



CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.

Detección de distorsiones en vidrios de seguridad por pruebas ópticas

Tesis que como requisito para obtener el grado de Maestra en

Optomecatrónica presenta:

Ing. Elvia Alejandra Moreno Matuz

Asesores:

Dr. Daniel Malacara Doblado

Dr. Rafael Espinosa Luna

“Versión definitiva. Incluye cambios sugeridos por revisores de tesis”

León, Gto., a 19 de Junio del 2013

Agradecimientos

La realización de esta tesis ha sido posible gracias a la colaboración de varias personas y la industria Vitro. Estoy especialmente agradecida con el Dr. Daniel Malacara Doblado y con el Dr. Rafael Espinosa Luna, asesores de esta tesis, por sus invaluable colaboraciones en la dirección de este trabajo; a la empresa Vitro, por el planteamiento del proyecto, y su apoyo económico en la estancia en Monterrey; sin cuyos apoyos no hubiera sido posible la realización de esta tesis.

Por otra parte, deseo manifestar mis agradecimientos al Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. por el apoyo que me brindó como estudiante de maestría; al Dr. Daniel Malacara Hernández por su amable ayuda con información y bibliografías; al Dr. Armando Gómez Vieyra por su amable colaboración de software para el análisis de las distorsiones en el vidrio laminado; a los miembros del taller óptico, por su amable ayuda en la preparación de mi material.

Esta tesis fue realizada gracias a un beca otorgada por CONACyT (No. 227530) y material adquirido por recursos del proyecto CONACyT (No. 100361), para la iluminación y distintas pruebas que se realizaron.

Resumen

La condición deseable para automovilistas es poder apreciar su entorno como si los vidrios de sus automóviles fueran inexistentes. Sin embargo, estos vidrios (fabricados bajo estrictas normas de seguridad), dependen de una serie de factores que determinan sus propiedades ópticas (índice de refracción, transmisión, reflexión y absorción). Para inspeccionar su calidad en relación a estas propiedades, se realizan distintas pruebas acorde a las respectivas normas que regulan su desempeño. Una de ellas es el estudio de las distorsiones ópticas por reflexión y transmisión. Comúnmente las industrias que trabajan el vidrio utilizan a operadores visuales para realizar este tipo de pruebas. Este procedimiento presenta desventajas como la incapacidad de diferenciar entre un parabrisas nominalmente óptimo y los ligeramente fuera de norma. En esta tesis se analiza las distorsiones en una muestra de vidrio automotriz y para ello se usa una prueba tipo Hartmann modificada y se realiza el estudio cuantitativo de las distorsiones por reflexión y transmisión en una muestra de vidrio de seguridad automotriz. Con este estudio se obtuvieron resultados cuantitativos de las distorsiones en una muestra de vidrio de seguridad automotriz teniendo como referencia un vidrio plano. Este procedimiento puede emplearse como criterio de control de calidad respecto a valores nominales en vidrios automotrices.

Índice general

Índice general	i
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 El vidrio de seguridad automotriz	2
1.3 Planteamiento del problema	3
1.4 Objetivos y alcance de la tesis	5
1.5 Organización de la tesis	6
2 PRELIMINARES TEÓRICOS	7
2.1 Fenómenos físicos asociados a las distorsiones en el vidrio de seguridad . . .	7
2.1.1 Reflexión	7
2.1.2 Transmisión	8
2.1.3 Coeficientes de reflectividad y transmitividad	10
2.2 Descripción del frente de onda	14
2.2.1 Prueba de Hartmann	15
2.2.2 Sensor de frente de onda	17
2.2.3 Referencia relativa	22
2.2.4 Programa de reconstrucción	22
2.2.5 Detector	22
3 ANÁLISIS DE LAS DISTORSIONES EN EL VIDRIO LAMINADO	24
3.1 Preparación de muestras de parabrisas automotriz	25

3.2	Descripción del arreglo de Hartmann	26
3.2.1	Arreglo de Hartmann modificado (arreglo matricial de Leds).	28
3.2.2	Localización de centroides en el Hartmanngrama	29
3.2.3	Medición de desplazamientos	29
3.3	Montaje experimental	30
3.4	Análisis para la muestra de vidrio laminado	33
3.4.1	Análisis por reflexión.	33
3.4.2	Análisis por transmisión	37
3.5	Análisis para la muestra de vidrio templado	41
3.6	Distorsiones en el vidrio de seguridad	45
3.7	Discusión de resultados	50
4	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	51
4.1	Conclusiones	51
4.2	Trabajo Futuro	52
	Referencias	53

Índice de figuras

1.1	Aberración de frente de onda $W(x^t, y^t)$ es la diferencia de camino óptico entre frente de onda real y el de referencia (esférico).	3
1.2	Principales reflexiones y refracciones en el vidrio curvo de seguridad	4
2.1	Rayo de luz reflejado.	8
2.2	Trazo de rayos en un vidrio plano.	9
2.3	Trazo de rayos en un vidrio curvo.	9
2.4	Reflexión y refracción sobre una interfaz simple	10
2.5	Reflexión y refracción sobre una interfaz múltiple.	11
2.6	Reflexión sobre una interfaz simplificada.	12
2.7	Gráfica de transmitancia del vidrio de seguridad.	13
2.8	Gráfica de absorción del vidrio de seguridad.	13
2.9	Gráfica de transmitancia del polivinil butiral.	13
2.10	Gráfica de absorción del polivinil butiral.	14
2.11	Arreglo básico de la prueba de Hartmann	16
2.12	Relación entre aberración transversal y deformación de frente de onda.	16
2.13	Integración trapezoidal	19
2.14	Cálculo del frente de onda desde cuatro puntos adyacentes más cercanos a partir del punto n, m	20
3.1	Sierra de diamante	26
3.2	Arreglo de Hartmann.	27
3.3	Arreglo bidimensional de leds.	28

3.4	Arreglo de Hartmann modificado.	28
3.5	Arreglo experimental	31
3.6	Cálculo de las aberraciones transversales (TA_x , TA_y).	32
3.7	Aberraciones transversales.	32
3.8	Análisis por reflexión	33
3.9	Patrón de puntos de referencia por reflexión.	34
3.10	Muestra de vidrio laminado en el arreglo experimental.	35
3.11	Patrón de puntos sobre la muestra de vidrio laminado por reflexión.	36
3.12	Desviaciones TA_x y TA_y sobre la muestra de vidrio laminado con respecto a la referencia	37
3.13	Arreglo para referencia por transmisión.	38
3.14	Arreglo para análisis por transmisión.	38
3.15	Patrón de puntos obtenidos por transmisión.	39
3.16	Imagen del patrón de puntos de referencia por transmisión.	40
3.17	Desviaciones TA_x y TA_y sobre la muestra del vidrio laminado con respecto a la referencia por transmisión.	41
3.18	Imagen del patrón de puntos de referencia para el vidrio templado	42
3.19	Imagen del patrón de puntos por reflexión del vidrio templado	43
3.20	Desviaciones TA_x y TA_y sobre la muestra de vidrio laminado con respecto a la referencia	45
3.21	Reconstrucción del frente de onda de la muestra de vidrio laminado por reflexión	48
3.22	Reconstrucción del frente de onda de la muestra de vidrio laminado por transmisión	49
3.23	Reconstrucción del frente de onda de la muestra de vidrio templado por reflexión	49

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Las regulaciones en el vidrio de seguridad incluyen pruebas de control de fragmentación, esfuerzos mecánicos, de tipo ambientales y propiedades ópticas. En un vehículo, las relacionadas a las propiedades ópticas son las más importantes para proveer alta visibilidad y una vista sin distorsiones. Actualmente la detección de las distorsiones ópticas por reflexión en los vidrios de seguridad se hace de manera subjetiva, basadas en muestras patrón. Las distorsiones ópticas, que son las deformaciones del patrón de puntos o franjas en las zonas principales del vidrio de seguridad, se pueden cuantificar utilizando técnicas ópticas. De ahí surge la motivación de estudiar las distorsiones en el vidrio de seguridad. Existe más de una técnica que se puede utilizar para medir las distorsiones ópticas, pero la selección de esta depende del objeto que se caracteriza y de la resolución que se desea. En este trabajo se utiliza una prueba tipo Hartmann para poder medir las distorsiones en el vidrio laminado. La prueba de Hartmann tiene la ventaja de ser un sistema sencillo, discreto, económico y permite medir las distorsiones a través de un arreglo cuadrado (x, y y z) o si se prefiere se puede elegir otro tipo de patrón de medición (polar o helicoidal). Se consideró el caso del análisis por reflexión y transmisión. Estas consideraciones son importantes dado que si se intenta analizar la calidad en el vidrio de seguridad, inevitables

defectos están presentes debidos al proceso de manufactura. El objetivo fue realizar un análisis cuantitativo de dichas distorsiones en el vidrio de seguridad. Por esta razón, el presente trabajo se ha realizado con el propósito de proponer una metodología para cuantificar la distorsión óptica del vidrio de seguridad con respecto a una referencia.

1.2. El vidrio de seguridad automotriz

Desde hace más de 100 años los fabricantes de vidrio de seguridad trabajan en colaboración con especialistas en tecnología para ofrecer confort, iluminación y seguridad al conductor. En 1927, aparece el vidrio laminado, como resultado de la invención del químico francés Edouard Benedictus [1]. El vidrio laminado es un vidrio de seguridad que se utiliza comúnmente como parabrisas en los automóviles [2], además de forma general está constituido de dos placas de vidrio y una de polivinil butiral. Una tendencia en años recientes, es la gran área visual que estos cubren, lo que exige mayores retos tecnológicos para sus diseñadores y constructores. La calidad óptica de estos vidrios de seguridad está en función del diseño de su curvatura, el ángulo de instalación y el proceso de su fabricación. Curvar el vidrio de seguridad está condicionado por el tamaño de la superficie y la curvatura: cuanto más grande es la superficie, mayor es el grosor; cuanto más cerrada es la curva, menor es el espesor.

Existen básicamente dos procesos industriales que se utilizan para curvar un vidrio. Uno de estos consiste en transportar el vidrio sobre rodillos cerámicos a través de un horno donde se calienta de forma gradual a una temperatura aproximada de 620° C. A esta temperatura el vidrio alcanza la consistencia de plasticidad, de manera que su propio peso hace que se adapte y tome la forma del molde. El proceso termina una vez enfriado el vidrio de forma abrupta con aire. Para crear formas complejas se utilizan moldes sofisticados que permiten alcanzar la forma deseada. Otro proceso alternativo para poder curvar un vidrio es utilizar una prensa. En este proceso las hojas de vidrio son pasadas a través de una sección de calor sobre rodillos o soportadas sobre una cama de aire. El vidrio pasa a la zona de curvado donde éste es presionado para tener la forma curva.

1.3. Planteamiento del problema

Imaginemos que un haz de luz convergente viene desde muy lejos, al pasar por el vidrio de seguridad (considere que este tipo de vidrio tiene una forma esférica y no homogénea), lo deseable es que no sufra ninguna distorsión (línea de puntos); sin embargo, debido a la curvatura del espejo este frente de onda se distorsiona, también conocido en pruebas ópticas como frente de onda aberrado. En este escenario, se tienen posibles aberraciones respecto a su forma ideal, ver Fig. 1.1.

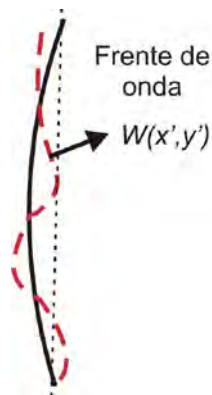


Fig. 1.1: Aberración de frente de onda $W(x', y')$ es la diferencia de camino óptico entre frente de onda real y el de referencia (esférico).

Con la línea sólida, se representa la forma nominal de la superficie que se quiere tratar; con la línea segmentada, se representan las irregularidades denominadas ondulaciones que se asocian a los errores por procesos de fabricación; y con la línea de puntos, se representa la referencia que se utiliza para hacer las mediciones. Por ello, para poder realizar las mediciones, se tiene que considerar que la reflexión y transmisión de la luz en este tipo de superficies depende del radio de curvatura asociado a las mismas, de la homogeneidad del material, de la sección transversal de haz de luz incidente, de la distribución de luz dentro del haz incidente, del ángulo de incidencia, de la longitud de onda asociada al haz incidente, de su estado de polarización, del índice de refracción de la superficie reflejante y de la posible

existencia de películas delgadas de elementos contaminantes sobre la superficie.

Ahora considere que un haz de luz incide en el vidrio de seguridad. Cuando esto ocurre, existen múltiples reflexiones; esto es, debido a las dos capas de vidrio y la capa polivinílica, ver Fig. 1.2. Lo que respecta a la parte del rayo transmitido sufrirá cambios en su trayectoria al momento de cambiar de medio de propagación. El rayo que se refleja debido a la primera capa vidrio y el rayo que se transmite a través del vidrio de seguridad representan los dos casos de interés en el contexto de distorsiones en el vidrio de seguridad. Por esta razón, el análisis de la distorsión en el vidrio de seguridad, se presentará por reflexión y transmisión. Para ambos casos, se utilizará luz polarizada para poder discriminar los haces reflejados y transmitidos de interés.

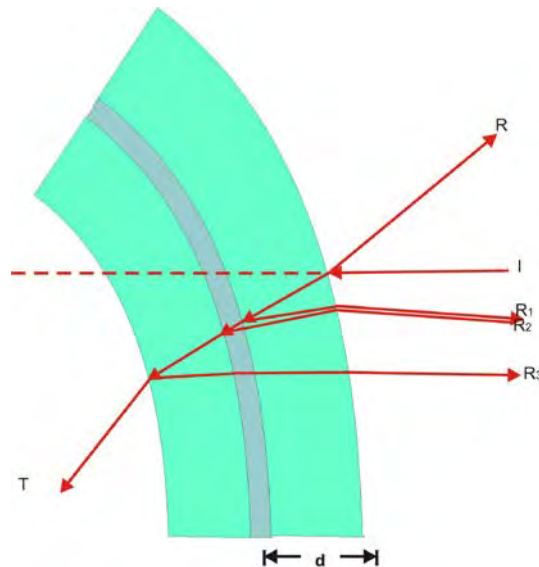


Fig. 1.2: Principales reflexiones y refracciones en el vidrio curvo de seguridad

El problema a resolver en nuestro trabajo es:

Considerando una superficie esférica y no homogénea, el objetivo es desarrollar una metodología, tal que permita evaluar la desviación de la reflexión y la transmisión óptica nominal contra los parámetros asociados al vidrio de seguridad evaluado. En particular emplearemos una prueba estilo Hartmann para el análisis de las distorsiones ópticas en el vidrio de seguridad automotriz (pueden ser tanto de vidrio laminado

como de vidrio templado).

