

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño



Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



**“PROYECCIÓN DE FRANJAS Y LÍQUIDOS PENETRANTES
FLUORESCENTES PARA IDENTIFICAR DISCONTINUIDADES
MECÁNICAS EN SUPERFICIES METÁLICAS”**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el
grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta

MISHRAIM SANCHEZ TORRES

Director:

Dra. Liliana Cardoza Avendaño
Universidad Autónoma de Baja California

Co-director:

M.C. José Luis Javier Sanchez González
Universidad Autónoma de Baja California

Ensenada, Baja California, julio del 2019.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD ENSENADA

Proyección de franjas y líquidos penetrantes fluorescentes para identificar discontinuidades mecánicas en superficies metálicas

TESIS

Que para obtener el grado de maestría en ingeniería presenta:

Mishraim Sanchez Torres

Aprobada por:


Dra. Liliana Cardoza Avendaño
Director de tesis


M.C. José Luis Javier Sánchez González
Co-director de tesis


Dra. Amalia Martínez García
Miembro del comité


M.C. Víctor Manuel Juárez Luna
Miembro del comité


Dra. Claudia Camargo Wilson
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Junio, 2019

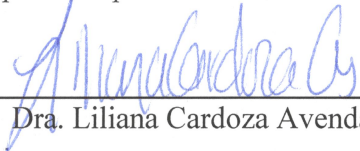
*"Sabiduría con Humildad es
Grandeza"*

Dr. Samuel Joaquín Flores

RESUMEN de la tesis de **MISHRAIM SANCHEZ TORRES** presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México, Junio 2019

Proyección de franjas y líquidos penetrantes fluorescentes para identificar discontinuidades mecánicas en superficies metálicas

Aprobada por:


Dra. Liliana Cardoza Avendaño


M.C. José Luis Javier Sánchez González

RESUMEN

Actualmente, las demandas de calidad en materiales metálicos e industriales están aumentando, las pruebas no destructivas realizadas en estos productos deben cumplir con los estándares normativos de calidad y sobre todo las necesidades de los clientes. Existen muchos métodos de garantía de calidad con respecto a las discontinuidades encontradas en materiales de la industria del acero como lo son los líquidos penetrantes fluorescentes, pero a menudo no se tiene un sistema que determine la valoración de ciertos materiales, para ello existen las técnicas ópticas no destructivas las cuales tienen un papel muy importante en la evaluación de materiales industriales ya que son técnicas de no contacto y algunas de ellas presentan resultados en tiempo real y de manera directa en una línea de campo. Una de las varias técnicas ópticas no destructivas es proyección de franjas, la cual permite determinar la calidad de las superficies de diversos materiales al analizar su topografía. Este sistema óptico requiere de un proyector para proyectar luz estructurada, una cámara CCD para la captura de imágenes y el objeto de estudio.

El desarrollo de esta investigación permitirá evaluar materiales de uso industrial aplicando la técnica de proyección de franjas en conjunto con la prueba de líquidos penetrantes y además validar su efectividad con técnicas de pruebas, tanto numérica como mecánica.

La tesis presenta resultados experimentales usando la técnica de proyección de franjas, como también el método de elemento finito para la detección de una fractura mecánica en una probeta de aluminio. Se obtuvieron resultados cuando la probeta fue sujeta a un esfuerzo mecánico y posteriormente a una perturbación térmica. La pieza también fue estudiada al aplicar la técnica de líquidos penetrantes fluorescentes. Otra muestra de estudio fue una pieza mecánica de interés en la industria aeroespacial al ser sometida a perturbación térmica evaluando sus cambios en la topografía dada la dilatación volumétrica.

DEDICATORIA

Al excelentísimo apóstol de Jesucristo “Naasón Joaquín García”.

Tú me enseñaste a ser paciente y aceptar que todo proviene del todo poderoso.

Me enseñaste a predicar la paz y a respetar a todo el mundo, sin distinción de raza, creencia, nivel social, ni de ninguna otra índole.

Me enseñaste a amar a mi prójimo, a no regresar mal por mal, sino al contrario, a orar por ellos y que más bienaventurado es dar que recibir. Que como hijo de Dios tengo el derecho de clamarle en los días de mi angustia y que él ha de responder, que ese derecho debo ejercerlo con toda piedad y reverencia.

Me enseñaste a que, como profesionista, pusiera mis conocimientos al servicio de mis hermanos y la sociedad, tu enseñanza y tu oración nos sigue sustentando a mis hermanos y a mí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme dejado vivir esta etapa de mi vida.

A mi familia, principalmente a mi madre Clara Sánchez Torres y a su esposo Salvador Álvarez por su apoyo para seguir adelante en todas mis metas. A mi esposa, Yubis Ontiveros y a mis hijas Nínive Jabneel e Isúi Azurim Sanchez Ontiveros por ser esa fuente de inspiración y motivación para concluir mis estudios de maestría.

Agradezco a mis sinodales y director de tesis, primeramente, al M.C. José Luis Javier Sánchez González por ser la persona más importante para mí en esta etapa académica, por su paciencia, confianza, generosidad, alegría y devoción, ni todas las virtudes y halagos que pueda poseer el ser humano pueden describir a este personaje y cuan agradecido estoy con él por haberme aceptado como su alumno de posgrado. A la Dra. Liliana Cardoza Avendaño por su amabilidad y determinación al aceptarme como su estudiante para poder culminar mis estudios, a la Dra. Claudia Camargo Wilson, al M.C. Víctor Manuel Juárez Luna, al Dr. Víctor Ruiz Cortes, agradezco su amabilidad, comprensión, ánimos y consejos que me otorgaron.

Agradezco de una manera muy especial y cariñosa a la Dra. Amalia Martínez García y al Dr. Juan Antonio Rayas por toda la sabiduría otorgada y su disposición tan noble para guiarme y tomar decisiones correctas, sin su ayuda no hubiese sido posible este proyecto.

A mis amigos estudiantes de doctorado, a Víctor Manuel Rico Botero del CICESE quien me asistió en la introducción de uno de los temas más cruciales de mi trabajo, agradezco de una manera muy especial a Gustavo Gómez Méndez del CIO por abrirme las puertas de su casa, por su paciencia y disponibilidad.

Por último, a la Universidad Autónoma de Baja California, al Centro de Investigaciones en Óptica y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la oportunidad y el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

INDICE

	INTRODUCCIÓN	1
	Bibliografía.....	4
1	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	6
1.1	Introducción.....	6
1.2	Metodología de aplicación.....	7
1.3	Clasificación y descripción de algunas técnicas.....	8
	Bibliografía.....	10
2	LÍQUIDOS PENETRANTES	12
2.1	Introducción.....	12
2.2	Técnica de líquidos penetrantes.....	14
2.3	Preparación de la superficie.....	14
2.4	Aplicación del líquido penetrante y tiempo de penetración.....	16
2.4.1	por inmersión.....	17
2.4.2	por atomización o rociado.....	17
2.4.3	por brocha o pincel.....	18
2.4.4	Tiempo de aplicación por líquidos penetrantes.....	19
2.5	Eliminación del exceso de penetrante.....	19
2.6	Aplicación del revelador.....	20
2.7	Inspección y limpieza final.....	20

2.8	Clasificación, ventajas y desventajas de los líquidos penetrantes.....	21
2.9	Normas y criterios de aceptación.....	22
	Bibliografía.....	23
3	CONCEPTOS BÁSICOS DE MECÁNICA EXPERIMENTAL	25
3.1	Introducción.....	25
3.2	Esfuerzo mecánico.....	25
3.3	Deformación.....	26
3.3.1	Zona elástica.....	27
3.3.2	Fluencia.....	27
3.3.3	Endurecimiento por deformación.....	27
3.3.4	Estricción.....	27
3.3.5	Fractura.....	27
3.4	Método del elemento finito.....	28
3.4.1	Pre-proceso.....	29
3.4.2	Fase de solución.....	30
3.4.3	Post-proceso.....	30
	Bibliografía.....	30
4	FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA DE PROYECCIÓN DE FRANJAS	31
4.1	Introducción.....	31
4.2	Técnica de proyección de franjas y moiré.....	31
4.3	Modulación matemática de moiré.....	33
4.4	Desplazamientos en plano.....	39
4.5	Desplazamientos fuera de plano.....	42

4.5.1	Moiré por sombreado.....	43
4.5.2	Moiré por proyección.....	45
4.5.3	Proyección de franjas.....	48
	Bibliografía.....	50
5	TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE FASE	52
5.1	Introducción.....	52
5.2	Cálculo de fase por transformada de Fourier.....	52
5.3	Método de desplazamiento de fase.....	55
5.4	Desenvolvimiento de fase.....	57
	Bibliografía.....	59
6	DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS	62
6.1	Introducción.....	62
6.2	Descripción del sistema óptico.....	62
6.3	Alineación y descripción del sistema de proyección de franjas.....	64
6.4	Medición de cambios de topografía de una placa metálica sometida a un esfuerzo mecánico.....	65
6.5	Simulación de análisis de esfuerzos mediante SolidWorks.....	69
6.6	Detección en cambio de topografía por aplicación de calor.....	73
7	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	80
7.1	Conclusiones.....	81
7.2	Trabajo futuro.....	81

ANEXOS.....	81
--------------------	-----------

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Limpieza mecánica por aplicación de arena seca a presión.....	15
Figura 2.2 Aplicación de líquido penetrante.....	16
Figura 2.3 Aplicación de líquido penetrante por inmersión.....	17
Figura 2.4 Aplicación del penetrante por brocha.....	18
Figura 2.5 Remoción del exceso de penetrante.....	19
Figura 2.6 Aplicación de polvos reveladores.....	20
Figura 2.7 Inspección mediante luz ultravioleta.....	21

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Diagrama esfuerzo (σ) – deformación (ϵ).....	26
Figura 3.2 Elemento unidimensional.....	29
Figura 3.3 Elemento bidimensional.....	29
Figura 3.4 Elemento tridimensional.....	30

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Rejilla de líneas constantes (Ronchi).....	32
Figura 4.2 Patrón de franjas cosenoidal.....	33
Figura 4.3 Patrón de moiré entre dos rejillas superpuestas del mismo paso con un ángulo α de una respecto a la otra.....	35

Figura 4.4 Patrón de moiré: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda, \alpha \neq 0$	37
Figura 4.5 Patrón de moiré: $\lambda_1 \neq \lambda_2, \alpha = 0$	38
Figura 4.6 Patrón de moiré: $\lambda_1 \neq \lambda_2, \alpha \neq 0$	39
Figura 4.7 Esquema de interferometría de moiré.....	40
Figura 4.8 Representación gráfica de moiré geométrico para desplazamientos en plano.....	42
Figura 4.9 Esquema de moiré por sombreado.....	43
Figura 4.10 Moiré por proyección.....	45
Figura 4.11 Determinación automática de la forma.....	47
Figura 4.12 a) Proyección de franjas sobre una superficie de referencia b) Proyección de franjas sobre un objeto.....	48
Figura 4.13 Esquema de un sistema de proyección de franjas	49

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 Espectro de Fourier con un patrón de franjas abiertas y la portadora.....	54
Figura 5.2 Lóbulo del espectro de Fourier trasladado al origen.....	54
Figura 5.3 Patrón de franjas cosenoidales con desplazamiento de cuatro pasos.....	57
Figura 5.4 (a) Mapa de fase envuelta (b) Mapa de fase desenvuelta.....	58

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 Esquema del arreglo óptico en donde A=450 mm, B=80 mm y $\alpha = 10^\circ$	63
Figura 6.2 Arreglo experimental del sistema de proyección de franjas.....	64
Figura 6.3 Dimensiones en milímetros de los ejes X, Y y Z del objeto de estudio.....	65
Figura 6.4 Objeto de prueba con revelador aplicado.....	66
Figura 6.5 Proyección de franjas sobre la muestra.....	67

Figura 6.6 a) Fase desenvuelta del objeto sin carga aplicada, b) fase desenvuelta del objeto con carga aplicada.....	67
Figura 6.7 Desplazamiento relativo W inducido en la muestra durante la carga mecánica aplicada.....	68
Figura 6.8 Gráfica unidimensional del perfil de la muestra a lo largo del eje Y	68
Figura 6.9 Gráfica del perfil de la muestra a lo largo del eje X	69
Figura 6.10 Resultados de la simulación FEM en placa usando condiciones experimentales. La placa presenta desplazamientos en el plano y fuera del plano: a) $U(x,y)$, b) $V(x,y)$, c) $W(x,y)$	70
Figura 6.11 Aplicación de líquidos penetrantes fluorescentes sobre la muestra metálica.....	72
Figura 6.12 Sistema de proyección de franjas para detectar cambios en la topografía del objeto por aplicación de calor.....	73
Figura 6.13 Componentes utilizados para detectar y aplicar calor.....	74
Figura 6.14 Topografía del objeto en donde se comparan el estado T_1 con respecto a T_0	75
Figura 6.15 Topografía del objeto en donde se comparan el estado T_2 con respecto a T_1	75
Figura 6.16 Topografía del objeto en donde se comparan el estado T_3 con respecto a T_2	76
Figura 6.17 Perfil de cambios en topografía para cada una de las diferencias de estados.....	77
Figura 6.18 Pieza aeroespacial.....	77
Figura 6.19 Componentes empleados para detectar y aplicar temperatura a un objeto metálico aeroespacial.....	78
Figura 6.20 Topografía del objeto metálico aeroespacial.....	79
Figura 6.21 Topografía de cambios por temperatura.....	79

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de los líquidos penetrantes.....	22
---	----

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1 Tabla de error relativo de la técnica de proyección de franjas.....	71
Tabla 6.2 Tabla de error relativo del sistema de proyección de franjas y la simulación en SolidWorks.....	72

Introducción

Hoy en día, existe una creciente necesidad de evaluar la calidad de los materiales utilizados en las industrias metálicas y no metálicas, así como de las mediciones de deformación y discontinuidades para ser examinadas en una amplia variedad de objetos. En México la creciente llegada de la industria extranjera, principalmente en el área automotriz y aeroespacial permite la investigación y el estudio de nuevos materiales, además, nuevas técnicas de medición son necesarias para cubrir las demandas de control de calidad, para ello, pueden ser adecuadas técnicas no destructivas tanto tradicionales como ópticas. Debido a lo anterior, una de las ramas de la óptica que tiene más aplicación en la ingeniería, es la metrología óptica, la cual permite realizar mediciones de no contacto y de campo completo de los campos de desplazamiento en plano y fuera de plano, lo cual permitiría conocer las características mecánicas de los materiales, así como detección de posibles fracturas mecánicas.

