

68
24.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGON**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECANICO
DEL ZINALCO POR INTERFEROMETRIA
HOLOCRAFICA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
ESPECIALIDAD MECANICA**

**P R E S E N T A :
IRMA MENA LOPEZ**

**ASESOR: FIS. LUIS ESCOBAR ALARCON
COASESOR: M. en C. DANIEL ALDAMA AVALOS**

SAN JUAN DE ARAGON, EDO. DE MEX.

1997



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres

Por que de no haber contado con su amor, apoyo y la armonía familiar de la cual nos rodearon a mis hermanas y a mi, desde que éramos niñas; de no haber sido así, yo no estaría aquí, adjudicándoles por completo la culminación de mi formación como profesionalista. Madre, bendita palabra que la vida me permite pronunciar, sinónimo de entrega total y desinteresada, con la única satisfacción de ver felices a sus hijos. Padre por tu esfuerzo y dedicación para que no nos faltara nada, aún en los tiempos difíciles, impulsándonos siempre a salir adelante. Ambos, a su manera me han marcado un ejemplo a seguir y éste trabajo, es sólo parte del resultado.

Gracias por haber confiado en Mi.

Los Quiero Mucho.

A mis Hermanas

Rocio (Flaca), Alicia (Lili), desde siempre hemos estado juntas, conviviendo, ayudándonos mutuamente, hemos compartido tantas cosas, que ahora quiero compartirles de este triunfo, que para mi es tan importante y se que también lo es para ustedes.

Las Quiero Mucho.

A toda mi Familia

Muchas veces no es posible tener a los seres queridos tan cerca como quisiéramos, pero esto no me impide el otorgarles el mérito que merecen, por haber colaborado, cada cual en su momento en mi formación personal.

A mi Novio Bogart

Quién ha permanecido a mi lado desde que llegó a mi vida, el único capaz de inspirar en mí este sentimiento tan maravilloso, con el cual me ha llenado de la alegría de vivir y de esa confianza que me motiva a seguir en el camino; camino que comparte conmigo y se que nunca me dejará caer, porque hasta ahora me ha rodeado de amor, atenciones, mimos, palabras de apoyo... ¡Todo!, tan solo por verme sonreír.

Te Amo.

A la Familia Torres

A los que he llegado a querer mucho, por ser una familia tan especial, que me ha brindado la oportunidad de formar parte de su vida. De ustedes he aprendido muchas cosas, con su admirable entereza con la que acostumbra superar los problemas que les impone la vida. Me han enseñado que "No se llora, se lucha" y con ello, ahora los considero un factor muy importante, que me ayudó a concluir mi trabajo.

Muchas Gracias.

A todos mis Amigos

Especialmente a aquellos con los que he compartido los mejores momentos de mi vida: Janett Pareyán, Juan Campuzano, Ismael Ruiz, Luisa, Iris, Erika, Lety, Santa, Brenda, Blanquita y Huguito, Daniela y Aletis, Astrid y Huicho, Manita y Chakán, Sylvita, Aaroncito, Celso, Robert, Marco, etc., etc., etc. Cada uno de los mencionados y demás amigos, compañeros y conocidos, que de alguna forma han estado conmigo, me dieron el más grandioso regalo: Su Amistad, a la que correspondo de igual forma.

Al Fís. Luis Escobar Alarcón

Por haber sido quien me contagió su entusiasmo, ante la "Magia de la Holografía" y me proporcionó los conocimientos básicos para la realización de mi Tesis.

Al Ing. Daniel Aldama Ávalos

Por ser de las pocas personas que se preocuparon porque aprovechara mis conocimientos al máximo y al cual agradezco su atención prestada e incondicional asesoría.

Al Dr. Gabriel Torres Villaseñor

Pues de no haber sido por usted, esta Tesis no se habría realizado como tal.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, particularmente a la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón y a Todos mis Profesores, por ser quienes me inculcaron las bases para mi formación como profesionista. A Miguel Fernández Gausti por permitirme complementar mi trabajo en el Laboratorio de Óptica Cuántica de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. Al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, en forma muy especial al Ing. Gustavo Molina y Jorge Vizuet por haberme permitido llevar a cabo mi Tesis en sus instalaciones.

A todos los que me faltaron y que ven con buenos ojos, este gran paso que he dado, hacia lo que es el principio de mi desempeño Profesional.

¡ GRACIAS !

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO
MECÁNICO DEL ZINALCO POR
INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA**



ÍNDICE

Introducción.....	1
Cap I. La Holografía.....	3
1.1. Conceptos Básicos.....	4
1.1.1. Interferencia.....	5
1.1.2. Difracción.....	9
1.1.3. Coherencia.....	11
1.2. Tipos de Hogramas.....	13
1.2.1. Hograma de Transmisión.....	14
1.2.2. Hograma de Reflexión.....	15
Cap II. Interferometría Holográfica.....	17
II.1. Técnicas de Interferometría Holográfica.....	18
II.1.1. Interferometría Holográfica de Tiempo Real.....	19
II.1.2. Interferometría Holográfica de Doble Exposición.....	21
II.1.3. Interferometría Holográfica de Tiempo Promedio.....	22
II.2. Análisis Teórico de la Técnica de Doble Exposición.....	23
II.2.1. Interpretación de Interferogramas.....	25
II.3. Aplicaciones de la Interferometría Holográfica.....	30
Cap III. El Zincoló.....	32
III.1. Propiedades Físicas y Mecánicas de un Material.....	33
III.1.1. Propiedades Físicas del Zincoló.....	38
III.1.2. Propiedades Mecánicas del Zincoló.....	39

Cap IV. Arreglo Experimental.....	43
IV.1. Requerimientos Experimentales.....	45
IV.2. Obtención de Interferogramas.....	47
IV.3. Experimentos Realizados.....	49
IV.3.1. Lámina de Zinalco (Área de Estudio Circular).....	49
IV.3.2. Lámina de Zinalco (Área de Estudio Rectangular).....	50
Cap V. Discusión de Resultados.....	53
V.1. Lámina Circular de Zinalco.....	53
V.1.1. Determinación del Campo de Desplazamientos.....	56
V.1.2. Determinación del Campo de Deformaciones.....	63
V.1.3. Determinación del Campo de Esfuerzos.....	64
V.1.4. Cálculo de Momentos y Fuerza Cortante.....	66
V.2. Lámina Rectangular de Zinalco.....	67
V.2.1. Obtención del Coeficiente de Poisson del Zinalco.....	67
Conclusiones.....	69
Apéndice A. El Láser.....	71
Apéndice B. Procesado Químico.....	78
Apéndice C. Teoría de la Elasticidad.....	82
Bibliografía.....	94

INTRODUCCIÓN

A través del proceso fotográfico el hombre ha sido capaz de grabar y retener cualquier escena que perciban sus ojos, permitiendo el registro permanente de diferentes hechos. Sin embargo, el proceso fotográfico limita el tipo de información que se puede registrar, ya que se graba solamente la distribución de amplitudes, esto es, las diferentes intensidades luminosas provenientes del objeto o escena de interés, dando como resultado una imagen bidimensional. La ciencia y tecnología modernas, cuentan ahora con un método más, que permite un registro de imágenes con mayores ventajas que la fotografía. *La Holografía.*

La Holografía es un método único con el cual es posible almacenar imágenes con la información completa en amplitud y en fase (características propias de la luz que, en este caso, reflejan y/o dispersan los objetos), con la ventaja de poderlas reproducir de igual forma, en amplitud y fase, obteniendo una reproducción indistinguible de la escena original, que incluye características de tridimensionalidad y paralaje. La palabra *Holograma* proviene del griego *holos* (entero) y *grafos* (grabado), en alusión al hecho de poder registrar y reconstruir la información completa contenida en una onda.

Dado a que es posible registrar la forma y posición exacta de un objeto en dos estados diferentes, entonces también es posible comparar interferométricamente el objeto consigo mismo, para obtener una medida precisa de la deformación o movimiento del objeto entre los dos estados. Esta técnica de medición es conocida como *Interferometría Holográfica*. Frecuentemente, debido a causas muy variadas, una superficie puede tener deformaciones pequeñísimas que no son detectables a simple vista. A pesar de su reducida magnitud, estas deformaciones pueden ser el síntoma de problemas graves presentes o futuros. Es aquí donde la Interferometría Holográfica tiene un papel muy importante, detectando y midiendo estas pequeñísimas deformaciones de la superficie.

En el presente trabajo se realiza un estudio del comportamiento mecánico de la aleación Zn-22% Al-Cu, llamada Zinalco, que fue creada en las instalaciones del Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México, por el Dr. Gabriel Torres Villaseñor y colaboradores. Este material tuvo su origen, dentro de un programa de investigación sobre el Zinc y sus aleaciones, con el objeto de desarrollar nuevos campos de aplicación para este metal, del cual México es uno de los principales productores a nivel mundial y así evitar su desplazamiento por los plásticos y el aluminio. El Zinalco demostró contar con mejores características mecánicas a las esperadas, dando una panorámica de excelentes expectativas para su comercialización, ya que se trata de un material nuevo y con propiedades no encontradas en ningún otro. Es por esto, que se le consideró como una inmejorable opción, para ser nuestro objeto de estudio.

Mediante la técnica de Interferometría Holográfica, es posible observar el comportamiento del Zinalco ante microdeformaciones y/o microesfuerzos, lo que nos permite prever zonas críticas de deformación, al someterlo a grandes esfuerzos. En su defecto, esta técnica nos permite contribuir con información, que pudiera ser de utilidad en estudios posteriores de tan innovadora aleación.

El trabajo está estructurado de la siguiente forma en los primeros capítulos se darán los principios básicos de Holografía e Interferometría Holográfica, así como algunas de las diferentes técnicas utilizadas, para la aplicación de cada una de ellas (Capítulos I y II). Enseguida se dará un bosquejo de las propiedades físico-mecánicas del Zinalco y las ventajas de utilización que presenta, ante su comparación con otros materiales afines (Capítulo III), a continuación se describirá el arreglo experimental utilizado (Capítulo IV), los resultados obtenidos con su respectivo análisis (Capítulo V) y finalmente las conclusiones del estudio, adjuntas a algunas recomendaciones pertinentes.

CAPÍTULO I

" LA HOLOGRAFÍA "

CAPÍTULO I

LA HOLOGRAFÍA

El desarrollo inicial de la holografía se debió a Dennis Gabor del *Imperial College of Science and Technology* [1], quien tratando de mejorar la resolución del microscopio electrónico propuso grabar, además de la información de amplitud, la información de fase del objeto con una onda de referencia monocromática. En ese momento no funcionó como se esperaba, en parte debido a que en el proceso de reconstrucción, las imágenes real y virtual quedaban en la misma línea, esto era consecuencia del arreglo para grabar el holograma, que estaba limitado por la longitud de coherencia de la fuente de luz utilizada (del orden de mm), de tal manera que además solo permitía el uso de objetos delgados como por ejemplo transparencias fotográficas

La invención del láser en 1960, dio a los investigadores una fuente de luz con una gran longitud de coherencia (del orden de metros), originando el invento de la holografía *fuera de eje* por Leith y Upatnieks [2], que resolvía el problema de Gabor, al hacer posible que las imágenes que se obtienen al reconstruir los frentes de onda respectivos estuvieran separados en el espacio, permitiendo el registro y reconstrucción de objetos grandes y escenas completas. Los frentes de onda reconstruidos corresponden a imágenes perfectamente tridimensionales en todos sus aspectos, aunque *contaminados* por efectos de *speckle* y la monocromaticidad del láser

Al grabar un holograma, lo que se registra es un patrón de interferencia, generado al hacer interferir un haz de referencia y la luz reflejada y/o dispersada por el objeto (haz objeto). Para tal efecto, la fuente de luz debe ser coherente y la luz láser cumple con este requisito de forma admirable

En los años posteriores al invento de Leith y Upatnieks, se han hecho muchas mejoras y simplificaciones a la técnica, hoy en día los hologramas se ven cotidianamente en cubiertas de revistas, tarjetas de crédito, engomados, etc. y tiene muchas aplicaciones técnicas tales como interferometría holográfica, obtención de elementos ópticos, entre otros

1.1. Conceptos Básicos

A finales del siglo XVII, Christian Huygens [4] propuso que la luz se propaga como una serie de ondas y que cada punto de esta onda es capaz de convertirse o generar un nuevo frente de ondas. Se ha descrito a la luz como energía que atraviesa el espacio en forma de onda. El tipo de ondas producidas se llama sinusoidal.

En la Figura 1.1 se presenta una onda sinusoidal típica, en la cual la longitud de onda usualmente simbolizada por la letra griega λ (lambda), es la distancia entre la cresta de una onda y la que le sigue. La frecuencia se simboliza con la letra griega ν (nu), que es el número de longitudes de onda que pasan por un punto en la unidad de tiempo. La longitud de onda y la frecuencia tienen una relación recíproca $\lambda\nu = c$. Si la longitud de onda es corta, la frecuencia es grande y viceversa. La amplitud (a) representa la altura de la onda (en una cresta o en un valle) está relacionada con la intensidad luminosa.

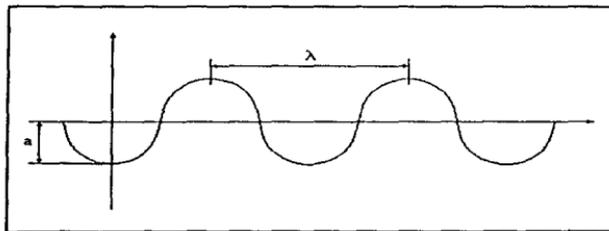


Figura 1.1. Onda Sinusoidal Típica.

La luz es una radiación electromagnética y toda radiación electromagnética viaja en el vacío a aproximadamente 3×10^8 m/s, que es una constante y se le representa con la letra c . Las ondas de luz pueden oscilar a diferentes frecuencias. La frecuencia de oscilación de la radiación electromagnética en la región visible es aproximadamente 10^{16} Hz. La longitud de onda de la luz visible está entre 400 y 700 nanómetros.

En el proceso holográfico se involucran dos fenómenos físicos que son interferencia y difracción, además de una propiedad de la luz, la coherencia. En este capítulo se mencionarán las ideas fundamentales para comprender cada uno de estos fenómenos.

1.1.1. Interferencia

La teoría ondulatoria de la luz fue demostrada por Thomas Young [5] en 1802 con un experimento muy sencillo (Figura 1.2). Young forzó a la luz proveniente de una fuente luminosa, a pasar por un pequeño orificio y de ahí, a través de dos ranuras separadas una fracción de pulgada una de la otra. Finalmente hizo coincidir la luz proveniente de estas ranuras en una pantalla, obteniendo un patrón de interferencia sobre la misma.

Lo anterior tiene una explicación muy sencilla. Dos ondas luminosas que se superponen en la misma región del espacio, pueden sumarse de forma algebraica. Esto puede verse en la Figura 1.3. La Figura 1.3a muestra dos ondas que están en fase, lo cual significa que tanto las crestas como los valles coinciden. Cuando se suman crean una onda, cuya amplitud, es la suma de las amplitudes de ambas ondas. Este caso es el denominado como interferencia constructiva total. En la Figura 1.3b pueden observarse dos ondas desfasadas 180° . En este caso las crestas de una de ellas coincide con los valles de la otra. La suma algebraica de estas dos ondas es igual a cero, este es un ejemplo de interferencia destructiva total. En general, no siempre vamos a tener una interferencia completamente destructiva o constructiva, sino que habrá un cierto grado de desfase entre las ondas.

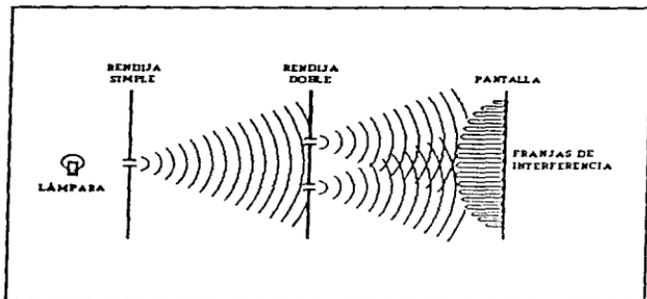


Figura 1.2. Interferómetro de Young. [6]

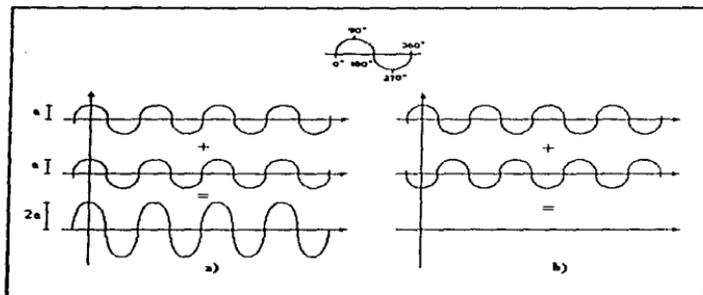


Figura 1.3. Superposición de ondas, a) interferencia constructiva, b) interferencia destructiva [5].

La interferencia, la podemos producir cuando dos ondas luminosas de exactamente la misma frecuencia se superponen en la misma región del espacio, por ejemplo, sobre una pantalla. Además de tener la misma frecuencia, su diferencia de fase y por lo tanto la distancia entre las crestas de ambas ondas, deben permanecer constantes en el tiempo. Esto es prácticamente posible, sólo si la luz de ambas ondas proviene de la misma fuente luminosa. Pero si es solamente una fuente luminosa la que produce la luz, los dos haces luminosos que se interfieren deben generarse de alguna manera de la misma fuente. Existen dos procedimientos para lograr esto denominamos al primero división de amplitud y al segundo división de frente de onda. Usando estos dos métodos básicos se ha diseñado una gran cantidad de interferómetros, con los que se pueden efectuar medidas sumamente precisas. Las Figuras 1.2 y 1.4 muestran dos interferómetros muy comunes, el primero es el ya mencionado, sistema de dos rendijas de Young, que produce interferencia por división de frente de onda y el segundo es el interferómetro de Michelson, que produce interferencia por división de amplitud. Sin duda el personaje más destacado en el terreno de la interferometría es Albert Abraham Michelson (1852-1931) [6], quien realizó una gran multitud de experimentos metroológicos, que lo hacen merecedor al nombre del padre de la interferometría.