1.4. Objetivos y alcance de la tesis

En este trabajo he utilizado la prueba tipo Hartmann, tomada de la teoría de estudio de aberraciones transversales en sistemas ópticos, y la he llevado al contexto de distorsiones ópticas (formas e inhomogeneidad del material) en el vidrio de seguridad. La razón de proceder de esta manera es que el problema es de naturaleza óptica. En esta tesis se presenta las técnicas, las herramientas y los arreglos experimentales empleados en el análisis de las distorsiones. En este contexto, se utiliza un patrón estilo Hartmann, que es proyectado sobre una superficie de referencia y se toma una imagen. Nuevamente, el patrón es proyectado sobre una muestra de vidrio de seguridad y se toma una segunda imagen. Finalmente, ambas imágenes son procesadas y analizadas para cuantificar las distorsiones. Para este propósito utilizamos dos técnicas conocidas: prueba tipo Hartmann y polarización, con la finalidad de medir la distorsión óptica asociada a la primer superficie del vidrio de seguridad y la distorsión óptica asociada a todos los posibles factores que afectan la transmisión; es decir, las distorsión por reflexión y transmisión.

Este trabajo representa el inicio de una serie de estudios que habrán de desarrollarse para proponer una serie de parámetros objetivamente medibles, que den origen a una norma que sirva para controlar la calidad de las distorsiones presentes en la reflexión en parabrisas automotrices. Los estudios servirán para implementar una mejora en el control de calidad de vidrios de seguridad automotriz, al verificar objetivamente que los valores asociados a la distorsión óptica cumplan los requerimientos contemplados en las normas actuales para los caso de transmisión y reflexión.

1.5. Organización de la tesis

Este trabajo esta organizado de la siguiente forma: El Capítulo 2, presenta los preliminares teóricos acerca de fenómenos que intervienen en las distorsiones, la prueba de Hartmann utilizada para medir desviaciones del frente de onda, y las herramientas necesarias para la reconstrucción del frente de onda. El Capítulo 3, presenta el arreglo experimental, analizando las distorsiones en el vidrio de seguridad. El Capítulo 4, presenta de forma cuantitativa las distorsiones. Finalmente, el Capítulo 5, presenta las conclusiones generales y algunos problemas abiertos.

Capítulo 2

PRELIMINARES TEÓRICOS

En este capítulo se presenta de forma breve el material teórico necesario para abordar el tema de las distorsiones en el vidrio de seguridad. Se dará la definición de distorsión, los principios ópticos relacionados para su estudio, la metodología utilizada y las herramientas utilizadas para cuantificar las distorsiones en el vidrio de seguridad.

2.1. Fenómenos físicos asociados a las distorsiones en el vidrio de seguridad

La luz al propagarse por el espacio interacciona de una manera u otra con los materiales que se encuentran en su camino de propagación. Cuando la luz cambia de medio de propagación; es decir, de una interfaz aire-vidrio, una parte de ella es reflejada, otra es transmitida y otro porcentaje es absorbido por este nuevo medio de propagación, convirtiéndola en energía calorífica.

2.1.1. Reflexión

Cuando la luz se refleja en una superficie plana, esta obedece la ley de la reflexión. Esta ley dice que la magnitud del ángulo incidente es igual a la magnitud del ángulo reflejado, observe la Fig. 2.1. En esta figura se observa que un rayo de luz sigue la trayectoria del

punto $P_1(0, y_1)$, se refleja en el punto $P(x, 0)$ hasta llegar al punto $P_2(x_2, y_2)$.

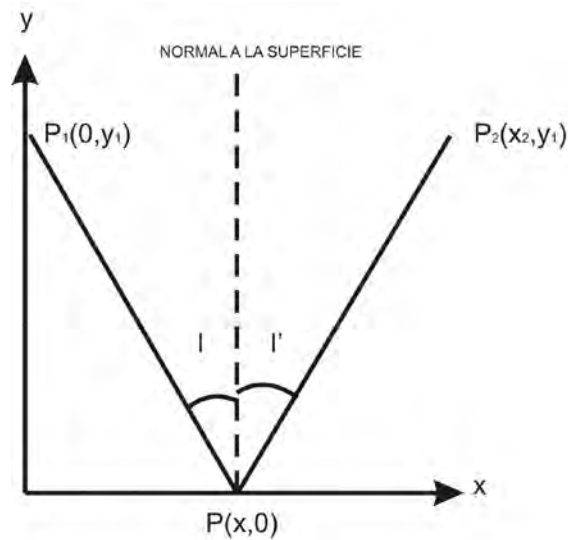


Fig. 2.1: Rayo de luz reflejado.

La ecuación que define la ley de la reflexión es

$$\text{sen } i = -\text{sen } i' \quad (2.1)$$

donde, $i = -i'$. La ley de reflexión aplica de igual forma para los vidrios curvos (si el ancho del haz incidente es suficientemente angosto), es decir el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Continuado con la luz que se transmite por el vidrio de seguridad, una parte es nuevamente reflejada y esta emerge desde la segunda superficie del vidrio.

2.1.2. Transmisión

El resto de luz que se transmite al aire, lo hará con un cambio de dirección. Si las dos superficies de vidrio son planas y paralelas, entonces el rayo de luz emerge en dirección paralela al rayo original, pero desplazado por una pequeña distancia d , observe la Fig. 2.2.

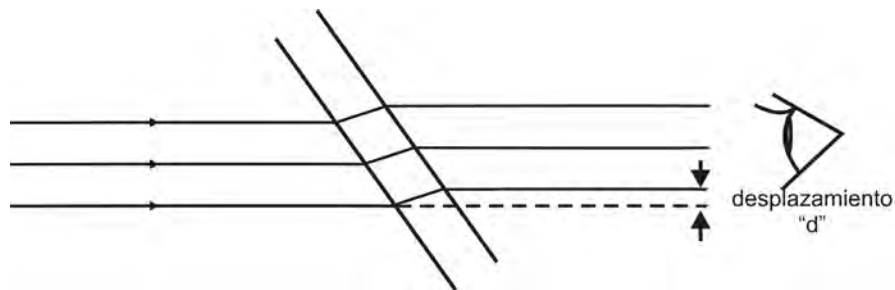


Fig. 2.2: Trazo de rayos en un vidrio plano.

Sin embargo, en el caso de un vidrio de seguridad curvo, el ángulo de incidencia no resulta constante de un punto a otro sobre la superficie y resulta diferente en la parte interna del vidrio, esto resulta en una desviación variable, observe ahora la Fig. 2.3.

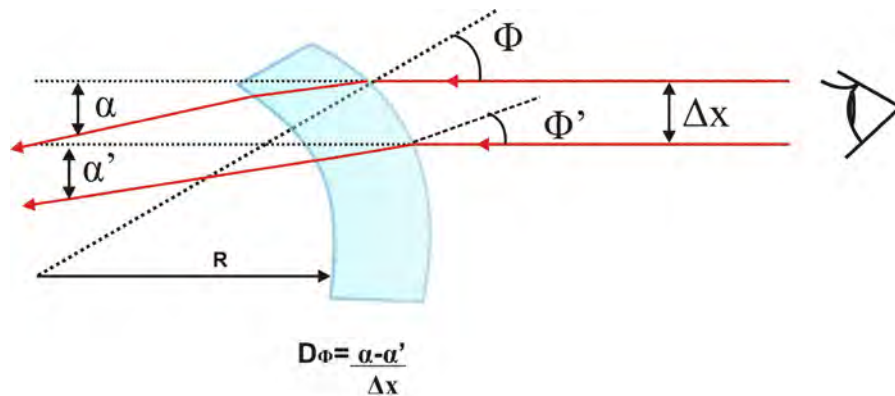


Fig. 2.3: Trazo de rayos en un vidrio curvo.

donde:

- $\Delta_x =$ es la distancia entre dos líneas rectas paralelas a la dirección de visión, que pasan a través de los puntos P y P^t .
- $R =$ radio de curvatura, en mm.
- $\Delta_{\alpha} = \alpha - \alpha'$ = es la distorsión óptica en la dirección $P - P^t$ (en radianes).

De manera que la definición de **distorsión óptica** es la diferencia algebraica de la desviación angular Δ_{α} medida entre dos puntos sobre la superficie del vidrio de seguridad,

esto es por transmisión o por reflexión. La distancia entre estos dos puntos es tal que la proyección en un plano en ángulo recto a la dirección de visión son separados por una distancia Δ_x .

2.1.3. Coeficientes de reflectividad y transmitividad

El coeficiente de reflectividad R se define como la relación entre la irradiación incidente y la reflejada entre dos medios con índices de refracción n_0 y n_1 , respectivamente [3]. A incidencia normal R está dada por:

$$R = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}^2 \quad (2.2)$$

En la Fig. 2.4 se observa el caso de una interfaz simple. La reflectividad es obtenida en función de los índices de refracción de ambos medios con la Ec. 2.2.

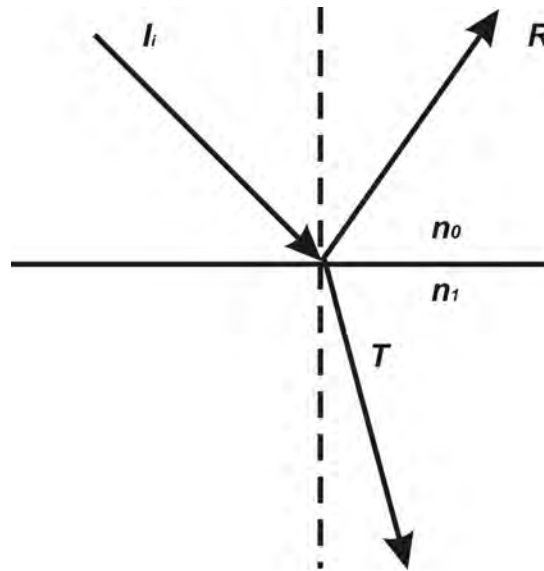


Fig. 2.4: Reflexión y refracción sobre una interfaz simple

La transmitancia como la reflectancia puede ser expresada en términos de los índices

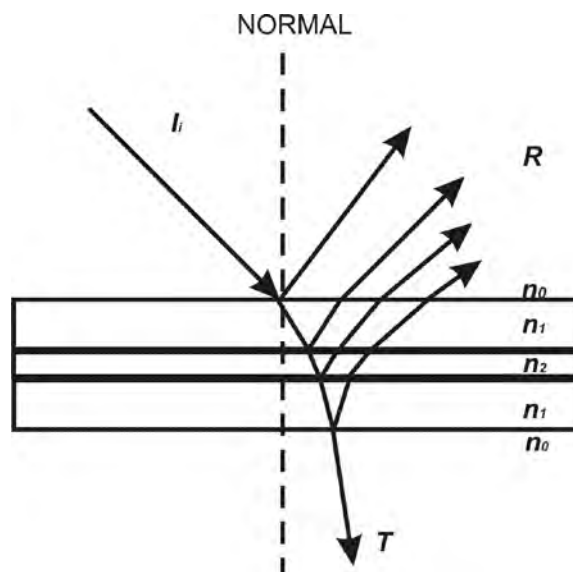


Fig. 2.5: Reflexión y refracción sobre una interfaz múltiple.

de refracción, a incidencia normal,

$$T = \frac{4n_0n_1}{(n_0 + n_1)^2} \quad (2.3)$$

Suponiendo que en el rango de longitudes de onda incidentes, no existe absorción por ambos medios, basados en el principio de conservación de la energía estos coeficiente se relacionan por:

$$R + T = 1 \quad (2.4)$$

El sistema físico se describe como un sistema óptico multicapa. En la Fig. 2.5 se observan las dos capas de vidrio y entre ellas la capa de polivinil butiral (PVB). Para calcular la reflectancia en cada frontera plana, el sistema puede ser simplificado como se muestra en la Fig. 2.6. Para este sistema, la ecuación de la reflectancia es modificada e Y (admitancia) toma el lugar del índice de refracción n_1 en la Ec. 2.2. Este término, Y , está en función de los índices de refracción de la capa de vidrio (n_1), del PVB (n_2) y de δ que es el retraso en fase entre las componentes ortogonales del campo eléctrico, asociado al haz de luz incidente producido por el PVB.

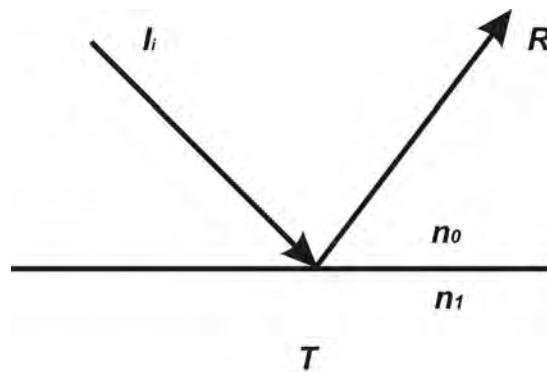


Fig. 2.6: Reflexión sobre una interfaz simplificada.

Para el vidrio laminado, se separaron las dos capas de vidrio y se extrajo un trozo de PVB. A estos materiales se les midió el índice de refracción con un refractómetro digital (*Abbe – 3L*). El refractómetro que se utilizó, mide índices de refracción de líquidos y sólidos entre 1,3 y 1,7 [8]. El índice de refracción obedece a la relación de dispersión, esto significa que tiene asociados valores que dependen de la longitud de onda con que se ilumina. De manera que para medir un índice de refracción con rango de 1,300 a 1,710, la longitud de onda necesaria es de 589 *nm*. Los índices de refracción que se obtuvieron son los siguientes:

- Capa de Vidrio 1, $n_1 = 1,5237$
- Capa de Vidrio 2, $n_1 = 1,5237$
- Capa de PVB, $n_2 = 1,4794$

Después de realizarse las mediciones de los índices de refracción se procedió a medir la transmitancia y absorción para el vidrio de seguridad, y además se hicieron estas mismas mediciones de forma individual para la capa de PVB, que se obtuvieron al separar del vidrio de seguridad. Estas mediciones fueron realizadas en función de la longitud de onda en un espectrofotómetro digital. Para esta medición se eligió un rango de 190 *nm* a 2500 *nm* para los tres casos. La descripción de las gráficas es la siguiente:

Para el vidrio, las gráficas para la medición de transmitancia y absorción se presentan en las Figs. 2.7 y 2.8, respectivamente. La gráfica de transmitancia presenta alrededor de

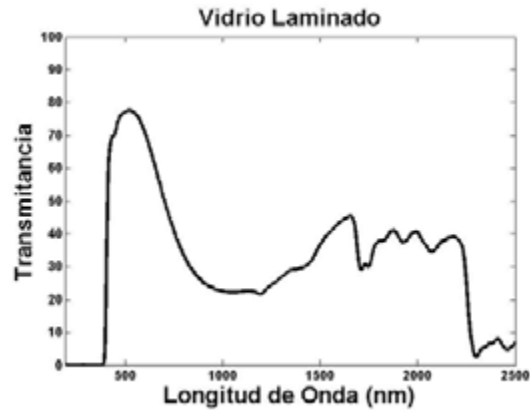


Fig. 2.7: Gráfica de transmitancia del vidrio de seguridad.