Para mediciones fuera de plano, se han desarrollado diferentes técnicas ópticas, tales como: escaneo láser [1], métodos de moiré [2], interferometría [3], proyección de franjas [2], interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI) [4,5] e interferometría de Talbot [6] cada una tiene diferentes grados de resolución, precisión y limitación.

Un aspecto general en la manufactura es el concepto de la normalización y de la producción a gran escala utilizando las mediciones como una parte clave en la calidad de una pieza, mediciones tales como: dimensiones, color, peso, rigidez, entre otras, que corroboran el cumplimiento normativo para su posterior comercialización dentro y fuera de un país. Estas mediciones se realizan como parte de una inspección con un conjunto de pruebas para determinar su conformidad, las cuales involucran métodos destructivos o no destructivos en un material en particular, por lo que es importante la inclusión tecnológica y económica del proceso en la calidad del producto [7]. Para analizar distintos materiales y realizar controles de calidad en la industria se suelen utilizar las pruebas no destructivas, se trata de métodos que permiten la exploración interna y externa de la pieza sin modificar sus propiedades, de forma que, tras el análisis quede apta para su uso. Este tipo de pruebas detectan discontinuidades y sirven para la detección de heterogeneidades tales como grietas,

inclusiones e incluso poros. Hay diversos tipos de ensayos no destructivos que se adecuan a las necesidades y finalidades de cada pieza o material, siendo algunos ejemplos: ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, ultrasonido, líquidos penetrantes, rayos x, etc.

La selección del tipo de técnica a utilizar depende directamente del tipo de aplicación, pero sobre todo del tipo de defecto que esperamos encontrar. Algunas industrias basan sus pruebas no destructivas en métodos tradicionales como líquidos penetrantes, en una empresa en específico para identificar la calidad de la superficie de una pieza aeroespacial es necesario realizar un análisis de capilaridad, para ello utilizan líquidos penetrantes fluorescentes (*Naphthenic light hydrotreated distillate*) el tiempo de inspección es de aproximadamente 30 a 55 minutos cuyas dimensiones (de estas piezas) son inferiores a $3m \times 1m \times 1m$.

En este trabajo de tesis se propone implementar en conjunto las pruebas no destructivas de líquidos penetrantes y proyección de franjas como técnicas complementarias en la realización de pruebas de calidad de piezas industriales. Primeramente, se aplica el ensayo de líquidos penetrantes fluorescentes el cual permite localizar y detectar discontinuidades superficiales aun en piezas de geometría compleja. A pesar de que este método solo detecta discontinuidades en la superficie del objeto, es una prueba efectiva, confiable, rápida y fácil de aplicar a una gran variedad de materiales, además de ser relativamente económica.

Por otra parte, la técnica de proyección de franjas se usa para cuantificar la deformación como la forma del objeto a estudiar. Esta técnica consiste en proyectar un patrón de franjas de perfil cosenoidal sobre el objeto de interés, la forma del objeto se decodifica directamente del patrón de franjas deformado registrado en la superficie de un objeto difuso [1]. La adquisición de datos se realiza en tres pasos: 1) detección de fase, 2) desenvolvimiento de fase y 3) conversión de fase a profundidad utilizando los parámetros del sistema óptico, obteniendo así las dimensiones de la topografía del objeto analizado en coordenadas reales [8].

Las mediciones de la deformación se deben realizar mediante la obtención de un patrón de franjas del objeto en su estado original y en su estado deformado, seguido de la

reconstrucción de la forma del objeto a partir de estos patrones de franjas para finalmente calcular la diferencia entre las dos mediciones.

La valoración de materiales es de gran importancia para conocer la firmeza e integridad de los mismos sujetos a análisis bajo condiciones de cargas y de este modo detectar fallas tales como fisuras o de fracturas, todo ello para determinar la calidad. La inspección del producto o servicio es muy importante para cualquier administrativo de la calidad y de su repercusión en la manufactura, ya que en éste convergen todos los procesos involucrados de la organización con el propósito de producir y ofrecer un producto con cualidades que satisfagan las necesidades requeridas y esperadas de su cliente, definiendo si la organización es competitiva o no [9].

La tesis está integrada por siete capítulos. A continuación, se realiza una breve descripción de éstos.

Capítulo 1. Ensayos no destructivos: Se abordan los principales ensayos no destructivos utilizados en la industria, su aplicación y metodología.

Capítulo 2. Líquidos penetrantes: Clasificación de aplicación por líquidos penetrantes y sus diferentes modos de empleo.

Capítulo 3. Conceptos básicos de mecánica experimental: Se describe el método de elemento finito y la mecánica de materiales, así como algunas propiedades de éstos.

Capítulo 4. Fundamentos de la técnica de proyección de franjas: Se presenta una descripción de las técnicas de moiré y proyección de franjas.

Capítulo 5. Técnicas de obtención de fase: Se describen las técnicas de detección de fase como desplazamiento de fase y transformada de Fourier. También se describe la técnica de desenvolvimiento de fase.

Capítulo 6. Desarrollo experimental y resultados: Se presenta la técnica de proyección de franjas implementada para la detección de grietas mecánicas, así como para el seguimiento de expansión térmica de algunos objetos de prueba. También se presenta la técnica de líquidos penetrantes fluorescentes en el caso de detección de fracturas.

Capítulo 7. Conclusiones y trabajo futuro: Se resumen los resultados obtenidos y se plantea un trabajo futuro para la continuidad de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. F. Chen., Brown G.M., Song M., “Overview of Three-Dimensional Shape Measurement Using Optical Methods”, *Opt. Eng.*, 39, pp. 10-22 (2000)
2. K. Patorski., “*Handbook of the Moiré Fringe Technique*”, Elsevier Amsterdam (1993)
3. D. Malacara., *Optical Shop Testing*, Wiley, New York (1991)
4. J. Leendertz., “Interferometric Displacement Measurement on Scattering Surfaces Utilizing Speckle Effect”, *J. Phys. E*, 3, pp. 214-219 (1970)
5. C. Jonathan, Pfister B., Tiziani H.J., “Contouring by Electronic Speckle Pattern Interferometry Employing Dual Beam Illumination”, *Appl. Opt.*, 29, pp. 1905-1911 (1990)
6. R. Rodriguez-Vera, Kerr D., Mendoza-Santoyo F., “3-D Contouring of Diffuse Objects by Talbot-Projected Fringes”, *J. of Mod. Opt.*, 38, pp. 1935-1945 (1991)
7. S. Kalpakjian, Schmid Steven R., “Manufactura, ingeniería y tecnología”, Editorial Reverte. España, pp. 943 (2002)
8. A. Martínez, J. A. Rayas, J. M. Flores M., R. Rodríguez-Vera y D. Donato Aguayo., “Técnicas Ópticas para el Contorneo de Superficies Tridimensionales”, *Rev. Mex. Fís.*, **51**, pp. 431-436 (2005)

9. A. Esponda., “Hacia una calidad más robusta con ISO 9000:2000“, editorial:
Panorama, pp. 125 (2001)

Capítulo 1

Ensayos no destructivos

1.1 Introducción

Un ensayo no destructivo puede considerarse como un examen, prueba o evaluación realizado en cualquier tipo de objeto sin cambiar su forma física o estado original con el propósito de determinar la ausencia o presencia de discontinuidades que puedan alterar la función de ese objeto. También se puede utilizar para medir otras características como el tamaño, dimensiones, configuración, estructura incluido el contenido de aleación, dureza, tamaño etc. Dicho de otro modo, se puede decir que cuando la inspección o prueba ha sido efectuada en el objeto, puede determinarse como apto para su uso.

En la industria, las pruebas no destructivas pueden ser utilizadas para:

1. Examen de materias primas antes del proceso
2. Evaluación de materiales durante el procesamiento.
3. Análisis de productos terminados.
4. Evaluación de productos una vez puestos en servicio.

Los ensayos no destructivos están basados en principios físicos y de su utilización se obtienen resultados para establecer un diagnostico confiable del estado o calidad del objeto a inspeccionar. Actualmente se considera una de las tecnologías de más rápido crecimiento utilizadas en las inspecciones de fabricación y servicio para garantizar la integridad y confiabilidad del producto, para controlar los procesos de fabricación, reducir los costos de producción y mantener un nivel de calidad uniforme teniendo la integridad necesaria para garantizar su utilidad y sobre todo la seguridad del público [1].

1.2 Metodología de aplicación

Hay muchas variables asociadas con las pruebas no destructivas que deben ser controladas y optimizadas. Los siguientes son los principales factores que deben considerarse para un ensayo efectivo.

El producto debe ser adecuado: Existen limitaciones características en cada uno de los métodos de pruebas no destructivas y es esencial que estas limitaciones se conozcan para que el método se aplique en función de las variables asociadas con el objeto de estudio. Por ejemplo, sería muy difícil proporcionar una prueba ultrasónica significativa en una pequeña fundición con formas muy complejas y superficies rugosas. En este caso, sería mucho más apropiado considerar la radiografía.

Seguir los procedimientos aprobados: Es esencial que todos los exámenes no destructivos se realicen siguiendo los procedimientos que se hayan desarrollado de acuerdo con los requisitos o especificaciones que apliquen. Además, es necesario calificar la prueba no destructiva para asegurar que detectará las discontinuidades y que la parte se puede examinar de una manera que satisfaga los requisitos. Una vez que el procedimiento ha sido calificado, un individuo certificado Nivel III debe aprobarlo.

Funcionamiento del equipo apropiado: Todo el equipo para usar debe estar en buenas condiciones y debidamente calibrado y se deben realizar inspecciones de control de procesos periódicamente para asegurar que el equipo y los accesorios estén funcionando correctamente.

Documentación completa: Es de vital importancia que la documentación apropiada del ensayo al concluir el mismo este completa. Este deberá contener todos los elementos clave del ensayo, incluidos los datos de calibración, el equipo, la descripción de la pieza, el procedimiento utilizado y la identificación de discontinuidades detectadas, etc.

Personal calificado: Los resultados no se muestran de forma absoluta, sino que deben ser interpretados a partir de las indicaciones propias de cada método, por lo que el personal no solo debe estar calificado, sino también estar debidamente certificado para interpretar dichos resultados [2].

1.3 Clasificación y descripción de algunas técnicas

Las discontinuidades identificadas se evalúan como condiciones rechazables o no rechazables en una pieza. Por lo general, una evaluación se hace en referencia a una base de diseño y puede incluir criterios basados en reglas para la aceptación y el rechazo, la evaluación o detección de una discontinuidad generalmente requiere una medición adecuada de su tamaño y ubicación para identificar el ensayo adecuado para dicha pieza.

Los seis ensayos generales más utilizados son: Partículas magnéticas, líquidos penetrantes, radiografía, ultrasonido, pruebas electromagnéticas e inspección visual, A continuación, se describe brevemente cada uno de estos métodos de prueba.

Partículas magnéticas: Consiste en detectar el campo magnético de fuga que producen las discontinuidades de un material ferromagnético al saturarlo magnéticamente, el medio de detección son partículas magnetizables de alta permeabilidad y baja retentividad.

Líquidos penetrantes: El método consiste en la capacidad de ciertos líquidos para penetrar y ser retenidos en discontinuidades abiertas a la superficie. Esta acción capilar depende de tres propiedades principales: tensión superficial, viscosidad y mojabilidad.

Radiografía: La radiografía industrial implica exponer un objeto de prueba a radiación penetrante, de modo que la radiación pase a través del objeto que se está inspeccionando y se coloque un medio de grabación contra el lado opuesto de ese objeto. Para materiales con menor densidad como el aluminio, se utiliza comúnmente la radiación x generada eléctricamente (rayos x) y para materiales más gruesos o densos, generalmente se usa la radiación gamma.

Ultrasonido: Se genera un sonido de frecuencia ultra alta el cual se introduce en la parte que se está inspeccionando y si el sonido toca un material con una impedancia acústica diferente (densidad y velocidad acústica) parte del sonido se reflejará en la unidad de envío y se podrá representar en una pantalla visual. Las frecuencias más bajas tienen mayor poder de penetración, pero menos sensibilidad (la capacidad de "ver" pequeñas indicaciones),

mientras que las frecuencias más altas no penetran tan profundamente, sino que pueden detectar indicaciones más pequeñas.

Pruebas electromagnéticas: La prueba electromagnética es una categoría de prueba general que incluye la prueba de Corriente de Foucault, la medición de campo de corriente alterna y la prueba de campo remoto. Todas estas técnicas utilizan la inducción de una corriente eléctrica o un campo magnético en una parte conductora, luego se registran y evalúan los efectos resultantes.