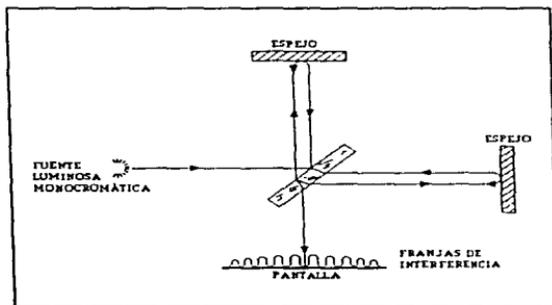


Figura 1.4. Interferómetro de Michelson. [6]

La interferometría es una herramienta indispensable en muchas actividades en las que sea necesario realizar mediciones. A partir de 1947 se han extendido estas técnicas a las ondas de radio, iniciándose así la radiointerferometría astronómica. Hoy en día, por medio de técnicas interferométricas se puede realizar una gran variedad de medidas sumamente precisas, entre las que podemos mencionar:

a) Medida y Definición del Metro Patrón. El primero que tomó la longitud de onda de la luz como referencia para especificar longitudes de objetos fue Michelson. Actualmente, con el láser, es mucho más simple la medición del metro por interferometría. En 1960, el metro fue definido como igual a 1 650 763.73 longitudes de onda en el vacío, de la luz emitida en una cierta línea espectral de kriptón-86.

b) Medida de las Deformaciones de una Superficie. Frecuentemente, debido a causas muy variadas, una superficie puede tener deformaciones pequeñísimas que no son detectables a simple vista. A pesar de su reducida magnitud, estas deformaciones pueden ser el síntoma de problemas graves presentes o futuros. Como por ejemplo, podemos mencionar una fractura de un elemento mecánico de un avión o de una máquina. Es aquí donde la interferometría tiene un papel muy importante, detectando y midiendo estas pequeñísimas deformaciones de la superficie. Esta aplicación de las técnicas interferométricas es especialmente útil y poderosa si se le combina con técnicas holográficas, a lo que se le conoce como interferometría holográfica.

c) Determinación de la Forma Exacta de una Superficie. Las superficies ópticas de los instrumentos modernos de alta precisión tienen que tallarse de tal manera que no tengan desviaciones de la forma ideal, mayores de una fracción de la longitud de onda de la luz (del orden de centésimas de micra). Es fácil comprender lo difícil que resulta tallar una superficie tan grande, como lo es la de un telescopio, pues el principal problema es medir la forma de la superficie con respecto a la forma ideal. Esto se hace mediante interferometría, con técnicas muy difíciles y complicadas que no es posible describir aquí.

d) Alineación de Objetos Sobre una Línea Recta Perfecta. La banca o base de un torno de alta precisión, por ejemplo, debe ser tanto más recta cuanto más fino sea el torno. En este problema y muchos otros en los que se requiera alinear algo con muy alta precisión, la interferometría es un auxiliar muy útil.

e) Determinación muy Precisa de Cambios del Índice de Refracción de Materiales Transparentes. Los vidrios ópticos, cristales o plásticos que se utilizan en las lentes, prismas y demás elementos ópticos tienen que ser de una alta homogeneidad tanto en su transparencia como en su índice de refracción. Esta homogeneidad de los materiales transparentes se mide por medio de interferometría.

f) Determinación muy Precisa de Velocidades o de Variaciones en su Magnitud. Cuando una fuente luminosa se mueve con respecto al observador, es bien sabido que la longitud de onda de la luz tiene un cambio aparente, alargándose o acortándose, según el objeto luminoso se aleje del observador o se acerque a él, respectivamente. Este es el llamado efecto Doppler. Por medio de interferometría se pueden detectar y medir variaciones sumamente pequeñas en la longitud de onda, lo que permite detectar movimientos o cambios también muy pequeños en la velocidad de un objeto.

g) Medición de Ángulos. Los ángulos al igual que las distancias, también se pueden medir con muy alta precisión por medio de técnicas interferométricas.

1.1.2. Difracción

Un cuerpo opaco colocado a medio camino entre una pantalla y un fuente puntual forma una sombra intrincada hecha de regiones claras y oscuras muy diferentes a las que uno esperaría encontrar. El trabajo de Francesco Grimaldi [7] en el siglo XVII fue el primer estudio detallado que se publicó sobre esta desviación de la luz de su propagación rectilínea, algo que él llamó *diffraction*. El efecto es una característica general de los fenómenos ondulatorios que ocurren donde quiera que una porción de frente de onda es obstruido de alguna manera. Si en el transcurso del encuentro con un obstáculo transparente u opaco se altera una región del frente de onda en amplitud o fase, ocurrirá difracción. Los varios segmentos de frente de onda que se propagan más allá del obstáculo interfieren para producir el patrón de difracción.

No hay distinción física entre interferencia y difracción. Sin embargo, se ha vuelto común, aunque no siempre apropiado hablar de interferencia cuando se está considerando la superposición de unas cuantas ondas y difracción cuando se trata de un gran número de ondas.

En las figuras 1.5 y 1.6, se muestran dos ejemplos de difracción



Figura 1.5. Fotografía de la difracción ocasionada por una mano sosteniendo una moneda. [7]

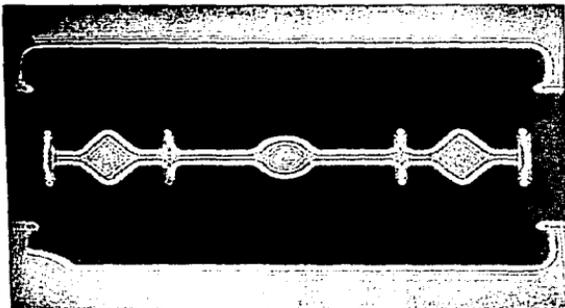


Figura 1.6. Fotografía de la difracción provocada por una navaja. [8]

1.1.3. Coherencia

El láser es una fuente luminosa con dos propiedades muy especiales e importantes de la luz, que técnicamente reciben los nombres de coherencia espacial y coherencia temporal. Consideremos una fuente luminosa muy pequeña a la que llamaremos *fente puntual*, que emite luz cuyos frentes de onda son esféricos y concéntricos con dicho punto. Si colocamos una lente convergente frente a esa fuente luminosa, de tal manera que quede sobre el foco de la lente, como se muestra en la figura 1.7a la luz saldría entonces de la lente en un haz de rayos paralelos, o lo que es lo mismo, con frentes de onda planos y paralelos entre sí. Como las fuentes luminosas no son infinitamente pequeñas, la luz no saldrá como un haz de rayos paralelos, sino como una multitud de haces, todos viajando en diferentes direcciones como se muestra en la figura 1.7b. De esta manera se esparce la energía luminosa en forma de un cono divergente. Se dice que una fuente infinitamente pequeña o puntual tiene una coherencia espacial perfecta, mientras que la extendida la tiene muy pobre [6].

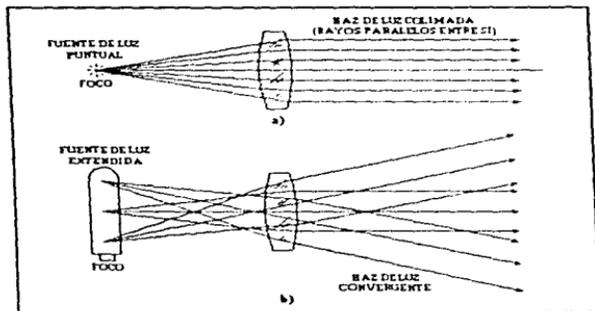


Figura 1.7. Lente convergente con una fuente luminosa colocada en su foco anterior, a) fuente puntual, b) fuente extendida [6].

Desafortunadamente, son muchísimas las situaciones en las que se requiere tener una gran coherencia espacial por ejemplo, para tener un frente de onda único en interferometría, para concentrar la energía luminosa en un punto muy pequeño a fin de obtener una densidad de energía muy alta, o para enviar el haz luminoso a gran distancia. Se puede obtener una fuente luminosa de gran coherencia espacial, colocando una hoja de papel aluminio con una perforación muy pequeña, sobre una fuente de luz extendida, sin embargo, de esta manera se reduce considerablemente la intensidad luminosa. La luz láser tiene una coherencia espacial casi perfecta, sin ningún sacrificio de su intensidad.

La segunda propiedad del láser tiene que ver con la cantidad de colores que emite la fuente luminosa simultáneamente, es decir, con el grado de monocromaticidad. Por ejemplo, una fuente de luz blanca no es nada monocromática, pues emite todo los colores del arcoiris al mismo tiempo.

Una fuente de luz lo bastante monocromática se puede obtener mediante varios procedimientos basados en los fenómenos de la dispersión de la luz en un prisma, en el de la difracción en una rejilla de difracción o en el de la interferencia en los filtros de interferencia. Desafortunadamente todos estos métodos se basan en la eliminación de los colores indeseados, pero de ninguna manera refuerzan al deseado. Por lo tanto el haz de luz se hace sumamente débil. Mientras más monocromático sea un haz luminoso, se dice que tiene más coherencia temporal. La luz de láser tiene coherencia temporal casi perfecta, es decir, tiene una alta monocromaticidad.

Recordemos ahora que la luz es una onda electromagnética idéntica en todo a una onda de radio o de televisión, solo que su frecuencia es mucho más alta, y por lo tanto su longitud de onda es mucho más corta. Cuando se dice que la fuente de luz debe ser muy pequeña para tener una coherencia espacial grande, lo pequeño o grande de la fuente es en comparación con la longitud de onda de la fuente luminosa. De aquí se puede deducir que es relativamente más fácil producir una onda de radio coherente que una onda de luz coherente.

I.2. Tipos de Hologramas

Para hacer un holograma, se utiliza un haz de luz monocromática y se produce interferencia por división de amplitud, parte del haz de luz monocromática es dirigido directamente hacia el medio de grabado, usualmente emulsión fotográfica de muy alta resolución como placa o película holográfica. A este haz que incide directamente sobre el medio de grabado se le llama *luz de referencia*, la otra parte del haz, llamado *luz objeto*, es enviado al objeto o escena, donde es reflejado y/o dispersado según las dimensiones y características físicas del objeto. La luz proveniente del objeto llega al medio de grabado, donde interfiere con el haz de referencia y puesto que ambas ondas provienen de la misma fuente coherente, forman un patrón de interferencia estable, quedando registrado de manera permanente en el medio de grabado.

Cuando la placa o película holográfica se revela, usando soluciones químicas de la misma forma que una película fotográfica convencional, se obtiene lo que se conoce como *holograma*. Si éste holograma resultante se ilumina de forma adecuada, se reconstruyen los frentes de onda del objeto obteniéndose una imagen tridimensional del mismo. Para reconstruir el frente de onda a partir de un holograma, en algunos casos es necesario utilizar luz láser o cualquier luz monocromática, una luz blanca muy bien filtrada por ejemplo. También existen hologramas que pueden ser reconstruidos con luz blanca convencional, como la luz del sol o un foco.

Los distintos tipos de hologramas, pueden clasificarse considerando aspectos tales como la forma en que el holograma difracta la onda de reconstrucción, o en su defecto como ya se había mencionado, dependiendo de la luz utilizada en el proceso de reconstrucción. Para efecto de este trabajo resulta conveniente el estudio de hologramas de transmisión y reflexión, los cuales encuentran esta denominación de acuerdo a la forma en que difractan la onda de reconstrucción.

1.2.1. Holograma de Transmisión

El método inventado por Leith y Upatnieks para hacer los hologramas, consiste primeramente en la iluminación con el haz de un láser, del objeto cuya imagen se quiere registrar. Se coloca después una placa fotográfica en una posición tal que llegue a ella, tanto la luz que refleja el objeto (haz objeto), como la luz del láser (haz de referencia). Podemos ver en la Figura 1.8 que estos dos haces interfieren al coincidir sobre la placa holográfica. Lo que se obtiene después de revelar la placa es un patrón de franjas de interferencia. Esta es una complicada red de líneas similares a las de una rejilla de difracción, pero bastante más complejas pues no son rectas, sino muy curvas e irregulares.

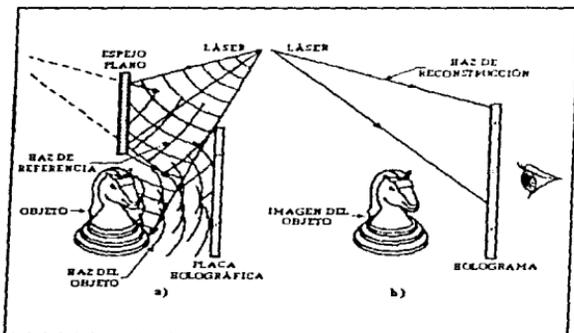


Figura 1.8. Esquema de a) la exposición y b) reconstrucción de un Holograma.[6]

Para reconstruir los frentes de onda del objeto, se coloca el holograma frente al haz directo del láser, en la posición original donde se colocó para exponerlo y se ilumina con el haz de referencia. La luz que llega al holograma es entonces difractada por las franjas impresas en el holograma, generando tres haces luminosos. Uno de los haces pasa directamente sin difractarse, sigue en la dirección del haz directo y no forma ninguna imagen. El segundo haz es difractado y es el que forma una imagen virtual del objeto, en la misma posición donde estaba éste al grabar el holograma. El tercer haz también es difractado, pero en la dirección opuesta al haz anterior, con respecto al haz directo, este haz forma una imagen real del objeto. Estos tres haces son los que se superponían en los hologramas de Gabor [1].

Observando a través del holograma como si fuera una ventana, se ve la imagen tridimensional del objeto (la imagen virtual) en el mismo lugar donde estaba el objeto originalmente. La imagen es tan real que no solo es tridimensional, sino que además tiene perspectiva variable, dentro de los límites impuestos por el tamaño del holograma. Así si nos movemos para ver el objeto a través de diferentes regiones del holograma, el punto de vista cambia como si el objeto realmente estuviera allí. Estos son los hologramas más simples, también son los hologramas más reales e impresionantes, pero tienen la desventaja de que solo pueden ser observados con la luz de un láser.

1.2.2. Holograma de Reflexión

Los hologramas de reflexión, inventados por Y. N. Denisyuk [6] en la Unión Soviética, se diferencian de los anteriores en que el haz de referencia, al grabar el holograma, llega por detrás y no por el frente como se muestra en la Figura 1.9. La imagen de este tipo de holograma tiene la enorme ventaja de que puede ser observado con una lámpara de tungsteno común y corriente. En cambio, se requiere de un gran estabilidad y ausencia de vibraciones durante la exposición, mucho mayor que con los hologramas de transmisión. Este tipo de holograma tiene mucho que ver con el método de fotografía a color por medio de capas de interferencia.

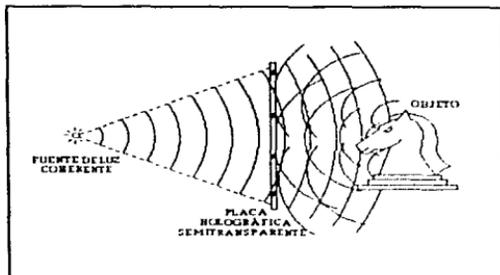


Figura 1.9. Exposición de un Holograma de Reflexión. [6]

Referencias

- [1] A New Microscopic Principle, D. Gabor, p p 161, 777-778
- [2] Reconstructed Wavefronts and Communication Theory, E. N. Leith y J. Upatnieks, p.p. 52, 1123-30
- [3] Principios Fundamentales de la Holografía, Fernández G. M., Escobar A. L., p p. 15.
- [4] Practical Holography, Christopher Outwater, p.p. 3-6.
- [5] La Holografía, John Lovine, p p. 20-35.
- [6] Óptica Tradicional y Moderna, Daniel Malacara, p.p. 59-67
- [7] Óptica, Zajac, p.p. 350-355
- [8] Óptica, F. Graham Smith, p.p. 217.

CAPÍTULO II

***" INTERFEROMETRÍA
HOLOGRÁFICA "***

CAPÍTULO II

INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA

La *Interferometría Holográfica* fue demostrada por vez primera por Stetson y Powell (1965) [1], para estudios de vibraciones y en la misma época por Hanies y Hildebrand, Horman, Brooks, Heflinger y Wuerker para otras aplicaciones. Esta nueva forma de Interferometría tiene muchas ventajas aparentes como una técnica de medición y algunos entusiastas predicen que puede desplazar a las técnicas interferométricas convencionalmente empleadas.

La Interferometría Holográfica es una técnica no destructiva, sin contacto con el objeto de estudio y con muy alta sensibilidad. La sensibilidad de las medidas realizadas de esta manera, es del orden de la longitud de onda de la luz (menos de una diezmilésima de milímetro).

La idea básica de la Interferometría Holográfica se deriva del hecho de que la imagen que se forma al reproducir un holograma es una réplica exacta del objeto, por lo que es posible compararla en forma interferométrica con el objeto directamente, o con otra imagen holográfica del mismo. Si el objeto es perturbado por esfuerzos, vibraciones o calor en *pequeñas cantidades*, se observará un patrón de franjas de interferencia sobre la imagen. Contando las franjas se puede determinar el desplazamiento del objeto, mientras que con su forma podemos conocer rápidamente el cambio ocurrido en la superficie del objeto, por ejemplo, el tipo de deformación, así como la localización de concentración de esfuerzos.

En contraposición con las ventajas que ofrece la técnica, la industria no la ha aceptado, de tal manera que la Interferometría Holográfica ha sido confinada a laboratorios de investigación, salvo notables excepciones, la razón para explicar esto, tiene que ver fundamentalmente con dos aspectos

- 1) Los requerimientos de estabilidad en holografía no son fácilmente compatibles con los ambientes que frecuentemente se encuentran en la industria, a menos que se utilicen láseres pulsados.
- 2) El proceso de registro fotográfico y el revelado subsecuente, introducen un cierto tiempo de retraso, lo cual no permite la inspección en línea y aunque se han desarrollado medios de registro autorrevelables y reutilizables, aún se tiene un tiempo de retraso entre el registro y el análisis de franjas

A pesar de lo anterior, la Interferometría Holográfica es una herramienta importante que ha dado solución a ciertos problemas específicos del tipo de aplicación industrial, tal como la inspección de llantas de aviones, que ha producido beneficios significativos en seguridad y economía. Adicionalmente, el estudio de la Holografía permite entender muchos fenómenos ópticos relacionados

II.1. Técnicas de Interferometría Holográfica

Básicamente existen tres técnicas para realizar Interferometría Holográfica:

- Tiempo Real
- Doble Exposición
- Tiempo Promedio

II.1.1. Interferometría Holográfica de Tiempo Real

Cuando el patrón de interferencia del haz objeto y el haz de referencia se graba correctamente en un holograma, se tendrá una reconstrucción adecuada, si se coloca el holograma en la misma posición en la que se expuso y se ilumina con el mismo haz de referencia. Si el holograma se coloca exactamente en la posición original la onda reconstruida es una réplica exacta de la onda objeto original. Si durante el tiempo entre la exposición y el proceso de revelado, el objeto permanece inmóvil e iluminado por la luz láser, al realizar la reconstrucción de los frentes de onda del holograma en la forma indicada, encontramos que los frentes de onda provenientes del holograma se superponen (en cada punto observado a través del holograma) con los frentes de onda provenientes del objeto original. Con esto resulta posible una comparación interferométrica entre ambos frentes de onda. Si alteramos al objeto con algún desplazamiento o deformación, tenemos que las distancias entre cada punto de la superficie del objeto y la fuente de luz, cambia relativamente así como la amplitud y fase de la luz proveniente del objeto.

Estos cambios existentes en los frentes de onda del objeto (que antes eran idénticos a los de reconstrucción), nos llevan a observar un patrón de franjas característico de la deformación de la superficie del objeto. Al ocurrir el cambio en la superficie del objeto, simultáneamente se observa el cambio en el patrón de franjas, y es por eso que a ésta técnica se le conoce como Interferometría Holográfica de Tiempo Real.

Para obtener buenos resultados de esta técnica interferométrica, debemos cuidar a) que el proceso de revelado sea el adecuado para evitar una distorsión en la emulsión, b) el reposicionamiento del holograma debe ser exacto y c) la iluminación debe ser ajustada de tal forma que la amplitud de la onda objeto reconstruida coincida con los valores originales de la onda objeto. La principal dificultad de esta técnica es superponer exactamente la imagen obtenida por el holograma y el objeto. En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo de lo que podemos ver con la aplicación de esta técnica.