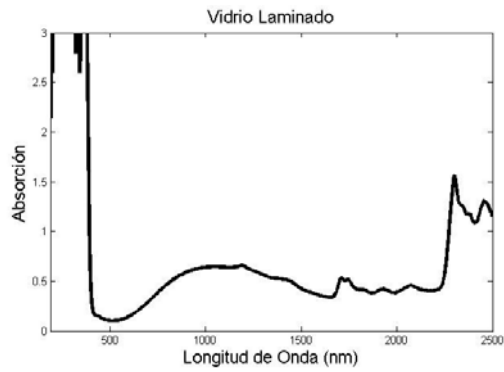


Fig. 2.8: Gráfica de absorción del vidrio de seguridad.

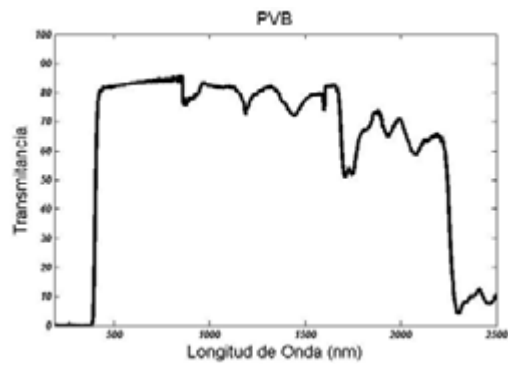


Fig. 2.9: Gráfica de transmitancia del polivinil butiral.

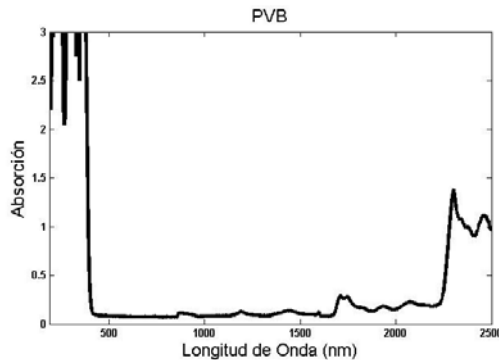


Fig. 2.10: Gráfica de absorción del polivinil butiral.

80 % de transmitancia en el rango de luz visible, esto es, aproximadamente de 430 a 470 nm; además, se observa una baja transmitancia de luz UV. Otra propiedad del vidrio de seguridad, es la absorción, donde parte de la luz incidente es absorbida.

Para el PVB, las gráficas de la medición de transmitancia y absorción se presentan en las Figs. 2.9 y 2.10, respectivamente. En la Fig. 2.9 se observa que la gráfica de transmitancia para la interfaz aire-PVB se encuentra alrededor del 85 % en promedio para la luz visible.

2.2. Descripción del frente de onda

La luz es una onda electromagnética, por tanto, obedece las leyes de Maxwell. El valor que tiene el campo $U(\mathbf{r}, t)$ se determina por su módulo $|U(\mathbf{r}, t)|$ y su fase $\varphi(\mathbf{r}, t)$.

Llamaremos frente de onda a una superficie de fase constante. Con esta definición los rayos son perpendiculares al frente de onda [6]. En general, se tendrá en cuenta las diferencias de fase en los distintos puntos que componen una misma imagen.

Aberración de frente de onda

El objetivo en la mayoría de los sistemas ópticos es formar imágenes. Cuando se tiene en cuenta el carácter ondulatorio de la luz, no se tendrá una imagen puntual en el plano imagen debido a la difracción. En el caso de una pupila circular, la mancha recibe el nombre de círculo de Airy. Si el sistema introduce aberraciones en el frente de ondas, sus

rayos aberrados producirán una imagen aberrada del objeto. El frente de onda aberrado, $W(r, t)$, se define como la diferencia de fase entre el frente de onda real y frente de onda de referencia.

2.2.1. Prueba de Hartmann

La prueba de Hartmann, fue desarrollada en 1900 por el astrónomo alemán Johannes Franz Hartmann. Esta tiene como objetivo recuperar la forma del frente de onda de un sistema óptico. De acuerdo a la Fig. 2.11 la pantalla está sobre el espejo; el haz de luz reflejados por el espejo forma una imagen consistente a la altura de la fuente de la luz (aprox.), en el plano de un arreglo circular de puntos equidistantes; la imagen es la tomada por la cámara o detector y es normalmente llamada Hartmanngrama (2.11).

Las deformaciones del frente de onda $W(x, y)$ son calculadas a partir de la medición de las aberraciones transversales TA_x y TA_y [9], estas pueden ser observadas gracias a la pantalla de Hartmann. Las aberraciones se definen como imperfecciones de un sistema óptico que producen imágenes defectuosas. En la Fig. 2.12 se ilustra la relación entre las aberraciones transversales y las deformaciones del frente de onda, y las expresiones que las relacionan son las siguientes:

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \frac{TA_x}{r} \quad (2.5)$$

y

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = \frac{TA_y}{r} \quad (2.6)$$

donde r es la distancia desde la pupila del frente de onda, a la imagen de la pantalla de Hartmann. Normalmente las deformaciones del frente de onda $W(x, y)$ son calculadas por una integración trapezoidal aproximada a lo largo del eje x ,

$$W(n, m) = \frac{d}{2r} \sum_{i=1}^n [TA_x(i-1, m) + TA_x(i, m)], \quad (2.7)$$

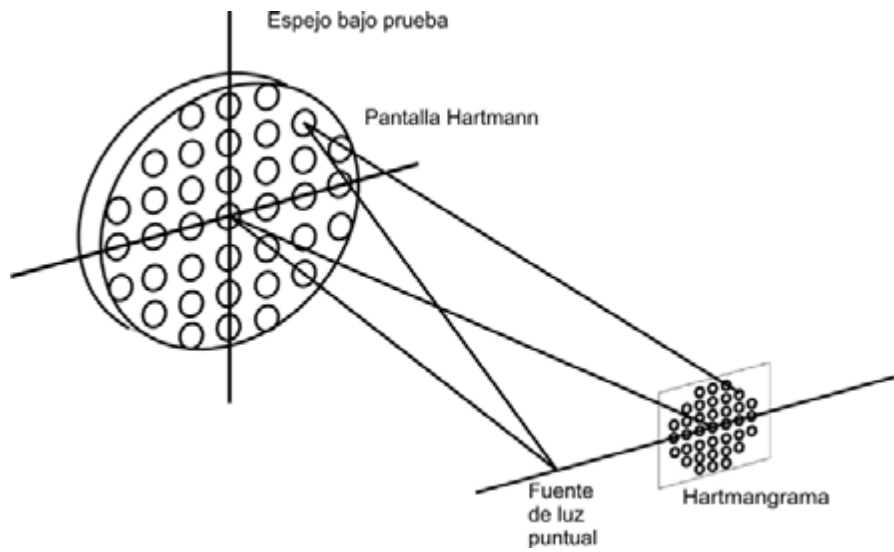


Fig. 2.11: Arreglo básico de la prueba de Hartmann

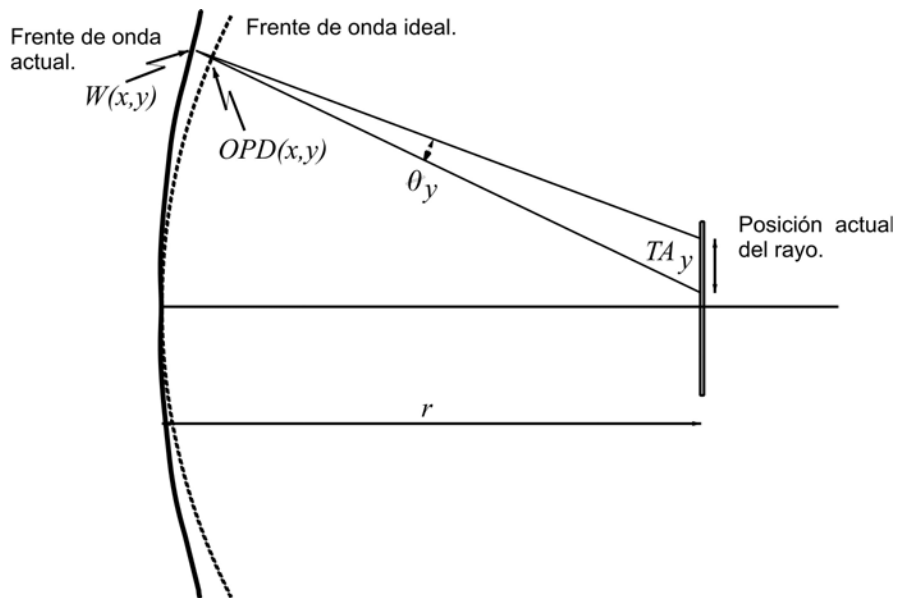


Fig. 2.12: Relación entre aberración transversal y deformación de frente de onda.

y a lo largo del eje y ,

$$W(n, m) = \frac{d}{2r} [TA_y(n, j-1) + TA_y(n, j)], \quad (2.8)$$

donde d es la separación existente entre dos agujeros consecutivos en la pantalla de Hartmann.

2.2.2. Sensor de frente de onda

El sensor de frente de onda es el dispositivo que se encarga de medir las pendientes que se producen entre dos imágenes. Para medir la pendiente, es necesaria una imagen de referencia. Cuando usamos el sensor, es crítico alinear el sensor a la referencia. Alineamos el sensor de modo que es normal al haz incidente. Iniciamos el software, cargamos la imagen de referencia e iniciamos la adquisición de las imágenes por reflexión o transmisión.

Las distorsiones en el frente de onda producen pendientes sobre cada uno de los puntos, por lo que la imagen se desplaza respecto de la referencia. La precisión de la medida de la pendiente de un sensor de Hartmann es limitada a la habilidad que tiene para determinar la posición exacta de los puntos del patrón de Hartmann. Esta precisión de medida es proporcional al número de bits de resolución en la medición de intensidad y el número de píxeles que están siendo iluminados.

Reconstrucción del frente de onda

Los distintos métodos que se pueden utilizar para la determinación de la fase se pueden catalogar en dos grandes grupos dependiendo de como se realice la medición.

1. Medición directa. Este tipo de sensores miden las propiedades específicas del frente de onda.
2. Medición indirecta. Las propiedades del frente de onda se deducen a partir de la intensidad en toda la apertura en el plano imagen o en sus proximidades.

Existen distintos métodos de muestreo para recuperar el frente de onda utilizando tales pantallas, en la mayoría de los casos se aplican a sistemas de lentes. Los métodos de muestreo se pueden clasificar como zonales o modales. Los métodos zonales se basan en el valor local del frente de onda a determinar mientras que los métodos modales se basan en un ajuste del frente de onda a una combinación lineal de funciones base. Enseguida se describen 3 métodos de muestreo para recuperar el frente de onda:

- Integración trapezoidal.
- Algoritmo de integración Southwell.
- Ajuste polinómico del frente de onda.

Integración trapezoidal

Este método es ilustrado en la Fig. 2.13, donde se presentan aproximaciones lineales en las mediciones de TA (figura superior); el frente de onda es continuo en los puntos medidos, pero no lo es cuando existen pendientes (figura inferior). De esta manera, si el frente de onda es cuadrático (ocurre cuando hay una inclinación, desenfoque y astigmatismo) este método de integración resulta ser exacto. A partir de las Ecs. 2.5 y 2.6, se obtiene:

$$W(x, y) = \frac{1}{r} \int_0^x TA_x(x, y) dx \quad (2.9)$$

$$W(x, y) = \frac{1}{r} \int_0^y TA_y(x, y) dy \quad (2.10)$$

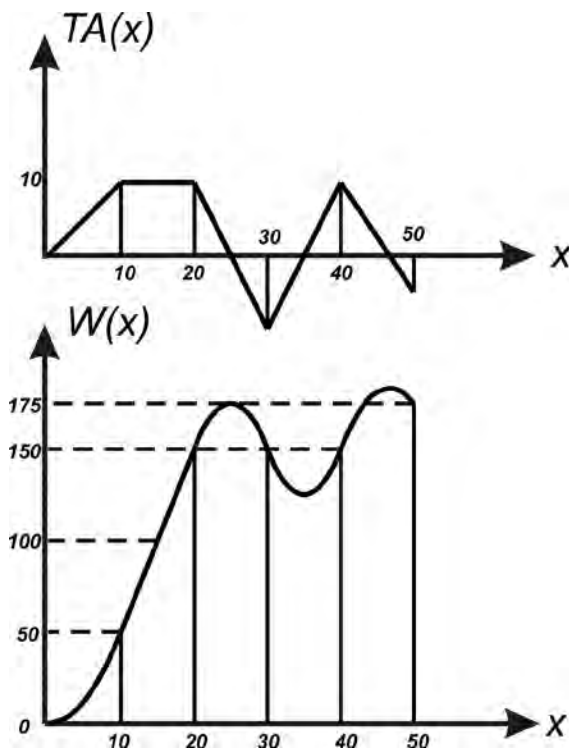


Fig. 2.13: Integración trapezoidal

Debido a que las mediciones se realizan desde una matriz de puntos con forma rectangular, y además para recuperar la forma del frente de onda se utiliza el método de integración trapezoidal de primer orden a partir de las Ecs. 2.5 y 2.6, por eso se escribe:

$$W(n, m) = W_{n-1, m} + \frac{d}{2r} [TA_x(n-1, m) + TA_x(n, m)] \quad (2.11)$$

a lo largo del eje x, mientras que para el eje y se tiene,

$$W(n, m) = W_{n, m-1} + \frac{d}{2r} [TA_y(n, m-1) + TA_y(n, m)] \quad (2.12)$$

por consiguiente, se tiene que

$$W(n, m) = W_{n-1, m-1} + \frac{d}{2r} [(TA_x(n-1, m-1) + TA_x(n, m-1)) + (TA_y(n, m-1) + TA_y(n, m))] \quad (2.13)$$

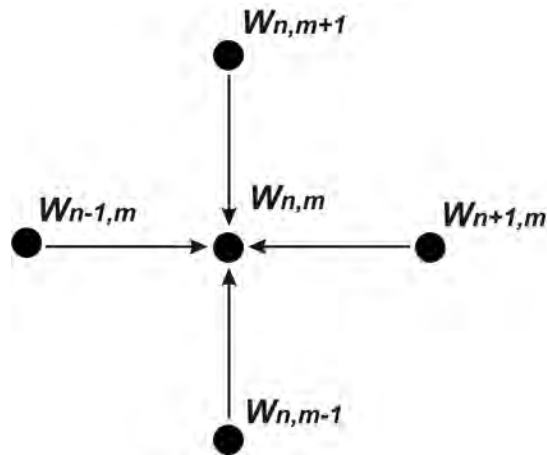


Fig. 2.14: Cálculo del frente de onda desde cuatro puntos adyacentes más cercanos a partir del punto n, m .

a lo largo de la línea diagonal, donde d es la separación entre dos agujeros consecutivos en la pantalla de Hartmann.

