



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Estudio y mejora de las propiedades ópticas de espejos de
fibra de carbono reforzado para
aplicación astronómica**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A:

OSVALDO JAVIER GALICIA GASPERIN



**DIRECTOR DE TESIS:
LUIS CARLOS ALVAREZ NUÑEZ**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

Para mi familia que son lo más importante de mi vida, Mariana, Javier y Andrea.

Los quiero con todo mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis es el resultado de una gran colaboración por lo que tengo mucho que agradecer y ¿Cómo no lo haría? sí, me siento bastante afortunado de poder trabajar con un grupo de trabajo excepcional, juntos juntan siglos de experiencia y talento inimaginable, sin duda una calidad de cualquier equipo internacional envidiaría.

En primer lugar, me gustaría agradecer a todos los profesores que me han guiado hasta este momento desde la cátedra, como su guía en la ciencia, en especial a Donají Xochitl Cruz López por tenerme confianza desde el comienzo de la carrera y que, gracias a su apoyo incondicional, su guía, y su amistad, jamás hubiera conocido a todos los demás que tengo que agradecer, y puedo asegurar que por su gran corazón seguirá guiando a nuevos científicos, los cuales jamás la olvidaran.

A Fernando Ángeles, no solo tengo que agradecerle por introducirme en este grupo de trabajo, sino por aceptarme en el suyo, bajo su tutela aprendí cosas que desafían al tiempo, espacio, y hasta la conciencia misma, guiándome por los laberintos de la ciencia y más, mientras resolvía cualquier duda de manera magistral, a la vez que desarrollaba aún más cualquier tema, gracias.

También le agradezco a José Antonio de Diego Onsurbe, por brindarnos un apoyo incondicional siempre estar atento a todos nuestros avances, por aceptarme en el grupo de trabajo que solo me ha impulsado más, por el otro la confianza que nos otorgó nos impulsó para entregar un proyecto profesional.

Las palabras de agradecimiento para mi asesor, Luis Carlos Álvarez Núñez, son inmensurables. La paciencia que me mostró sólo es comparable con su gran conocimiento que, nunca dudó en compartirlo conmigo. Sin duda, sin su guía y vasta experiencia este proyecto no hubiera avanzado tan rápido. Además, no sobra agradecerle por las innumerables veces que intercedió, cuando nos pidieron retirarnos del laboratorio, las incontables veces cuando la burocracia no avanzaba, cuando cuestionaban mi presencia en el instituto, por saber lidiar con mi temperamento y por ayudarme incondicionalmente a perseguir otros proyectos.

Fuera del ámbito académico, aunque les debería agradecer en la maestría me gustaría agradecerle de antemano, al Ingeniero Romero Roal y a la Licenciada Beatriz Roal, por su apoyo incondicional y confianza que nos tienen, ante los trámites para la maestría.

Agradezco las observaciones y consejos incondicionales de Raúl Rodríguez, así como su camarería y paciencia, a Eduardo Mondragón, por ayudarnos a acelerar las compras y guiarnos en los procesos, a Francisco Ruiz por su apoyo y amistad en el instituto. Especial agradecimiento a Don Franco Pérez García que nos recibió en su taller con una confianza absoluta. Al señor Benito Serralde Telésforo por fabricar los anillos. También al señor Javier Preciado que nos proporcionó una amplia gama de desmoldantes por medio su empresa, Distribuidora Preciado.

Por último, le quiero agradecer a los jurados por sus aportaciones y sobre todo por su valioso tiempo en la lectura de esta tesis.

En general al Instituto de Astronomía por abrir las puertas a propuestas que buscan empujar los límites de la instrumentación para conocer más sobre el universo y también al proyecto IT101116-PAPIIT.

RESUMEN

La investigación presentada, se ha enfocado en la caracterización del proceso de fabricación de una membrana deformable para su empleo en el uso de la óptica activa y adaptativa. Basándose en los espejos de fibra de carbono reforzada, se experimentó con cada uno de los agentes físicos y químicos del proceso de manufactura. Lo anterior llevo a diseñar un procedimiento en el cual se puede realizar una superficie de calidad óptica y con las propiedades requeridas para la óptica activa. Dicho proceso también presenta una eficiencia en costo contra otras superficies de replicación de menor calidad y para las de fabricación tradicional.

Gracias a las observaciones durante la experimentación, se logró eliminar el fenómeno de fiber-print, el cual es un defecto en la superficie generado por las fibras de carbono, actualmente se elimina con técnicas tradicionales de pulido. Sin embargo, en la investigación presentada, el fiber-print se elimina durante el proceso de replicación. Este defecto es estudiado varios grupos de investigación, pero buscan mitigarlo métodos tradicionales aumentando las horas de trabajo y por lo tanto costos. Además, se logró mitigar otras imperfecciones del proceso por medio de la dosificación del proceso. Los prototipos mostraron un buen rendimiento a temperatura ambiente aumentando la eficiencia de los costos.

Finalmente, se realizaron mediciones para verificar la efectividad del proceso de replicación, tanto para forma como rugosidad, en el caso de la forma se tiene un error de 24% que representa 2.5λ que puede ser corregida por medio de actuadores. También se verificó la rugosidad, la cual demostró ser consistente a pesar de someterse a diferentes condiciones se mantuvo por debajo del criterio de $\lambda/10$, lo que valida la calidad de los prototipos fabricados bajo los estándares de la norma ISO 10110.

CONTENIDO	
PORTADA	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
CONTENIDO	V
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 GRAFENO	1
1.2 ESPEJOS DE FIBRA DE CARBONO REFORZADO	3
2 OBJETIVO	5
3 CRITERIOS DE CALIDAD Y MANUFACTURA ÓPTICA	6
3.1 CRITERIOS DE CALIDAD	6
3.1.1 RUGOSIDAD	6
3.1.2 CRITERIO DE RALEIGH-RICE PARA FORMA Y RUGOSIDAD	7
3.1.3 LÍMITE DE DIFRACCIÓN	10
3.1.4 RAZÓN DE STREHL	11
3.2 ESPACIO DE FOURIER	11
3.2.1 DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA (PSD)	12
3.2.2 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE REFLECTANCIA BIDIRECCIONAL (BRDF)	13
4 FABRICACIÓN DE ESPEJOS POR REPLICACIÓN	16
4.1 ESPEJOS DEFORMABLES DE FIBRA DE CARBONO REFORZADO	16
4.2 PROBLEMAS ACTUALES Y FIBER PRINT	17
5 METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN	19
5.1 TIPOS DE FIBRA	21
5.2 CAPAS	22
5.2.1 DOBLE RESINA	23
5.2.2 DOBLE FIBRA	23
5.3 CONTENCIÓN	24

5.3.1	PELÍCULA	24
5.3.2	ANILLOS	25
5.4	RESINAS Y DESMOLDANTES	27
5.5	ACABADOS	29
5.5.1	BOLSAS DE EMPAQUETAR Y TAPAS	29
5.5.2	BURBUJAS	32
5.6	PROCEDIMIENTO PRELIMINAR	33
6	REFINAMIENTO DEL PROCEDIMIENTO	36
6.1	DETERMINACIÓN DEL DESMOLDANTE	36
6.2	PROCESO DE DEGASEO	38
6.3	MEZCLADO Y TIEMPO DE CURADO	39
6.4	REVISIÓN DEL SISTEMA DE SUJECCIÓN	40
6.5	CURADO A ALTA TEMPERATURA	41
7	RESULTADOS Y ANÁLISIS	43
7.1	INTERFEROMETRÍA Y FORMA	43
7.2	RUGOSIDAD	47
7.3	PROCESO FINAL	52
7.4	ALUMINIZADO	53
8	CONCLUSIÓN	54
	Bibliografía	55

1. INTRODUCCIÓN

En esta tesis se muestra el estudio e implementación de nuevos materiales reflectivos en el marco de la instrumentación astronómica y en lo particular en la mejora de la calidad óptica de los telescopios de nueva generación. Como cualquier instrumento se deben involucrar varias ramas del conocimiento como la Mecánica, Electrónica, Química, Física y Óptica, este es el objetivo del grupo de Óptica Activa del Instituto de Astronomía de la UNAM.

Originalmente se investigaba el empleo de membranas deformables con la finalidad de que a través de actuadores se pueda corregir las aberraciones ópticas estáticas del telescopio, logrando los criterios de calidad requeridos en instrumentación astronómica.

Para lograr el objetivo anterior se empezó por investigar todas las formas de manipulación de membranas en óptica, por un lado, dichos métodos se concentraban en que por medio de una carga electrostática se logra el desplazamiento deseado por el otro lado, se puede deformar la membrana por medio de actuadores piezoeléctricos que son altamente adaptables y fáciles de controlar.

Sin embargo, faltaba el material donde se depositaría la superficie reflectiva, este material debiera tener las propiedades necesarias para que pueda ser manejable ante los esfuerzos de los actuadores y lo suficientemente rígida para sostener una capa reflectiva a la vez que la rugosidad de la misma no afectara la calidad de la imagen, por lo que en un principio se pensó en ocupar membranas de nitruro de silicón.

Al trabajar con nitruro de silicón la rugosidad se encontraría en la escala micrométrica la cual, está fuera de las capacidades requeridas para la instrumentación astronómica, que se encuentra en el orden de angstroms. Contemplando lo anterior nos dimos a la tarea de investigar más sobre otros substratos que nos ofrecieran dichas capacidades en ese momento fue cuando los materiales bidimensionales, una propuesta es el grafeno, el cual se presenta en la siguiente sección

1.1 GRAFENO

La fabricación del grafeno es un hito reciente para la ciencia, en 2010 Andre Geim y Konstantin Novoselov fueron galardonados con el premio nobel por haber logrado fabricar la primera muestra de grafeno bidimensional por medio del proceso de exfoliación [1]. El Grafeno fue teorizado en 1947 por P.R. Wallace para ejemplo de ilustrativo en los libros de texto de la física de estado sólido, sin embargo, su reciente fabricación por exfoliación permitió que sus propiedades pudieran ser estudiadas y fomento la fabricación por otros métodos.

Nos llamó la atención las propiedades del grafeno al ser de los primeros materiales bidimensionales, además es el más utilizado y estudiado. Sus propiedades térmicas permiten una rápida disipación de térmica de $5000 W/mK$ por lo que la energía sobrante tras una deformación es eliminada por el otro lado, sus características mecánicas ofrecen una gran adaptabilidad a una superficie además de ser capaz de soportar altas tensiones de hasta $42 N/m$ sin perder flexibilidad, principalmente nos interesó el grafeno debido a que al ser una monocapa solo absorbería 2.3 % de la luz y los errores en la superficie serian del orden de sus enlaces de 1.42 Armstrongs [1].

En lo particular, la idea original consistía en depositar una película reflectante sobre una membrana de grafeno mediante el método de transferencia. Sin embargo, el manejo de una sola capa de grafeno resultó poco práctico, ya que la membrana de grafeno crece sobre un sustrato de cobre la cual se disuelve en cloruro férrico como se observa en la figura 1 a, para luego pescar el grafeno que flota en agua destilada, después de diluir la muestra de cloruro férrico hasta que se vuelve transparente. Sin embargo, en el proceso no se pudo garantizar la uniformidad de la muestra.

Otras investigaciones sobre el grafeno deducen que tiene la propiedad de reducir la rugosidad de un sustrato [16 - 19], por medio de una transición llamada Snap-Through, esta se manifiesta cuando hay suficiente energía libre disponible en la superficie de modo que el grafeno no se adapta a la forma del sustrato como en la figura b o en punto intermedio como en la Figura 1 c, sino que normaliza los picos de la rugosidad del sustrato como en la Figura 1d.

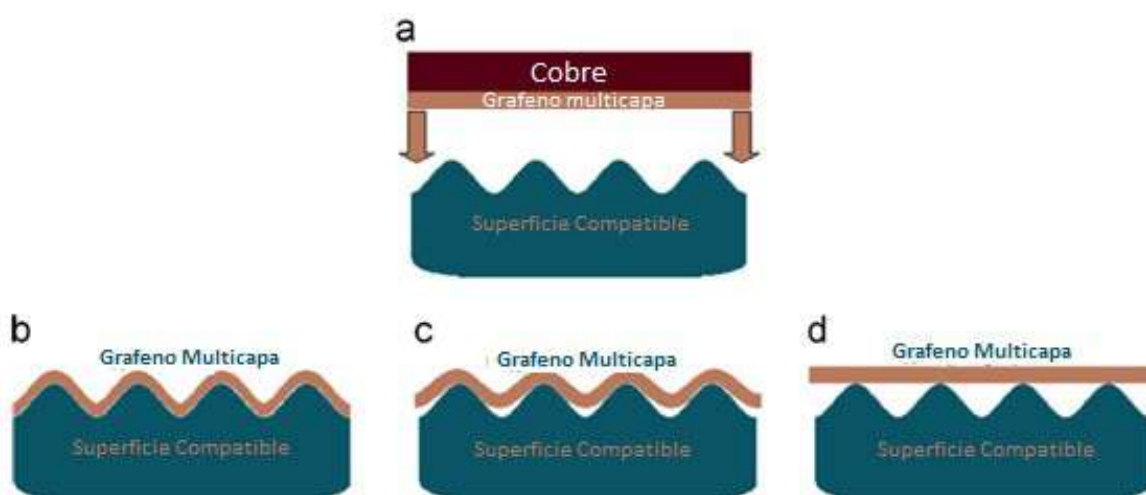


Fig. 1. Proceso de deposición de grafeno a) deposición de grafeno en un sustrato soluble, b) Grafeno multicapa con gran adhesión, c) Grafeno multicapa adhesión media, d) Grafeno multicapa con efecto Snap-Through, imagen de [18]

Al tomar en cuenta el fenómeno anterior, se intentó aprovecharlo para disminuir la rugosidad de sustratos previos a la deposición de una capa reflectiva disminuyendo el tiempo de pulido y alcanzando mejor calidad óptica. Sin embargo, los resultados preliminares mostraron que, aunque la rugosidad disminuye, todavía falta mucho tiempo antes de que esta propiedad pueda ser explotada para los requerimientos de la implementación deseada.

Una teoría es que, el grafeno es altamente reactivo por lo que es muy fácil que se combine con moléculas preexistentes en el medio por lo que en lugar de generar una membrana atenuadora resultó ser extremadamente opaca, la cual persistió tras el proceso de aluminizado como se observan en la Figura 2. Además, para observar el fenómeno de Snap-Through se requieren por lo menos 17 capas, y en los laboratorios de del Instituto de Física de la UNAM solo se ha logrado depositar un máximo de 2 capas de grafeno, suspendiendo esta línea de investigación.

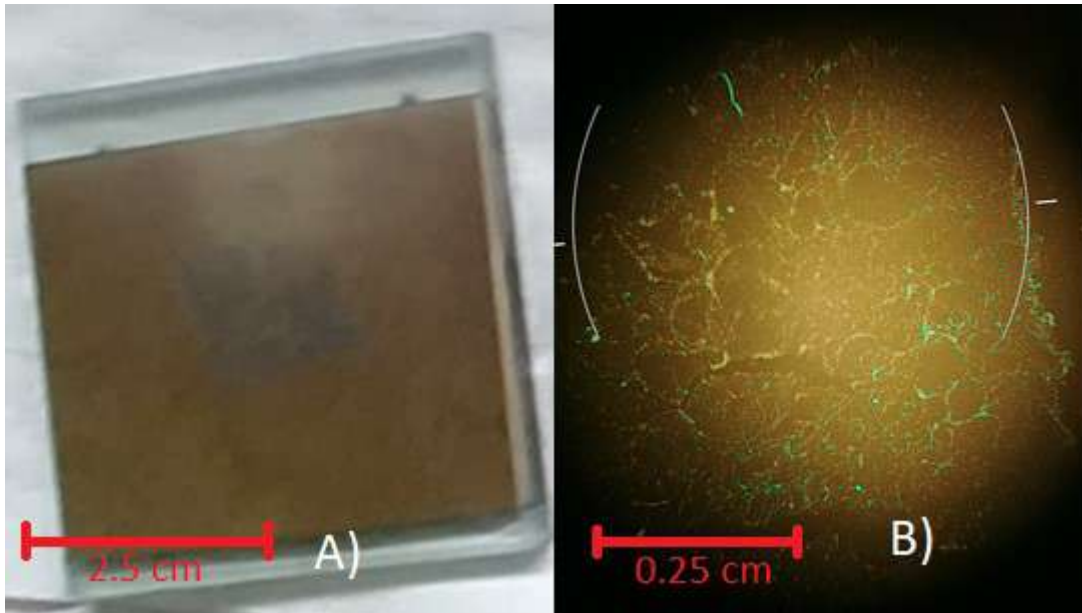


Fig. 2. A) Capa de grafeno opaca tras la deposición, B) Observación al microscopio de la deposición con muchos errores y poca uniformidad

La investigación se enfocó de nuevo en que el sustrato adoptara las propiedades del grafeno como membrana deformable y la búsqueda bibliográfica sugirió otro derivado del carbón, las fibras de carbono. Dichas fibras se han popularizado en la industria espacial, automotriz e incluso como elemento cosmético para productos en general.

1.2 ESPEJOS DE FIBRA DE CARBONO REFORZADO

El método de fabricación de espejos deformables de fibra de carbono ha tenido un impulso en los últimos años desde que se han mejorado las técnicas de fibra de carbono por su popularización al emplearlo en diferentes industrias.

La técnica de replicación requiere una superficie negativa o master, esta replicación ocurre gracias al empleo de una resina epoxi la cual tiene la capacidad de adaptarse a una forma y después de un proceso de curado se endurece tomando la fibra de carbono como un soporte mecánico que le otorga flexibilidad y resistencia con una superficie con la geometría opuesta a la del molde.

Las características para una membrana deformable se encontraron en las fibras de carbono reforzado, mostrando un rendimiento excepcional a partir de esto, se enfocó la investigación en el desarrollo de este compuesto para aplicaciones que cumplan con criterios de calidad óptica.

Este proceso de replicación, por lo regular no es una relación 1:1 de la superficie del molde con el producto final. Sin embargo, este método puede ser explotado para lograr una relación muy cercana gracias al empleo de ciertos químicos y condiciones controladas. Esta relación de replicación, en 2004 llamó la atención de varios grupos de investigación [8], en donde apenas se empezó a explorar las incógnitas del proceso de replicación, con el fin de generar espejos deformables con una rugosidad comparable de una lente de calidad óptica pulida con los métodos tradicionales y la forma negativa a la geometría del molde.

Los espejos de fibra de carbono reforzado actualmente son empleados para tareas que no requieran una precisión astronómica y es más necesaria la durabilidad ante condiciones ambientales extremas, esta tecnología es ocupada en los sistemas de imagen para aplicaciones aeroespaciales [45], como vehículos teledirigidos en donde la calidad de imagen no es tan relevante. Por el otro lado, su aplicación en la astronomía es muy poca y muy reciente [2].

Los sistemas de imagen astronómicos requieren cada vez espejos más grandes, así como más resistentes a la degradación ambiental, para observaciones continuas y robóticas o incluso no terrestres. El empleo de los “carbón fiber reinforced polymer mirrors” (CFRM) representa un posible futuro para los instrumentos de observación.

Pero una de sus desventajas que se han encontrado la mayoría de los grupos de investigación es que cuando se tiene una superficie replicada no está lista para la aplicación de una película reflectante, pues el proceso de refuerzo de fibra de carbono tiene errores asociados con el tejido de la fibra, la presión hace que la resina se ajuste a la fibra generando el efecto conocido como “fiber-print” [8].

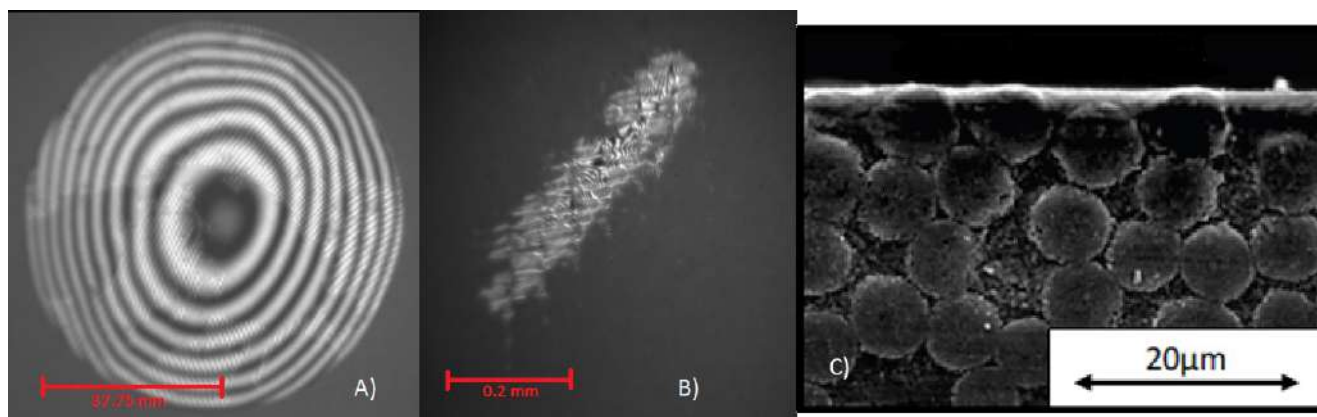


Fig. 3 Comparación de franjas interferométrica del “fiber-print” de superficies reflejantes A) superficie sin fiber-print con aberraciones esféricas B) Foto del efecto de “fiber-print” con líneas en dirección de la fibra. C) corte transversal de un compuesto de fibra de carbono, donde se observa la tendencia de las fibras a superponerse en la superficie.[50]

EL “fiber-print” por lo regular es mitigado por medio de distintas técnicas, la más usada es pulir la resina antes de la deposición de la película reflectante, esta técnica es la aplicación de varias capas de resina y fibra, no obstante, parece poco eficiente después de ocupar una lente ya pulida que se tenga que volver a pulir el producto. En esta tesis se aborda la experimentación para lograr mitigar exitosamente el fiber-print desde la primera aplicación.

Este trabajo, está distribuida de la forma siguiente: capítulo 2 se dan a conocer los objetivos, capítulo 3, se explican los criterios de calidad de fabricación, capítulo 4, en donde se presenta las ventajas y su relevancia de usar espejos de fibra de carbono, y a lo largo del capítulo 5 se presenta el proceso de caracterización, en el capítulo 6 se presenta una segunda iteración para refinar imperfecciones. Finalmente, en el capítulo 7 se presentan los datos que validan la experimentación en contraste con los criterios de calidad óptica y mostrar el avance que se tiene en la manufactura de los espejos a base de fibra de carbono reforzado.

2 OBJETIVO

El objetivo general de la tesis consiste en incluir técnicas de vanguardia para la mejora del rendimiento de instrumentos astronómicos, enfocándose en las ventajas de la óptica activa y todas las tecnologías en las que se soporta.

El principal objetivo es desarrollar un espejo deformable que sea compatible con la óptica activa y adaptativa, este debe poseer la resistencia y durabilidad para los instrumentos astronómicos de la siguiente generación.

Además, el espejo debe cumplir con los criterios de calidad óptica a los mismos estándares de cualquier instrumento, por lo que la realización de este trabajo implica superar las limitaciones de las investigaciones por un nuevo método más refinado y confiable.

3 CRITERIOS DE CALIDAD Y MANUFACTURA ÓPTICA

En la fabricación de una superficie óptica siempre se deben considerar ciertos factores de calidad (con referencia al estándar ISO 10110) que tienen repercusiones en el rendimiento final del instrumento. Dichos factores están limitados con respecto a la geometría permitida, basados en criterios ópticos como son la Función de Punto Extendido (En inglés Point Spread Función, PSF), la Distribución Espectral de Potencia (En inglés Power Spectral Density, PSD) , etc. que indican como va a ser la calidad de una imagen.

Estos conceptos, en lo general, definen hasta qué punto una superficie óptica se comporta adecuadamente, para los espejos de fibra de carbono reforzado serán la base para evaluar las mejoras y el desempeño del espejo al formar una imagen.

3.1 CRITERIOS DE CALIDAD

3.1.1 RUGOSIDAD

Primero se tratará una cuestión geométrica, si bien la forma de un elemento óptico puede inducir aberraciones en la imagen, también el acabado de la superficie o perfil define cuanta energía es capaz de flejar en una dirección sin dispersarla y para que esto ocurra la superficie debe ser suave. Sin embargo, suave es relativo, depende de qué tipo de fenómenos se quieran observar (visibles, rayos x, rayos gamma, etc).