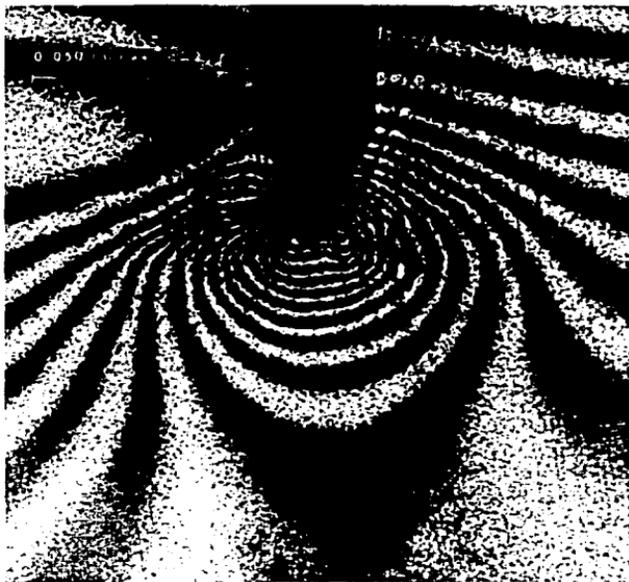


Figura 2.1. Interferograma de Tiempo Real, de un metal deformado en un solo punto. [2]

II.1.2. Interferometría Holográfica de Doble Exposición

La Interferometría Holográfica de Doble Exposición, como su nombre lo indica, consiste en realizar una doble exposición sobre el mismo medio de grabado (placa o película holográfica) utilizado para tal efecto. Una de las exposiciones se realiza en un estado inicial de la superficie del objeto y la otra en un estado modificado de la misma.

Lo anterior implica el hecho de contar con un arreglo experimental, montado de tal forma que permita un primer registro de los frentes de onda provenientes del objeto bajo condiciones normales, es decir, sin que exista movimiento alguno (cambio de temperatura, fuerza aplicada o algún otro factor externo) que pueda alterar su superficie. Posteriormente se procede a modificar las condiciones del objeto en cuestión, por ejemplo se le puede aplicar una fuerza, con el fin de conocer el tipo de deformación que le produce al objeto. Una vez modificado el objeto, se realiza la segunda exposición sobre el mismo medio de grabado. Cada exposición es hecha con el mismo haz de referencia.

Después de someter la emulsión a un procesamiento químico, obtenemos lo que conocemos como interferograma holográfico, que es el registro de la superposición de ambos frentes de onda, en cuya reproducción podemos visualizar un patrón de franjas sobre el objeto, las cuales nos proporcionan información para conocer el tipo de deformación a la que se sometió el objeto. En este caso ya no es tan importante la precisión en la posición del holograma y la intensidad luminosa, por lo que se supera la dificultad presentada para la metodología de Tiempo Real. Además, si se llegara a tener alguna distorsión en el medio de grabado durante el procesamiento químico, dicha distorsión será la misma para ambas ondas reconstruidas, por lo que no nos ocasiona gran problema en la interpretación del patrón de franjas.

La técnica de Interferometría Holográfica de Doble exposición, fue la utilizada para nuestro estudio y más adelante se mostrarán los interferogramas correspondientes.

II.1.3. Interferometría Holográfica de Tiempo Promedio

La Interferometría de Tiempo Promedio es una técnica para formar hologramas de superficies en estado vibratorio. El método es idéntico al que se utiliza para la obtención de hologramas cuando se encuentran estáticas. Se realiza una sola exposición, obteniendo con la reproducción del holograma (después del respectivo procesamiento químico), la imagen de la superficie del objeto con un patrón de franjas de interferencia superpuestas, que son representativas de la vibración existente en el momento de la exposición. En la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de lo que se puede hacer con esta técnica.

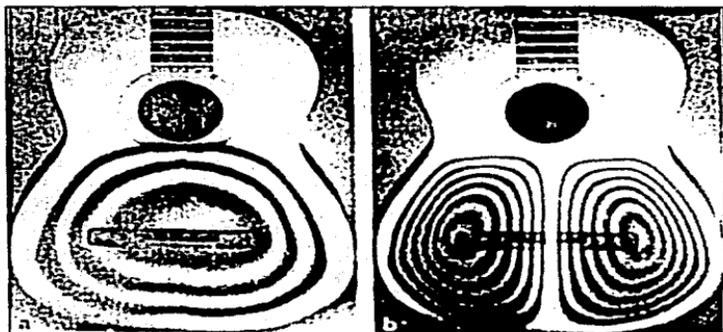


Figura 2.2. Fotografías generadas con Holografía de Tiempo Promedio, de las imágenes de la vibración de una guitarra. [2]

II.2. Análisis Teórico de la Técnica de Doble Exposición

En la técnica de doble exposición, la interferencia tiene lugar entre los frentes de onda reconstruidos, con el objeto en dos estados diferentes. Típicamente, la primera exposición se realiza en un estado inicial, en una condición sin esfuerzos y la segunda se realiza con un esfuerzo aplicado al objeto. Cuando el holograma ya procesado se ilumina con el haz de referencia original, se observarán dos imágenes, una que corresponda al objeto en su estado libre de esfuerzos y la otra corresponde al objeto sometido a esfuerzos. El patrón de interferencia resultante, nos revela los cambios en la forma de la superficie del objeto, entre las dos exposiciones.

En este caso, la intensidad en la placa holográfica durante la primera exposición está dada por

$$I_1 = |r(x,y) + o(x,y)|^2 \quad (2.1)$$

y durante la segunda exposición es

$$I_2 = |r(x,y) + o'(x,y)|^2 \quad (2.2)$$

donde $r(x,y)$ representa la onda de referencia

$o(x,y)$ representa la onda objeto en su estado inicial

$o'(x,y)$ representa la onda objeto en su estado modificado

La transmitancia del holograma resultante puede considerarse que es una función lineal de la intensidad, esto es

$$t(x,y) = t_0 + \beta(I_1 + I_2) \quad (2.3)$$

donde β es una constante.

Cuando el holograma se ilumina otra vez con la misma onda de referencia, la amplitud transmitida por el holograma es

$$U(x,y) = r(x,y) t(x,y) \quad (2.4)$$

Los únicos términos de interés en la expansión de la ecuación anterior, son aquellos que corresponden a las dos imágenes primarias superpuestas, la amplitud compleja correspondiente a estas es

$$U_1(x,y) = \beta r^2 |o(x,y)| [e^{i\phi(x,y)} + e^{-i\phi(x,y)}] \quad (2.5)$$

de tal manera que la intensidad resultante es

$$I_1(x,y) = |o(x,y)|^2 [I + \cos[\phi(x,y) - \phi^*(x,y)]]$$

esto es

$$I_1(x,y) = |o(x,y)|^2 [I + \cos \Delta\phi(x,y)] \quad (2.6)$$

Esta ecuación representa la distribución de irradiancia multiplicada por un término de fase, esto es, la imagen del objeto esta modulada o tiene sobrepuesta sobre ella un patrón de franjas brillantes y oscuras que son característica de la interferometría de dos haces

Se tendrán franjas oscuras cuando

$$\cos \Delta\phi + I = 0$$

esto es cuando $\Delta\phi = n\pi$, donde $n = 1, 3, 5, \dots$

II.2.1. Interpretación de Interferogramas

Con la Interferometría Holográfica pueden medirse los vectores de desplazamiento de cada punto del objeto de estudio. Cuando se consigue la reproducción de un interferograma, se puede ver la figura del objeto, cubierto por un patrón de franjas, correspondiendo cada una a los desplazamientos provocados por la deformación aplicada. El desplazamiento diferencial de una superficie en la dirección normal de la misma es aproximadamente igual a la mitad de la longitud de onda (de la luz de iluminación en el momento de la exposición) por franja. En la superficie, la posición de las franjas dependerá de la iluminación del objeto, la dirección de observación y la naturaleza de la deformación.

La localización puede obtenerse, considerando la interferencia del par de haces (referencia y objeto) originales y el par de haces una vez deformada la superficie del objeto. Para ello denotaremos con la letra δ , al cambio de fase de la onda del objeto en el plano del holograma, inducido por el desplazamiento. El patrón de las franjas de interferencia dependen de la función δ . Para puntos fijos sobre la superficie $\delta = 0$, la intensidad correspondiente es máxima.

La determinación cuantitativa de este desplazamiento de puntos sobre la superficie de un objeto, se obtiene directamente del patrón de franjas de interferencia. Utilizando el modelo geométrico de la Figura 2.3, estableceremos la relación entre las franjas y la superficie desplazada de un cuerpo.

Consideremos la imagen virtual, reconstruida por medio de un holograma de doble exposición, donde simultáneamente existen dos superficies reales de un objeto. En la Figura 2.3 se muestran las condiciones de iluminación y observación para Q y Q', que nos representan a un punto de la superficie del objeto, antes y después de la deformación respectivamente. D es el vector de desplazamiento; S es el punto de la fuente de iluminación (origen), B es el punto de observación, r_1 , r_2 , y R son los radio vectores de los puntos Q, Q' y B respectivamente, \hat{e}_s , \hat{e}_1 y \hat{e}_2 , \hat{e}_1 son los vectores unitarios del punto de iluminación y observación para Q y Q'.

El holograma a partir del cual se reconstruyen las dos imágenes del objeto, y también restringe el cono de posibles direcciones, desde las que el elemento de la superficie de interés puede ser observado. Existe una diferencia de fase entre las ondas de luz en el plano del holograma, pero no podemos asumir directamente este cambio de fase como δ , debido a que al punto Q de la superficie del objeto puede ser desplazado en la dirección de observación dada.

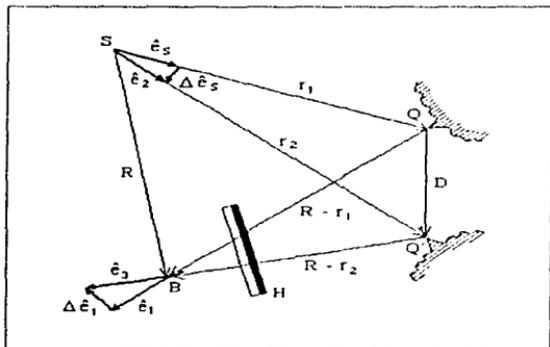


Figura 2.3. Arreglo para la derivación de la relación principal de la Interferometría Holográfica. [4]

La diferencia Δ entre los dos haces provenientes de la fuente de luz S, que pasan a través de los puntos correspondientes Q y Q', hasta el punto de observación B, se escribe como

$$\Delta = \overline{SQ'B} - \overline{SQB} \quad (2.7)$$

Usando la nomenclatura de la Figura 2.3 podemos escribir los caminos ópticos como:

$$\overline{SQB} = \hat{e}_s \cdot r_1 + \hat{e}_1 \cdot (R - r_1) \quad (2.8)$$

$$\overline{SQ'B} = \hat{e}_2 \cdot r_2 + \hat{e}_1 \cdot (R - r_2) \quad (2.9)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.8) y (2.9) en la ecuación (2.7) se obtiene la expresión

$$\Delta = \hat{e}_2 \cdot r_2 + \hat{e}_1 \cdot (R - r_2) - \hat{e}_s \cdot r_1 - \hat{e}_1 \cdot (R - r_1) \quad (2.10)$$

Los vectores unitarios de iluminación y observación para el punto Q' se representan como

$$\hat{e}_2 = \hat{e}_s + \Delta \hat{e}_s, \quad \hat{e}_1 = \hat{e}_1 + \Delta \hat{e}_1 \quad (2.11)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.11) en (2.10) se obtiene

$$\Delta = (\hat{e}_1 - \hat{e}_s) \cdot (r_1 - r_2) + \Delta \hat{e}_s \cdot r_2 + \Delta \hat{e}_1 \cdot (R - r_2) \quad (2.12)$$

En el sistema óptico de la Interferometría Holográfica, la distancia desde la fuente de luz hasta el objeto, por regla general es más grande que la magnitud $|D|$.

$$|D| = |r_2 - r_1| \ll |r_2| \approx |r_1|$$

y por consiguiente, para los vectores asumimos que

$$\Delta \hat{e}_s \perp r_2, \quad \Delta \hat{e}_1 \perp (R - r_2)$$

con esta consideración la expresión (2.12) adquiere la forma

$$\Delta = (\tilde{e}_1 - \tilde{e}_s) \cdot D$$

La diferencia de fase, δ , esta relacionada con la diferencia de caminos ópticos a través del número de onda $2\pi / \lambda$.

$$\delta = (2\pi / \lambda) (\tilde{e}_1 - \tilde{e}_s) \cdot D \quad (2.13)$$

donde λ es la longitud de onda de luz utilizada.

Entonces una franja de interferencia es brillante si

$$\delta = 2\pi n \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

y oscura para

$$\delta = 2\pi (n - 1/2) \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

donde n es el orden absoluto de las franjas brillantes u oscuras.

La ecuación (2.13) puede ser descrita, para el patrón de franjas brillantes como

$$n \lambda = (\tilde{e}_1 - \tilde{e}_s) \cdot D \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.14)$$

y para el patrón de franjas oscuras

$$(n - 1/2) \lambda = (\tilde{e}_1 - \tilde{e}_s) \cdot D \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.15)$$

Las ecuaciones (2.14) y (2.15), que establecen la relación entre el vector de desplazamiento de un punto considerado, los parámetros del sistema de interferencia (dirección de iluminación y observación), y el orden absoluto de la franja en un determinado punto sobre el patrón, son conocidas como la *relación principal de la interferometría holográfica*.

Definiremos vector de sensibilidad \mathbf{k} , a la diferencia entre los vectores unitarios de observación e iluminación

$$\mathbf{k} = \hat{\mathbf{e}}_1 - \hat{\mathbf{e}}_s$$

Ahora la ecuación (2.14) puede ser convertida a una forma conveniente para el análisis

$$n \lambda = \mathbf{k} \cdot \mathbf{D} \quad (2.16)$$

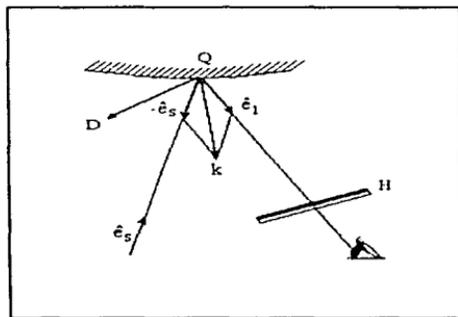


Figura 2.4. Representación del vector \mathbf{k} (vector de sensibilidad). [4]

Considerando las condiciones de iluminación y observación, de un punto Q de la superficie, como se muestra en la Figura 2.4 En esta configuración, el vector de sensibilidad esta dirigido a lo largo de la bisectriz del ángulo formado, entre la dirección de los vectores de iluminación y observación. Entonces el patrón de franjas, visto desde un punto fijo de observación, nos permite la determinación de la proyección del vector desplazamiento sobre el vector de sensibilidad por medio de la ecuación (2.16)

11.3. Aplicaciones de Interferometría Holográfica

Una de las aplicaciones más importantes de la Interferometría Holográfica son las pruebas no destructivas, en las que se involucra la cuantificación y análisis de deformaciones y/o esfuerzos, ocasionados por la aplicación de fuerzas o por cambios de presión, temperatura, etc. Además de las técnicas interferométricas ya señaladas para tal efecto, se puede complementar la técnica de Doble Exposición con la utilización de láseres de emisión pulsada junto con la digitalización de los resultados, permitiéndonos el estudio de objetos con vibración o movimiento constante, como por ejemplo máquinas en funcionamiento, estructuras en superficies inestables, etc. De esta forma se facilita la aplicación de un mantenimiento preventivo en lugar del correctivo, minimizando el costo que este implica.

Algunas otras aplicaciones de Interferometría Holográfica, solo nos permiten conocer información cualitativa del patrón de franjas, no obstante como ya se habia mencionado, es una herramienta importante que ha dado solución a ciertos problemas específicos del tipo de aplicación industrial, tal como la inspección de llantas de aviones, que ha producido beneficios significativos en seguridad y economía.

También se pueden detectar fracturas o uniones deficientes en construcciones. Así mismo, se puede llevar a cabo la aplicación de un control de calidad, mediante la utilización de esta técnica Holográfica. Otras áreas de aplicación que encuentra la Interferometría Holográfica es en la investigación medica y dental, utilizada en el estudio de la deformación de estructuras anatómicas, como prótesis. Por otro lado es muy útil en las áreas de transferencia de calor y masa, y diagnósticos de plasma. También nos permite la evaluación de esfuerzos y medición de cambios en estructuras complejas sometidas a condiciones de corrosión o absorción de agua. Adicionalmente, el estudio de la Holografía permite entender muchos fenómenos ópticos relacionados.

Referencias.

- [1] Interferometry Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction, Powell R. L., Stetson K. A., 1965.
- [2] Óptica Tradicional y Moderna, Daniel Malacara, pp. 51-59.
- [3] Óptica, Hechtz, Zajac, pp. 279.
- [4] Holographic Interferometry in Experimental Mechanics, Yu. I. Ostrovsky.
- [5] Holographic Interferometry, P. K. Rastogi.

CAPÍTULO III

" EL ZINALCO "

CAPÍTULO III

EL ZINALCO

México es un país que consume aluminio abundantemente, pero carece de él. Su demanda es cubierta por las desventajas que implican las importaciones, para una nación en vías de desarrollo industrial. Ante tal situación los científicos mexicanos desarrollaron una aleación para enfrentar la carencia de este metal y aprovechar las materias primas que existen en grandes cantidades en nuestro país.

En 1978 se inició en el IIM-UNAM un programa de investigación auspiciado por la Organización de Estados Americanos, sobre el Zinc y sus aleaciones con el objeto de desarrollar nuevos campos de aplicación para este metal, del cual México es uno de los principales productores a nivel mundial y así evitar su desplazamiento por los plásticos y el aluminio. Los resultados de las investigaciones condujeron al desarrollo de la aleación Zinalco, la cual además de tener aplicaciones en la rama de la fundición, también puede incursionar en el campo de la extrusión, en el de la forja y en el de la laminación.

El Zinalco es básicamente la aleación eutectoide Zn-22% Al modificada con diversos aleantes como Cu, Mg y Ti, con lo cual se ha originado una nueva familia de aleaciones que se encuentran ya en forma comercial en México.

III.1. Propiedades Físicas y Mecánicas de un Material

Los distintos materiales suelen identificarse por sus **Propiedades Físicas**. Las propiedades físicas son aquellas que describen las características propias del material, bajo cualquier condición que no implique un cambio en su composición química, es decir, en cuanto a aspecto, estructura molecular, comportamiento ante la presencia de temperatura, campos eléctricos, fuerzas externas, etc.

A continuación se mencionan algunas de las propiedades físicas más significativas que describen un material.

- **Densidad.** La densidad de un líquido, gas o sólido, se expresa como la cantidad de masa por unidad de volumen de la sustancia. La densidad de un sólido puede ser determinada por el método de desplazamientos, basado en el principio de Arquímedes, utilizando dos líquidos de distinta pero conocida densidad.
- **Conductividad Eléctrica.** La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene un material para permitir el paso de electrones a través de él.
- **Conductividad Térmica.** La conductividad térmica es la capacidad que tiene un material para permitir la transmisión de temperatura a través de él.
- **Coefficiente de Expansión Térmico.** Este también puede definirse como coeficiente de expansión lineal o coeficiente de expansión cúbica, y es el cambio en unidades de longitud por el incremento de un grado en la temperatura, tomando como referencia la unidad de longitud a 0 °C.
- **Temperatura de Fusión.** La temperatura de fusión de una sustancia pura, es el punto en el que las fases sólida y líquida del material pueden coexistir en equilibrio. Se entiende que el punto de fusión, es un cambio de las características físicas del estado sólido, y se presenta cuando el material es sometido a un incremento de temperatura.