La Ec. 2.13 ha sido calculada para puntos sucesivos a lo largo de la imagen de Hartmann, comenzando con $W(0, m)$, $W(n, 0)$, $TA(0, m)$ y $TA(n, 0)$ igual a cero; además nos proporciona la desviación de la superficie para cualquier punto (n, m) , tomando el primer punto como una referencia.

Algoritmo de Southwell

El algoritmo de Southwell es un método zonal. La idea de este método es tomar en cuenta los puntos adyacentes en las direcciones vertical y horizontal, respectivamente, esto para calcular el frente de onda. El método es iterativo, donde para cualquier punto (n, m) , el frente de onda se calcula con las Ecs. 2.7 y 2.8 integrando para cuatro puntos adyacentes más cercanos, como se observa en la Fig. 2.14. El valor $W_{n,m}$ es justamente la medida de

los cuatro valores o puntos adyacentes. La ecuación para realizar esta medida, se escribe:

$$\begin{aligned}
 W_{n,m} &= W_{n-1,m} + S_{n-1,m}^x \\
 W_{n,m} &= W_{n+1,m} + S_{n+1,m}^x \\
 W_{n,m} &= W_{n,m-1} + S_{n,m-1}^y \\
 W_{n,m} &= W_{n,m+1} + S_{n,m+1}^y
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

donde para simplificar la Ec. 2.14, se define $S_{n-1,m}^x$ como:

$$S_{n-1,m}^x = \frac{d}{2r} [TA_x(n-1, m) + TA_x(n, m)]
 \tag{2.15}$$

Finalmente, la medida a analizar de estas cuatro mediciones es

$$\begin{aligned}
 W_{n,m} &= \frac{(\sigma_{n-1,m}W_{n-1,m} + \sigma_{n+1,m}W_{n+1,m} + \sigma_{n,m-1}W_{n,m-1} + \sigma_{n,m+1}W_{n,m+1})}{\sigma_{n-1,m} + \sigma_{n+1,m} + \sigma_{n,m-1} + \sigma_{n,m+1}} \\
 &+ \frac{(\sigma_{n-1,m}S_{n-1,m}^x + \sigma_{n+1,m}S_{n+1,m}^x + \sigma_{n,m-1}S_{n,m-1}^x + \sigma_{n,m+1}S_{n,m+1}^x)}{\sigma_{n-1,m} + \sigma_{n+1,m} + \sigma_{n,m-1} + \sigma_{n,m+1}}
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

donde las $\sigma_{n,m}$ se definen con valor unitario para todos los puntos. La Ec. 2.16 se calcula para todos los puntos (n, m) del arreglo de la prueba de Hartmann. El número de iteraciones es igual al número de puntos.

Ajuste polinomial

El ajuste polinomial es también llamado método modal. Este tipo de métodos se basan en un ajuste del frente de ondas a una combinación lineal de un conjunto de funciones base. El polinomio es de la forma:

$$W(x, y) = \sum_{n=0}^N A_n P_n
 \tag{2.17}$$

donde N es el número de términos que se están utilizando, A_n son los coeficientes de esta combinación lineal y P_n son los polinomios. Entonces, considerando las Ecs., 2.5 y 2.6, se

escribe

$$W(x, y) = \sum_{n=0}^L A_n P_n \frac{\partial P_n}{\partial x} \quad (2.18)$$

$$W(x, y) = \sum_{n=0}^L A_n P_n \frac{\partial P_n}{\partial y} \quad (2.19)$$

Se procede finalmente a realizar un ajuste por mínimos cuadrados de las funciones 2.18 y 2.19 para los valores medidos correspondientes a las aberraciones transversales.

2.2.3. Referencia relativa

Cuando se trata de determinar el efecto en un cambio de un sistema óptico es comúnmente utilizada una medición diferencial. Por ejemplo, cuando se trata de medir el efecto de una lente que se encuentra en movimiento o el efecto de un espejo deformable sobre el frente de onda. Una referencia relativa puede ser creada al adquirir una imagen. La alineación del sensor de frente de onda es importante para generar un archivo de referencia.

2.2.4. Programa de reconstrucción

Se adaptó el software que ha sido desarrollado por el Dr. Armando Gómez Vieyra para detección de aberraciones en sistemas ópticos. Este se basa en la detección de los centroides de Hartmanngrama. La localización de la referencia con respecto a la imagen real y el proceso de integración. Este programa está escrito en Matlab®.

2.2.5. Detector

Para el registro de los Hartmanngramas, se utilizó una cámara CCD característica (Sony) y una tarjeta de adquisición de imágenes NI con un programa de Matlab® para controlarla. La principal característica de esta cámara es su tecnología CCD, que ofrece alta sensibilidad. El rango del espectro de detección en una cámara CCD puede variar desde 400nm hasta los 1050nm, con un pico de sensibilidad cerca de los 700nm.

Un factor importante al momento de utilizar la cámara CCD es la iluminación. Una CCD

solo puede observar con precisión el rango dinámico, que es la diferencia entre la fuente más brillante y la menos brillante. El rango dinámico de una CCD se expresa en términos de electrones. Esto es porque cuando los fotones llegan a la CCD, el número de electrones acumulados en los pozos aumenta y cuando no caben más electrones en el pozo se dice que el pixel está saturado. Esta característica permite registrar imágenes en condiciones de baja iluminación, es por ello que la cámara CCD es ideal para captar la imagen. Cabe aclarar que se utilizó una lente zoom en la cámara CCD para formar la imagen sobre el detector.

Capítulo 3

ANÁLISIS DE LAS DISTORSIONES EN EL VIDRIO LAMINADO

En este capítulo se describe el arreglo experimental empleado para el análisis de las muestras de vidrio de seguridad. El análisis se realizó por transmisión y reflexión para considerar las diferencias de camino óptico debido a la construcción del vidrio automotriz. Para esto se empleó la técnica de Hartmann modificada, donde su principal cometido es el de estimar de la manera más fiel el frente de onda. En este trabajo, se estima el frente de onda con un conjunto discreto de valores de la fase en determinados puntos. Para esto, se retomaron programas de software desarrollados por el Dr. Armando Gómez Vieyra, egresado del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. Esto permitió obtener los centroides de los puntos en los Hartmanngramas, que a su vez permitieron detectar la distorsión del vidrio de seguridad y finalmente obtener el frente de onda.

En este mismo capítulo se hace la descripción del arreglo modificado de Hartmann, donde la pantalla de Hartmann se compone de un arreglo matricial, una lente zoom y una cámara CCD como detector. El uso de leds para construir el patrón de puntos nos permite tener

un patrón de puntos con luz puntual, que proporciona la intensidad necesaria para obtener un patrón de manchas a nuestras necesidades. En presencia del frente de onda aberrado producido por nuestro objeto a prueba, los puntos se desplazan con respecto a los puntos de un frente de onda de referencia. Los desplazamientos son proporcionales a la pendiente local promedio (aberración transversal). La medición de las pendientes en la dirección x e y se obtiene en el mismo punto y se realiza el proceso de integración para obtener la aberración del frente de onda.

3.1. Preparación de muestras de parabrisas automotriz

Utilizar herramientas comunes (como: corta-vidrios, pinzas) no es suficiente para el corte de una muestra de parabrisas; esto es, debido a las características con que cuenta como la de ser vidrio templado y a la vez adherido a una capa delgada de PVB en su interior. Un vidrio templado, al someterse a esfuerzos superiores a su límite de resistencia mecánica, tiende a romperse de manera aleatoria en centenares de pequeños trozos. Los parabrisas automotrices actualmente son de vidrio laminado, estos están constituidos por dos láminas de vidrio entre las cuales se encuentra una capa de materia plástica (PVB), la cual es preparada y calentada hasta formar una película delgada entre ambos vidrios cuya función básica es servir como medio de seguridad, manteniendo unidas las fracciones de vidrio generadas en caso de impacto fuerte. El proceso térmico al que se someten genera que ambos vidrios resulten templados aumentando así su resistencia a impacto.

Las muestras se cortaron a partir de una lámina de sierra de diamante, comúnmente usada en el proceso de generación en fabricación óptica. Esto permite obtener muestras de parabrisas con bajas fracturas. El proceso de corte de la muestra, resulta provechoso la aplicación del líquido tanto para la lámina de corte como para que no se expandan las fracturas en el material que se corta. Finalmente las muestras se limpiaron tan solo con un poco de agua y de esta forma estuvieron listas para utilizarse en el arreglo experimental. El proceso de preparación de las muestras, se llevó a cabo en el taller óptico de las

instalaciones del CIO. En la Fig. 3.1 se presenta la herramienta utilizada para la obtención de muestras de parabrisas.



Fig. 3.1: Sierra de diamante

Otra de las opciones para poder obtener una muestra de vidrio laminado es el uso de una herramienta láser con la característica de que esta herramienta resulta costosa y que no es común en el taller óptico.

3.2. Descripción del arreglo de Hartmann

La prueba de Hartmann inicialmente fue utilizado para comprobar los espejos de los telescopios y de instrumentos ópticos. Este consiste en una placa con un conjunto de agujeros y un detector de imagen, como por ejemplo una cámara de CCD mostrada en la Fig. 3.2. Con la ayuda de estos agujeros se produce un patrón de difracción en el detector de imagen. Al desplazarse el patrón de puntos de difracción se estiman las pendientes del frente de onda en cada una de las regiones que corresponden a cada uno de los agujeros. Lo que se requiere para determinar la fase varía dependiendo de las condiciones impuestas por el sistema óptico que se mide o el ambiente. No es lo mismo medir las aberraciones en un objetivo de microscopio que en un ojo humano vivo. En el primer caso el sistema es estático, para el cual no hay restricciones de la cantidad de luz que se utiliza, así como

tampoco hay problema con el tiempo que se tarde en realizar la medida; en cambio, al realizar medidas sobre el ojo vivo si importa la intensidad de la luz, el tiempo en el que se realiza la medida e incluso se requiere mediciones en tiempo real para evitar los propios movimiento del ojo humano. Para el caso particular del ojo los diferentes sensores de frente de onda desarrollados tienen variadas restricciones: como límites en la luz utilizada y el tiempo requerido para hacer las mediciones.

El problema principal de este tipo de pruebas es que la luz se aprovecha de un modo poco eficiente. Roland Shack sustituyó la placa con agujeros por un conjunto de lentes, que recogen más luz y forman una imagen definida en lugar de una mancha con difracción extensa. Al realizar esta modificación se produce una mejora en el modelo de la prueba de Hartmann mejorando la razón de señal-ruido del sensor y a la vez su eficiencia [4]. De manera similar, el caso que se examina en esta tesis es estático y también se tuvieron problemas con la iluminación. Se requiere intensidad en los puntos para detectar su posición, para esto se construyó una matriz de leds.

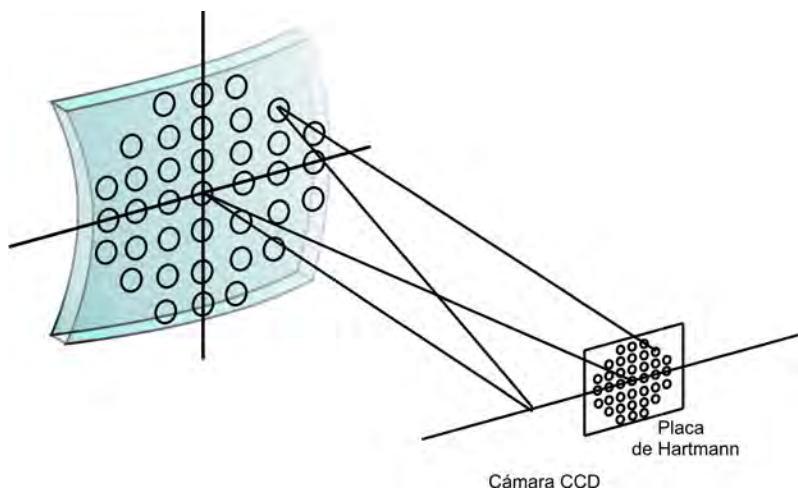


Fig. 3.2: Arreglo de Hartmann.



Fig. 3.3: Arreglo bidimensional de leds.

3.2.1. Arreglo de Hartmann modificado (arreglo matricial de Leds).

Si se supone una matriz de puntos, cada punto forma en el plano focal una imagen, que es de un tamaño en micrómetros. Las imágenes se registran con una cámara CCD, donde el arreglo utilizado se muestra en la Fig. 3.4. Si se considera el caso de un frente de onda plano, entonces los puntos estarían igualmente espaciados. En caso de que el frente de onda tenga aberraciones, la matriz de puntos se distorsionará.



Fig. 3.4: Arreglo de Hartmann modificado.

3.2.2. Localización de centroides en el Hartmanngrama

Para medir el frente de onda se determina la posición de las imágenes generadas por los "puntos", que se muestran en la Fig. 3.3. Para hallar la posición de los puntos se utiliza el cálculo del centroide, también llamado centro de gravedad.

A cada punto se le asigna un área de la cámara CCD, A_j . El centroide j -ésimo se obtiene utilizando las Ecs. 3.1 y 3.2.

$$X_j = \frac{A_j \int x \cdot I(x, y) \cdot dx dy}{A_j \int I(x, y) \cdot dx dy} \quad (3.1)$$

$$Y_j = \frac{A_j \int y \cdot I(x, y) \cdot dx dy}{A_j \int I(x, y) \cdot dx dy} \quad (3.2)$$

donde A_j , representa el área de la CCD que se asocia con cada punto j -ésimo y $I(x, y)$ es la intensidad de la imagen en el punto de las coordenadas (x, y)

La CCD está compuesta por pixeles; es decir, un conjunto discreto de elementos de imagen.

