica.....	27
Figura 16. Esquema del crecimiento de la película.....	29
Figura 17. : Diseño CAD de las piezas. (A) pieza plana con estructura interna sólido, (B) pieza plana con estructura en forma de panal y (C) cóncavo R100. 35	
Figura 18. Software PreFrom de la impresora.	36
Figura 19. Proceso de fabricación piezas Impresora Form3 FormLabs, (B) Form Wash y (C) Form Cure.....	37
Figura 20. Descripción del proceso de pegado de la herramienta metálica con la piza de resina Clear.	39
Figura 21. Proceso de pegado del pad a las herramientas de trabajo para el proceso de esmerilado y pulido. El pad verde (rugoso), pad café (suave a terciopelado) y pad azul (rugoso).....	40
Figura 22. Piezas cóncavas de resina Clear antes del esmerilado enumerados	41

Figura 23. Proceso de esmerilado de las piezas de resina Clear.	42
Figura 24. Visualización en el microscopio de la superficie esmerilada notamos rayas.	43
Figura 25. Proceso de pulido y como quedo finalmente la pieza.	44
Figura 26. Medición de las irregularidades con el Interferómetro Zygo.	48
Figura 27. Sistema de Magnetron Sputtering utilizado para la fabricación de películas delgadas de Aluminio.....	49
Figura 28. Proceso de disposición de películas delgadas.	50
Figura 29. Esquema del proceso de deposición de películas de aluminio en los sustratos poliméricos.	52
Figura 30. Esquema óptico de un espectrofotómetro ⁶⁸	54
Figura 31. Representación gráfica Ley de Bragg ⁶⁹	56
Figura 32. Sistema interno de espectroscopia Foto electrónica de Rayos X. ...	57
Figura 33. Notación de picos XPS.	59
Figura 34. Esquema de las señales generadas en el SEM interactuando con la muestra ⁷⁵	60
Figura 35. Funcionamiento del AFM.	61
Figura 36. Esquema del cantiléver y piezoeléctrico.	63
Figura 37. Funcionamiento operativo del AFM ⁷⁷	64
Figura 38. Interferómetro tipo Fizeau de la marca Zygo.	65
Figura 39. Medición de las irregularidades de la superficie diseño de panel. ...	66
Figura 40. Medición de las irregularidades de la superficie de una superficie cóncavo con un R100.	67
Figura 41. Medición de las irregularidades de la superficie de una superficie cóncavo con un R200.	68
Figura 42. Micrografía AFM de la superficie polimérica.	69
Figura 43. Se observa la película de aluminio depositada sobre el sustrato impreso en 3D.....	72
Figura 44. Grafica Uv-Vis reflectancia de Al.	73

Figura 45. (a) Patrón de difracción de las películas de Aluminio a referencia (b) patrón obtenido depositadas por sputtering. 75

Figura 46. Espectro de las películas de Aluminio. 76

Figura 47. Escaneo XPS de espectros de las películas de Aluminio depositadas. 77

Figura 48. Imágenes del SEM de películas de Aluminio 78

Figura 49. Micrografías 2D de AFM de las películas de aluminio depositadas por magnetron sputtering (A) un campo de visión de $1\mu m \times 1\mu m$. (B) un campo de visión de $5\mu m \times 5\mu m$ 79

SÍMBOLOS

β	Beta
α	Alfa
μm	Micrometro
$^{\circ}\text{C}$	Grados celsius
λ	Longitud de onda
\AA	Angstrom
rpm	Revoluciones por minuto
psi	Libras por pulgada
\pm	Más o menos

LISTA DE ABREVIATURAS

UV	Ultravioleta
VIS	Visible
DRX	Difracción de Rayos x
AFM	Microscopia de Fuerza Atómica
XPS	Espectroscopia de Fotoelectrones de Rayos X
SEM	Microscopio Electrónico de Barrido
PVD	Deposición Física de Vapor
CVD	Deposición Química de Vapor
SPUTTERING	Pulverización Catódica
Be	Berilio
Ni	Níquel
Au	Oro
Ag	Plata
Al	Aluminio
3D	tridimensional
MA	Manufactura Aditiva
CAD	Diseño Asistido por Computadora
PR	Prototipo Rápido
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
SLA	Estereolitografía
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada
STL	Lenguaje de Teselado Estándar
DLP	Procesamiento Digital por Laser
FDM	Modelado por Deposición Fundida
PS	Sustratos Poliméricos
PLA	Ácido Poli láctico
PC	Policarbonato
DC	Corriente Continua
RF	Radio frecuencia
Torr	Unidad de presión (133.322 Pa.)
O	Oxígeno
SCCM	Centímetros Cúbicos Estándar por Minuto
Å	Angstroms
mA	Miliamperios
eV	Electronvoltio
mbar	Milibares
nm	Nanómetro

Ar	Gas Argón
N	Nitrógeno
Ar ⁺	Iones positivos de argón
Target	Blanco metálico
V	Voltio
W	Vattio
PV	Pico Valle
RMS	Raiz Cuadrática Media

RESUMEN

La impresión 3D de productos ópticos, utilizando métodos como la estereolitografía (SLA) en la manufactura aditiva, ha generado un gran interés en la industria óptica. Este estudio, se presenta el diseño, la fabricación y la caracterización de espejos poliméricos impresos en 3D. Se comparan las propiedades ópticas de la resina con los estándares ópticos convencionales, y se realiza un análisis detallado de la transmisión óptica, la uniformidad de las piezas y la calidad de la superficie.

La caracterización se llevó a cabo mediante la medición de la transmitancia, el índice de refracción y la rugosidad. La transmitancia se evaluó utilizando un espectrógrafo que cubre un rango de longitudes de onda de 200 nm a 1000 nm. El índice de refracción se midió utilizando un refractómetro de Abbe modelo WY1A. La irregularidad de la superficie óptica se evaluó mediante interferometría utilizando un interferómetro comercial de la marca Zygo.

Además, se depositaron películas delgadas de aluminio sobre las superficies poliméricas para su uso como espejos ópticos. Estos depósitos se realizaron mediante erosión iónica o DC sputtering. Las películas se caracterizaron utilizando técnicas como Uv-Vis, XPS, DRX, SEM y AFM para evaluar sus propiedades ópticas y morfológicas.

En resumen, este trabajo aborda el diseño, la fabricación y la caracterización de espejos poliméricos impresos en 3D, comparando las propiedades ópticas de la resina con los estándares convencionales. Además, se depositaron películas delgadas de aluminio sobre las superficies poliméricas y se evaluaron sus propiedades ópticas y morfológicas. Estos avances tienen el potencial de revolucionar la industria óptica al permitir la fabricación de componentes ópticos personalizados de manera más eficiente y asequible.

ABSTRACT

3D printing of optical products, using methods such as stereolithography (SLA) in additive manufacturing, has generated great interest in the optical industry. In this study, the design, fabrication and characterization of 3D printed polymeric mirrors are presented. The optical properties of the resin are compared with conventional optical standards and a detailed analysis of optical transmission, part uniformity and surface quality is performed.

The characterization was carried out by measuring transmittance, refractive index and roughness. Transmittance was evaluated using a spectrograph with wavelengths from 200 nm to 1000 nm. The refractive index was measured using an Abbe refractometer model WY1A. Optical surface irregularity was evaluated by interferometry using a commercial Zygo brand interferometer.

In addition, aluminum thin films were deposited on the polymeric surfaces to be used as optical mirrors. These deposits were made by ion erosion or DC sputtering. The films were characterized by techniques such as Uv-Vis, XPS, XRD, SEM and AFM to evaluate their optical and morphological properties.

In summary, this work addresses the design, fabrication and characterization of 3D printed polymeric mirrors, comparing the optical properties of the resin with conventional standards. In addition, aluminum thin films were deposited on the polymeric surfaces and their optical and morphological properties were evaluated. These advances have the potential to revolutionize the optical industry by enabling the fabrication of customized optical components in a more efficient and affordable manner.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de espejos astronómicos ligeros es un tema en el campo de la astronomía y la ingeniería. Los telescopios modernos necesitan grandes espejos que sean lo suficientemente grandes y precisos para recopilar la mayor cantidad de luz posible y producir imágenes de alta calidad. Sin embargo, estos espejos pueden ser muy pesados y difíciles de fabricar, lo que ha llevado a la búsqueda de materiales y técnicas más ligeras y eficientes¹.

En la actualidad, existen varias soluciones para producir espejos ligeros, como el uso de materiales como la cerámica, resinas o el vidrio de baja densidad, y técnicas como la colocación de estructuras hexagonales en lugar de una sola pieza de vidrio².

Esto puede mejorar significativamente la capacidad de los telescopios para estudiar el espacio en más detalle y con mayor precisión. El perfeccionamiento del telescopio ha permitido la exploración de las superficies de los planetas, el descubrimiento de diversas estrellas débiles y por ende la medición de distancias estelares^{1,2}.

Es de resaltar que, a lo largo de la historia de la humanidad el hombre en su afán de buscar respuestas de cómo está formado nuestro sistema solar, se ha adentrado en la investigación en la fabricación de componentes ópticos para observar el universo. Es por esto que, la óptica es la ciencia más relevante para varias disciplinas, en las que destaca ingeniería y, la astronomía, ya que en todas las disciplinas se utilizan instrumentos ópticos en formas de dispositivos e instrumentos que van desde los espejos, lentes y cámaras, hasta los microscopios, láseres y telescopios^{3,4}.

Particularmente en la astronomía, la cual es la ciencia encargada del estudio de todos los fenómenos relacionados con los objetos celestes, la óptica juega un papel fundamental. El instrumento óptico que hace posible la participación en el progreso de la ciencia es el telescopio^{2,5}.

El progreso e innovación de los espejos ópticos han permitido el desarrollo de los satélites, así como los observatorios terrestres.

Es por ello que la fabricación de espejos para telescopios es un desafío, esto se debe a las tolerancias y a la calidad óptica⁶. La fabricación de espejos ópticos requiere mucho tiempo de fabricación, esto debido a que las superficies a fabricarse pasan por diferentes procesos los cuales son: generado, esmerilado y pulido, esto es debido a los requisitos para crear superficies con calidades que pueden llegar a alcanzar alrededor de $>\lambda/20$ ⁶.

Esta fabricación puede desarrollarse ya sea por métodos tradicionales, o por métodos modernos donde actualmente se está empleando la ingeniería aditiva.

En los últimos años, la manufactura aditiva ha cobrado un gran interés en el campo de la óptica debido al amplio panorama para la fabricación de componentes ópticas en términos de forma y complejidad de la superficie, calidad óptica, reducción de peso y costos^{7,8}. En la fabricación aditiva de componentes ópticas el proceso inicia en la creación de un modelo 3D, después de este modelado se imprime en alguna impresora con tecnología 3D, para finalmente realizar un post-procesado de la pieza, por lo que los tiempos de realización son más cortos y los costos son mucho menores^{9,10,11,12,13}. Pero con la desventaja, por ahora, de no poder alcanzar calidades altas ($<\lambda/2$).

La mayoría de las componentes están hechas de vidrio, metal, polímeros y otros materiales que no tienen la capacidad de reflejar la luz incidente. Es por eso que los espejos se recubren con una capa fina de aluminio u otro material reflectante para mejorar su capacidad de reflejar la luz. Es importante destacar que el tipo de recubrimiento utilizado puede afectar significativamente el rendimiento de las componentes ópticas, por lo que necesario elegir detalladamente el recubrimiento adecuado para cada aplicación específica^{12,13,14,15}.

Por otro lado, para la elaboración de espejos se crea una capa delgada en el sustrato mediante la deposición de iones, por medio de distintas técnicas como la evaporación termal, deposición física de vapor (PVD) o Sputtering^{16,17,18}. Los materiales más utilizados en los depósitos son el Berilio (Be), Níquel (Ni), Oro

(Au), Plata (Ag) y Aluminio (Al)^{19,20}. El aluminio es un material abundante en la tierra por lo que lo hace muy asequible, además, es un material denso, dúctil, con alta resistencia a la corrosión, además de tener una alta reflectancia^{20,21}.

Por lo anterior descrito, en este trabajo se diseñó, fabrico y se caracterizó, un espejo óptico, el cual fue construido mediante impresión 3D con la técnica de estereolitografía (SLA)^{22,23,24,25,26} depositando una película reflectante de Aluminio por la técnica de Sputtering DC o pulverización catódica^{27,28,29}.

2 ANTECEDENTES

2.1 Espejos ópticos

En el campo de la óptica y la astronomía, los espejos ópticos han tenido un papel importante, especialmente en la construcción de telescopios modernos. La utilización de espejos ópticos en la astronomía tiene una historia que se remonta a varios siglos^{2,3,4}. En la antigüedad, los astrónomos utilizaban principalmente lentes y espejos planos para observar el cielo. Sin embargo, se discute la identidad del verdadero inventor del telescopio a lo que se le atribuye a Hans Lippershey era un fabricante de lentes. Por otro lado, entre 1609-1610 el astrónomo Italiano Galileo Galilei mostro el primer telescopio refractor registrado. Con este descubrimiento la era de la astronomía revolucionó al grado de que más investigadores se unieron para realizar innovaciones al instrumento que les permitía adentrarse en el universo en la búsqueda de respuestas^{1,2}.

Existe una multitud de configuraciones de telescopios, que pueden agruparse en tres tipos: los refractores o dióptricos, constituido principalmente con un arreglo de lentes, reflectores o catóptricos en este caso está constituido por un arreglo de espejos y finalmente están los catadióptricos, que están constituidos por la combinación de lentes y espejos^{30,31,32,5}.

Por otro lado, en la antigüedad los espejos para los telescopios reflectores se realizaban de metal brillante, la cual consistía en una mezcla de cobre y estaño. Este proceso evolucionó por el químico alemán Justus von Liebig con el descubrimiento de un método para colocar una película de plata sobre la superficie del sustrato que se usa como soporte para generar el revestimiento. Con el paso del tiempo los espejos con baño de plata fueron aceptados no solo por la facilidad de realizarlos sino porque se podía repetir el baño de plata en cualquier momento sin dañar su forma.

Sin embargo, la evolución de los materiales utilizados para la realización de la óptica de telescopios refractores o hechos de espejos de bronce, marcó la entrada de telescopios reflectores de vidrio o (vitro)cerámica, alrededor de 1900. El primer espejo de vidrio fue fabricado por León Foucault en 1956. Este avance tecnológico permitió superar las deficiencias de los espejos de bronce clásicos, cuya oxidación degradaba las imágenes y requería su frecuente repulido. Con el tiempo se descubrió que el revestimiento de plata era susceptible a la oxidación y a la degradación con el uso. En el siglo XX, se introdujo el revestimiento de aluminio como una alternativa más duradera, por su alta reflectante y resistente a la corrosión, lo que lo convierte en un material ideal para los espejos ópticos en la astronomía. Durante más de 400 años, el diámetro de los espejos ha seguido aumentando este progreso, ver en la Figura 1, incluso se ha vuelto exponencial en los últimos 25 años⁵.

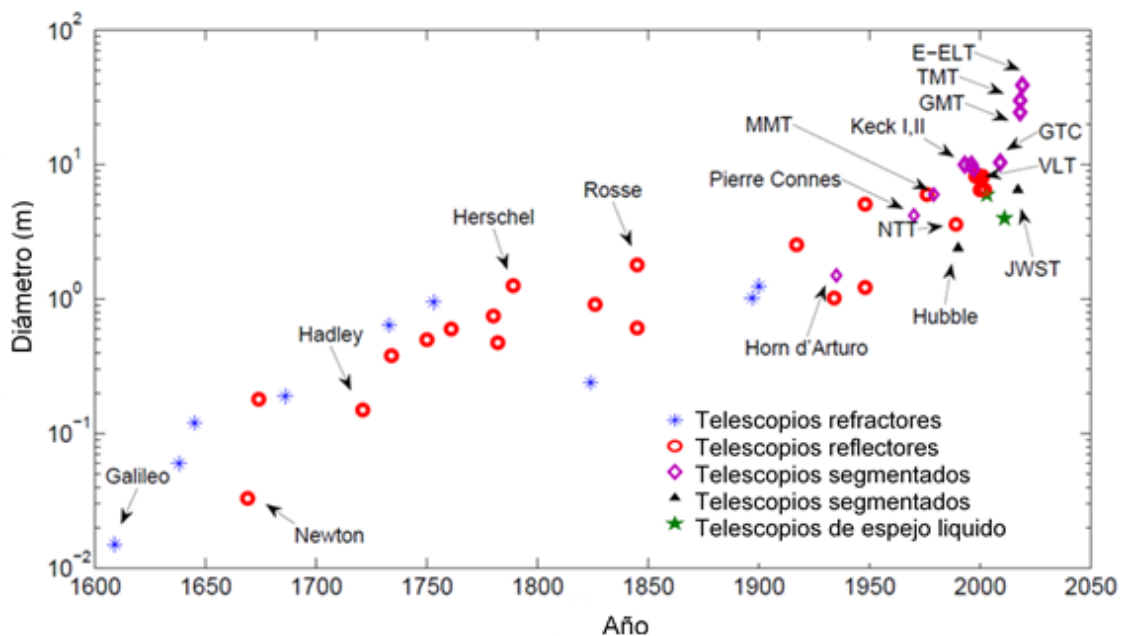


Figura 1. Evolución de los espejos ópticos¹.

Sin embargo, es común encontrar en los observatorios telescopios de diferentes diámetros, ver figura 2, donde se observa los diferentes diámetros de las superficies ópticas, algunos observatorios ya se encuentran y otras apenas están en proceso de construcción. Esto debido a que la observación en el visible a las

longitudes de onda del infrarrojo cercano medio tuvo lugar alrededor de 1970, con la mejora de los detectores y el descubrimiento de lugares de observación que permitan una buena transmisión atmosférica. Los telescopios que alcanzaron los 10 m de diámetro marcaron la década de 2000. En el 2020 con la llegada del E-ELT (European Extremely Large Telescope) el diámetro alcanzó 39 m. El aumento de los diámetros de los telescopios está directamente relacionado con el aumento de la nitidez de la imagen captada. Cuanto mayor sea la intensidad recogida, más detectables serán las fuentes débiles. Cuanto mejor sea la resolución angular, más será posible acceder a detalles finos y evitar confundir diferentes objetos o fenómenos. El anhelo del conocimiento ha ideado una infinidad de, los cuales nos han servido para contemplar lo que nos rodea a lo que ha impresionado al hombre^{33,34}.

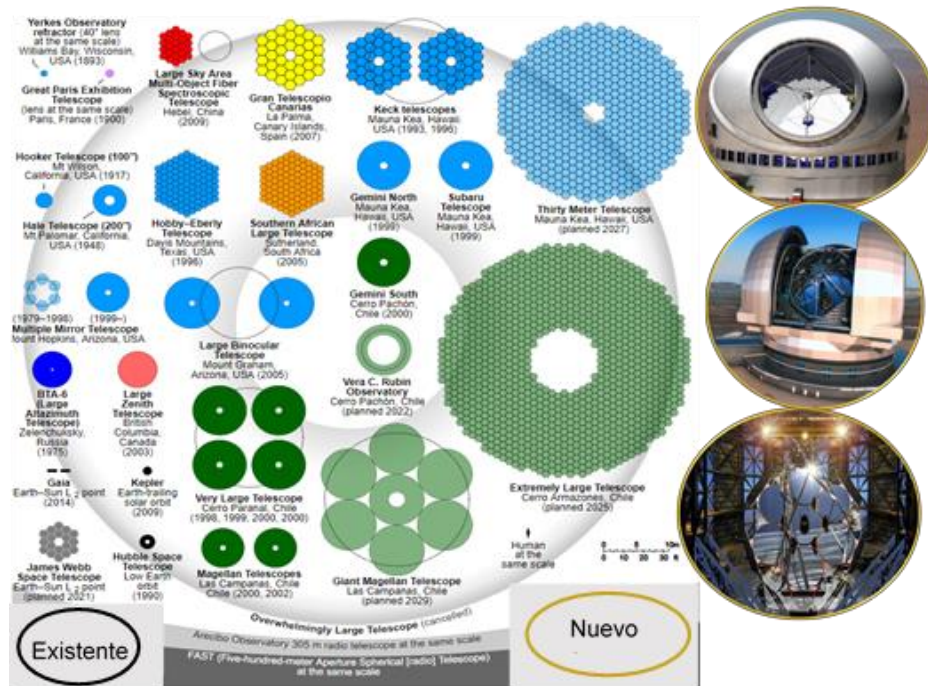


Figura 2. Comparación de las escalas de los Telescopios^{35,5}.

2.2 Componentes ópticos

Las lentes, prismas y espejos son componentes ópticos comunes de verlos en la vida cotidiana. Tales instrumentos son binoculares, cámaras fotográficas, cámaras oscuras, microscopios y telescopios^{36,37}.

La variedad de componentes es inmensa a lo que se pueden dividir en dos grupos: de (transmisión y de reflexión).

Los de transmisión son lentes, filtros, prismas, polarizadores, divisores de haz, entre otros. En el grupo de reflexión se menciona los espejos. En la figura 3, se representa el concepto básico de las lentes, en la cual un objeto pasa rayos a través de la componente óptica y esta forma una imagen en un plano definido.

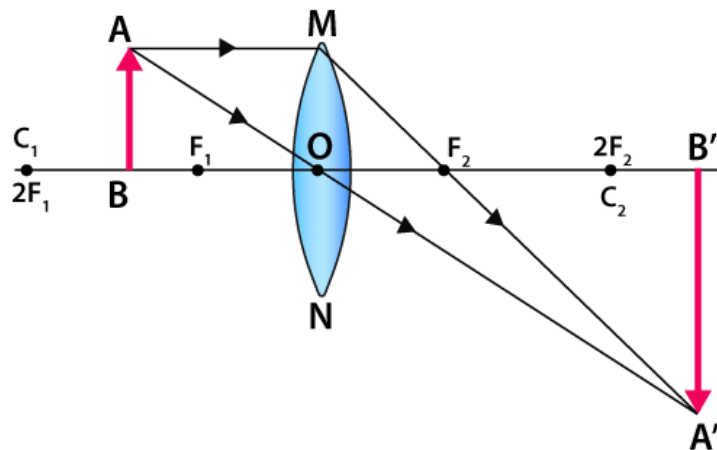
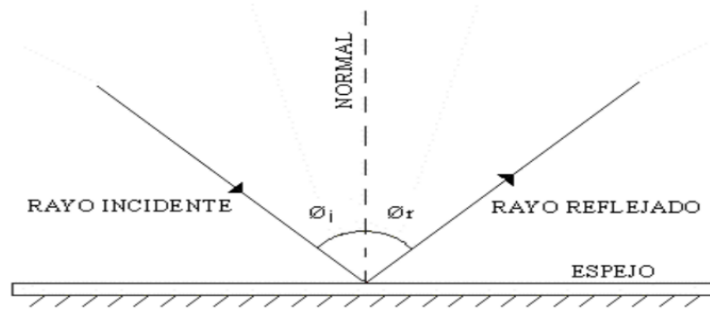


Figura 3. Representación esquemática de una Lente.

Los espejos (Figura 4) se utilizan para redirigir, generar imágenes y enfocar la luz y se pueden encontrar de muchos tamaños, formas y configuraciones. Pueden estar hechos de vidrio, metal o plástico; pueden ser planos, esféricos o esféricos; y pueden estar revestidos. Las propiedades reflectantes dependen de la longitud de onda, el ángulo de incidencia y la polarización de la luz incidente^{37,38}.



Reflexión regular o especular

Figura 4. Esquema de un rayo de luz incidente sobre una superficie reflectora.

Las especificaciones fundamentales del espejo incluyen la reflectividad a la longitud de onda adecuada, las dimensiones y tolerancias, la calidad de la superficie, la apertura clara y la estabilidad mecánica y térmica.

Los espejos de primera superficie, son espejos que tienen una capa reflectante aplicada directamente sobre la superficie del material base, los espejos de primera superficie reflejan la luz desde la misma superficie en la que incide.