Las Propiedades Mecánicas (que forman parte de las propiedades físicas), describen el comportamiento del material bajo efectos de trabajo. Un ensayo del material, a tracción y compresión nos da una valoración objetiva, de las propiedades mecánicas de dicho material.

Para los ensayos a tracción se emplean probetas especiales que en su mayor parte se tornan de barras o se hacen de láminas. Supongamos que se ha colocado una de estas probetas de tracción en una máquina de ensayos de tracción y compresión, y se aplican en los extremos fuerzas de tracción. Cuando se aumenta gradualmente la fuerza axial por incrementos de carga, se mide el alargamiento de la longitud patrón para cada incremento, continuando de ese modo hasta que se produce la rotura de la probeta. Conociendo el área original de la sección transversal de la probeta puede obtenerse la tensión normal, representada por σ , para cada valor de la carga axial, simplemente utilizando la relación $\sigma = P/A$, donde P representa la carga axial y A el área primitiva de la sección transversal. Con varios pares de valores de la tensión normal σ y de la deformación normal ϵ podemos representar gráficamente los datos experimentales tomando estas cantidades como ordenadas y abscisas, respectivamente. Así se obtiene un diagrama tensión-deformación del material para este tipo de carga. Este diagrama puede adoptar numerosas formas, en la Figura 3-1 se representan dos gráficos típicos de materiales usados normalmente en ingeniería.

La curva tensión-deformación de la Figura 3-1a se puede usar para determinar varias características de resistencia del material. Estas son:

- **Límite de Proporcionalidad.** A la ordenada de un punto P se le conoce por límite de proporcionalidad, esto es, la tensión máxima que puede producirse durante un ensayo de tracción simple de modo que la tensión sea función lineal de la de la deformación.
- **Límite Elástico.** La ordenada de un punto que casi coincide con P se conoce como límite elástico, esto es, la tensión máxima que puede producirse durante un ensayo de tracción simple de modo que no haya deformación permanente o residual cuando se suprime totalmente la carga. Para muchos materiales son casi idénticos los valores numéricos del límite elástico y del límite de proporcionalidad, por lo que a veces se consideran sinónimos. En los casos en que es notoria la diferencia, el límite elástico es casi siempre mayor al de proporcionalidad.

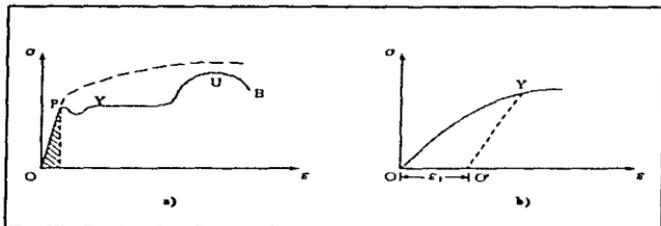


Figura 3.1. Gráficos Tensión-Deformación. [2]

- **Zona Elástica.** La región de la curva tensión-deformación que va desde el origen hasta el límite de proporcionalidad.
- **Zona Plástica.** La región de la curva tensión-deformación que va desde el límite de proporcionalidad hasta el punto de rotura.
- **Límite Elástico Aparente o de Fluencia.** A la ordenada del punto Y en el que se produce un aumento de la deformación sin aumento de tensión se le conoce como límite elástico aparente o límite de fluencia del material. Cuando la carga ha aumentado hasta el punto Y, se dice que se produce fluencia. Algunos materiales presentan en la curva tensión-deformación dos puntos en los que hay un aumento de deformación sin que aumente la tensión. Se les conoce como límites de fluencia inferior y superior.
- **Resistencia a la Tracción.** La ordenada del punto U, máxima en la curva, se llama resistencia o tracción, o a veces, resistencia última del material
- **Resistencia a la Rotura.** La ordenada del punto B se llama resistencia de rotura del material.

- **Módulo de Resiliencia.** El trabajo realizado en un volumen unidad de material, cuando se aumenta una fuerza de tracción simple, gradualmente desde cero hasta un valor tal que se alcance el límite de proporcionalidad del material, se define como módulo de resiliencia. Puede calcularse por el área bajo la curva de tensión-deformación desde el origen hasta el límite de proporcionalidad y se representa por la zona rayada en la Figura 3.1a. Así pues, la resiliencia de un material es su capacidad de absorber energía en la zona elástica.
- **Módulo de Tenacidad.** El trabajo realizado en un volumen unidad del material, cuando se aumenta una fuerza de tracción simple, gradualmente desde cero hasta el valor que produce la rotura, se define como módulo de tenacidad. Puede calcularse por el área total bajo la curva tensión-deformación desde el origen hasta la rotura. La tenacidad de un material es su capacidad de absorber energía en la zona plástica del material.
- **Límite Elástico Convencional.** La ordenada de la curva Tensión-deformación para la cual el material tiene una deformación permanente predeterminada cuando se suprime la carga se llama límite elástico convencional del material. Se suele tomar como deformación permanente 0.002 o 0.0035 cm por cm, pero estos valores son totalmente arbitrarios. En la Figura 3.1b se ha representado una deformación permanente ϵ_0 en el eje de deformaciones y se ha trazado la recta O'Y paralela a la tangente inicial de la curva. La ordenada de Y representa el límite elástico convencional del material, llamado a veces tensión de prueba.

Ley de Hooke. Para un material cuya curva tensión-deformación es similar a la de la Figura 3.1a resulta evidente que la relación entre tensión y deformación es lineal para los valores relativamente bajos de la deformación. Esta relación lineal entre el alargamiento y la fuerza axial que lo produce (pues cada una de estas cantidades difiere solo en una constante de la deformación y la tensión, respectivamente) fue observada por primera vez por Sir Robert Hooke en 1678 y lleva el nombre de la ley de Hooke. Para describir esta zona inicial del comportamiento del material, podemos escribir $\sigma = E\epsilon$, donde E representa la pendiente de la parte recta (OP) de la curva de tensión-deformación de la Figura 3.1a.

- **Módulo de Elasticidad.** La cantidad E , es decir, la relación de la tensión unitaria a la deformación unitaria se suele llamar módulo de elasticidad del material en tracción o, a veces, módulo de Young. Como la deformación unitaria ϵ es un número abstracto (relación entre dos longitudes) es evidente que E tiene las mismas unidades que la tensión.
- **Relación de Poisson.** Cuando una barra está sometida a una carga de tracción simple se produce en ella un aumento de longitud en la dirección de la carga, así como una disminución en las dimensiones laterales perpendiculares a estas. La relación entre la deformación de la dirección lateral y la de la dirección axial se define como relación de Poisson. La representamos por la letra griega ν . Para la mayoría de los metales está entre 0.25 y 0.35.
- **Módulo de Rigidez.** El módulo de rigidez o módulo de elasticidad tangencial se representa por la letra G y se define como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Relaciones entre Constantes Elásticas. [3]

	E	ν	K	G	λ
E, ν	E	ν	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{E}{2(1-\nu)}$	$\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
E, K	E	$\frac{3K-E}{6K}$	K	$\frac{3KE}{9K-E}$	$\frac{3K(3K-E)}{9K-E}$
E, G	E	$\frac{E-2G}{2G}$	$\frac{GE}{3(3G-E)}$	G	$\frac{G(E-2G)}{3G-E}$
E, λ	E	$\frac{2\lambda}{E+\lambda+R}$	$\frac{E+3\lambda+R}{6}$	$\frac{E-3\lambda+R}{4}$	λ

Nota: $R = \sqrt{E^2 + 9\lambda^2 + 2E\lambda} > 0$

- *Módulo Volumétrico de Elasticidad*. O simplemente módulo volumétrico se representa por la letra K y se define como se muestra en la Tabla 3.1
- *Factor de Carga Axial*. El factor de carga axial, también conocido como constante de Lamé, se representa con la letra griega λ y se define como se muestra en la Tabla 3.1.

En la Tabla 3.1 se da la relación existente entre algunas de Constantes Elásticas ya mencionadas

III.1.1. Propiedades Físicas del Zinalco

Las principales propiedades físicas del Zinalco se muestran en la Tabla 3.2 Como podemos observar de esta tabla, la aleación tiene un intervalo de solidificación bastante amplio que va desde 421 a 481 °C, esto permite inyectar el material en moldes en estado cuasilíquido lo cual reduce notablemente las contracciones producidas durante la solidificación. Además este proceso requiere del uso de aleaciones de bajo punto de fusión para mayor durabilidad de los moldes y herramientas. Por otro lado, piezas de latón, hierro o bronce que actualmente se funden en moldes de una por una pueden ser sustituidas por Zinalco moldeado por inyección, también es posible sustituir piezas obtenidas por troqueles.

El Zinalco, siendo un material con un punto de fusión relativamente bajo (en comparación con la del aluminio, latón, bronce, o hierro de fundición) nos permite ahorros considerables de energía. El Zinalco funde con el doble de rapidez que el aluminio y tres veces más rápido que el bronce. El bajo punto de fusión de esta aleación y su alta resistencia a temperatura ambiente, ha demostrado poder cambiar en forma positiva los procesos clásicos, utilizados en la producción de varios productos entre los que podemos mencionar, llaves para cerraduras, fichas para accionar dispositivos de entrada o maquinaria y contactos eléctricos de baja fricción para el Metro, entre otros. Los anteriores ejemplos se mencionan por estar ya en el mercado.

Tabla 3.2. Propiedades Físicas del Zinalco. [4]

Temperatura de Fusión	421 a 481 °C
Densidad	5.5 g/cc
Conductividad Eléctrica	37% de la del Cu
Conductividad Térmica	37% de la del Cu
Coefficiente de Expansión Térmico	25 mm/mK
Color	Blanco Grisáceo

La densidad del Zinalco es de 5.5 g/cc lo cual lo hace 31% más ligero que el acero y aunque pesa el doble que el aluminio, comparativamente es más ligera que el zamak, la cual es la aleación más conocida del zinc, 30% más ligera que el acero de fundición y 40% más ligera que el latón.

III.1.2. Propiedades Mecánicas del Zinalco

Como en todos los materiales las propiedades mecánicas del Zinalco dependen de su microestructura la cual consiste en una mezcla de dos fases, una fase α rica en aluminio y otra fase β rica en zinc. Un tratamiento térmico desde arriba de los 275 °C, nos produce una estructura perlítica similar a la del acero. El temple desde la misma temperatura nos produce una estructura de granos finos equiaxiales. Esta microestructura de dos fases tiene una energía de cohesión relativamente baja, lo cual provoca que el mecanismo de deformación sea por deslizamiento de una fase sobre otra sin sufrir deformación plástica alguna de las fases.

Este mecanismo que en los metales comunes se observa solo cerca del punto de fusión, es el mecanismo principal con el cual el Zinalco se deforma a temperatura ambiente. Esto da como resultado una serie de fenómenos muy singulares, como el de no sufrir endurecimiento por deformación, efecto común en todos los metales. La temperatura tiene un gran efecto sobre las propiedades mecánicas, ya que la fuerza de cohesión que une los granos del material decae rápidamente con la temperatura, esto se traduce en una fuerte disminución del esfuerzo de tensión y al mismo tiempo en un importante aumento de la ductilidad.

Las diferentes microestructuras que podemos inducirle al Zinalco: perlitica y granos finos, nos proporcionan una gran gama de propiedades mecánicas, las cuales se han resumido en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Propiedades Mecánicas del Zinalco. [4]

Zinalco I

	Fundición en arena	Fundición por inyección	Estruido 270-300 °C	Laminado
Resistencia a la tensión (MPa)	290-300	310-320	380-410	270-290
Esfuerzo de cedencia (MPa)	280-300	290-310	280-320	300-310
Deformación Máxima (%)	3-5	8-10	30-35	80-100
Dureza Rb	50-55	60-65	40-55	25-30

Zinalco II

	Fundición en arena	Fundición por inyección
Resistencia a la tensión (MPa)	350-390	400-420
Límite elástico	260-270	340-370
Deformación Máxima (%)	5-8	6-10
Dureza Rb	65-80	55-70

Los dos tipos de Zinalco que aparecen en la Tabla 3.3, corresponden a aleaciones con diferentes contenidos de Mg. El Mg tiene la propiedad de aumentar la resistencia mecánica del Zinalco y mantener sus propiedades a más altas temperaturas, a costa de perder ductilidad a temperatura ambiente. La razón es que el Mg, retrasa la transformación eutécticoide posiblemente por la aparición de una fase β rica en Mg, detectada en las fronteras del grano. El Zinalco II es el más apropiado para ser usado en fundición, especialmente fundición a presión.

La relación del Zinalco, peso a resistencia mecánica es igual a la de las aleaciones de aluminio de la serie 6xxx, lo cual permite crear piezas tan ligeras como el aluminio. Por otra parte su resistencia a la corrosión está intermedia entre el zinc y el aluminio, lo cual lo coloca entre los metales con muy buena resistencia a la corrosión. Un metal con estas propiedades puede incursionar en algunos de los campos de aplicaciones del acero, del latón, del bronce, zamak y aún en los del aluminio. Su coeficiente de expansión térmica es muy similar al del aluminio, este coeficiente es de importancia, en el caso de fabricación de perfiles para ventanas o fundición de precisión.

La aleación preferida para el proceso de moldeo por inyección ha sido el zamak, el cual es básicamente Zn en un 95% y el resto es Al, Cu y Mg. Las propiedades mecánicas de las aleaciones de zamak son muy pobres y su alta densidad hace que se pierda su bajo precio, además la aleación es muy propensa a la corrosión intergranular, lo cual le resta durabilidad.

Otra aleación utilizada en el proceso de fundición a presión es el aluminio 380 el cual tiene la desventaja de requerir temperaturas relativamente altas, cercanas a los 650 °C, lo cual representa un mayor deterioro de los moldes. El Zinalco es menos agresivo al acero que el aluminio y sus propiedades mecánicas resultantes son superiores a las del aluminio 380, latón o hierro de fundición.

Como ya se había mencionado antes, el Zinalco presentó características excelentes, que le dan la opción a sustituir a otros materiales, ya que viene a llenar un vacío, existente entre los dos metales con mayor aplicación ingenieril, que existen actualmente el hierro y el aluminio. Para las finalidades de este trabajo se utilizó lámina de Zinalco I.

Referencias

- [1] **Engeneering Materials**, H. S. Dixon, Sec 1.
- [2] **Resistencia de Materiales**, W. A. Nash, p p. 1-6.
- [3] **Resistencia de Materiales**, V. L. Feodosiev, Cap 1.
- [4] **El Zinalco**, Nuevo Material Nuevas Tecnologías, G. Villaseñor, p.p. 3-14.
- [5] **Elasticity Theory an Applications**, H. Reisman, p.p.134-139.

CAPÍTULO IV

***" ARREGLO
EXPERIMENTAL "***

CAPÍTULO IV

ARREGLO EXPERIMENTAL

Por medio de la técnica de Interferometría Holográfica de Doble Exposición, se realizaron algunos experimentos con distintos objetos y materiales, con el fin de adquirir experiencia suficiente para garantizar buenos resultados con la aleación Zn - 22% Al - Cu (Zinalco), que es la principal motivación para la realización del presente trabajo. De entre las pruebas realizadas, hubo algunas que se destacaron por los resultados observados, de ellas, se menciona más adelante lo concerniente a los resultados obtenidos para el Zinalco.

Los arreglos experimentales para cada caso son, esencialmente diseñados bajo el mismo principio básico, para la fabricación de un Holograma de Transmisión. En la Figura 4.1, se muestra el arreglo experimental utilizado para el estudio del Zinalco. Este consistió, primeramente en dirigir el haz del láser a un espejo (E1), el cual envía el haz a un divisor de haz variable (DH1), para obtener dos haces de las mismas características, uno de los cuales se utilizó como haz de referencia, por lo que fue dirigido con otro espejo (E2), hacia la placa holográfica (PH). El otro haz fue dividido nuevamente en dos haces con otro divisor de haz (DH2), los cuales fueron orientados con dos espejos mas (E3 y E4) hacia el objeto de estudio desde dos puntos distintos, con la finalidad de tener una mejor iluminación del objeto. Una vez orientados de esta forma, a los tres haces se les coloca un filtro espacial (FE1, FE2 y FE3, respectivamente) para expandirlos y *limpiarlos*, finalmente se adecua la intensidad luminosa, de tal forma que el haz objeto y el haz de referencia tengan una relación haz de referencia - haz objeto de 3 a 1. Estos dos haces interfieren al coincidir sobre la placa holográfica.

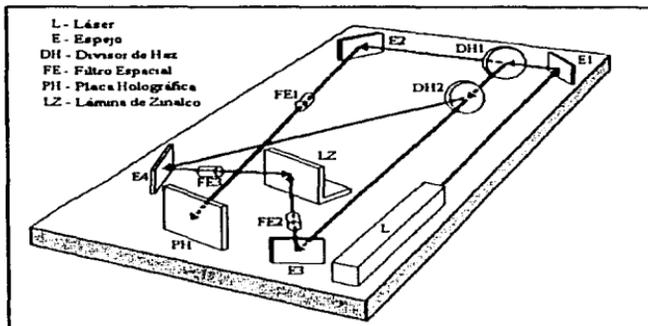


Figura 4.1. Arreglo Experimental (Zinako).

Las distancias entre cada uno de los elementos ópticos utilizados, el objeto y la placa holográfica, fueron determinados considerando los siguientes aspectos

- La distancia de recorrido de los haces debe ser aproximadamente la misma
- El objeto de estudio debe iluminarse por completo
- El ángulo entre el haz de referencia y el haz objeto no debe exceder del ángulo que determina la resolución de la placa holográfica.
- La placa holográfica debe estar preferentemente de frente y paralela al objeto.
- El área de trabajo es de 1.2×1.5 m aproximadamente.

IV. 1. Requerimientos Experimentales

El láser. Como ya se había mencionado antes, los hologramas de transmisión requieren de la utilización de un láser para su grabado, debido a las exigencias de coherencia de la luz. Existe una gran variedad de láseres (ver Apéndice A) con distintas potencias y longitudes de onda, que se puede utilizar para hacer hologramas. Por lo anterior, se utilizó un láser de Helio-Neón, que tiene su emisión en la parte visible del espectro electromagnético en el color rojo, con una longitud de onda de 632.8 nm y 35 mW de potencia en el modo continuo, con una longitud de coherencia de 1 m aproximadamente y un diámetro aproximado de haz de 1.5 mm.