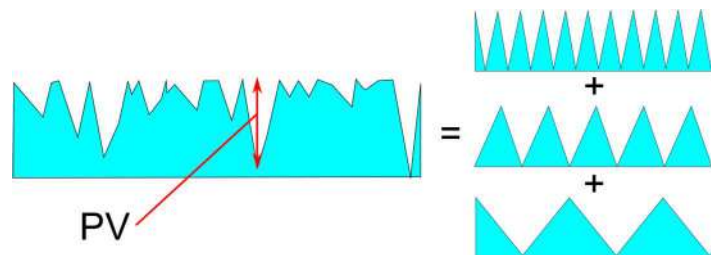


Fig. 4. Representación del perfil de una superficie por medio de la suma de polinomios sinusoidales

Para empezar, hay que considerar la forma matemática de describir una superficie, idealmente esta debe ser plana, sin embargo en la práctica las superficies están llenas de defectos. Por lo cual más fácil expresar las superficies como la suma de varias expresiones sinusoidales con parámetros no arbitrarios como en la figura 4 [33]. Por lo que si para una sábana en tres dimensiones x y y que están sobre un plano, z es la dirección en la que la altura se representa por lo que para una y fija z se describe como:

$$z(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2n\pi x/L) \text{ (Ec. 1)}$$

En donde, a_0 y a_n son coeficientes de Fourier que se pueden encontrar en la literatura tradicional, n representa el grado de aproximación del perfil, y L representa la longitud del espacio que se quiere analizar. Por lo que la primera medida de rugosidad que se puede encontrar es el valor cuadrático medio (en inglés Root Mean Square, RMS) que describe una media de la rugosidad del perfil analizado.

$$\sigma = \left(\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} [z(x) - \bar{z}]^2 dx \right)^{1/2} \quad (Ec. 2)$$

En donde L representa la longitud del perfil que se está analizando por lo que la función $z(x)$ debe estar bien acotada para que tenga validez la Ec. 2, mientras que \bar{z} es la media estadística del perfil $z(x)$.

Pero también puede haber perfiles que sean aleatorios [33]. Estos se pueden modelar con una distribución $P(z)$ gaussiana sobre la probabilidad que a cierta distancia $z(x)$ tenga una altura entre 0 y Z , como en la Ec. 3.

$$P(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2\sigma^2} \quad (Ec. 3)$$

Por lo que el valor cuadrático medio σ , se puede expresar como un momento estadístico de $P(z)$ se muestra en la Ec. 4 que representa un perfil real puede ser descrito por medio de estadística, para poder ser interpretado en un solo peso que tendrá una repercusión en la Sección 3.1.2.

$$\sigma = \left[\int_{-\infty}^{\infty} Z^2 P(z) dz \right]^{1/2} \quad (Ec. 4)$$

3.1.2 CRITERIO DE RALEIGH-RICE PARA FORMA Y RUGOSIDAD

Al principio de la sección 3.1.1 se mencionaba que para que una superficie se considere suave depende del rango del espectro que se quiera observar por lo que se debe definir matemáticamente la relación entre el perfil y la longitud de onda a la que la superficie aparentemente es suave lo cual es una de las suspensiones de teoría de perturbación vectorial de Raleigh-Rice, la cual para fines prácticos establece que una superficie es suave si cumple la condición de la ecuación 5 [41].

$$PV \leq \frac{\lambda}{4} \text{ Para forma } \text{ ó } \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \ll 1 \text{ para rugosidad} \quad (Ec. 5)$$

En donde λ es la longitud de onda de la fuente que se desea observar, PV es la distancia pico-valle para una sección estudiada, y σ es la RMS de la superficie observada.

De acuerdo con este criterio, se puede cuantificar cuando una superficie se comportará adecuadamente para la longitud de onda analizada, aun así las frecuencias espaciales de la superficie definen el rendimiento final de la superficie. De la Sección 3.1.1, se puede inferir que es una cuestión estadística, por lo que la Ecuación 5 es relación entre la descripción de una superficie y su comportamiento reflectivo a cada longitud de onda, por lo que este criterio tiene su fundamento óptico en la coherencia de la imagen que se desea formar.

La deducción de este fenómeno puede obtenerse por trazado de rayos y óptica geométrica a nivel macroscópico tal como Lord Rayleigh lo dedujo, o por medio de un enfoque más moderno considerando el camino óptico de la reflexión a nivel microscópico. De cualquier forma, Andrés Maréchal lo refino a $\lambda/10$ por medio de las aberraciones del frente de onda.

La forma más eficiente de verificar el principio de Raleigh en forma macroscópica de la Ec.5, es por medio del cálculo de tolerancias con trazado de rayos. En este caso práctico δx representa la sagita como valor Pico-Valle y ε es la distancia para que la imagen forme el disco de mínima confusión.

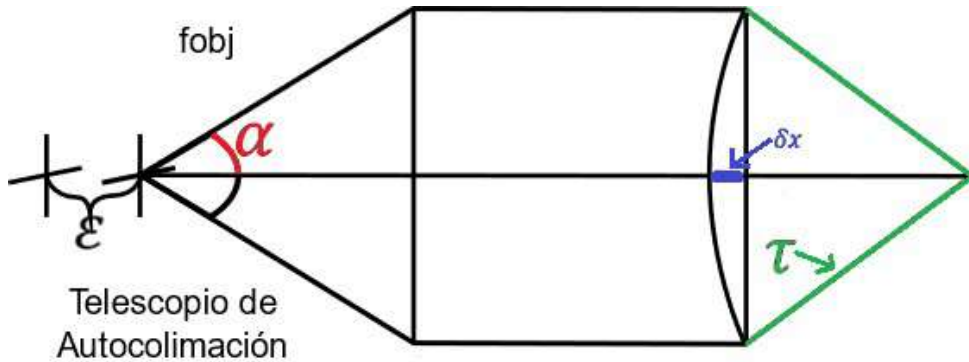


Fig. 5. Telescopio de auto colimación, como ejemplo para trazado de rayos para calcular la sagita δx como relación PV

Basándonos en el diagrama de la Fig. 5 se puede calcular el valor mínimo de curvatura requerido para que la superficie sea considerada plano, tomando en cuenta λ como longitud de onda y α como el Angulo de apertura del sistema por lo que:

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{8 * \alpha^2} \text{ (Ec. 6)}$$

$$\text{de donde } \alpha = \frac{1}{2F\#} \text{ (Ec. 6.1)}$$

Donde $F\#$ es la relación focal de la apertura. Para ubicar la imagen dentro del círculo de mínima confusión, se emplea la fórmula de Newton:

$$\varepsilon * \tau = fobj^2 \text{ (Ec. 6.2)}$$

De donde el radio de curvatura es:

$$\tau = \frac{fobj^2}{\varepsilon} \text{ (Ec. 6.3)}$$

Resultando en:

$$\tau = \frac{fobj^2 * 8 * \left(\frac{1}{2F\#}\right)}{\lambda} \text{ (Ec. 6.4)}$$

Y para fines prácticos se emplean los valores del telescopio de auto colimación del proyecto FRIDA[49], $fobj = 300 \text{ mm}$, $F\# = 6$, $\lambda = .5510 \times 10^{-3} \text{ mm}$, al evaluar la Ec. 6.4 resulta $\tau = 9.091 \times 10^6 \text{ mm}$

Para calcular la sagita δx :

$$\delta x = \frac{\frac{R^2}{r}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{R^2}{r}\right)}} \quad (\text{Ec. 6.5})$$

Donde $R = 53.85 \text{ mm}$, es el radio del espejo plano y $r = \tau$, es el radio de curvatura por lo que la sagita es $\delta x = 1.595 \times 10^{-4} \text{ mm}$, por lo que para un interferómetro Frizeau ($\lambda = 633 \text{ nm}$) por lo que se puede concluir que:

$$\delta x = \lambda/4 \quad (\text{Ec. 6.6})$$

Lo que corrobora la ecuación 5.

Otra de las formas de verificar el principio de Raleigh a nivel macroscópico (forma y figura), se plantea en [22]. Según Nayar, se considera el principio de coherencia, por lo que se debe de asegurar una diferencia de fase constante lo que se logra cuando los rayos reflejados tienen la misma frecuencia. En este caso, como en la Ec. 5 solo se considera una longitud a la vez, donde se cumple el principio, finalmente deben tener la misma forma de onda para que sean estacionarias, en este caso al usar una fuente desde el infinito se cumple lo último, al considerar ondas planas.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} OPL \quad (\text{Ec. 7})$$

Por lo que solo se tiene que garantizar la diferencia de fase $\Delta\phi = \pi/2$ para establecer este criterio, y donde la longitud de camino óptico (En inglés Optical Path Length, *OPL*) el cual se estima con el esquema mostrado en la figura 6.

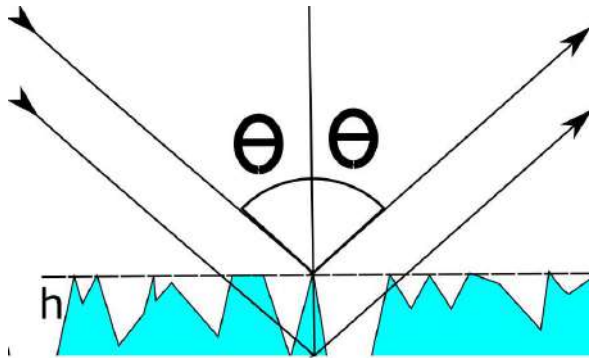


Fig. 6 esquema de reflexión de rayos con rugosidad de la superficie

Para calcular a la diferencia de camino óptico, se consideran dos rayos que provienen de una fuente en el infinito en donde uno se refleja en un pico y para ver los efectos de la rugosidad, se calcula el camino óptico en términos de que tanto se debe desplazar el segundo rayo para volver a unirse con el primero.

Por lo que si la proyección del rayo es tal que h es el coseno del *OPL* por lo que si $h = OPL \cos \theta$, la Ec. 7 se convierte en:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{h}{\cos\theta} \quad (\text{Ec. 7.1})$$

Considerando que para ser coherente se busca $\Delta\phi = \pi/2$ entonces

$$\frac{\pi}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{h}{\cos\theta} \text{ (Ec. 7.2)}$$

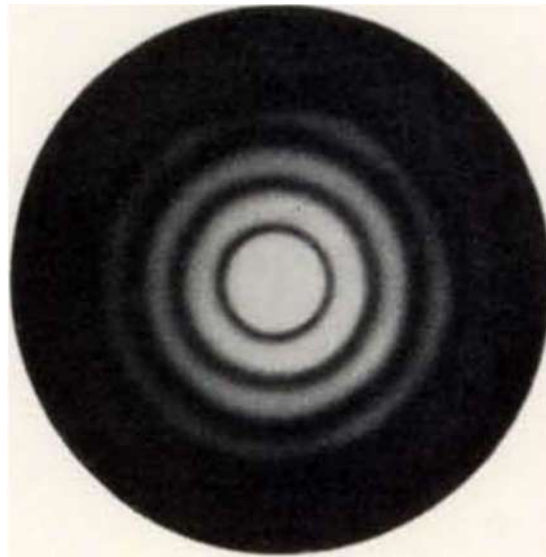
$$\frac{\lambda \cos\theta}{4} = h \text{ (Ec. 7.3)}$$

A primer orden, se debe tener máxima reflexión, cuando $\cos\theta \rightarrow 1 \Rightarrow \theta \rightarrow 0$, al tomar este limite, se puede considerar una por $0 < \cos\theta < 1 \Rightarrow \lambda \cos\theta \leq \lambda$ resultando en la Ec. 7.4 que es la Ec. 5,

$$\frac{\lambda}{4} \geq h \text{ (Ec. 7.4)}$$

3.1.3 LÍMITE DE DIFRACCIÓN

Otro criterio importante es la resolución, por resolución se entiende que para un instrumento óptico existe una distancia a la que es capaz de diferenciar una fuente de luz de otra, esto es un efecto de la difracción de Fraunhofer que ocurre que cuando se hace pasar la luz por medio de un orificio, en donde le principio de Huygens indica que cada punto en la apertura es un nueva fuente de luz, por lo que los frentes de onda generados se sobre ponen entre ellos mostrando interferencia que proyecta una figura conocida como patrón de Airy tal como la Fig. 7.



**Fig. 7 Patrón de Airy de luz amarilla de mercurio
 $\lambda = 579 \text{ nm}$ [30]**

La descripción de este patrón se puede describir como una distribución de intensidades Ec.8, cuya deducción es bien conocida.

$$I = \left[\frac{2J_1(x)}{x} \right]^2 I_0 \text{ (Ec. 8)}$$

En donde en la referencia [30] se calcula que el 86 % de la intensidad se concentra del centro hasta el primer disco obscuro lo que se le conoce como disco de Airy cuyo radio se deduce de encontrar el primer mínimo de Ec. 8, como resultado se obtiene el radio del disco principal en la Ec. 8.1

$$r = 1.22 \lambda / D \text{ (Ec. 8.1)}$$

En donde λ es la longitud de onda observada y D es el diámetro de la apertura del instrumento de observación.

De esta manera se deduce el concepto de función de dispersión de punto (En inglés Power Spectral Density, PSF), en donde al tener un sistema formador de imagen se espera que se tenga una imagen con el 86% de energía en el disco central y el resto de energía se encuentra en los anillos secundarios. Por lo que el instrumento debe tener la capacidad de resolver dos objetos a la misma distancia focal a una separación de $1.22 \lambda/D$ entre ellos.

Aun así, la PSF depende de otros factores y se puede ver afectada por aberraciones geométricas del sistema e incluso atmosféricos como la deformación del frente de onda, pero al evaluar un instrumento se esperaría obtener la mayor intensidad posible en el primer disco.

3.1.4 RAZÓN DE STREHL

Por un lado, se tiene un criterio geométrico en la Sección 3.1.2, con el criterio de suavidad de Raleigh y en contraste se tiene un límite energético de la resolución de un instrumento. En realidad se quiere considerar el rendimiento de un sistema, en general, se ocupa el radio de Strehl [46] que a primer orden se describe como :

$$S = \frac{I(x = 0)}{P(x = 0)} \quad (Ec. 9)$$

La cual describe la relación entre la intensidad máxima de la PSF del campo incidente I y la PSF del campo al límite de difracción P , por lo que, $0 < S < 1$, sin embargo, este concepto es muy versátil y también se puede calcular por medio de las deformaciones de frente de onda. Así como para un espejo existe una relación empírica con la RMS (σ) de la superficie d[48]:

$$S = e^{-\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2} \quad (Ec. 9.1)$$

Por lo que en general es un concepto bastante útil si se quiere evaluar el sistema de una manera más integral, pues de esta manera se puede observar la cantidad de energía que se puede concentra de un sistema, con cierta caracterización en contraste con el mismo sistema, el límite de difracción y la vez toma en cuenta varios criterios calidad de imagen.

3.2 ESPACIO DE FOURIER

La transformada de Fourier es una herramienta ampliamente utilizada para el procesamiento de señales, pues establece que cualquier señal puede ser descompuesta en varias señales sinusoidales, basándose en la creación de un Kernel de las series de Fourier en su forma habitual:

$$\mathcal{F}\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (Ec. 10)$$

Habitualmente, se emplea en el análisis de imágenes o acústica. Sin embargo, también puede ser ocupada para analizar la rugosidad de una superficie. De la sección 3.1.1, se puede observar que el perfil de una superficie se representa como la suma de varias funciones sinusoidales.

Lo importante es que en el espacio recíproco de Fourier se puede observar realmente cuáles son las contribuciones de cada una de esas frecuencias que con cierto tratamiento se pueden ocupar como herramientas en la evaluación de la calidad de los sistemas ópticos.

3.2.1 DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA (PSD)

La Densidad Espectral de Potencia (En inglés Power Spectral Density, PSD), es una herramienta de análisis de señales que se adapta adecuadamente para la evaluación de los procesos donde se puede observar la contribución de cada uno de los componentes del perfil.

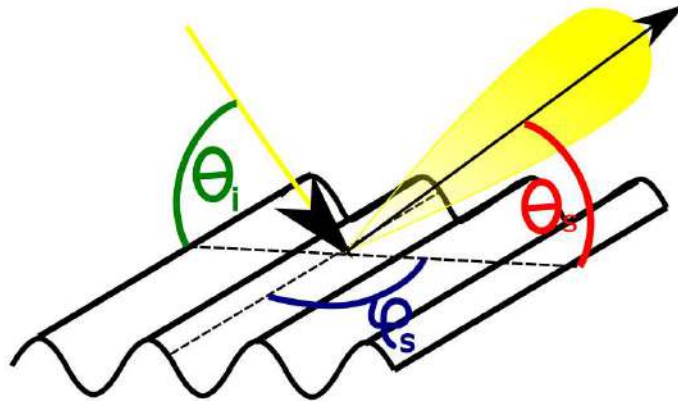


Fig. 7 diagrama de la dispersión de un haz de luz con respecto a una frecuencia espacial, θ_i es el ángulo incidente, con θ_s como el ángulo de dispersión o reflejado, φ_s la componente azimutal del haz reflejado, aquí se puede observar un lóbulo que representa la contribución a la PSD

Estos componentes se pueden definir como frecuencias espaciales y a diferencia de las frecuencias de onda, en este caso se refiere que tanto se repite cada estructura, por lo que sus dimensiones son m^{-1} o ciclos. La forma de calcular las frecuencias se basa en la geometría en que ocurre la dispersión como en la Figura 7 y a la vez en la longitud de onda que se quiere observar para 2D [41].

$$f_x = \frac{\sin \theta_s \cos \varphi_s - \sin \theta_i}{\lambda} \quad y \quad f_y = \frac{\sin \theta_s \sin \varphi_s}{\lambda} \quad (Ec. 11)$$

Realizando una transformada de Fourier espacial de la superficie al espacio de frecuencias espaciales, se puede determinar cuál es la contribución de cada una de ellas. Esto se puede observar en la Fig. 7, como el lóbulo que sale de la dispersión por lo que la transformada de Fourier se convierte en una densidad espectral de frecuencias o en inglés Power Spectral Density (PSD), donde su definición matemática está dada por Ec. 12 [41] en 2D .

$$PSD_{2D}(f_x, f_y) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{L^2} \left| \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} z(x, y) e^{-2\pi i(f_x x + f_y y)} dx dy \right|^2 \quad (Eq. 12)$$

En donde, L es la longitud de la muestra examinada por lo que la PSD es una muestra estadística y depende de la resolución del instrumento, para estar bien definida, las unidades para 1D es de $um^2 * um$ mientras que para 2D es de $um^3 * um$ de acuerdo con la ISO 10110, lo que representan es el poder dispersado en el lóbulo de la Fig.7.

La PSD habitualmente la calculan los mismos interferómetros, pero el estándar ISO 10110 nos permite definir intervalos que definen el comportamiento de los errores de la superficie desde la figura hasta

el acabado, se muestra en la Fig. 8. Por lo regular se ocupa un perfilómetro distinto dependiendo del orden de magnitud de cada región y la resolución necesaria.

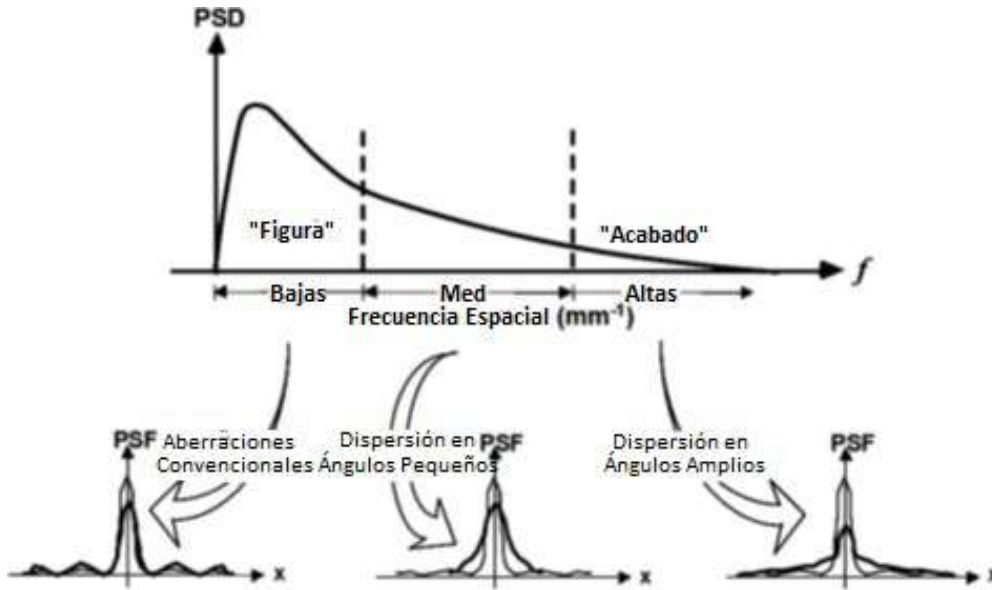


Fig.8 Regímenes de frecuencias espaciales contra PSD con respecto a su impacto en la calidad de imagen [6][7]

Las definiciones de los intervalos suelen variar sobre todo en la sección de frecuencias espaciales medias (En inglés Mid-Spatial Frecuencias, MSF) como se muestra en la figura 8, y su tratamiento representa todavía un desafío, pero en las MSF existe el efecto ripple con el cual se puede identificar gráficamente en que sección de la PSD se presentan las MSF [47].

Siguiendo el estándar ISO 10110 [38], se define que las frecuencias espaciales son bajas del orden de $10^{-5} \rightarrow 10^{-3} \text{ um}^{-1}$ y las frecuencias espaciales altas, se encuentran en el rango $10^{-3} \rightarrow 10^{-1} \text{ um}^{-1}$. Dado que por lo regular estos peridogramas son datos experimentales, se les puede ajustar con diversos modelos que en si representarán la correlación de dispersión de la muestra. Al ser una medida estadística, se encuentra que la RMS recomendada se obtiene del área debajo de la curva de la PSD [38]. Para las bajas frecuencias idealmente es de 10.3 nm por lo que se relaciona con la figura de la superficie y para las altas frecuencias es de 1.9 nm , que está relacionado con el acabado.

3.2.2 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE REFLECTANCIA BIDIRECCIONAL (BRDF)

La Función de distribución de reflectancia bidireccional (En inglés Bidirectional reflectance distribution function, BRDF), es una función que describe la manera en que una superficie opaca refleja la luz a cierto ángulo incidente y a cierto ángulo reflejado. Fue descrita por primera vez por Fred Nicodemus en 1970 y relaciona el campo eléctrico incidente y el reflejado con la dirección de la luz incidente ω_i y la dirección de reflexión ω_s haciendo que la BRDF tenga unidades en Estereorradianes a la menos uno [Sr^{-1}] pues depende de la irradiancia L por ángulo solido de la dirección del rayo en el área proyectada.

$$f_r(\omega_i, \omega_s) = \frac{dL_s(\omega_s)}{dE_i(\omega_i)} = \frac{dL_s(\omega_s)}{L_i(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (\text{Ec. 13})$$

Como esta depende de los ángulos de incidencia y dispersión, habitualmente se grafica la BRDF contra el ángulo de dispersión como se observa en la Fig. 9 donde se muestra la BRDF de una superficie con distribución gaussiana, en donde se marca el ángulo del rayo especular.

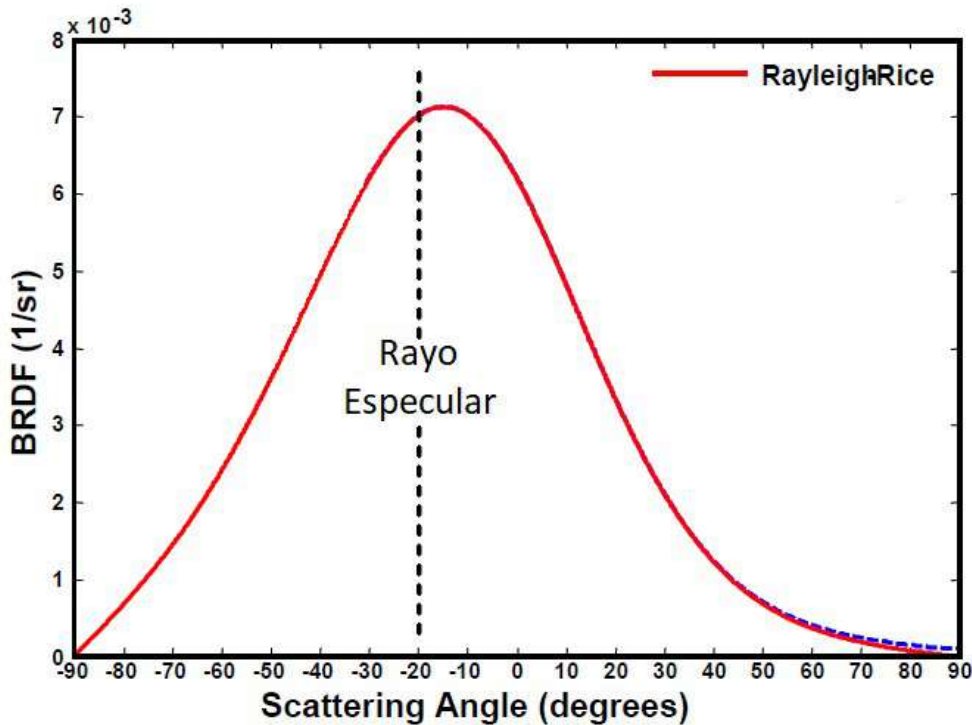


Fig. 9 Predicción de la BRDF usando la teoría de Rayleigh-Rice, de un rayo especular sobre una superficie gaussiana.