Entre los diferentes tipos de espejos, se encuentran los llamados espejos planos, los cuales se utilizan normalmente para redirigir la luz a lo largo de un camino óptico o para plegar sistemas ópticos. Transfieren la radiación con un efecto mínimo sobre el frente de onda o la calidad de la imagen, y se pueden combinar para cambiar la orientación de una imagen (similar a los reflejos a través de un prisma).

2.3 Fabricación tradicional de espejos ópticos.

En la actualidad, el procedimiento tradicional de fabricación de espejos suele ser laborioso y los tiempos de realización son por lo general largos, esto debido a que las superficies a fabricarse pasan por diferentes procesos como: corte, pegado, redondeo, generado, esmerilado, pulido y las pruebas interferométricas de las superficies ^{39,40,41}.

Es decir, cada proceso contribuye para la precisión de la forma final, así como la rugosidad y los defectos cosméticos de la superficie. El objetivo principal en la fabricación de espejos es producir superficies reflectantes de alta calidad, precisas, altamente reflectantes, para lograr u para obtener mejores resultados de la calidad de las imágenes siempre apegándose al diseño óptico. A continuación, se describen los procesos a detalle:

En el proceso tradicional de fabricación de espejos, se inicia con un bloque de vidrio óptico, el cual es llevado a una maquina cortadora, donde el corte se realiza de acuerdo con las especificaciones deseadas, generalmente se lleva acabo el corte dentro de unos pocos milímetros de la dimensión finales, ver figura 5.



Figura 5. Cortadora de vidrio⁴¹.

Después de este proceso las superficies adquieren la forma cóncava, convexa o planas, por lo que los radios de curvatura varían de acuerdo con los valores de diseño. Los radios de curvatura son realizados usando una máquina generadora (ver figura 6), donde se debe considerar que un mal generado puede ocasionarnos problemas en los procesos siguientes, incluso no se podría obtener la tolerancia óptica deseada. Dado que existe una diferencia de curvatura en las piezas ópticas, esto ocasionaría deformaciones.

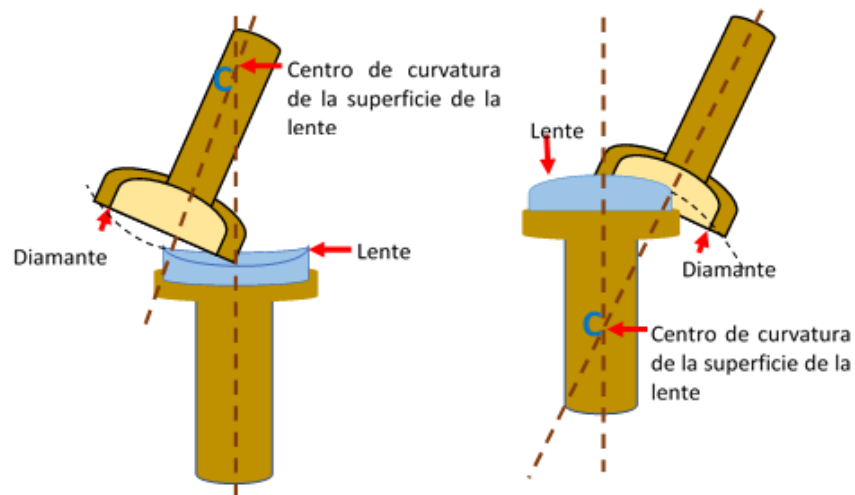


Figura 6. Esquema de proceso de generado sobre espejo de vidrio⁴².

Una vez que se ha generado la forma y tamaño a la componente óptica, se inicia el proceso de esmerilado en la cual se lleva a cabo en una maquina pulidora, ver figura 7. La técnica consiste en utilizar diferentes abrasivos de partículas como oxido de aluminio, carburo de boro y carburo de silicio de grano grueso de 120, 40, 25,15 y 5 micras, en la cual la pieza y la herramienta se frotan entre sí, mientras se mantiene entre ellas el abrasivo que generalmente es una solución acuosa. Las partículas causan pequeñas fracturas en la superficie a esmerilar, lo que resulta en la eliminación de material. En la remoción de material de la superficie que se está trabajando se van eliminando las imperfecciones conocidas como poro y raya hasta llegar a un acabado fino.

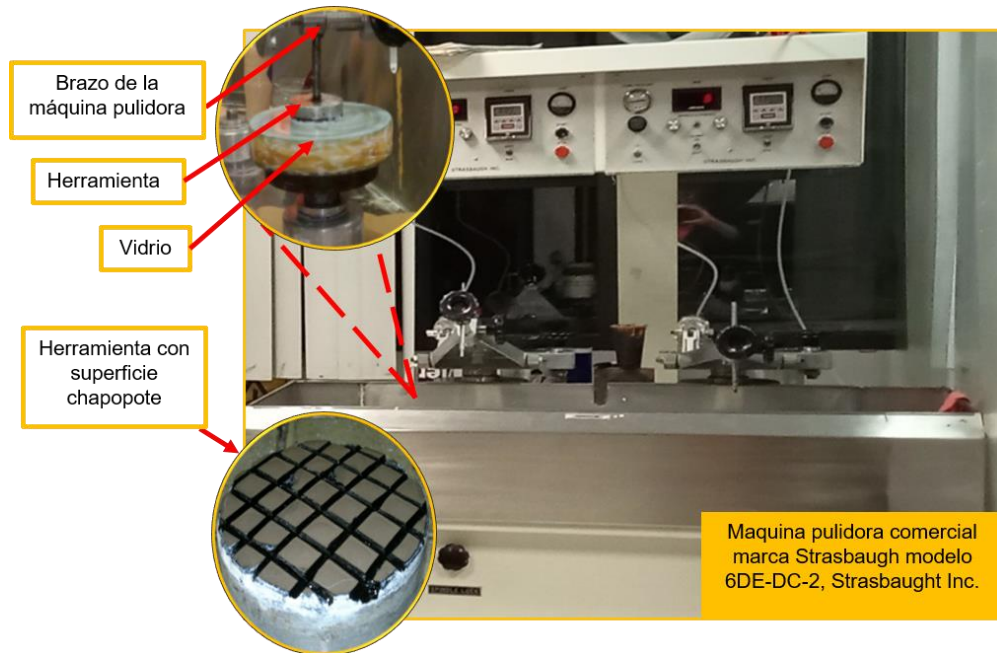


Figura 7. Máquina pulidora.

Finalmente, se realiza el pulido de la superficie, este pulido consiste en remover material sobre el vidrio, metal, polímero, entre otros materiales, hasta obtener la superficie deseada.

El pulido consiste en la rotación y desplazamiento sobre el vidrio de una herramienta montada en el brazo de la maquina pulidora, manteniendo entre la herramienta y el vidrio una disolución de abrasivo, es decir una mezcla de pulidor (óxido de aluminio) con agua^{40,42}. En el pulido se utilizan compuestos abrasivos como óxido de cerio, óxido de zirconio y óxido de aluminio con tamaños de grano de 1.4, 0.5, 0.1 micras. En la figura 8, se presenta el esquema del proceso de pulido.

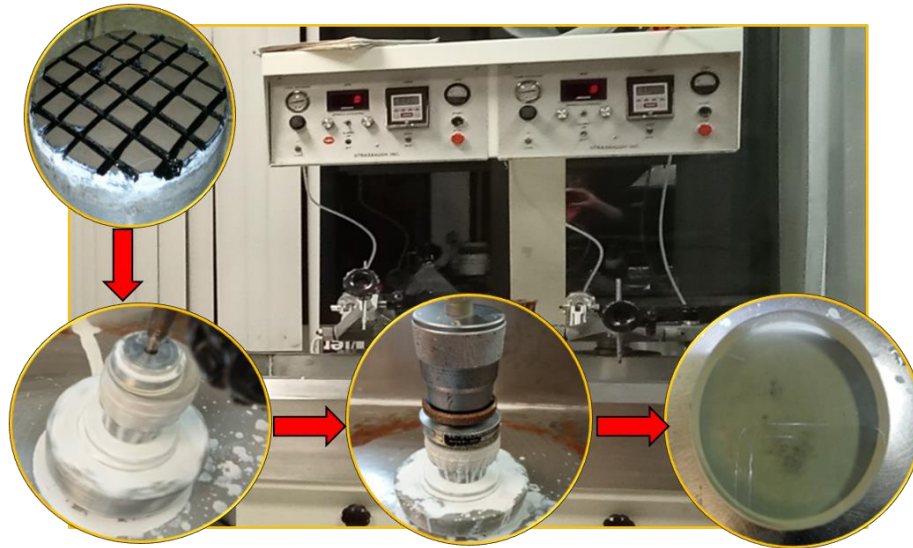


Figura 8. Esquema de pulido tradicional de superficies ópticas.

En este último proceso de pulido, la forma de la superficie fabricada se mide constantemente hasta obtener la forma deseada. Esta medición se realiza mediante interferometría, donde, el interferómetro está diseñado para una amplia variedad de aplicaciones que permiten la evaluación de las superficies y materiales ópticos. Por su versatilidad puede ser utilizado en diferentes configuraciones, debido al sistema a al cual está basado. Con este sistema se pueden probar de manera cualitativa y cuantitativa una gran variedad de superficies ópticas.

En la figura 9, El interferómetro comercial tipo Fizeau cuenta con una superficie de referencia con calidad $PV= 1/22.2\lambda$ y $RMS= 1/166.6\lambda$ donde tiene $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$. El interferómetro puede probar una gama completa de propiedades ópticas^{39,40,41}.

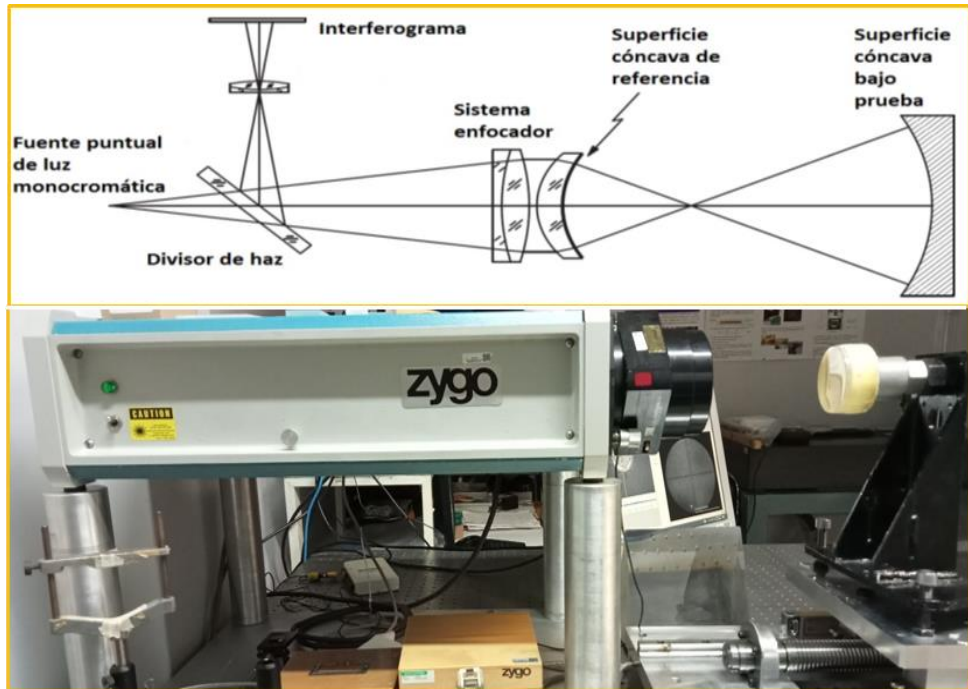


Figura 9. Es quema del interferómetro Zygo®.

2.4 Manufactura aditiva (MA)

La manufactura aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D se refiere a métodos para crear objetos tridimensionales mediante la adición de capas sucesivas de material. La ventaja de la impresión 3D es que permite la creación de objetos con geometrías complejas que serían difíciles o imposibles de lograr con los métodos de fabricación convencionales. Esto brinda la oportunidad de diseñar y fabricar productos innovadores que se adapten a necesidades específicas. La impresora 3D es una maquina controlada por una computadora y utiliza archivos STL (lenguaje de triangulo estándar) para crear un objeto a partir de los modelos de diseño asistido por computadora (CAD)⁴³.

También es definida por el comité internacional ASTM (American Society for Testing and Materials) y su norma F42 en tecnologías de MA como el “proceso de unión de materiales para fabricar objetos a partir de datos de modelos tridimensionales”⁴⁴. En la tabla 1, se muestra la clasificación de las 7 técnicas. En cuanto a los materiales, la MA ha ampliado su rango de aplicaciones al permitir la utilización de una gama cada vez mayor de materiales. Además de los tradicionales plásticos y resinas, ahora se pueden utilizar cerámicas, polímeros avanzados y metales, incluyendo aleaciones metálicas. Esto ha ampliado aún más las posibilidades de la tecnología de MA y ha impulsado su adopción en industrias donde se requieren materiales más resistentes y duraderos⁴⁵.

Una de las ventajas clave de la tecnología de MA es su flexibilidad. Puede utilizarse en una amplia variedad de sectores industriales, como la automoción, la aeroespacial, la medicina, la arquitectura y la joyería, entre otros. Cada sector puede aprovechar las capacidades únicas de la MA para producir piezas y componentes personalizados de manera eficiente.

El lado ventajoso de AM es que no requiere herramientas de moldeo y su consumo de tiempo relativamente menor para fabricar piezas personalizadas,

que son los parámetros más beneficiosos para un sistema de fabricación robusto de prototipos^{45,46}

La AM ha experimentado un gran desarrollo desde su aparición en 1984, presentada por Chuck Hull como la primera tecnología comercial de prototipo rápido conocida como estereolitografía (SLA)⁴⁷.

Tabla 1. Tecnologías de fabricación 3D^{45,48}.

Técnica	Tecnología	Materiales
Sinterizado Láser Selectivo (SLS)	Fusión por haz de electrones (EBM) Sintonización selectiva por láser (SLS)	Proceso de manufactura aditiva en el cual es realizada por una cama de polvo
Inyección aglutinante Binder Jetting (DP)	Impresión a base de yeso (PP).	Capa de polvo y deposición de gotas de aglutinante
Modelado por Deposición Fundida (FDM)	Extrusión en caliente (FDM) (FFF)	El material se conduce a través de una boquilla. Termoplásticos (PLA, ABS)
Inyección de material Material Jetting	Multi-jet modeling	Proceso donde gotas del material es depositado selectivamente
Deposición de energía dirigida Direct energy deposition	Deposición de metales por laser, (LMD)	Fundición del material que se está depositando
Laminación por capas Sheet Lamination	Fabricación de objetos laminados (LOM).	Unión de una hoja del material para formar un objeto Papel, papel de aluminio capa de plástico.
Fotopolimerización en tanque. Vat Fotopolymeriation	Estereolitografía (SLA) -Procesamiento de luz digital (DLP)	Proceso en el cual se cura la resina líquida mediante la polimerización activada por luz UV. Fotopolímeros y resinas fotosensibles

Hoy en día, la impresión 3D es atractiva por el rápido crecimiento y versatilidad en la fabricación de objetos reduciendo costos^{48,49}.

La fabricación mediante la tecnología de impresión 3D es un desafío actual debido a varias razones: la primera es debido a la precisión requerida, ya que la óptica macroscópica, como lentes y espejos, requiere una alta precisión en la forma y las características ópticas. La impresión 3D puede tener limitaciones en términos de precisión y resolución, lo que dificulta lograr los estándares exigidos para la óptica de alta calidad. Después la óptica requiere superficies lisas y libres de imperfecciones, ya que cualquier irregularidad puede afectar la calidad de la imagen o la propagación de la luz y por último está el procesamiento posterior requerido, donde a menudo, es necesario realizar procesos posteriores, como pulido o recubrimiento, para mejorar la calidad de la superficie y las características ópticas de los componentes impresos en 3D.

A pesar de estos desafíos, se están realizando avances en la fabricación de óptica mediante impresión 3D, y se están explorando nuevos materiales y procesos para superar estas limitaciones^{50,51}.

En esta tesis se centra en los procesos de fotopolimerización en cuba en los que el fotopolímero líquido se cura selectivamente mediante polimerización activada por luz. En la figura 10 se muestra el esquema del proceso que se debe cumplir para la impresión 3D de cualquier objeto. El proceso aplica para cualquier tipo de impresión.

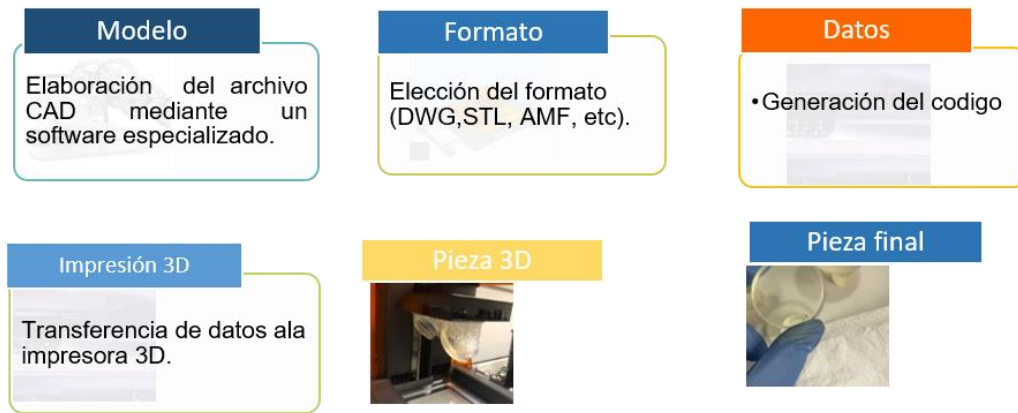


Figura 10. Esquema del proceso de impresión 3D.

2.4.1 Estereolitografía (SLA)

En el avance de la tecnología de impresión 3D se destaca la Estereolitografía (SLA), esta tuvo sus inicios en estados unidos y Francia. Patentada en 1984 por Charles Hull, la primera máquina comercial desarrollada por 3D Systems en 1988. En la actualidad es la más utilizada para la creación de prototipos, en todas las áreas de la industria gracias a su rapidez y bajo costo en generación de piezas. El proceso de la estereolitografía se basa en utilizar un tanque donde se encuentra almacenada una resina líquida foto curable que se solidifica mediante la luz de un láser ultravioleta⁵¹.

El láser solidifica la resina la cual se compone de moléculas orgánicas, monómeros, oligómeros, foto iniciadores y otros aditivos, que impactan significativamente en la calidad óptica de los modelos hechos con esta tecnología⁵².

El tiempo requerido para la materialización de una pieza está comprendido entre horas e incluso días dependiendo del diseño y complejidad de la pieza. Otras causas que influyen de manera directa en el tiempo de impresión es el espesor de cada capa y la velocidad del láser. El proceso de limpieza consta de sumergirlo las piezas u objetos impresos en alcohol isopropílico también conocido como isopropanol, esto es necesario para eliminar el exceso de resina no solidificada. El objetivo del proceso de post-curado es potencializar las conexiones moleculares que se generan como parte del proceso de la generación de la pieza. Por lo cual la pieza se introduce a una cámara de curado la cual consta en la exposición al calor y la luz provoca que la estructura del polímero se vea reforzado. El refuerzo en los enlaces desencadena un mejoramiento en las propiedades mecánicas de la pieza.

De acuerdo con las regulaciones previstas por la ASTM, se puede obtener un tiempo y una temperatura adecuada para las resinas existentes en el mercado^{47,48}. La consideración de esta característica se debe a que se asocia al

módulo de elasticidad con la plenitud de unión de los enlaces que conforman las diversas cadenas del polímero^{48,52}.

La temperatura y el tiempo del curado está en función de la elasticidad. Cuando de la temperatura de post curado es elevada se corre el riesgo de que la pieza sufra algún tipo de deformación. En contraste, la temperatura elevada acelera el tratamiento del elemento en cuestión. Por lo general los proveedores de las resinas, detallan un tiempo de curado y una temperatura gracias a los estudios realizados bajo la normativa ASTM. En la figura 11, se muestra el tiempo de curado recomendado por el fabricante de las resinas.

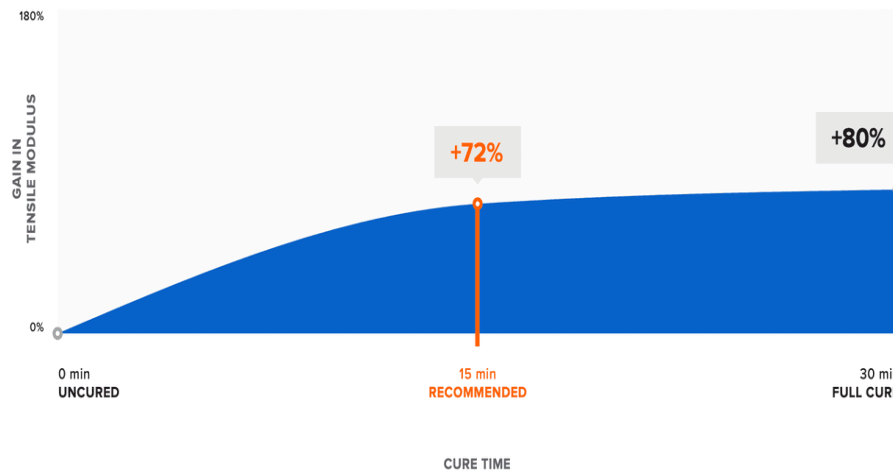


Figura 11. Temperatura y tiempo de curado para una resina utilizada en SLA⁵³.

Una impresora 3D SLA⁵³, consta de una serie de componentes los cuales hacen posible generar la pieza deseada, en la figura 12, se muestra el esquema de una impresora SLA. Las características principales se encuentran en un cubo de resina, en una plataforma móvil (eje Z), un sistema de raspado (eje X), un láser UV, óptica de enfoque y un espejo galvanométrico (ejes X e Y).

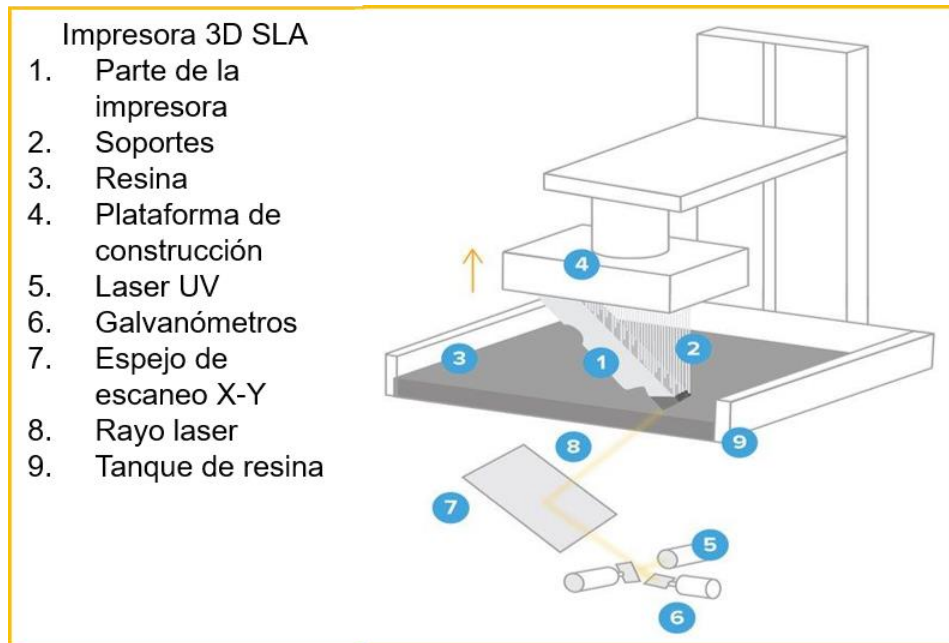


Figura 12. Partes del funcionamiento de una impresora 3D SLA⁵⁴

La estereolitografía ofrece la capacidad de fabricar objetos mediante impresión 3D, lo que brinda ventajas como la libertad de diseño, ligereza y la posibilidad de optimizar la estructura interna de la pieza. A medida que avanza la tecnología, la competitividad para liderar el mercado industrial son: calidad, precio, tiempo de entrega, flexibilidad e innovación⁵⁵.