Mesa Estable. El proceso de exposición de cualquier holograma o interferograma debe realizarse en una mesa estable, es decir, aislada de las vibraciones del piso, a fin de que las pequeñas franjas de interferencia (del orden de décimas de micra) no se pierdan. Esta mesa, no solo debe aislarse de las vibraciones del piso sino de cualquier otro tipo de vibración, por lo que, preferentemente deberá estar situada en un lugar con escaso ruido y de temperatura no muy variable, sin tener contacto con cualquier otro mueble, pared u objeto fuera de ella. El método utilizado para aislar del movimiento a la mesa de trabajo, se basa en un sistema neumático, con el que ésta queda suspendida en el aire fuera del alcance de cualquier vibración. La mesa utilizada para el desarrollo experimental cuenta con unas dimensiones de 1.2 x 3 m aproximadamente, su superficie es de acero y se encuentra llena de barrenos (para fijar los diferentes componentes de arreglo experimental) con diámetro de 1/64 in y una profundidad de 1/2 in, separados uno del otro una distancia de 1 in.

Elementos Ópticos y Dispositivos de Sujeción. Para montar un arreglo holográfico, se requiere de distintos elementos ópticos y dispositivos de sujeción, cada uno, con características propias que satisfagan las necesidades del arreglo experimental.

Una de las condiciones para producir interferencia es que los haces que interfieren provengan de la misma fuente, esto se puede lograr por división de amplitud (como en el interferómetro de Michelson), con un divisor de haz que tiene la función de dejar pasar a través de él, parte del haz y reflejar el resto, los divisores de haz pueden ser de densidad fija o variable, permitiéndonos controlar la intensidad luminosa de los haces resultantes. Estos cuentan con una base especial, que se puede sujetar a la mesa de trabajo con tornillos para impedir su movimiento, pues esto ocasionaría un cambio en el ángulo del haz que se está reflejando.

Cuando se quiere desviar y orientar los haces, se deben utilizar espejos de primera superficie. Estos espejos pueden contar con cierta libertad de movimiento (en la montura del espejo, por medio de tornillos), para mayor comodidad en los ajustes finales de la alineación. Todos y cada uno de los espejos deben de sujetarse firmemente a la mesa estable, de tal forma que estemos seguros que no se van a mover en el momento de la exposición. Se pueden utilizar soportes y nueces para sujetarlos con bastante efectividad.

Para los efectos de iluminación, tanto del objeto como de la placa, es necesario expandir los haces y esto se hace con lo que conocemos como filtros espaciales. Los filtros espaciales son objetivos de microscopio con determinada distancia focal, para expandir el haz y *pinhole's* (pequeños agujeros de 25 mm) colocados en el foco frente a cada objetivo, para limpiar el haz de las impurezas debidas a difracción ocasionadas por partículas de polvo a *suciedad* en el objetivo. Para colocar los *pinhole's* en el foco de los objetivos, se colocan ambos en una base, la cual cuenta con un elemento mecánico (donde se coloca el objetivo), con libertad de movimiento en los tres ejes coordenados. En conjunto, el filtro espacial, también se puede sujetar a la mesa con tornillos. Los filtros espaciales son utilizados tanto en el grabado como en la reproducción de hologramas e interferogramas.

Se debe contar con otros dispositivos de sujeción para mantener inmóviles también a la placa y al objeto, que son esencialmente la parte más importante en el arreglo. Estos dispositivos pueden variar sus características de acuerdo a los requerimientos del experimento y al tamaño de la placa y del objeto, por lo que en la mayoría de los casos, serán producto del ingenio de la persona que realiza cada experimento. Más adelante se describirá, como se sujetaron la placa holográfica y las muestras experimentales, así como la forma en que fueron deformadas para la obtención de los interferogramas.

En la Figura 4.1 se enlistan los elementos ópticos empleados para el arreglo básico utilizado para nuestro estudio

Medio de grabado. Para la obtención de un holograma o interferograma holográfico es necesario utilizar como medio de grabado, placa o película holográfica de alta resolución, debido a que la información que se está registrando se encuentra formada por una gran cantidad de pequeñísimas franjas, que una película convencional (con una baja resolución de 90 líneas por milímetro aproximadamente) sería incapaz de resolver. La distancia entre las franjas está determinada por el ángulo entre el haz de referencia y el haz objeto, y típicamente es del orden de milésimas de milímetro, por lo que se debe utilizar una película fotográfica de por lo menos 1000 líneas por milímetro de resolución. La resolución de las películas y placas está determinada en función del tamaño de grano de la emulsión, cuanto más pequeño, mayor es el poder de resolución. Una placa holográfica suele tener entre 2000 y 5000 líneas por milímetro de resolución.

Para este caso se utilizó película holográfica SO253 de Kodak con una resolución de 2000 líneas por milímetro y, placa y película holográfica 8E75 de Agfa con una resolución de 5000 líneas por milímetro, estas últimas tienen un nivel de contraste mayor. El contraste es importante para una mejor definición de las franjas.

IV.2. Obtención de Interferogramas

La obtención de un interferograma holográfico de doble exposición es similar a la del holograma, solo que en el primero se efectúan dos exposiciones en la misma película, una de ellas con el objeto de estudio modificado (en este caso deformado). A continuación se explica brevemente como se llevan a cabo las exposiciones y el proceso de revelado, así como la observación de la imagen registrada en el interferograma.

Exposiciones. Una vez armado el arreglo que se utilizará se procede a realizar las exposiciones, para las cuales, la colocación de la película o placa holográfica y la deformación del objeto, deberán efectuarse en completa oscuridad, debido a la sensibilidad de la emulsión holográfica a la luz. Se debe encender el láser y flotar la mesa, dejando transcurrir un lapso de tiempo para que todo se estabilice, una vez estabilizado, se coloca una película inservible o un trozo de cartón en la posición donde deberá ir la película nueva, vigilando que todo esté en perfecto orden y que las intensidades de luz sean las adecuadas. Posteriormente se obtura el láser y se apagan las luces, se coloca la película buena (con la emulsión hacia el objeto) y esperamos un par de minutos sin hacer contacto alguno con la mesa para que esta se estabilice, para hacer la primera exposición. El tiempo de exposición va a depender del medio de grabado utilizado y la intensidad luminosa que este llegando a la misma. Una vez realizada la exposición, se vuelve a obturar el láser y modificamos el objeto auxiliandonos con una pequeña lamparita, procurando que no le llegue luz a la película. Esperamos nuevamente a que todo se estabilice y exponemos por segunda ocasión. Finalmente quitamos la placa expuesta y procedemos a aplicarle un procesado químico para su revelado.

Procesado Químico. El proceso de revelado también se lleva a cabo en ausencia total de luz, introduciendo primeramente la película expuesta en una charola que contenga revelador, teniendo especial cuidado de que éste llegue a todos los puntos de la película, agitando suavemente, durante un periodo de tiempo de 5 min. Al término de este tiempo se coloca la película bajo un chorro de agua para eliminar los residuos de revelador. Una vez revelada la película, se introduce en un baño detenedor por 30 seg y después se pasa al fijador, por un lapso de 3 min. De igual forma se eliminan los residuos de revelador bajo un chorro de agua. De ser necesario se le aplica un blanqueado y finalmente se seca.

Primordialmente se utilizaron los siguientes químicos (ver Apéndice B)

- Revelador D-19
- Fijador F-7
- Blanqueador de Ferricianuro de Potasio

Reconstrucción. El proceso de reconstrucción de un interferograma es idéntico al de un holograma, sólo se tiene que colocar de tal forma que el ángulo de iluminación sea el mismo con el que el haz de referencia llegaba a la placa en el momento de la exposición. De esta forma, podemos ver la imagen tridimensional del objeto (imagen virtual), cubierto de franjas ocasionadas por la deformación a la cual se sometió.

Sin embargo, la anterior no es una forma simple para analizar las franjas de deformación, pues resulta complicado medir el tamaño de las franjas y la distancia de separación entre ellas, resultando conveniente grabar en papel fotográfico este patrón de franjas. Esto se consigue proyectando la imagen real directamente sobre papel fotográfico.

Ahora bien, una vez considerados los aspectos anteriores, procederemos a describir los experimentos realizados.

IV.3. Experimentos Realizados

IV.3.1. Lámina de Zinalco (Área de Estudio Circular).

La lámina utilizada fue de un espesor de 1/64 in, con aproximadamente unas dimensiones de 13.5 x 13.5 cm, la cual fue colocada entre dos placas de acero con un orificio de 12 cm de diámetro cada una y hechos concéntricamente. La lámina se prensó entre estas placas por medio de tornillos. Para el experimento la lámina se colocó de frente (Figura 4.2) y soportada por un ángulo de acero fundido, por la parte inferior de las placas. Por la parte posterior (en el centro de la lámina) se le aplicó una fuerza determinada. En la Figura 4.4 se muestra una fotografía de la mesa con el arreglo experimental.

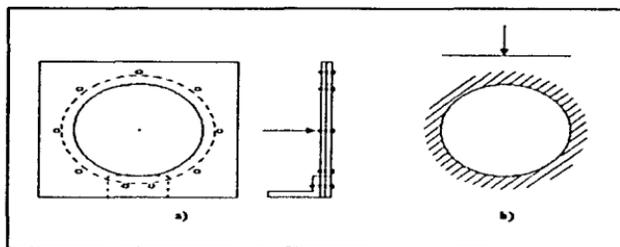


Figura 4.2. Lámina Circular de Zinco.

Después de realizar varias pruebas con distintas fuerzas aplicadas, de los interferogramas obtenidos se seleccionó uno para su análisis

IV.3.2. Lámina de Zinco (Área de Estudio Rectangular).

Se utilizó el mismo tipo de lámina del experimento anterior, pero en este caso contaba con unas dimensiones de 5 x 14 cm, la cual fue sujeta a todo lo ancho de sus lados angostos. Esto se consiguió (Figura 4.5) con dos sistemas de sujeción de apriete por tornillo, separados uno del otro 13.3 cm aproximadamente, los cuales fueron fijados directamente a la mesa por medio de pivotes y tornillos

La lámina fue colocada de frente en forma horizontal y se sometió transversalmente a flexión pura, aplicándole dos pares de fuerzas, de la siguiente forma se aplicaron dos fuerzas a todo lo ancho de la lámina y en forma paralela a los sistemas de sujeción, a 3.5 cm de cada uno de ellos. El objetivo de este experimento fue determinar el coeficiente de Poisson del Zinco

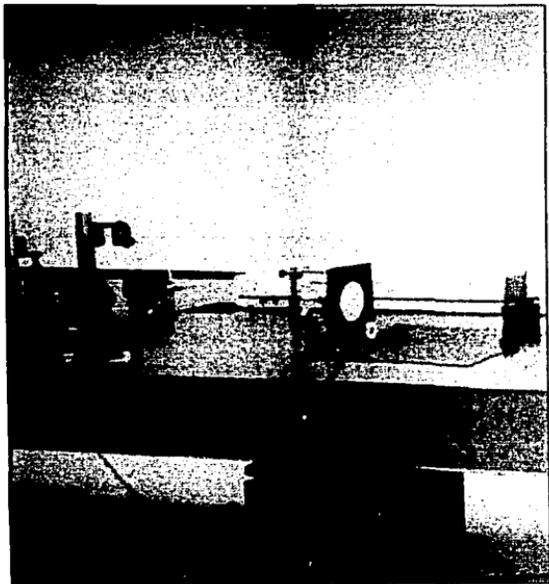


Figura 4.3. Fotografía de la Mesa con el Arreglo Experimental del Zinaco

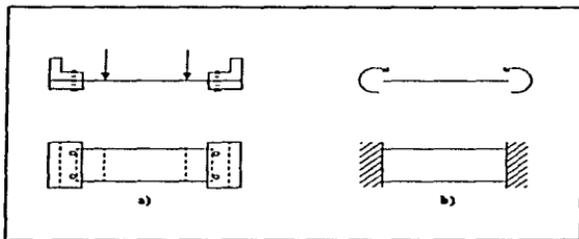


Figura 4.5. Lámina Rectangular de Zincaco.

Referencias

- [1] Principios Fundamentales de la Holografía, Fernández G. M., Escobar A. L., p p. 15.
- [2] Practical Holography, Christopher Outwater, p p. 3-6
- [3] La Holografía, John Lovine, p p. 20-35
- [4] Holographic Interferometry, P. K. Rastogi.
- [5] Holographic Interferometry in Experimental Mechanics, Yu. I. Ostrovsky.
- [6] Reconstructed Wavefronts and Communication Theory, E. N. Leith y J. Upatnickis, p p. 1123-30.

CAPÍTULO V

" DISCUSIÓN

DE

RESULTADOS "

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Cuando a causa de ciertos procesos tecnológicos, tales como el laminado, predomina una cierta orientación de los cristales del metal, las propiedades elásticas dependen de esta dirección y por lo tanto debería considerarse la condición de anisotropía. No obstante, como ya se mencionó antes, el Zinalco es un material cuyas características lo liberan de esta condición, por lo que se supondrá que los cuerpos de las muestras experimentales en cuestión son perfectamente elásticos, homogéneos e isotrópicos. Además despreciaremos las fuerzas superficiales y las fuerzas másicas (presión, peso, gravedad, etc.).

V.1. Lámina Circular de Zinalco

En la Figura 5.1 se muestra el interferograma elegido, de la lámina circular de Zinalco, para el análisis. Se puede observar que el patrón de franjas de interferencia que se obtiene como resultado de la fuerza aplicada en su centro, es de forma casi circular, lo cual puede deberse a inhomogeneidad en el material, o bien, debido a problemas en el sistema para sujetar la lámina y aplicarle la fuerza. Suponemos, que en este caso la razón es la primera, ya que se utilizaron distintos sistemas de sujeción y apriete de la lámina y se obtenían resultados muy parecidos.

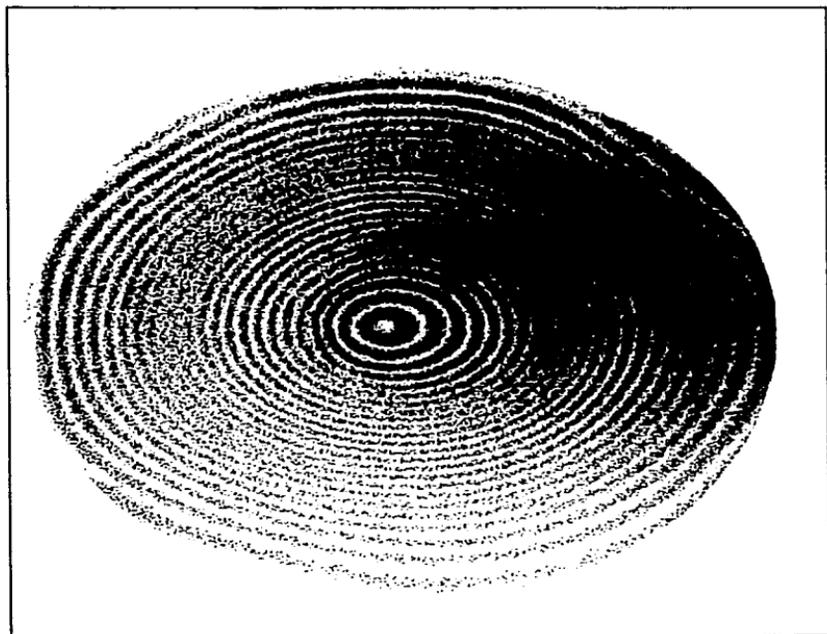


Figura 5.1. Interferograma de la lámina circular de Zinco.

Como ya se discutió en el Capítulo II, la distribución de irradiancia de un holograma de doble exposición de acuerdo a la ecuación (2.6) está dada por

$$I(x, y) = |o(x, y)|^2 [1 + \cos \Delta\phi(x, y)] \quad (5.1)$$

donde: $|o(x, y)|^2$ representa a la imagen del objeto

$\Delta\phi(x, y)$ es el cambio en la fase óptica debido al cambio en la posición del objeto entre las exposiciones

El cambio de fase como función del desplazamiento de un punto [1] está dado por

$$\Delta\phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} [2z(x)] \quad (5.2)$$

Dependiendo del valor del cambio de fase se tendrá interferencia constructiva o destructiva, representada por un patrón de interferencia como el mostrado en la Figura 5.1

La n -ésima franja brillante (interferencia constructiva) corresponde a un cambio de fase

$$\Delta\phi = 2\pi N$$

por lo que

$$z(x) = \frac{N\lambda}{2}$$

Por conveniencia usaremos como notación $w(x) = z(x)$ de tal manera que

$$w(x) = \frac{N\lambda}{2} \quad (5.3)$$

donde N es el orden de franja.

V.1.1. Determinación del Campo de Desplazamientos

De acuerdo con la ecuación (5.3) y suponiendo que el desplazamiento de la lámina es en una sola dirección (eje z), si contamos el número de franjas hasta una posición de interés, se puede determinar el desplazamiento sufrido para ese punto en específico. En la Figura 5.2 se muestra el gráfico de desplazamiento en la dirección normal como función del radio de la lámina.

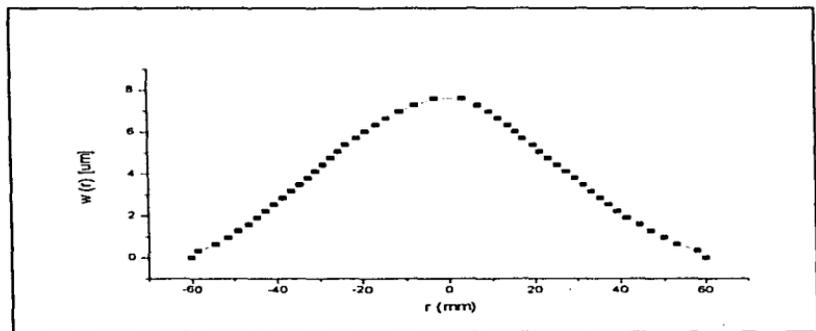


Figura 5.2. Distribución de desplazamientos para la lámina circular de Zincalco

A partir de los datos experimentales de la Figura 5.2, se obtuvo una expresión analítica mediante un ajuste no lineal, la ecuación que se obtuvo queda como una función del radio y es la siguiente

$$w(r) = 7.62 e^{-7.53 \times 10^{-6} (r + 1.47)^2} \quad (5.4)$$

La ecuación (5.4) representa el campo de desplazamientos que sufre la lámina en dirección del eje z y describe totalmente su comportamiento. Utilizando esta ecuación se puede determinar el desplazamiento de cualquier punto de la lámina, por ejemplo, el desplazamiento máximo se obtiene cuando $r = 0$, es decir, en el punto en que se aplica la fuerza que es el centro de la lámina, en donde

$$w_{\max, r=0} = 7.60 \mu\text{m}$$

En la Figura 5.3 se muestra la curva correspondiente a la ecuación (5.4)

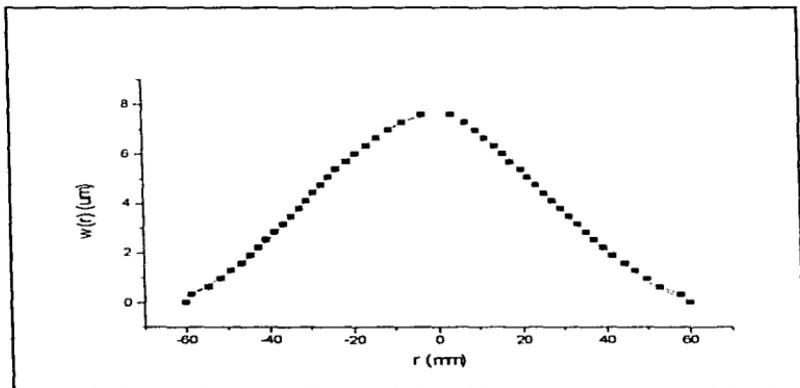


Figura 5.3. Curva ajustada a los datos experimentales.