Inspección visual: La prueba visual es el método de prueba más utilizado en la industria, se basa en la utilización de luz visible como campo de energía y en las leyes fundamentales de la óptica.

Por parte de la óptica, se mencionan tres métodos no destructivos que utilizan láser como: shearografía, holografía e interferometría electrónica de patrones de moteado. Los métodos ópticos se caracterizan por ser no invasivos, de no contacto y que además representan alta sensibilidad, fiabilidad y rapidez. El reciente desarrollo y comercialización de láseres, cámaras y sistemas de procesamiento de datos, ha dado lugar a un extenso análisis cuantitativo de los resultados obtenidos por estas pruebas. A continuación, se describe brevemente los métodos ópticos no destructivos ya mencionados:

Shearografía: Se hace incidir un haz de luz láser en la superficie del objeto de estudio en reposo y se toma una imagen, la imagen resultante es captada por una cámara y guardada en un ordenador, luego la superficie del objeto se deforma por una fuerza externa y se toma otra imagen y se guarda para después superponer las dos imágenes captadas, si existen defectos como vacíos o desuniones, éstos se verán reflejados en los patrones obtenidos por la superposición de las imágenes guardadas, es decir, las imágenes correspondientes a un antes y después de la deformación. Actualmente, esta técnica está respaldada por la administración federal de aviación de los Estados Unidos [3].

Holografía: La holografía es una técnica en donde se graban dos imágenes ligeramente diferentes para mostrar las pequeñas diferencias entre ellas. La imagen de un objeto es capturada en una película de tipo emulsión para interferir con otra imagen del objeto ligeramente perturbada y almacenada en la misma película, la imagen resultante contiene líneas de contorno que son una medida de la cantidad de diferencias dimensionales del objeto en las dos etapas [4].

Interferometría electrónica de patrones de moteado: Cuando una superficie difusa es iluminada por una fuente de luz laser se manifiesta un fenómeno conocido como moteado, una primera imagen de moteado de un objeto sin deformación se correlaciona con una segunda imagen del mismo objeto con deformación, el resultado es un patrón de franjas que indica la modificación que sufrió el objeto bajo estudio, esta técnica ha sido utilizada para detectar y medir fracturas, así como cambios en las dimensiones de piezas o materiales metálicos [5].

BIBLIOGRAFÍA

1. G. Posakony., “A Look to the Past—A Look to the Future”, *Lester Honor Lecture, September 27–30, 1976 in Houston, Texas in honor of Dr. Horace H. Lester, NDT Pioneer*. Published in the December issue of *Materials Evaluation* (1976)
2. J. Charles Hellier., “Introduction to non-destructive testing. Handbook of nondestructive evaluation”, USA: *McGRAW-HILL* pp. 20 (2003).
3. K. Roderick., *Nondestructive Testing Handbook “Special Nondestructive Testing Methods”*, ASNT, United States (1995)
4. J. Gryzagoridis., “Holographic Methods for Component Manufacture and Evaluation”, *Int. J. Pres. Ves. & Piping* 50, pp. 317-335 (1992)

5. A. Martínez, R. Rodríguez-Vera, J. A. Rayas, H. J. Puga. "Fracture detection by moiré interferometry and ESPI techniques," *Optics and Lasers in Engineering*, 39, No. 5-6, pp.525-536 May/June (2003)

Capítulo 2

Líquidos penetrantes, una prueba no destructiva

2.1 Introducción

La prueba de líquidos penetrantes es una técnica con la que es posible detectar y localizar discontinuidades superficiales en diversos materiales industriales, incluso en objetos geoméricamente complejos. Aunque este método solo detecta discontinuidades de superficie, es una técnica sencilla y fácil de implementar a una gran multitud de piezas. Para un caso en particular, esta prueba es ampliamente utilizada en la industria aeroespacial para detectar grietas en metales, se confía en asegurar la integridad estructural de la aeronave a través de inspecciones de componentes críticos durante la producción y durante toda la vida útil del avión. La prueba de líquidos penetrantes depende del deterioro del material en un entorno dado y a menudo se combinan varios ensayos no destructivos, varios autores describen una amplia gama de técnicas no destructivas que se pueden usar individualmente o en combinación para efectuar la monitorización de estado en la industria de ingeniería y procesamiento mecánico [1,2].

El método consiste en aplicar un líquido de color designado sobre la superficie del material a inspeccionar. Después de cierto tiempo transcurrido para que el líquido se introduzca en la discontinuidad, se limpia la superficie para retirar el exceso de penetrante. El siguiente paso consiste en aplicar un revelador, sustancia que absorbe el líquido alojado en las discontinuidades para amplificar las mismas de tal manera que al extraerlo produce una indicación o marca visible de dicha discontinuidad.

La inspección con líquidos penetrantes es uno de los métodos más tradicionales de pruebas no destructivas, está basada en el proceso del aceite y blanqueador empleado antiguamente para inspeccionar partes de acero en la industria ferroviaria.

La prueba no destructiva con líquidos penetrantes se caracteriza por ser un procedimiento de inspección no destructivo, del tipo físico químico, diseñado para detectar y revelar discontinuidades en la superficie de los materiales siempre y cuando se tenga una parte expuesta a la superficie en la cual el líquido penetrante ha sido aplicado. El objetivo de la prueba de líquidos penetrantes es identificar grietas, traslapes, porosidades entre otras. Esta prueba es capaz de aplicarse en materiales metálicos y no porosos; por ejemplo: aluminio y aleaciones de este, metales sinterizados, materiales no metálicos como vidrio, plásticos, cerámica, etc. [3]. Una de las características de los líquidos penetrantes es que, por medio de esta prueba pueden ser inspeccionadas piezas de forma geométrica complicada las cuales resultan muy difíciles de ser inspeccionadas por otro método o cuando los materiales a inspeccionar se localizan en lugares donde no hay suministro eléctrico.

El equipo de inspección puede ser tan sencillo como un reducido conjunto de envases a presión o tan robusto como una instalación automatizada. No obstante, en todos los escenarios el éxito de la inspección depende del cuidado con la que fue limpiada la superficie de los materiales a inspeccionar, la ausencia de contaminación, las condiciones de la superficie y del cuidado de los operadores para ratificar que se efectuó la técnica de manera apropiada y se realice la interpretación correcta de las indicaciones.

Los líquidos penetrantes tienen el rasgo de propagarse a través de las discontinuidades que presentan las piezas o materiales, basándose en la acción capilar, la que causa que un líquido descienda o ascienda a través de dos paredes cercanas entre sí; también se basa en los principios físicos de cohesión, viscosidad, habilidad humectante y tensión superficial [3].

2.2 Técnica de líquidos penetrantes

En la aplicación de líquidos penetrantes es necesario realizar una serie de pasos para llevar a cabo la inspección, se enumeran a continuación.

1. Preparación de la superficie
2. Aplicación del penetrante
3. Eliminación del exceso del penetrante de la superficie
4. Aplicación del revelador y revelación de indicaciones
5. Inspección
6. Limpieza final

2.3 Preparación de la superficie

Es necesario que, en las piezas a inspeccionar, las discontinuidades se encuentren en la superficie y además éstas estén abiertas para que el penetrante tenga una vía de acceso, por lo que es importante una buena limpieza del material en donde no se obstruyan las discontinuidades, esto para obtener resultados confiables. Es indudable que el penetrante no puede fluir si la discontinuidad se encuentra tapada con aceite, agua, pintura, óxido o cualquier otro material ajeno.

Para obtener resultados apropiados en la inspección, es necesaria una limpieza adecuada en la superficie del material. La técnica de limpieza a utilizar depende del tipo de contaminante que se encuentra en la superficie de la pieza. En el código ASME BPV. V, artículo 6, T-626, en las normas ASTM E165, E1417 y NOM-B-133-1994, se proporcionan algunas técnicas de limpieza.

Los métodos de limpieza deben ser tal que éstos no enmascaren cualquier indicación de contaminación, y discontinuidad, dichos métodos se clasifican como:

Químicos: Puede ser limpieza alcalina, acida, o sales fundidas.

Mecánicos: Los principales métodos son: pulido abrasivo, aplicación de arena seca y húmeda a alta presión, agua y vapor a alta presión y limpieza ultrasónica.

Por solventes: Este método puede dividirse en desengrasado al vapor y enjuague con solventes.



Figura 2.1 Limpieza mecánica por aplicación de arena seca a presión.

2.4 Aplicación del líquido penetrante y tiempo de penetración

Una vez que se ha realizado la limpieza previa de la superficie del material a inspeccionar, el penetrante se aplica sobre la superficie limpia y seca de la pieza. Las técnicas de aplicación más utilizadas son la aplicación por inmersión, vaciado, rociado, con brocha. Todas las superficies deben cubrirse totalmente para permitir que mediante la acción capilar el líquido penetrante se introduzca en las discontinuidades como se ilustra en la figura 2.2, el tiempo de permanencia del penetrante en la superficie debe determinarse según el recomendado en las normas ASTM E 165-02 o el que determine el procedimiento calificado [4].



Figura 2.2 Aplicación de líquido penetrante.

El líquido penetrante deberá estar sobre la superficie en inspección por un periodo denominado tiempo de penetración, que es el tiempo necesario para que el líquido penetre en el interior de la fisura, este tiempo en promedio varía de 10 a 30 minutos. La aplicación del penetrante se realiza de acuerdo con los siguientes métodos:

2.4.1 Por inmersión

Este método es recomendable cuando las piezas a inspeccionar son pequeñas o de tamaño reducido y cuando se inspeccionan grandes lotes de materiales. Otro motivo de aplicar el método de inmersión es debido a la complejidad en su forma que pueden tener los objetos a inspeccionar o cuando es necesario cubrir toda la superficie de la pieza como se muestra en la figura 2.3.



Figura 2.3 Aplicación de líquido penetrante por inmersión.

2.4.2 Por atomización o rociado

Este método se considera el más sencillo de aplicar, ya que el rocío se puede obtener empleando aire a presión o mediante aerosoles. Además, se aconseja apoyarse de una brocha o pincel para cubrir aquellas áreas que por su forma geométrica impiden que el rocío llegue a ellas. Este método es recomendable aplicarlo cuando se tienen lotes pequeños o piezas ya instaladas en su ensamble final, en superficies planas o relativamente grandes.

2.4.3 por brocha o pincel

Una de las formas más económicas es por este método, en donde resulta más eficiente aplicarlo además de que reduce el desperdicio de penetrante. Se recomienda el uso de este método cuando se tienen materiales grandes o medianos donde sus formas son regulares; también cuando se van a inspeccionar áreas bien definidas como los cordones de soldadura, áreas pequeñas y zonas donde es difícil el acceso por otro método o para aplicar pequeñas cantidades de penetrante en las que solo se desea limpiar la parte sujeta a inspección como se muestra en la figura 2.4.



Figura 2.4 Aplicación del penetrante por brocha.

2.4.4 Tiempo de aplicación por líquidos penetrantes

El tiempo necesario que necesita un material para que el penetrante se introduzca en las discontinuidades es variable y dependiente de algunos factores como: tipo de penetrante utilizado, propiedades de la pieza a inspeccionar, el procedimiento de fabricación del material, las posibles discontinuidades a encontrar y temperatura. Existen tablas donde se especifica según la norma aplicable el tiempo de penetración que se recomienda por los fabricantes de las piezas o materiales, en estas tablas se indica que el penetrante no deberá ser utilizado a temperaturas menores del indicado al límite inferior, ya que, de ser así, el líquido no se introduce en las discontinuidades.

2.5 Eliminación del exceso de penetrante

La eliminación del exceso de penetrante constituye una parte importante en el procesamiento de los materiales, luego de que el tiempo de penetración ha transcurrido, se procederá a la eliminación del excedente de penetrante ubicado en la superficie de la pieza como se ilustra en la figura 2.5, en esta parte se debe tener cuidado de no remover aquel que está retenido en las discontinuidades. Si esto pasa, es necesario volver a inspeccionar la pieza desde el principio.

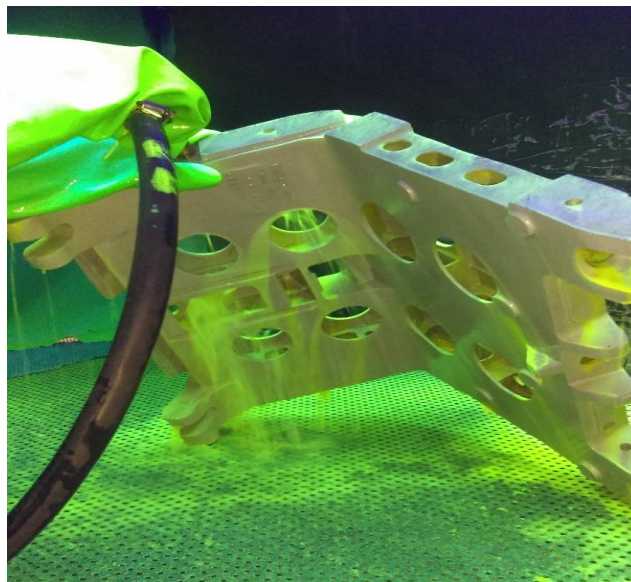


Figura 2.5 Remoción del exceso de penetrante.

2.6 Aplicación del revelador

Posterior a la remoción del exceso de líquido penetrante se aplica el revelador, es en esta etapa en que se forman las indicaciones sobre la superficie en inspección. El revelador es una sustancia compuesta donde su función es exactamente la de absorber hacia la superficie el resto del líquido penetrante que quedó contenido dentro de la discontinuidad (fisura).