La integral se sustituye por una sumatoria extendida a las áreas A_j para realizar el cálculo de los centroides, utilizando las Ecs. 3.3 y 3.4.

$$X_j = \frac{\sum_k A_k \int x_{kl} \cdot I(x_{kl}, y_{kl}) \cdot dx dy}{\sum_k A_k \int I(x_{kl}, y_{kl}) \cdot dx dy} \quad (3.3)$$

$$Y_j = \frac{\sum_k A_k \int y_{kl} \cdot I(x_{kl}, y_{kl}) \cdot dx dy}{\sum_k A_k \int I(x_{kl}, y_{kl}) \cdot dx dy} \quad (3.4)$$

3.2.3. Medición de desplazamientos

Utilizando el sensor de Hartmann se obtiene la distorsión óptica del vidrio de seguridad y utilizando las Ecs. 2.5 y 2.6, se obtienen las pendientes promedio del frente de onda. Para lograr esto, primero se calcula el desplazamiento de los centroides con respecto a una referencia. Se considera como referencia a las posiciones de los centroides de un haz plano. El desplazamiento de las imágenes se obtiene al realizar una diferencia de las posiciones de

los centroides del frente de onda aberrado con respecto a las posiciones de los centroides de referencia. La medición de las pendientes en la dirección x y y , se realiza a partir del centroide del haz de referencia. Cuando una de las imágenes sufre un desplazamiento demasiado grande, no es posible identificar adecuadamente la desviación entre la medida real y la de referencia (criterio de Nyquist). Por tal razón, se mide el frente de onda si por cada área A_i hay una sola imagen.

3.3. Montaje experimental

El montaje experimental (Fig. 3.4) consiste en utilizar luz cuasimonocromática (arreglo de Leds rojos), una cámara CCD, una PC con una tarjeta NI PCI para capturar las imágenes, dos polarizadores para la atenuación de la luz cuasimonocromática, una estructura mecánica como base del arreglo de Leds y soportes, los objetos de estudio: un corte de vidrio automotriz y un vidrio templado.

Las pruebas se realizaron por transmisión y reflexión para ambos objetos de estudio. Al proyectar el patrón de Hartmann sobre el objeto se procede a examinar como se desplaza con respecto al patrón de referencia. Para evaluar los desplazamientos (aberraciones transversales TA_x y TA_y) de los puntos, se realizó el arreglo experimental que se observa en la Fig. 3.5. En esta figura se representa la proyección de un patrón de puntos sobre el objeto bajo estudio y la obtención de imágenes a través de dos cámaras CCD con lente zoom, donde la cámara 1 se utiliza para realizar el análisis por reflexión y la cámara 2 se utiliza para realizar el análisis por transmisión. La luz cuasimonocromática se atenúa utilizando dos polarizadores cruzados, $P1$ y $P2$. El polarizador que se denomina $P1$, es colocado frente a la lente de la cámara; el polarizador que se denomina $P2$, se coloca frente a la placa de Hartmann. La intensidad de la luz se controla girando a un polarizador con respecto a otro.

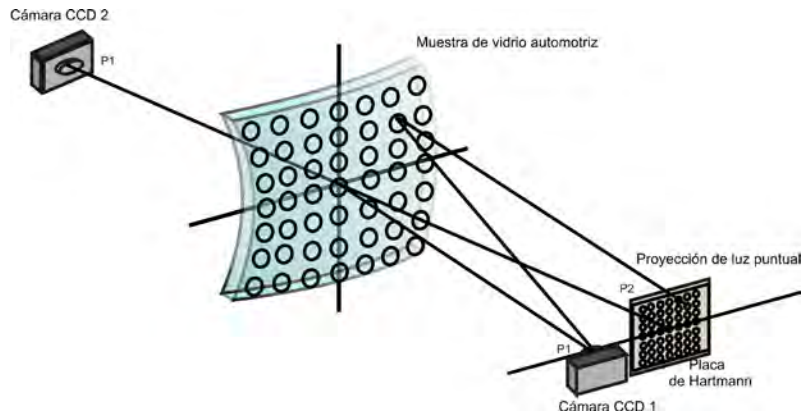


Fig. 3.5: Arreglo experimental

Ahora bien, la posición de la cámara y el arreglo bidimensional es conocida, lo que permite determinar la dirección del haz de luz incidente. Al obtener esta dirección y la del haz de luz reflejado, es posible hallar la desviación entre estos dos haces (esto se repite para cada uno de los puntos).

Como se menciona en la sección 2.2.1, para reconstruir la forma del frente de onda a partir de las aberraciones transversales, se realiza una integración trapezoidal a lo largo de los eje x e y . En la Fig. 3.6 se observa la forma de obtención de TA_x y TA_y . Las expresiones para hallar la forma del frente de onda $W(n, m)$ del objeto bajo estudio son 3.5 y 3.6.

$$W_x(n, m) = \frac{d}{2r} \sum_{i=1}^n [LTA_x(i-1, m) + TA_x(i, m)] \quad (3.5)$$

$$W_y(n, m) = \frac{d}{2r} \sum_{j=1}^m [LTA_y(n, j-1) + TA_y(n, j)] \quad (3.6)$$

Para tener una mejor visión de estas aberraciones trasversales, observe la Fig. 3.7.

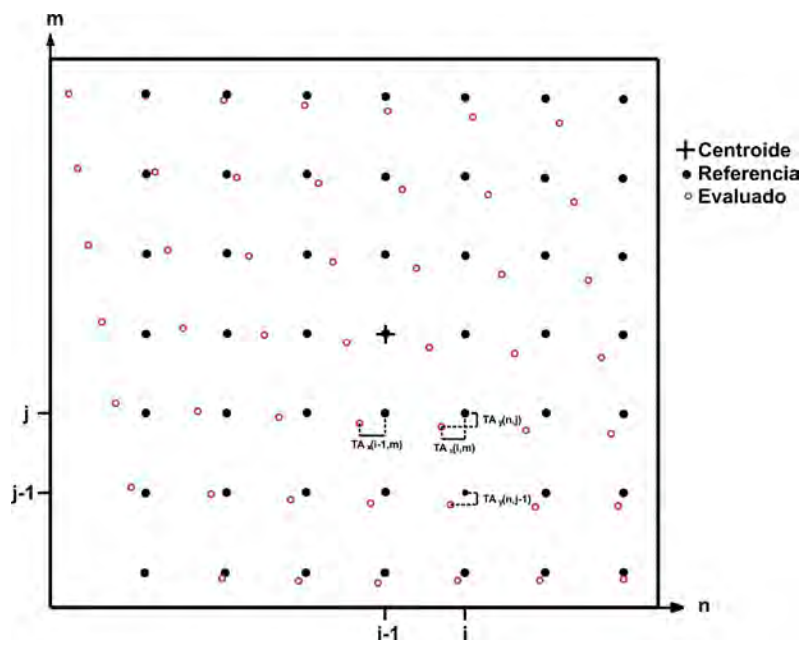


Fig. 3.6: Cálculo de las aberraciones transversales (TA_x , TA_y).

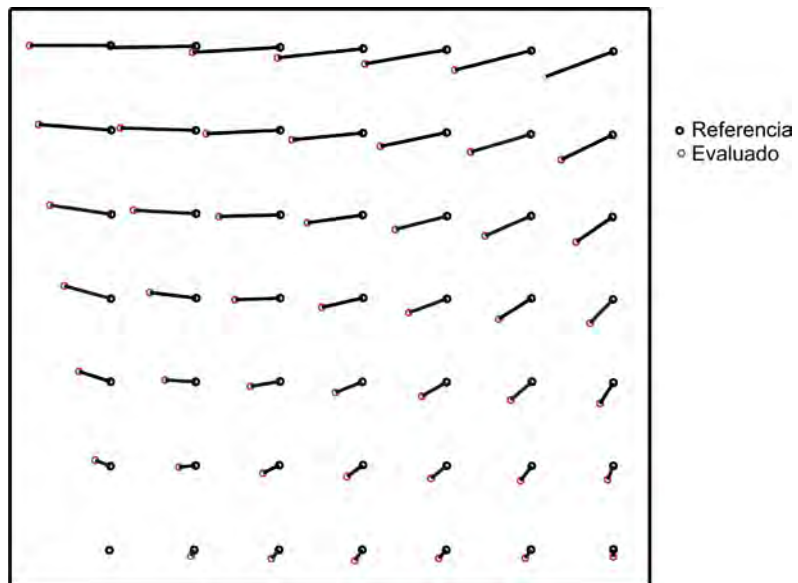


Fig. 3.7: Aberraciones transversales.

3.4. Análisis para la muestra de vidrio laminado

El análisis para la muestra de vidrio laminado, se realizó por

- Reflexión.
- Transmisión.

3.4.1. Análisis por reflexión.

Para el análisis por reflexión, se obtuvieron dos imágenes:

1. Imagen de patrón de puntos de referencia.
2. Imagen de patrón de puntos sobre la muestra de vidrio laminado.

Para obtener la primera imagen, se proyectó el arreglo bidimensional de puntos sobre un vidrio de ventana plano, como se observa en la Fig. 3.8. De manera que, con este arreglo se obtuvo la imagen del patrón de puntos de referencia, ésta se observa en la Fig. 3.9. Al procesar las imágenes se hallaron las coordenadas xy de los puntos de referencia; los valores de las coordenadas x e y se presentan en las Tablas 3.1 y 3.2, respectivamente.

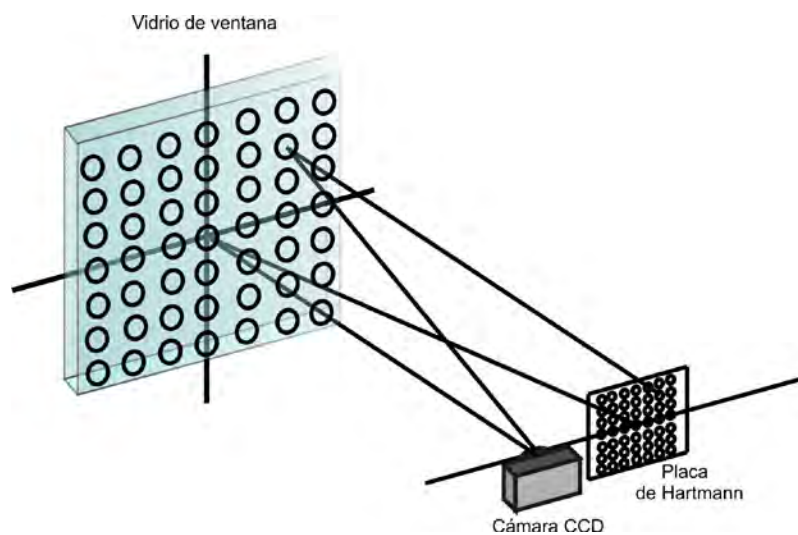


Fig. 3.8: Análisis por reflexión

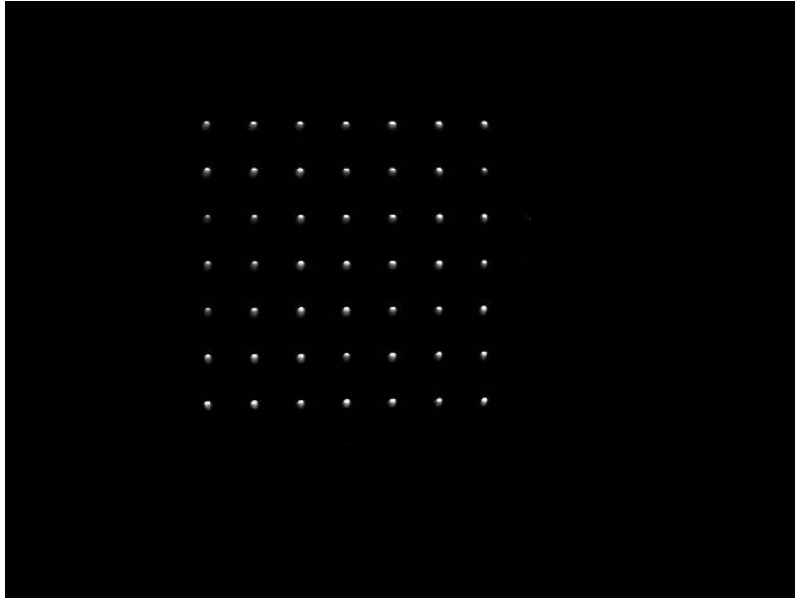


Fig. 3.9: Patrón de puntos de referencia por reflexión.

Tabla 3.1: Coordenadas en $x(m)$ de la matriz bidimensional de puntos de referencia por reflexión.

0	0.0905	0.1807	0.2701	0.3611	0.4506	0.5413
-0.0023	0.0877	0.1784	0.2683	0.3566	0.4484	0.5383
-0.0052	0.0854	0.1758	0.2658	0.3559	0.4463	0.5364
-0.0077	0.0835	0.1738	0.2627	0.3532	0.4438	0.5345
-0.0108	0.0797	0.1702	0.2605	0.3508	0.4421	0.5322
-0.0140	0.0769	0.1679	0.2578	0.3485	0.4408	0.5304
-0.0172	0.0735	0.1648	0.2555	0.3453	0.4372	0.5272

Tabla 3.2: Coordenadas en $y(cm)$ de la matriz bidimensional de puntos de referencia por reflexión.

0	0.0020	0.0047	0.0063	0.0097	0.0113	0.0128
0.0905	0.0930	0.0950	0.0980	0.1002	0.1023	0.1060
0.1805	0.1823	0.1848	0.1866	0.1892	0.1914	0.1939
0.2699	0.2728	0.2749	0.2763	0.2794	0.2811	0.2841
0.3587	0.3612	0.3637	0.3668	0.3691	0.3705	0.3733
0.4495	0.4524	0.4544	0.4569	0.4589	0.4627	0.4632
0.5413	0.5437	0.5455	0.5482	0.5504	0.5533	0.5550

Al observar los datos de las tablas, se tienen variaciones drásticas entre los datos, esto es debido a la referencia, que es un vidrio plano. A continuación, veremos como se distorsiona el patrón de puntos sobre la muestra de vidrio laminado. Para ello, necesitamos obtener una segunda imagen.