Podemos hacer una comparación de los resultados obtenidos, utilizando interferometría holográfica, con los resultados que se obtienen resolviendo el problema utilizando la Teoría de la Elasticidad. La solución a este problema es bien conocida [2] y está dada por la ecuación

$$w(r) = \frac{P}{8\pi D} \left[r^2 \ln \frac{r}{a} + \frac{1}{2} (a^2 - r^2) \right] \quad (5.5)$$

donde r es la distancia del centro de la lámina a cualquier punto de interés de la misma,
 a es el radio de la lámina
 P es la fuerza aplicada
 D es la rigidez de la placa a la flexión

En la Figura 5.4 se muestra el campo de desplazamientos correspondiente a la solución teórica, dada por la ecuación (5.5)

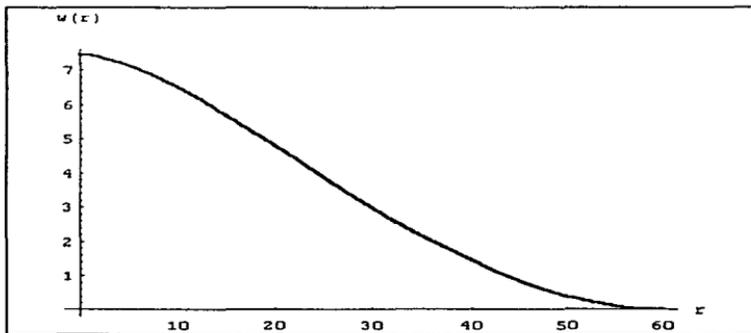


Figura 5.4. Distribución de desplazamiento de acuerdo al modelo teórico.

En la Figura 5.5 se muestra simultáneamente y en forma gráfica, los resultados obtenidos utilizando interferometría holográfica y la solución teórica, encontrándose que concuerdan de manera aceptable

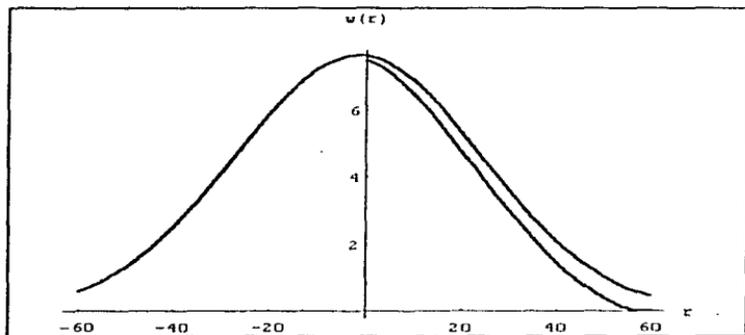


Figura 5.5. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con el modelo teórico.

Con el propósito de visualizar cual es el efecto físico, al aplicar la fuerza en el centro de la lámina, se puede suponer razonablemente que se tiene simetría radial, para obtener una gráfica tridimensional (Figura 5.6) de esta función.

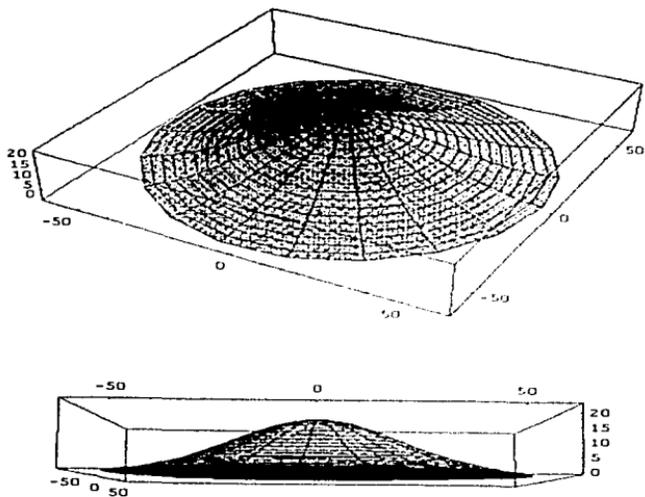


Figura 5.6. Gráfico 3-D del Campo de Desplazamientos experimentales.

De manera análoga, el campo de desplazamientos de acuerdo al modelo teórico se muestra en la gráfica tridimensional de la Figura 5.7.

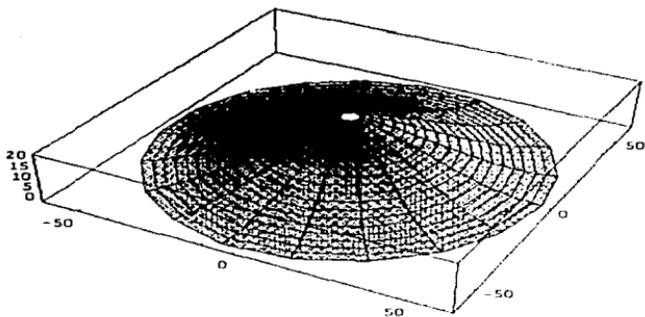


Figura 5.7. Gráfico de 3-D del Campo de Desplazamientos para el Modelo Teórico.

A partir del campo de desplazamientos obtenido por Interferometría Holográfica y dada la ecuación (5.6), se pueden obtener, los campos de desplazamiento radial

Campos de desplazamiento radial

El campo de desplazamientos en la dirección radial [3] esta dado por

$$u_r = z \frac{dw}{dr} \quad (5.6)$$

Que se puede calcular directamente, a partir de la ecuación (5.4), derivándola analíticamente.

$$u_r = -z(2.21 \times 10^{-3} + 1.51 \times 10^{-3}r) 7.62 e^{-0.51 \times 10^{-3}(r+1.4)z}$$

Esta ecuación describe completamente el campo de desplazamientos en la dirección radial y como puede observarse depende linealmente del espesor z de la lámina (ver Apéndice C) Por ejemplo, el campo de desplazamiento radial sobre una de las caras de la placa ($z = 0.198$ mm) está dado por

$$u_{r, z=0.198} = -(2.21 \times 10^{-3} + 1.51 \times 10^{-3}r) 1.49 e^{-0.51 \times 10^{-3}(r+1.4)z}$$

La Figura 5.8 se muestra el campo de desplazamiento radial para diferentes valores de z , como puede observarse, a partir del plano medio de la lámina, los desplazamientos radiales comienzan a incrementarse, tomando su valor máximo sobre las caras de la lámina y anulándose en el plano medio de la misma.

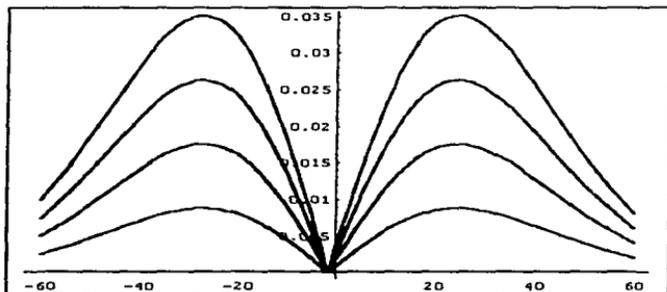


Figura 5.8. Campos de Desplazamiento Radial para distintos valores de z .

V.2.2. Determinación del Campo de Deformaciones

A partir de la distribución de desplazamientos normales, dados por la ecuación (5.4), se pueden también calcular los campos de deformación radial y tangencial

Campos de deformación radial

La deformación radial [3] en este caso esta dada por la ecuación

$$\epsilon_r = z \frac{d^2 w}{dr^2} \quad (5.8)$$

Derivando analíticamente, dos veces la ecuación (5.4) se tiene

$$\epsilon_r = - \left[151 \times 10^{-3} - (2.21 \times 10^{-3} + 1.51 \times 10^{-3} r)^2 \right] 7.62 z e^{-0.11 \times 10^{-4} (r+1.47)^2}$$

En la Figura 5.9 se muestra gráficamente el campo de deformación radial para diferentes valores de z.

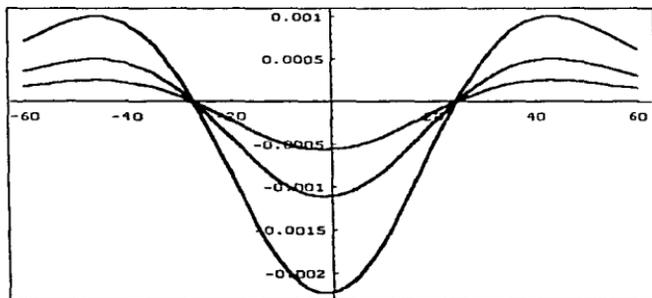


Figura 5.9. Campos de Deformación radial para diferentes valores de z.

Campos de deformación tangencial

La deformación tangencial [3] esta dada por:

$$\epsilon_t = \frac{z}{r} \frac{dw}{dr} \quad (5.9)$$

Sustituyendo la ecuación (5.4) en la (5.9) se tiene

$$\epsilon_t = -\frac{z}{r} (2.21 \times 10^{-3} + 151 \times 10^{-3} r) 7.62 e^{-7.53 \cdot 10^{-4} (r+1.4)^2}$$

V.1.3. Determinación del Campo de Esfuerzos

Dado que el material es elástico, se pueden calcular las distribuciones de esfuerzos utilizando la ley de Hooke, a partir de las deformaciones radiales y tangenciales

Campos de esfuerzo radial

La relación esfuerzo-deformación [3] para el caso de los esfuerzos radiales es la siguiente

$$\sigma_r = \frac{Ez}{1-\nu^2} (\epsilon_r + \nu \epsilon_t) \quad (5.10)$$

Que se puede representar en términos de $w(r)$ como

$$\sigma_r = \frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right) \quad (5.11)$$

Por lo que

$$\sigma_r = -129 \times 10^{11} z \left[151 \times 10^{-3} - (2.21 \times 10^{-3} + 151 \times 10^{-3} r)^2 + \frac{0.39}{r} (2.21 \times 10^{-3} + 151 \times 10^{-3} r) \right] e^{-7.53 \times 10^{-7} (r+1.47)^2}$$

Campos de esfuerzo tangencial

La relación esfuerzo-deformación [3] para el caso de los esfuerzos tangenciales es la siguiente

$$\sigma_t = \frac{Ez}{1-\nu^2} (\epsilon_t + \nu \epsilon_r) \quad (5.12)$$

Que se pueden representar en términos de $w(r)$ como

$$\sigma_t = \frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \nu \frac{d^2 w}{dr^2} \right) \quad (5.13)$$

Por lo que

$$\sigma_t = -129 \times 10^{11} z \left[2.09 \times 10^{-3} - 2.21 \times 10^{-3} r^{-1} - 0.39 (2.21 \times 10^{-3} + 151 \times 10^{-3} r)^2 \right] e^{-7.53 \times 10^{-7} (r+1.47)^2}$$

Estas expresiones demuestran claramente que los esfuerzos se anulan en el plano medio de la placa y varían linealmente con el espesor de la placa, los esfuerzos máximos se tienen en las caras de la placa.

V.1.4. Cálculo de Momentos y Fuerza Cortante.

Conociendo los esfuerzos σ_r y σ_t , se pueden determinar los momentos resultantes [3] sobre las caras mediante las ecuaciones

$$M_r = D \left(\frac{d^3 w}{dr^2} + \nu \frac{dw}{r dr} \right) \quad (5.14)$$

$$M_t = D \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \nu \frac{d^3 w}{dr^2} \right) \quad (5.15)$$

Donde $D = \frac{E(2h)^3}{12(1-\nu^2)}$ es la rigidez de la placa a la flexión, por lo tanto

$$M_r = -4.89 \left[1.51 \times 10^{-3} - (2.21 \times 10^{-3} + 1.51 \times 10^{-3} r)^2 + \frac{0.39}{r} (2.21 \times 10^{-3} + 1.51 \times 10^{-3} r) \right] e^{-7.53 \times 10^{-2} (r+1.47)^2}$$

$$M_t = -4.89 \left[2.09 \times 10^{-3} - 2.21 \times 10^{-3} r^{-1} - 0.39 (2.21 \times 10^{-3} + 1.51 \times 10^{-3} r)^2 \right] e^{-7.53 \times 10^{-2} (r+1.47)^2}$$

La fuerza cortante [3] se calcula mediante la expresión:

$$Q_r = D \frac{d}{dr} \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) \quad (5.16)$$

$$Q_r = \left[1.08 \times 10^{-2} + 7.38 \times 10^{-3} r + 1.08 \times 10^{-2} r^{-2} \right] e^{-7.53 \times 10^{-2} (r+1.47)^2}$$

V.2. Lámina Rectangular de Zinalco

V.2.1. Obtención de Coeficiente de Poisson del Zinalco.

El interferograma obtenido de la lámina rectangular de Zinalco, para este fin, se muestra en la Figura 5.11.



Figura 5.11. Interferograma de la Lámina Rectangular de Zinalco.

Teóricamente sabemos (Apéndice C) que la ecuación de las líneas de nivel, que corresponden a las curvaturas opuestas que se obtienen en el interferograma, se define como

$$x^2 - \nu y^2 = \text{cte.}$$

por lo que, el coeficiente de Poisson (ν) para el Zinalco, se puede determinar fácilmente utilizando la ecuación

$$\nu = \frac{1}{\tan^2 \alpha}$$

Midiendo en el interferograma obtenido, según la Figura C 4 del Apéndice C, se tiene que $\alpha = 58^\circ$, con lo que obtenemos un valor para el coeficiente de Poisson de $\nu = 0.39$. Con este dato y el Módulo de Elasticidad ($E = 110 \text{ GPa}$) ya conocido, podemos obtener valores de otras Constantes Elásticas para el Zinalco (ver Tabla 3 I)

Tabla 5.II. Valores Típicos de Constantes Elásticas.[3]

Material	ν	$E \text{ (Pa)}$	$\lambda \text{ (Pa)}$	$G \text{ (Pa)}$	$K \text{ (Pa)}$
Acero	0.29	207×10^{10}	11.1×10^{10}	8.02×10^{10}	16.4×10^{10}
Aluminio	0.34	6.89×10^{10}	5.46×10^{10}	2.57×10^{10}	7.18×10^{10}
Cobre	0.34	8.96×10^{10}	7.10×10^{10}	3.34×10^{10}	9.33×10^{10}
Zinalco*	0.39	11.0×10^{10}	14.04×10^{10}	3.96×10^{10}	16.67×10^{10}

* Los datos del Zinalco fueron calculados con base a la tabla 3 I

Referencias

- [1] Medición de Microdeformaciones y Microesfuerzos Utilizando Interferometría Holográfica, Castro C. Marco, p.p. 29-34, 54-59.
- [2] Elasticity Theory and Applications, P. S. Pawlik, p.p. 45-55, 231-245.
- [3] Resistencia de Materiales, V. L. Feodosiev, p.p. 32-80, 320-325.

CONCLUSIONES

La técnica de Interferometría Holográfica es una técnica con muchas ventajas sobre otras técnicas no destructivas, ya que es posible realizar análisis cualitativos y cuantitativos, además de permitirnos verificar modelos matemáticos, resultando una herramienta valiosa que puede dar una gran cantidad de información a los ingenieros

La técnica de Interferometría Holográfica demostró tener un gran potencial para realizar micrometrología, así como para caracterizar el comportamiento mecánico de elementos aislados, o bien de sistemas más complejos

Se implementaron arreglos experimentales para estudiar el comportamiento mecánico de la aleación Zinalco (siendo factible la aplicación de dichos arreglos a otras situaciones), con lo que se consiguió determinar de forma confiable, los campos de desplazamiento, de deformación, de esfuerzo, los momentos y fuerzas cortantes, para cualquier punto de una placa o lamina deformada, lo que hasta ahora no se había podido hacer con ninguna otra técnica. Por otra parte, con esta técnica podemos determinar los valores de constantes elásticas, propias del material. Estas aplicaciones se extienden hacia cualquier otro tipo de material, forma o estructura, lo cual nos permite apreciar su gran utilidad.

Se tuvieron algunos problemas (que se lograron superar, casi en su totalidad) por la inhomogeneidad del material, los sistemas de sujeción tanto del objeto como de la placa holográfica y el método utilizado para aplicar las fuerzas que deformaban nuestro elemento de estudio. No obstante, por métodos comparativos podemos asumir que los resultados obtenidos son lo suficientemente confiables, lo cual será de gran ayuda para futuros estudios relacionados con la aleación Zinalco, así como para ampliar los campos de aplicación de la Interferometría Holográfica de Doble Exposición. No obstante, se considera pertinente dar algunas recomendaciones para realizar y facilitar trabajos posteriores.

Recomendaciones:

Se recomienda revisar si las condiciones, bajo las cuales se lleva a cabo el proceso de producción de la lámina de Zinalco, es el adecuado. Además resulta conveniente realizar más experimentos con objetos de estudio de otro tipo (barras, columnas, perfiles, dispositivos mecánicos, estructuras, etc.) y otros materiales (concreto, cerámicos, plásticos), para abrir puertas hacia otros campos de estudio.

Los interferogramas obtenidos mediante esta técnica, pueden mejorarse ya sea con una mejor iluminación, o con la utilización de un procesado químico que les proporcione mayor eficiencia, por ejemplo, se pueden obtener interferogramas más brillantes con otros procesos de blanqueado, pero que a su vez son más elaborados y delicados. También sería de gran utilidad metodizar la interpretación de los interferogramas, utilizando métodos más precisos para la medición de la posición de las franjas en los mismos.

Utilizar las demás técnicas de Interferometría Holográfica mencionadas en el trabajo, para experimentos afines, incrementando las posibilidades de obtener mayor información y facilitar el trabajo, además de explorar las posibilidades de utilizarlas en aplicaciones a nivel industrial.

Tener un cuidado muy especial en el arreglo experimental, en cuanto a la sujeción del objeto de estudio y la forma en que se le está modificando. También debemos seleccionar cuidadosamente la muestra, para evitar que los interferogramas se vean afectados por factores externos, alterando la información que se pretende obtener.

Implementar en las instalaciones de la escuela un laboratorio de óptica, para realizar estudios de este tipo, con el fin de ampliar la investigación científica y consecuentemente las posibilidades laborales. También se recomienda continuar con el estudio del Zinc y sus aleaciones, para aprovechar al máximo, los beneficios que nos brinda este material.

APÉNDICE A. EL LÁSER

El láser, cuyo nombre se ha formado con la primera letra de cada palabra de la frase en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (luz amplificada por emisión estimulada de radiación), ha ampliado repentinamente y grandemente los horizontes de la ciencia y tecnología actual.

En el año 1900, Planck [1] propuso que toda energía es radiada en pequeños paquetes de energía, a los cuales llamó cuantos. Más tarde en 1916, Albert Einstein confirmó la teoría de Planck y al aplicarla al estudio de la luz, llamó fotón a ese pequeño paquete de energía luminosa. Einstein estudió y predijo el fenómeno de emisión estimulada en los átomos, según el cual un átomo que recibe luz de la misma longitud de onda de la que puede emitir, es estimulado a emitirla en ese instante.

El siguiente trabajo fundamental para la evolución posterior del láser fue el del bombeo óptico, desarrollado a principios de la década de los cincuenta por Alfred Kastler (1902-1984) [2]. El trabajo de Kastler sobre el bombeo óptico, fue desarrollado con la colaboración de su alumno Jean Brosse, fructificando con el descubrimiento de técnicas para subir el nivel energético de los átomos, dicho de otro modo, métodos para que los electrones de los átomos suban al nivel deseado, utilizando efectos de resonancia óptica.