Figura 2.6 Aplicación de polvos reveladores.

2.7 Inspección y limpieza final

Después de transcurrido el tiempo de revelado, el área de inspección deberá ser oscurecida e iluminar con luz ultravioleta el material bajo estudio, la intensidad de la luz negra debe de ser de $1000 \mu W/cm^2$, según la norma ASTM E1417. La calidad de la inspección final del material está relacionada con el criterio de aceptación dada por el inspector para aprobar o no las indicaciones que aparezcan en la superficie de prueba. La limpieza final es necesaria

debido a que el revelador y el penetrante en algunas ocasiones pueden acumular humedad, y esto puede producir algún tipo de corrosión.

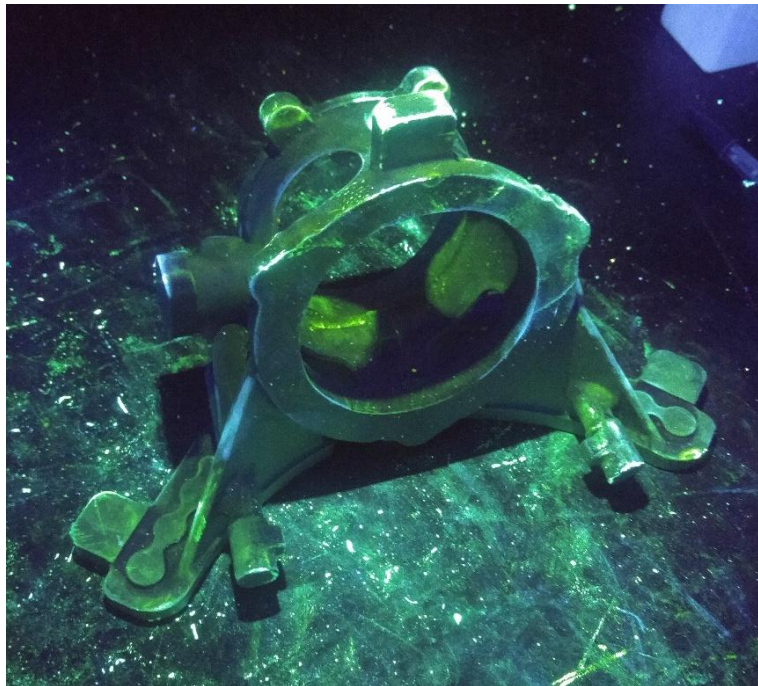


Figura 2.7 Inspección mediante luz ultravioleta.

2.8 Clasificación, ventajas y desventajas de los líquidos penetrantes

La clasificación de los tipos de líquidos penetrantes está agrupada en función de la fuente de luz que se utiliza para la observación de las indicaciones. Estos se clasifican en tres grupos que son: 1. Líquidos penetrantes coloreados, observables con luz visible blanca. 2. Líquidos penetrantes fluorescentes, observables con luz UV (ultravioleta). 3. Líquidos penetrantes mixtos (fluorescentes-coloreados), observable bajo los dos tipos de luz anteriores [5]. En este trabajo estamos abordando únicamente la prueba de líquidos penetrantes fluorescentes, este tipo de líquidos incorpora en su composición un matiz fluorescente de color generalmente amarillo verdoso, que son sensibles a una iluminación especial llamada luz negra que los hace fluorescer. En definitiva, los líquidos penetrantes del tipo fluorescente presentan mayor viabilidad en comparación con los líquidos coloreados, es decir, son capaces de localizar indicaciones más finas.

Ventajas	Desventajas
• Simple de aplicar y controlar • Aplicable a materiales metálicos y no metálicos • Los equipos son de bajo costo	• Detecta únicamente discontinuidades en la superficie. • No aplica en materiales porosos. • Difícil en superficies muy porosas o rugosas.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de los líquidos penetrantes.

2.9 Normas y criterios de aceptación

Las características de las piezas bajo estudio deben establecer la prueba no destructiva que se va a emplear. Para establecer el criterio de aceptación o rechazo es necesario realizar un estudio de relación entre las indicaciones de las pruebas y sus resultados, existe una serie de factores que influyen para una correcta determinación del uso final de la pieza como lo son: la composición química del material, la ubicación de las indicaciones, áreas críticas, las partes que van a ser desbastadas (secciones donde se pueden remover algunas discontinuidades) y superficies que puedan ser reparadas mediante soldadura. Todo esto siempre y cuando exista un experto que pueda fijar un juicio adecuado para la aceptación o rechazo de las piezas. El criterio de aceptación para piezas debe estar basado en una especificación como una norma o algún documento gubernamental que contemple que tipo de discontinuidad podrá ser causa de rechazo. Estas normas deberán estar adjudicadas a los criterios de ensayos no destructivos por líquidos penetrantes, en donde también se considera el proceso de inspección adecuado [6,7].

En la actualidad, existen industrias que se han sujetado a ciertas normas para la aceptación o rechazo del material sometido a líquidos penetrantes, las normas pueden variar desde consideraciones generales hasta muy específicas. En la industria, el área encargada de proporcionar indicaciones para el estudio de las piezas bajo el ensayo de líquidos

penetrantes debe decidir cuales piezas son aceptadas, rechazadas o reparadas según las especificaciones de normas por agencias gubernamentales u otras sociedades técnicas como el código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) y la norma ASTM (*The American Society for Testing and Materials*) [5,8].

A continuación, se muestran algunas normas y códigos que son considerados para la prueba de líquidos penetrantes.

ASTM

E 165. *Standard Recommended Practice for Liquid Penetrant Inspection.*

E 1316. *Terminology for Nondestructive Examinations.*

E 1417. *Standard Practice for Liquid Penetrant Examination.*

E 270. *Definition of Terms Relating to Liquid Penetrant Inspection.*

SAE

AMS-2645G. *Fluorescent Penetrant Inspection.*

AMS-2646B. *Contrast Dye Penetrant Inspection.*

ANSI

ANSI/ASTM E433. *Reference Photographs for Liquid Penetrant Inspection.*

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Borucki, and G. Jordan., “Liquid Penetrant Inspection”, ASM Handbook Volume 17 Nondestructive Evaluation and Quality Control. (2002) [Accessed 2009 23 March]
2. P. Mix, J. Wiley & Sons., “NDT Handbook - Non-destructive examination methods for condition monitoring”, Introduction to Nondestructive Testing - A Training Guide”, ed. K. G. Bøving, Butterworths. (2005)

3. R. Echeverría., “*Líquidos penetrantes*”, Universidad Nacional de Comahue, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Ensayos no Destructivos, Cap 4, pp. 1-13 (2003)
4. Líquidos penetrantes, fuerza aérea, servicio de mantenimiento – Dpto. de ingeniería laboratorio de ensayos no destructivos, pp. 105
5. Sociedad americana de pruebas de materiales (ASTM) Estándar ASTM E 165. (2002)
6. Sociedad americana de Ensayos No Destructivos (ASNT) Estándar CP 189. (2001)
7. ASTM E 1417, Standard Practice for Liquid Penetrant Examination
8. B. Sinclair., “*A Centennial History of the American Society of Mechanical Engineers*”, 1880-1980. Toronto University press, (1980)

Capítulo 3

Conceptos básicos de mecánica experimental

3.1 Introducción

En este capítulo se mostrarán de manera breve algunos conceptos básicos correspondientes al método del elemento finito y la mecánica de materiales debido a que son de utilidad en la discusión que ocupa la presente tesis. Se define el esfuerzo mecánico, el campo de deformación y como están relacionados entre sí. Las propiedades más comunes son resistencia, dureza, ductilidad y resistencia al impacto. Para definir estas propiedades, el material debe someterse a diferentes pruebas, en la actualidad los ingenieros mecánicos seleccionan un material en función de sus propiedades mecánicas, evalúan el rango de utilidad y definen el servicio que puede esperarse para garantizar el rendimiento de dicho material durante su uso.

3.2 Esfuerzo mecánico

Se puede definir el esfuerzo mecánico como la oposición interna que presenta una unidad de área correspondiente a un material contra una carga externa aplicada a ese mismo material [1]. Las fuerzas externas que actúan sobre los materiales mecánicos se les denomina cargas, y las fuerzas internas que los mantienen en equilibrio son conocidas como reacciones. El esfuerzo total y el esfuerzo unitario son esfuerzos relacionados con la distribución y transferencia de fuerzas lo largo del material mecánico. Dicho esto, se puede definir el esfuerzo como la resistencia interna que ofrece un área unitaria del material del que esta hecho un miembro para una carga aplicada externa. El concepto de esfuerzo (σ), que es la fuerza (F) actuando por unidad de área (A), se puede expresar matemáticamente como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

3.3 Deformación

Cuando una fuerza externa, F , es aplicada a un material, éste tiende a modificar su forma y sus dimensiones, estos cambios son conocidos como deformación los cuales pueden ser visibles o no visibles al ojo humano, la deformación se puede clasificar en deformación total y deformación unitaria. La ecuación de Hook relaciona el esfuerzo con la deformación y el módulo de Young (E) [2]. Esta deformación se determina al dividir el alargamiento δ en la longitud de un material entre la longitud original L . Si se está suponiendo que la deformación es constante a lo largo de cierta región correspondiente a un material, por lo tanto:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{F}{AE} \quad (3.2)$$

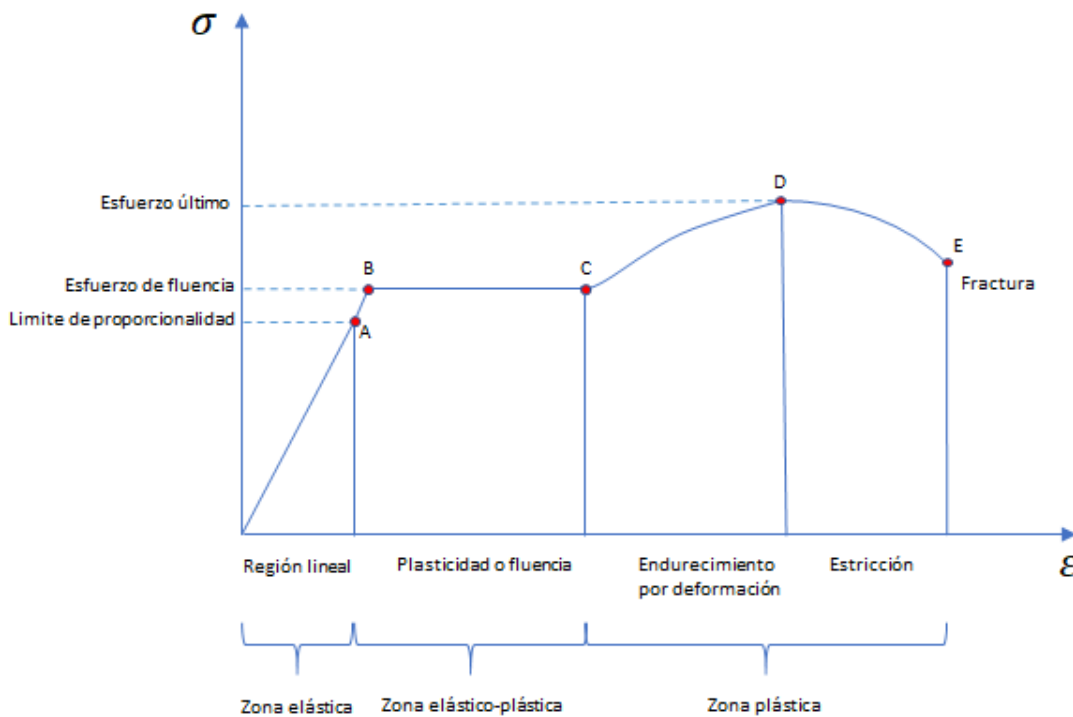


Figura 3.1 Diagrama esfuerzo (σ) – deformación (ε).

3.3.1 Zona elástica

El comportamiento elástico de un material se origina cuando las deformaciones se encuentran dentro de la región lineal, en esta zona si se retira la carga aplicada el material volverá a su forma original.

3.3.2 Fluencia

Un aumento en la carga aplicada al material por encima del límite elástico producirá una fractura en éste y causará que se deforme permanentemente el material. El esfuerzo que origina la cedencia se denomina esfuerzo de cedencia y la deformación causante se conoce como deformación plástica.

3.3.3 Endurecimiento por deformación

El material puede soportar un aumento de carga lo que origina una curva ascendente, en esta zona el material no puede recuperar su forma original y además se fortalece por deformación plástica.

3.3.4 Estricción

Cuando un material comienza a modificar sus dimensiones y superar el esfuerzo último, se dice que alcanzó el punto de estricción, en esta zona el material se ira deformando con esfuerzos cada vez menores hasta el punto de ruptura o fractura, en esta zona, aunque se deje de aplicar carga a el material, éste no recuperara su forma original.

3.3.5 Fractura

Una fractura es la separación de un cuerpo en dos o más partes y está asociada a las propiedades del material y del esfuerzo que experimenta. Existen dos tipos de fractura que

sufren los materiales metálicos y se pueden clasificar en dos tipos: Frágil y dúctil. La fractura frágil ocurre antes o durante el momento en que el material presenta una deformación plástica. La fractura dúctil ocurre cuando un material es sometido a una deformación plástica excesiva, las principales causas que originan este tipo de fracturas son debidas a las impurezas del material o inclusiones que este pueda contener [3].