Existen numerosos intentos por describir explícitamente a la Ec. 13 [21]. En general la BRDF nos dice en qué dirección y la intensidad se propagada una imagen reflejada en una superficie. Debe tenerse en cuenta que es una relación matemática que es esencial para calcular otras funciones características como la Resolución de dispersión angular (en inglés Angle Resolved Scattering, ARS) y La dispersión total integral (en inglés Total Integrated Scattering, TIS) [11].

Para examinar la parte física la teoría de perturbaciones de Rayleigh-Rice se desarrolla la “Golden-Rule” Ec. 14 de la metrología, la cual permite realizar estimaciones de la BRDF a partir de la PSD, así se puede estimar la dispersión de luz a partir del perfil y se puede realizar el análisis del acabado de la superficie.

$$BRDF = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \cos \theta_i \cos \theta_s Q * PSD(f_x, f_y) \text{ (Ec. 14)}$$

El uso de la “Golden-Rule” permite hacer aproximaciones de cómo deben influir ciertas frecuencias espaciales en la PSD. Sin embargo, la Ec. 14 tiene indeterminaciones al estimar la PSD en las altas frecuencias espaciales y conciertas longitudes de onda Fig.10 A). Los acabados finos seguían correlaciones empíricas hasta que se propuso el modelo generalizado de la teoría de Harvey-Shack la cual solucionó el problema Fig. 10 B), y estableció el comportamiento a altas frecuencias espaciales.

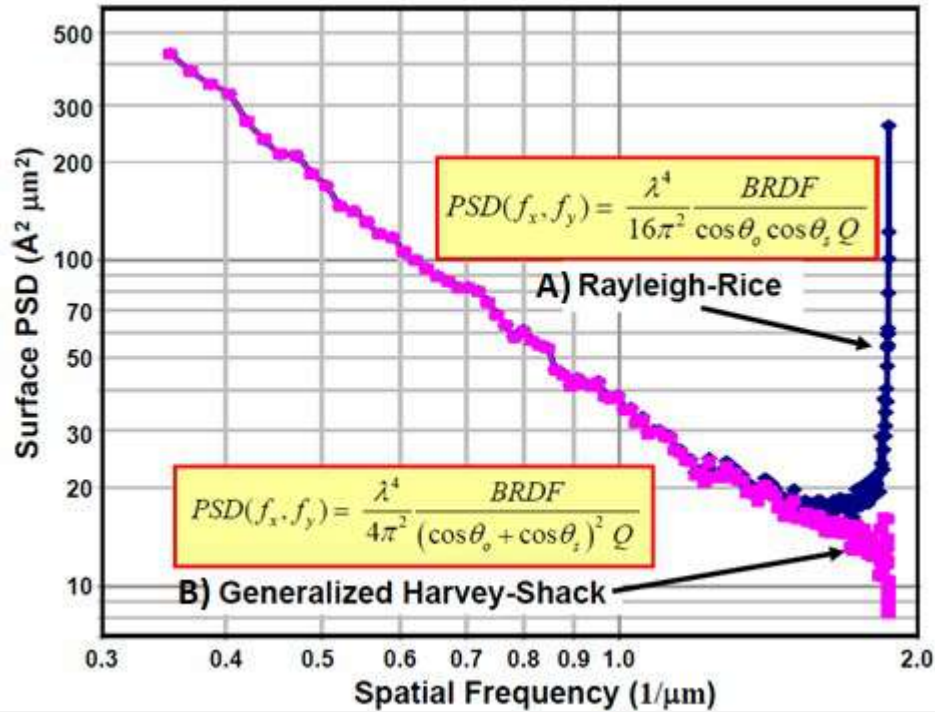


Fig 10. Predicción de PSD con "Golden-Rule" A) se muestra un gancho generado por la teoría Rayleigh-Rice, B) la teoría generalizada de Harvey-Shack no presenta la indeterminación. [21]

El desarrollo de la teoría generalizada de Harvey-Shack, primero consistió en considerar la diferencia de camino óptico a nivel microscópico Fig. 11 A), sin embargo consideraba que el desplazamiento de camino óptico se comportaba igual para cada ángulo y solo dependía de la reflexión por lo que no se podía tomar en cuenta el factor de polarización, tampoco se consideraban ondas evanescentes y estaba limitado a sistemas paraxiales por lo que finalmente se estableció que se debe de calcular el camino óptico para cada ángulo incidente como de dispersión Fig. 11 B).

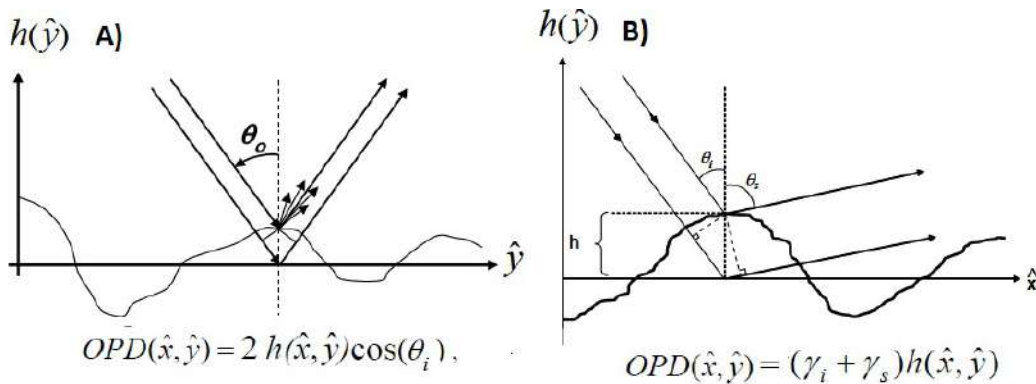


Fig. 11. Consideraciones de la diferencia de camino óptico para las teorías de dispersión A) la diferencia de camino óptico depende de la reflexión, B) la diferencia de camino óptico depende del ángulo de dispersión e incidente.[21]

Tomando estas consideraciones, se expandió el modelo de Rayleigh-Rice que, por lo que la "Golden-Rule" tiene una expresión dada por (Ec. 14), el cual se asemeja a la (Ec.5) de rugosidad, en una forma más práctica.

$$\frac{16\pi^2}{\lambda^4} (\cos \theta_i + \cos \theta_s)^2 Q * PSD(f_x, f_y) \text{ (Ec. 15)}$$

4 FABRICACIÓN DE ESPEJOS POR REPLICACIÓN

En este capítulo explica el procedimiento general de la fabricación de los espejos deformables de fibra de carbono. Las etapas básicas que actualmente se llevan a cabo, los elementos que los componen, así como los defectos que otras investigaciones han encontrado y como lo mitigaron.

El método tradicional para la fabricación de elementos ópticos, por lo regular lleva tres fases: generación, devastado y pulido. Cada una está enfocada en lograr la calidad que se requiere en cada régimen (3.2). Sin embargo, existen otros métodos de fabricación, por ejemplo la replicación, la cual data de hace 40 años, como la extrusión de un plástico en un molde, formando una lente o un espejo.

En el método de replicación se fabrica una superficie con calidad óptica, que se llamara máster, a la cual se le aplica un compuesto que adopte la forma de la superficie para después desprender un elemento óptico, con la forma opuesta al máster. El proceso se repite varias veces con el mismo máster hasta su desgaste, permitiendo generar varios productos sin necesidad de repetir las tres fases de la fabricación tradicional.

Las ventajas de los métodos de replicación son el alto volumen y el bajo costo de producción [3-9],[45-50], pues se basan en un solo elemento con calidad óptica para generar otros. Lo que incrementa la efectividad de la producción, ya que en general todos los productos deben de tener las mismas características. En lo particular ha surgido recientemente un interés de utilizar espejos por replicación en instrumentos astronómicos de óptica activa [4].

Su principal función en la óptica activa consiste en la corrección de las aberraciones del telescopio, por lo que se requieren que sean flexibles [14], [4]. Las soluciones comerciales actuales son bastante pesadas y rígidas por lo que no se puede lograr tan fácilmente y como resultado no tienen suficiente calidad.

Por el otro lado, los telescopios para observación no terrestre cada vez requieren espejos ligeros [9] y la implementación de la fibra de carbono en aplicaciones militares [45] impulsaron la investigación en la creación de espejos de fibra de carbono reforzado con el fin de generar elementos que cumplan los criterios de calidad. Sin embargo, actualmente no se ha logrado escalar el proceso para producir elementos de calidad óptica requerida para la investigación, pero si para aplicaciones en donde la calidad de imagen no es requerida.

4.1 ESPEJOS DEFORMABLES DE FIBRA DE CARBONO REFORZADO

Los espejos de fibra de carbono resultaron excelentes candidatos para la óptica activa [9], pues tienen características muy interesantes para los nuevos telescopios, además de ser ligeros tienen [2],[5]:

- Una alta relación de rigidez contra peso
- Expansión térmica casi nula
- Alta resistencia y dureza
- Características a la medida
- Facilidad de Replicación

En la actualidad existen diversos grupos de investigación (CMA, Arizona, UCL, ...) dedicados al estudio de estos espejos y todos tienen un procedimiento similar de fabricación:



Fig.12 Etapas del proceso de fabricación de espejos de fibra de carbono reforzado, [3-5],[8-9],[45],[50]

La primera etapa es consiste en la generación de una superficie original o máster por medio de método tradicional de pulido para que tenga las características ópticas requeridas, idealmente esta superficie original limita la calidad óptica del producto [4].

En la segunda etapa se prepara la fibra de carbono con el tamaño y forma final del espejo, en algunos casos se implementan varias capas de fibra con distintos entramados [3-5],[8-9],[45],[50], para mejorar algunas características mecánicas y ópticas, e incluso un proceso de pre-impregnado de resina.

En la tercera etapa se prepara una resina epoxi, cuyo contenido varía según el fabricante. Al mezclar con un endurecedor se convierte en un polímero, dependiendo de la técnica se deposita la resina al máster y se colocan las capas de fibra de carbono.

Después de un proceso de curado, el compuesto (fibra y resina) es separado del master, y de acuerdo a la calidad resultante se emplean procesos para eliminar los errores de superficie, antes de depositar una capa reflectante.

4.2 PROBLEMAS ACTUALES Y FIBER PRINT

Idealmente un proceso de réplica debe mantenerse fiel al máster, sin embargo, el proceso de colocar fibra de carbono genera sus propias imperfecciones, tal como la aparición de burbujas, degrado de la resina y errores de forma, fracturas por desprendimiento, y el más notorio se conoce como fiber-print.

La aparición de burbujas usualmente es mitigada por medio de químicos que cambian la viscosidad u por técnicas de vacío (cámara de degaseo) sin embargo, los químicos pueden producir cambios demasiado bruscos en la resina y comprometer el compuesto.

En el proceso de curado, la resina puede escurrir cambiando el volumen y forma del compuesto final y por tanto afecta las propiedades mecánicas y también compromete la calidad óptica de la superficie, habitual por lo cual se emplean cámaras de autoclaving, al vacío aplicando temperatura, para acelerar el proceso de endurecimiento [8].

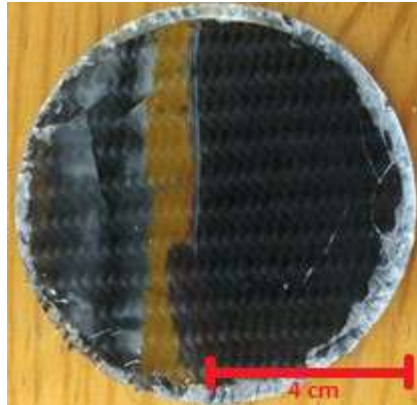


Fig 13. Fracturas resultantes del proceso de separación

Por el otro lado, el proceso también puede comprometer la superficie óptica por medio de las fracturas al momento de separar el máster se observa en la Figura 13, por lo que se ocupan desmoldantes químicos, que sean compatibles con la resina. y si el fabricante no lo especifica puede llegar a ser complicado encontrar uno.

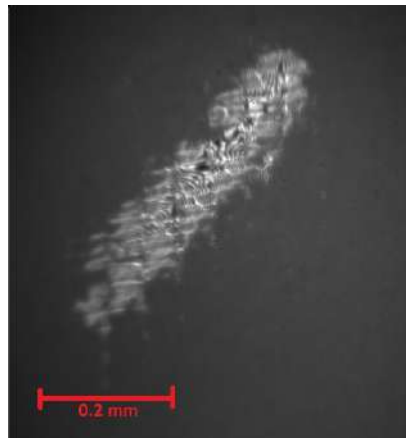


Fig. 14. Fiber-print en interferometría

Finalmente existen problemas en la superficie misma, ya que, gracias al entramado de la fibra, este genera presión en la resina y el patrón de la fibra se transmite hasta la superficie óptica tal como la Figura 14. Creando el efecto de fiber print. Los diversos grupos de investigación han desarrollado técnicas propias para eliminarlo, aplicando más capas de fibra de carbono hasta neutralizar el patrón [50], también depositando más capas de resina durante y después del tiempo de endurecimiento [8][45], depositando capas gruesas de material reflectante de aluminio o níquel variando de 50 μm a 100 μm [12][13]. E incluso se pule el compuesto resultante a pesar de que el master ya tenía calidad óptica [45].

Para fines prácticos todos los efectos anteriores, y en especial el de fiber print, solo retrasan y hacen el proceso de replicación igual de laborioso que los procesos tradicionales, por lo que en realidad no se tiene dominado ni comprendido el proceso.

5 METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se muestra el empleo de las técnicas para fabricación de un espejo de fibra de carbono reforzada, el objetivo es eliminar el fiber-print, por lo que la metodología esta basada en la observación de los resultados por cada técnica empleada y en consecuencia se analizaron los grados de libertad de cada nuevo procedimiento.

Con la finalidad de identificar cada prototipo, se asignó un sistema de códigos que especifican que técnica fue empleada y el grado de libertad ocupado. Para dar un panorama general de todo el procedimiento se puede revisar la Figura 15. Para ver una relación explícita de cada prototipo con su técnica se puede revisar la figura 16.

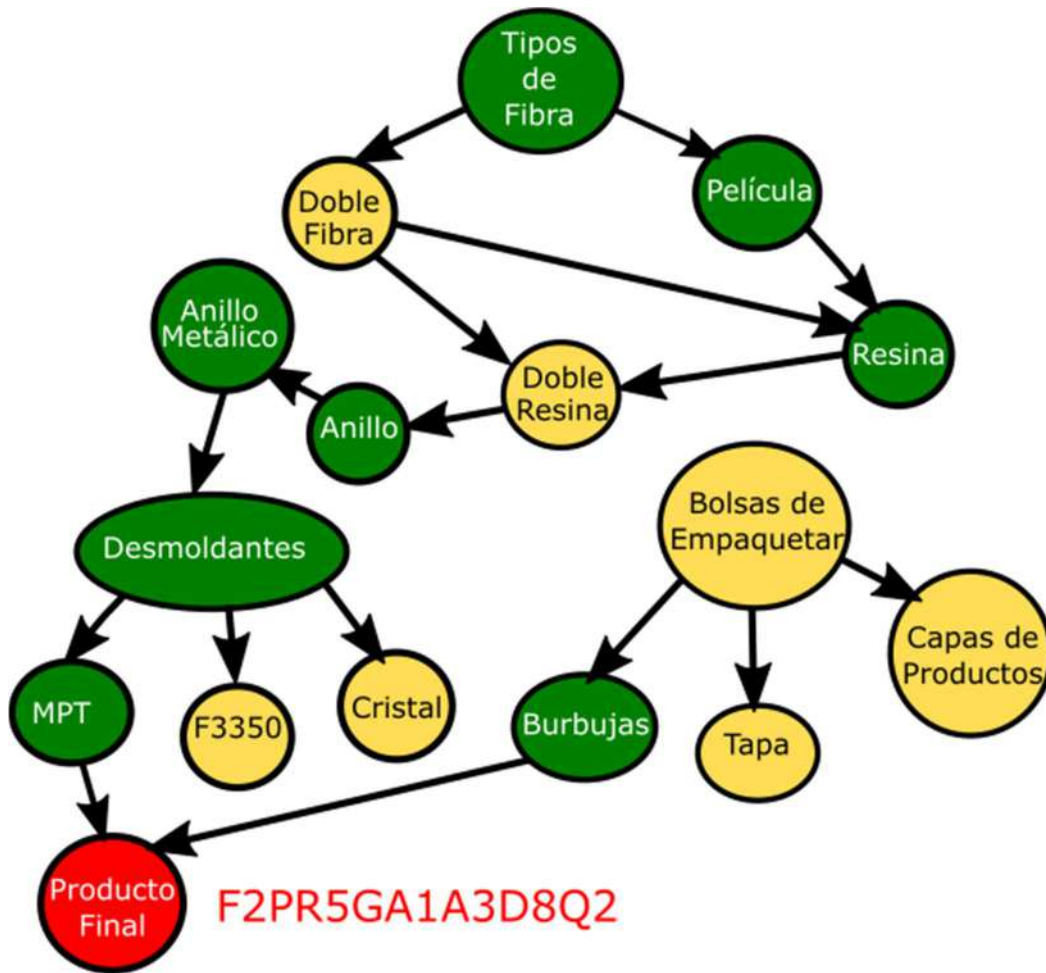


Fig. 15 Diagrama de árbol donde se muestra la dirección empleada para agregar un nuevo procedimiento.

Para fines prácticos no se describen los 49 experimentos, es más eficiente explicar cada técnica con sus observaciones, implementación y los prototipos involucrados.

Las superficies aceptables se pueden identificar a simple vista por un aspecto especular, sin embargo, los prototipos candidato son sometidos a una prueba de interferometría, para obtener la información de la superficie $z(x, y)$ y si cumplen los requisitos de fabricación para calidad óptica.

En todo momento es de gran importancia ocupar protección respiratoria, ocular, y de contacto, como bata, guantes, gafas protectoras y mascarás de carbono activo. Así como acceso a un lugar ventilado con tomas de agua cercanas, así como desagüe, una mesa de trabajo inerte a los químicos empleados y evitar fuentes de calor en los vapores generados.

5.1 TIPOS DE FIBRA

El empleo de la fibra de carbono se basa en la aplicación de un polímero que refuerza un entramado de fibra, dependiendo del entramado son las propiedades que adquieren o si tienen una dirección preferencial en su resistencia.

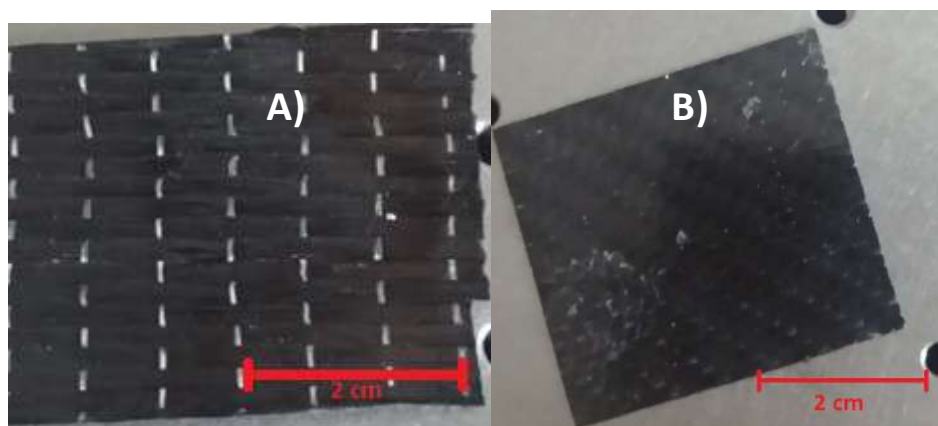


Fig. 17 A) fibra direccional B) fibra Bidireccional

Los entramados más comunes son, de una dirección (F1) que se muestra en la Figura 17 A, o de dos direcciones (F2) observado en la figura 17 B. Al ser de los primeros componentes disponibles se fabricaron 4 prototipos, con dos variaciones de resina (Crystal y Q12). El procedimiento fue el siguiente:

- Se cortaron las fibras al tamaño de 4 vidrios de ventana 3 circulares, de 8 cm de diámetro y 1 rectangular, de 9 cm de largo por 5 de ancho.
- Se limpiaron con agua, jabón y una mezcla de 50/50 de alcohol etílico y acetona.
- Se les colocó una capa de desmoldante genérico (D1).
- Se prepararon 20 gr de resina Q12 marca Quintim¹, a partir de ahora se le conoce como (R1), a una porción de 15gr/125gr de catalizador/pre-polímero.
- Se prepararon 20 gr de resina cristal genérica, a partir de ahora se le conoce como (R2), a una porción de 5 gotas/10gr de catalizador/pre-polímero.

¹ Mas información del distribuidor: <http://www.quintum.com.mx/resinas.php>

- Se depositó 10 gr de (R1) en un vidrio donde se colocó un entramado unidireccional (F1) y otra porción se colocó sobre otro vidrio al cual se le colocó un entramado bidireccional (F2).
- De igual manera, el último punto se repitió para el (R2).

La finalidad fue observar el comportamiento de las fibras de carbono con respecto a la aparición del efecto de fiber-print, respecto a cada tipo de entramado. Una foto del experimento se puede observar en la Fig. 18, donde se muestran cada uno de los resultados.

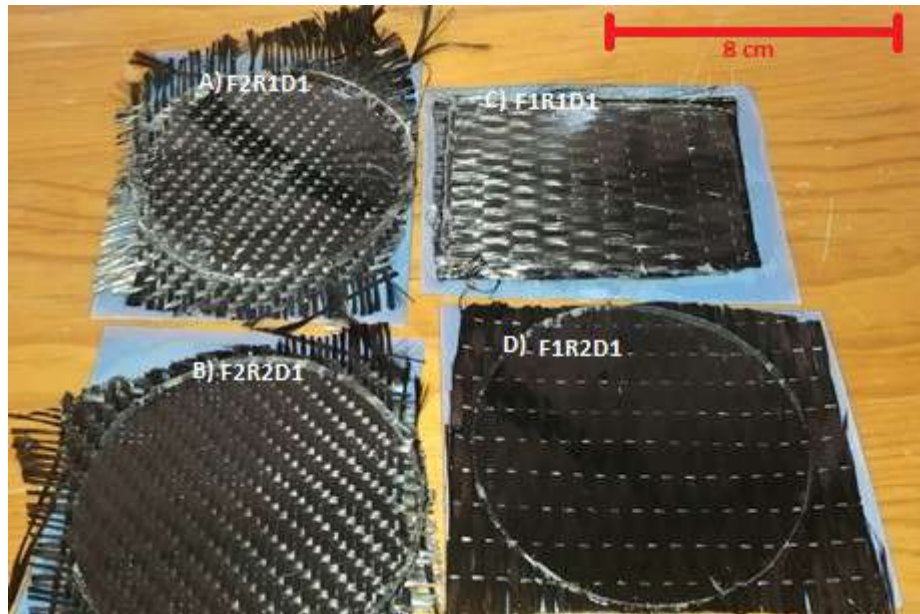


Fig.18 Experimentos con las fibras, se muestran los códigos de cada prototipo A) es el resultado de F2R1D1, B) es el resultado de F2R2D1, C) es el resultado de F1R1D1, D) es el resultado de F1R2D1

En todos los casos el proceso de desmoldado es complicado y produjo daños a la superficie. Por inspección general, se acordó que la fibra bidireccional (F2) y la resina Crystal (R2) tienen un comportamiento más adecuado, ya que no tiene una dirección preferencial en su entramado.

También, la fibra se llegó a implementar en formato de prepreg, este formato consiste en una fibra previamente impregnada de fibra, en algunos casos se ha empleado con la finalidad de eliminar el fiber print, comercialmente se puede encontrar esta presentación tanto en entramado direccional y bidireccional, por cuestiones de volumen se tuvo que añadir un paso adicional de colocar resina en la fibra antes de aplicarla, a este procedimiento se le dio la denominación (F1P) para la direccional y (F2P) para la bidireccional.

5.2 CAPAS

En varios artículos [3-5],[8-9],[45],[50] se presentan métodos de deposición de varias capas con la finalidad de reducir el efecto del fiber-print, por lo que se realizaron experimentos para observar estos resultados.

5.2.1 DOBLE RESINA

Para poder ver que efecto tiene la deposición de una doble capa de resina se permutaron los procedimientos de la sección 5.1 ocupando las mismas materias primas. Se decidió emplear más desmoldante para tener mejores resultados.