Apenas a la llegada del láser en 1960 se comenzó a disponer de una fuerte fuente de luz, lo que permitió que la técnica holográfica, que anteriormente solo era de interés científico, se convirtiera en una proposición práctica; al grado de que se inició, y aún se continúa invirtiendo grandes esfuerzos de investigación y desarrollo para tal efecto [3].

A fin de comprender el fenómeno de emisión estimulada comencemos por recordar que la luz es emitida y absorbida por los átomos mediante los mecanismos llamados de emisión y de absorción, respectivamente. Si el electrón de un átomo está en una órbita interior, puede pasar a una exterior si absorbe energía del medio que lo rodea, generalmente en la forma de un fotón luminoso. Éste es el proceso de absorción que se representa mediante los diagramas de la Figura A.1a. Si el electrón se encuentra en una órbita exterior, puede caer a una órbita interior si pierde energía, lo cual puede ocurrir también mediante la emisión de un fotón, siendo su energía igual a la diferencia de energía de los estados entre los que se da la transición.

Cuando un electrón está en una órbita exterior también decimos que esta en un estado superior. El electrón no puede permanecer en un estado superior un tiempo demasiado grande, sino que tiende a caer al estado inferior emitiendo un fotón, después de un tiempo menor a un microsegundo, al que se denomina vida media del estado. Es por eso que este proceso se denomina de emisión espontánea y se representa en la Figura A.1b

La energía que necesita un electrón para subir al estado superior no necesariamente se manifiesta bajo la forma de fotón luminoso. También puede absorber la energía que se transmite mediante otros mecanismos, como por ejemplo, mediante una colisión con otro átomo. Si estamos subiendo constantemente los átomos de un cuerpo al estado superior mediante un mecanismo cualquiera, estos caerán espontáneamente al estado inferior emitiendo luz. A este proceso se le conoce con el nombre de bombeo óptico

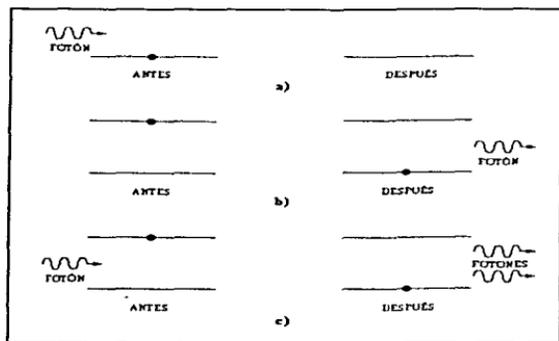


Figura A.1. Procesos atómicos de a) Absorción, b) Emisión Espontánea y c) Emisión Estimulada. [2]

La emisión de luz es entonces un proceso en el que todos los átomos del cuerpo participan, pero en forma independiente y totalmente desincronizada. Dicho de otro modo, las fases de las ondas no tienen ninguna relación entre sí, o lo que es lo mismo, las crestas de estas ondas no están alineadas, como se muestra en la Figura A 2

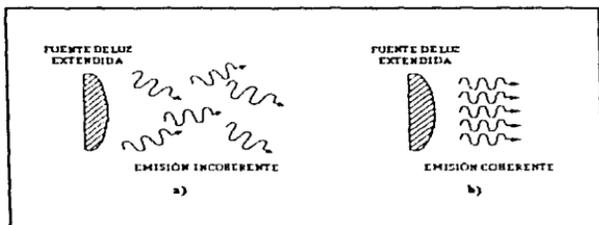


Figura A.2. Emisión incoherente de fotones de una fuente de luz extendida. [2]

Existe una segunda forma de emisión de luz por un átomo, llamada emisión estimulada que se representa mediante el diagrama de la Figura A 1(c). Si un electrón está en el estado superior y recibe un fotón de la misma frecuencia del que emitiría si bajara al nivel inferior, desestabilizará a este átomo, induciéndolo a emitir inmediatamente. Después de esta emisión estimulada existirán dos fotones en lugar de uno, el que estimuló y el estimulado. Naturalmente, para que la emisión estimulada tenga lugar se requiere que el electrón permanezca en el estado superior un tiempo suficientemente largo para darle oportunidad al fotón estimulador a que llegue al átomo. Por esta razón, el proceso de emisión estimulada es más fácil si el nivel superior tiene una vida media relativamente larga.

Como los átomos tienden constantemente a caer al estado o nivel inferior, la mayoría de ellos en un momento dado están ahí. Lo que logra el bombeo óptico es que la mayoría de los átomos estén constantemente en el nivel superior. Este proceso se denomina inversión de población y es absolutamente indispensable para que se produzca la emisión láser.

Consideremos un material sujeto a bombeo óptico, a fin de que sus átomos regresen constantemente al nivel superior. Supongamos también que la vida media de este estado superior es lo suficientemente larga como para permitir la emisión estimulada. Finalmente hagamos incidir en este material un fotón de la frecuencia adecuada para provocar la emisión estimulada. Es fácil ver que se provocará una reacción en cadena, por lo que a la salida se tendrá no solo uno sino una multitud de fotones. Dicho de otro modo se habrá amplificado la luz mediante el mecanismo de emisión estimulada.

A fin de que este proceso sea continuo, podemos colocar un espejo semitransparente a la salida, para regresar parte de los fotones que salen, y así seguir provocando la emisión estimulada. A la entrada se coloca otro espejo totalmente reflector, ver Figura A.3.

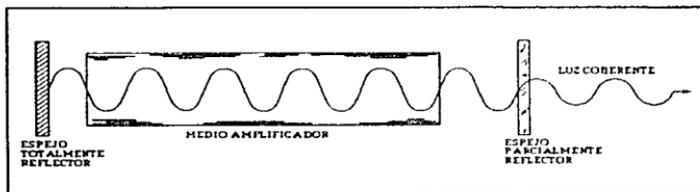


Figura A.3. Sistema de emisión de un láser. [2]

Los principales tipos de láseres que existen se pueden clasificar en continuos o pulsados, de baja potencia o de alta potencia, según el color de la luz que emiten, o según el material del que están hechos. A continuación se mencionan algunos de los principales láseres, clasificados según el estado del material que se utiliza como medio amplificador:

a) Láseres de Gas. Éstos son los láseres más comunes y útiles. En la Tabla A.1 se muestra algunos de estos láseres, con sus principales características.

Tabla A.1. Algunos láseres de gas [2].

Sistema	Elemento activo	Región espectral o color	Forma de operación	Potencia típica
He-Ne	neón	rojo, naranja, amarillo, verde e infrarrojo	continua	10 mW
He-Cd	cadmio	violeta, UV	continua	10 mW
He-Se	selenio	verde	continua	10 mW
Ar	argón	verde, azul, UV	continua o pulsada	10 W
Kr	kriptón	rojo	continua o pulsada	10 W
CO ₂ -N ₂ -He	bióxido de carbono	infrarrojo	continua o pulsada	100 W o más

Los primeros tres láseres tienen mucho en común. En éstos el helio tiene como función ayudar en el proceso del bombeo óptico. El elemento activo es el neón en el primero, el vapor de cadmio en el segundo y el vapor de selenio en el tercero. El primero de ellos es más popular y el que se utilizó durante la realización del presente trabajo. Estos láseres se construyen con un tubo de vidrio con dos electrodos internos para mantener una descarga eléctrica a través del gas.

Una segunda categoría de láseres de gas son los de gas ionizado, por ejemplo, los de argón y kriptón ionizados. Estos láseres requieren de una corriente muy grande, del orden de amperes, para poder ionizar el gas y producir la inversión de población. Por lo que es necesario el enfriamiento por agua, y el tubo debe tener una construcción muy complicada y especializada. Además la vida de estos láseres es corta, comparada con la de los otros láseres de gas.

El láser de bioxido de carbono funciona con niveles de energía moleculares en lugar de atómicos. La potencia infrarroja que emite en 10.6 μm es tan alta que puede cortar muy fácilmente una gran variedad de materiales. Por ello sus aplicaciones industriales son muy grandes.

b) Láseres sólidos. Se entiende por láser sólido aquel en el que el medio activo es sólido. Esto incluye a los semiconductores, llamados también de estado sólido. La Tabla A. II muestra algunos de los principales láseres sólidos.

Tabla A. II. Algunos láseres sólidos [2].

Sistema	Elemento activo	Región espectral o color	Forma de operación	Potencia típica
rubi	cromo	rojo 694.3 nm	pulsada	----
Nd-YAG	neodimio	infrarrojo 1.06 μm	continua o pulsada	1 W
Nd-vidrio	neodimio	infrarrojo	pulsada	----
Ga-As	arsenuro de Galio	infrarrojo 0.84 μm	continua o pulsada	1 W
semiconductor	silicio	infrarrojo 0.6-0.9 μm	continua o pulsada	0.5 W

El láser de rubí fue el primero en inventarse. El cromo, que está como contaminante, en una barra de rubí es el elemento activo. Para excitar este láser se usa una lámpara helicoidal de xenón pulsada. Como el pulso de la lámpara debe ser muy intenso, se dispara por medio de un campo de capacitores. Este láser es pulsado, aunque se pueden obtener pulsos dobles, separados menos de un microsegundo con el fin de emplearlos en interferometría holográfica. El láser de Nd-YAG tiene como elemento activo el neodimio hospedado en una barra de YAG. Al igual que el láser de rubí se excita con una lámpara de xenón pulsada.

El láser semiconductor, a diferencia de los otros sólidos, se excita con una corriente eléctrica. Este láser puede ser tanto pulsado como continuo, es muy compacto y se puede modular, es decir, transmitir información con él muy fácilmente. El haz luminoso tiene forma de abanico al salir del láser, con una divergencia angular de alrededor de 8°. Aunque su coherencia no es muy alta, es el dispositivo ideal para comunicaciones por fibras ópticas. Este es el láser que se utiliza en los reproductores de discos compactos y en las lecturas de discos ópticos para computadora.

c) Láseres Líquidos. Como su nombre lo indica, en estos láseres el medio activo es líquido y generalmente es un colorante, como la rodamina 6G, disuelta en líquido. La ventaja de estos láseres es que se pueden sintonizar a cualquier color deseado, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, según el colorante que se use. En cambio tienen la desventaja que su excitación tiene que hacerse con el haz coherente de otro láser, como el de argón o el de Nd-YAG.

Referencias.

- [1] Practical Holography, C. Outwater, V. Hamersveld, sec. 2.
- [2] Óptica Tradicional, Daniel Malacara, pp. 59-81.
- [3] Óptica, F. Graham Smith, J. H. Thompson, pp. 347-351.
- [4] The Laser Guidebook, Jeff Hecht.

APÉNDICE B. PROCESADO QUÍMICO

Sabemos que la película o placa holográfica es sensible a la luz, debido a la emulsión que tiene en uno de sus lados. Esta emulsión está formada por granos extremadamente finos (menores de 0.1 μm de diámetro) de haluro de plata, depositados en una matriz de gelatina, junto con algunos agentes sensibilizadores. Con la emulsión se recubre un sustrato transparente como placa de vidrio o película flexible de acetato. Cuando se expone en una placa o película holográfica y posteriormente se revela el patrón de interferencia, se forma una holograma de absorción durante el proceso de revelado. El procesamiento químico completo que se requiere para la obtención de un holograma, consta principalmente de tres etapas:

- Revelado
- Fijado
- Blanqueado

Revelado

El propósito del proceso de revelado es el de oscurecer las partes del material sensible que han sido afectadas por el bombardeo de fotones durante la exposición. El revelador es un agente reductor, que reduce químicamente los haluros de plata a plata metálica de manera selectiva, es decir, reduciendo únicamente los granos que hayan sido expuestos a la luz y en forma proporcional a la cantidad de luz recibida. Esta es una correspondencia punto por punto entre el objeto y la emulsión. Cada punto o conjunto de puntos del objeto reflejan determinada cantidad de luz. Un objeto blanco refleja más luz y por lo tanto expone más haluro de plata, teniendo después del proceso de revelado una zona más oscura.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

No todos los reveladores son adecuados para fines holográficos, debido a que algunos reducen discretamente todos los granos de haluro de plata (produciendo velo) y otros no alcanzan a reducir ni los granos expuestos. En la Tabla B.1 se listan los componentes del revelador utilizado que es un revelador limpio, de alto contraste y con buenas propiedades de conservación. Todos los químicos utilizados, para la elaboración de cada compuesto, son químicamente puros.

Tabla B.1. [3]

Revelador D - 19	
Agua a 50 °C	500 ml
Metol	2 g
Sulfito de Sodio	90 g
Hidroquinona	8 g
Carbonato de Sodio Monohidratado	52.5 g
Bromuro de Potasio Anhidro	5 g
Agua Fría a Completar	1000 ml

Fijado

Al terminar el revelado la emulsión está hinchada y llena de solución reveladora, que sigue actuando a menos que se le detenga, contiene aún haluros de plata sensibles a la luz que se deben eliminar para evitar que se siga oscureciendo.

Para el proceso de fijado, se necesita primero un baño de paro o detenedor (que nos permitirá controlar el tiempo de revelado) para contrarrestar la acción reductora del revelador y un posterior baño fijador que convierta todo el haluro de plata no expuesto, en sales solubles que pueden ser eliminadas con un lavado, sin que dañe la imagen de plata. En el fijador, también hay endurecedores, que darán resistencia a la gelatina de la emulsión.

El baño detenedor además de contrarrestar la acción del revelador, evita que se acarreé mucho revelador al fijador, contaminándolo menos y alargando su vida útil. Como detenedor se puede utilizar, unas gotas de fijador o de ácido acético, diluidas en agua destilada.

En la Tabla B II se mencionan los componentes del fijador utilizado, que es rápido y de gran capacidad.

Tabla B.II. [3]

Fijador F - 7	
Tiosulfato de Sodio Pentahidratado	360 g
Cloruro de Amonio	50 g
Sulfito de Sodio Anhidro	15 g
Ácido Acético Glacial	13 ml
Ácido Bórico Cristales	7.5 g
Alumbre de Potasio Granular Fino	15 g
Agua a Completar	1000 ml

Blanqueado

En los hologramas de absorción, la amplitud de la luz incidente en el momento de la reconstrucción, es modificada por la absorción de las áreas oscuras de la emulsión revelada, tales hologramas tienen una eficiencia de difracción relativamente baja (del orden del 6%) La manera de aumentar la eficiencia de difracción de un holograma de absorción es convertirlo en un holograma de fase, esto se logra mediante un proceso de blanqueado (alcanzando eficiencias de hasta el 100%) Existen distintos métodos de blanqueado, pero los blanqueadores que contienen ferricianuro de potasio están entre los mejores, más rápidos y más fáciles de utilizar, proporcionando hologramas con alta eficiencia de difracción y relativamente bajo ruido

El proceso de blanqueado con ferricianuro de potasio, sustituye la plata metálica en la emulsión ya revelada por ferricianuro de plata (que es transparente en la región visible del espectro), el cual tiene un índice de refracción distinto al de la gelatina que lo contiene

El blanqueador utilizado se muestra en la Tabla B.III

Tabla B.III. [3]

Blanqueador de Ferricianuro de Potasio	
Agua Destilada	15 g
Ferricianuro de Potasio	1000 ml

Referencias

- [1] La Holografía, John Lovine, p.p. 60-75
- [2] Practical Holography, C. Outwater, V. Hamersceld, sec. 10.
- [3] Química para Fotógrafos y Formulario, Ramiz Shehadi, p.p. 9-42, 125, 166.

APÉNDICE C. TEORÍA DE LA ELASTICIDAD

Sabemos que la deformación es una magnitud cinemática relacionada con la dirección del desplazamiento, y que los momentos de flexión y los esfuerzos pueden obtenerse de mediciones de deformación, utilizando las ecuaciones constitutivas del material, como la ley de Hooke

El pequeño desplazamiento de las partículas de un cuerpo deformado, generalmente se descompone en tres componentes u , v , w , paralelas a los ejes x , y , z , respectivamente. Consideremos un cuerpo elástico pequeño con dimensiones dx , dy , dz (Figura C.1). Si el cuerpo se deforma y u , v , w , son las componentes del desplazamiento del punto O , el desplazamiento en la dirección x de un punto próximo A , situado en el eje de las x será

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$$

debido al incremento $(\partial u/\partial x)dx$ de la función u , que corresponde al cambio de la coordenada x . El aumento de la longitud del elemento OA debido a la deformación es por lo tanto $(\partial u/\partial x)dx$. En consecuencia, la deformación longitudinal en el punto O , en la dirección x es $\partial u/\partial x$. De igual forma, las deformaciones longitudinales en las direcciones y y z , están dadas por las derivadas $\partial v/\partial y$ y $\partial w/\partial z$.

Consideremos ahora la variación del ángulo formado por los elementos OA y OB . Si u y v son los desplazamientos del punto O en las direcciones x e y , los del punto A en la dirección y , y los del punto B en la dirección x vienen dados respectivamente por

$$v + \frac{\partial v}{\partial x} dx \quad y \quad u + \frac{\partial u}{\partial y} dy$$

A causa de estos desplazamientos, la nueva dirección $O'A'$ del elemento OA forma con la dirección inicial un pequeño ángulo igual a $\partial v/\partial x$. De igual forma, la dirección $O'B'$ forma con OB el ángulo $\partial u/\partial y$. Se sigue de ello que el ángulo $\angle AOB$, inicialmente recto, ha variado en la cantidad $\partial v/\partial x + \partial u/\partial y$. Esta es la deformación tangencial, también conocida como deformación angular.

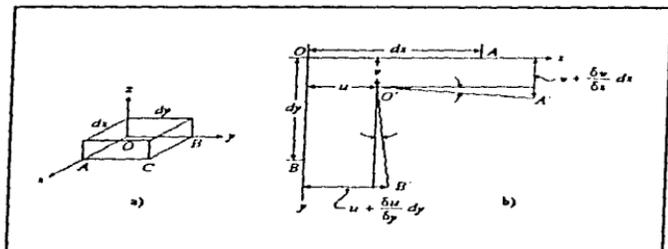


Figura C.1. [1].

De igual forma se obtiene la deformación tangencial de los ángulos formados por los planos xy y xz y los yx e yz .

Representemos mediante la letra ϵ la deformación longitudinal y mediante la letra γ la deformación tangencial. Entonces podemos escribir

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (c.1)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$$

que reciben el nombre de componentes de la deformación.

La relación entre las componentes de la tensión y de la deformación para materiales elásticos está establecida por la Ley de Hooke.

La magnitudes de la deformación en las direcciones de los ejes coordenados, para un paralelepípedo rectangular infinitésimo, con sus aristas paralelas a los ejes coordenados, vienen dadas por las ecuaciones

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}, \quad \epsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E}, \quad \epsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} \quad (c.2)$$

en las que E es el módulo de elasticidad longitudinal en el área elástica y ν es una constante llamada coeficiente de Poisson

La relación entre la deformación tangencial y la tensión tangencial esta definida por

$$\gamma = \frac{2(1 + \nu)\sigma_x}{E} = \frac{2(1 + \nu)\tau}{E}$$

Pero sabemos que el modulo de elasticidad tangencial o módulo de rigidez G está definido por

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (c.3)$$

entonces

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (c.4)$$

Si sobre las caras de un elemento actúan fuerzas tangenciales, la deformación del ángulo formado por dos ejes coordenados cualesquiera, depende únicamente de las componentes de las tensiones tangenciales paralelas a tales ejes, y su valor es

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \quad (c.5)$$

Fisicamente los esfuerzos normales son el cambio en la longitud por unidad de longitud de un pequeño elemento del material en cada dirección. Los esfuerzos cortantes son el cambio del ángulo entre los segmentos de línea de puntos del material que inicialmente eran paralelos a los ejes coordenados.