2.5 Aluminizado

El aluminio se ha estudiado como material reflectante debido a su alta reflectancia en los espectros visible e infrarrojo. Además, el aluminio es más económico y tiene una resistencia a la corrosión y es más económico⁵⁶.

En ese sentido, se han desarrollado reflectores de aluminio utilizando materiales poliméricos como sustratos para reemplazar los vidrios tradicionales pesados, frágiles y caros⁵⁷. Existe una variedad de métodos de deposición que permiten crear estos recubrimientos ^{58,59}. Las técnicas de deposición física y química son las dos familias principales para el aluminizado. La finalidad del aluminizado es mejorar alguna de las propiedades de las piezas, las cuales pueden ser la transmisión de luz, propiedades químicas o eléctricas y reflectantes^{60,61}. Con un aumento significativo en el uso de dispositivos para aplicaciones ópticas. La técnica deposición física en la cual se encuentra la deposición por magnetron sputtering DC⁶⁰, es una de las más estudiadas debido a que es una técnica eficiente para obtener espejos de aluminio-polimérico. Sin embargo, aún se están investigando algunos factores importantes, como por qué tiene baja compatibilidad superficial y adherencia cuando se utiliza una superficie de polímero-metal depositada en películas y cómo cambia la homogeneidad y el comportamiento con respecto a la reflexión de la luz ⁶¹.

2.5.1 Técnicas de fabricación de películas delgadas

Existe una amplia variedad de técnicas para el crecimiento de películas delgadas las cuales se pueden clasificar en dos grupos principales: húmedos y secos.

La técnica fase de vapor se divide en dos subcategorías dependiendo del origen que se adsorben sobre la superficie.

- Si se origina en una reacción química en fase gaseosa, a la técnica se le denomina “deposición química de vapor” o CVD por sus siglas en inglés Chemical Vapor Deposition.
- Por otro lado, si provienen de desbastado o sublimación de un elemento sólido o son inyectadas directamente en una deposición, sin que exista reacciones químicas en fase gaseosa, se le denomina como “deposición física de vapor”, o PVD por sus siglas en inglés (Physical Vapor Deposition).

En el primer caso, el desarrollo se logra a través de procesos químicos en fase líquida y la precipitación de diversos productos en la superficie a cubrir, los cuales posteriormente se adsorben y forman una película delgada. En la segunda, el crecimiento de la capa se produce a través de procesos en fase gaseosa/plasma y la adsorción de especies sobre la superficie resultante ver figura 13.

Aunque ambas técnicas presentan ventajas e inconvenientes, en este trabajo se centra en el segundo caso, ya que en la actualidad es la más utilizada en la industria tecnológica. Esta técnica presenta ventajas inherentes como:

- No requieren operar a altas temperaturas, por lo que permiten recubrir superficies delicadas, tales como polímeros, tejidos, vidrios entre otros.
- Tiene un costo bajo
- No genera grandes residuos de contaminantes
- Su uso es muy versátil.

Estas ventajas han ayudado para desarrollar dispositivos y han propiciado que centros de investigación centren su actividad en su análisis y desarrollo.

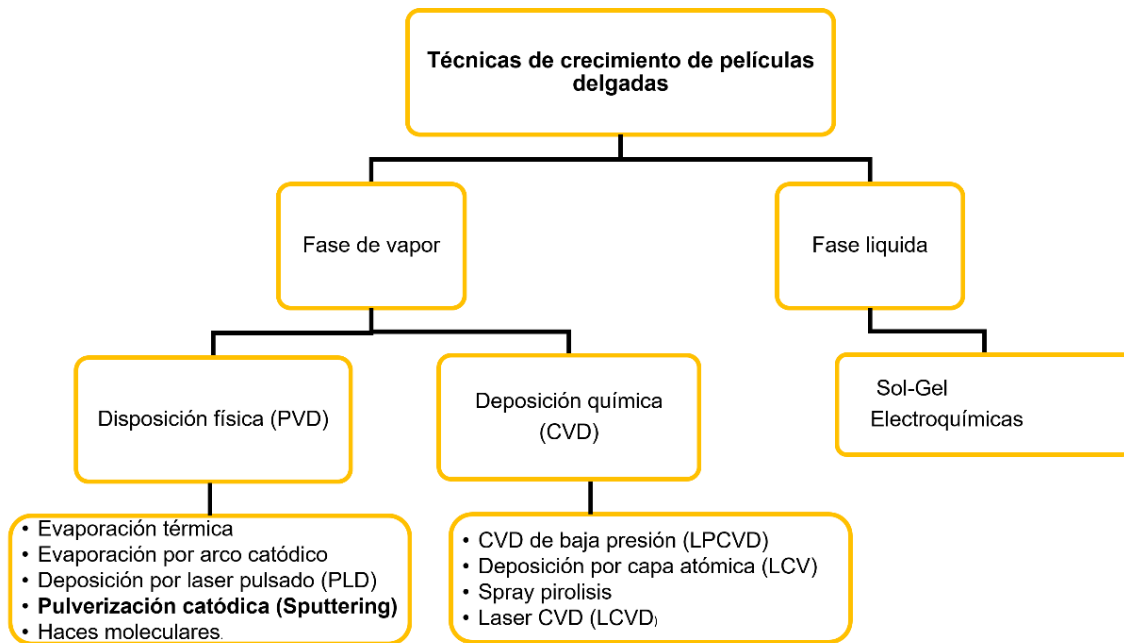


Figura 13. Técnicas de deposición de películas delgadas⁵⁸.

En general las películas delgadas por su extrema delgadez y fragilidad no se emplean aisladas, si no que están soportadas sobre otros sólidos de mayor grosor y de distintas propiedades físicas o químicas, a las cuales se les denomina “sustratos”⁶³.

Como menciona López⁶⁴ las propiedades físicas de una película delgada dependen de su microestructura y deben ser:

- Químicamente estable en el entorno que se usara.
- Adherirse bien a la superficie que cubre.
- Tener un espesor uniforme.
- Ser químicamente puro o tener una composición química controlada.
- Tener una baja densidad de imperfecciones.

Las películas delgadas se usan para optimizar propiedades de los sustratos que se recubren o dotarlos de propiedades nuevas.

Las diversas aplicaciones de las películas delgadas se pueden mencionar los siguientes campos de aplicación:

- **Electrónica:** Las películas delgadas se utilizan en la fabricación de dispositivos electrónicos, como transistores, diodos y células solares. Estas películas se depositan sobre sustratos para formar capas semiconductoras, conductoras o aislantes, según se requiera en cada componente.
- **Óptica:** En el campo de la óptica, las películas delgadas se utilizan para recubrir superficies y mejorar las propiedades ópticas de los materiales. Por ejemplo, se pueden aplicar recubrimientos antirreflectantes en lentes y espejos para reducir las pérdidas por reflexión.
- **Energía:** Las películas delgadas se utilizan en diversas aplicaciones relacionadas con la energía. Por ejemplo, en células solares de capa delgada, se depositan películas semiconductoras para absorber la luz y generar electricidad.
- **Industria de semiconductores:** Las películas delgadas son esenciales en la fabricación de semiconductores y microchips. Se utilizan para crear capas de aislantes, conductores y semiconductoras en la construcción de dispositivos electrónicos avanzados.
- **Sensores y dispositivos de detección:** Las películas delgadas se utilizan en la fabricación de sensores y dispositivos de detección, como sensores de temperatura, sensores de gases y sensores de humedad. Estas películas permiten la detección precisa de cambios físicos y químicos.

Mattox^{65,66} refiere que la técnica de deposición física de vapor PVD, como procesos una deposición atómica en el que el material se evapora de una fuente sólida o líquida en forma de átomo o molécula y se transporta en forma de vapor a través del vacío o en un ambiente gaseoso de baja presión a la superficie, donde se condensa. Generalmente la deposición física se puede realizar mediante el uso de una técnica llamada recubrimiento por pulverización catódica con plasma en donde se menciona algunos puntos para la deposición de películas:

- Preparación del sustrato: Antes de la deposición, es necesario preparar el sustrato sobre el cual se va a depositar la película delgada. Esto implica la limpieza y el tratamiento de la superficie para asegurar una adhesión adecuada de la película y reducir las impurezas.
- Dispositivo de pulverización: El proceso de pulverización catódica se lleva a cabo en una cámara de vacío, donde se encuentra el dispositivo de pulverización. Este dispositivo incluye uno o varios cátodos, generalmente compuestos por el material que se desea depositar, y un ánodo.
- Plasma y gases de proceso: Se introduce un gas de proceso en la cámara de vacío, que se ioniza para formar un plasma. El plasma es una mezcla de iones y electrones altamente energéticos que interactúan con el material del cátodo. También se pueden utilizar gases reactivos para alterar las propiedades químicas de la película depositada.
- Sputtering o pulverización catódica: Mediante la aplicación de un campo eléctrico, se bombardea el cátodo con iones del plasma, lo que provoca la liberación de átomos o partículas del material del cátodo. Estas partículas son entonces depositadas sobre el sustrato, formando la película delgada.
- Control de parámetros: Durante el proceso de deposición, varios parámetros deben ser controlados, como la energía del plasma, la presión de los gases, la distancia entre el cátodo y el sustrato, y la composición química de los gases utilizados. Estos parámetros influyen en las propiedades y la calidad de la película delgada resultante.
- Caracterización y control de calidad: Una vez depositada la película delgada, es importante llevar a cabo análisis y pruebas para evaluar su calidad. Esto puede incluir pruebas de espesor, composición química, adhesión, propiedades ópticas, eléctricas y mecánicas, entre otras

2.5.2 Magnetron sputtering.

La deposición mediante sputtering es un método de deposición física de vapor mediante el cual se deposita una película delgada por pulverización catódica⁶³. En este trabajo, se ha seleccionado el método de deposición por pulverización catódica o sputtering para la fabricación de los espejos de primera superficie. Esta elección se debe a que el sputtering ofrece varias ventajas que son cruciales para el desarrollo tecnológico y la calidad de los espejos a fabricar. Algunas de estas ventajas son debido a que el método de sputtering es altamente controlable y reproducible, fundamental para asegurar la uniformidad y precisión de las propiedades ópticas de los espejos de primera superficie. Además, el sputtering permite obtener películas delgadas con excelentes propiedades cristalinas. La deposición por pulverización catódica se realiza en un ambiente de vacío controlado, lo que evita la presencia de impurezas y asegura la calidad del material depositado. Esto es particularmente importante en el caso de espejos, ya que cualquier defecto en la estructura cristalina podría afectar la reflectividad y la calidad de la imagen reflejada. En la deposición mediante Magnetron sputtering se utiliza un plasma que está limitando la superficie a la cual se va a depositar el material precursor, este plasma, típicamente es generado usando un gas inerte (Argón), la superficie del sólido se ve afectada por la presencia de las colisiones de iones contra los átomos de la superficie que pueden ser acelerados hacia el sustrato, como se muestra en la figura 14, las partículas del material son usualmente iones gaseosos acelerados desde un plasma, el plasma está formada por el gas ionizado por el campo eléctrico donde el ion golpea la superficie del material y transfiere parte de su energía a los átomos produciendo una colisión

donde los iones de argón chocan con el target y desprenden átomos que se dirigen al sustrato⁶⁴.

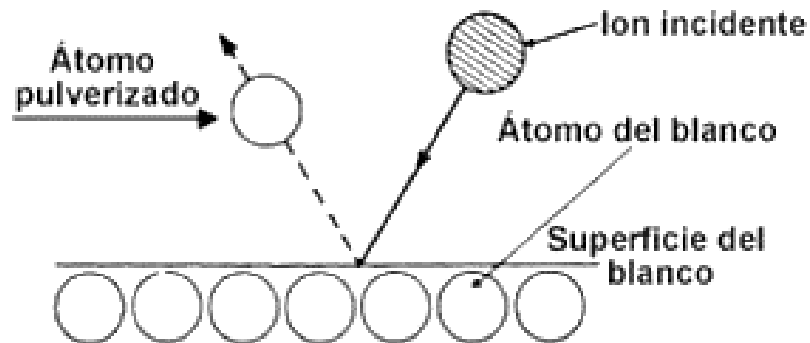


Figura 14. Esquema de pulverización catódica.

Por otro lado, la disposición por pulverización catódica consiste en producir una descarga eléctrica de forma que los átomos del gas inerte del interior de la cámara se ionicen. A los cuales los iones son acelerados por el propio campo eléctrico que produce una descarga y colisionan con el blanco arrancando el material que se deposita en el sustrato, por lo tanto, esto es posible para formar una película delgada⁶⁵ ver figura 15.

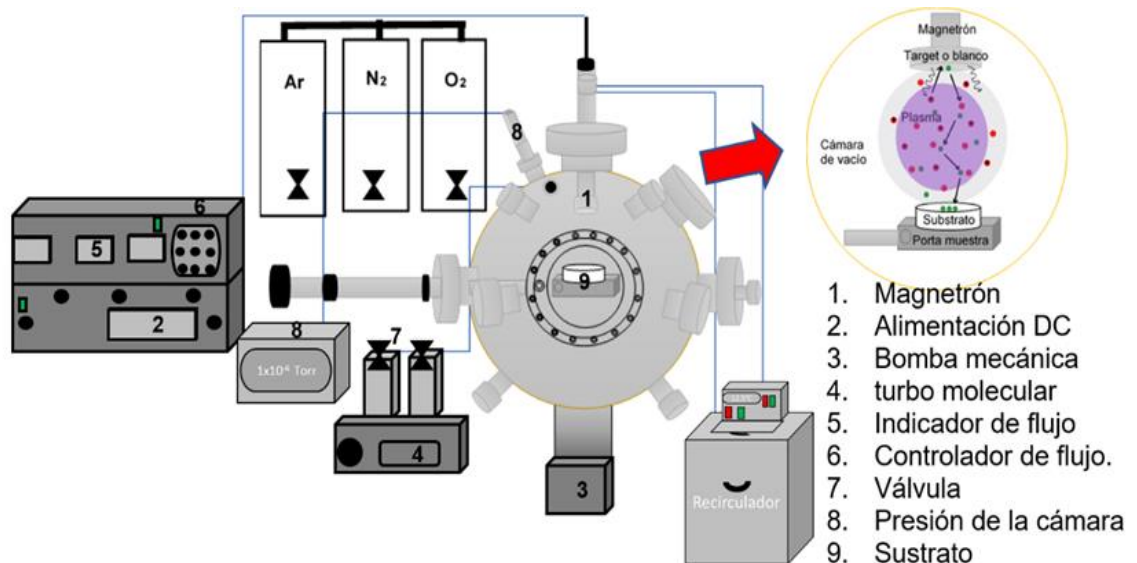


Figura 15. Cámara de deposición por pulverización catódica.

La condición para lograr este estado de descarga depende del voltaje y la distancia entre cátodo-anodo, así como la presión del gas.

Para lograr la deposición por pulverización catódica se logra realizar en:

- Buen vacío: Se debe evacuar la cámara de deposición para alcanzar un nivel de vacío adecuado, generalmente inferior a 10^{-5} Torr. Esto se logra utilizando bombas de vacío que remueven el aire y otros gases presentes en la cámara, creando un ambiente libre de partículas y contaminantes.
- Gas de baja presión: Se introduce un gas en la cámara de deposición a baja presión. El gas, comúnmente argón, actúa como medio de transporte para las partículas pulverizadas desde el blanco o cátodo hasta el sustrato.
- Presión suficientemente baja: La presión dentro de la cámara de deposición se mantiene lo suficientemente baja para garantizar un transporte adecuado de las partículas pulverizadas y para evitar la colisión entre ellas, lo que podría afectar la uniformidad y calidad de la película depositada. La presión se controla mediante el ajuste de la tasa de flujo de gas y la capacidad de las bombas de vacío utilizadas.

De acuerdo con lo anterior se pueden clasificar las etapas en el crecimiento de una película.

1. Llegada de átomos sobre la superficie: En esta etapa, los átomos o moléculas del material depositado alcanzan la superficie del sustrato. Durante este proceso, los átomos transferirán parte de su energía cinética al sustrato y entrarán en equilibrio térmico con él.
2. Adsorción/desorción: En esta etapa, los átomos o moléculas que llegan a la superficie del sustrato pueden ser atraídos y adsorbidos por los átomos o moléculas que ya se encuentran en la superficie. A su vez, algunos átomos o moléculas de la superficie pueden escapar al entorno. Este equilibrio dinámico entre la adsorción y la desorción es fundamental para el crecimiento de la película.

3. **Difusión superficial:** Una vez que los átomos o moléculas se han adsorbido en la superficie del sustrato, pueden moverse y difundir sobre la superficie. La difusión superficial permite que los átomos se redistribuyan y encuentren sitios adecuados para formar nuevos enlaces y crecer en la estructura de la película.
4. **Nucleación:** En esta etapa, los átomos o moléculas adsorbidos y difundidos comienzan a formar núcleos de agregación. Estos núcleos son los precursores de la película y pueden crecer mediante la incorporación de más átomos o moléculas.
5. **Crecimiento continuo de la película delgada:** A medida que los núcleos se forman, crecen y se unen entre sí, la película delgada se desarrolla y se extiende sobre la superficie del sustrato de manera continua. Este crecimiento puede ser controlado mediante la regulación de la temperatura, la presión y otros parámetros del proceso de deposición.

Es importante destacar que las etapas y los mecanismos específicos pueden variar dependiendo del método de deposición utilizado, el material de la película y las condiciones experimentales. La comprensión de estas etapas es esencial para controlar y optimizar el crecimiento de las películas delgadas y lograr las propiedades deseadas en el material depositado ver figura 16.

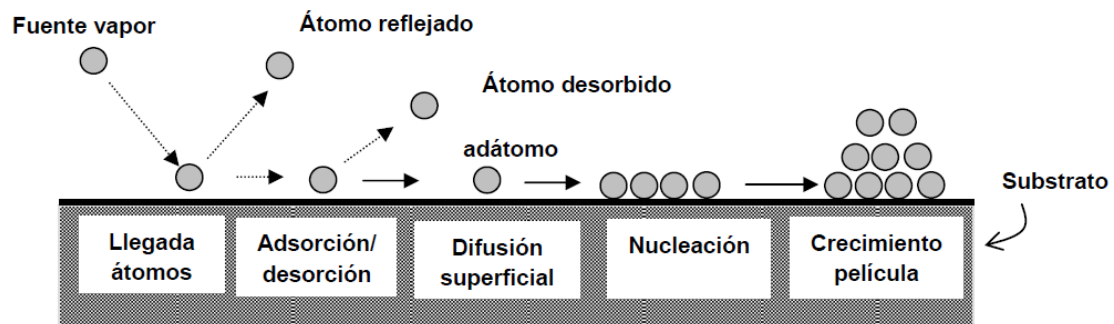


Figura 16. Esquema del crecimiento de la película.

Cabe mencionar que, gracias al campo magnético, los electrones usados para crear el plasma no bombardean los sustratos, si no que quedan atrapados en trayectorias cicloidales cerca al blanco, de esta manera no hay daño por radiación y temperatura hacia los sustratos, a lo que permite la utilización de sustratos sensibles a la temperatura polímeros, plásticos, membranas, etc,^{67,68,69}.

3 HIPÓTESIS

Si se logra desarrollar técnicas para fabricar superficies ópticas utilizando materiales poliméricos mediante manufactura aditiva (impresión 3D), existe la posibilidad de utilizar estas superficies en investigación y desarrollo tecnológico en áreas de instrumentación óptica y astronómica. Esto se debe a la potencial reducción de costos de fabricación en comparación con los métodos de fabricación tradicionales.

4 OBJETIVOS

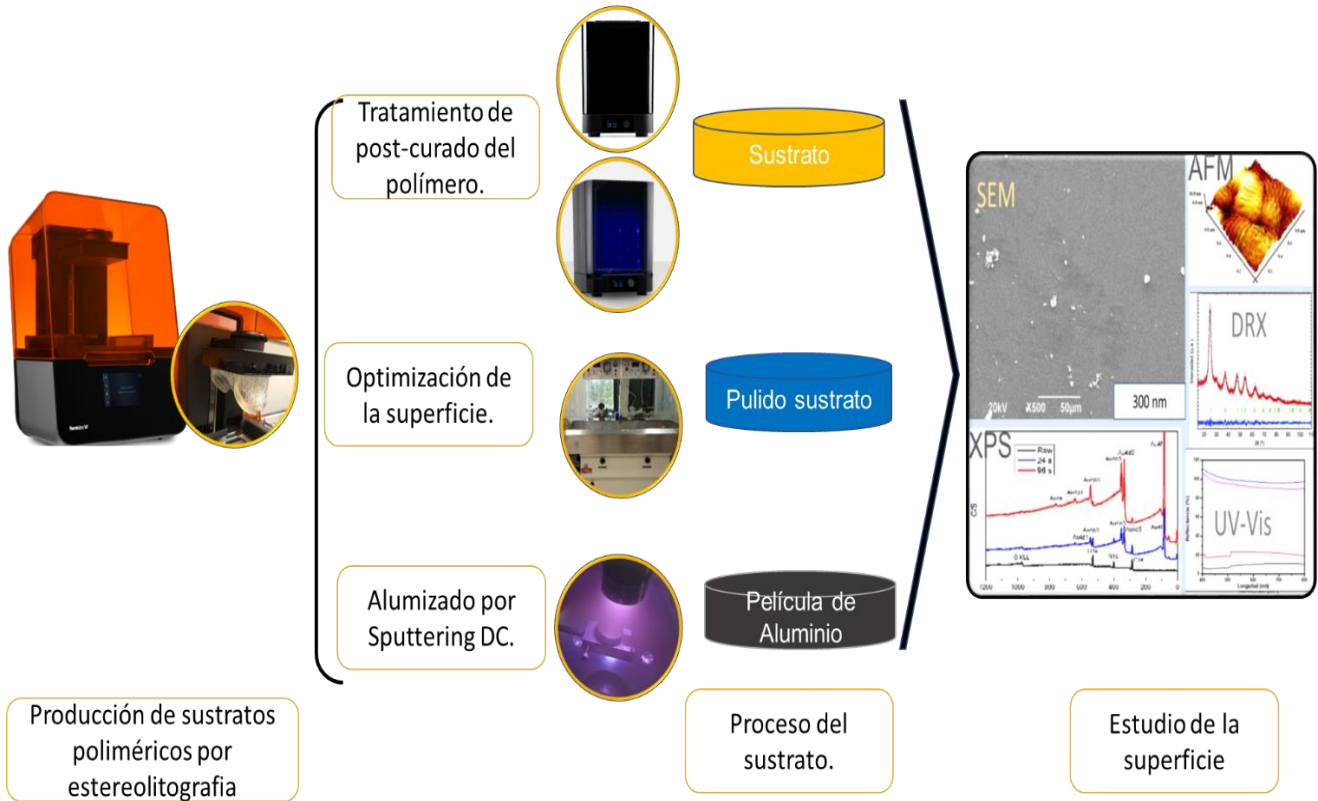
4.1 Objetivo General

El objetivo principal de esta tesis es utilizar la tecnología de impresión 3D para diseñar y fabricar sustratos poliméricos ligeros con potencial para ser utilizados como espejos ópticos.

4.2 Objetivo Especifico

1. Diseño y fabricación de superficies poliméricas mediante Impresión 3D.
2. Optimización de superficies ópticas con la técnica artesanal y tradicional de superficies poliméricas.
3. Caracterización óptica de las superficies poliméricas Medición de índice de refracción, transmitancia.
4. Medición de la superficie polimérica mediante metrología óptica (interfómetro Zygo).
5. Depósito de película delgada de Aluminio en el sustrato polimérico mediante la técnica de magnetron sputtering.
6. Caracterización óptica del aluminio mediante Uv-Vis.
7. Caracterizar las películas delgadas de aluminio por difracción de rayos X (XRD), espectrómetro de electrones fotoemitidos por rayos-X (XPS), SEM y microscopia de fuerza atómica (AFM).

5 ESTRATEGIA GENERAL



6 MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se presentará una descripción detallada de los equipos y materiales necesarios para llevar a cabo el diseño, fabricación y aluminizado de los sustratos poliméricos utilizando la técnica de deposición catódica. Además, se explicará la metodología utilizada para realizar las caracterizaciones necesarias con el fin de analizar las propiedades del aluminizado.