- Se limpiaron 4 vidrios de ventana circulares de 12 cm de diámetro.
- Se les colocó 4 capas de desmoldante genérico a todos ellos.
- Se cortaron 4 entramados de Fibra direccional (F1) y 4 entramados bidireccionales (F2)
- Se prepararon 2 mezclas de (R1) y 2 mezclas de (R2) a las cuales se le depositaron en 4 vidrios de ventana con sus entramados correspondientes.
- Cuando endurecieron, fueron separados, los 4 vidrios se volvieron a lavar y se les colocó desmoldante.
- Se les colocaron otras 2 mezclas de (R1) y 2 mezclas de (R2), creando prototipos (R1)(R1), (R1)(R2), (R2)(R1), (R2)(R2).

Los primeros 3 prototipos se intentaron despegar por varios métodos, como navaja y martillos, sin embargo, se tuvieron que desechar por completo. Por el otro lado en la combinación (R2)(R2) no se adhirió la segunda capa de resina, previamente curada, sino que, se fijó al vidrio sin posibilidad de despegarse.

5.2.2 DOBLE FIBRA

Con el fin de observar el comportamiento de las multicapas de fibra, se procedió a colocar capas adicionales de fibra de carbono de los dos entramados, con pequeñas porciones de resina entre cada dos capas de resina.

Cabe destacar que para este momento, ya se había caracterizado la relación de catalizador/pre-polímero para la resina cristal y la variación más estable fue la de 3 gotas de catalizador por 10 gr de pre-polímero (R4), la cual se describe en la Sección 5.4.

- Se prepararon prototipos F1R4 y F2R4 a para los cuales se les cambió el desmoldante por Deus Zeux con 6 capas del mismo (D2).
- Antes del curado al prototipo F1R4, se le colocó por arriba de la fibra una capa delgada de resina R4 y otra fibra F1 en dirección perpendicular a la primera capa.
- Para el F2R4 también se le colocó en resina R4 sobre la fibra, seguido se colocó otra capa de fibra F2 en diagonal con el entramado original.

Por el otro lado se decidió observar el efecto con tres capas de fibra, por lo que se repitió el procedimiento anterior, fabricando un prototipo F1R4F1R4F1R4D2 con la segunda capa a 45° de la anterior y la tercera a 90° de la primera.

En general el proceso de desprendimiento fue más sencillo, por el uso de desmoldante, pero aún se generaron efectos de desprendimiento y fiber-print presente, la Figura 19 presenta los prototipos terminados.

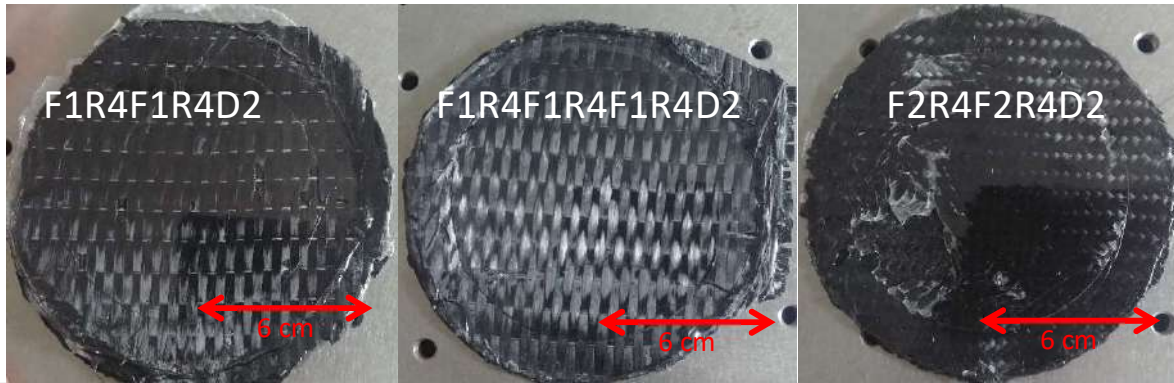


Fig. 19 prototipos F1R4F1R4D2, F1R4F1R4F1R4D2, F2R4F2R4D2.

5.3 CONTENCIÓN

Uno de los factores importantes para la mitigación del fiber print, es la contención de la resina. También evita fracturas al momento de despegar los prototipos. Por lo que la contención permite que la resina se ajuste a una forma en específico e incluso se deposite en lugares clave donde la adhesión es menor, facilitando los siguientes procesos.

5.3.1 PELÍCULA

La implementación de una película protectora surgió como una mejora para el proceso de desmoldado, tras la observación de que las fracturas surgen en las orillas. En general se buscaba un material de baja adhesión y que tenga la habilidad de proteger a la superficie a replicar, la película Sastisloh® se emplea en la fabricación tradicional para proteger superficies opuestas a las que se quieren pulir, también es apreciada por no dejar residuos (baja adhesión) en superficies ópticas por lo que se implementó en el proceso. La metodología fue:

- Primero se limpian los vidrios a con alcohol etílico, acetona, agua y jabón.
- Después se corta la película al tamaño del vidrio de 12 cm de diámetro.
- Se aplica la película en el lado que se quiere replicar.
- Se corta un círculo interno de 10.5 cm de diámetro, para que acote la superficie de interés como en la figura 20 A (también se puede hacer antes de aplicar).
- Y se procede a continuar el proceso habitual de replicación.

Las primeras pruebas se realizaron con el (D2), que no es el desmoldante de mayor rendimiento, mostró una mejora significativa al limitar las fracturas en la frontera, conservando la superficie central, tal como la figura 20 B). A este procedimiento se le denominó (A1).

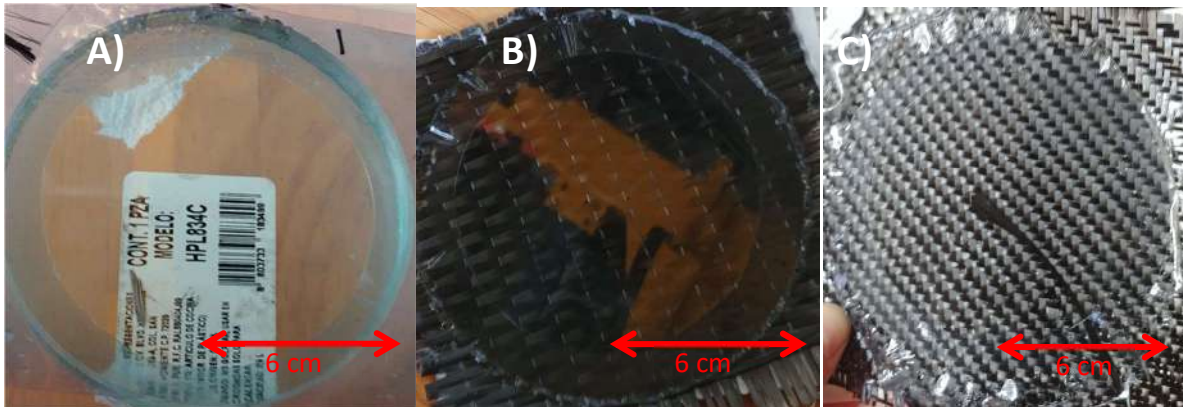


Fig.20 Implementación de película protectora, A) Se muestra la película aplicada solo en la frontera B) Resultado de la implementación de la película F1R4A1D2 C) Resultado de F2R4A1D2

5.3.2 ANILLOS

En el segundo método para contener la resina tiene como objetivo evitar los escurrimientos, por lo que se colocaron anillos, después de colocar las películas(A1) y desmoldante (D2) y antes de depositar la resina (R4).

El primer material que se ocupó como anillo es la cinta adhesiva Scotch® Azul, envolviendo el vidrio de ventana, por lo que el procedimiento quedo de la siguiente manera:

- Primero se limpian los vidrios.
- Se les aplica la película y se les corta un círculo interior (A1).
- Se les aplica el desmoldante (D2).
- Se envuelve la frontera del vidrio con cinta adhesiva Scotch® Azul. (A2).
- Se deposita la resina (R4).
- Finalmente, se le coloca una fibra pre-impregnada y se deja curar 24hrs.

El producto de este procedimiento se pudo observar en la figura 21 A ya despegado, y el producto antes de despegar en la figura 21 B). Los resultados mostraron una superficie ya con características especulares, pero con zonas de fiber-print.

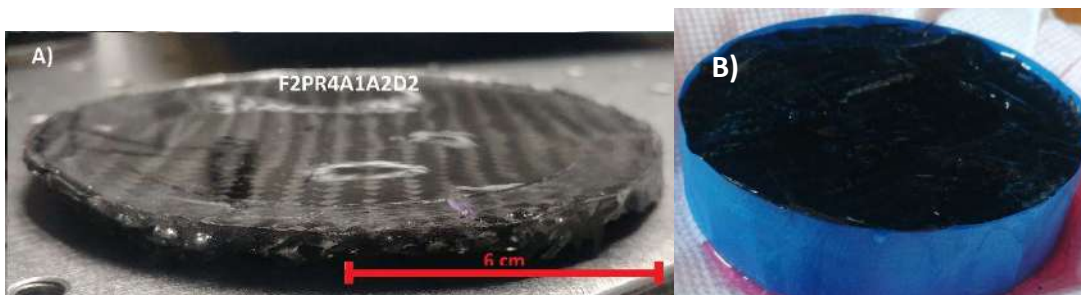


Fig. 21 A) Resultado de la colocación del Anillo de cinta adhesiva Scotch® Azul. (A2). B) Prototipo durante la fase de curado. F2PR4A1A2D2

Se logró un avance al mitigar por zonas el fiber-print, pero presento la desventaja de que la cinta no contuvo por completo a la resina, por lo que se dedujo que la contención de la resina debería ser por medio de una barrera más rígida, así que se implementó una barrera de latón en la frontera del vidrio.

La barrera de latón consiste en un anillo como el de la Figura 22 A, de diámetro exterior de 65 mm y diámetro interior de 55 mm, una profundidad de 11 mm, con un grosor de lámina de 1 mm, este anillo fue fabricado con la ayuda del taller mecánico del Instituto de Astronomía , a partir de material disponible.

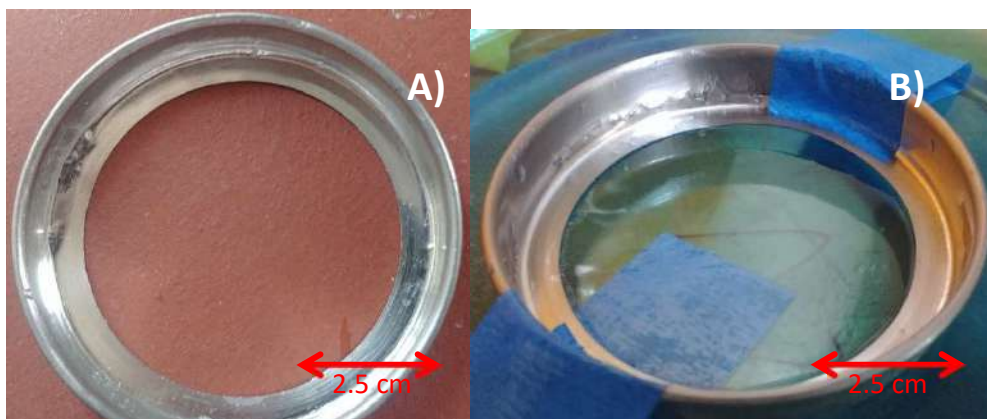


Fig. 22 A) Anillo metálico como barrera para la contención de la resina. B) colocación del anillo metálico en el vidrio a replicar

El procedimiento es similar que aplicar adhesiva Scotch® Azul que consiste en colocar por encima y fijar el anillo metálico (A3) al vidrio con cinta adhesiva como se observa en la Figura 22 B.

Los resultados fueron un gran avance debido a que la superficie activa no mostro fiber-print como se observa en la figura 23 A. Incluso la superficie ya era visible por un interferómetro (Zygo) como se muestra en la figura 23 B, lo que implica que el prototipo tiene una rugosidad en el orden de 20λ , indicando que el procedimiento es adecuado.

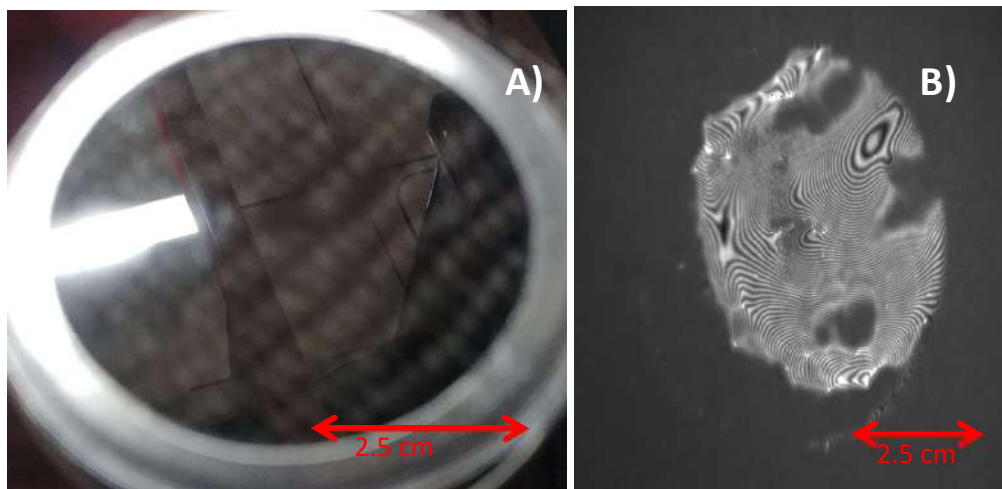


Fig. 23 A) Espejo con anillo metálico, que muestra una calidad especular B) Imagen captada por el interferómetro F2PR4GA1A3D2

Por lo que la implementación del anillo se volvió estándar bajo la denominación (A3). El prototipo presento degradación al cabo de unas semanas, por lo que no es apto para las condiciones de un telescopio terrestre.

Es importante notar que la deposición de resina ahora es de 5 mm por lo que se denominó de deposición gruesa (RXG), a comparación de los otros prototipos, la X en (RXG) se intercambia por el código de la resina que se esté empleando.

5.4 RESINAS Y DESMOLDANTES

En un principio, la disponibilidad de materias primas era limitado, por diversas razones de compras, proveedores, locación, permisos, etc., pero a medida que progresaba el proyecto se pudo experimentar con más resinas y más desmoldantes, por lo que resulto en la selección de los mejores componentes.

Las resinas son un elemento clave, por lo que al principio solo se tenían disponibles las resinas Q12 (R1) y Crystal 1, que su comportamiento no era el adecuado. Debe señalarse que la resina Q12 (R1) era muy agresiva con los vidrios, por lo que fue descartada.

Con la finalidad de encontrar el mejor comportamiento de la Resina Crystal 1 (R2), se procedió variar las concentraciones de endurecedor. resultado se obtuvo la mezcla de resina Crystal 2 (R3) con una relación de 8 gotas de catalizador por 10 gr de resina, y una mezcla con concentración de 3 gotas de catalizador por 10 gr de resina Crystal 3 (R4), mostró una superficie especular y más flexibilidad. La aplicación de las mismas se puede ver en la Figura 24.

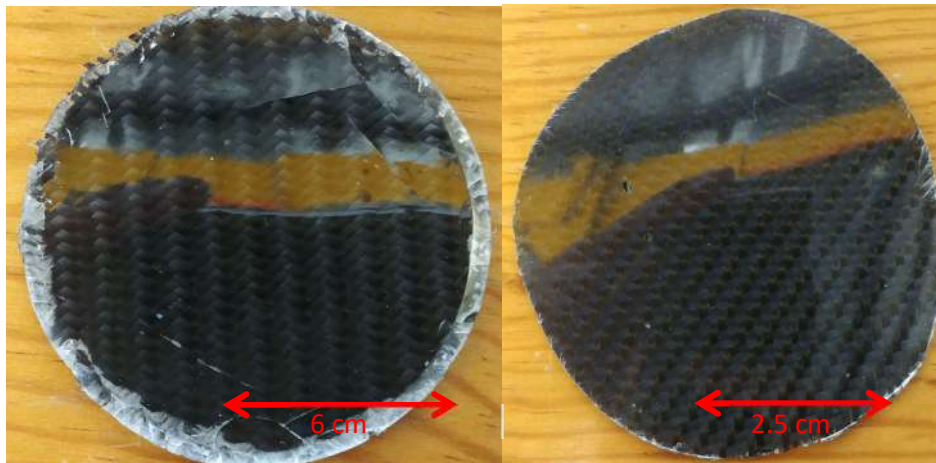


Fig. 24 Resultados de las variantes de resina (R2) A) Variación F2R3D1 (R3) B) Variación F2R4D1 (R4) F2R4D1

Por el otro lado, el factor principal para obtener la mejor calidad de espejos es que la tensión superficial y la adhesión de la resina para que se replique la superficie, y esto depende de varios factores que de manera física no se pueden alterar, pero si de manera química, en este caso consistía en caracterizar la interacción del desmoldante con la resina para disminuir la adhesión, por lo que se probaron individualmente una serie de desmoldantes. Siguiendo el procedimiento:

- Primero se limpiaron los con alcohol etílico, acetona, agua y jabón .
- Se colocó 4 capas de cada desmoldante por superficie.
- Se dejaron reposar a temperatura ambiente durante 15 min.
- Se colocaron varias cintas adhesivas y se observó sí se despejaban.

Los resultados se muestran en la Tabla 1, donde el mejor desmoldante para disminuir la adhesión y que se esparza uniformemente a una superficie son : Desmoldyn², Silicón con Solvente, Desmol Zeus y el Teflón.

Tabla 1. Relación de desmoldantes y como afectan la adhesión sobre una superficie.

Nombre Comercial	Superficie	adhesión	notas
Semi permanente Teflón	no uniforme	se pega	aun en diferentes zonas el desmoldante no es efectivo además crea una capa blanca que se queda adherida al sustrato
Teflón	uniforme	muy baja adhesión	crea una superficie mostrada sin embargo es efectivo
Aceite mineral	uniforme	adhesión media	no es muy efectivo
Silicón con solvente	uniforme	muy baja adhesión	ligeramente más efectivo que el teflón con una capa ligera
Desmoldyn	uniforme	muy baja adhesión	no tan efectivo como con solvente pero muy efectivo y no deja capa
Semi seca	no uniforme	baja adhesión	deja una capa de partículas la cinta las absorbe
Desmol Zeux	uniforme	baja adhesión	Tiene una apariencia similar a la capa de aceite
Sin marca	uniforme	hay adhesión	

Con el fin de seguir estudiando los efectos de las diferentes resinas con los desmoldantes, se prosiguió a repetir el procedimiento de la Sección 5.3.2 pero cambiando el desmoldante y la resina Crystal 3 por la MPT XX(R5) del fabricante Epolyglass (R6).

De todos los resultados las superficies con apariencia especular, son las de la figura 25, para lo que el Desmoldyn (D8), el Desmoldante de silicón con solvente (D7), y el aceite mineral (D6), fueron los mejores resultados, sin embargo, el prototipo de aceite mineral se degrado en un lapso de 48hrs.

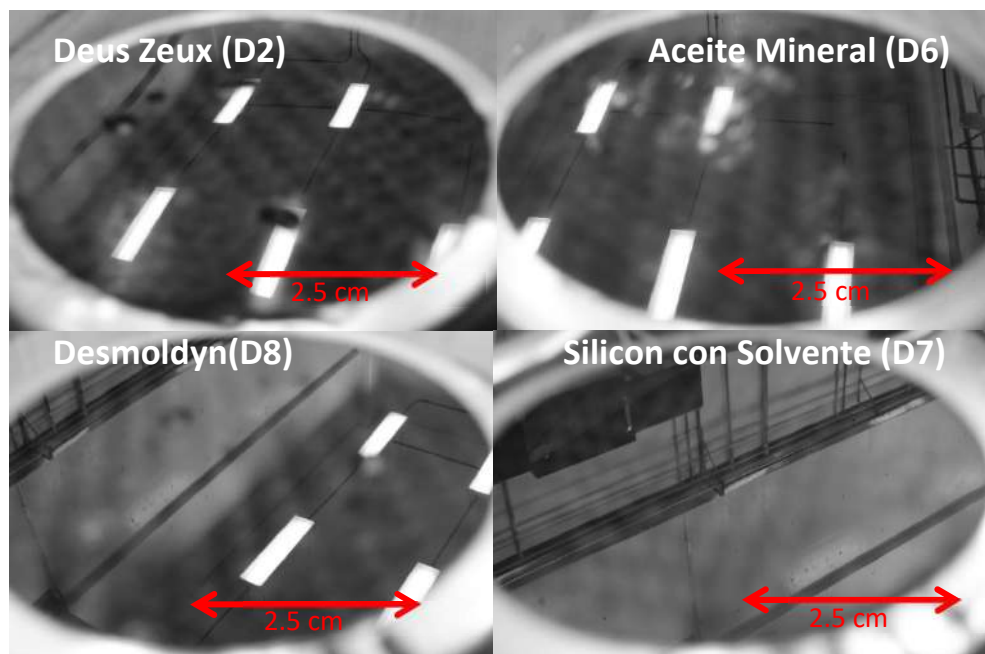


Fig. 25 Prototipos de MPT XX mostrando el techo del taller óptico con sus respectivos desmoldantes.

² <http://www.distribuidorapreciado.com.mx/desmoldantes.html>, Distribuidora Preciado, Desmoldyn Protector

El mismo procedimiento se realizó para la Resina F3520 (R6), del mismo fabricante Epolyglass donde se probaron los desmoldantes de mejor rendimiento (D7) y (D8). Los resultados se pueden ver en la Figura 26, los cuales no son especulase como los resultados Resina MPT XX (R5) con Desmoldyn (D8).

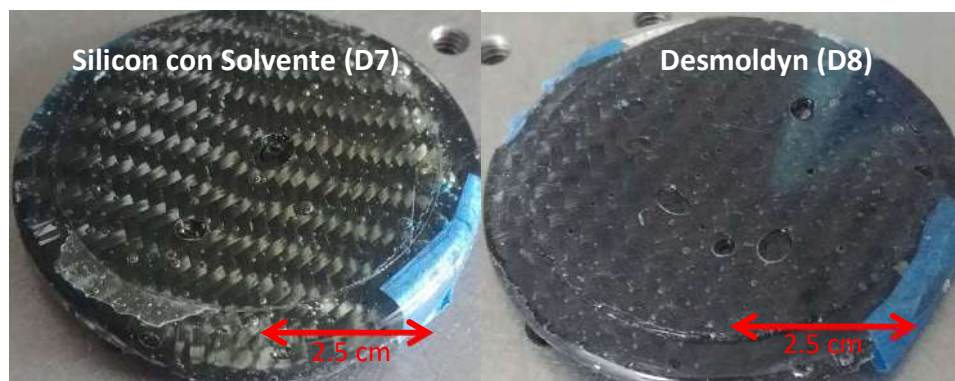


Fig. 26 Prototipos de F3250 con sus respectivos desmoldantes.

5.5 ACABADOS

Los diferentes procesos que se han mencionado de la Sección 5.1 hasta la Sección 5.4, solo tienen la finalidad de caracterizar el fenómeno de replicación de superficies de cierta calidad óptica, por lo que no se estudian los acabados que pueden llegar a afectar el rendimiento.

Por lo que de manera paralela se han realizado experimentos para mejorar los efectos secundarios que se presentan a continuación.

5.5.1 BOLSAS DE EMPAQUETAR y TAPAS

En la Sección 5.3 se observó la importancia de la contención de la resina en consecuencia, se decidió implementar bolsas de empaquetado, con el objetivo de mantener la forma del espejo, para limitar la movilidad de la resina, garantizando formas planas o conservar una curvatura, e incluso evitar escurrimientos.

En el empleo de bolsas de vacío, se fabricaron 4 prototipos, con el mismo procedimiento estándar para el prototipo F2PR5GA1A3D8 y F2PR5GA1A3D5, la diferencia fue en el empleo de una máquina empaquetadora Hamilton Beach, en donde una vez depositados se insertan en una bolsa la cual se fija y sella al vacío como en la Figura 27.



Fig. 27 Proceso de sellado una bolsa con un prototipo

Cabe destacar que en los 2 primeros experimentos se colocó un espaciador de cartón para complementar la altura al anillo, por lo que a los códigos de los prototipos se les agregó (B) de bolsa y (E) por los espaciadores.

Los espaciadores no dieron el resultado esperado, pues el fiber-print se volvió más evidente en ambos prototipos, como se muestra en la Figura 28.



Fig. 28 Resultado de colocar espaciadores, en ambos casos F2PR5GA1A3D8BE y F2PR5GA1A3D5BE, tienen la misma apariencia

La aparición del fiber-print se debe a que el cartón absorbió la resina, por lo que solo se quedó una mínima cantidad en la fibra de carbono. Se repitió el procedimiento, pero sin espaciador, dando como resultado la Figura 29, en donde se marcó también el fiber-print. Sin embargo, se logró notar que la resina intento salirse del anillo, dejando a la fibra con muy poca resina, pero muy flexible.