La segunda imagen, es el patrón de puntos sobre la muestra del vidrio laminado, que se obtiene al colocar la muestra de vidrio laminado en lugar del vidrio de ventana, esto se puede observar en el arreglo de la Fig. 3.10. De manera que, la imagen que se obtiene se observa en la Fig. 3.11; se observa como se distorsiona el patrón de puntos sobre la muestra de vidrio laminado. A continuación se ubican las coordenadas xy de los puntos sobre la muestra de vidrio laminado; los valores de las coordenadas x e y de estos puntos se presentan en las Tablas 3.3 y 3.4, respectivamente.

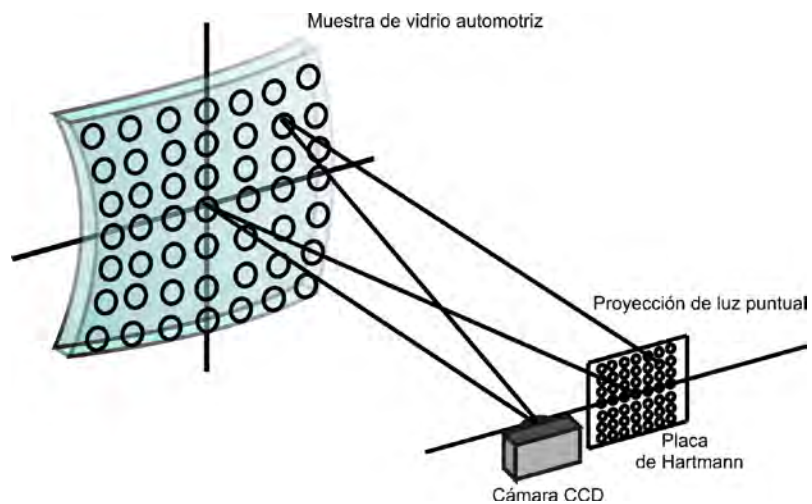


Fig. 3.10: Muestra de vidrio laminado en el arreglo experimental.

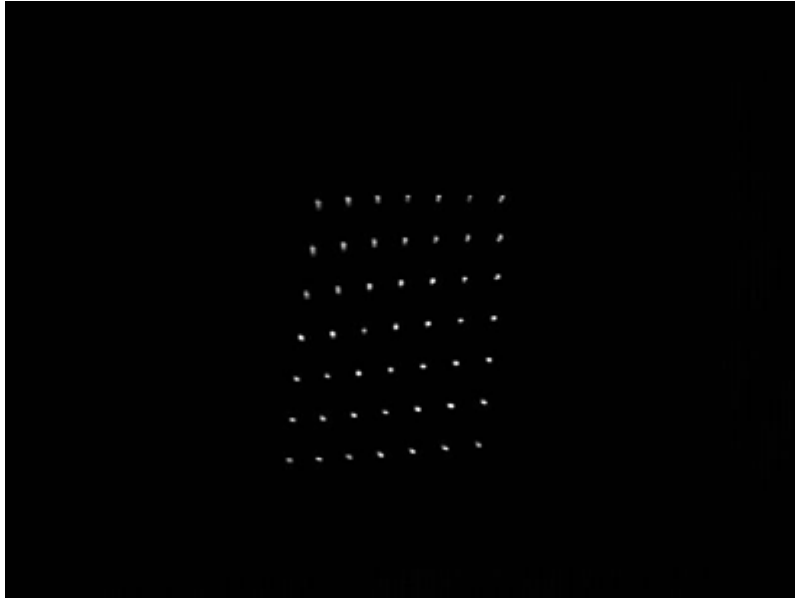


Fig. 3.11: Patrón de puntos sobre la muestra de vidrio laminado por reflexión.

Tabla 3.3: Coordenadas en $x(m)$ de los puntos sobre el objeto por reflexión.

0.0416	0.0971	0.1516	0.2057	0.2604	0.3150	0.3701
0.0299	0.0857	0.1422	0.1976	0.2522	0.3095	0.3648
0.0198	0.0758	0.1319	0.1881	0.2444	0.3016	0.3585
0.0128	0.0679	0.1229	0.1782	0.2350	0.2930	0.3507
0.0080	0.0613	0.1151	0.1697	0.2267	0.2834	0.3410
0.0046	0.0557	0.1086	0.1624	0.2175	0.2745	0.3321
0.0022	0.0515	0.1032	0.1549	0.2087	0.2661	0.3224

Tabla 3.4: Coordenadas en $y(m)$ de los puntos sobre el objeto por reflexión.

0.0568	0.0500	0.0449	0.0412	0.0387	0.0374	0.0368
0.1144	0.1090	0.1029	0.0988	0.0952	0.0921	0.0909
0.1684	0.1638	0.1598	0.1550	0.1512	0.1471	0.1435
0.2206	0.2181	0.2142	0.2102	0.2066	0.2019	0.1980
0.2701	0.2690	0.2667	0.2641	0.2608	0.2564	0.2522
0.3200	0.3204	0.3186	0.3166	0.3136	0.3100	0.3056
0.3701	0.3703	0.3690	0.3691	0.3657	0.3626	0.3589

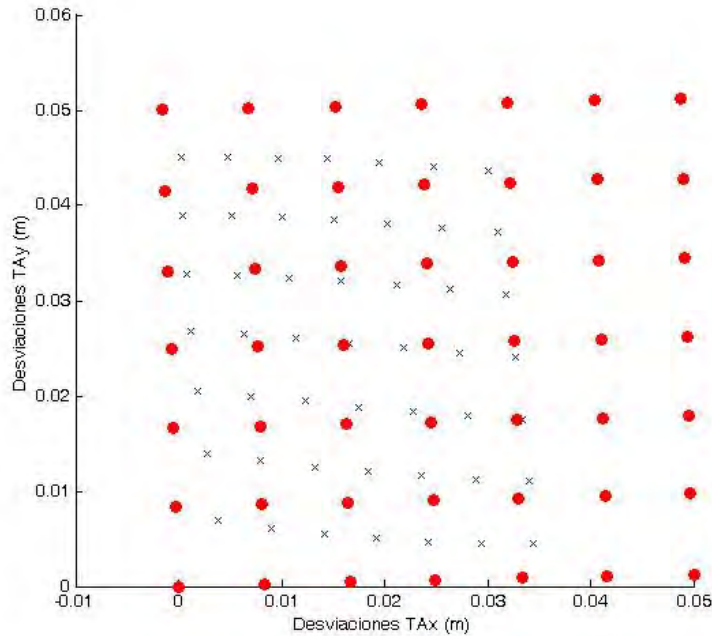


Fig. 3.12: Desviaciones TA_x y TA_y sobre la muestra de vidrio laminado con respecto a la referencia

Halladas las coordenadas del patrón de puntos de referencia y el patrón de puntos sobre el objeto, podemos observar la Fig. 3.12.

3.4.2. Análisis por transmisión

Al igual que en el caso por reflexión, para el caso de análisis por transmisión se tomaron dos imágenes:

- Imagen de patrón de puntos de referencia.
- Imagen de patrón de puntos sobre la muestra de vidrio laminado.

A diferencia del caso de reflexión; esta vez, la imagen del patrón de puntos de referencia es el mismo patrón de puntos, como se observa en el arreglo de la Fig. 3.13. Después de esto, se coloca la muestra de vidrio laminado y se procede a tomar la imagen de los puntos sobre la muestra con la segunda cámara, esto se observa en la Fig. 3.14. Así se obtuvieron las dos imágenes para el análisis por transmisión.

La imagen del patrón de puntos de referencia tomada por transmisión se observa en la Fig. 3.15. Los valores de las coordenadas x e y se presentan en las Tablas 3.5 y 3.6, respectivamente.

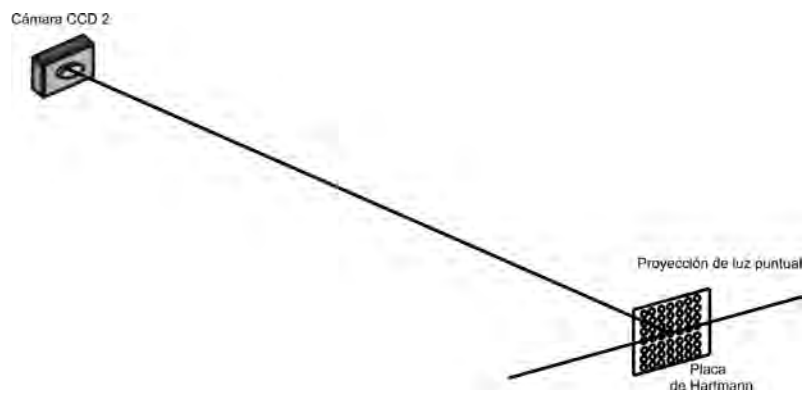


Fig. 3.13: Arreglo para referencia por transmisión.

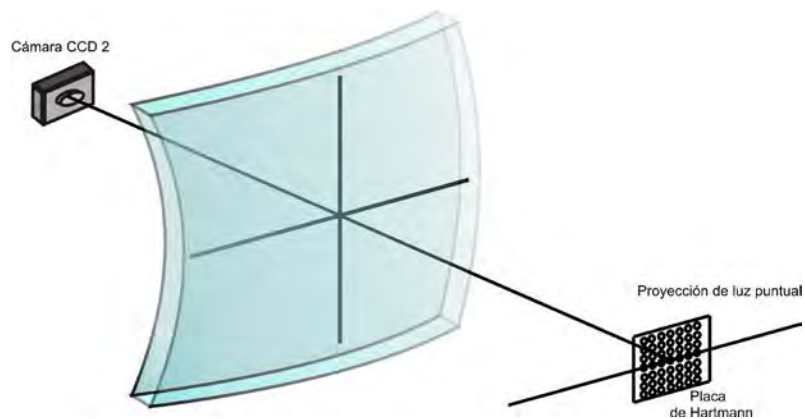


Fig. 3.14: Arreglo para análisis por transmisión.

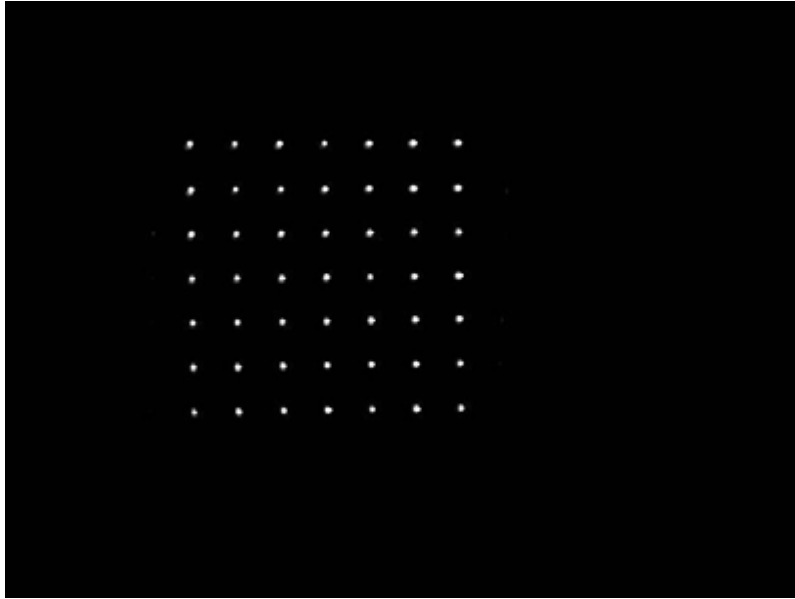


Fig. 3.15: Patrón de puntos obtenidos por transmisión.

Tabla 3.5: Coordenadas en $x(m)$ de los puntos de referencia por transmisión.

0	0.0083	0.0167	0.0251	0.0334	0.0417	0.0500
0.0002	0.0084	0.0169	0.0252	0.0334	0.0417	0.0500
0.0003	0.0087	0.0170	0.0253	0.0336	0.0418	0.0501
0.0004	0.0088	0.0172	0.0255	0.0336	0.0418	0.0502
0.0006	0.0088	0.0172	0.0255	0.0338	0.0421	0.0503
0.0007	0.0089	0.0174	0.0256	0.0338	0.0421	0.0504
0.0008	0.0091	0.0175	0.0258	0.0340	0.0423	0.0506

Tabla 3.6: Coordenadas en $y(m)$ de los puntos de referencia por transmisión.

0	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003	-0.0003
0.0086	0.0084	0.0084	0.0083	0.0082	0.0082	0.0081
0.0167	0.0167	0.0166	0.0165	0.0165	0.0163	0.0163
0.0251	0.0249	0.0249	0.0248	0.0247	0.0246	0.0244
0.0334	0.0332	0.0331	0.0330	0.0329	0.0327	0.0326
0.0416	0.0416	0.0413	0.0412	0.0411	0.0410	0.0408
0.0500	0.0499	0.0497	0.0496	0.0494	0.0493	0.0492

La imagen del patrón de puntos sobre la muestra de vidrio laminado por transmisión se observa en la Fig. 3.16. Los valores de x e y se muestran en las Tablas 3.7 y 3.8, respectivamente.

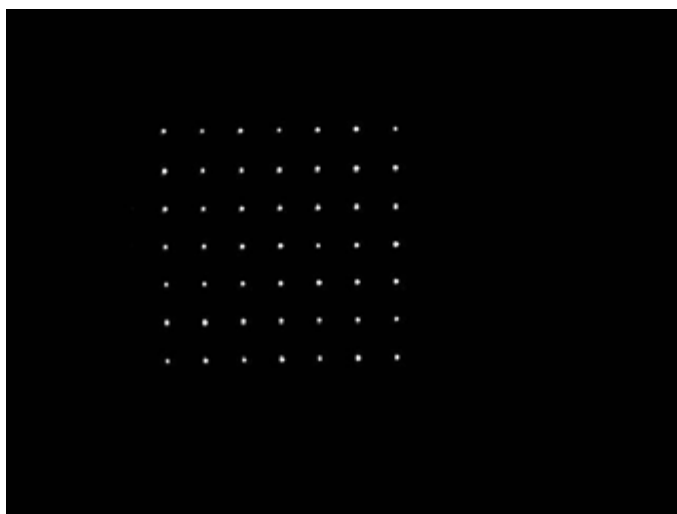


Fig. 3.16: Imagen del patrón de puntos de referencia por transmisión.

Tabla 3.7: Coordenadas en $x(m)$ de los puntos sobre el objeto por transmisión.