6.1 Materiales

Se utilizó la impresora 3D Form3 para fabricar los sustratos poliméricos a partir de la resina estándar Clear de la marca Formlabs, para el lavado de las piezas se utilizó el equipo de limpieza de resina Form Wash de la marca Formlabs y el equipo de curado por rayos UV se utilizó la Form Cure de marca Formlabs.

Cámara de deposición catódica: Se utilizará una cámara de deposición catódica adecuada para aluminizar los sustratos. La deposición se realizará utilizando un target de aluminio con una pureza del 99.99%, suministrado por la marca Kurt J. Lesker, que tiene un diámetro de 2" y un espesor de 1/8". El gas utilizado en el proceso será argón con una pureza del 99.99%.

Placas de vidrio BK7: Estas placas de vidrio se utilizarán como sustratos para la deposición de la capa de aluminio. El vidrio BK7 es conocido por su buena transmisión óptica y se adapta bien a la técnica de deposición catódica.

Alcohol isopropílico y agua desionizada: Estos líquidos se utilizarán para la limpieza y preparación de los sustratos antes de la deposición y durante el proceso de fabricación.

Oxido de aluminio: Se utilizarán partículas de óxido de aluminio con diferentes tamaños de grano para realizar procesos de pulido y mejora de la calidad superficial de los sustratos aluminizados

6.2 Fabricación de piezas

6.2.1 Diseño CAD

La fabricación de las piezas se llevó a cabo con un diámetro de dos pulgadas. Se desarrollaron tres modelos de superficies: dos superficies planas y una superficie esférica cóncava. El primer diseño (a) se caracteriza por ser sólido en su interior, el segundo diseño (b) presenta una estructura interna en forma de panal de abeja, y el último diseño (c) tiene una estructura interna sólida. ver figura 17.

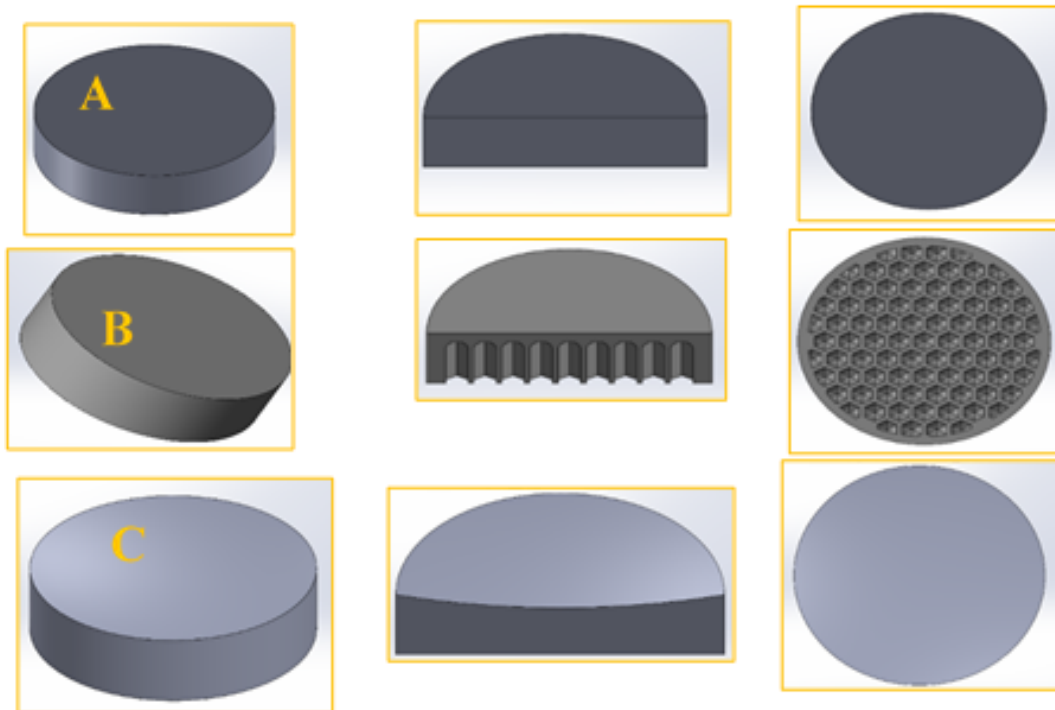


Figura 17. : Diseño CAD de las piezas. (A) pieza plana con estructura interna sólida, (B) pieza plana con estructura en forma de panal y (C) cóncavo R100.

Estos diseños fueron realizados en SolidWorks y se exportaron como archivos en formato Standard Tessellation Language (STL) para definir todos los ajustes de impresión. Es importante destacar que este formato de archivo es compatible con la impresora 3D utilizada, en este caso, el software PreForm de Formlabs. La figura 18 muestra las piezas con los soportes necesarios, listas para ser impresas.

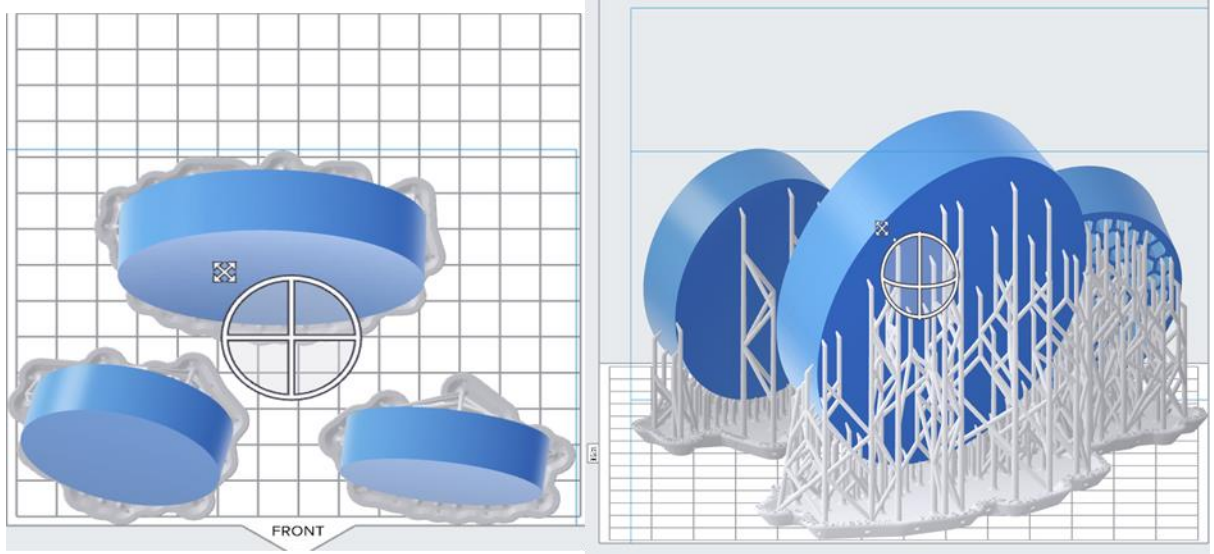


Figura 18. Software PreForm de la impresora.

6.2.2 Impresión

El proceso de impresión 3D de las piezas poliméricas en resina Clear se realizó utilizando una impresora 3D de estereolitografía de escritorio Form 3. Esta impresora se basa en una tecnología de alta resolución, con una precisión de 25 micras en los ejes X y Y. El espesor de cada capa puede variar entre 25 y 300 micras. El volumen de trabajo de la impresora es de 14.5 x 14.5 x 18.5 cm. La impresora utiliza una fuente de luz de 250 mW con una longitud de onda de 405 nm. El spot de láser utilizado tiene un tamaño de 85 micras, lo que permite una alta precisión en la impresión de los detalles de las piezas. Estas características técnicas de la impresora 3D Form 3 garantizan una alta calidad y precisión en la fabricación de las piezas poliméricas utilizando la resina Clear⁶⁶. Ver la figura 19, el proceso de la impresión.

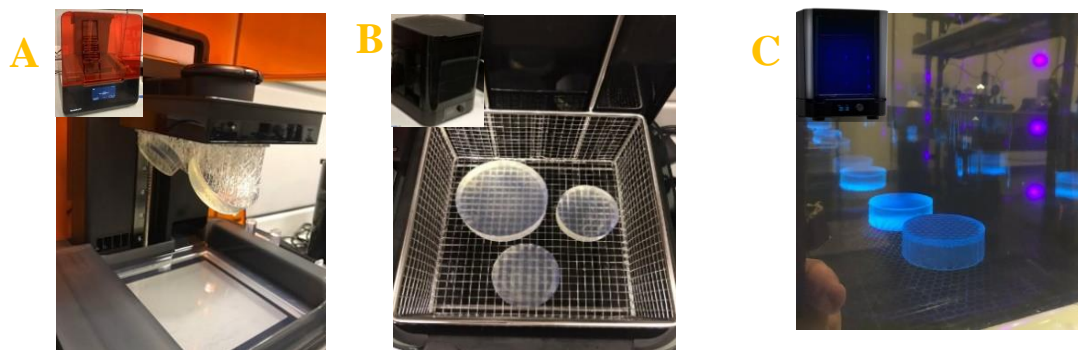


Figura 19. Proceso de fabricación piezas (A) Impresora Form3 FormLabs, (B) Form Wash y (C) Form Cure.

6.2.3 Post-procesado

Las piezas 3D impresas para este proyecto fueron sometidas a un proceso de post-procesamiento que incluyó lavado, curado y acabado final. Para eliminar la resina excedente, las piezas se lavaron utilizando alcohol isopropílico durante 15 minutos. Se utilizó el equipo Form Wash, el cual facilita este proceso de limpieza. Posteriormente, las piezas fueron sometidas a un proceso de curado en el equipo Form Cure durante 15 minutos. Este proceso maximiza las propiedades de las piezas impresas, mejorando su resistencia, rendimiento y maximizando sus propiedades mecánicas.

Tabla 2.Descripción de las piezas de diseño en 3D.

Sustrato Resina clear Formlabs	Diámetro de diseño	Espesor de la pieza	Estructura interna	Forma
Diseño 1	2"	15 mm	Solido	Plana
Diseño 2	2"	15 mm	Panal	Plana
Diseño 3	2"	15 mm	Solido	cóncava

6.2.4 Acabado final de piezas poliméricas.

Esto consiste en la eliminación de los soportes de las piezas impresas y previamente curadas. En lo cual se busca que el acabado final suave y estético. Es importante tener en cuenta que el proceso de acabado es la eliminación de los soportes, residuos excedentes de la resina no curada y el pulido es el proceso final de la pieza.

En este sentido, para lograr un acabado suave en la pieza polimérica se realizó el proceso de esmerilado y pulido de la superficie en la cual se describe en la sección 6.3.2 y 6.3.3 el proceso que se realizado.

6.3 Pegado de la PS a la herramienta

La pieza de resina se adhirió a una herramienta metálica base, asegurándose de que ambas tengan el mismo diámetro, como se muestra en la Figura 20. El proceso de pegado se llevó a cabo siguiendo una serie de pasos enumerados del 1 al 4.

1. Seleccionar una herramienta metálica con un diámetro igual al de la pieza a pulir.
2. Ajustar la base metálica a la pieza de resina utilizando cinta adhesiva en tres puntos estratégicos para mantener el ajuste durante el proceso.
3. Una vez ajustada, aplicar cinta adhesiva de manera circular alrededor del contorno de las piezas, asegurando que la superficie de la pieza de resina quede completamente ajustada a la herramienta metálica. Realizar un pegado uniforme en ambas superficies.
4. Después de completar el pegado con cinta adhesiva, calentar cera y aplicarla en las superficies laterales de la herramienta y la pieza. Este paso se realiza para sellar completamente ambas superficies y evitar cualquier incidente durante el proceso de pulido de la pieza.



Figura 20. Descripción del proceso de pegado de la herramienta metálica con la piza de resina Clear.

6.3.1 Pegado del pad a la herramienta de vidrio

Primero, se limpió la superficie de vidrio con acetona para asegurar una adecuada adhesión. Luego, los pads fueron colocados sobre las superficies de las herramientas de vidrio utilizando un pegamento epóxico de secado rápido, conocido como "pegamento epoxi 5 minutos".

En este proceso, se emplearon pads de pulido de la marca Politex Reg II 12 de Geminess con diferentes texturas, identificadas como verde, café y azul. Cada uno de estos pads fue utilizado en los procesos de esmerilado y pulido, según los requisitos específicos de cada etapa. El tiempo de pegado del pad sobre la herramienta de vidrio varió de 30 a 60 minutos, asegurando una adhesión adecuada antes de proceder con el pulido.



Figura 21. Proceso de pegado del pad a las herramientas de trabajo para el proceso de esmerilado y pulido. El pad verde (rugoso), pad café (suave a terciopelado) y pad azul (rugoso).

Cabe mencionar que se utilizaron diferentes pads para el proceso de esmerilado y pulido debido a que en el taller no se habían realizado previamente estas tareas en piezas de resina fotosensible. Esta adaptación en la selección de los pads permitió explorar y determinar cuáles eran los más adecuados para lograr los resultados deseados en términos de acabado y pulido de las piezas.

Se realizaron pruebas y evaluaciones para determinar la combinación óptima de pads y técnicas de pulido que proporcionaran los mejores resultados en función de las características específicas de las piezas de resina utilizadas en este trabajo, ver la figura 21, ahí se muestran los pads que se utilizaron las cuales,



Figura 22. Piezas cóncavas de resina Clear antes del esmerilado enumerados (2" Ø R100) y 2 (3" Ø R200).

6.3.2 Proceso de esmerilado de PS

Es importante destacar que cada par de piezas que se trabajen juntas deben tener una curvatura cercana para facilitar su acoplamiento durante el esmerilado y lograr un mejor rendimiento. Se utiliza una máquina de pulido disponible en el Taller de Óptica del INAOE, la cual realiza un movimiento oscilante en la superficie de las piezas. La pieza a esmerilar se coloca en la parte inferior y la herramienta de trabajo se sujeta en la superficie superior mediante un pistón que ejerce una presión mínima entre ellas.

La máquina de pulido rota los objetos inferiores en sentido anti-horario y desplaza los objetos superiores de un lado a otro. La extensión normal de la carrera, que es el desplazamiento horizontal del vidrio superior, se establece en aproximadamente un tercio del diámetro de la lente. Cuanto mayor sea el recorrido de la carrera, mayor será el cambio en los radios de curvatura de las piezas.

En el paso número 3, se procedió a quitar el pistón que ejercía presión entre ambas superficies. Esto se debió a la aparición de vibraciones durante el proceso de esmerilado, por lo que se optó por realizarlo de forma manual durante un periodo de 5 horas para asegurar un mejor control y evitar posibles daños en las piezas.

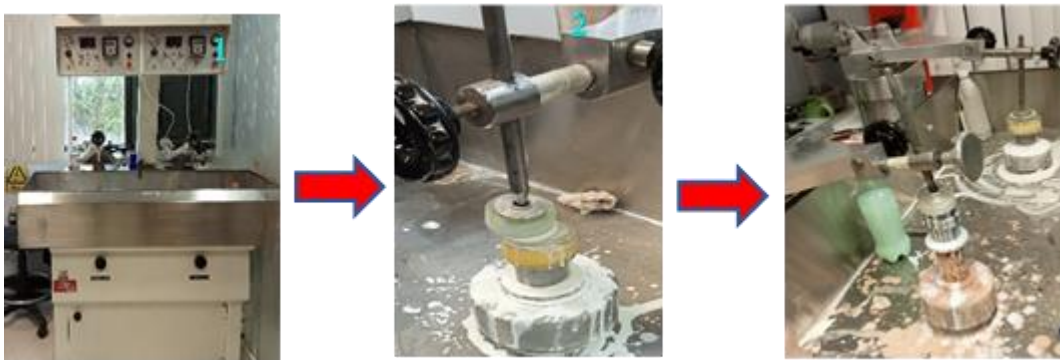


Figura 23. Proceso de esmerilado de las piezas de resina Clear.

Después de esmerilar la superficie de la pieza, se procedió a limpiarla para poder medir el radio de curvatura de acuerdo con el diseño establecido (R100 2"). La

medición se llevó a cabo utilizando un esferómetro de 1 ½", en el cual una vuelta completa corresponde a 0.500 líneas. En las primeras mediciones, se observó una sagita de 0.762 líneas. Para realizar esta medición, se llevó a cabo un proceso de esmerilado durante 4 horas utilizando el abrasivo mencionado anteriormente. Posteriormente, se procedió a cambiar los tamaños de grano del abrasivo, como se indica en la tabla 3.

Tabla 3. Tiempos de esmerilado.

Abrasivos (Oxido de Aluminio)	Tiempo
40 micras	4 h
25 micras	8h
15 micras	6h
5 micras	50 min

El proceso de esmerilado se considera completo cuando no se observan rayas, poros ni marcas de impresión en la superficie. Estas son características deseadas que indican que se ha logrado obtener una superficie lisa y libre de imperfecciones. Al eliminar las rayas, poros y marcas de impresión, se mejora la calidad visual y táctil de la pieza, lo cual es importante para su posterior uso y aplicación. Ver figura 24.

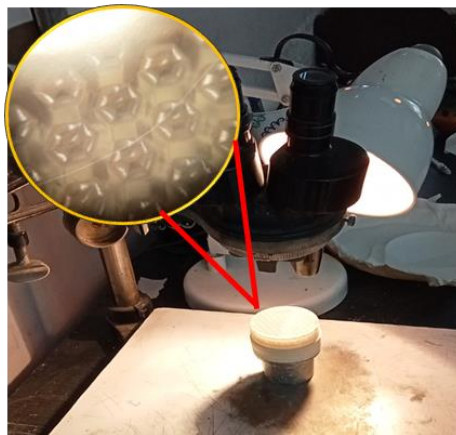


Figura 24. Visualización en el microscopio de la superficie esmerilada notamos rayas.

6.3.3 Proceso de Pulido de PS

El pulido es una etapa en la que se remueven pequeñas porciones de material para lograr una superficie transparente y eliminar poros leves o detalles cosméticos mínimos. En este trabajo, se utilizó el pulidor de plástico XLPA PLASTIC LENS POLISH para llevar a cabo esta etapa final del proceso. Durante el esmerilado y el pulido, se agregó constantemente pulidor a las superficies para asegurar una correcta humectación y evitar cualquier ralladura durante el proceso de trabajo, ver figura 25. Este procedimiento se repitió hasta obtener un acabado óptimo de pulido, que consiste en una superficie lisa y libre de imperfecciones. Esta etapa es especialmente importante, ya que permite corregir las deformaciones presentes en la superficie de la pieza y obtener un resultado final de alta calidad.

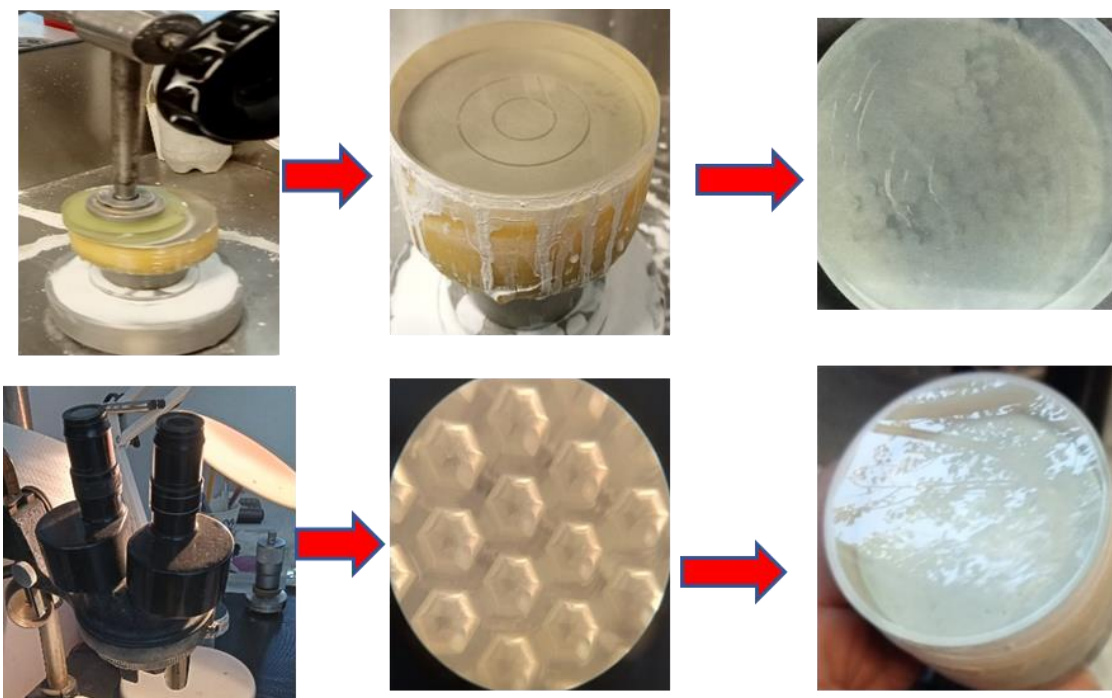


Figura 25. Proceso de pulido y como quedó finalmente la pieza.

6.4 Metrología óptica

Caracterización óptica de las superficies poliméricas se midieron el índice de refracción, rugosidad y transmitancia. estas mediciones son esenciales para comprender y controlar el comportamiento óptico de los materiales poliméricos para la aplicación en el campo de la óptica.

Para la medición del índice de refracción se utilizó un refractómetro Abbe, es un instrumento óptico que se utiliza para medir el índice de refracción de líquidos y sólidos transparentes.

En la siguiente enumeración de describen los pasos para la obtención del índice de refracción.

- Calibración del refractómetro: se calibro el instrumento utilizando un líquido de referencia con un índice de refracción conocido.
- Preparación de la muestra: se colocó en la platina la muestra solida transparente previamente pulida.
- Medición del índice de refracción: una vez ya calibrado, se coloca la muestra en la platina del refractómetro y se enfoca el ocular en el límite entre la luz reflejada y transmitida para alinear el límite con las líneas de referencia, por lo cual el valor indicado en la escala del disco graduado corresponde al índice de refracción de la muestra.
- Es importante destacar, que el refractómetro Abbe es adecuado para medir el índice de refracción de líquidos y muestras solidas transparentes delgadas.

Por otro lado, para la medición de la transmitancia se utilizó el espectrómetro Thorlabs la cual permite analizar la distribución espectral de la luz incidente o transmitida para una muestra.

Se realizó la medición siguiendo el procedimiento a los siguientes pasos, es de mencionar que se utilizó un cubo de resina polimérica de $10 \times 10 \times 45 \text{ mm}$.

- Configuración del espectrómetro: consta que el espectrómetro este configurado correctamente al rango espectral y a los parámetros de adquisición estén configurados adecuadamente para la medición deseada también es importante que esté conectado a una fuente de luz estable.
- Preparación de la muestra: adquirir una muestra representativa de la resina polimérica.
- Análisis de la muestra: se colocó la muestra en la trayectoria óptica del espectrómetro, donde incida la luz sobre la muestra y la luz transmitida es capturada por el espectrómetro.
- Adquisición de datos: finalmente los datos obtenidos mediante el espectrómetro es la información espectral de la luz transmitida a través de la muestra en función de la longitud de onda generando una tabla de datos recopilados y a la cual se puede genera una gráfica.

Cabe destacar, que para realizar una medición correcta y precisa es importante seguir los pasos que brinda el fabricante debido a que puede variar los pasos de acuerdo a la marca del equipo.

Finalmente, para la medición de la rugosidad de la superficie polimérica se realizó mediante la técnica de Microscopia de Fuerza Atómico (AFM), que esta descrita en sección 6.5.6, en la cual se describió el proceso de esta técnica. Para la obtención de las micrografías se siguieron los siguientes pasos que a continuación se describe.

- Configuración del equipo: antes de iniciar cualquier proceso de escaneo se configura el equipo, ajustando los parámetros de escaneo, como la velocidad de escaneo el tamaño del área a analizar.

- Preparación de la muestra: tener la muestra limpia libre de contaminantes.
- Colocación de la muestra: se coloca la muestra en la platina de escaneo del AFM y se ajusta correctamente para evitar algún movimiento durante el escaneo.
- Ajuste de la punta /sonda: se realiza el ajuste adecuado para el posicionamiento de la punta para un escaneo adecuado con la superficie.
- Escaneo y análisis de datos: el escaneo de la superficie el consta de un barrido puntual sobre un área de la superficie bajo prueba a lo cual permite obtener un mapa topográfico.