Para movimientos pequeños, la rotación de un objeto también puede expresarse en términos de derivadas del desplazamiento; las componentes w_x , w_y y w_z de la rotación alrededor de los ejes x , y , z están dadas por

$$w_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad w_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad w_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (c.6)$$

El conocimiento de las componentes de desplazamiento, es suficiente para describir el estado de deformación, para el caso especial de esfuerzos en un sólo plano, es decir, esfuerzos paralelos a su cara principal

C.1. Análisis de la Flexión de una Placa Circular

La teoría de la flexión de una placa es una parte bien desarrollada de la teoría aplicada de la elasticidad. Una placa varía su curvatura bajo la acción de fuerzas exteriores que actúan perpendicularmente al plano medio de la misma. En los cálculos de las placas se considera que la distancia z (Figura C 2), es notablemente menor que el espesor $2h$ de la placa. Solamente admitiendo esta suposición se puede estudiar la flexión de la placa independientemente de la tracción.

Esta teoría de la flexión de una placa, se basa sobre ciertas suposiciones simplificativas. La primera de ellas consiste en que se considera invariable la normal, esta suposición se conoce como la suposición de Kirchhoff y consiste en que los puntos situados antes de la deformación sobre cierta recta normal a la superficie media, siguen formando después una recta normal a la superficie deformada. Esto es aceptable en la medida en que el espesor de la placa es pequeño en comparación con las demás dimensiones.

Otra consideración es que las tensiones normales en las secciones paralelas al plano medio, son despreciablemente pequeñas en comparación con las tensiones originadas por la flexión, es decir que no existe presión alguna entre las capas de la placa.

Con la Figura C.2, se puede determinar la siguiente expresión

$$u_r = z \frac{dw}{dr} \quad (c.7)$$

que nos define el campo de desplazamiento de la placa, con la cual podemos conocer el desplazamiento en la dirección radial para cualquier valor de z , es decir para cada plano en el espesor de dicha placa.

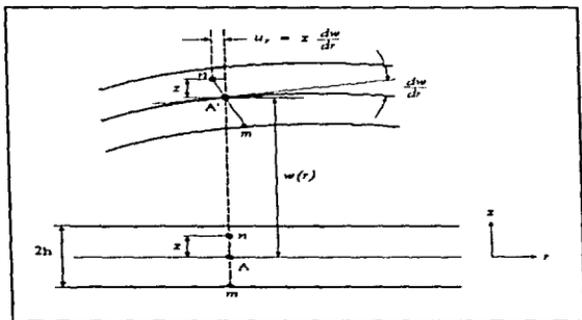


Figura C.2. Representación del campo de desplazamiento en la dirección radial. [3]

En la Figura C.3 está representada una sección axial de la placa. Los puntos situados sobre la normal A_1B_1 , después de la flexión de la placa forman la normal $A'B'$, girada un ángulo dw/dr . La normal A_2B_2 girará un ángulo $dw/dr + d^2w/dr^2$.

El segmento CD situado a la distancia z del plano medio, y orientado radialmente recibe la siguiente deformación

$$e_r = z \frac{d^2 w}{dr^2} \quad (c.8)$$

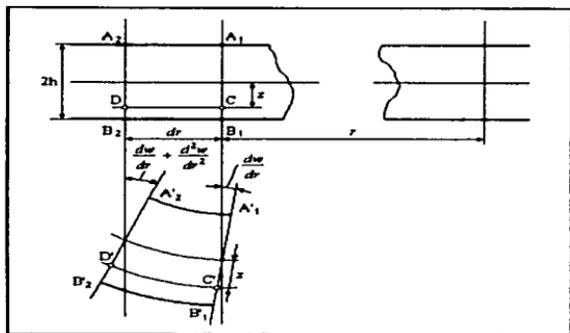


Figura C.3. Determinación de las deformaciones. [3]

La deformación unitaria en el punto C en la dirección perpendicular del plano del dibujo se puede obtener, comparando las longitudes de las circunferencias correspondientes, antes y después de la deformación. Antes de la deformación de la placa, la longitud de la circunferencia que pasa por el punto C era $2\pi r$, mientras que después de la deformación, será $2\pi (r + z \frac{dw}{dr})$. Por lo tanto la deformación unitaria tangencial será

$$e_t = \frac{z}{r} \frac{dw}{dr} \quad (c.9)$$

El segmento CD situado a la distancia z del plano medio, y orientado radialmente recibe la siguiente deformación

$$\epsilon_r = z \frac{d^2 w}{dr^2} \quad (c.8)$$

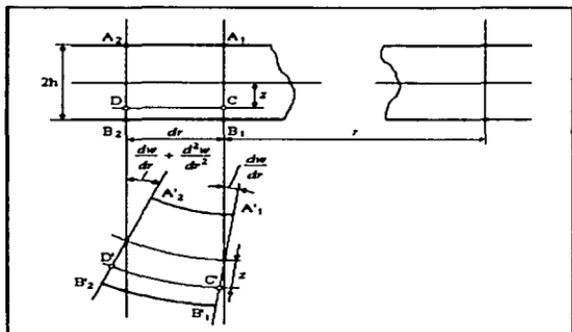


Figura C.3. Determinación de las deformaciones. [3]

La deformación unitaria en el punto C en la dirección perpendicular del plano del dibujo se puede obtener, comparando las longitudes de las circunferencias correspondientes, antes y después de la deformación. Antes de la deformación de la placa, la longitud de la circunferencia que pasa por el punto C era $2\pi r$, mientras que después de la deformación, será $2\pi (r + zdw/dr)$. Por lo tanto la deformación unitaria tangencial será

$$\epsilon_t = \frac{z}{r} \frac{dw}{dr} \quad (c.9)$$

Separamos, mediante dos secciones axiales que forman un ángulo $d\phi$ y dos superficies cilíndricas de radios r y $r + dr$, el prisma elemental de la Figura C.4a. Como en las secciones paralelas al plano medio no existen tensiones normales, los alargamientos y las tensiones estarán unidos por la ley de Hooke en la forma siguiente

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{1}{E} (\sigma_r + \nu\sigma_t) \\ \epsilon_t &= \frac{1}{E} (\sigma_t + \nu\sigma_r) \end{aligned} \quad (c.10)$$

Expresando las tensiones de acuerdo a las expresiones (c.8) y (c.9)

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right) \\ \sigma_t &= \frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \nu \frac{d^2w}{dr^2} \right) \end{aligned} \quad (c.11)$$

Sobre las caras del prisma (Figura C.4a) pueden actuar no solamente tensiones normales, sino también tensiones tangenciales. De la condición de simetría se deduce fácilmente que las tensiones tangenciales pueden aparecer solamente en los planos perpendiculares al radio r y que se orienta verticalmente.

Veamos ahora las condiciones de equilibrio del prisma separado. Para ello, hallamos primero los resultantes de las fuerzas que actúan sobre las caras del elemento. Las tensiones tangenciales en la cara $A_1B_1A_1B_1$ (Figura C.4a) originan una fuerza resultante cortante dirigida según el eje z . La intensidad de esta fuerza, es decir, la magnitud de la fuerza que se refiere a la unidad de longitud de arco $r d\phi$ se designa por Q kg/cm. La fuerza cortante en la cara $A_1B_1A_1B_1$ será $Qrd\phi$ y la fuerza cortante de la cara $A_2B_2A_2B_2$, $(Q + dQ)(r + dr)d\phi$ (Figura C.4b)

Como las tensiones en las capas superiores e inferiores son iguales, pero de signo opuesto, serán nulas las fuerzas normales sobre las caras del elemento. Las tensiones σ_r y σ , que actúan sobre las caras correspondientes se reducen a momentos resultantes en los planos verticales

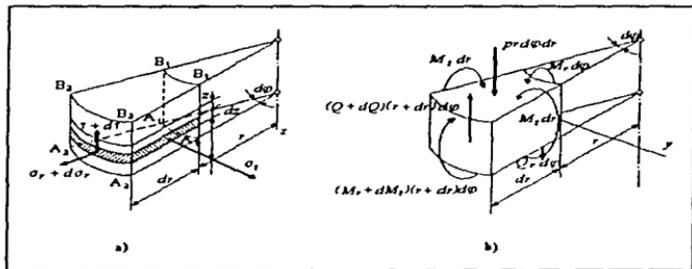


Figura C.4. [3]

La intensidad de los momentos sobre las caras $A_1B_1A_1B_1$ y $A_1B_1A_2B_2$, es decir, las magnitudes de los momentos referidos a la unidad de longitud de la sección se designan por M_r y M_t kgf cm/cm respectivamente. Conociendo las tensiones, se determina los momentos resultantes sobre las caras, obteniéndose

$$M_r = D \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right)$$

$$M_t = D \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \nu \frac{d^2 w}{dr^2} \right)$$
(c.12)

Entre las fuerzas aplicadas al elemento (Figura C.4a) se incluye también la fuerza exterior pr dr , siendo p la presión en kg/cm^2 que pueden variar en la función del radio r . Proyectando todas las fuerzas que actúan sobre el elemento (Figura C.4a), sobre el eje de simetría obtendremos

$$pr = \frac{d}{dr} (Q_r) \quad (\text{c.13})$$

Planteamos ahora la suma de los momentos de todas las fuerzas respecto al eje y , tangente al arco del círculo de radio r en el plano medio, y prescindiendo de las magnitudes de orden superior y pasando el límite resulta

$$M_r - \frac{d}{dr} (M_r r) = Q_r \quad (\text{c.14})$$

Sustituyendo M_r y M_r de las expresiones (c.12) en la expresión (c.14) y suponiendo que la rigidez D es constante resulta

$$Q_r = D \frac{d}{dr} \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) \quad (\text{c.15})$$

que es la fuerza cortante.

C.2. Comportamiento de la Superficie de una Placa Rectangular sometida a Flexión

Cuando una placa se somete a flexión pura, sometida a la acción de dos pares de fuerzas iguales y opuestas M , que actúan en uno de sus planos principales. La teoría elemental correspondiente, nos da para las componentes de la tensión los valores

$$\sigma_y = \frac{E_x}{R}, \quad \sigma_x = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (\text{c.16})$$

R es el radio de curvatura de la barra deformada a causa de la flexión. En este caso el momento flector está dado por la ecuación:

$$M = \int \sigma_{yx} dA = \int \frac{E\epsilon^2}{R} dA = \frac{EJ_z}{R} \quad (c.17)$$

en la cual J_z es el momento de inercia de la sección transversal de la viga respecto al eje neutro paralelo al eje z . De la ecuación (c.17) resulta:

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EJ_z} \quad (c.18)$$

que es la conocida fórmula de la teoría elemental de la flexión.

Consideremos ahora una sección cualquiera, $y = c$, que dista c de la extremidad izquierda de la barra. Después de esta deformación los puntos de esta sección transversal se encontrarán en el plano

$$x = a + u = a + \frac{az}{R} \quad (c.19)$$

es decir, que tal como admite la teoría elemental en la flexión simple, las secciones transversales permanecen planas. Con el objeto de estudiar la deformación en la sección transversal en su propio plano, consideremos las caras $y = \pm b$, después de la flexión. Los costados de la viga toman la inclinación que se indica con líneas de trazos en la Figura C.5b, de acuerdo a la ecuación

$$y = \pm b + w = \pm b \left(1 - \frac{vz}{R}\right) \quad (c.20)$$

Los otros dos lados de la sección transversal, $z = \pm c$, se habrán curvado por efecto de la flexión y estarán constituidos por curvas parabólicas de ecuaciones

$$z = \pm c + w = \pm c - \frac{1}{2R} (a^2 + v(c^2 - y^2)) \quad (c.21)$$

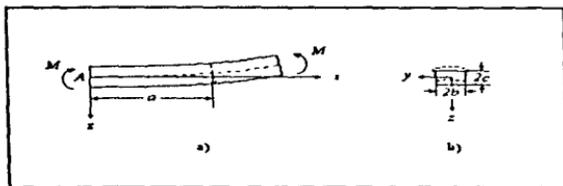


Figura C.5. [1]

Si la deformación es pequeña esas curvas pueden ser sustituidas con suficiente exactitud por arcos de circunferencia de radio R/v . Cuando a causa de la flexión, la curvatura de esos costados muestra, en la dirección longitudinal, su concavidad hacia arriba, transversalmente presenta su concavidad hacia abajo. Podremos obtener la ecuación de las líneas de nivel que corresponden a esta superficie, de curvaturas opuestas, cuyo aspecto será el que se muestra en la Figura C.6a, haciendo que la última de las ecuaciones (c.21), z y w constantes. Por lo que se tiene como ecuación de esas curvas

$$x^2 - v y^2 = cte \quad (c.22)$$

que son por lo tanto, hipérbolas, de asíntotas

$$x^2 - v y^2 = 0$$

de donde resulta para el ángulo α (Figura C.6)

$$\tan^2 \alpha = \frac{1}{v} \quad (c.23)$$

Por lo tanto si se obtienen las líneas de centro por medios holográficos, el coeficiente de Poisson (ν), se puede determinar fácilmente utilizando la ecuación

$$\nu = \frac{1}{\tan^2 \alpha} \quad (\text{c.24})$$

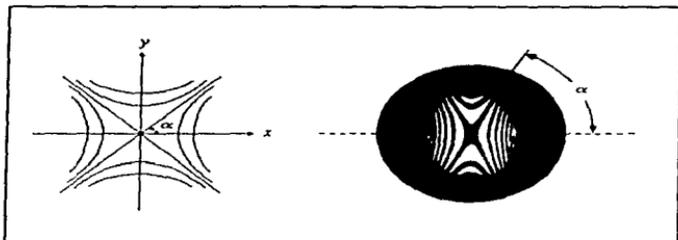


Figura C.6. Comportamiento de la superficie de una placa sometida a flexión pura. [1]

Referencias

- [1] Teoría de la Elasticidad, S. Timoshenko, p p 21-31, 281-291.
- [2] Elasticity Theory and Applications, P. S. Pawlik, p p 45-55, 231-245.
- [3] Resistencia de Materiales, V. L. Feodosiev, p p 32-80, 320-325.
- [4] Advanced Strength and Applied Elasticity, A. C. Ugural, Cap. 13.

BIBLIOGRAFÍA

- Abramson Niels, *The Making and Evaluation of Holograms*, Academic Press, Orlando 1986.
- Castro C. Marco, *Medición de Microdeformaciones y Microesfuerzos Utilizando Interferometría Holográfica*, Universidad Autónoma del Estado de México, México 1997.
- Collier R. J., Lin L., Burckhardt C., *Optical Holography*, Academic Press, Nueva York 1971.
- De Velis John B., Reynolds George O., *Theory and Applications of Holography*, Addison-Wesley, Canada 1967.
- Escobar A. Luis, *Holografía*, Reporte Interno, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, 1985.
- Escobar A. Luis, Fernández G. Manuel, *Técnicas de Blanqueado de Emulsiones Holográficas*, Rev. Méx. Fis. 38, No. 3, 1992
- Fernández G. Manuel, Escobar A. Luis, *Principios Fundamentales de la Holografía*, Contactos, No. 1. Abril 1990.
- Gabor Denis, *A New Microscop Principle*, Nature 161, Mayo 1948.
- Gabor Denis, *Microscopy by Reconstructed Wavefronts*, Proc. Roy. Soc., ser. A, 197, Julio 1951.
- Gabor Denis, *Microscopy by Reconstructed Wavefronts II*, Proc. Roy. Soc., London, 64, Junio 1966.
- Graham Smith F., Thompson J. H., *Óptica*, Ed. Limusa, México 1979.
- Gray L. Cloud, *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge University Press, New York 1995.
- Hecht Eugene, Zajac Alfred, *Óptica*, Fondo Educativo Interamericano, México 1977.

- Hecht Jeff, *The Laser Guidebook*, Mc Graw-Hill, New York 1992
- Hecht Norman L., Minardi John E., *Quantitative Theory for Predicting Fringe Pattern Formation in Holographic Interferometry*, Applied Optics, 12, No. 11, 1973
- Ibarra Tandy Benjamin, *Curso de Introducción a los Láseres*, Universidad Autónoma Metropolitana, México 1997.
- Leith Emmet N., Juris Upatnieks, *Photography by Laser*, Scientific American, 212, 6, 1965.
- Leith Emmet N., Juris Upatnieks, *Reconstructed Wavefronts and Communication Theory*, J. Opt Soc Am., 52, Octubre 1962.
- Lovine John, *La Holografía*, Ed Mc Graw-Hill, México 1978
- Mader David L., *Holographic Interferometry on Pipes: Precision Interpretation by Least-Squares Fitting*, Applied Optics 24, No. 22, 1985
- Malacara Daniel, *Óptica Tradicional y Moderna*, La Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México 1989
- Ostrovsky Yu I., Shepinov V P., Yakovlev V V., *Holographic Interferometry in Experimental Mechanics*, Board, Germany 1991
- Outwater Christopher, Hamersveld Van, *Practical Holography*, Dimensional Arts, 1995.
- Hariharan, *Optical Holography*, Cambridge University Press, New York 1984
- Rastogi Pramod K., *Holographic Interferometry*, Springer-Verlag, Germany 1994.
- Reisman Hebert, Pawlik Peter S., *Elasticity Theory and Applications*, Jhon Wiley & Sons, Canadá 1980.
- Robillard Jean, Caulfield H. John, *Industrial Applications of Holography*, Oxford Unuversity Press, New York 1990.

- Segal D. M., Thompson R. C., *Lasers and Applications Summer Course*, Imperial College Prince Consort Road, London 24-28 Junio 1996.
- Smith Howard M., *Principles of Holography*, Wiley, Nueva York 1969
- Sollid John E., *Holographic Interferometry Applied to Measurements of Small Static Displacements of Diffusely Surfaces*, Applied Optics, 8, No. 8, Agosto 1969
- Sollid John E., Swint J. B., *A Determination of the Optimum Beam Ratio to Produce Maximum Contrast Photographic Reconstruction from Double Exposure Holographic Interferograms*, Applied Optics, 9, No. 12, 1970.
- Powell R. L., Stetson K. A., *Interferometry Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction*, J Opt. Soc. Am. 55, Dec. 1965.
- Shehadi Ramiz, *Química para Fotógrafos y Formulario*, Universidad Veracruzana, Veracruz 1984.
- Spiegel Murray R., *Manual de Fórmulas y Tablas Matemáticas*, Ed Mc Graw Hill, México 1990.
- Stroke George W., *An Introduction to Coherent Optics and Holography*, Academic Press, New York 1969.
- Timoshenko S., Goodier J. N., *Teoría de la Elasticidad*, Ed. Urmo, España 1968.
- Ugural A. C., Fenster S. K., *Advanced Strength and Applied Elasticity*, Ed. Elsevier, Canadá 1981.
- Vest C. M., *Holographic Interferometry*, Nueva York, John Wiley, 1979.