-0.0002	0.0081	0.0164	0.0248	0.0331	0.0415	0.0500
0.0000	0.0083	0.0167	0.0249	0.0331	0.0415	0.0500
0.0002	0.0084	0.0168	0.0250	0.0332	0.0416	0.0501
0.0002	0.0086	0.0168	0.0251	0.0333	0.0416	0.0501
0.0004	0.0087	0.0169	0.0251	0.0335	0.0417	0.0502
0.0005	0.0088	0.0171	0.0253	0.0335	0.0418	0.0502
0.0007	0.0090	0.0172	0.0255	0.0337	0.0419	0.05030

Tabla 3.8: Coordenadas en $y(m)$ de los puntos sobre el objeto por transmisión.

-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0003	-0.0004	-0.0005	-0.0006
0.0086	0.0085	0.0084	0.0084	0.0082	0.0081	0.0080
0.0169	0.0168	0.0168	0.0166	0.0165	0.0163	0.0163
0.0252	0.0251	0.0251	0.0249	0.0248	0.0247	0.0246
0.0334	0.0333	0.0332	0.0332	0.0330	0.0328	0.0327
0.0417	0.0416	0.0414	0.0414	0.0412	0.0411	0.0409
0.0500	0.0499	0.0498	0.0497	0.0495	0.0494	0.0493

Se procede a realizar el análisis de las desviaciones en x e y por transmisión, estas se presentan en la Figura 3.17.

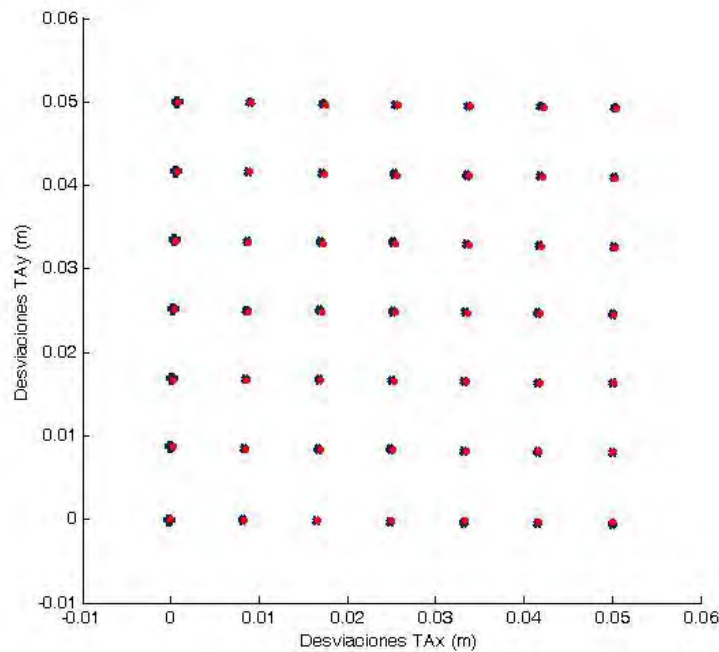


Fig. 3.17: Desviaciones TAx y TAy sobre la muestra del vidrio laminado con respecto a la referencia por transmisión.

Se observa menores desviaciones del patrón de puntos sobre la muestra del vidrio laminado con respecto al patrón de referencia. Por consiguiente, se puede decir que existe un mejor análisis por reflexión que cuando se analiza para ambas capas de vidrio.

3.5. Análisis para la muestra de vidrio templado

El análisis para una muestra de vidrio templado se realizó por transmisión y reflexión. Tomando como referencia el arreglo de la Fig. 3.8, se tomó la imagen del patrón de puntos de referencia y tomando como referencia el arreglo de la Fig. 3.10, se tomó la imagen del patrón de puntos sobre el vidrio templado. Las imagen de referencia se muestra en la Figs.3.18, y las tablas de sus coordenadas x e y se presentan en las Tablas 3.9 y 3.10

respectivamente.

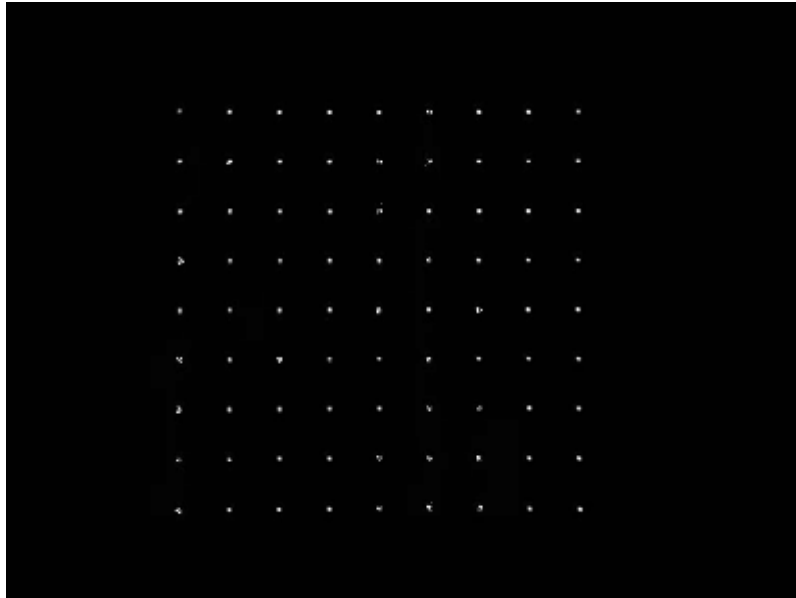


Fig. 3.18: Imagen del patrón de puntos de referencia para el vidrio templado

Tabla 3.9: Valores de las coordenadas en $x(m)$ de los puntos de referencia sobre vidrio templado.

0	0.00949	0.01894	0.02842	0.03770	0.04708	0.05653	0.06574	0.0750
0.00007	0.00961	0.01911	0.02846	0.03779	0.04712	0.05662	0.06573	0.07503
0.00017	0.00962	0.01912	0.02854	0.03772	0.04711	0.05666	0.06573	0.07498
0.00018	0.00966	0.01918	0.02855	0.03781	0.04716	0.05659	0.06568	0.07486
0.00011	0.00973	0.01916	0.02857	0.03776	0.04716	0.05654	0.06563	0.07478
0.00011	0.00970	0.01914	0.02856	0.03779	0.04712	0.05650	0.06564	0.07483
0.00002	0.00962	0.01916	0.02855	0.03781	0.04712	0.05657	0.06572	0.07487
0.00001	0.00961	0.01910	0.02848	0.03778	0.04709	0.05647	0.06574	0.07484
-0.00010	0.00961	0.01894	0.02847	0.03773	0.04712	0.05663	0.06575	0.07501

Tabla 3.10: Valores de las coordenadas en $y(m)$ de los puntos de referencia sobre el vidrio templado.

0	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002
0.0094	0.0095	0.0095	0.0096	0.0096	0.0095	0.0095	0.0095	0.0094
0.0187	0.0188	0.0187	0.0188	0.0188	0.0187	0.0188	0.0187	0.0186
0.0280	0.0279	0.0280	0.0280	0.0280	0.0279	0.0279	0.0278	0.0276
0.0373	0.0372	0.0373	0.0371	0.0371	0.0370	0.0370	0.0369	0.0368
0.0466	0.0464	0.0464	0.0464	0.0461	0.0462	0.0460	0.0459	0.0460
0.0558	0.0558	0.0557	0.0556	0.0554	0.0553	0.0552	0.0551	0.0551
0.0651	0.0651	0.0649	0.0647	0.0644	0.0645	0.0643	0.0644	0.0644
0.0745	0.0743	0.0742	0.0741	0.0738	0.0738	0.0737	0.0737	0.0738

Se tomó una segunda imagen para el análisis del vidrio laminado, así también para el vidrio templado, que son los puntos sobre la muestra se muestra en la Fig.3.19. La imagen observada presenta distorsión, y esto se observa en la desviación de los puntos con respecto a la referencia. Las coordenadas x e y de esta figura se muestran en las Tablas 3.9 y 3.10 respectivamente. Los valores de las coordenadas van de 0 a 7,5cm, que es el valor medido en los ejes x e y

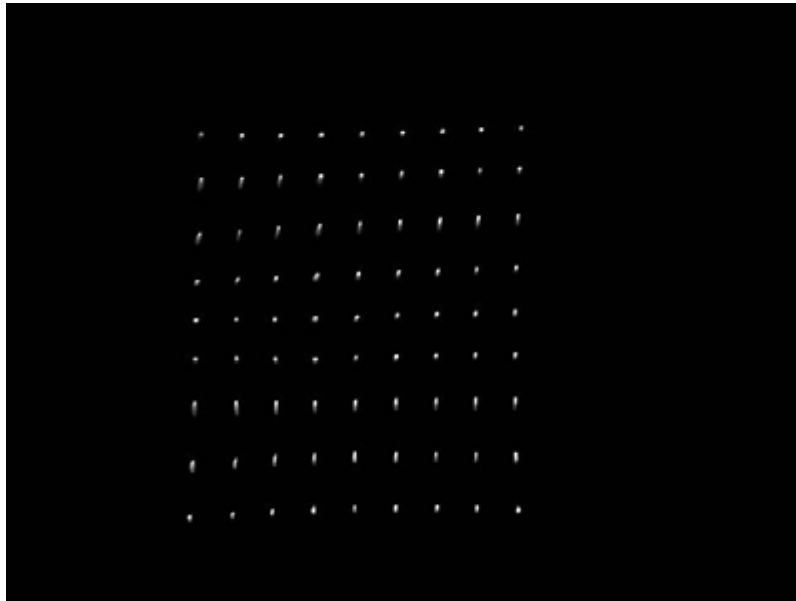


Fig. 3.19: Imagen del patrón de puntos por reflexión del vidrio templado

Tabla 3.11: Valores de las coordenadas en $x(m)$ de los puntos sobre el vidrio templado.

0.0075	0.0150	0.0222	0.0297	0.0372	0.0446	0.0520	0.0591	0.0665
0.0074	0.0149	0.0221	0.0295	0.0370	0.0445	0.0518	0.0589	0.0663
0.0071	0.0145	0.0216	0.0293	0.0367	0.0441	0.0515	0.0586	0.0659
0.0067	0.0142	0.0213	0.0287	0.0365	0.0439	0.0512	0.0583	0.0656
0.0065	0.0139	0.0210	0.0285	0.0362	0.0436	0.0509	0.0581	0.0654
0.0064	0.0140	0.0211	0.0285	0.0360	0.0435	0.0508	0.0581	0.0654
0.0062	0.0139	0.0213	0.0285	0.0359	0.0434	0.0508	0.0581	0.0654
0.0058	0.0137	0.0210	0.0283	0.0358	0.0434	0.0508	0.0582	0.0655
0.0053	0.0132	0.0205	0.0282	0.0358	0.0434	0.0510	0.0583	0.0660

Tabla 3.12: Valores de las coordenadas en $y(m)$ de los puntos sobre el vidrio templado.

0.0019	0.0021	0.0022	0.0020	0.0018	0.0016	0.0013	0.0010	0.0007
0.0108	0.0107	0.0103	0.0100	0.0098	0.0095	0.0093	0.0089	0.0086
0.0216	0.0212	0.0204	0.0197	0.0194	0.0190	0.0187	0.0184	0.0179
0.0306	0.0302	0.0299	0.0294	0.0291	0.0287	0.0285	0.0282	0.0278
0.0381	0.0378	0.0378	0.0377	0.0375	0.0371	0.0368	0.0367	0.0365
0.0456	0.0455	0.0456	0.0456	0.0453	0.0452	0.0449	0.0447	0.0447
0.0545	0.0544	0.0545	0.0543	0.0542	0.0539	0.0538	0.0538	0.0538
0.0661	0.0657	0.0651	0.0647	0.0645	0.0645	0.0644	0.0645	0.0645
0.0765	0.0759	0.0754	0.0750	0.0746	0.0746	0.0746	0.0747	0.0750

En la Figura 3.20 se muestran las aberraciones transversales TA_x y TA_y .

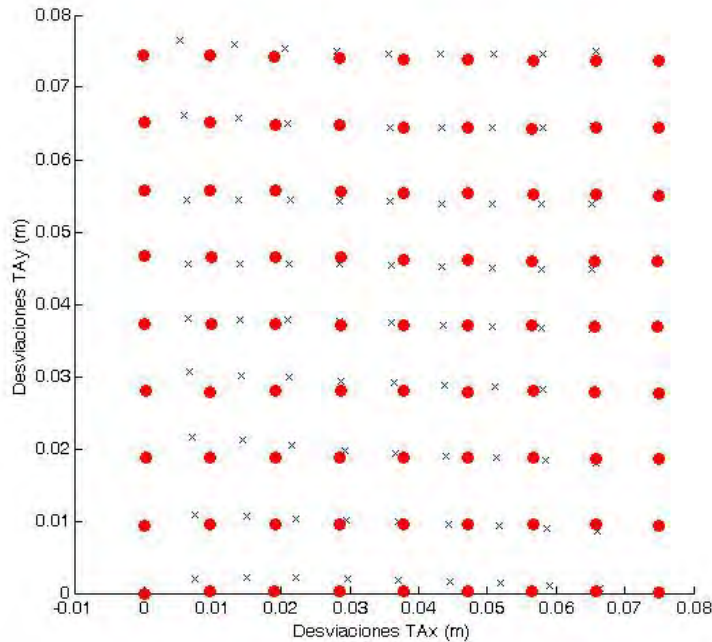


Fig. 3.20: Desviaciones TA_x y TA_y sobre la muestra de vidrio laminado con respecto a la referencia

3.6. Distorsiones en el vidrio de seguridad

El principio básico del sistema es la medición de las desviaciones TA_x y TA_y y pendientes de la superficie a caracterizar; por ello, el uso de detección de centroides de la imagen e integración numérica. La parte óptica del sistema no ofrece una medida directa de estas desviaciones TA_x y TA_y y pendientes; es entonces que a partir de los datos proporcionados por el sistema óptico, se obtiene las distorsiones y finalmente la reconstrucción del frente de onda.

La principal ventaja de medir las distorsiones con el sistema es la reducción de errores debidos a movimientos mecánicos o vibraciones. Además de que el sistema podría permitir la comparación de una muestra de vidrio óptico con uno que no lo es a partir de la cuantificación de las distorsiones.

Las distorsiones o aberraciones transversales TA_x y TA_y para la muestra de vidrio laminado se observan en la siguientes Tablas 3.13 y 3.14 El valor máximo de las distorsiones en el

Tabla 3.13: Distorsión en $x(arcmin)$ medida por reflexión.