3.4 Método del elemento finito

El método del elemento finito también llamado (FEM) también conocido como análisis de elemento finito (FEA) es una herramienta computacional empleada para la solución numérica de problemas de ingeniería donde se hace uso de conceptos de física y matemáticas en el cual una o más variables dependientes deben satisfacer una ecuación diferencial en todas partes dentro de un dominio perteneciente a un modelo de variables independientes, el dominio de interés puede representar una estructura física y las variables de interés pueden representar deformaciones, vibraciones, temperatura, flujo de calor y/o velocidad de fluidos, lo cual describe el comportamiento del material bajo estudio. Con el avance de la tecnología, actualmente se recurre al uso de los sistemas CAD (Diseño asistido por computadora) para modelar problemas complejos con mayor facilidad ya que para dar solución a un problema en particular debe efectuarse una cantidad muy elevada de ecuaciones y operaciones algebraicas.

El método consiste en convertir una región compleja asociada a un cuerpo en formas geométricas más simples llamadas elementos finitos. Las propiedades del material y sus relaciones gobernantes se expresan en función de valores desconocidos en los nodos del sistema de figuras geométricas que lo componen [4].

Una simulación numérica mediante elemento finito requiere de los siguientes pasos:

3.4.1 Pre-proceso

En esta etapa del proceso se define la discretización del dominio del problema (tipo de análisis) tipo de elemento a ser usado y propiedades del material (formas, tamaños, números y configuraciones) condiciones de contorno, condiciones iniciales y su respectivo mallado, este último hace referencia a la cantidad de elementos geométricos que contiene el cuerpo u objeto bajo estudio. Existen diferentes tipos de elementos dada cierta configuración de coordenadas espaciales, si la geometría y propiedades de un material pueden ser descritos por una sola coordenada, entonces el material puede ser abordado mediante elementos lineales como se muestra en la figura 3.2, si el caso puede describirse en dos coordenadas se puede emplear los elementos presentados en la figura 3.3, si el material puede ser descrito en tres coordenadas, entonces la región puede modelarse haciendo uso de elementos tridimensionales mostrados en la figura 3.4.

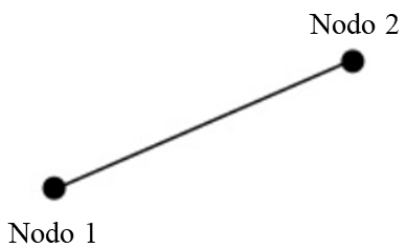


Figura 3.2 Elemento unidimensional.

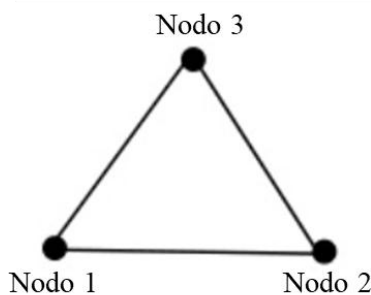


Figura.3.3 Elemento bidimensional.

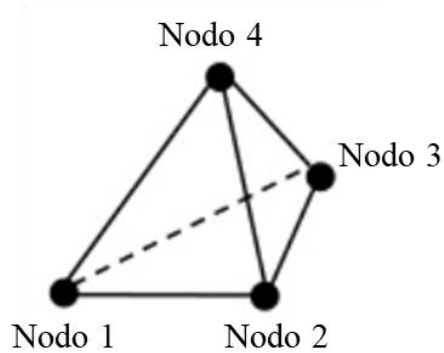


Figura 3.4 Elemento tridimensional.

3.4.2 Fase de solución

Generalmente y dependiendo del estudio o análisis, en esta etapa del modelado se definen las condiciones de frontera y cargas para obtener resultados nodales como valores de desplazamientos en diferentes nodos (en un análisis de esfuerzo) o valores de temperatura (en el caso de estudios térmicos).

3.4.3 Post-proceso

En esta sección se realiza el análisis y evaluación de los resultados en donde también es posible modificar las condiciones iniciales como, por ejemplo; propiedades del material, tipo de mallado, condiciones de contorno y tipo de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

1. R. L. Mott., *Applied Strength of Material* (659). University of Dayton, Ohio: *Pearson Prentice Hall*, pp. 9 (1996)
2. S. Timoshenko, “*Theory of elasticity*”, Ed. *McGraw-Hill College*, pp. 27 (1970)
3. D. R. Askeland, P. P. Fulay, and W. J. Wright, “*The science and engineering of materials*”. Stamford, CT: *Cengage Learning*, (2011)
4. K. J. Bathe: *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, 2nd edition, pp. 1 (1995)

Capítulo 4

Fundamentos de la técnica de proyección de franjas

4.1 Introducción

El fenómeno de moiré y la técnica de proyección de franjas están estrechamente relacionados ya que utilizan las mismas técnicas de análisis de franjas utilizadas en la interferometría clásica, se han utilizado comúnmente en metrología y se han revisado ampliamente en la literatura. Estas técnicas son muy conocidas para detectar formas y desplazamientos en plano y fuera de plano, además no requieren una iluminación muy uniforme en el campo de visión [1].

4.2 Técnicas de proyección de franjas y moiré

El término moiré en óptica es utilizado para describir un efecto visual que se observa cuando se superponen dos estructuras periódicas o cuasi-periódicas, es decir, de frecuencias idénticas o similares. La primera aplicación científica del fenómeno de moiré se describió en 1874 por Lord Rayleigh quien utilizó esta técnica para realizar pruebas de alta sensibilidad, observó que era posible determinar la calidad de rejillas de difracción en términos de espaciado, paralelismo y rectitud de líneas comparando con una regla maestra y observando las franjas de moiré [2].

El efecto consiste en crear un patrón de franjas oscuras y claras las cuales son muy sensibles a las pequeñas diferencias de movimiento, esto hace el efecto de moiré muy dinámico cambiando muy rápidamente con un movimiento leve y llamando la atención del observador, una rejilla de Ronchi puede observarse en la figura 4.1.

Las rejillas pueden ser de líneas rectas o curvas, cuando dos rejillas de este tipo se superponen parte de la luz que pasa a través de la primera rejilla está obstruida por la

segunda y debido a esto se produce una modulación de las intensidades de luz lo cual produce un patrón de frecuencia baja conocido como franjas de moiré, este efecto es particularmente llamativo cuando se observa a distancia. Se puede notar que la forma de las franjas de moiré cambia rápidamente con pequeños desplazamientos o rotaciones de ambas rejillas, el fenómeno depende de la dirección de observación con que se mira.

El efecto de moiré más allá de ser una atracción visual es uno de los primeros métodos ópticos utilizados para la medida de formas, desplazamientos y deformaciones de objetos con muy alta precisión [3,4].

La técnica de moiré es de no contacto físico con respecto al objeto de estudio, esta técnica ha sido utilizada para medir componentes de desplazamientos en plano y fuera de plano, los desplazamientos se miden simultáneamente en todo el campo de visión. El principio fundamental de la técnica de moiré es comparar dos estados del mismo sistema de líneas, que reflejan los cambios experimentados por una superficie.

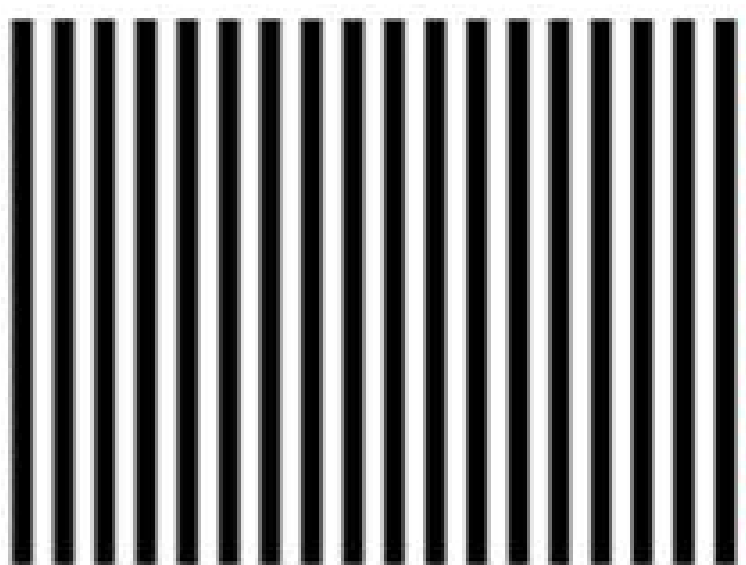


Figura 4.1 Rejilla de líneas constantes (Ronchi).

Por otra parte, tenemos la técnica de proyección de franjas, la cual está basada en los principios de moiré por proyección, básicamente consiste en proyectar un patrón de franjas en la superficie de estudio de tal manera que se forma un patrón de franjas que se deforma

de acuerdo con la topografía del objeto, pueden emplearse diferentes tipos de patrones en la proyección, pudiendo ser estos de tipo senoidal, Ronchi o rejilla binaria [4]. Una de las ventajas de la técnica proyección de franjas es que, además de ser una técnica de campo completo pueden ser estudiados objetos de diferentes dimensiones (micro y macro objetos) [5]. La principal diferencia entre proyección de franjas y las técnicas de moiré es que proyección de franjas no requiere de una rejilla física demoduladora como tradicionalmente se utiliza para generar franjas. En la figura 4.2 se puede apreciar un patrón de franjas cosenoidal que se puede utilizar para ser proyectado sobre una superficie.

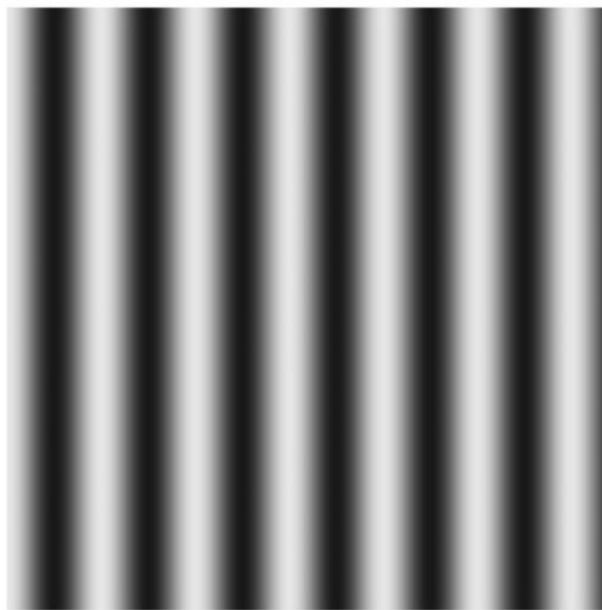


Figura 4.2 Patrón de franjas cosenoidal.

4.3 Modulación matemática de moiré

Los patrones de Moiré son de vital importancia para comprender conceptos básicos de interferometría, para generar citados patrones es necesario contar con estructuras periódicas o cuasi-periódicas, la función de transmitancia para este tipo de rejillas puede expresarse mediante el uso de series de Fourier. Considerando la función de transmitancia para dos rejillas arbitrarias, la siguiente expresión $f_1(x,y)$ y $f_2(x,y)$, muestra cómo calcular el patrón de moiré:

$$f_1(x, y) = a_1 + \sum_{n=1}^{\infty} b_{1n} \cos(n\phi_1(x, y)) \quad (4.1)$$

$$f_2(x, y) = a_2 + \sum_{n=1}^{\infty} b_{2n} \cos(n\phi_2(x, y)) \quad (4.2)$$

Donde $\phi(x, y)$ es la función que describe la forma de las líneas de la rejilla, es decir la fase de dicha función. Los coeficientes a_1 , a_2 , b_{1n} y b_{2n} determinan el perfil de las líneas de la rejilla (onda triangular, cuadrada, cosenoidal, etc.). Asumiendo que dos rejillas están situadas con un ángulo de 2α entre ellas y con el eje “y” bisectando este ángulo, véase figura (4.3) las dos funciones de la rejilla $\phi_1(x, y)$ y $\phi_2(x, y)$ pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\phi_1(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_1} (x \cos \alpha + y \sin \alpha) \quad (4.3)$$

$$\phi_2(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_2} (x \cos \alpha - y \sin \alpha)$$

Donde λ_1 y λ_2 denota la separación entre líneas de las dos rejillas. La ecuación 4.3 puede ser reescrita como:

$$\phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_b} x \cos \alpha + \frac{4\pi}{\lambda} y \sin \alpha \quad (4.4)$$

Donde λ es el espacio promedio entre líneas y λ_b es la longitud de onda entre las dos rejillas dada por:

$$\lambda_b = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (4.5)$$

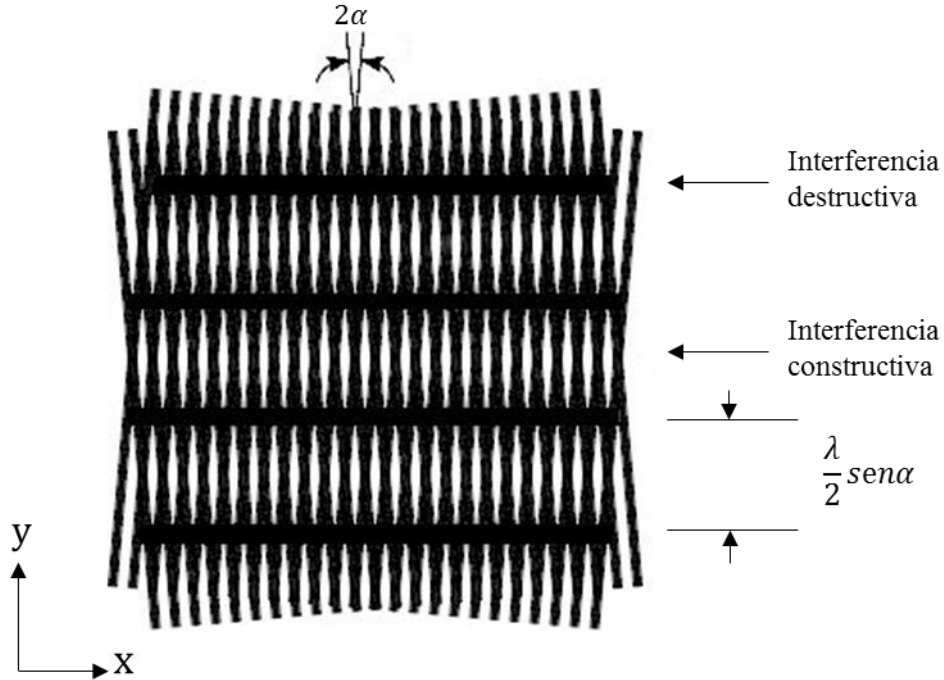


Figura 4.3 Patrón de moiré entre dos rejillas superpuestas del mismo paso en un ángulo α de una respecto a la otra.