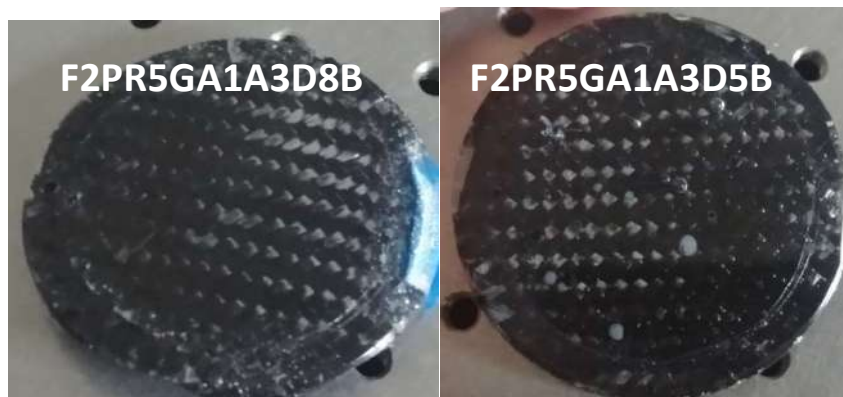


Fig. 29 Prototipos fabricados con bolsas de empaquetado, F2PR5GA1A3D8B y F2PR5GA1A3D5B

Para evitar el escenario adverso de los espaciadores, se propuso colocar una tapa sobre el anillo para que el efecto de absorción de la bolsa no afectara a la resina interna. Los resultados fueron interesantes, ya que se generó una superficie altamente poblada de burbujas, Figura 30, pero de una consistencia suave, que, al fin y al cabo, el espejo al tener objetivos de óptica adaptativa, en donde la flexibilidad es una propiedad deseada.

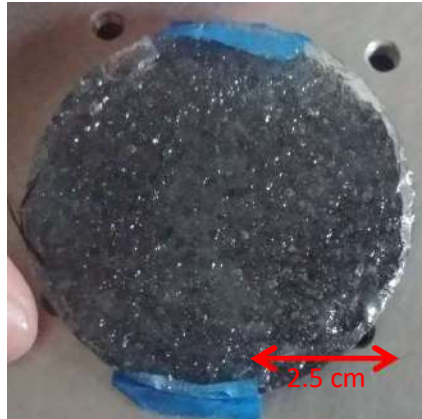


Fig. 30 prototipo F2PR3GA1A3D8BT, en donde se muestra la alta población de burbujas

En esta propiedad deseada se intentó transferir a una superficie especular por medio de la deposición de una segunda capa de resina. Al realizarse la prueba con una segunda capa de MPT XX, como de F3250, los resultados si tuvieron sujeción entre capas, sin embargo es tan dura que no se pudieron separar de los anillos, aun así la presencia de burbujas no es adecuada, porque están en la superficie como se muestra en la figura 31.

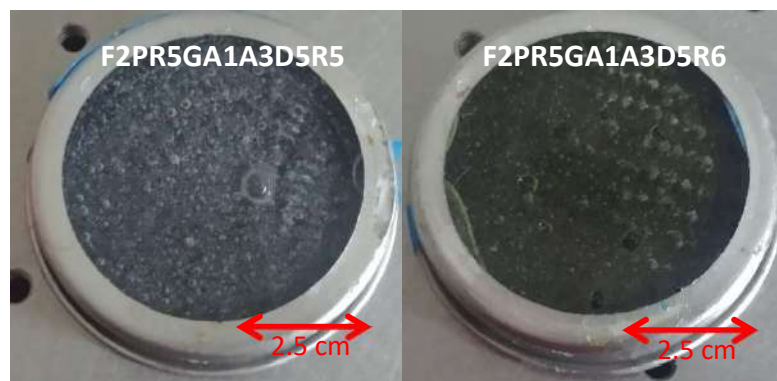


Fig. 31 Prototipos a los que se les colocó una segunda capa de resina

Aun así, se continuó ocupando bolsas de empaquetado por el resultado flexible. En el siguiente paso se buscaría replicar una primera capa a forma de un plano, y de con una curvatura con una fibra muy impregnada que serviría de una primera capa para soportar una capa con una superficie óptica adecuada. Ahora solo se ocuparía la resina MPT XX por su estabilidad en otras pruebas, los resultados son los que se aprecian en la Figura 32.



Fig. 32 Resultados de prototipos con una primera capa flexible con forma.

5.5.2 BURBUJAS

En la Sección 5.5.1 es evidente que las burbujas son un problema recurrente, por lo que se procedió a aplicar los métodos más comunes para eliminar las burbujas.

El primer ensayo fue la aplicación de aerosol comercial anti-burbujas (Q), para esto se baso en el procedimiento F2PR5GA1A3D8, pero antes de colocar la fibra se aplicó una capa del aerosol, al momento algunas burbujas subieron a la superficie, La siguiente etapa fue colocar la fibra.

El resultado no fue el esperado, puesto que el aerosol al cambiar la viscosidad de la resina permitió que las burbujas salieran. Sin embargo, esto también modifico el proceso de endurecimiento resultando una superficie con textura pegajosa como se observa en la figura 33.

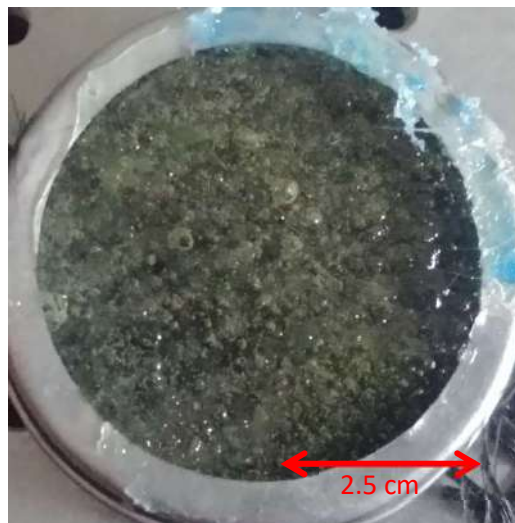


Fig. 33 Resultado de la aplicación de aerosol quita burbujas (Q)

El segundo intento, antes de colocar la fibra, se pasó un mechero (Q1) directo sobre la resina ya depositada. El resultado dio una superficie con menos burbujas, pero además de que no es repetible, la calidad no es especular pues se pueden observar como deformaciones en la superficie, como se ve en la Figura 34.

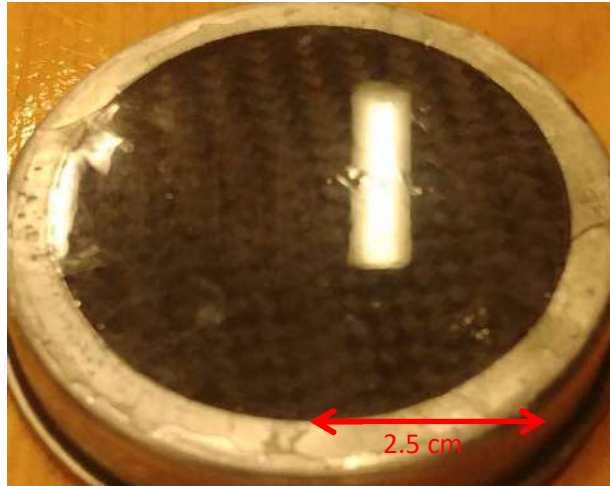


Fig. 34 Resultado de aplicar un mechero en la resina depositada (Q2)

Los métodos anteriores no resultaron efectivos, por lo que para el prototipo final se procedió con un método más estándar conocido como degaseo el cual se revisa en la Sección 6.2.

5.6 PROCEDIMIENTO PRELIMINAR

Todos los procesos anteriores convergen en el prototipo F2PR5GA1A3D8, el cual se presenta en la figura 35. El prototipo en cuestión ya presenta características propias de una superficie óptica con ciertos defectos.

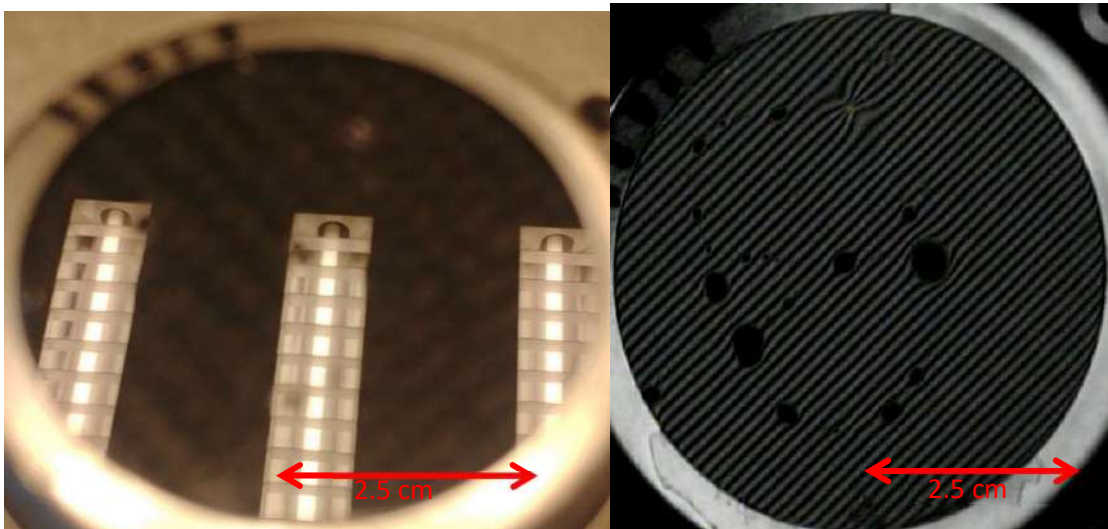


Fig. 35 Prototipo F2PR5GA1A3D8, A) se muestra una fotografía con el foco en el infinito B) Proyección de franjas sobre la superficie para el proceso de deflectométría, en este caso los defectos son más evidentes como las burbujas y deformaciones.

El procedimiento específico de este prototipo consiste en:

- Se corto la fibra bidireccional (F2) al tamaño del anillo metálico(A3).
- Se Limpio la superficie a replicar de vidrio de ventana con agua, jabón y alcohol con acetona.
- Se aplico una capa de cinta Satisloh®(A3) la cual se le corto la forma interna del anillo metálico.
- Se preparo la resina MTP XX (R5) a una porción de 10 *gr* de resina y 5 *gr* de endurecedor.
- Se pre-impregno la Fibra con la resina (PR5).

- Se colocó y fij con cinta el anillo metálico (A3) sobre el master.
- Se colocaron 6 capas de desmoldante Desmoldyn (D8) sobre el master y se dejó reposar 15 min.
- Se vertió la resina (R5) en el anillo (A3) y se colocó la fibra (F2PR5).
- Se dejó curar a temperatura ambiente durante 2 días.

En base a este procedimiento se debe seguir realizando variaciones para poder mitigar los defectos del prototipo. Estos defectos incluyen burbujas en la superficie, debajo de la superficie, residuos de desmoldante y pequeñas ondulaciones que afectan la superficie en general.

La proyección de franjas de la figura 35 B son parte de un análisis de deflectometría el cual es útil para obtener información sobre la cosmética scratch and dig (poro-rama) de una superficie especular. Es útil para hacer análisis de previos con un interferómetro Zygo XP. La figura 36 se muestra la superficie recuperada en píxeles del prototipo F2PR5GA1A3D8, en donde ya se espera que la superficie presente cualidades especulares muy superiores a otros prototipos.

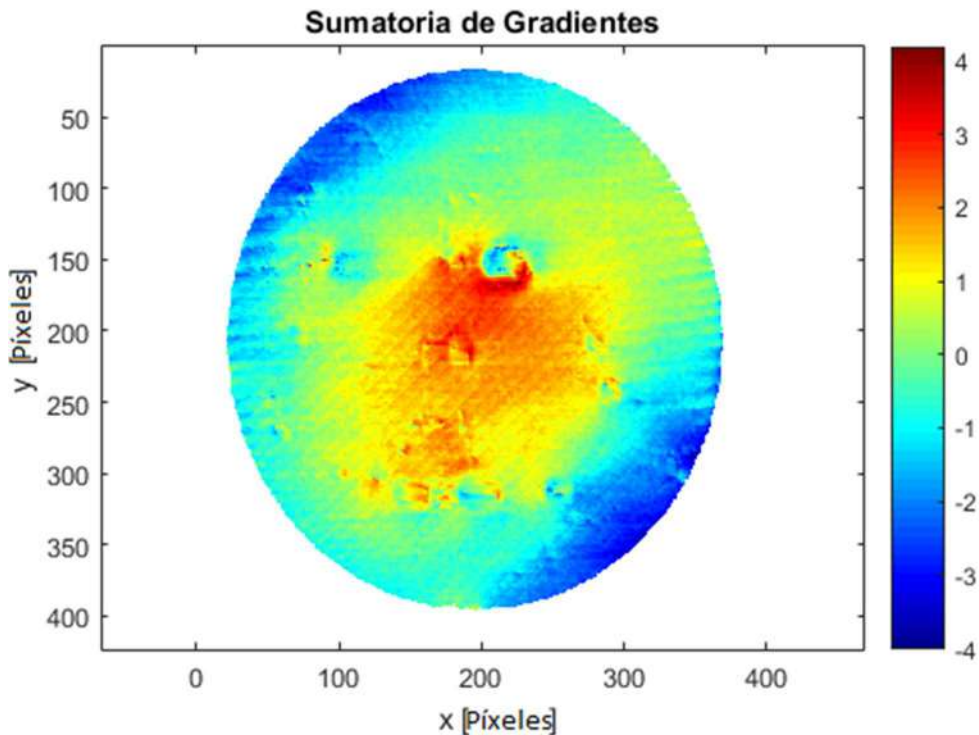


Fig.36 Superficie del Prototipo F2PR5GA1A3D8, en donde se calcula la suma de gradientes resultante de deflectometría indicando la altura de la superficie en unidades arbitrarias.

Por el otro lado, también se realizó un análisis con interferómetro, el cual brinda más información, en la figura 37 el perfil de la superficie, bajo una longitud de onda de 633 nm , se calculó la distancia pico-valor a $16.131 * \lambda$ y un rms de $2.543 * \lambda$, en donde a pesar de estar muy por encima del criterio de Raleigh $\lambda/4$, ya se presentan franjas interferométricas. Además, se puede observar que el proceso de replicación está limitado a la calidad del máster y los defectos del proceso como las burbujas.

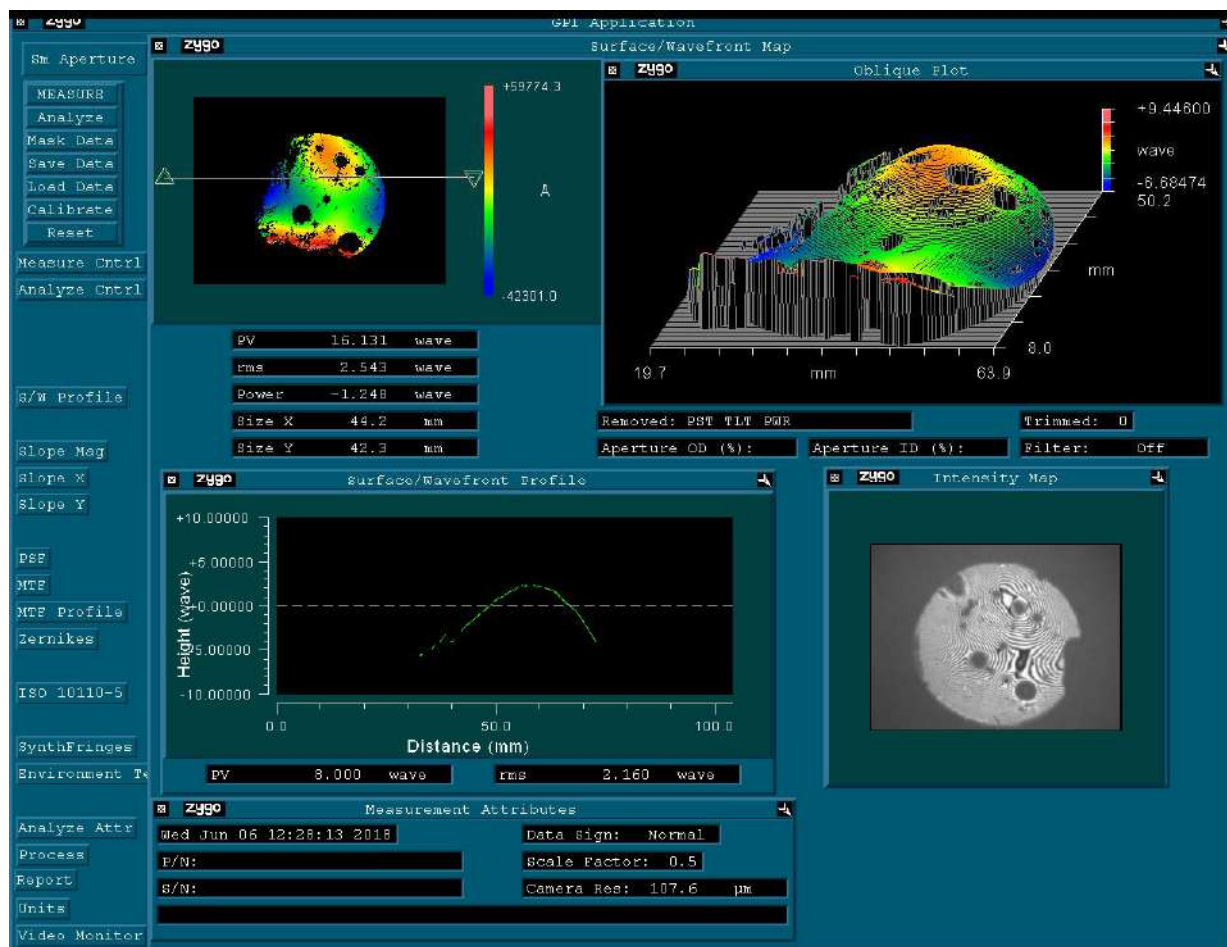


Fig.37 Captura del análisis del prototipo F2PR5GA1A3D8, realizada con un interferómetro de Frizeau de la marca Zygo modelo XP de 6"

Esta sección muestra que el método de replicación es válido, siempre y cuando este caracterizado, lo que implica conocer las propiedades de la resina y desmoldante, como los elementos de contención de la resina y la calidad del máster, todos estos conocimientos en conjunto resultan en la mitigación del fiber-print, facilitan los procesos de desmoldeo y asegura la resistencia al ambiente en donde el espejo se implementará.

El siguiente avance del estudio debe estar centrado en la eliminación de los efectos en la superficie, para lo cual se revisarán los procesos de mezclado, depósito de resina como depósito de desmoldante, así como una caracterización más profunda por medio de técnicas de degaseo y la determinación de la cantidad del desmoldante.

6 Refinamiento del Procedimiento

En este capítulo, se presentan los procesos de refinamiento para lograr una superficie uniforme y libre de las imperfecciones. Estas han sido persistentes a lo largo del capítulo cinco, y donde se busca: eliminar burbujas, disminuir el deterioro y mantener la forma.

En el Capítulo 5 se determinó que la mejor mezcla es la de Desmoldyn (D8) con la resina MPT XX (R5) y todos los aditamentos en la fabricación del prototipo F2PR5GA1A3D8, por lo que se presentará información enfocada en evaluar la cantidad de desmoldante como el desempeño de los aditamentos.

6.1 DETERMINACIÓN DEL DESMOLDANTE

Una de las principales incógnitas del proceso preliminar, es la dosis de desmoldante requerida para evitar que tenga efectos negativos en la superficie de reflexión. Entre los efectos tenemos: las burbujas en la superficie pequeñas deformaciones por desprendimientos, se puede observar que el desmoldante induce deformaciones al examinarlo mediante deflectometría, como en la Figura 38.



Figura 38. Deposición de desmoldante(D8) sobre el master, examinado mediante deflectometría

Para poder determinar la cantidad de desmoldante, se empezó por repetir el proceso del F2PR5GA1A3D8, con 6 capas de Desmoldyn (D8), el cual se agitó por 2 minutos, el número de capas fue bajando de dos en dos hasta obtener el prototipo con menos burbujas. Como resultado se notó una disminución en el tamaño de las burbujas en la superficie, a medida de se reduce el número de capas de desmoldante, tal como se observa en las imágenes de la Figura 39.

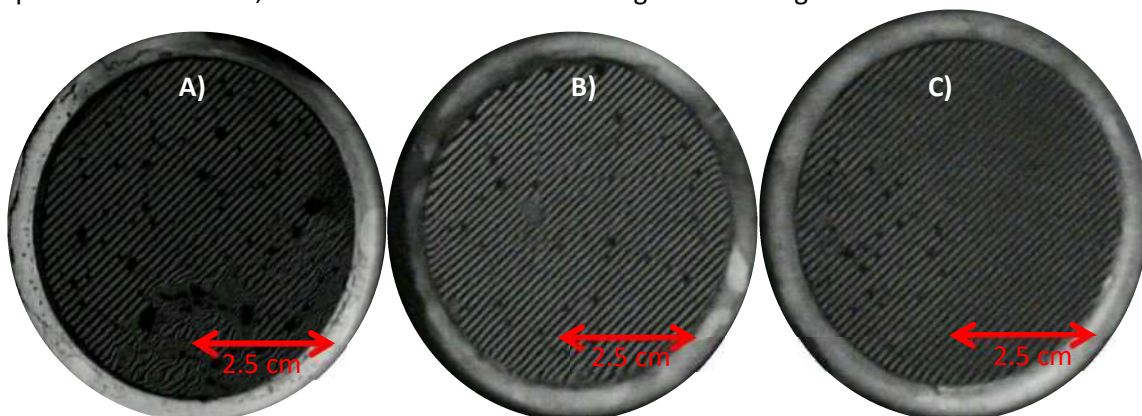


Figura 39. Variaciones de aplicación de capas de desmoldante A) 6 capas B) 4 capas C)2 capas

Es importante notar que cuando se aplicó solo una capa de aerosol, ya se contaba con una cámara de degaseo por lo que se le aplico un proceso de degaseo a la resina al mezclarse con el catalizador y después de depositarse en el anillo.

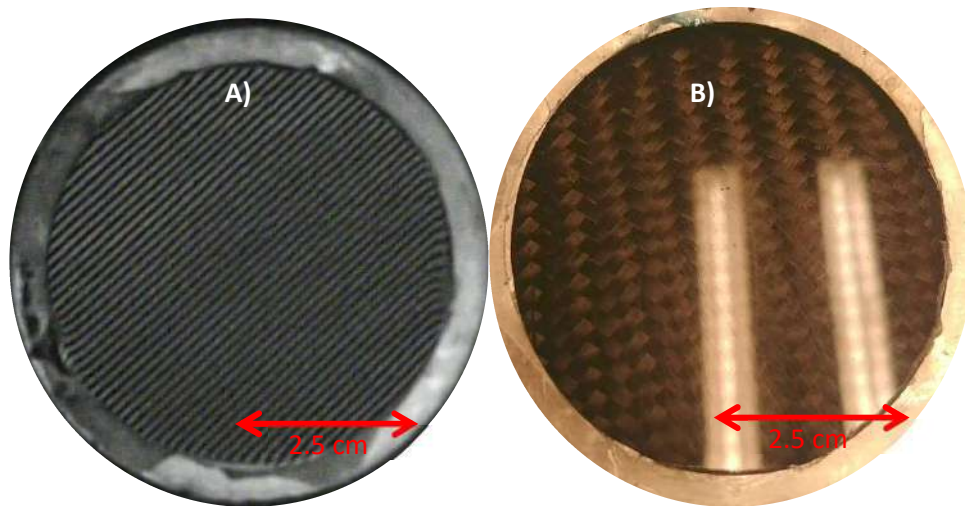


Figura 40. Aplicación de una pasada de Desmoldyn (D8) A) imagen de proyección de franjas, B) imagen enfocada a la superficie donde aún se notan microburbujas

Sin embargo, en la Figura 40 B aún se observan burbujas diminutas en la superficie. Finalmente se logró depositar una capa tan delgada que no genera burbujas, por medio de una aplicación indirecta del aerosol como en la Figura 41. La ventaja es que permite que el desmoldante genere su función de desprender la réplica del molde mientras no deja burbujas en la superficie, se le asigno la notación (D8D).

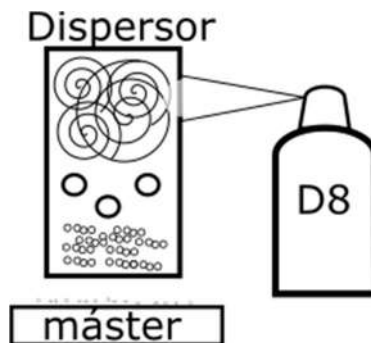


Figura 41. Deposición de desmoldante (D8) de manera indirecta

Las réplicas no mostraron burbujas como se observa en la figura 42 y los únicos defectos son los rayones del master que se replican, dicha técnica se adoptó para los futuros procedimientos.