13.8786	2.4887	9.2110	20.7780	32.6681	44.1282	55.7955
10.8028	0.4112	11.6182	22.8867	33.9387	45.1788	56.5585
8.3909	2.9648	14.1977	25.2621	36.3225	47.1479	58.0327
6.8376	4.9864	16.5509	27.5449	38.5924	49.3508	60.0327
6.2776	5.9309	18.0017	29.6851	40.5607	51.8688	62.5212
6.1933	6.7803	19.3769	31.2472	42.8770	54.4272	64.9102
6.4432	7.1741	20.1442	32.9647	44.8003	56.0786	67.1118

Tabla 3.14: Distorsión en $y(arcmin)$ medida por reflexión.

24.9237	21.2393	18.0712	15.9398	13.6945	12.6095	11.8656
19.9655	16.8189	13.4367	10.6311	8.3635	6.3830	4.5696
13.7152	11.0821	8.5219	5.8036	3.2871	0.7368	1.6678
6.8001	4.7703	2.3581	0.1046	2.4465	5.1794	7.7972
1.0328	2.3539	4.2745	6.3803	8.5631	10.9426	13.7384
9.3934	10.0894	11.6229	13.3163	15.3318	18.1631	20.2490
17.9999	18.6946	19.8463	20.7070	22.9410	25.2505	27.4500

vidrio laminado de acuerdo a los estándares de calidad es como máximo de $2 arcmin$, hablando la zona visible de un conductor. En nuestra tabla podemos observar valores muy elevados, esto resulta de haber tomado como referencia un vidrio plano en lugar de un vidrio curvo, es decir, lo ideal es comparar un vidrio curvo perfecto con uno que no tiene calidad.

En las Tablas 3.15 y 3.16 se presentan las distorsiones analizadas por transmisión. Se observan distorsiones del orden de $1 arcmin$.

Tabla 3.15: Distorsiones en $x(arcmin)$ analizadas por transmisión.

0.5615	0.7007	0.9707	0.9671	0.9303	0.5757	0
0.7410	0.6100	0.8632	1.1881	1.0579	0.6197	0.0902
0.3539	0.8505	0.9210	1.1137	1.3457	0.8044	0.1822
0.8410	0.8226	1.1349	1.3879	1.1419	0.8081	0.3403
0.6885	0.6928	1.0902	1.4035	1.1945	1.1206	0.4499
0.4990	0.6059	0.9959	1.2188	1.1764	1.1105	0.5571
0.4912	0.5159	1.1318	1.0914	1.1095	1.3765	0.9607

Tabla 3.16: Distorsiones en $y(\text{arcmín})$ analizadas por transmisión.

0.2044	0.0679	0.3647	0.3597	0.8692	0.8660	0.7569
0.0744	0.2668	0.1605	0.3184	0.0312	0.2385	0.3894
0.5682	0.4470	0.5518	0.3477	0.2192	0.2073	0.1373
0.3285	0.5415	0.5821	0.4439	0.6229	0.3003	0.4075
0.2569	0.3177	0.6786	0.6093	0.3905	0.1805	0.2938
0.2603	0.0741	0.3470	0.5870	0.3773	0.4718	0.3249
0.0000	0.1849	0.1625	0.2889	0.3794	0.3481	0.2702

Las distorsiones T_{Ax} y T_{Ay} para la muestra del vidrio templado se observan en las Tablas 3.17 y

Tabla 3.17: Distorsiones T_{Ax} en el vidrio templado.

26.8483	19.8734	11.6171	4.5724	1.9520	8.8438	16.2982	23.7753	30.5993
26.4940	19.1834	10.6127	3.8087	2.6552	9.5249	17.4691	24.5886	31.5522
24.8391	17.4187	9.0488	2.8135	3.4994	10.6934	18.5212	25.7617	32.6099
23.4575	16.2438	7.4391	0.6992	4.7432	11.6850	19.5412	26.5381	33.2030
22.8399	15.0706	6.7613	0.1666	5.6785	12.6821	20.2693	27.1273	33.8410
22.4871	15.3436	7.0638	0.1910	6.3974	13.1050	20.4566	27.2149	33.8766
22.2309	15.2801	7.5989	0.2535	7.0211	13.3825	20.8193	27.4566	33.9923
20.7989	14.7324	6.8822	0.6861	7.1190	13.2699	20.5283	27.1553	33.4663
19.3658	12.9703	5.7792	1.0258	7.0199	13.4981	20.3793	26.7712	32.4654

Tabla 3.18: Distorsiones T_{Ay} en el vidrio templado.

6.8177	6.8354	6.9135	6.2130	5.5816	4.9187	3.7734	2.5865	1.7798
4.9050	4.2474	2.8128	1.6050	0.8867	0.0164	0.8534	2.1330	3.0924
10.1927	8.6993	5.9167	3.4240	2.3818	1.0628	0.0877	1.0308	2.3216
9.1727	8.0893	6.9301	5.2775	3.9689	3.0682	2.0379	1.4244	0.5085
3.0225	2.2971	2.0071	1.9327	1.2321	0.4792	0.6986	0.8192	1.2514
3.7470	3.4942	3.0273	2.9211	2.8135	3.6480	3.8412	4.3130	4.4427
4.8532	4.9271	4.3204	4.4308	4.2027	4.9910	4.8745	4.5926	4.6216
3.4551	2.2159	0.6838	0.0929	0.0646	0.0388	0.0737	0.4175	0.4689
7.2000	5.4445	4.3674	3.2250	2.8502	3.1328	3.1649	3.3744	4.2910

En la Fig. 3.21 se muestra la correspondiente reconstrucción del frente de onda de la muestra de vidrio laminado por reflexión.

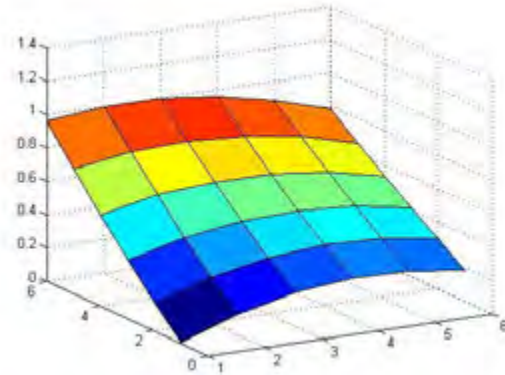


Fig. 3.21: Reconstrucción del frente de onda de la muestra de vidrio laminado por reflexión

La Fig. 3.22 muestra el perfil obtenido a partir de las medidas experimentales, utilizando el método de integración trapezoidal. Se aprecian las diferencias de camino óptico de la propagación de la luz presente en las derivadas a lo largo de los puntos de muestreo. El perfil obtenido por reflexión es mucho más suave que el obtenido por transmisión. Actualmente existen estudios de comparación de métodos de integración por lo tanto es probable que al utilizar algún otro método de integración los detalles sean más visibles y exista un menor error de propagación.

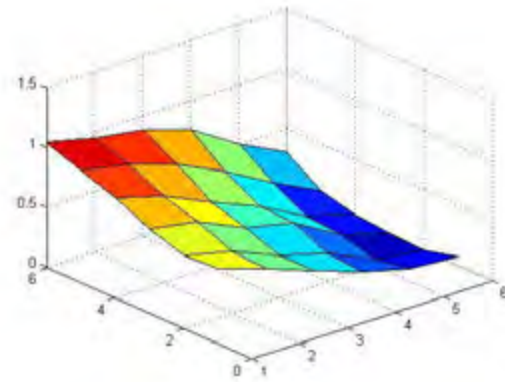


Fig. 3.22: Reconstrucción del frente de onda de la muestra de vidrio laminado por transmisión

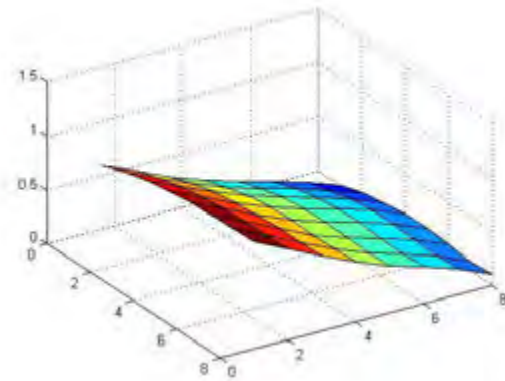


Fig. 3.23: Reconstrucción del frente de onda de la muestra de vidrio templado por reflexión

Estas tres reconstrucciones representan las tres muestras utilizadas en el laboratorio. La reconstrucción del frente de onda, utilizando la prueba de Hartmann, nos permite observar las deformaciones que existen en el vidrio de seguridad. Esta técnica puede ser utilizada para la creación de patrones de comparación en el caso del vidrio de seguridad.

3.7. Discusión de resultados

Tras la revisión bibliográfica de los métodos de caracterización óptica de distorsiones, se optó por el sensor de Hartmann, dadas las ventajas que se presentan sobre otros métodos. Entre estas ventajas están:

- No requiere una técnica mecánica de barrido, por lo tanto, no requiere de elementos electromecánicos adicionales.
- Permite caracterizar toda la matriz del detector.
- El montaje experimental es relativamente simple, si lo comparamos con los arreglos interferométricos.
- Al tratarse de un patrón de irradiación, la alineación del sistema no es tan crítica.

Utilizando el sensor de Hartmann, se estudió las distorsiones en muestras de vidrio de seguridad. El propósito principal del trabajo fue el de cuantificar estas distorsiones que se obtuvieron a partir de estas muestras de vidrio. Los resultados obtenidos fueron valores de distorsiones grandes teniendo en cuenta que un vidrio puede dividirse en secciones y la tolerancia cambia de acuerdo a cada sección. Estas muestras no fueron comparadas contra otras, ya que únicamente fueron partes tomadas de todo un vidrio de seguridad y ninguna correspondía a una forma similar. Estas muestras de vidrio fueron analizadas por transmisión y reflexión. El resultado fue que se obtuvieron mayores distorsiones en el análisis por reflexión, esto es debido a que se hace un análisis para una sola capa de vidrio. Ambos análisis son importantes, pues durante el proceso de fabricación del vidrio, el análisis de las distorsiones es requerido durante todo el proceso.

Capítulo 4

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

4.1. Conclusiones

Se desarrolló una prueba tipo Hartmann que permite la medida de las distorsiones sobre el vidrio de seguridad con cierta resolución temporal y espacial. Sobre este diseño, se realizó la prueba para dos tipos de materiales: vidrio laminado y vidrio templado. En el arreglo utilizado para el análisis de vidrio laminado se utilizó un elemento polarizador para evitar un aumento de la dinámica de las aberraciones de bajo orden. De aquí se desprende la idea de que el análisis se realice utilizando una sola capa de vidrio antes de que se forme el vidrio laminado y realizar un análisis posterior a este.

A través de la reconstrucción de la forma de onda, se midió la forma de la superficie reflejante. Donde para realizar la medición de ésta, se utilizó la prueba estilo Hartmann, donde el patrón y la posición de los puntos se refleja en la superficie del vidrio de seguridad (superficie reflejante). Esto resulta útil al momento de hacer el diseño de un vidrio curvo sin distorsiones para ser comparado con otros diseños de vidrio curvo donde se requiera el análisis de las distorsiones.

La dinámica de las aberraciones es mayor en el caso del vidrio templado en comparación con el vidrio laminado debido a su proceso de fabricación. Esto es debido a que el vidrio templado en ocasiones es utilizado para la decoración de electrodomésticos, en cambio, el vidrio laminado resulta ser una protección para el usuario.

Una serie de opciones con nuevas medidas y mejoras sobre este tipo de sistemas ya implementados, queda abierta para futuros estudios. Por ejemplo, se contempla la posibilidad de aumentar la sensibilidad del sensor de estilo Hartmann propuesto. Lo que permitirá reducir las variabilidades de las medidas que se obtienen, de esta manera, obtener distorsiones cuantitativas que indiquen si el vidrio tiene calidad o no y se tenga la confianza del registro de pequeños cambios en las aberraciones. Este trabajo representa el inicio de una serie de estudios que habrán de desarrollarse para proponer una serie de parámetros objetivamente medibles, que den origen a una norma que sirva para controlar la calidad de las distorsiones presentes en la reflexión en parabrisas automotrices.

4.2. Trabajo Futuro

Uno de los aspectos recientes explorados de esta técnica es el acoplamiento de este tipo de sistemas utilizando instrumentos de óptica adaptativa. Por lo tanto la mejora que podría introducirse es la implementación de una matriz de lentes para observar los puntos más débiles, haciendo más precisa la determinación de los centroides.

Otra idea consiste en utilizar un simulador de las distorsiones que se podrían generar anticipando de alguna manera la calidad del vidrio de seguridad. Esto además de extender los algoritmos en entornos visuales para uso de los operarios, podría formar un sistema integral para la detección de distorsiones en el vidrio de seguridad.

Automatizar la medición de la forma del vidrio de seguridad Mejorar la optomecánica de nuestro arreglo para realizar mediciones sobre superficies de mayor tamaño y a la vez hacer eficientes los algoritmos de localización de centroides y reconstrucción de frente de onda, de tal manera que el operario o cualquier usuario pueda utilizar el sistema sin dificultad.

Referencias

- [1] Quentin R. Skrabec Jr., *Michel Owens and the glass industry*, Pelican Publishing Company, (2007).
- [2] Stenzel Holger, Koll Bernhard, Becker Günter; "Procedimiento y lámina para la fabricación de vidrios de seguridad compuestos", No. 2 204 738, España, (2002).
- [3] Malacara D., *Óptica básica*, Fondo de Cultura Económica, (2004).
- [4] Hardy J., *Adaptive optics for astronomical telescopes*, Oxford University Press, Nueva York (1998).
- [5] Acosta P., "Método para producir un cristal de vidrio laminado libre de obstrucción óptica causada por curvatura, uso de una película portadora particular para la producción del cristal de vidrio laminado y películas portadoras particularmente adecuadas para el método de uso"; No. 963289, Alemania, (1996).
- [6] Hetch E., *Óptica*, 3th ed., Addison Wesley Longman Inc., (2000).
- [7] Born M. and Wolf E., *Principles of optics*, 7th ed., Cambridge University Press, (1959).
- [8] Bausch and Lomb Abbe-3L Refractometer, Reference Manual: "Description of the Instrument". P 6.
- [9] Malacara D., *Optical shop testing*, 3th ed., John Wiley & Sons, Inc., (2007).

- [10] Turner J, Cecil F., *Photoelasticity principles and methods*, Dover Publications, Inc., (1960).
- [11] Sirohi R. and Siong F., *Optical methods of measurement*, Marcel Dekker, Inc., (1999).