Cuando estas dos rejillas se superponen (figura 4.3), la función de transmisión de intensidad resultante es dada por el producto:

$$f_1(x, y)f_2(x, y) = a_1a_2 + a_1 \sum_{m=1}^{\infty} b_{2m} \cos[m\phi_2(x, y)] + a_2 \sum_{n=1}^{\infty} b_{1n} \cos[n\phi_1(x, y)] \quad (4.6)$$

$$+ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} b_{1n} b_{2m} \cos[n\phi_1(x, y)] \cos[m\phi_2(x, y)]$$

Los términos a_1 , a_2 contienen frecuencia uno, $a_1 \sum_{m=1}^{\infty} b_{2m} \cos[m\phi_2(x, y)]$ y $a_2 \sum_{n=1}^{\infty} b_{1n} \cos[n\phi_1(x, y)]$ representan dos patrones con la misma frecuencia de las rejillas originales, el último término que es el de nuestro interés por proporcionar el patrón que contiene el efecto de moiré puede ser reescrito de la siguiente manera:

$$T = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_{1n}b_{2m}}{2} [\cos[n\phi_1(x, y) + m\phi_2(x, y)] + \cos[n\phi_1(x, y) - m\phi_2(x, y)] + \cos[n\phi_1(x, y) - m\phi_2(x, y)]] \quad (4.7)$$

En este caso nos interesan las frecuencias bajas que determinan las franjas de moiré, entonces anulando los términos de alta frecuencia la expresión puede ser reescrita como:

$$TM(x, y) = a_1 a_2 + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_{1n}b_{2m}}{2} \cos[n\phi_1(x, y) - m\phi_2(x, y)] \quad (4.8)$$

A partir de la cual se puede deducir el espaciado de franjas, la orientación y el perfil de franjas. El patrón de moiré tendrá líneas cuyos centros satisfagan la ecuación:

$$\phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) = M2\pi \quad (4.9)$$

Donde M corresponde al orden de la franja.

Podemos considerar tres casos diferentes para observar el efecto de moiré [6].

Caso 1: De rotación (figura 4.4). Considerando la ecuación 4.4, donde las rejillas se superponen con un ángulo entre ellas, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, $\alpha \neq 0$.

La ecuación 4.4 es reducida a:

$$M\lambda = 2y \operatorname{sen} \alpha \quad (4.10)$$

Esta ecuación representa líneas horizontales equi-espaciadas.



Figura 4.4 Patrón de moiré: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, $\alpha \neq 0$.

Caso 2: extensión. Las rejillas con una pequeña diferencia entre sí de periodo se superponen paralelas entre sí, $\lambda_1 \neq \lambda_2$, $\alpha = 0$.

Por lo tanto, las franjas de moiré satisfacen la ecuación:

$$M\lambda_b = x \quad (4.11)$$

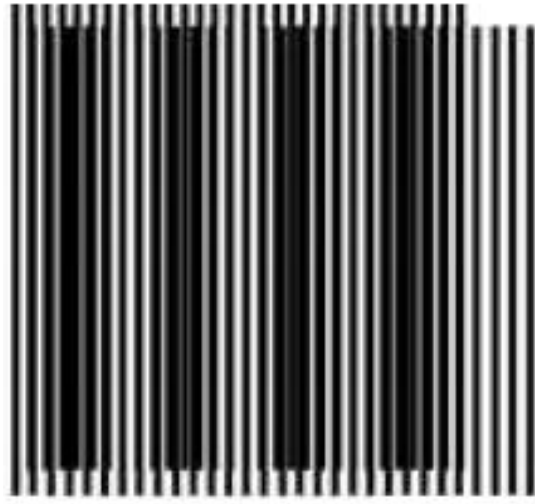


Figura 4.5 Patrón de moiré: $\lambda_1 \neq \lambda_2$, $\alpha = 0$.

Caso 3: General. Cuando dos rejillas tienen diferentes espacios entre líneas y el ángulo entre rejillas es diferente de cero, $\lambda_1 \neq \lambda_2$ y $\alpha \neq 0$, entonces la ecuación gobernante para las franjas de moiré es:

$$M\bar{\lambda} = \frac{\bar{\lambda}}{\lambda_b} x \cos \alpha + 2y \sin \alpha \quad (4.12)$$

Esta es la ecuación de las líneas rectas cuyo espaciado y orientación depende de la diferencia relativa entre los espacios de las dos rejillas y el ángulo entre las rejillas. En la figura 4.6 se puede apreciar la imagen correspondiente a este caso mencionado.

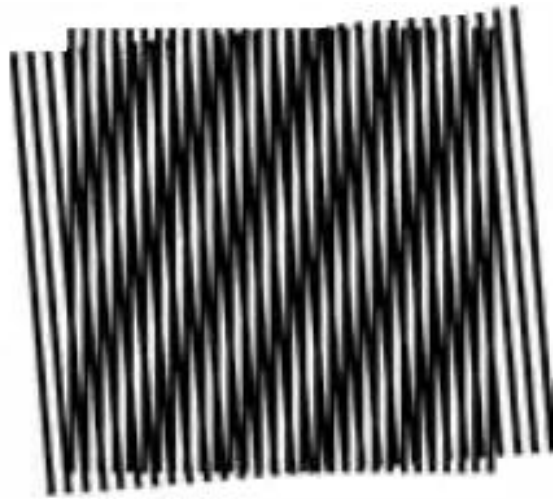


Figura 4.6 Patrón de moiré: $\lambda_1 \neq \lambda_2$, $\alpha \neq 0$.

4.4 Desplazamientos en plano

La técnica de moiré es adecuada para la medición de las componentes de desplazamiento en plano, esta técnica es conocida como interferometría de moiré o interferometría de rejilla. Esta técnica combina los conceptos del efecto moiré, difracción por una rejilla e interferencia de dos haces. El método es fundamentalmente interferométrico y de muy alta sensibilidad [7, 8].

La interferometría de moiré puede ser explicada como un proceso que implica la interferencia de dos haces de difracción, bajo este fundamento, no se toma en cuenta el efecto moiré. En este modelo, el objeto espécimen tiene pegada a su superficie una rejilla de difracción que modifica la fase en vez de la amplitud. Cuando el espécimen es deformado, entonces la rejilla se deforma junto con éste. La rejilla espécimen cambiará en frecuencia y dirección sistemáticamente punto a punto. En consecuencia, los frentes de onda planos que iluminan la rejilla espécimen serán difractados. Pero debido a los cambios localizados en la frecuencia y en la dirección de las líneas de la rejilla, los frentes de onda que emergen estarán ligeramente cambiados. Al utilizar los dos frentes de onda simultáneamente y escogiendo apropiadamente sus ángulos de incidencia, entonces se difractan de manera tal que interfiere un frente de onda con el otro. El patrón de

interferencia que resulta de la superposición de esos dos frentes de onda es un mapa de contornos de la separación angular de los dos órdenes difractados. Debido a que la desviación angular de la luz difractada es una medida de la frecuencia espacial de la rejilla, el mapa de contornos puede ser visto como un mapa de la distorsión de la rejilla espécimen, figura 4.7.

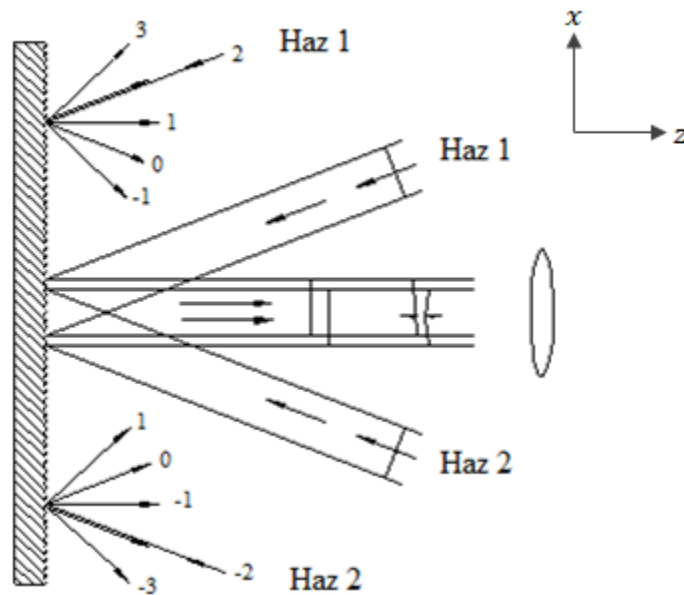


Figura 4.7 Esquema de interferometria de moiré.

Aquí no se ha mencionado nada del efecto moiré. Sin embargo, encontramos que el patrón de interferencia es el mismo que resultaría si la rejilla espécimen fuera superpuesta directamente con una similar pero no deformada. Otra forma de explicar el proceso es que los dos haces que inciden en el espécimen forman una rejilla de referencia debido a la interferencia de los dos haces. Esta rejilla es llamada rejilla virtual, aunque es una imagen real que puede ser vista en una pantalla o grabada. Esta rejilla de referencia es ópticamente superpuesta en la rejilla espécimen para formar un patrón de moiré, el cual es visto al usar los haces difractados que provienen del espécimen formando una imagen en el sistema de observación.

Entre las características de la interferometría de moiré se puede mencionar: (a) se puede medir desplazamientos en plano hasta con una sensibilidad máxima de 4 franjas/ μm , (b) es una técnica en tiempo real y de campo completo. Adicionalmente, tiene alta razón de señal a ruido: los patrones de franjas tienen alto contraste y excelente visibilidad. Rango dinámico grande: el método es compatible con un gran rango de desplazamientos, esfuerzos y gradientes.

La relación entre el orden de la franja y el desplazamiento es el mismo que en el moiré geométrico:

$$U(x, y) = \frac{1}{f} \cdot N_x(x, y),$$

(4.13)

$$V(x, y) = \frac{1}{f} \cdot N_y(x, y),$$

donde f es la frecuencia de la rejilla de referencia (virtual).

Los esfuerzos pueden ser extraídos de los desplazamientos de los campos mediante las relaciones:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{1}{f} \left[\frac{\partial N_x}{\partial x} \right]$$

(4.14)

$$\varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{1}{f} \left[\frac{\partial N_y}{\partial y} \right]$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{1}{f} \left[\frac{\partial N_x}{\partial y} + \frac{\partial N_y}{\partial x} \right] \quad (4.15)$$

las cuales se aplican a cada punto x, y en el campo. El esfuerzo es una cantidad geométrica, la cual depende del movimiento relativo de dos o tres puntos en un objeto y por consiguiente está relacionada a los desplazamientos que provocan deformación. Las ecuaciones 4.14 y 4.15 son para esfuerzos y rotaciones pequeñas. Una explicación más amplia de las ecuaciones correspondientes a esfuerzos puede ser encontrada en la teoría de elasticidad [9]. La figura 4.8 es una representación desde el punto de vista del moiré geométrico del concepto de interferometría de moiré.

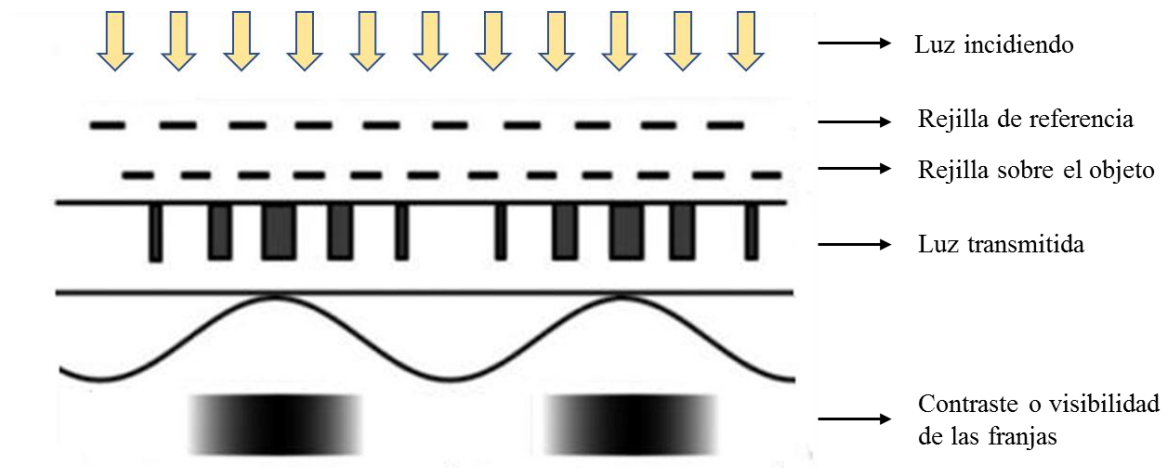


Figura 4.8 Representación gráfica de moiré geométrico para desplazamientos en plano.