Es importante destacar, que este tipo de medición nos proporciona información sobre la rugosidad promedio (R_a), así como la rugosidad cuadrática media (R_q) y generar imágenes topográficas tridimensionales.

6.4.1 Mediciones de irregularidades de la superficie

La medición de la forma de la superficie realizadas a las superficies óptica fabricadas fueron mediante interferometría en donde se utilizó el interferómetro comercial de la marca Zygo.

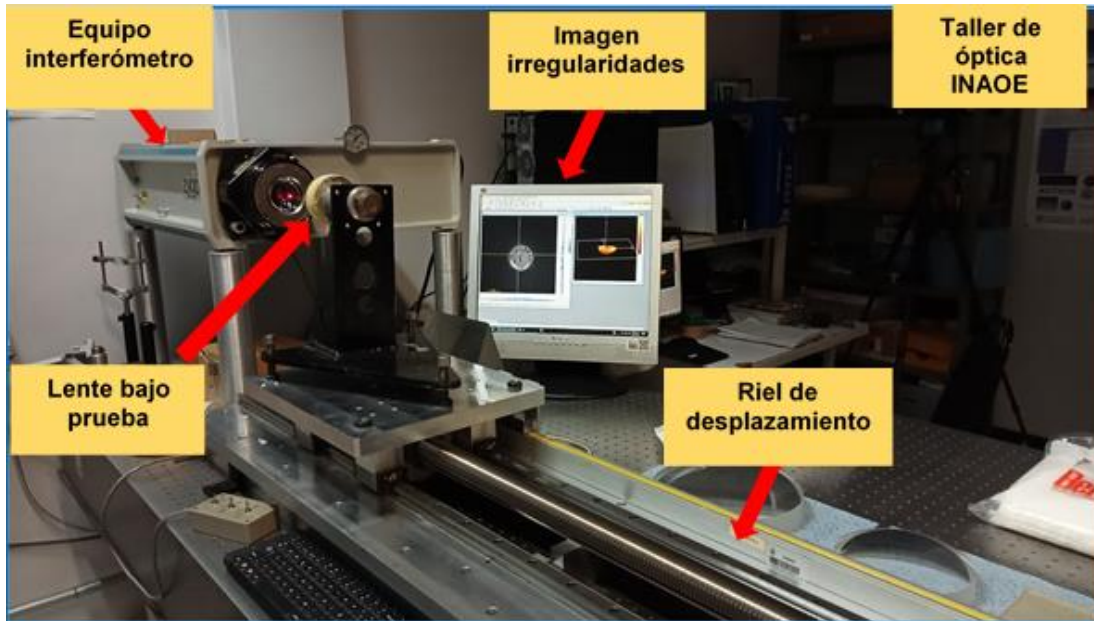


Figura 26. Medición de las irregularidades con el Interferómetro Zygo.

En este interferómetro se verifico la calidad de la superficie bajo análisis se comparan dos frentes de onda, el de referencia que sale del interferómetro y el de prueba que es producido al hacer incidir la luz en el espejo o lente que se está fabricando. En la figura se observa, el espejo que se encuentra frente al interferómetro de manera que coincida el punto focal de la superficie de referencia y el centro del espejo bajo prueba y con esta configuración se capturan interferogramas que son imágenes de franja de interferencia con una separación de $\lambda/2$ entre dos (franjas claras y oscuras).

En la figura 26, se muestra el equipo para probar la superficies ópticas el cual está ubicado en el taller de óptica del INAOE.

6.5 Aluminizado por Sputtering DC

Después de obtener la superficie pulidas se procedió a aluminizarlas mediante la técnica descrita en la sección 2.5.2.

El proceso de aluminizado se llevó a cabo utilizando el equipo de erosión iónica, también conocido como sputtering DC,, ubicado en el Laboratorio de Nanociencias y Nanotecnología de la UANL. Este equipo está equipado con una cámara de deposición capaz de alcanzar un vacío de hasta 10^{-6} Torr, lo cual es necesario para asegurar condiciones óptimas durante el proceso de deposición. El esquema del equipo de sputtering se muestra en la Figura 27, donde se puede observar la disposición de los componentes y su funcionamiento. Este proceso utiliza la técnica de bombardeo iónico para transferir átomos de aluminio desde un blanco (target) hacia el sustrato, formando así una película delgada de aluminio sobre la superficie.

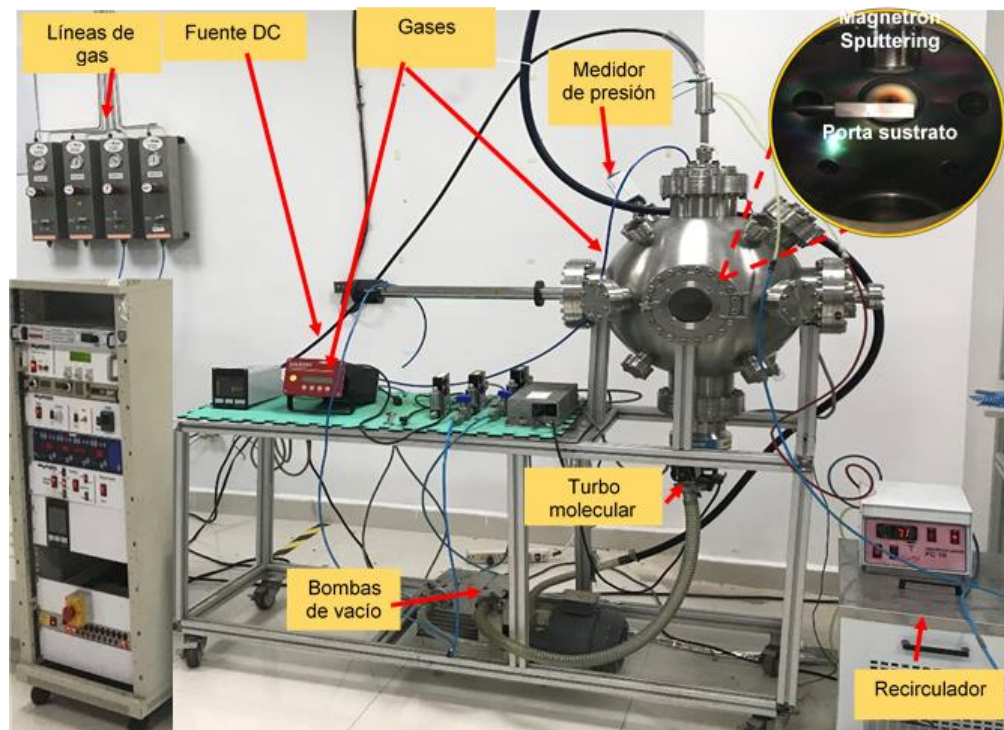


Figura 27. Sistema de Magnetron Sputtering utilizado para la fabricación de películas delgadas de Aluminio.

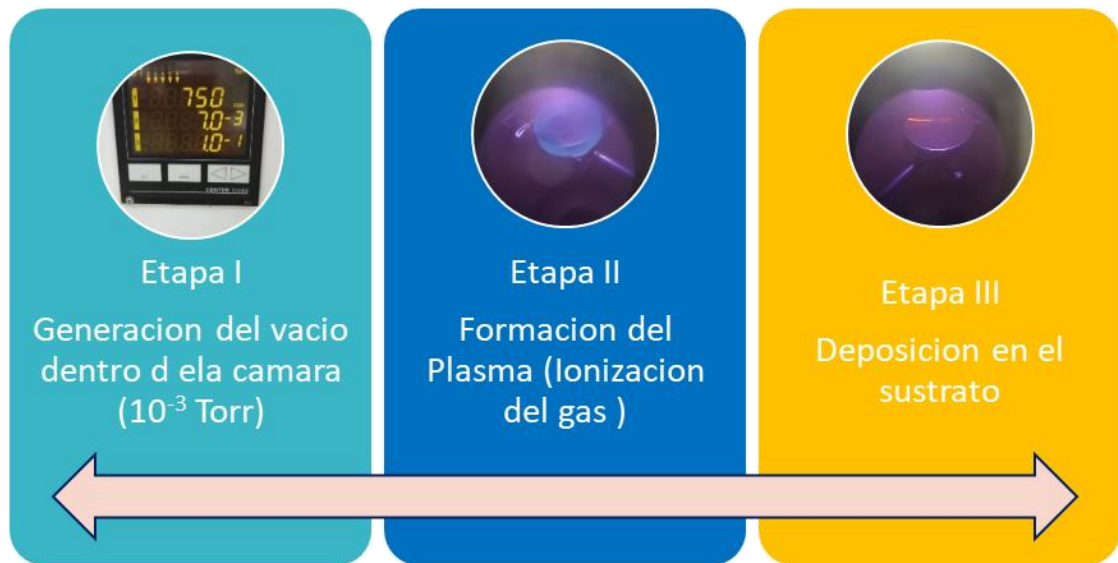


Figura 28. Proceso de deposición de películas delgadas.

A continuación, se describe el proceso en el cual se llevó a cabo el aluminizado de las piezas poliméricas de la resina estándar clear de la FomLabs.

Etapa I: La muestra se introduce en la cámara de deposición, y la distancia a la que se coloca varía según el proceso específico. A continuación, se procede a realizar el vacío en la cámara mediante el uso de dos tipos de bombas. La bomba mecánica se encarga de realizar un pre-vacío, alcanzando una presión del orden de 10^{-3} Torr. Posteriormente, se activa la bomba turbo-molecular, la cual logra alcanzar un alto vacío en el rango de 10^{-6} Torr.

El objetivo de llegar a una baja presión en la cámara de deposición es evitar la presencia de impurezas, como el oxígeno, que podrían interferir en el proceso de erosión iónica y comprometer la pureza y calidad de la muestra. La presencia de impurezas puede afectar la adherencia, la composición y las propiedades de la película depositada. Por lo tanto, alcanzar un alto vacío es esencial para garantizar la pureza de la muestra y obtener resultados óptimos en el proceso de deposición de películas mediante erosión iónica.

Etapa II: En el interior de la cámara de deposición se encuentra un magnetrón que alberga el blanco (target) del material a depositar. Los blancos tienen un diámetro de 50 mm y están conectados al sistema de bombeo, medidores de

presión, entrada de gas y mangueras del sistema de enfriamiento. El sistema de generación del plasma se representa esquemáticamente en la Figura 36.

Una vez que se alcanza una presión aproximada de 3×10^{-6} Torr en la cámara, se introduce el gas inerte, en este caso argón. La presión del gas es un parámetro que se ajusta según el proceso de fabricación de cada muestra. Dentro de la cámara, los electrodos están conectados a una fuente de alimentación de corriente continua, que permite regular la potencia para cada deposición.

Cuando se aplica la corriente eléctrica, el gas se ioniza parcialmente debido a una descarga eléctrica, creando un plasma en la cámara. Este plasma de argón ionizado es el responsable de la erosión del blanco (target) y de la deposición del material en la superficie de la muestra. La potencia aplicada y la presión del gas son ajustadas cuidadosamente para lograr un control preciso sobre el proceso de deposición y obtener la calidad deseada en las películas depositadas.

Etapa III: El proceso de deposición se realiza mediante la generación de un campo eléctrico utilizando una fuente de corriente directa. Este campo eléctrico crea una descarga eléctrica que ioniza los átomos del gas inerte, en este caso, el argón, que se introduce en la cámara de vacío. Estos átomos ionizados son sensibles al campo magnético generado en el extremo del magnetrón, que tiene una geometría toroidal.

El campo magnético del magnetrón permite dirigir y acelerar los iones de argón hacia la superficie del blanco (target), causando la erosión de este último debido a las múltiples colisiones entre los iones de argón y los átomos superficiales del blanco. Si la energía transferida durante estas colisiones es suficiente, algunos átomos liberados de la superficie del blanco se dirigen hacia el sustrato, donde se depositan formando una película.

En resumen, el campo eléctrico y magnético generado en el proceso de erosión iónica permiten que los iones de argón erosionen el blanco y que los átomos

liberados se depositen en la superficie del sustrato, dando lugar a la formación de una película del material deseado. Ver figura 29.

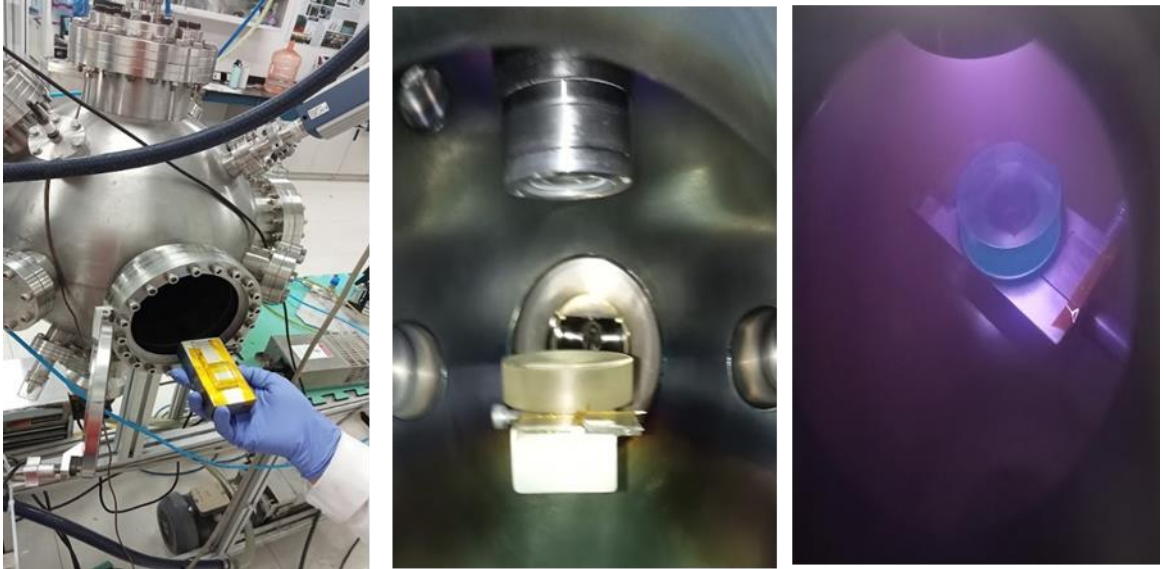


Figura 29. Esquema del proceso de deposición de películas de aluminio en los sustratos poliméricos.

6.6 Técnicas de caracterización

La caracterización de las películas delgadas es la obtención de información a partir de un medio que es perturbado por una señal. En el cual se puede conocer la composición, reflectividad, estructura, morfología y propiedades de un material. Existen diversas técnicas para caracterizar películas delgadas mediante Uv-Vis, DRX, XPS SEM, y AFM. A continuación, se describirán con más detalle estas técnicas.

6.6.1 UV-Visible espectroscopia

La espectrofotometría se fundamenta en el análisis de la cantidad de radiación electromagnética que puede absorber, transmitir o reflejar una muestra en el de longitud del espectro electromagnético (ultravioleta 200 a 400 nm, visible 400 a 800 nm e infrarrojo 700 a 2500 nm). Estas técnicas se analizan para caracterizar líquidos y sólidos. Para la medición de la reflectancia difusa se define como la difracción de radiación incidente que es reflejada en todas las direcciones por la muestra. El espectro resultante se obtiene como un porcentaje de reflectancia frente a la longitud de onda, fijando como 100% de reflectancia obtenida para una muestra de referencia que no adsorba la luz en el rango de longitudes de onda usado. La luz incidente es parcialmente absorbida y dispersada donde la radiación dispersada que emana de la muestra y desviada hacia el detector⁶⁷. En la figura 30, se muestra el esquema del espectrofotómetro.

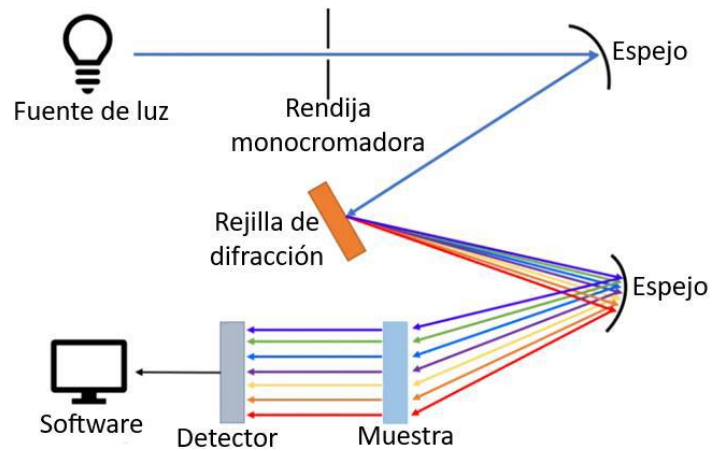


Figura 30. Esquema óptico de un espectrofotómetro⁷¹

Las mediciones utilizan frecuentemente la siguiente ecuación para la transmitancia.

$$T = P/P_0 * 100$$

Donde:

P= potencia radiante después de que pasa a través de la muestra

P₀= es la potencia radiante inicial.

El equipo utilizado para la medición de reflectancia y transmitancia del aluminizado fue el espectrógrafo UV-Vis Shimadadzu modelo UV-1800, se medieron las muestras en el rango de 200 a 1100 nm.

6.6.2 Difracción de Rayos X (XRD)

Es una técnica que permite conocer la composición de un material cualitativamente y determinar cuantitativamente parámetros asociados con su estructura atómica, de ahí radica la importancia en el estudio de las películas delgadas para la caracterización de composición y estructura⁷².

Los rayos X se producen acelerando electrones desde el cátodo hacia un blanco metálico (ánodo) a través de un alto voltaje. Los electrones acelerados poseen suficiente energía chocan con los átomos de metal utilizado como blanco, removiendo electrones de niveles internos ocasionado que electrones de niveles superiores cubran los lugares vacantes emitiendo fotones de rayos X⁷³.

Cuando un haz de radiación X incide sobre la red de un sólido, formada por planos paralelos separados por una distancia d , éste refleja las ondas incidentes de forma especular, de tal manera que cada plano refleja una pequeña fracción de la radiación, por lo que los haces difractados aparecerán cuando las reflexiones de los planos atómicos que están paralelos, interfieran constructivamente como se muestra en la figura 31. La relación entre los parámetros anteriores se expresa como la ley de Bragg

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

Donde:

n = es el número entero (orden de reflexión)

λ = longitud de onda de los rayos X

d = distancia interplanar

θ = ángulo formado entre el rayo incidente y la muestra

Por lo que la condición para que haya interferencia constructiva del haz de radiación incidente es conocida como la ley de Bragg⁷³

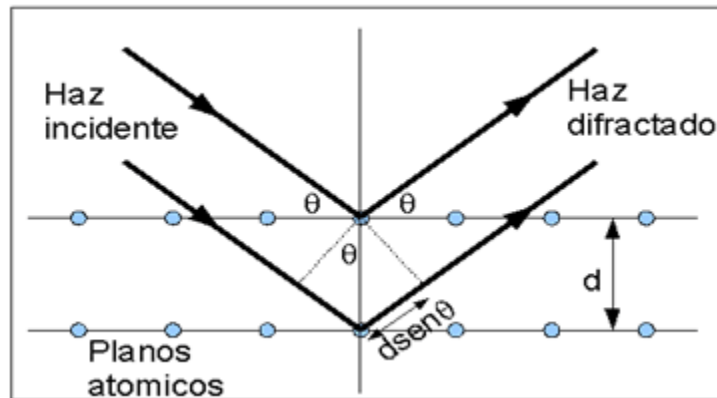


Figura 31. Representación gráfica Ley de Bragg⁷².

Una de las características de esta técnica es que cada material posee una orientación característica, a su vez este puede contener más de una fase cristalográfica, esto quiere decir que las propiedades de un material dependen tanto de su composición química como también de su orientación, tamaño y tipo de estructura cristalina. La ventaja del XRD es que cada material se caracteriza por tener un difractorama único, por lo que se puede determinar la composición de la muestra. La ausencia de picos de difracción en una muestra indica que el material es amorfo o carece de estructura cristalina.

El equipo utilizado para obtener el patrón de difracción de una muestra es un difratometro de rayos X PANalytical Empyrean en el cual se empleó una radiación CuK α ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) operando a 45 kV y 40 mA. El barrido se realizó en un rango de 2θ a 90° con pasos de escaneo de 0.016° y 80 segundos por paso de modo continuo^{70,71}.

6.6.3 Espectroscopia de Foto electrónica de Rayos X (XPS)

La espectroscopia fotoeléctrica de rayos X (en inglés X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS), es una técnica que permite determinar el tipo y composición química de los elementos superficiales presentes en la muestra. Esta técnica se basa en el efecto fotoeléctrico y su proceso se basa en rayos- X⁷⁴. El XPS mide la energía con la que se emiten los electrones la cual está directamente relacionada con la energía con la estaba enlazada al átomo del cual proviene. Es decir, la espectroscopia XPS está basada en el proceso de entrada de un fotón de una energía dada en los primeros 10 μm de un material y la expulsión de un electrón con otro valor de energía⁷⁵. En la figura 32, se muestra los componentes principales de un equipo XPS.

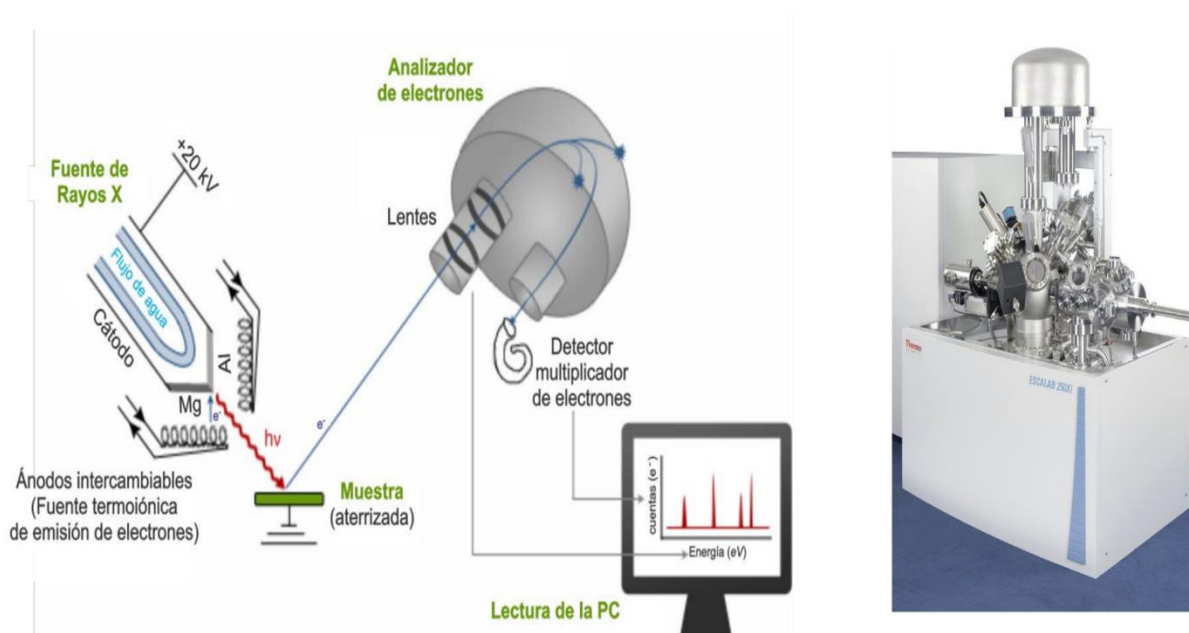


Figura 32. Sistema interno de espectroscopia Foto electrónica de Rayos X⁷⁶.

La técnica consiste en dar información de la química, organización y la morfología de la superficie. El funcionamiento del equipo se basa en el principio de emisión foto electrónica. La interacción de un fotón con un átomo puede ocurrir que el

fotón lo atravesase sin que ocurra una interacción y el fotón sea dispersado por un electrón o que el fotón interacciona con un electrón de un orbital atómico realizándose una transferencia total de energía del fotón hacia el electrón ocurriendo así la emisión del electrón del átomo⁷⁶. Es decir, cada átomo de la superficie de la muestra tiene sus electrones cercanos al núcleo.