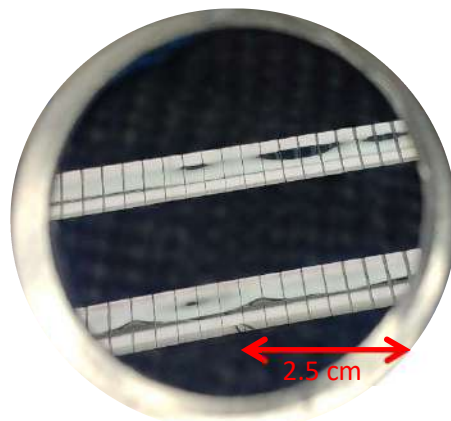


Figura 42. Resultado de colocar desmoldante (D8) de manera indirecta

6.2 PROCESO DE DEGASEO

La técnica de degaseo es ampliamente empleada en los procesos de fabricación de los compuestos de resinas, su principal objetivo es reducir la cantidad de burbujas atrapadas tras el proceso de curado, aumentando la resistencia del compuesto, así como, sus propiedades cosméticas.

La cámara de degaseo consiste en una olla de acero, como se observa en la Figura 43, a la cual se le coloca una tapa de acrílico con una válvula que regula el flujo de aire que extrae una bomba de vacío. En esencia, se coloca la resina en el interior de la cámara, la cual genera vacío y por lo tanto succiona las burbujas hasta sacarlas de la mezcla de resina con endurecedor, sin alterarla químicamente, proceso se puede ver en la figura 44.



Figura 42. Cámara de vacío con sus accesorios

La incorporación del proceso de degaseo consiste en: una vez que se mezcló el endurecedor con la resina, se coloca la muestra en la cámara de vacío, se cierra y se procede a encender la bomba. Una vez que se llega a un vacío constante (depende del rendimiento de la bomba y la altitud), se deja prendida por 5 minutos. En esta etapa se observa un comportamiento como en la figura 44 A, se apaga la bomba y se cierran las válvulas dejando que el vacío interno actúe pasivamente por otros 5 minutos.

Después del depósito en el anillo de contención, es habitual que algunas burbujas se aparezcan por lo que se repite el procedimiento de degaseo otros 5 minutos activos y 5 minutos pasivos como el resultado mostrado en la figura 44 B), el procedimiento se denominó como (Q2).

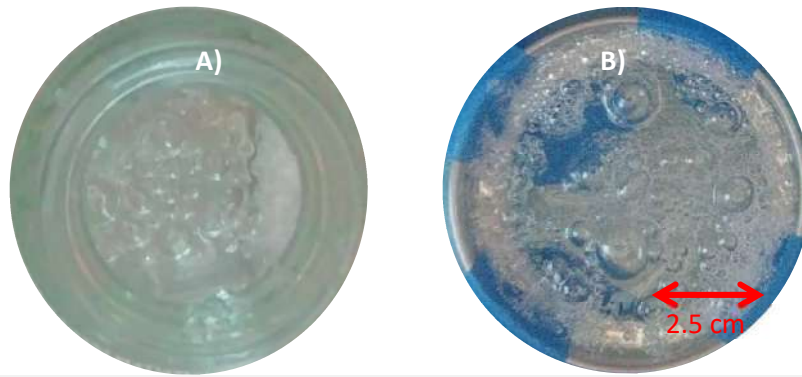


Figura 44. Etapas de degaseo A) después de mezclarse, B) después de depositarlo

6.3 MEZCLADO Y TIEMPO DE CURADO

Una de las observaciones importantes de algunos prototipos es que a pesar de cubrir el tiempo de curado especificado por el fabricante (6 horas), mostraron una degradación al cabo de unos días. Dichas degradaciones tienen forma de ondulaciones y se dedujo que deben estar relacionadas con el tiempo de curado pues el procedimiento no es el recomendado por el fabricante. Además, el procedimiento de mezclado al ser a mano no garantiza uniformidad en la mezcla.

Para ofrecer un mezclado más uniforme, se incorporó una parrilla de agitación magnética marca Corning modelo PC-420, en dicha parrilla no se ocupó calor, pero se estableció una velocidad 7, en la escala del 1 al 10, y al colocar la píldora agitadora se dejó mezclar por 5 minutos antes del primer proceso de degaseo, tal como se observa en la figura 45.



Figura 45. Resina agitándose magnéticamente

Para poder descartar el tiempo de curado, se dejaron muestras ya agitadas magnéticamente en un curado de 46 horas, después de transcurrido el tiempo tras el desmoldeo, no exhibió degradación como se muestra en la figura 46.



Figura 46. Degradado de resina A) prototipo con degradado B) prototipo que no se degradó a las 48 horas pero aún tiene microburbujas

6.4 REVISIÓN DEL SISTEMA DE SUJECIÓN

En mediciones de forma preliminares, se percató que la forma del máster no estaba siendo replicada por el proceso. Por lo que se propuso revisar el método de sujeción del anillo al máster, la principal observación es que existe una capa que se levanta de la frontera del anillo 1 mm de alto, la cual está relacionada con la película protectora (A1).

Otra observación es que el escurrimiento de la resina por debajo del anillo es un impedimento para replicar la forma exacta del master. En consecuencia, además de emplear cinta adhesiva también se exploraron opciones como sujeción magnética (Fig.47 A,B), un anillo sin pestaña (Fig.47 D), emplear la máquina empaquetadora (Fig.47 E), y compararlos contra la cinta habitualmente empleada (Fig.47 C),.

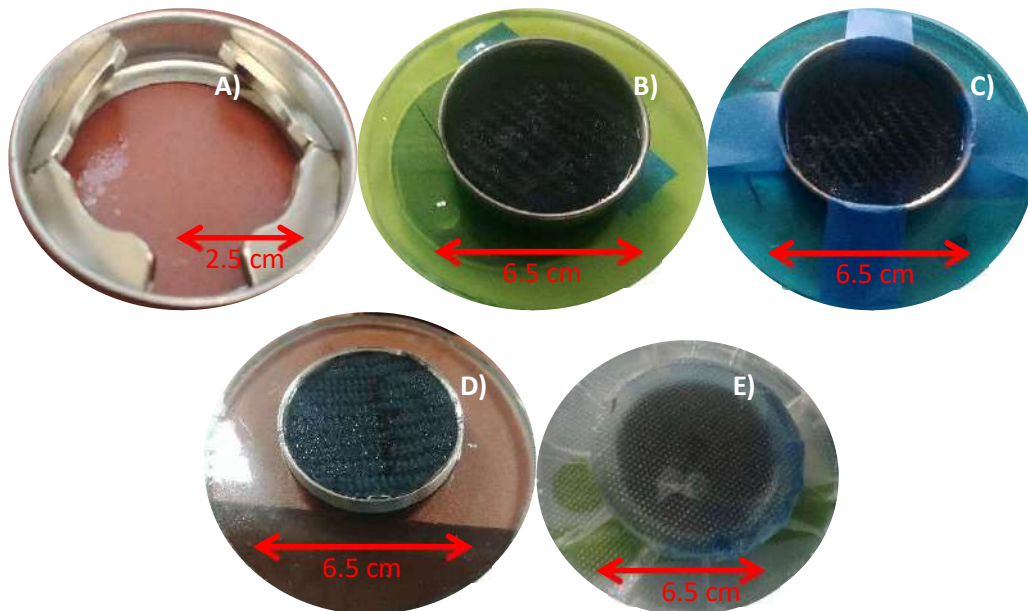


Figura 47. Evaluación de los sistemas de sujeción A) Anillo con imanes de neodimio, B) Anillo con imanes de neodimio con un imán de ferrita para atraerlo, C) sistema de sujeción habitual con cinta, D) Aplicación de anillo sin pestañas, E) Anillo apretado por empaquetado.

Para evaluarlos sin la película (A1), solo se colocó la película protectora en la zona de replicación, se colocó una capa de desmoldante (D8), se retiró la película protectora y se colocó desmoldante

indirectamente (D8D). A continuación se colocó el anillo por el sistema de sujeción a evaluar, después el procedimiento continuo habitualmente.

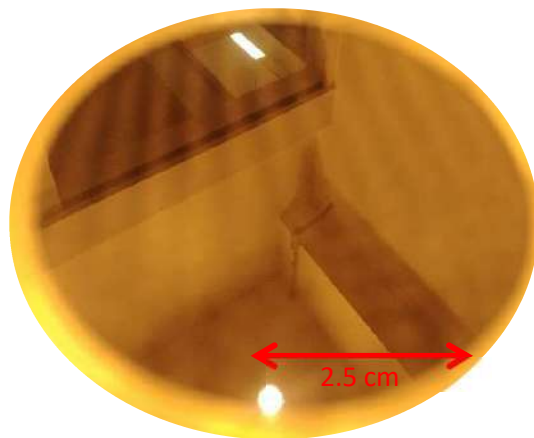


Figura 48. Superficie del espejo por sujeción de cinta enfocada al infinito

Todos los productos tuvieron escurrimiento. Sin embargo, solo se pudo desmoldar exitosamente el sistema por cinta, que se observa en la Figura 48. Los demás prototipos requirieron de agua caliente que al final se deforma la resina curada.

Se determinó que el escurrimiento se debe a un exceso de resina, por lo que se probaron dos métodos para eliminar intencionalmente ese exceso. En un caso se redujo la cantidad de resina en la muestra a 8 ml por 4 ml de catalizador, su resultado se observa en la figura 49 A. En el segundo caso, se colocaron canales en el anillo(A3C) para que el exceso escurra y no afecte la superficie, los canales se observan en la figura 49 B.

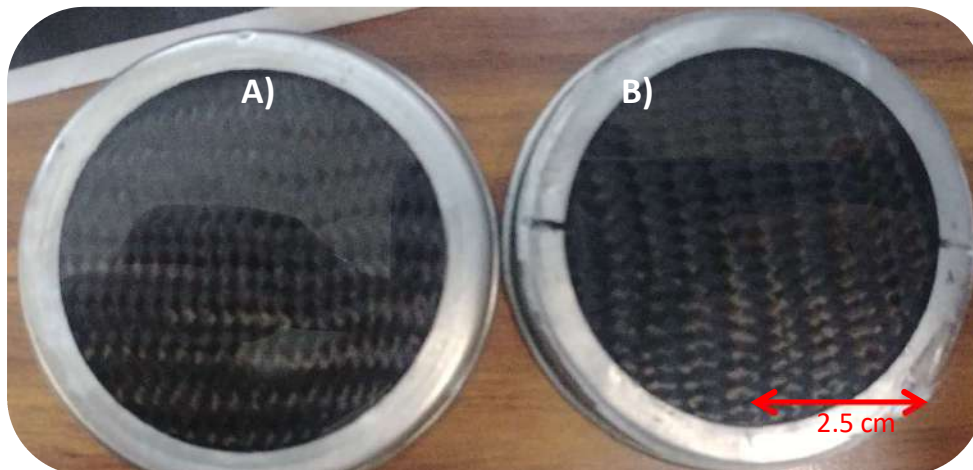


Figura 49. Pruebas de exceso de resina A) Prototipo con mezcla de 8ml de resina, B) prototipo con canales para evitar escurrimiento.

6.5 CURADO A ALTA TEMPERATURA

Aunque el proceso se desarrolló para curarse a temperatura ambiente, se decidió observar el comportamiento del mismo en altas temperatura. Con el objetivo de observar si ofrecía una mejora en conservación de la forma y eliminar imperfecciones de curado. El segundo motivo fue por completar el estudio, y como referencia contra las demás investigaciones.

Se repitió el mismo procedimiento para el sistema de sujeción con cinta sin usar los canales. Se ocupó un máster plano a $\lambda/10$ aluminizado de Edmund Optics, el compuesto se muestra en la Figura

50. Se envolvió con papel aluminio y se calentó en un horno a una temperatura de 180 °C durante media hora y se disminuyó a 100 °C en donde permaneció durante 1 hora y media, después se apagó el horno y se dejó enfriar la muestra a ventilación activa durante 2 horas. Una vez apagada la ventilación se dejó reposar 12 horas.



Figura 50. Preparación del prototipo a alta temperatura. A) Anillo con deposición de resina sobre plano $\lambda/10$, B) horno de para temperatura.

El proceso de extracción resulto bastante laborioso a comparación de otras muestras, un inconveniente para procesos en masa, y al ver que la capa de protección del plano se adhirió a la resina, se puede deducir que el proceso no es apto a trabajar a temperaturas mayores al ambiente.



Figura 51. Superficie del prototipo a temperatura mayor al ambiente.

El resultado de la superficie resulto especular, como se observa en la figura 51. Sin embargo, parte de la película protectora del master se impregno en la resina por lo que las imágenes reflejadas toman otra tonalidad. Además, la película se pegó con dobleces, lo que afectaría la calidad de fabricación.

7 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los experimentos realizados a lo largo de este proyecto son variados y sobre la marcha algunas observaciones previas fueron de ayuda para corregir el rumbo del experimento. Sin embargo, el principal interés es el rendimiento de los espejos de fibra de carbono reforzados, por lo que en concordancia con la ISO 10110 y los criterios de imagen del Capítulo 3, se evaluaron adecuadamente los resultados de cada etapa del proyecto.

7.1 INTERFEROMETRÍA Y FORMA

Uno de los factores a evaluar es la replicación los cuales son explicados en esta sección, que tanto se mantiene la relación entre la forma del master y la réplica. Por lo que los resultados se validaron con un interferómetro de Frizeau marca Zygo Verifire que se muestra en la figura 52, cuya incertidumbre es $\pm \lambda/10$ pues es la calidad óptica de la referencia dentro del interferómetro por lo que representa la desviación del camino óptico.

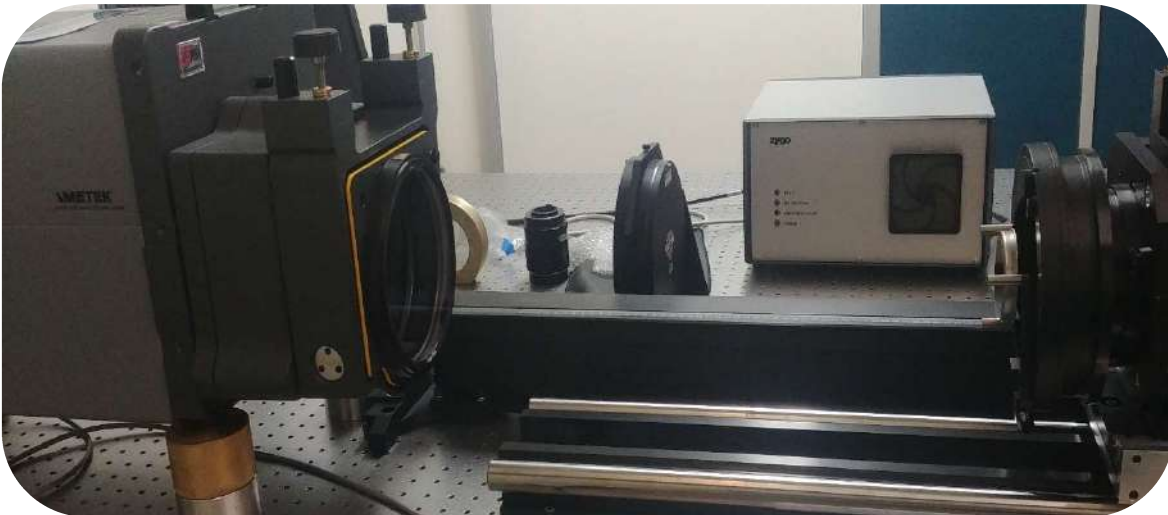


Figura 52. Interferómetro de Frizeau Zigo Verifire, analizando la superficie de un prototipo

Una vez encendido el interferómetro, se procedió a medir la forma del prototipo con poca resina (8ml), con canales de escurrimiento, con sujeción por cinta, replica con temperatura y el master de vidrio flotado los resultados se presentan en las figuras 53-57.