4.5 Desplazamientos fuera de plano

Existen algunas técnicas que son útiles para detectar contornos de superficies fuera de plano como lo son: Moiré por sombreado, moiré por proyección, proyección de franjas y moiré por reflexión. En esta sección se describirá brevemente algunas de estas técnicas.

4.5.1 Moiré por sombreado

Uno de los primeros reportes del uso de la técnica de moiré por sombreado para medir la topografía de superficies fue dado por Meadows [10] y Takasaki [11] algunas de sus aplicaciones han sido para la determinación de deformaciones en objetos de interés. En el caso de moiré por sombreado solo se utiliza una sola rejilla la cual se encuentra sobre el objeto bajo estudio y además viene iluminada de forma oblicua de modo que se genera una proyección de sombra sobre el objeto de tal manera que, al observar a este a través de la rejilla se forma un patrón de moiré debido a la interferencia de la rejilla con su propia sombra. Este patrón de franjas representa la altura fuera de plano asociada al objeto véase figura 4.9.

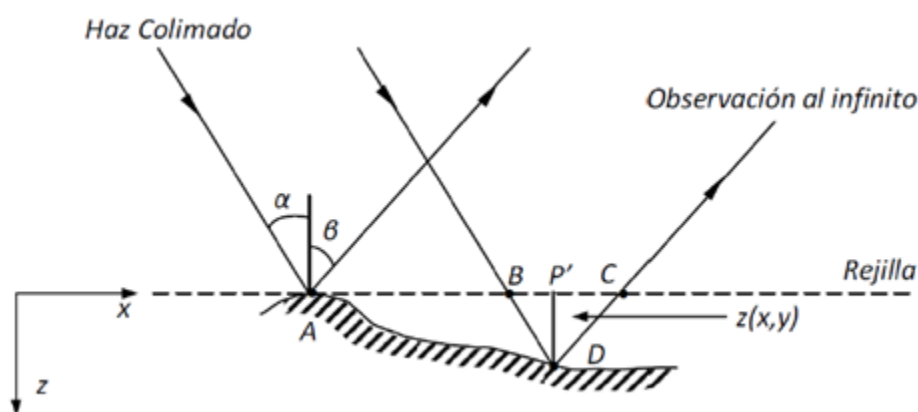


Figura 4.9 Esquema de Moiré por sombreado.

En la figura 4.9 se está suponiendo un haz colimado y se ilumina con ese haz una rejilla, la rejilla está cerca del objeto, α representa el ángulo de iluminación y β el ángulo de observación, lo que se pretende es encontrar la altura z , que distancia hay de cierto punto a la rejilla, de esta manera se puede determinar la topografía del objeto bajo estudio.

Para esto, es necesario contar el número de franjas que tiene la rejilla de modo que se pueda calcular la distancia AC y esto es igual a contar el número de líneas (franjas) multiplicado por el periodo de la rejilla, de manera similar para AB. Sea p el número de elementos en AB, q el número de elementos en AC entonces $AB = pa$ y $AC = qa$. Para obtener la distancia

de BC basta con restar AC - AB. Por lo tanto, $BC = AC - AB = (q - p)a = Na$ Donde $N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ N representa el orden de las franjas, el término a, representa el periodo, p es el número de líneas entre A y B, q equivale al número de líneas entre A y C. Entonces la distancia BC se puede representar como: $BC = BP' + P'C$. Por trigonometría se tiene que:

$$\tan \alpha = \frac{BP'}{z}, \quad \tan \beta = \frac{P'C}{z} \quad (4.16)$$

$$BC = z(\tan \alpha + \tan \beta) \quad (4.17)$$

Por lo tanto, la altura se determina mediante la siguiente ecuación

$$z = \frac{Na}{(\tan \alpha + \tan \beta)} \quad (4.18)$$

N es un numero de franja expresada por:

$$N = \frac{\phi}{2\pi} \quad (4.19)$$

En los últimos años la técnica de moiré por sombreado ha sido frecuentemente mencionada en la literatura. Para un área en específico podemos mencionar varias aplicaciones industriales como lo son: resistencia de componentes, pruebas de deformación, estudio de vibraciones, contorneo, medición del cuerpo humano entre otras [12].

4.5.2 Moiré por proyección

En la técnica de moiré por proyección se tienen dos lentes y dos rejillas, esta técnica consiste en proyectar franjas sobre la superficie de estudio y luego ver estas franjas a través de una segunda rejilla con su respectiva lente de observación, de esta manera se empalman dos patrones de franjas. Las franjas se pueden proyectar en una superficie mediante la imagen de una rejilla utilizando un sistema de proyección, la figura 4.10 muestra el esquema que describe este sistema.

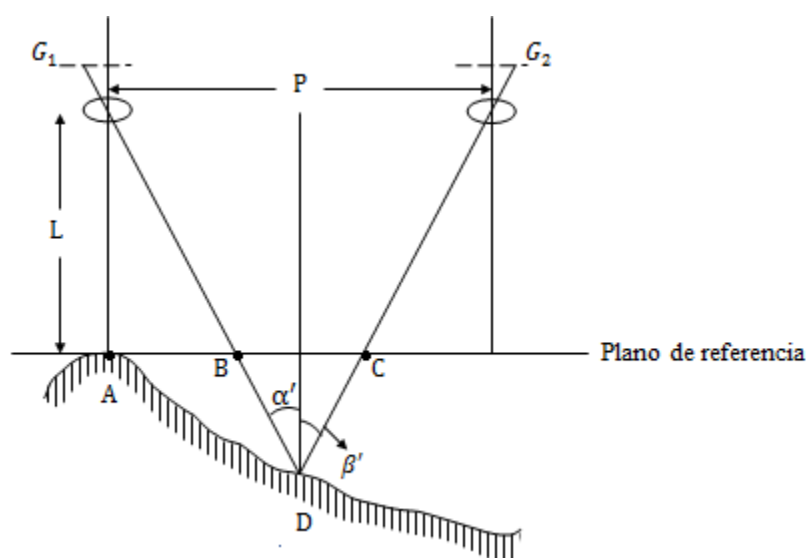


Figura 4.10 Moiré por proyección.

En moiré por proyección se utiliza una rejilla de alta frecuencia; la rejilla es proyectada en la superficie del objeto y luego se forma su imagen en una rejilla de referencia idéntica a la rejilla proyectada y alineada paralela a ella. Las franjas de moiré se forman en el plano de la rejilla de referencia.

De la Fig.4.10, se forma la imagen de la rejilla G_1 de periodo b en el plano de referencia donde su periodo es Mb , siendo M la amplificación del sistema de proyección. Si la superficie del objeto fuera plana y localizada en este plano de referencia, la rejilla proyectada debería tener un periodo constante. Se forma la imagen de esta rejilla en la rejilla de referencia G_2 .

Si los sistemas de proyección y de formación de imágenes son idénticos el periodo de la rejilla imagen será igual al de G_2 y los elementos de las rejillas estarán paralelas entre sí dada la alineación inicial. Entonces no se forma un patrón de moiré. Sin embargo, si la superficie es curva, el periodo de la rejilla proyectada en la superficie varía y se formará un patrón de moiré.

Podemos examinar de la misma forma como en moiré por sombreado, esto es, iluminando la rejilla de periodo Mb en el plano de referencia por una onda esférica desde la pupila de salida de la lente de proyección.

De acuerdo con lo descrito en moiré por sombreado podemos escribir:

$$z(x, y) = \frac{NMb}{\tan \alpha' + \tan \beta'} = NMb \frac{L+z(x,y)}{P} \quad (4.20)$$

La ecuación (4.20) se puede escribir como:

$$z(x, y) = \frac{NMb}{P - NMb} \quad (4.21)$$

Cuando la distancia entre la rejilla y la superficie del objeto cambia, las franjas de moiré se desplazan. Información de los gradientes locales de la superficie se puede obtener a partir de la dirección del desplazamiento.

En una de las aproximaciones para la determinación automática de la superficie, la rejilla colocada sobre el objeto es iluminada oblicuamente (Fig.4.11) obteniendo un patrón de moiré.

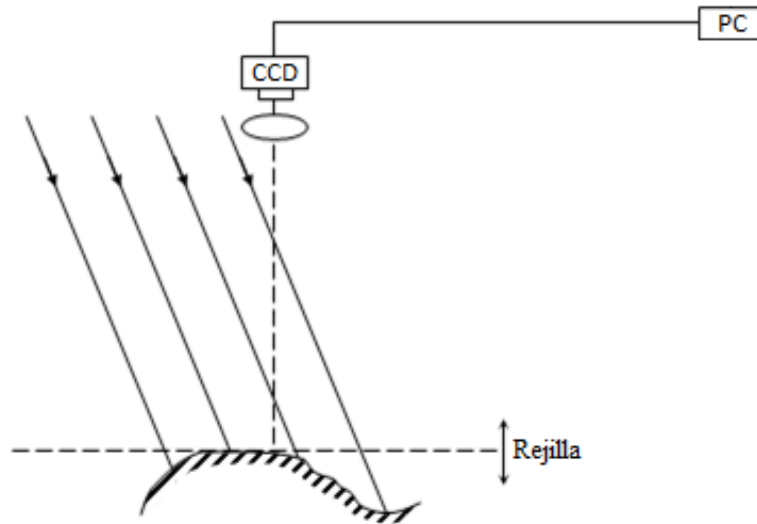


Fig. 4.11 Determinación automática de la forma.

Cuando la rejilla se desplaza axialmente se obtiene patrones de moiré existiendo un desplazamiento en fase para sus franjas. Utilizando la técnica de desplazamiento de fase (*phase stepping*) se puede calcular la topografía del objeto.

Algunas aplicaciones de la técnica de moiré por proyección son: medición de deformaciones, análisis de vibraciones, ingeniería humana, comparación de componentes, entre otras. [13,14,15,16].

4.5.3 Proyección de franjas

El uso de la técnica de proyección de franjas para evaluar la topografía de una superficie tridimensional (3D) se ha convertido en una de las áreas de investigación más activas en metrología óptica durante los últimos años, la obtención de la topografía de distintos materiales es un tema de gran interés para una amplia gama de aplicaciones industriales, científicas y biomédicas [17, 18]. Esta técnica consiste en proyectar un patrón de franjas tipo cosenoidal en un plano de referencia, luego se vuelve a proyectar el mismo patrón de franjas en el objeto de prueba. La diferencia de fase entre los dos patrones de franjas se relaciona a la altura del objeto, véase figura 4.12. El patrón de franjas simulado en una computadora es proyectado mediante el uso de un proyector. En este caso se dice que las franjas son generadas sintéticamente.

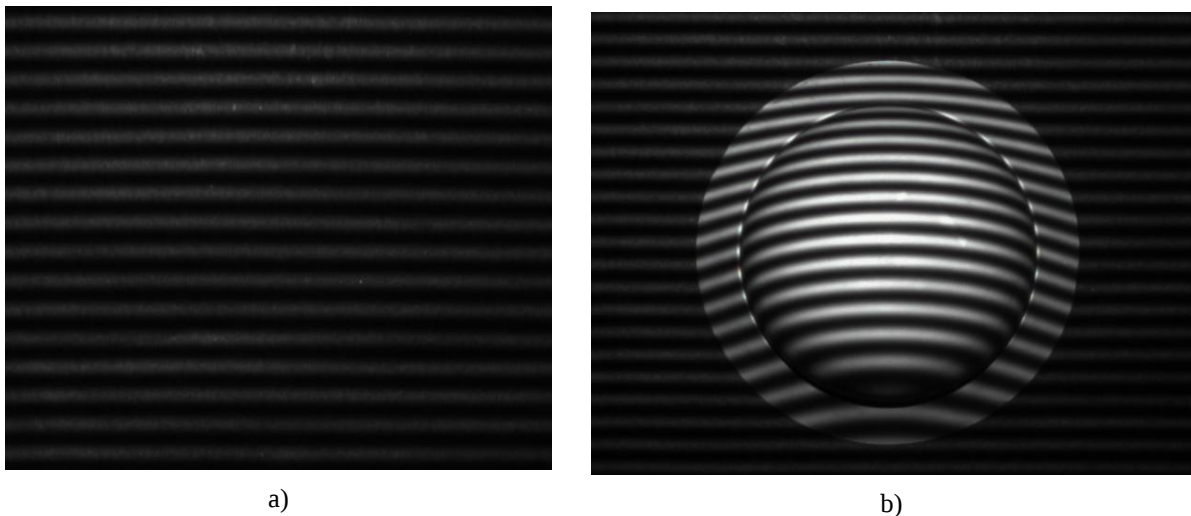


Figura 4.12 a) Proyección de franjas sobre una superficie de referencia, b) Proyección de franjas sobre un objeto.

La topografía de un objeto es obtenida mediante la ecuación:

$$z(x, y) = \frac{\phi(x, y)}{(2\pi)} \frac{p}{(\tan \alpha + \tan \beta)} \quad (4.22)$$

Donde $\phi(x, y)$ corresponde a la diferencia de fase entre el plano de referencia y el objeto, p es el periodo de las franjas proyectadas, α es el ángulo entre el eje óptico y el proyector, β es el ángulo entre el eje óptico y la cámara, figura 4.13.