Para que la emisión del electrón ocurra, el fotón debe tener una energía mínima y una vez superada se empezara a observar la fotoemisión de electrones del átomo. Donde la energía cinética con la que se emitirá este electrón es descrita por la ecuación de Einstein.

$$E_B = h\nu - K_E$$

Donde:

E_B= Es la energía de enlace del electrón al átomo.

hν= Es la energía del fotón de rayos X

K_E=Es la energía cinética del electrón detectado por espectrómetro del XPS.

La energía del enlace de un electrón varía según el tipo de átomo y de los átomos a los que este unido este átomo. Las interacciones débiles entre átomos, como fuerzas de cristalización o enlaces a hidrógenos, no alteran la distribución electrónica como para que provoquen un cambio observable en la energía de enlace.

Una gráfica muestra las mediciones realizadas por el equipo. Los valores de energía de enlace se muestran en el eje horizontal y la intensidad de electrones se muestran en el eje vertical. La cantidad de átomos presentes en la muestra está relacionada con la intensidad.

De acuerdo con la figura 33, el número cuántico principal n , el momento angular l y el acoplamiento spin-orbital j se utilizan para marcar los picos.

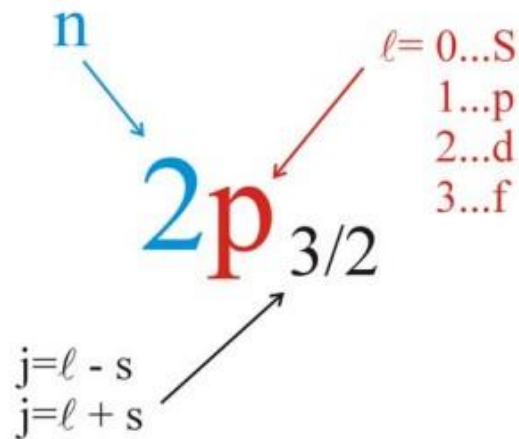


Figura 33. Notación de picos XPS.

El equipo XPS utilizado para caracterizar las películas fue un Thermo Scientific Escalab 250Xi, manteniendo una presión base de análisis de 1010 mbar; la excitación de los fotoelectrones analizados fue realizada con una fuente de rayos X monocromática de Al K α 1486.68 eV con función de trabajo de 42 eV, radio de análisis de 650 μm siendo las mismas condiciones de análisis para las zonas de alta resolución (energía de paso de 20 eV, 45° de “take-off angle” con paso de 0.1 eV)

6.6.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido (SEM) por sus siglas de inglés, es un instrumento empleado para examinar y analizar la microestructura superficial y morfológica de muestras orgánicas e inorgánicas en una escala de unos pocos nanómetros. El fundamento físico de la técnica es la interacción del haz de electrones con átomos de la muestra, la superficie del material es enfocada con un haz de electrones con energías de excitación desde 0.1kV hasta 30 kV, que escanea la superficie de la muestra, en donde una serie de detectores analiza el resultado de la interacción electrón muestra y una bomba de vacío. Este conjunto de elementos está colocado en la columna ver figura, la cual constituye la parte principal del microscopio. La columna debe de estar al vacío, debido de que el haz de electrones solo debe interactuar con la muestra.

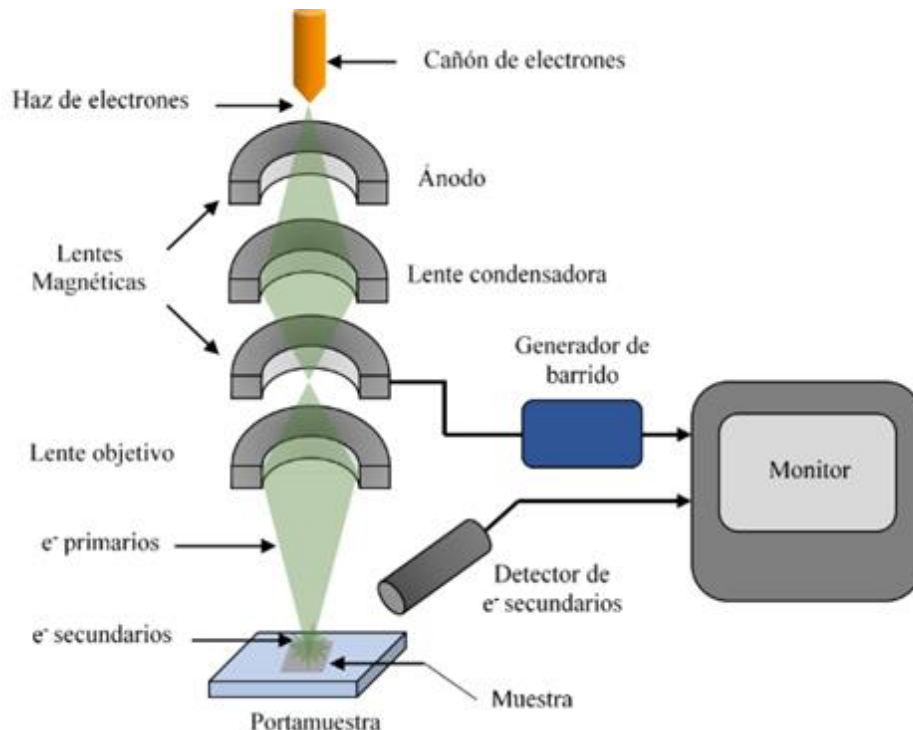


Figura 34. Esquema de las señales generadas en el SEM interactuando con la muestra^{77,78}.

El haz de electrones del SEM se dirige finamente concentrado en una zona determinada sobre la prueba. Los tipos de señales producidas son: electrones secundarios estos electrones son de baja energía que resultan de la emisión por parte de los átomos de la muestra debido a la colisión con el haz incidente de electrones. Estos electrones ofrecen información de la topografía produciendo una imagen en blanco y negro de la muestra examinada⁷⁶.

Asimismo, “la emisión de electrones retro dispersados depende fuertemente del número atómico de la muestra. Por tanto, dos partes de la muestra que tengan distinta composición se revelan con distinta intensidad, aunque no exista ninguna diferencia de topografía entre ellas” y “los rayos X que se generan en una muestra sometida a bombardeo electrónico permiten identificar los elementos presentes y establecer su concentración. En la figura, se muestra un diagrama esquemático de las señales que se obtienen de la interacción del haz de electrones con la muestra

El equipo utilizado, para evaluar la morfología superficial es el SEM JEOL JSM-6390LV, Tokio Japón, con filamento de tungsteno a un voltaje de aceleración de 30 kV y una distancia de trabajo de 10 mm y con un aumento de resolución de 10 nm.

6.6.5 Microscopia de fuerza atómica (AFM)

El Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) también llamado en inglés Scanning Force Microscope (SFM), es un instrumento óptico, el cual puede detectar pequeñas fuerzas generadas cuando una punta de tamaño manométrico, colocada sobre una barra flexible llamada cantiléver, interactúa con la superficie de una muestra hace un barrido dirigido a través de la muestra, ver la figura 35.

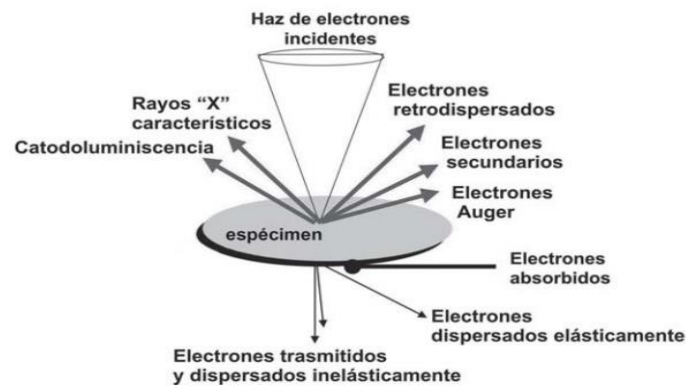


Figura 35. Funcionamiento del AFM⁷⁷.

Esta interacción se da principalmente a través de fuerzas de repulsión-atracción átomo a átomos de tipo Van der Waals, las cuales se pueden medir cuando el cantiléver acerca la punta a la muestra, a distancias de pocos nanómetros, entonces por la fuerza atómica sobre la punta el cantiléver sufre una torsión que defleca el haz del láser que incide sobre sobre este, dicho haz es detectado por un fotodetector. Para dirigir el barrido, la muestra se coloca sobre un cristal piezoeléctrico para aplicar una diferencia de voltaje esto permite hacer un escaneo fino sobre la muestra. Ver figura 36.

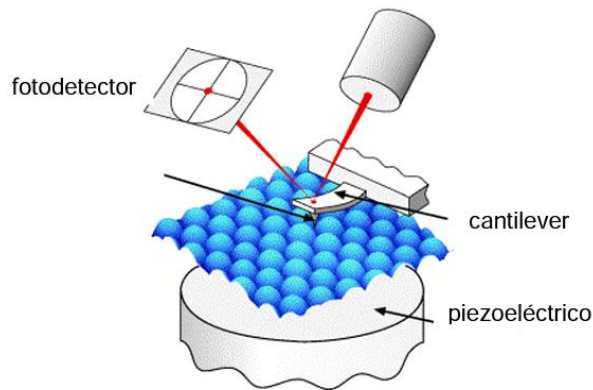


Figura 36. Esquema del cantiléver y piezoeléctrico.

La imagen se forma a partir de los datos que se obtiene del movimiento de la punta en el plano de la superficie (movimientos x-y) y el eje z es causado por la torsión del cantiléver.

Existen tres métodos operacionales para el AFM, el método de contacto consiste en el acercamiento de la punta a la superficie y funciona por fuerzas de repulsión y el otro método es sin contacto en el cual la distancia es mayor, es decir, la punta del cantiléver no toca la superficie de la muestra y las fuerzas que actúan son de atracción. Dependiendo el material a evaluar define el método a utilizar, es decir para materiales blandos o elásticos es recomendable utilizar el método sin contacto ya que ofrece mayores ventajas, además evita la contaminación de la muestra y permite mayor conservación de las puntas.

En la figura 37, se representa las diferentes formas de energía según el escaneo utilizado, se muestra como a mayor distancia entre la punta de la sonda y los átomos del depósito, las fuerzas que intervienen son de tipo atractivas entre átomos, en este punto el modo es denominado de no contacto, y la energía potencial disminuye hasta cierto punto de estabilidad, en donde la distancia entre el cantiléver y la muestra es tan pequeño, que las fuerzas que se presentan, son de repulsión, y la energía asciende, indicando el modo de contacto⁷⁷.

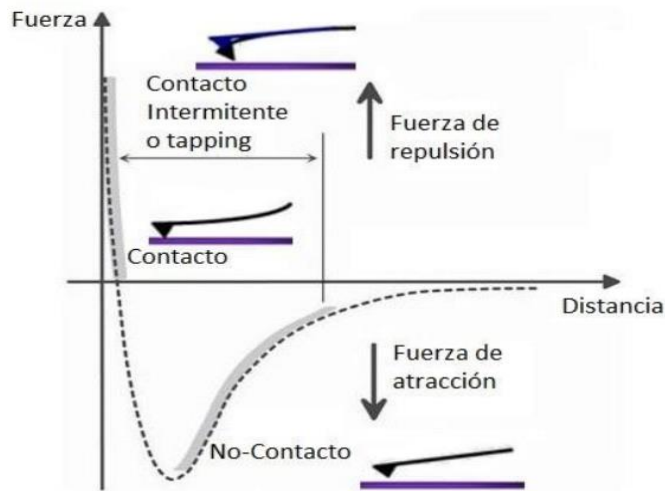


Figura 37. Funcionamiento operativo del AFM⁷⁸

El AFM evalúa una gran cantidad de muestras líquidas, sólidas, orgánicas y materiales inorgánicos. Este da información detallada de tamaños de granos, defectos cristalinos y la morfología, la cual permite la evaluación detallada de los fenómenos de crecimiento y las energías implicadas en el proceso^{78,79}.

Además de proporcionar una imagen de la topografía de la muestra, el AFM también puede usarse para medir propiedades mecánicas y eléctricas de la superficie.

Las imágenes AFM se obtuvieron en un equipo ASYLUM RESEARCH, modelo PARK NX10 MFP3D-SA, empleando la técnica de modo Tapping o modo AC en aire. Los escaneos (barridos) se realizaron en áreas de $Z \mu\text{m} \times Z \mu\text{m}$, en un intervalo de velocidad de 0.10 a 0.5 Hz. Se empleó un cantiléver rectangular con frecuencia de la primera resonancia nominal de 70 kHz, constante de resorte (k) nominal de 2 N/m y un radio de curvatura nominal de 9 nm.

7 RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos a partir de las caracterizaciones de la superficie de la pieza y de las películas de Aluminio, producido mediante sputtering DC. Se describen los resultados de las pruebas y las gráficas obtenidas de las mediciones interferométricas, ópticas y morfológicas del espejo óptico de resina polimérica (resina estándar clear FromLabs).

7.1 Evaluación de la calidad superficial de PS

Un interferómetro de Zygo, una herramienta de alta precisión para evaluar la calidad superficial de las piezas después de la optimización de la superficie, se obtuvo para validar los resultados de las piezas finales. La interferometría utiliza un láser para calcular la diferencia de fase entre dos superficies o entre una superficie y una referencia conocida. En el caso de los componentes, la calidad superficial se puede evaluar en una variedad de longitudes de onda, lo que permite medir imperfecciones tanto a una escala micro como nano. El interferómetro Zygo muestra la superficie en tres dimensiones, lo que permite visualizar la topografía de la pieza en su totalidad. Esto permite la detección de defectos de superficie y la comparación de la uniformidad de diferentes áreas.

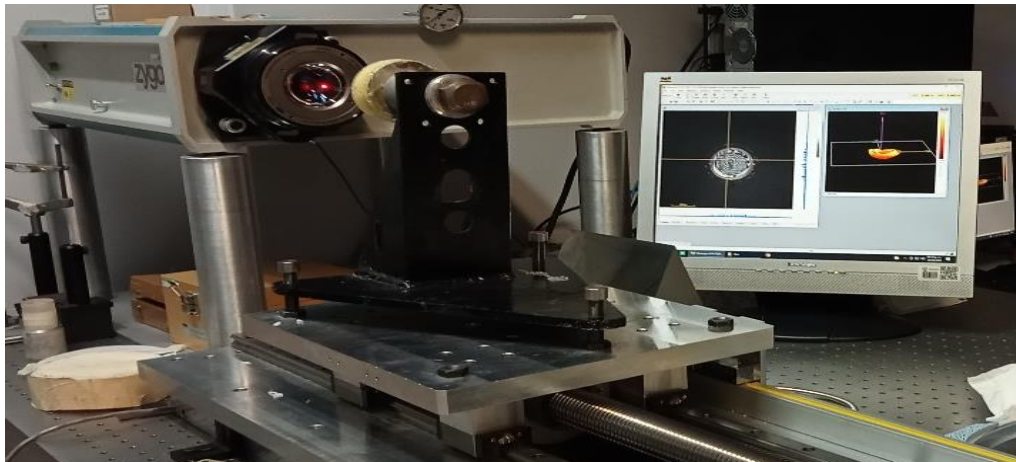


Figura 38. Interferómetro tipo Fizeau de la marca Zygo.

En las figuras (Fig: 39,40 y 41), se muestra la información de la optimización de las superficies. A través del análisis, se han registrado variaciones significativas del PV y RMS en cada una de las piezas. Esto se debe a ciertos factores que afectan la calidad de las superficies, como la forma en que se han fabricado o la calidad de las herramientas utilizadas durante la optimización de la pieza.

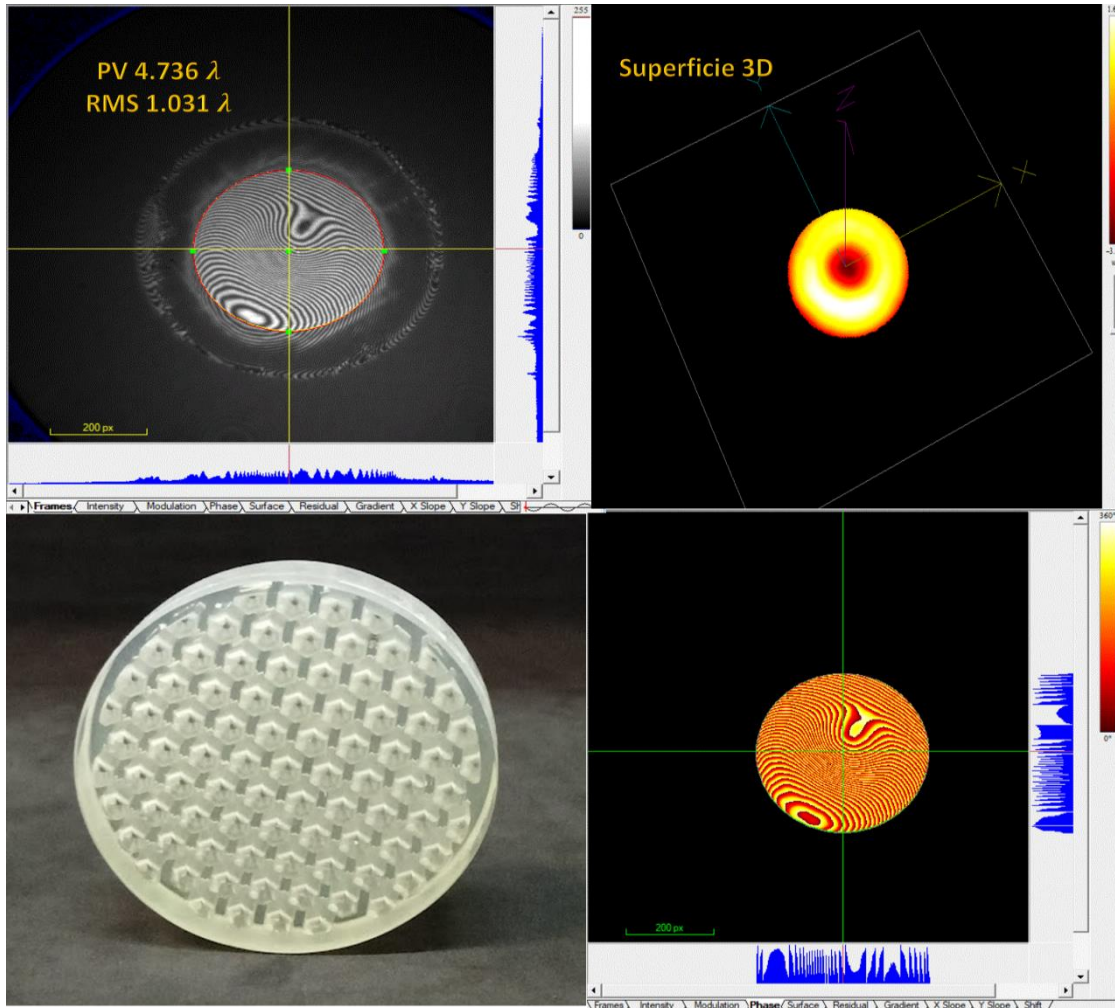


Figura 39. Medición de las irregularidades de la superficie diseño de panel.

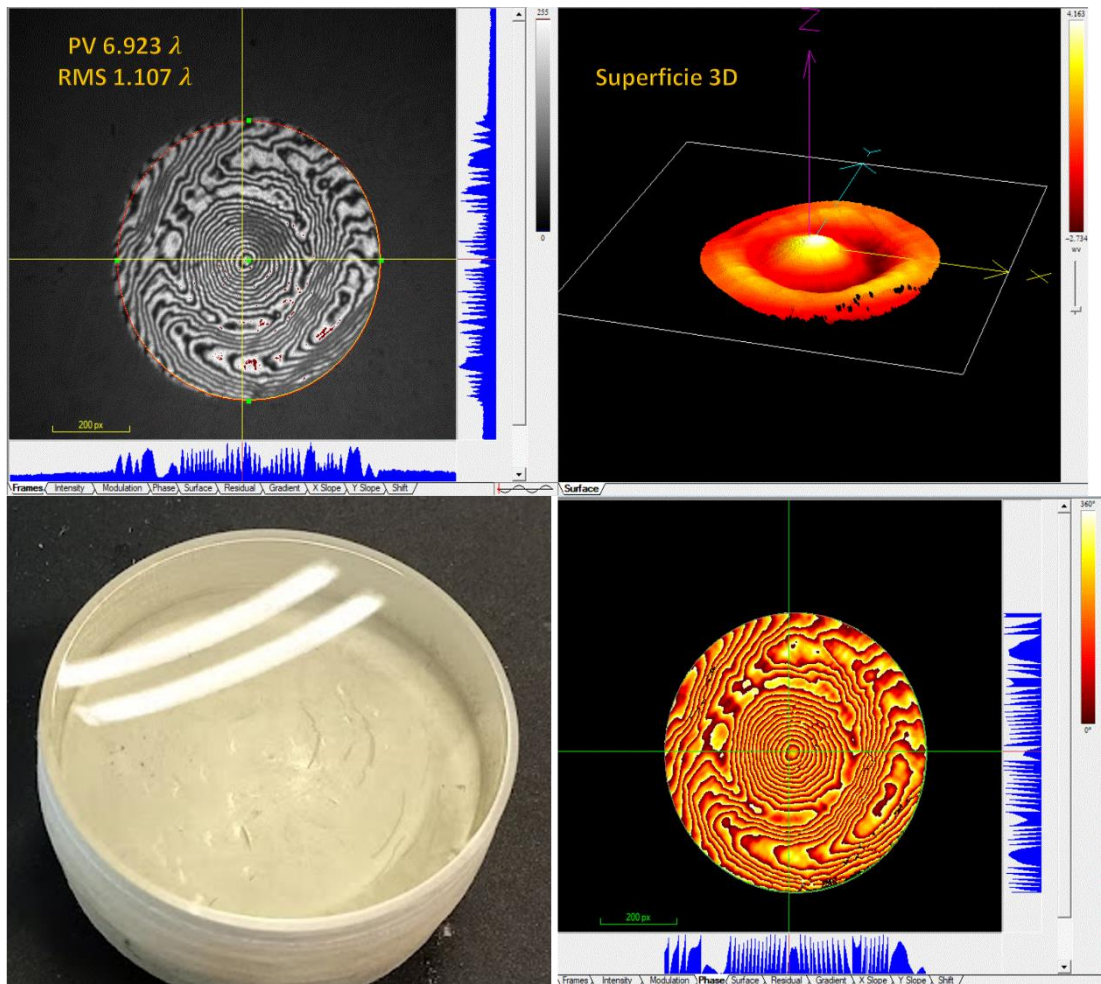


Figura 40. Medición de las irregularidades de la superficie de una superficie cóncavo con un R100.