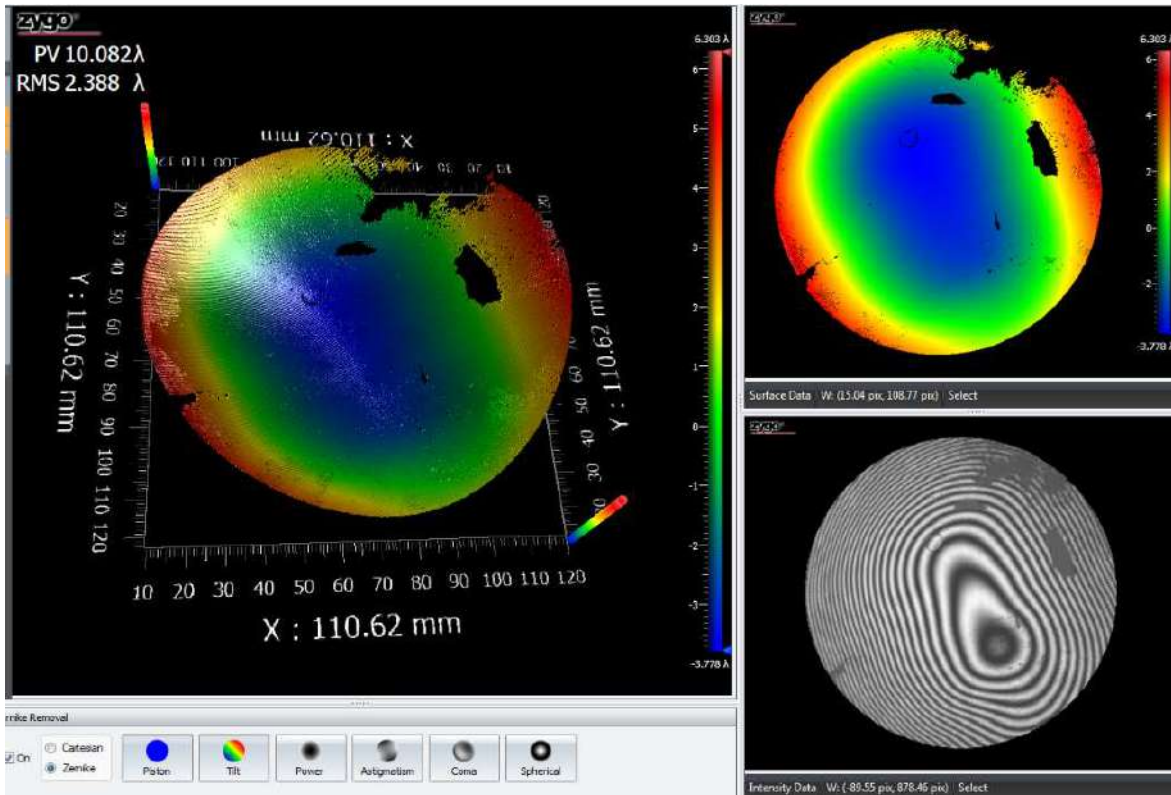


Figura 53. Medición del máster de vidrio flotado

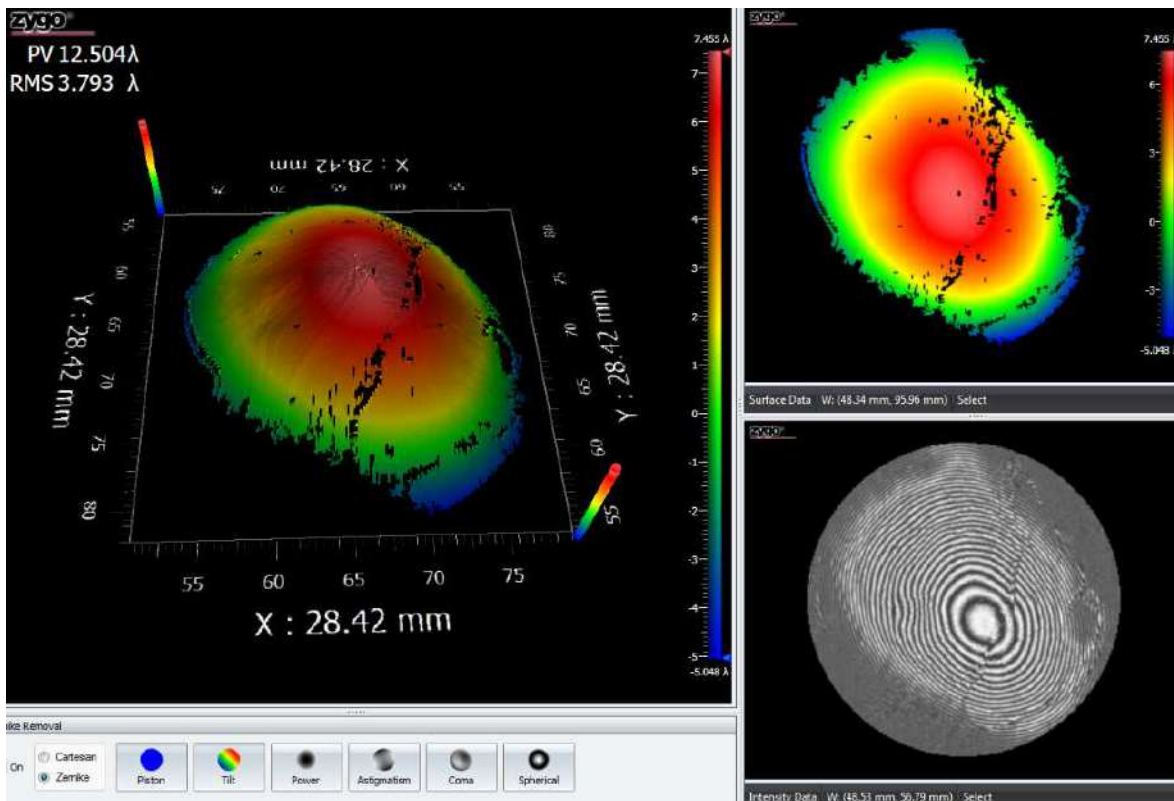


Figura 54. Medición de la réplica con sujeción de cinta

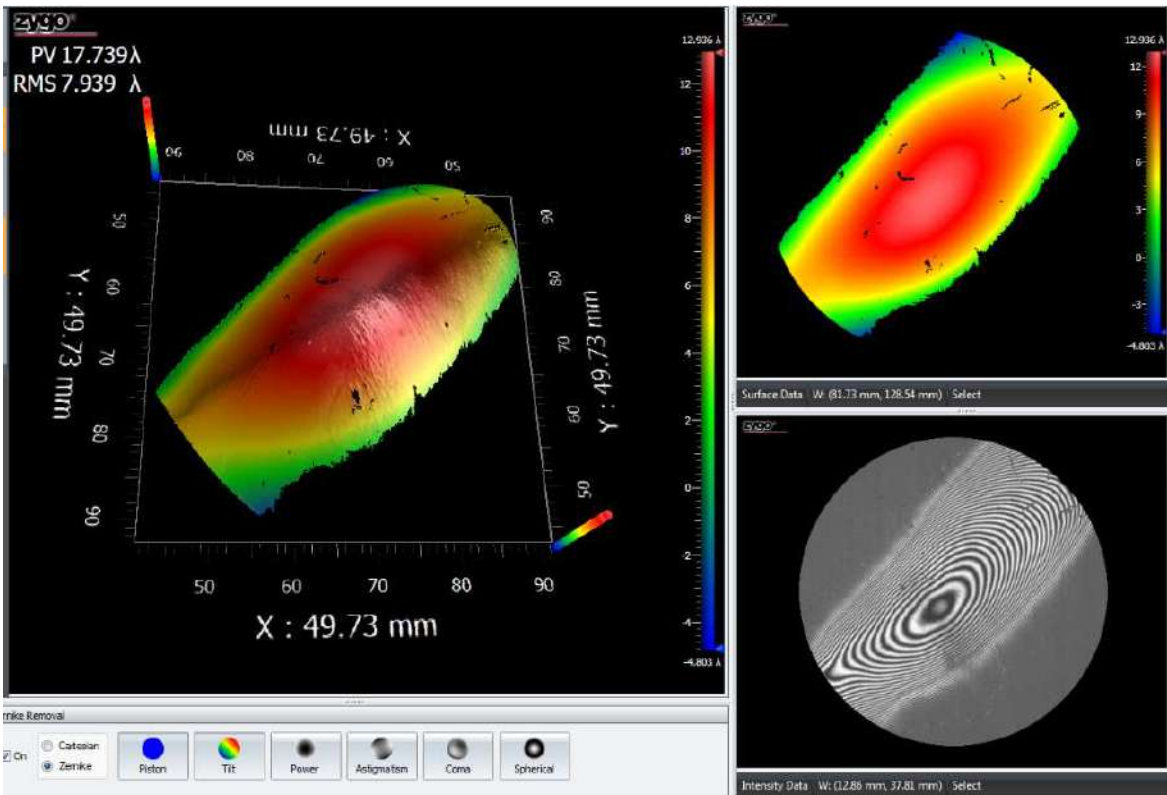


Figura 55. Medición de la réplica con canales

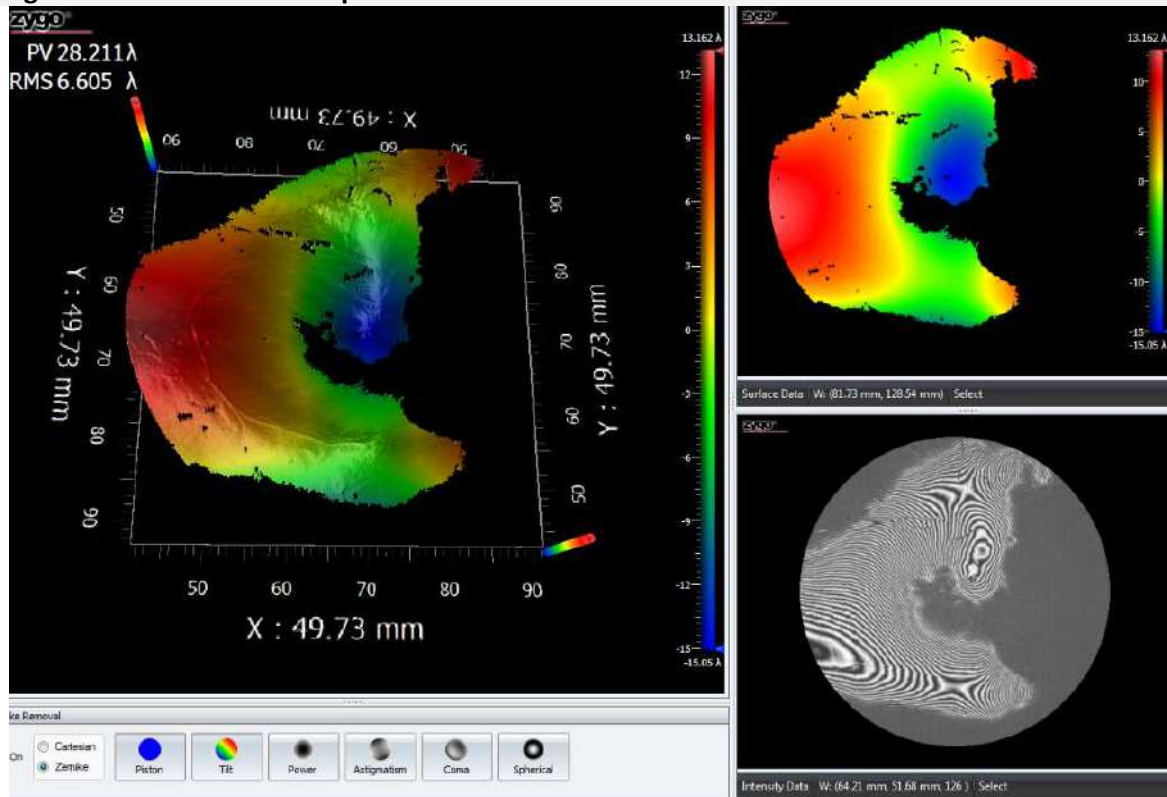


Figura 56. Medición de la réplica de 8ml

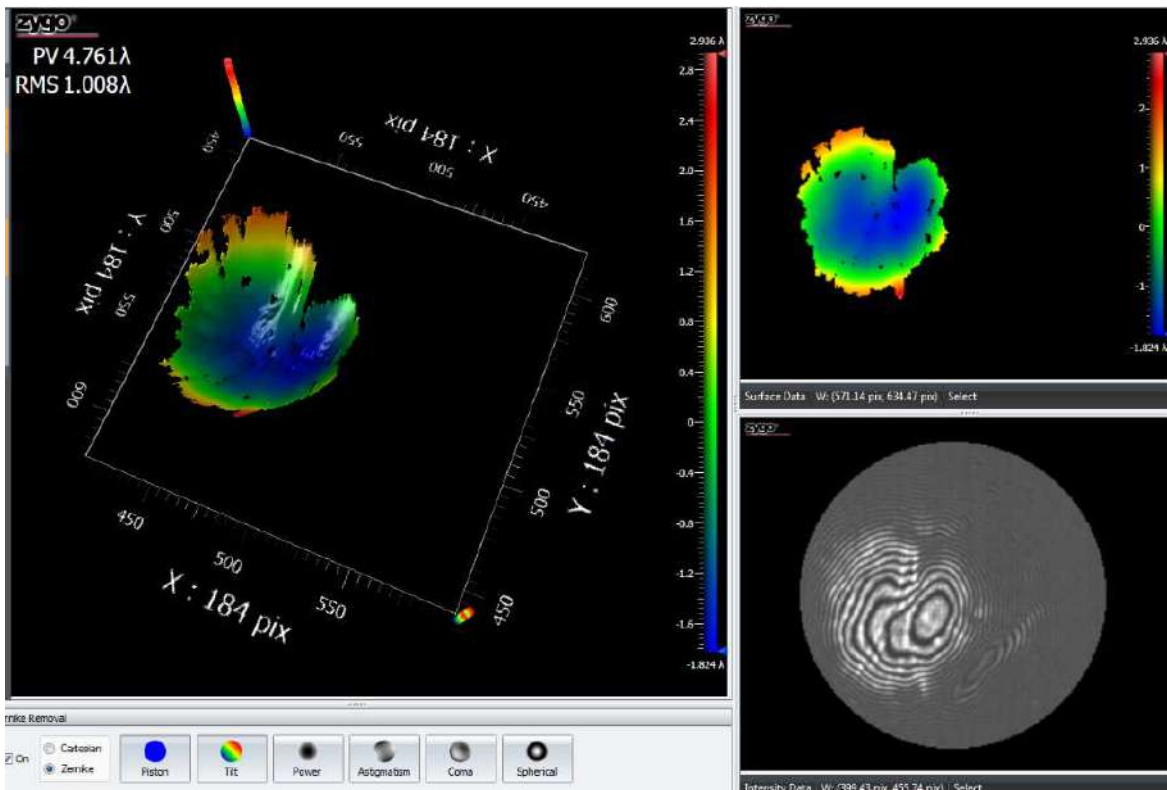


Figura 57. Medición de la réplica a temperatura

Las informaciones concentradas de los criterios a analizar se pueden revisar en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de valores cuantitativos de forma de los candidatos.

Espejo	PV ($\lambda \pm \lambda/10$)	RMS ($\lambda \pm \lambda/10$)	Diferencia PV %	Diferencia RMS %
Vidrio Flotado	10.08	2.388	No aplica	No aplica
Replica de Edmunds(temperatura)	4.761	1.008	No aplica	No aplica
Replica vidrio con cinta	12.504	3.793	24.05	58.83
Replica vidrio con canal	17.739	7.939	75.98	290.24
Replica vidrio (8ml)	28.211	6.605	179.87	117.75

En primera instancia, la información de la Tabla 3 da de hecho que no hay una replicación de forma con relación 1:1. Por el otro lado, es importante notar que en el caso de la replicación con el proceso de temperatura, la relación PV y la RMS son las más bajas pero hay que notar que la forma detectada por el interferómetro es la película que se le pego en la sección 6.5 lo que se muestra en la figura 57, esto infiere que el proceso a alta temperatura que todavía requiere de una investigación adicional.

En superficie resultante de aplicar 8ml de resina, mostro una deformación de prácticamente del 180%, bastante alejada del máster. Además, considerando los efectos de flexión del compuesto de fibra de carbono, pues tiene zonas tanto cóncavas como convexas, como se observa en la figura 56. Dichas inestabilidades pueden estar relacionadas con el hecho de tener menos material. Sin embargo, la mayor parte de la superficie cerca del centro y pierde continuidad. Además, al considerar la diferencia de la RMS del 118% se puede decir que el proceso no respetará la calidad del máster aun cuando mejor.

Por el otro lado, los espejo con una mejor razón de replicación, que se mostraron en la Figura 54, que corresponde al sistema de sujeción con cinta al tener una diferencia de PV del 24% y de RMS del 59%. Esta diferencia está muy lejos del rango de la incertidumbre del instrumento, pero deben estar relacionados con los efectos de flexión del material. Además, la RMS es alta por las pequeñas imperfecciones que el interferómetro marco como zonas negras.

También uno de los resultados interesantes es de la figura 55, el proceso de replicación con canales, aunque su diferencia PV es del 76%, es claro que a comparación del master de la Figura 53, resultó en la forma negativa que se deseaba y tanto la distancia PV como la RMS se ven afectadas por una línea de deformación intermedia, que es un producto del proceso de desmoldeo que se deberá continuar desarrollándose.

En cualquier caso, tanto el resultado con sistema de sujeción con cinta como la aplicación de canales en el anillo presentan formas que ya solo dependen de componentes mecánicos, El siguiente paso es el desarrollo un sistema de desmoldeo mecánico, cuyos esfuerzos no se reflejen en la superficie. Además, al considerar que su función es actuar como membrana deformable, las correcciones de forma serían mínimas.

7.2 RUGOSIDAD

La rugosidad, que se explica en el capítulo 3, juega un gran papel en la calidad del acabado y dado el método de fabricación por replicación empleado, es importante conservar la misma calidad del máster. El rendimiento del espejo se mide en base a que tanta energía es capaz de reflejar sin dispersarla, y eso depende de las frecuencias espaciales en la geometría de la superficie y por tanto su rugosidad.

Medir la rugosidad consiste en ocupar el mismo principio de interferometría de Frizeau, se implementó un colimador tipo Schwarzschild para enfocar el área de inspección. El ensamble se calibra con un patrón (USAF Resolution target, Edmund Optics) a 1 mm dejando una escala de 5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. Después se selecciona un área de inspección de 1 mm de diámetro (ISO 10110 especifica de 0.5 mm a 2 mm de diámetro). El arreglo se puede observar en la figura 58, para verificar su funcionamiento se midió una superficie de carburo de tungsteno de con relación PV de 9.2 Armstrongs y RMS de 0.9 Armstrongs Figura 59, el ensamble en general tiene una incertidumbre de $\pm 5 \text{ nm}$.



Figura 58. Interferómetro con objetivo de 5" esférico convergiendo a un colimador Schwarzschild, que enfoca a un punto en la superficie a observar.

Para que el resultado no se vea afectado por los errores del sistema con el interferómetro se tomaron un conjunto de 20 mediciones, de las cuales se estimó los coeficientes de Zernike propios del

arreglados. En las mediciones posteriores, este perfil de error se removió, para tener la mejor aproximación de la superficie.

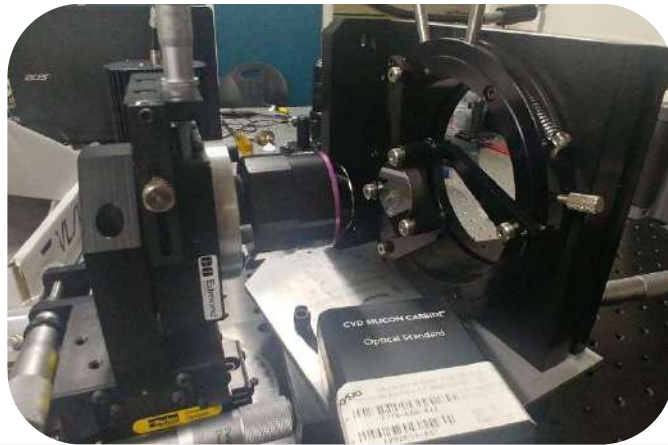


Figura 59. Medición de rugosidad del plano de carburo de silicio

Primero se midió la rugosidad del master, los prototipos presentados son producto de dos masters distintos, el primero es un plano $\lambda/10$ de Edmund Optics figura 59, y el segundo es de vidrio flotado en la figura 60.

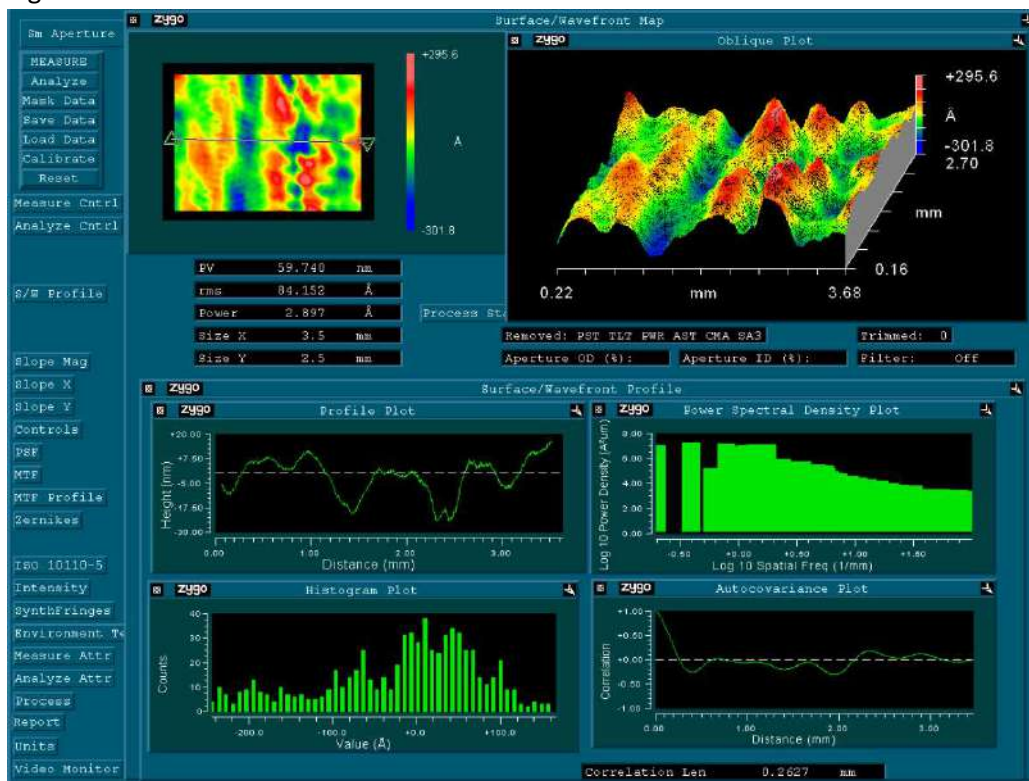


Figura 60. Medición de rugosidad del plano $\lambda/10$ de Edmund Optics

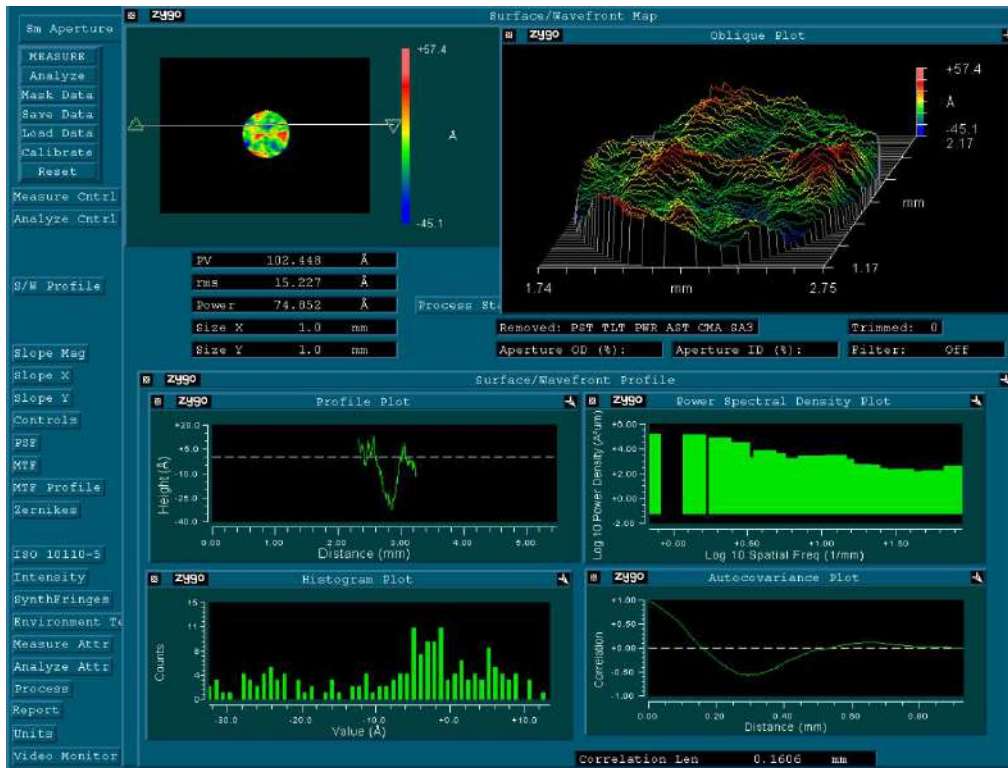


Figura 61. Medición de rugosidad del master de vidrio flotado

También se examinó la rugosidad de las réplicas de vidrio flotado tanto por sujeción con cinta Figura 62, el anillo con canales de escurrimiento Figura 63, y también con poca resina (8 ml), Figura 64. Además, se midió la rugosidad de la réplica del plano $\lambda/10$ de Edmund Optics con temperatura como se muestra en la Figura 65.

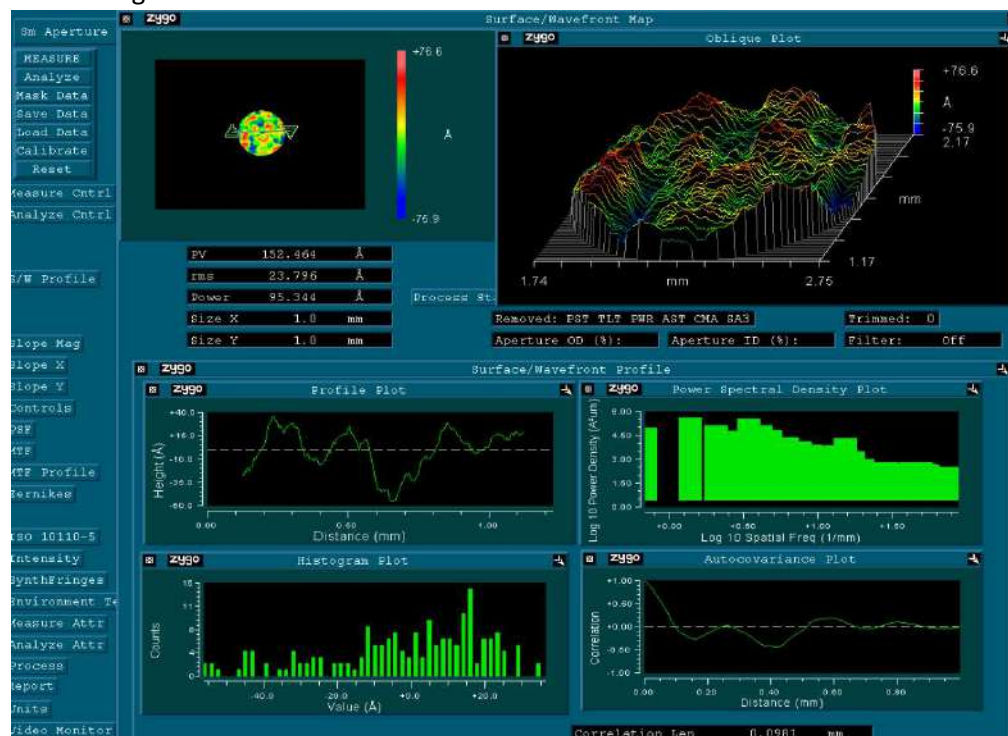


Figura 62. Medición de rugosidad de réplica de vidrio flotado con sujeción con cinta

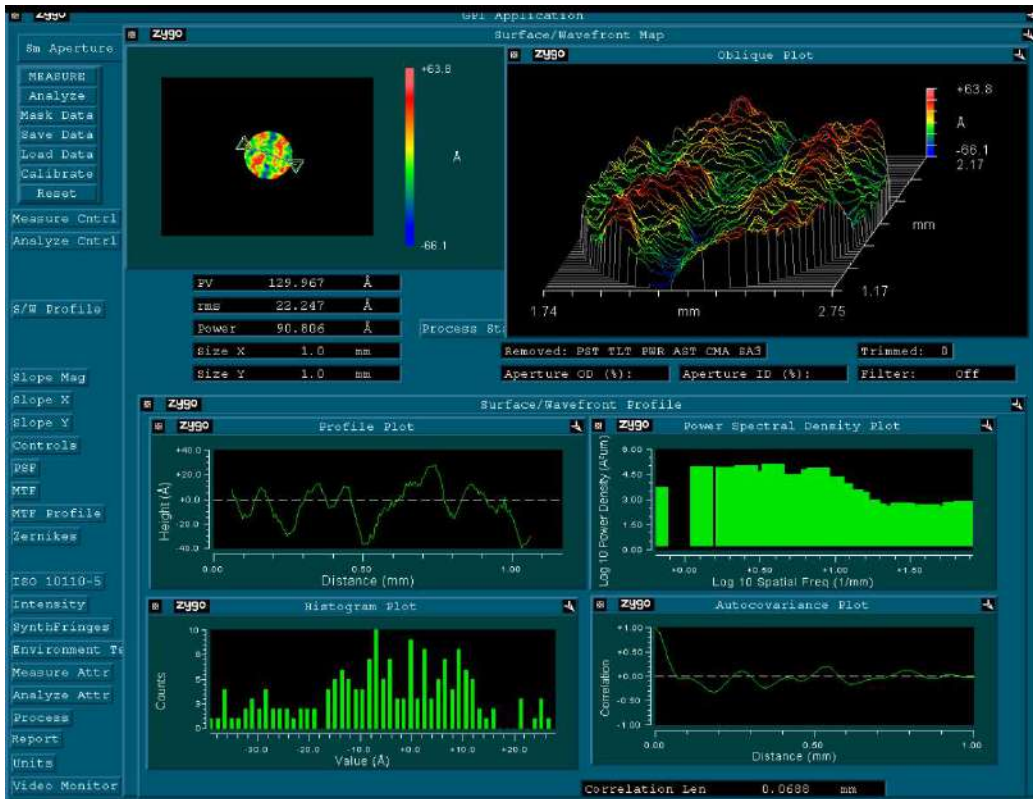


Figura 63. Medición de rugosidad de réplica de vidrio flotado con canales

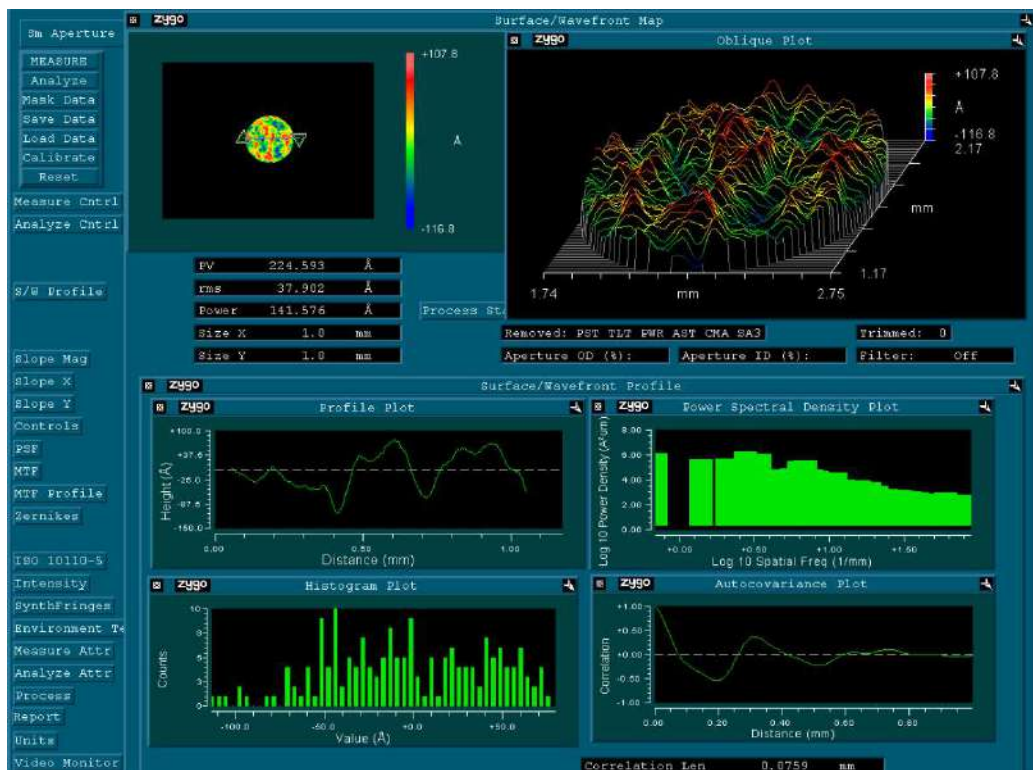


Figura 64. Medición de rugosidad de réplica de vidrio flotado con poca resina 8 ml

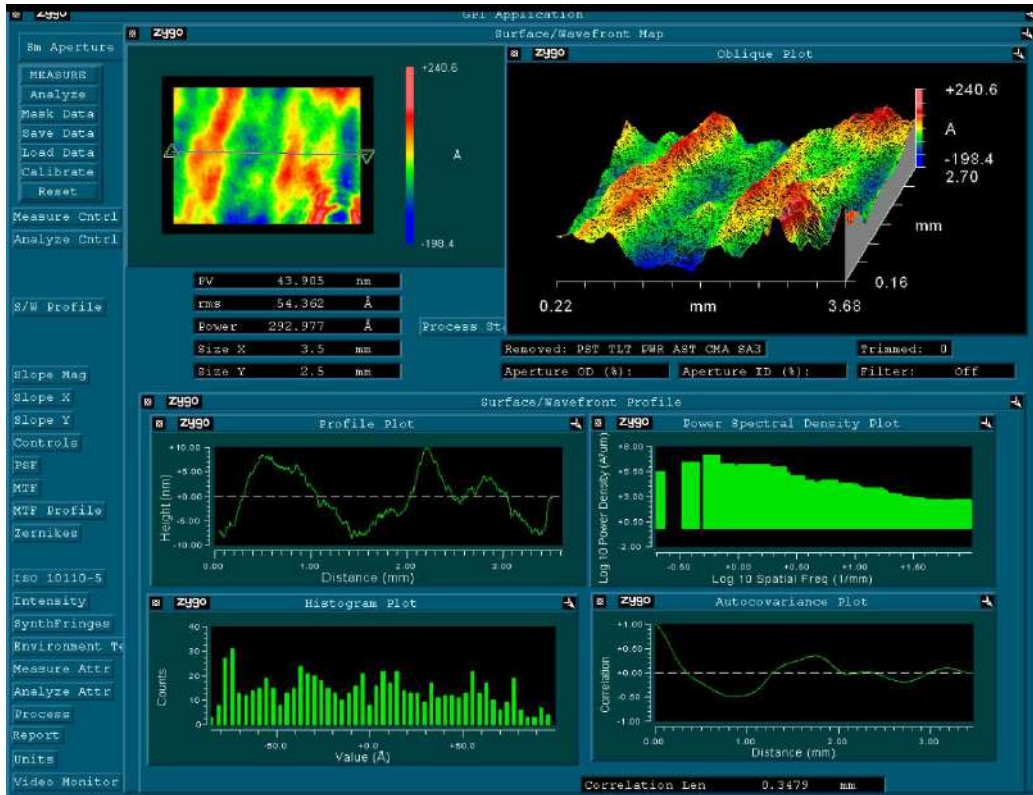


Figura 65. Medición de rugosidad de réplica de plano $\lambda/10$ de Edmund Optics

Cuantitativamente los datos relevantes son, la relación PV y la RMS que se concentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de valores cuantitativos de rugosidad de los candidatos.