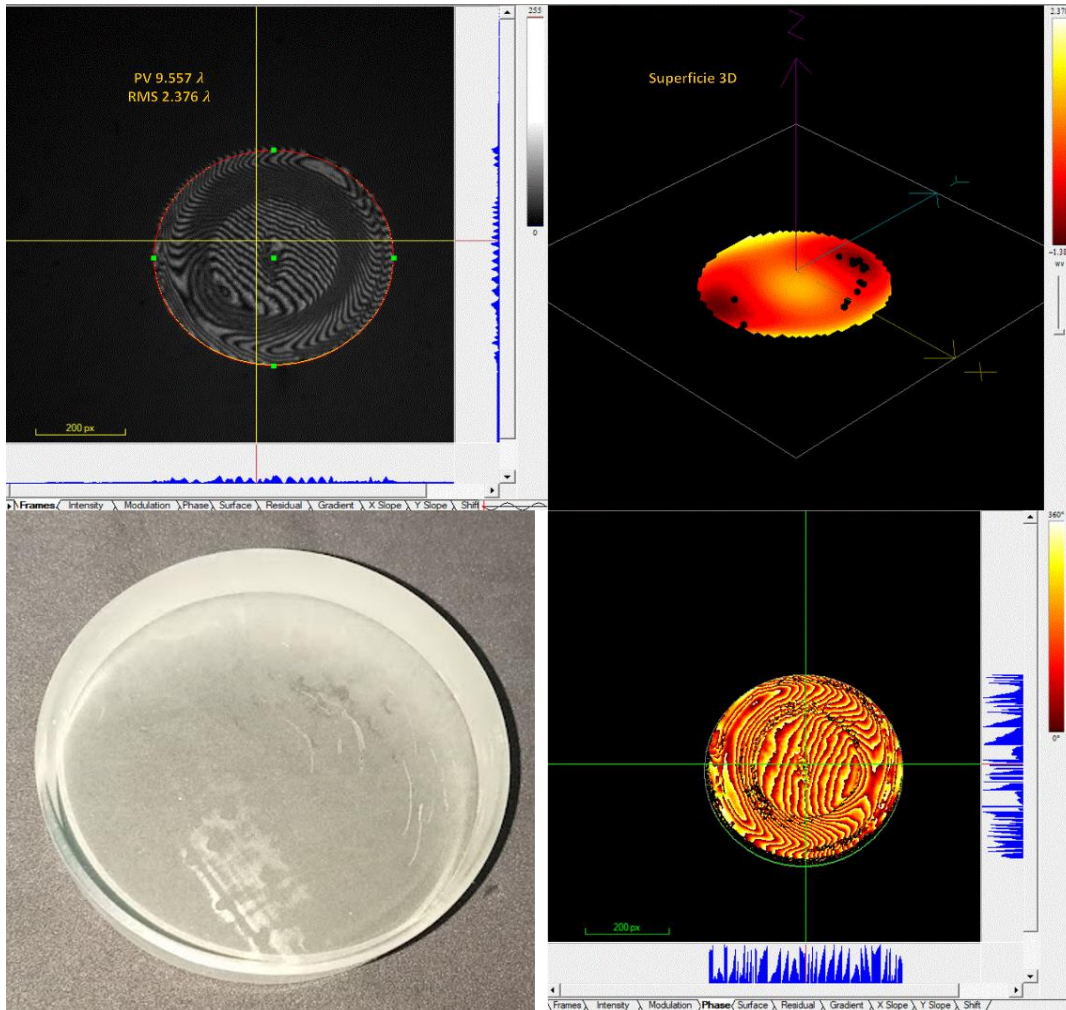


Figura 41. Medición de las irregularidades de la superficie de una superficie cóncava con un R200.

En general las mediciones de las superficies aparentan ser altas, sin embargo, hay que considerar el proceso de optimización de la superficie y la manufactura del material polimérico. Por un lado, la variable que en el proceso respeta a la relación PV, el RMS mostraron errores, pero se observaron franjas de interferencia donde se observan deformaciones del orden 3λ en pico-valle y 0.46λ RMS ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$).

Durante el proceso de optimización de la superficie de las piezas de resina clear se utilizó el método tradicional, que permite llegar a una superficie lisa. Según los

reportes de^{80,81,82,4} optimizan la superficie del polímero usando diferentes técnicas de pulido y logran una superficie lisa con acabado transparente.

Para la medición de la rugosidad es crucial para asegurar la calidad del acabado, especialmente cuando se considera el método de fabricación y los materiales utilizados. La capacidad de un espejo para reflejar la energía sin dispersarla se mide en su rendimiento, y esto depende de las frecuencias espaciales presentes en la geometría de la superficie^{83,4}, lo cual a su vez está estrechamente relacionado con la rugosidad de la misma. En definitiva, la rugosidad es un aspecto clave a tener en cuenta para lograr un acabado de alta calidad. En la figura se muestra la rugosidad medida de la superficie de la resina, donde se obtuvo una rugosidad de 5 nm en un área de escaneo de $60 \times 60 \mu\text{m}$. Ver figura 42.

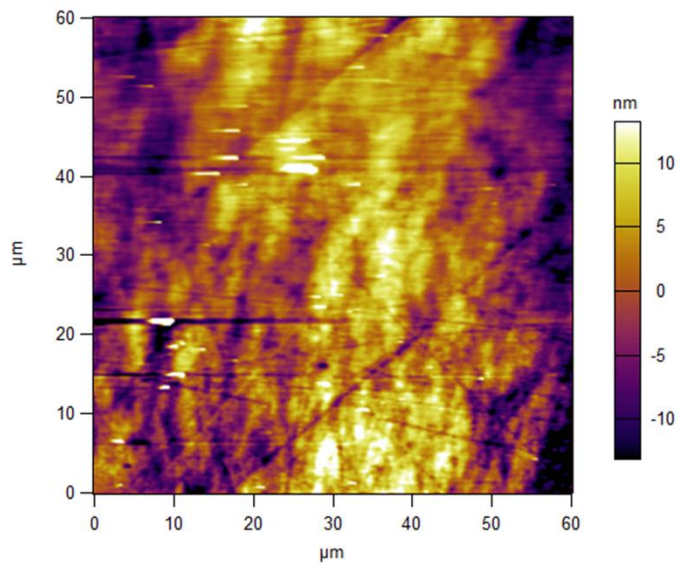


Figura 42. Micrografía AFM de la superficie polimérica.

Por otro lado, para la medición del índice de refracción se utilizó una pieza polimérica de $2.5 \times 3 \times 1 \text{cm}$, se realizó un pulido previo a la medición. En la tabla 4, se muestra en resultado de la medición del índice de refracción de la resina en la cual se compara con el índice de refracción del vidrio BK7.

Tabla 4. Índice de refracción.

Sustrato	Rugosidad	Índice de refracción
Clear Formlabs	5 nm	1.505
N-BK7	0.5 nm	1.516

Es importante destacar que la rugosidad puede variar según el proceso de fabricación y el tratamiento superficial utilizado.

tiene una superficie más lisa y uniforme debido a su proceso de fabricación, mientras que la resina estándar Clear de FormLabs puede tener pequeñas imperfecciones o inclusiones debido al proceso de fabricación de impresión 3D por estereolitografía. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la rugosidad también puede depender del grado de acabado y pulido en la superficie del material en cuestión.

En la tabla 5, se muestra una comparación de la densidad de la resina estándar Clear de Formlabs es de aproximadamente 1.09 g/cm^3 , mientras que la densidad del vidrio BK7 es de alrededor de 2.51 g/cm^3 . Por lo tanto, podemos decir que el vidrio BK7 es más denso que la resina estándar Clear de Formlabs. Sin embargo, el volumen y la masa registrada en la tabla depende del tamaño y forma de la pieza, en general de acuerdo a lo reportado en la tabla el vidrio tendrá mayor volumen que la resina esto debido a que el vidrio no se expande ni se encoge durante su producción, en tanto que la resina se contrae ligeramente a medida que se cura y por ende el vidrio es más pesado debido a la mayor densidad.

Tabla 5. Comparación del el peso y la densidad de la resina con el vidrio Bk7.

Sustrato Plano	Estructura	Diámetro ϕ	Espesor (mm)	Masa (gr)	Volumen (cm³)	Densidad del material (g/cm³)
Diseño 1	Panal	2"	15	33.13	30.4024	1.09
Diseño 2	Solido	2"	15	33.13	30.4024	1.09
N-BK7	Solido	2"	15	76.31	30.4024	2.51

En la tabla 6, se describe

Tabla 6. Comparación de las piezas poliméricas y el vidrio Bk7 sólido.

Sustrato Plano	Estructura	Diámetro ϕ	Espesor (mm)	Resina utilizada (mililitros)	Peso (g) pieza	Densidad de la pieza (g/cm³)
Diseño 1	Panal	2"	15	17.05	22.078	0.7261
Diseño 2	Solido	2"	15	30.16	35.967	1.1830
N-BK7	Solido	2"	15	-	76.31	2.5099

7.2 Aluminizado por Sputtering

Las piezas se colocaron en la montura dentro de la cámara esférica (Sputtering), en la que se llevó a cabo el aluminizado.

El proceso de recubrimiento se realizó con la técnica de erosión iónica magnetrón sputtering. En la figura 43, se muestra el interior de la cámara el sustrato a recubrir con aluminio de una alta pureza (99.99%). Cabe mencionar que la deposición de películas de aluminio sobre el sustrato fue homogénea concéntrica en dirección al magnetrón.

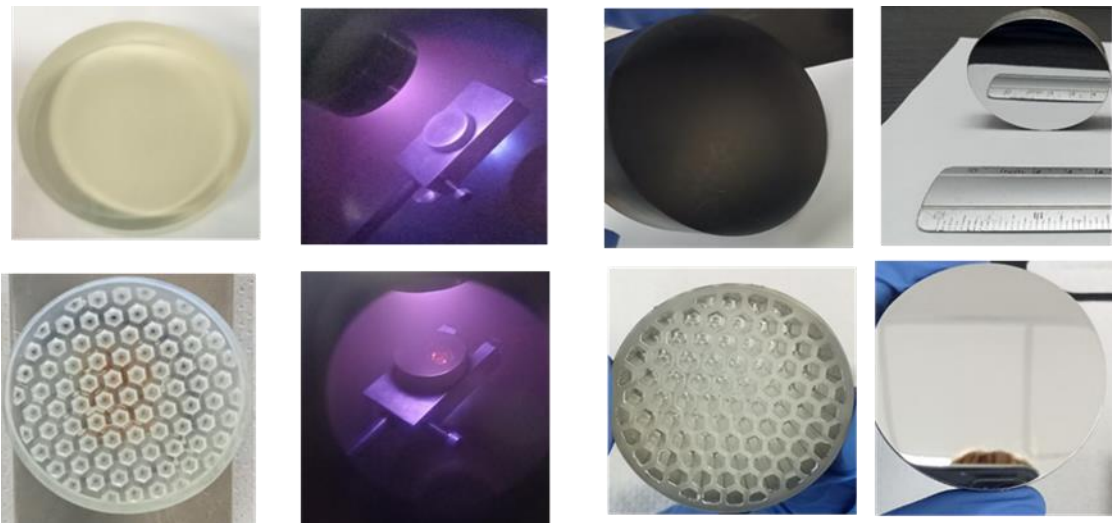


Figura 43. Se observa la película de aluminio depositada sobre el sustrato impreso en 3D.

En general el proceso de aluminizado no mostro alteraciones significativas en piezas polimericas y aun que aun hay imperfecciones, como todo proceso se caracterizo las interacciones del polimero con la película de aluminio.

Lo que indica que los espejos son aptos para la deposcion de las películas reflectantes sin comprometer su fabricación.

7.3 Caracterización óptica de las películas de Al

7.3.1 UV-Visible

Se realizaron mediciones de reflectancia para el rango de longitud de onda de 300 nm a 800 nm para corroborar la eficacia del aluminizado de las superficies poliméricas. Como se muestra en la figura 44, se observa que la reflectancia de la superficie muestra un promedio de 87.75% en el visible y un 68.39% en el UV. El aluminio es uno de los metales que presenta una alta reflectancia después de la plata⁸⁴. Existe una tendencia de una ligera disminución de la reflectancia en el rango en longitudes de onda corta para las superficies. Es evidente observar que la reflectancia mas alta está en el visible.

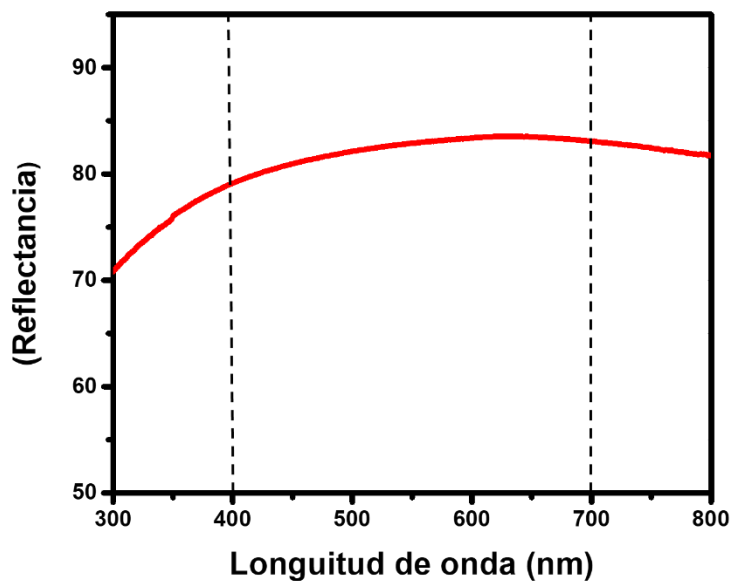


Figura 44. Grafica Uv-Vis reflectancia de Al.

7.4 Caracterizaciones morfológicas de las películas de Al

7.4.1 Difracción de Rayos X (XRD)

El análisis de los difractogramas en la figura 53 muestra el patrón de los escaneos XRD para las películas de aluminio obtenidos por el método de Sputtering DC. En trabajos recientes⁸⁵ mencionan que no existe un tamaño, sino una distribución de tamaños que contribuyen a cada pico de la difracción.

Se realizó el análisis para determinar la cristalinidad de las diferentes fases. El patrón muestra picos típicos correspondientes a los planos cristalográficos (111), (200), (220) y (311), que están relacionados a la presencia de la estructura de aluminio de acuerdo con la ficha cristalográfica JCPDS 004-0787⁸⁶ (figura 53b). La estructura tiene una textura que se ha observado en otros trabajos en las que se depositaron películas de aluminio muestra el patrón de los picos de las películas de aluminio en ángulos de difracción 2θ correspondientes a 38.5° , 45° , 65° , 78° que corresponde a los planos antes mencionados. Estos datos son consistentes para la difracción de aluminio con pureza de 99.99%. La exploración de ángulo máximo de 2θ de referencia que fue de 140° . Esta semejanza de picos confirma que las muestras utilizadas son efectivamente películas de aluminio (ver figura 45).

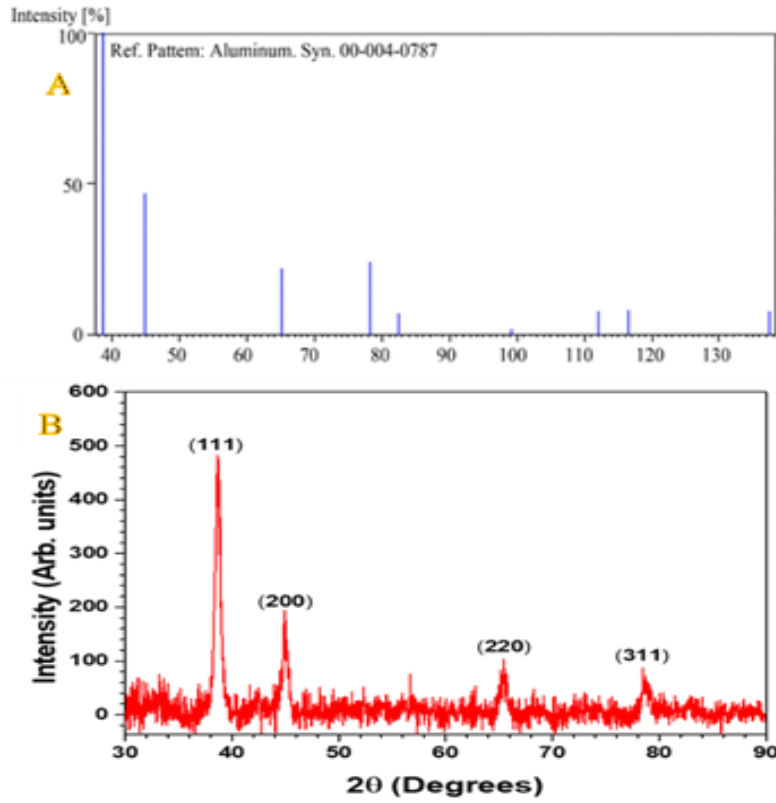


Figura 45. (a) Patrón de difracción de las películas de Aluminio a referencia (b) patrón obtenido depositadas por sputtering.

7.4.2 Espectroscopia de fotoelectrones dispersados (XPS)

Figura 46 muestra la composición básica de las películas de aluminio estimada por la medición de XPS típico survey de la superficie metálica del aluminio. La superficie de la película tiene una contaminación de carbono y oxígeno.

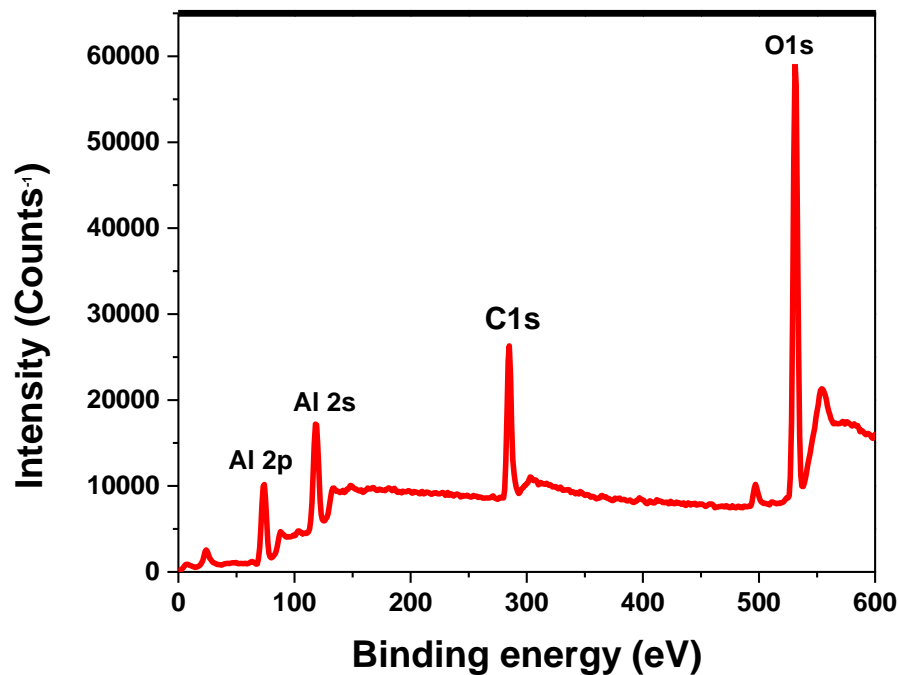


Figura 46. Espectro de las películas de Aluminio.

En la figura 47 se muestra la desconvolución del análisis de XPS del Al, lo que nos arroja que se obtuvo un valor aceptado para las películas del aluminio que se encuentra reportado alrededor de 73 eV⁸⁷, en la figura 55 se muestran los picos de aluminio Al2p para las películas fabricadas por sputtering DC. El análisis de la superficie de la película mostro la formación de aluminio alrededor de 71.6 eV, 72.14 eV, 74.04 eV y 74.41 eV, como lo muestra la figura, los picos desplazados a energías mayores corresponden al oxido de aluminio (alúmina), como menciona la literatura que la energía de enlace mayor a 74 eV^{87,88,89}.

Por lo que el razonamiento de la contaminación presente se debe a las reacciones que ocurren en la superficie de la película después del aluminizado debido a la exposición al ambiente.

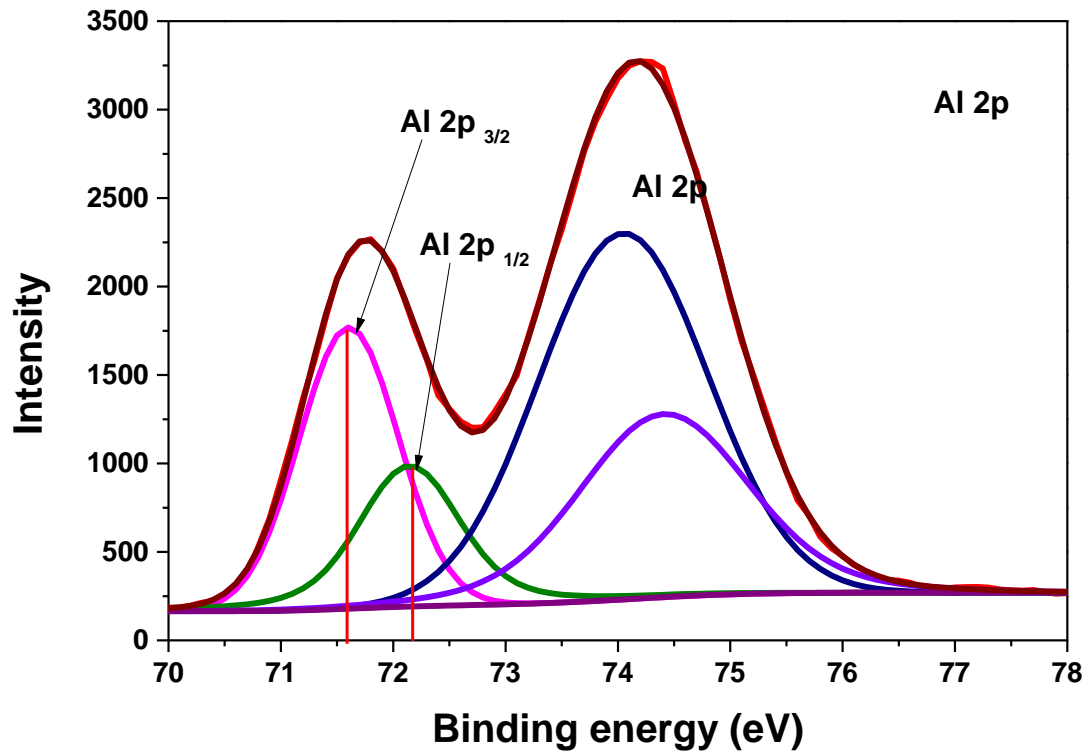


Figura 47. Escaneo XPS de espectros de las películas de Aluminio depositadas.

7.5 Análisis de imágenes de Microscopia

7.5.1 Microscopio electrónico de barrido (SEM)

Los análisis obtenidos por SEM, proporciona un mayor y más detallado acercamiento a la superficie de la película⁹⁰. Mediante esta técnica se detectó la imagen de la figura 48, de la muestra con un recubrimiento de la película de aluminio. En estas figuras es posible observar la aglomeración de granos homogéneos sobre la superficie. Además, se observan que tiene una superficie lisa con un contraste uniforme, además se muestran en la superficie unas pequeñas partículas que se asocia a defectos de la superficie las cuales no son significativas para la película.

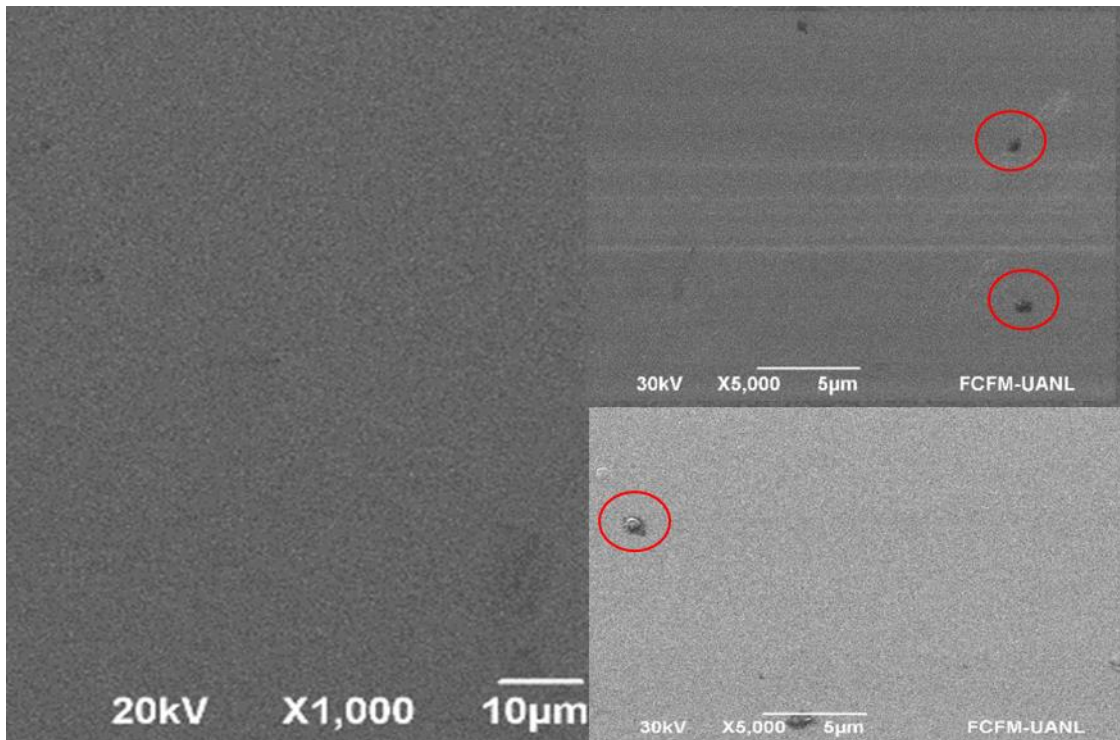


Figura 48. Imágenes del SEM de películas de Aluminio

7.5.2 Microscopio de fuerza atómica (AFM)

La morfología de la superficie de las películas de aluminio se estudió mediante mediciones de AFM en áreas de escaneo en áreas seleccionadas al azar de $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ y $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$, en la morfología se cuantificaron por la raíz cuadrada media de la rugosidad (R_a). En la figura 49, muestra los escaneos 2D AFM de las películas de Aluminio depositadas por sputtering sobre sustratos de resina polimérica. Se obtuvo un valor de $R_a \sim 1.85\ \text{nm}$ para las muestras, es decir, la morfología de la superficie no depende del sustrato.