Espejo	PV ($\pm 5 \text{ nm}$)	RMS ($\pm 5 \text{ nm}$)	Diferencia PV %	Diferencia RMS %
Plano Edmunds	59.74	8.41	No aplica	No aplica
Vidrio Flotado	10.24	1.52	No aplica	No aplica
Replica de Edmunds(temperatura)	43.91	5.43	26.5	35.4
Replica vidrio con cinta	15.25	2.37	48.9	55.9
Replica vidrio con canal	12.99	2.22	26.8	46.1
Replica vidrio (8ml)	22.45	3.79	119.2	149.3

En general, todas las muestras están dentro del rango comercial de $\frac{\lambda}{10} = 63.3 \text{ nm}$ para la longitud de onda del interferómetro (633 nm), sigue estando dentro del rango de incertidumbre del instrumento, por lo que indica que la rugosidad resultante es fiable bajo diferentes condiciones. El principal aspecto a verificar es la capacidad de replicación del proceso en el cual no todas las muestras mantuvieron la misma relación de replicación.

Los porcentajes de error aparentan ser altos, sin embargo, hay que considerar que, son en escala nanométrica. Las diferencias de camino óptico son relevantes en el tipo de aplicación pues depende de la precisión del arreglo óptico del que forman parte. Por un lado, la variable que el proceso respeta más es la relación PV, pero la RMS a pesar de mostrar un gran error, en términos físicos la mayor RMS difiere por 3 nm y a menor por 0.7 nm lo que ya no es distinguible por la incertidumbre, físicamente será muy parecido al máster.

En el caso del espejo replicado del plano $\lambda /10$ de Edmunds Optics, es importante mencionar que el patrón de la superficie que se muestra en la figura 65. no es fiber print sino que el proceso de replicado es tan fiel que respeta el patrón de pulido del master, generado por pulido magneto hidrodinámico, pues el mismo patrón se observa en la figura 60 correspondiente al master. Incluso se puede deducir que por el decremento en la relación PV y RMS, alguna propiedad viscoelástica de la resina mejoro la rugosidad, esto deja otra línea en la que se puede seguir investigando.

Además, en el caso de la replicación con alta temperatura, su error PV de 26.5% es equiparable con el proceso a temperatura ambiente cuando se le aplican canales para su escurrimiento, al igual que la afinidad de la RMS con el master solo difiere por un 10.6% de eficiencia entre los dos procesos. Por lo que se puede deducir que el proceso a alta temperatura es equiparable al proceso a temperatura ambiente. Sin embargo, el hecho que exista una sospecha que el desmoldante no opere a altas temperaturas, indica que se requiere una investigación subsecuente si se quiere tener un curado más rápido. Por el momento se puede afirmar que el procedimiento es válido para replicar a temperatura ambiente.

7.3 PROCESO FINAL

Si consideramos que en los dos criterios (rugosidad y forma), se obtuvieron resultados aceptables que varían un 26% para la rugosidad, y hasta un 76% en forma. Con las muestras más cercanas se refieren los procesos con sujeción con cinta, así como el empleo de canales de escurrimientos, aunque la forma es mejor conservada con la sujeción de cinta normal, es importante destacar que la muestra que tienen los canales, solamente se ve afectada por una flexión del proceso de desmoldeo por lo que, si consideramos su mejora en la rugosidad, este es el mejor candidato que se puede presentar en esta investigación.

Dado el análisis de las superficies resultantes que se obtuvieron, antes de poder dar las conclusiones, es apropiado dar una descripción explícita del procedimiento con los mejores resultados.

- Se cortó la fibra bidireccional (F2) al tamaño del anillo metálico(A3).
- Con un disco de devastado se tallaron dos canales opuestos en el anillo(A3C)
- Se limpió la superficie a replicar de vidrio de ventana con agua, jabón y alcohol con acetona.
- Se cortó película protectora para el área a replicar y se aplicó una capa de desmoldante (D8)
- Se preparó la resina MTP XX (R5) a una porción de 10 *gr* de resina y 5 *gr* de endurecedor.
- Se colocó la resina en un agitador magnético durante 5 minutos a una velocidad 7 de 10.
- Se colocó la resina dentro de la cámara de degaseo, una vez alcanzado el máximo vacío se dejó trabajar la bomba durante 5 minutos y se degaseo 5 minutos con las válvulas cerradas
- Se pre-impregnó la Fibra con la resina (PR5).
- Se colocó y fijó con cinta el anillo metálico (A3) sobre el máster.
- Se colocó una fina capa de desmoldante Desmoldyn (D8D) de manera indirecta.
- Se vertió la resina (R5) en el anillo (A3C)
- Se colocó de nuevo en la cámara de vacío durante 5 minutos
- Se retiró y se colocó la fibra (F2PR5).
- Se dejó curar a temperatura ambiente durante 2 días.

7.4 ALUMINIZADO

Ya fuera del tiempo de análisis, y por cuestiones de disponibilidad del equipo, se logró aluminizar los cuatro mejores candidatos, los cuales se observan en la figura 64.

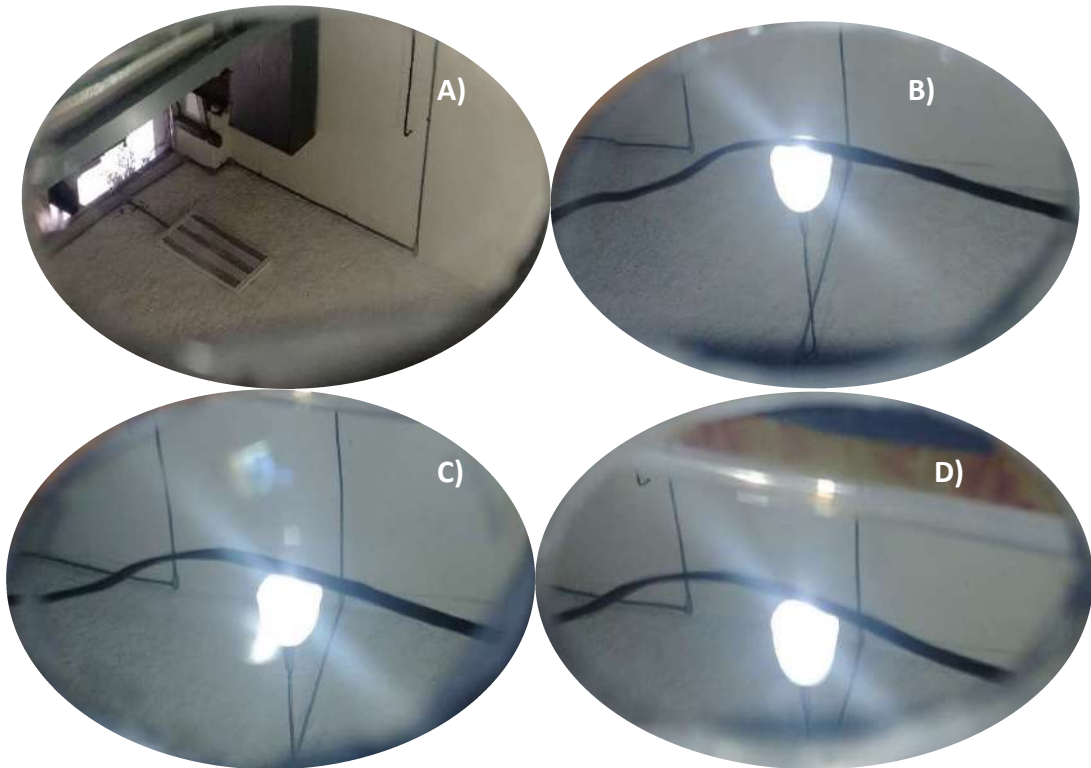


Figura 64. Espejos de fibra de carbono aluminizados, A) Espejo con la variación de canales B) Espejo con sujeción con cinta C) Espejo con poca resina (8ml) D) Espejo de replicación a alta temperatura.

En general el proceso de aluminizado no mostró alteraciones significativas en la resina y aunque aún hay imperfecciones, como todo proceso se tiene que caracterizar interacción de la resina con las partículas de aluminio, quedando como perspectiva para trabajo futuro.

De cualquier forma, esto indica que los espejos son aptos para deposición de películas reflectantes por evaporación sin comprometer su fabricación.

8 CONCLUSIÓN

El punto de partida de esta investigación comenzó bajo la premisa de desarrollar una técnica paralela de fabricación de superficies reflectivas de calidad óptica, para aplicaciones en donde se requieran membranas, rígidas y semi-rígidas, los métodos de replicación y en lo particular los compuestos de fibra de carbono reforzados fueron los candidatos seleccionados por su alta reducción de costos.

En primer lugar, es importante destacar que el proceso de replicación de superficies de calidad óptica son complicados por lo que la fabricación fue caracterizada a lo largo del Capítulo 5, en donde se logró la mejora del proceso al eliminar el fiber-print en donde, la técnica de contención es la responsable de evitar la aparición del fiber-print, este fenómeno debe estar relacionado con las propiedades de la resina, un estudio químico y de viscosidad más afondo lo explicaría y como explotarlo.

Por el otro lado también se estudió otros problemas intrínsecos del procedimiento a lo largo del Capítulo 6, como las burbujas, el escurrimiento, y el degradado de los espejos, el efecto de estos estudios se puede observar en el Capítulo 7 en donde, se presenta de manera cuantitativa donde el proceso de fabricación tiene de un 24 % de error con respecto a la forma del máster en PV, y en rugosidad una mejora del 26% la relación PV.

En el caso de la forma, es importante tomar en cuenta que parte del objetivo de la tesis es presentar una membrana deformable, por lo que un 24 % de error en la forma equivalente a 2.5λ , aun está por debajo de la máxima deformación que permiten los sistemas de óptica adaptativa que superan las 8.4λ [14]. Lo que pude concluir que en efecto se tiene una membrana deformable en el rango de la aplicación de la óptica adaptativa, sin embargo, sus características mecánicas requieren un segundo proceso de investigación.

En el aspecto de la rugosidad, todos los procesos superaron los estándares de la óptica comercial por lo que indica, que el procedimiento propuesto cumple los criterios de calidad aun sin procesos de pulido y es confiable bajo diferentes procesos, y al examinar la replicación a alta temperatura se encuentra que no es muy lejana a la capacidad de replicación a temperatura ambiente, lo cual también es relevante porque disminuye costos de equipo como de costo energético.

Se elimino el fiber-print desde el proceso de replicación representa una gran mejora puesto que ya no se requiere el empleo de agentes de pulido posteriores pues, el empleo de los métodos tradicionales de fabricación que solo serían redundantes, ahorrando horas de pulido y el empleo de maquinaria más compleja. Además, no hay antecedente de este método de eliminación por lo que presenta una aportación de vanguardia en este tema.

Por el otro lado, el proceso de deposición de la película reflectante por evaporación no alteró la forma de los espejos, y aunque falta un análisis más preciso de sus efectos, esto califica el proceso como apto para la deposición de la capa reflectante sin dañar el resto de sus mejoras.

En conclusión, la tesis en efecto presenta una mejora a los procesos de replicación en espejos de fibra de carbono reforzado, eliminando el fenómeno de fiber-print, ofreciendo un método confiable para replicar la rugosidad y forma cumpliendo los criterios de calidad, y aunque falta un estudio completo de las propiedades mecánicas, también presenta una membrana deformable en el orden de la óptica adaptativa, satisfaciendo los objetivos de la tesis.

Bibliografía

- [1] T. (Ed.). (2010). Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2010. Retrieved March 30, 2018, from https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/press.html
- [2] Hart, M. (2012). Full. Development of robust light-weight deformable mirrors in carbon fiber. Retrieved from https://amostech.com/TechnicalPapers/2012/Adaptive_Optics_Imaging/HART.pdf
- [3] Ammons, S. M., Hart, M., Coughenour, B., Romeo, R., Martin, R., & Rademacher, M. (2011). Demonstration of 17 cm robust carbon fiber deformable mirror for adaptive optics. *Astronomical Adaptive Optics Systems and Applications IV*. doi:10.1117/12.894186
- [4] Coughenour, B., Ammons, S. M., Hart, M., Romeo, R., Martin, R., Rademacher, M., & Bailey, H. (2010). Demonstration of a robust curved carbon fiber reinforced polymer deformable mirror with low surface error. *Adaptive Optics Systems II*. doi:10.1117/12.856326
- [5] Doel, P. (2007). Prototype carbon fiber composite deformable mirror. *Optical Engineering*, 46(9), 094003. doi:10.1117/1.2779337
- [6] Harvey, J. E. (2012). Total integrated scatter from surfaces with arbitrary roughness, correlation widths, and incident angles. *Optical Engineering*, 51(1), 013402. doi:10.1117/1.oe.51.1.013402
- [7] Harvey, J. E. (2014). Integrating optical fabrication and metrology into the optical design process. *International Optical Design Conference 2014*. doi:10.1117/12.2075363
- [8] Hochhalter, J. D., Maji, A. K., & Reicher, D. W. (2004). Process Induced Errors in Replicated Carbon Fiber Reinforced Polymer Mirrors. *Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments*. doi:10.1061/40722(153)120
- [9] Kendrew, S. (2006). Development of a carbon fiber composite active mirror: design and testing. *Optical Engineering*, 45(3), 033401. doi:10.1117/1.2179771
- [10] Kendrew, S., Doel, P., Brooks, D., King, A. M., Dorn, C., Dwan, R. M., . . . Evans, G. (2006). Carbon fibre composite deformable mirrors: developments at UCL. *Advances in Adaptive Optics II*. doi:10.1117/12.669808
- [11] Schröder, S., Duparré, A., Coriand, L., Tünnermann, A., Penalver, D. H., & Harvey, J. E. (2011). Modeling of light scattering in different regimes of surface roughness. *Optics Express*, 19(10), 9820. doi:10.1364/oe.19.009820
- [12] Thompson, S. J., Brooks, D., & Doel, A. P. (2008). A nickel-carbon-fibre composite for large adaptive mirrors: fabrication methods and properties. *Optics Express*, 16(2), 1321. doi:10.1364/oe.16.001321
- [13] Thompson, S. J., Doel, P., Brooks, D., & Strangwood, M. (2010). A 1-metre Ni coated CFRP demonstrator for large deformable mirrors. *1st AO4ELT conference - Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes*. doi:10.1051/ao4elt/201006007
- [14] Wilcox, C. C., Jungwirth, M. E., Wick, D. V., Baker, M. S., Hobart, C. G., Romeo, R. C., & Martin, R. N. (2012). Closed-loop performance of an actuated deformable carbon fiber reinforced polymer mirror. *Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications IV*. doi:10.1117/12.920193
- [15] Wilcox, C., Fernandez, B., Bagnasco, J., Martinez, T., Romeo, R., & Agrawal, B. (2015). The meter-class carbon fiber reinforced polymer mirror and segmented mirror telescope at the Naval Postgraduate School. *Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVII*. doi:10.1117/12.2082628
- [16] Deng, C., Jiang, J., Liu, F., Fang, L., Wang, J., Li, D., & Wu, J. (2015). Effects of electrophoretically deposited graphene oxide coatings on interfacial properties of carbon fiber composite. *Journal of Materials Science*, 50(17), 5886-5892. doi:10.1007/s10853-015-9138-2
- [17] Gao, W., & Huang, R. (2011). Effect of surface roughness on adhesion of graphene membranes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(45), 452001. doi:10.1088/0022-3727/44/45/452001

- [18] Xiong, L., & Gao, Y. (2013). Surface roughness and size effects on the morphology of graphene on a substrate. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 54, 78-85. doi:10.1016/j.physe.2013.06.00
- [19] Zhang, Z., & Li, T. (2011). Determining graphene adhesion via substrate-regulated morphology of graphene. *Journal of Applied Physics*, 110(8), 083526. doi:10.1063/1.3656720
- [20] Choi, N., & Harvey, J. E. (2013). Numerical validation of the generalized Harvey–Shack surface scatter theory. *Optical Engineering*, 52(11), 115103. doi:10.1117/1.oe.52.11.115103
- [21] Harvey, J. E. (2010). *Generalized Surface Scatter Theory for Moderately Rough Surfaces*. Lecture presented at College of Optics and Photonics, Stockholm.
- [22] Nayar, S., Ramamoorthi, R., & Hanrahan, P. (2009). *Basic Principles of Surface Reflectance*. Lecture.
- [23] Raimondi, L., & Spiga, D. (2010). Self-consistent computation of x-ray mirror point spread functions from surface profile and roughness. *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray*. doi:10.1117/12.857155
- [24] Raimondi, L., & Spiga, D. (2014). Mirrors for X-ray telescopes: Fresnel diffraction-based computation of point spread functions from metrology. *Astronomy & Astrophysics*, 573. doi:10.1051/0004-6361/201424907
- [25] Spiga, D., & Raimondi, L. (2011). *A novel method for computing the Point Spread Function from mirror metrology data*. Lecture presented at X-ray astrophysics up to 511keV, Ferrara.
- [26] Spiga, D., & Raimondi, L. (2014). X-ray optical systems: From metrology to Point Spread Function. *Advances in Computational Methods for X-Ray Optics III*. doi:10.1117/12.2061657
- [27] Duparré, A., Ferre-Borrull, J., Gliech, S., Notni, G., Steinert, J., & Bennett, J. M. (2002). Surface characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components. *Applied Optics*, 41(1), 154. doi:10.1364/ao.41.000154
- [28] Wan, J., Li, B., & Li, X. (2015). The testing of the aspheric mirror high-frequency band error. *2015 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Lasers and Applications*. doi:10.1117/12.2193481
- [29] Yu, Y., & Li, G. (2002). Power spectral density (PSD) in stitching interferometer. *Surface Scattering and Diffraction for Advanced Metrology II*. doi:10.1117/12.451843
- [30] Born, M., & Wolf, E. (1987). *Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Oxford: Pergamon Press.
- [31] Li, S., & Dai, Y. (2017). *Large and middle-scale aperture aspheric surfaces lapping, polishing and measurement*. Singapore: Wiley.
- [32] Maradudin, A. A. (2011). *Light scattering and nanoscale surface roughness*. New York: Springer.
- [33] Stover, J. C. (2016). *Optical scattering: Measurement and analysis*. Place of publication not identified: Spie Press.
- [34] Suiter, H. R. (2008). *Star testing astronomical telescopes: A manual for optical evaluation and adjustment*. Richmond, Va: Willmann-Bell.
- [35] Bennett, J. M., & Mattsson, L. (1999). *Introduction to surface roughness and scattering*. Washington, D.C.: Optical Society of America.
- [36] Church, E. L., & Takacs, P. Z. (1984). Survey Of The Finish Characteristics Of Machined Optical Surfaces. *Production Aspects of Single Point Machined Optics*. doi:10.1117/12.944965
- [37] Fest, E. C. (2013). *Stray light analysis and control*. Bellingham, WA: SPIE Press.
- [38] ISO 10110 Standard. (n.d.). *Field Guide to Optomechanical Design and Analysis*. doi:10.1117/3.934930.ch92
- [39] Noll, R. J., & Glenn, P. (1982). Mirror surface autocovariance functions and their associated visible scattering. *Applied Optics*, 21(10), 1824. doi:10.1364/ao.21.001824
- [40] Sohn, E., Ruiz, E., Salas, L., Luna, E., & Herrera, J. (2013). HyDRa: Polishing with a vortex. *Applied Optics*, 52(25), 6146. doi:10.1364/ao.52.006146

- [41] Tayabaly, K., Spiga, D., Canestrari, R., Bonnoli, G., Lavagna, M., & Pareschi, G. (2015). Roughness tolerances for Cherenkov telescope mirrors. *Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy VII*. doi:10.1117/12.2187025.
- [42] Harvey, J. E., Moran, E. C., & Zmek, W. P. (1988). Transfer Function Characterization Of Grazing Incidence Optical Systems. *Grazing Incidence Optics for Astronomical and Laboratory Applications*. doi:10.1117/12.942159
- [43] Bos, A. V. (1999). Rayleigh wave-front criterion: Comment. *Journal of the Optical Society of America A*, 16(9), 2307. doi:10.1364/josaa.16.002307
- [44] Walsh, C. J., Leistner, A. J., & Oreb, B. F. (1999). Power spectral density analysis of optical substrates for gravitational-wave interferometry. *Applied Optics*, 38(22), 4790. doi:10.1364/ao.38.004790
- [45] Hochhalter, J. D. (2005). Replicated mirrors using carbon fiber reinforced polymers (Unpublished doctoral dissertation).
- [46] Roberts, J. L., Perrin, M. D., Marchis, F., Sivaramakrishnan, A., Makidon, R. B., Christou, J. C., . . . Troy, M. (2004). Is that really your Strehl ratio? *Advancements in Adaptive Optics*. doi:10.1117/12.549115
- [47] Aikens, D., Degroote, J. E., & Youngworth, R. N. (2008). Specification and Control of Mid-Spatial Frequency Wavefront Errors in Optical Systems. *Frontiers in Optics 2008/Laser Science XXIV/Plasmonics and Metamaterials/Optical Fabrication and Testing*. doi:10.1364/oft.2008.otua1
- [48] N.A (2013) *LARGE OPTICS: Mid-spatial-frequency errors: The hidden culprit of poor optical performance*. Retrieved April 09, 2018, from <https://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-49/issue-08/features/large-optics-mid-spatial-frequency-errors-the-hidden-culprit-of-poor-optical-performance.html>
- [49] Álvarez, L., Chapa, O., Cuevas S. (2011). Diseño de las Pruebas Ópticas del Prototipo del Colimador, Instituto de Astronomía, UNAM, Recuperado de Archivo PDF
- [50] Kamiya, T., Utsunomiya, S., Komatsu, K., & Shimizu, R. (2011). Full text. In The 18th International Conference on Composite Materials. Retrieved from <http://www.iom3.org>
- [51] Pfisterer, R. N. (2012). Converting surface roughness data into PSD and BSDF. *Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces III*. doi:10.1117/12.931671
- [52] Strutt, J. W. (2009). *Scientific Papers*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [53] Maréchal, A. (1947). *Etude des effets combine's de la diffraction et des aberrations géométriques sur l'image d'un point lumineux* (Doctoral dissertation, Université de Paris, 1947). Paris: Ed. de la Revue d'Optique théorique et instrumentale.