Los resultados de AFM muestran que las condiciones de deposición utilizada no provocan daños en la superficie de las películas y el sustrato y el aluminizado sobre el polímero fue exitoso.

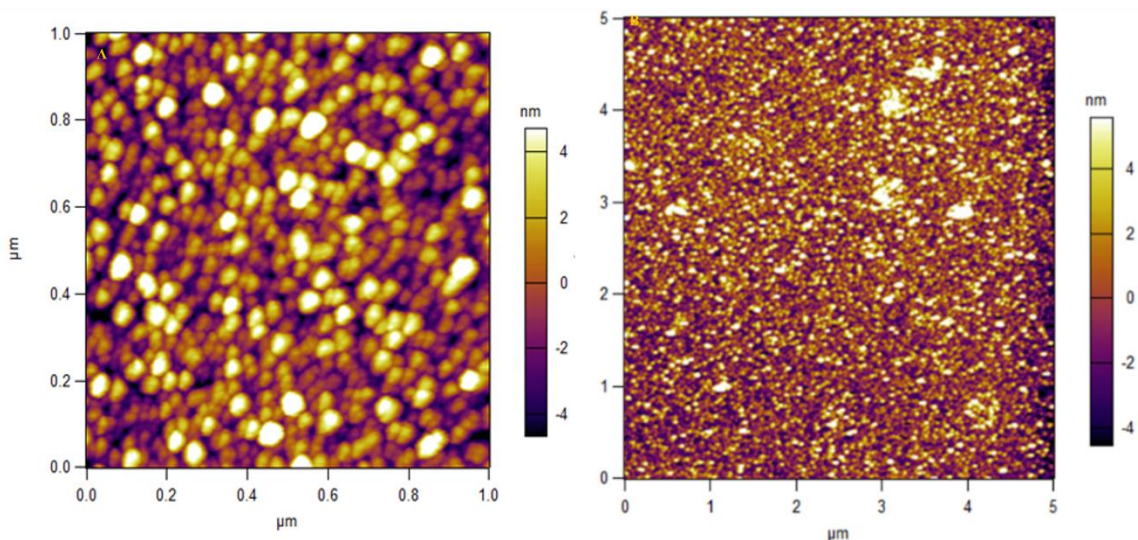


Figura 49. Micrografías 2D de AFM de las películas de aluminio depositadas por magnetron sputtering (A) un campo de visión de $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$. (B) un campo de visión de $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$.

8 CONCLUSIONES

- El proceso de diseño, fabricación y metalizado de piezas polimérica se confirma que se pueden realizar depósitos metálicos en sustratos en resina fotosensible.
- La estereolitografía es una técnica de impresión 3D con una elevada precisión. El ejemplo claro está en la elaboración de piezas. Las dimensiones de un rango de error oscilan aproximadamente $\pm 0.5 \text{ mm}$. Gracias a las mediciones realizadas la impresión SLA, es utilizada para trabajos de diseño de precisión como superficies ópticas.
- Se usó la técnica de Sputtering DC para depositar películas delgadas de Al sobre el sustrato.
- Su caracterización superficial se realizó mediante análisis de XPS, SEM y AFM para la explorar las propiedades de la película delgada.
- El recubrimiento uniforme del aluminio fue confirmado por el análisis del SEM a detalle en la que se observaron depósitos homogéneos sobre el sustrato.
- Las ventajas del diseño son la reducción de peso, tiempos cortos de fabricación.
- Este trabajo contribuye al diseño y la fabricación de espejos ópticos reflectantes mediante depósitos de películas de aluminio, sobre sustratos poliméricos impresos en 3D.

9 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios con diferentes materiales para encontrar que material ofrece mejor rendimiento dimensional, en función de las propiedades térmicas y mecánicas.
- En futuras impresiones 3D de resina aumentar los tiempos de optimización de la superficie y probar con otras técnicas de pulido mecanizado.
- Hacer pruebas de interferometría y calidad de imagen de las superficies optimizadas.

10 REFERENCIAS

1. Bely, P. Y., 2003. The Design and Construction of Large Optical Telescopes. Astronomy and Astrophysics Library. Springer, 1st edition.
2. Cheng, J. 2009. The principles of astronomical telescope design. Springer, 360, 1-615.
3. Noethe, L., 2009. History of mirror casting, figuring, segmentation and active optics. Exp. Astron. 26, 1-18.
4. Cunningham, C. R., 2009. Future technologies for optical and infrared telescopes and instruments. Exp. Astron., 26, 1–3.
5. Gilmozzi, R., 2004. Science and technology drivers for future giant telescopes. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 5489, pp. 1–10.
6. Malacara, D, 2007. Optical shop testing. 3era. Edición.
7. Vaidya, N., Solgaard, O., 2018. 3D printed optics with nanometer scale surface roughness. Microsystem & Nanoengineering, 4,1-8.
8. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T.Q., Hui, D.,2018. Additive manufacturing (3D): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B, 143, 172-196.
9. Sebbe, N.P.V., Fernandes, F., Sousa, V. F.C., Silva, F. J. G., 2022. Hybrid manufacturing processes used in the production of complex parts: A comprehensive review. Metals MDPI. 12, 1-20.
10. Zuo, C., Qian, J., Feng, S., Yin, W., Li, Y., Fan, P., Han, J., Qian, K., Chen, Q., 2022. Deep learning in optical metrology: a review. Light Science & Application. 11, 1-54.
11. Zhang, C., Li, Z., 2022. A review of lightweight desing for space mirror core structure: Tradition and future. Machines. 10, 1-19.

12. Bautista-Hernández, A., Villalobos-Mendoza, B., Pérez-Tijerina E., and Aguirre Aguirre, D., 2022. Study and characterization of components fabricated in a 3D printer. *Journal of Physics: Conference Series*.
13. Aguirre-Aguirre, D., Gonzalez-Utrera, D., Villalobos-Mendoza, B., Diaz-Uribe, R., 2023. Fabrication of biconvex spherical and aspherical lenses using 3D printing. *Appl. Opt.* 62, C14-C20 – 7.
14. Bass, M. 2010. *Optics*, McGraw-Hill, 2, 1-1264.
15. Zhang, W. W., Allgood, K. D., Biskach, M., Chan, K.W., Hlinka, M., Kearney, J. D., Mazzarella, J.R., McClelland, R. S., Numata, A., Riveros R.E., Saha, T.T., Solly P. M. 2019. High-resolution, lightweight, and low-cost x-ray optics for the Lynx observatory. *J. of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 5, 1-34.
16. Butt, M. A., 2022. Thin-film coating methods: A successful marriage of High-quality and cost-effectiveness- a brief exploration. *Coatings*, MDPI. 12, 1-22.
17. Hummel, R. E., Guenther, K. L. 1995. *Optical Properties. Optica coatings*, 1, 1-353.
18. Arias, N., Jaramillo, F. 2019. Highly reflective aluminum film on polycarbonate substrates by physical vapor deposition. *Applied Surface Science*, 505.1-6.
19. Singh, M. M., Vijaya, G., Krupashankara, M. S., Sridhara, B. K., Shridhar, T. N. 2018. Deposition and Characterization of Aluminium thin film coating using DC Magnetron sputtering process. *Materialstoday*, 5, 2696-2704.
20. Zhang, J. 2017. Design and Manufacture of an Off-axis Aluminum Mirror for Visible-light Imaging. *Photonics*, 1, 364-371.
21. Almanza, R., Hernández, P., Martínez, I., Mazari, M. 2009. Development and Mean life of Aluminum First- Surface Mirrors for Solar Energy Applications. *Solar Energy Materials and Solar Cell*, 9,1647-1651.

22. Ishutov, S., Hasiuk, F. J., Jobe, D., Agar, S., 2018. Using resin-based 3D printing to build geometrically accurate proxies of porous sedimentary rocks. *Groundwater*. 56, 482-490.
23. Walker, D. D., Yu, G., Li, H., Myer, B. W., Beaucamp, A. T., Namba, Y., Wu. L. 2019. Title advances in optical fabrication for astronomy. *Monthly Notices*, 485, 2071-2082.
24. Patmonoaji, A., Mahardika, M.A., Nasir, M., She, Y., Wang, W., Muflikhun, M.A., Suekane, T., 2022. Stereolithography 3D Printer for Micromodel Fabrications with comprehensive accuracy evaluation by using microtomography . *Geosciences*, MDPI. 12, 1-17.
25. Berglund, D. G., Tkaczyk, S. T. 2019. Fabrication of optical components using a consumer-grade lithographic printer. *Optics Express*, 27, 30405-30420.
26. Berglund, D. G., Tkaczyk, S. T. 2022. Enabling consumer-grade 3D-printed optical instruments- a case study on design and fabrication of a spectrometer system using low-cost 3D printing technologies. *Optics CONTINUUM*, 1, 516-526.
27. Depla, D., Mahieu, S., 2008. *Reactive Sputter Deposition*. Springer Series in Materials Science, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-540-76662-9.
28. Wasa, K., Kanno, H. K., 2012. *Handbook of Sputter Deposition Technology: Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nano-Materials and MEMS*. 2nd edition.
29. Brooks, D., 2001. *The production of metal mirrors for use in astronomy*. University College London. (Tesis doctoral).
30. Herrera-Vázquez, J., 2008. *Diseño de un telescopio anastigmático y compacto con tres espejos cónicos*. INAOE, (tesis doctoral).
31. Hecht, E., 2016. *Óptica*. Editorial Pearson. 5, pp-724.

32. Rivera-Ramos, H., 2005. Rutas de manufactura por control numérico para la instrumentación astronómica. UNAM, (Tesis licenciatura).
33. Conde-Saavedra, G., 2018. El telescopio: una primera ventana al universo. *Revista Boliviana de Física*, 33, 27-34.
34. Dominguez-Retamoza, E. A., 2016. Desarrollo de un sistema de sincronización espacial para comunicaciones ópticas satelitales. UNAM, (tesis maestría).
35. Preumont, A., Bastaits, R., Surdej, I., Collette, C., 2012. Challenges in precision and vibration control for physics experiments. *J. Systems and Control Engineering* 226 (7) 864-866.
36. Malacara, D., 2015. Óptica básica. Fondo de cultura económica.
37. Hecht, E., 2002. Optics. Addison Wesley.
38. Pedrotti, F. L., Pedrotti, L.S., Pedrotti, L. M., 2017. Introduction to optics. 3rd edition, Cambridge University Press, Cambridge.
39. Parks, R.E., 1982. Overview of optical manufacturing methods. *Proceeding of SPIE*, 306,
40. Izazaga, R., Carrasco, E., Hidalgo, A., Aguirre, D., Terlevich, E., Terlevich, R., Dalton, G., Trager, S., Aguerri, L. J. A., Bonifacio, P., Vallenari, A., Abrams, C., Middleton, K., 2018. WEAVE spectrograph cameras: the polishing of the spherical lenses. *Proc. SPIE*, 10706, 1-21.
41. Izazaga-Pérez, R., 2015. Pulido de superficies ópticas fuera de eje a partir de superficies esféricas. INAOE (Tesis doctoral).
42. Accostupa, Y., 2007. Desarrollo de un objetivo de telescopio astronómico refractor para observación lunar orientadas a la enseñanza de la astronomía. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, (Tesis maestría).

43. Huang, J., Qin, Q., Wang, J., 2020. A Review of Stereolithography: Processes and Systems. *Process*. 8, 1-16.
44. Gibson, I., Rosen, W. D., Stucker, B., 2014. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer.
45. Somireddy, M., Czekanski, A., Singh, C.V., 2018. Development of constitutive material model of 3D printed structure via FDM. *Mater. Today Comun.* 15, 143–152.
46. Rank, M., Heinrich, A., 2020. One shot high resolution refractive index profile measurement for 3D printed optics (conference presentation). *Proc. SPIE*. 11294.
47. Taormina, G., Sciancalepore, C., Messori, M., Bondioli, F., 2018. 3D printing processes for photocurable polymeric materials: Technologies, materials, and future trends. *J. Appl. Biomater. Funct. Mater.* 16, 151–160.
48. ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies, & ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. Subcommittee F42. 91 on Terminology 2012. *Standard terminology for additive manufacturing technologies*. Astm International.
49. Bove, A., Calignano, F., Galati, M., Iuliano, L., 2022. Photopolymerization of ceramic resins by Stereolithography process: A review. *Appl. Sci.* 12, 1-17.
50. Li Jinguo, An Xiaolong, Liang Jingjing, Zhou Yizhou, Sun Xiaofeng. 2022. Recent advances in the stereolithographic three-dimensional printing of ceramic cores: Challenges and prospects. *Journal of Material Science & Technology*, 117, 79-98.
51. Melchels W. F. P., Feijen J., Grijpma D. W., 2010. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials* 24, 6121-6130.

52. Bártolo, P. J., 2011. Stereolithography: materials, processes and applications. Springer Science & Business Media.
53. Impression 3D por estereolitografía (SLA): vision general de la tecnología <https://xometry.eu/es/impresion-3d-por-estereolitografia-sla/>, (accesado diciembre 2022)
54. Form3+ Rapid, Flawless Prints Every Time. <https://formlabs.com/3d-printers/form-3/>, (accesado Diciembre 2022).
55. Liou, W. F., 2007. Rapid prototyping and engineering applications a toolbox for prototype development. Boca raton, 562.
56. Gilbert, J., 2017. Aluminium: properties, production and applications. CRC Press.
57. Lemared, S., Ferrari, M., Dufour, T., Du Jeu, C., Hugot, E., Lemaitre, G.R., 2019. High performance large lightweight mirrors fabrication adapted to stress-mirror polishing (SMP) technique. International Conference on space optics SPIE. 11180, 2459-2467.
58. Smith D., 2012. Thin film deposition: principles and practice.
59. Dehnavi, V., Liu, X. Y., Luan, B.L., Shoesmith, D.W., Rohani, S., 2014. Phase transformation in plasma electrolytic oxidation coating on 6061 aluminum alloy. Surface and coating technology, 25, 106-114.
60. Manova, D., Gerlach, J.W., Mandil, S., 2010. Thin film deposition using energetic ions. MDPI MATERIALS. 3, 4109-4141.
61. Knepper, R. A., Messier, R.F., 2001. Thin film morphology at low adatom mobility. in Complex Mediums II: Beyond Linear Isotropic Dielectrics. International Society for Optics and Photonics.
62. Butt, M.A., Tyszkiewicz, C., Karasiński, P., Zieba, M., Kazmierczak, A., Zdonczyk, M., Duda, L., Guzik, M., Olszewski, J., Martynkien, T., Bachmatiuk, A., Piaramidowicz, R., 2022. A Review of the Current Status. Materials MDPI. 15,1-25.

63. Espinos, J.P., 2010. Aplicaciones tecnológicas de películas delgadas. DIGITAL.CSIC. Accedido en línea: Abril 2023.
64. López, C., 2012. "Obtención de películas delgadas de acero inoxidable 304 y su caracterización electroquímica", Tesis doctoral en Ciencia de Materiales, Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.
65. Mattox, D., 2010. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Second Edition, Elsevier Inc.
66. Mattox, D. M., 1993. Sputtering configurations, in handbook of physical vapor deposition (PVD): Film Formation, Adhesion, Surface preparation and contamination control, NOTES PUBLICATIONS. 354–363.
67. Kelly, P.J., Arnell, R.D., 2000. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. Vacuum 56(3): p. 159-172.
68. O'keefe, M., Rigsbee, J., 1995. The science, technology and materials applications of physical vapor deposition process, in materials and process for surface and interface engineering. Springer. 151-183.
69. Mwema, F.M., Oladijo, O.P., Akinlabi, S.A., Akinlabi, E.T., 2018. Properties of physically deposited thin aluminium film coatings: A review. Journal of alloys and compounds. 747, 306-323.
70. Mendes-Felipe C., Patrocinio D., Laza M. J., Rubio-Ruiz L., Vilas Vilela J. L., 2018. Evaluation of postcuring process on the thermal and mechanical properties of the clear02™ resin used in stereolithography. Polymer Testing 72, 115-121.
71. Owen, T., 2000. Fundamentos de la espectroscopía UV-visible moderna: Conceptos básicos. Agilent Technologies. pp1-130.
72. Aparicio, M.E., Carbajal-Arizaga, G.G., 2015. Utilidad de la difracción de rayos X en las nanociencias. Mundo nanociencias, Rev. Interdiscip. En Nanociencias y Nanotecnología. 3,62-72.
73. Brundle, C. R., Evans, C.A., Wilson, S., 1992. Encyclopedia of materials characterization.

74. Feliu Jr. S., 1993. Técnicas de análisis de superficies por espectroscopia electrónica. Conceptos y aplicaciones generales. Revista de Metalurgia de Madrid, 29. Pp 307-319.
75. Briggs, D., 2005. Surface analysis of polymers by XPS and static SIMS. Edición 2nd Cambridge university press.
76. Briggs, D., Seah, M. P., 1983. practical surface analysis by auger and X-ray Photoelectron spectroscopy.
77. Wiesendanger, R., 1994. Scanning probe microscopy and spectroscopy: methods and applications. Cambridge University Press.
78. Olmos, D. y Gonzalez, B. 2009. Microscopia de fuerza atómica. Práctica 1. Modos básicos de operación. Universidad Carlos III de Madrid.
79. Haugstad, G. 2012. Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
80. Glynn, S., 2020. Evaluating the validity of manufacturing 3d printed lenses; using commercial SLA materials and Diamond turning process. Universidad de Arizona. Tesis maestria.
81. Manapat, J.Z., Chen, Q., Ye, P., Advincula, R.C., 2017. 3D Printing of polymer nanocomposites via stereolithography. Macromolecular Materials and Engineering, 302, 1438-7492.
82. Kažukauskas, E., Butkus, S., Tokarski, P., Jukna, V., Barkauskas, M., Sirutkaitis, V., 2020. Micromachining of Transparent Biocompatible Polymers Applied in Medicine Using Bursts of Femtosecond Laser Pulses Micromachines 12 (11), 1093.
83. Singh, S., Jain, A., Chaudhary, P., Gupta, R. and Mali, H.S. 2023, "Optimization of dimensional accuracy and surface roughness in m-SLA using response surface methodology", Rapid Prototyping Journal. 29.6, pp. 1324-1339.
84. Adelkhani, H., Nasoodi, S., Jafari, A.H. 2009. A Study of the Morphology and Optical Properties of Electropolished Aluminum in the Vis-IR Region. International Journal of Electrochemical Science, 4, 238-246.

85. Mondal, S., Bhattacharyya, S., 2014. Performance of a size-selected nanocluster deposition facility and in situ characterization of grown films by x-ray photoelectron spectroscopy. *Review of Scientific Instruments*. 85, 065109-065121.
86. Zhang, H., Maljkovic, N. and Mitchell, S., 2002. Structure and Interfacial Properties of Nanocrystalline Aluminum/Mullite Composites. *Material Science Engineering*, A326, 317-323.
87. Haeberle, J., Henkel, K., Gargouri, H., Naumann, F., Gruska, B., Arens, M., Tallarida, M., Schmeißer, D., 2013. Ellipsometry and XPS comparative studies of thermal and plasma enhanced atomic layer deposited Al₂O₃ films. *Beilstein J. Nanotechnol.* 4, 732–742.
88. Kim, H.G.; Kim, S.S, 2011. Aluminum oxide barrier coating on polyethersulfone substrate by atomic layer deposition for barrier property enhancement. *Thin Solid Films* , 520,481–485.
89. Iatsunskyi, I.; Kempinski, M.; Jancelewicz, M.; Zaleski, K.; Jurga, S.; Smyntyna, V. 2015. Structural and XPS characterization of ALD Al₂O₃ coated porous silicon. *Vacuum* 113, 52–58.
90. Goldstein, J., Newbury, D. E., Echlin, P., Joy, D. C., Lyman, C. E., Lifshin, E., Sawyer, L., Small, J. M., 2017. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer Science & Business Media.

11 FICHA BIBLIOGRÁFICA

Ana María Bautista Hernández

Candidato para obtener el grado académico de **DOCTORADO EN INGENIERIA
FISICA**

Tesis:

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN ESPEJO ÓPTICO LIGERO CON
APLICACIÓN ASTRONÓMICA**

FORMACIÓN ACADÉMICA

2016-2018 Maestría en Astrofísica Planetaria y Tecnologías Afines, en la Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

2010-2015 Licenciatura: Ingeniero Industrial, en el Tecnológico Superior de Álamo Temapache, Veracruz, México.

12 LOGROS ALCANZADOS

Participación en Congresos Internacionales

- Participación en el XI Congreso Internacional de Ingeniería Física, 27-29 de Septiembre del 2021, Ciudad de México, México.

Modalidad cartel: Study and Characterization of optical components fabricated in a 3D printer. Autores: A. Bautista-Hernández, B. Villalobos-Mendoza, E.G. Pérez-Tijerina and D. Aguirre-Aguirre.

- Participación en el XXX Congreso Internacional de Materiales, 14-19 de Agosto del 2022, Cancún, México.

Autores: A. Bautista-Hernández, B. Villalobos-Mendoza, E.G. Pérez-Tijerina and D. Aguirre-Aguirre.

Participación en Congresos Nacionales

- Participación en el LXIV Congreso Nacional de Física, 4-8 de Octubre del 2021, Tijuana, Baja California.

Modalidad Cartel: Estudio y caracterización de impresora 3D para la fabricación de componentes ópticas. Autores: A. Bautista-Hernández, B. Villalobos-Mendoza, E.G. Pérez-Tijerina and D. Aguirre-Aguirre.

- Participación en el LXV Congreso Nacional de Física, 2-7 de Octubre del 2022, Zacatecas, México.

Modalidad Cartel: Avances en la fabricación de un espejo óptico mediante impresión 3D. Autores: A. Bautista-Hernández, B. Villalobos-Mendoza, D. Gonzalez-Utrera, R. Izazaga-Pérez E.G. Pérez-Tijerina and D. Aguirre-Aguirre.

Artículos en revistas con índice JCR/SCOPUS

- Articular por ser enviado: Design and Fabrication of a substrate aluminized by DC Sputtering with potential application as a lightweight optical mirror.

Autores: A. M. Bautista-Hernández, F. Solís-Pomar, C. D. Gutiérrez-Lazos, A. Avilés-Alvarado, F. A. García-Castillo, D. Aguirre-Aguirre, R. Izazaga- Pérez and E. G. Pérez-Tijerina. Estatus: En revisión.

Artículos en extensos en congresos indizados en JCR/SCOPUS

- Extenso publicado: Study and characterization of components fabricated in a 3D printer.

Autores: A. Bautista-Hernández, B. Villalobos-Mendoza, E.G. Pérez-Tijerina and D. Aguirre-Aguirre. Estatus: Publicado.

Participación en proyectos financiados

- PAPIIT, IT100321, Evaluación de superficies ópticas de forma libre fabricadas mediante manufactura aditiva, Responsable Dr. Daniel Aguirre, 2021-2023, monto total \$609,554.00, Financiado: DGAPA-UNAM.