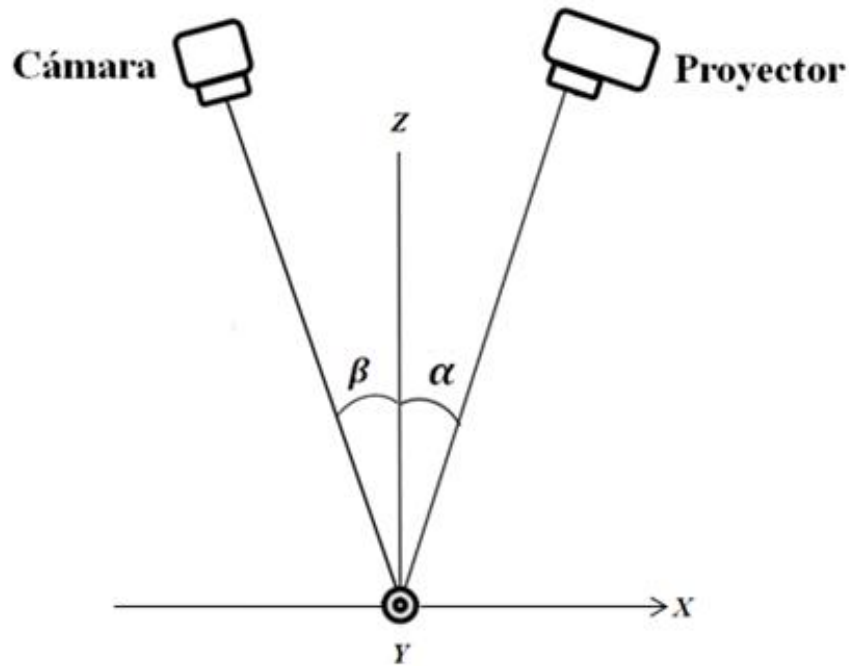


Figura 4.13 Esquema de un sistema de proyección de franjas.

A medida que el ángulo entre la iluminación y la observación se hace más grande, el intervalo de contorno disminuye, aunque un ángulo mayor proporcione alta sensibilidad, no obstante, se presenta un problema de sombreado en los objetos bajo estudio, estas sombras representan áreas con datos faltantes, por lo que la imagen obtenida no puede ser recortada.

BIBLIOGRAFIA

1. B. Han, and Y. Guo., “Thermal Deformation Analysis of Various Electronic Packaging Products by Moiré and Microscopic Moiré Interferometry”, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol 117, pp. 185-191, (1995)
2. J. Pekelsky, R. & van Wijk, M. C. Moiré topography: Systems and applications. In: Non-Topographic Photogrammetry. 2nd ed. Karara, H. M. (ed.). Falls Church, VA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 231 – 263 (1989) ISBN 0-944426-23-9
3. G. L. Cloud., “*Optical methods of engineering analysis*” Cambridge University Press, Cambridge, (1998)
4. N. Munera, G. J. Lora, J. Garcia-Sucerquia, “Evaluation of fringe projection and laser scanning for 3d reconstruction of dental pieces” Dyna, N., Medellin, pp. 65-73 (2012)
5. A. Martinez, J. A. Rayas, H. J. Puga, Katia Genovese, “Iterative estimation of the topography measurement by fringe-projection method with divergent illumination by considering the pitch variation along the x and z directions”, Optics and lasers in Engineering, vol 48, No. 9, pp. 877-881 (2010)
6. K. Creath, Wyant J.C., “Moire and fringe projection techniques”, *Optical shop testing*, Malacara D., Editor, Wiley, New York (1992)
7. D. Post, B. Han, P. Ifju., “*High Sensitivity Moiré: Experimental Analysis for Mechanics and Materials*”, Chapter 3 and 4, Springer, New York (1994)
8. G. L. Cloud., “Optical Methods in Experimental Mechanics. Experimental Techniques”, (2005-2006)

9. J. W. Dally & Riley W. F., “Experimental Stress Analysis”. Boston: Mc. Graw Hill (1991)
10. D. Meadows. M. Johnson O, Allen J.B., “Generation of Surface Contours by moiré Patterns”, *Appl. Opt.*, 9, pp. 942-947(1970)
11. H. Takasaki., “Moiré topography”, *Appl. Opt.*, 9, pp. 1467-1472 (1970)
12. K. Patorski., *Handbook of the moiré fringe technique*, chapters 1, 9-11, Elsevier, Amsterdam (1993)
13. A. L. Beraldo, D. Albiero, A. J. Silva Maciel, I. M. Dal Fabbro., S. Rodrigues., (02/10/2007). “Moiré technique applied in compression stress of bamboo guadua”. *Maderas, Ciencia y tecnología*, 9(3): 309-322,14.
14. K. J. Gasvik, M. E. Fourney., “Projection Moiré Using Digital Video Processing: A Technique for Improving the Accuracy and Sensitivity”, *Transactions of the ASME*, 53, pp. 652-656 (1986)
15. M. T. Saito, E. M. Yoshimura, F. F. Palacios., et al. “Utilization of fringe projection technique for evaluation of wound dimensions and of healing progress. In: *Advanced Biomedical and Clinical Diagnostic Systems*” XI Proc of SPIE: USA; (2013)
16. J. Doty. L., “Projection Moiré for Remote Contour Analysis”, *J. Opt. Soc. Am.*, **73**, pp. 366-372 (1983)
17. S. S. Gorthi, and P. Rastogi., “Fringe projection techniques: Whither we are?” *Opt Laser Eng*, vol. 48, pp. 133–140 (2010)
18. F. Chen. G., Brown, M. and M. Song, “Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods,” *Opt Eng*, vol. 39(1), pp. 10–22 (2000)

Capítulo 5

Técnicas de obtención de fase

5.1 Introducción

El objetivo de la técnica de proyección de franjas consiste en obtener la forma tridimensional de los objetos de interés, dicha forma está vinculada principalmente con el cálculo de fase la cual es proporcional a la topografía del objeto. En este capítulo se abordarán teóricamente los dos métodos principales para obtener fase, el método de transformada de Fourier-Takeda y la técnica de desplazamiento de fase.

5.2 Cálculo de fase por transformada de Fourier

El método de la transformada de Fourier es una técnica de análisis espacial de patrones de franjas propuesto y demostrado por Takeda et al [18], quien fue uno de los primeros en emplear la técnica de la transformada rápida de Fourier para la extracción de fase, unos años más tarde la técnica fue extendida al espacio bidimensional (2D) [19]. Una de las características de este método es que se puede obtener información de fase a partir de una sola toma de imagen, es decir, puede ser empleado en eventos dinámicos donde el objeto bajo estudio este en constante movimiento, básicamente la técnica de Fourier se basa en el proceso de imágenes, decodificando información de intensidad al dominio frecuencial. A continuación, se presenta el desarrollo matemático.

La expresión de intensidad para un patrón de franjas está representada de la forma:

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos(\phi(x, y) + 2\pi f_0 x) \quad (5.1)$$

Donde f_0 representa la frecuencia espacial portadora, la fase $\phi(x, y)$ contiene la información de altura del objeto, $a(x, y)$ y $b(x, y)$ son variaciones espaciales no deseadas de irradiancia pertenecientes a la transmisión del objeto de prueba.

Para describir la transformada rápida de Fourier se toma el patrón de franjas adquirido y se utiliza:

$$\cos \theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2} \quad (5.2)$$

Por lo tanto, la ecuación 5.1 puede ser reescrita por:

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y)e^{2\pi i f_0 x} + c^* e^{-2\pi i f_0 x} \quad (5.3)$$

Donde $*$ denota el complejo conjugado, i es un término imaginario (definido por $i^2 = -1$) y entonces se define $c(x, y)$ como:

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) e^{i\phi(x, y)} \quad (5.4)$$

La transformada de Fourier de la ecuación (5.3) con respecto a x es dada por un algoritmo conocido como la transformada rápida de Fourier (FFT) obteniendo $G(x, y)$:

$$G(f, y) = A(f_x, y) + C(f_x - f_0, y) + C^*(f_x + f_0, y) \quad (5.5)$$

Donde A , C y C^* denotan el dominio de Fourier, f_x es la frecuencia espacial en la dirección x . Si las variaciones de $a(x, y)$, $b(x, y)$ y $\phi(x, y)$ son lentas comparadas con la frecuencia portadora, los espectros de Fourier de la ecuación (5.5) serán separados por f_0 , esta ecuación representa un espectro formado por un lóbulo central y dos lóbulos que representan las altas frecuencias de la imagen de las franjas, véase figura 12.

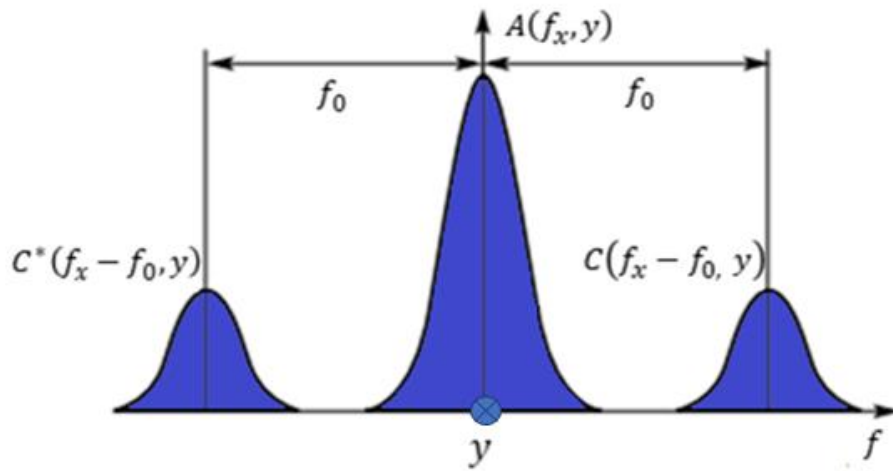


Figura 5.1 Espectro de Fourier con un patrón de franjas abiertas y la portadora.

Posteriormente se selecciona cualquiera de los dos lóbulos de la señal portadora, el nivel de fondo $a(x, y)$ ya ha sido filtrado, entonces trasladamos al origen un lóbulo y de esta manera se elimina la frecuencia portadora como se observa en la figura 5.2.

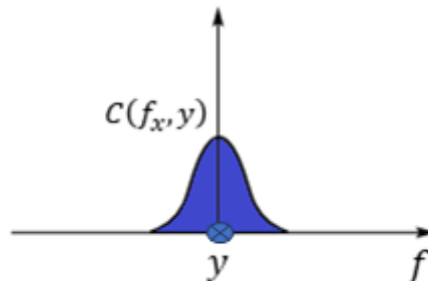


Figura 5.2 Lóbulo del espectro de Fourier trasladado al origen.

Finalmente se calcula la transformada inversa de $C(fx, y)$ con respecto a fx , como resultado se obtiene $c(x, y)$ definido en la ecuación (5.4).

Finalmente, la fase puede recuperarse a través de:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{Im[c(x, y)]}{Re[c(x, y)]} \quad (5.6)$$

Donde $Im(x, y)$ y $Re(x, y)$ se refiere a la parte imaginaria y real de $c(x, y)$. Los valores de fase obtenidos mediante la ecuación 5.6 se encuentran envueltos en el intervalo de $[-\pi$ a $\pi]$. Esto se corrige por medio de un proceso de desenvolvimiento de fase [20].

5.3 Método de desplazamiento de fase

El método de desplazamiento de fase consiste en mover un patrón de franjas de referencia a lo largo de la dirección de propagación de su frente de onda con respecto del patrón de franjas que se está analizando, de este modo se cambia la fase. El análisis de estos patrones de franjas permite la completa recuperación de la información que posee el objeto a estudiar. La fase desconocida del patrón de franjas u objeto bajo análisis es obtenida aplicando diversas técnicas [21]. La forma más simple para obtener la fase consiste en tomar tres imágenes consecutivas añadiendo un desplazamiento de fase conocido, no obstante, en este trabajo de tesis se utiliza un algoritmo de cuatro pasos correspondiente a cuatro imágenes.

La intensidad de un patrón de franjas se puede modelar de la siguiente forma:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + \Delta\phi] \quad (5.7)$$

Donde $a(x, y)$ representa el fondo que contiene las variaciones de intensidad del patrón de franjas, $b(x, y)$ es un factor que describe la amplitud o visibilidad de las franjas, $\phi(x, y)$ representa la fase desconocida, $\Delta\phi$ es el incremento de fase introducido.

Los cuatro patrones de franjas son proyectados utilizando cuatro valores diferentes de fase, por lo tanto, es necesario adquirir cuatro interferogramas con un desplazamiento de fase de $\pi/2$. La ecuación que describe cada uno de estos pasos está dado por:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y)] \\
 I_2 &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi/2] \\
 I_3 &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi] \\
 I_4 &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + 3\pi/2]
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

Aplicando la identidad trigonométrica:

$$\cos(A + B) = \cos(A) \cos(B) - \sin(A) \sin(B) \tag{5.9}$$

A las cuatro ecuaciones anteriores y aplicando pasos algebraicos se tiene que:

$$I_4 - I_2 = 2b(x, y) \sin[\phi(x, y)] \tag{5.10}$$

$$I_1 - I_3 = 2b(x, y) \cos[\phi(x, y)]$$

Para finalmente obtener la fase por medio de:

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{(I_4 - I_2)}{(I_1 - I_3)} \right] \quad (5.11)$$

En la figura 5.3 se muestra un perfil de franjas cosenoidales con un desplazamiento de cuatro pasos implementado.

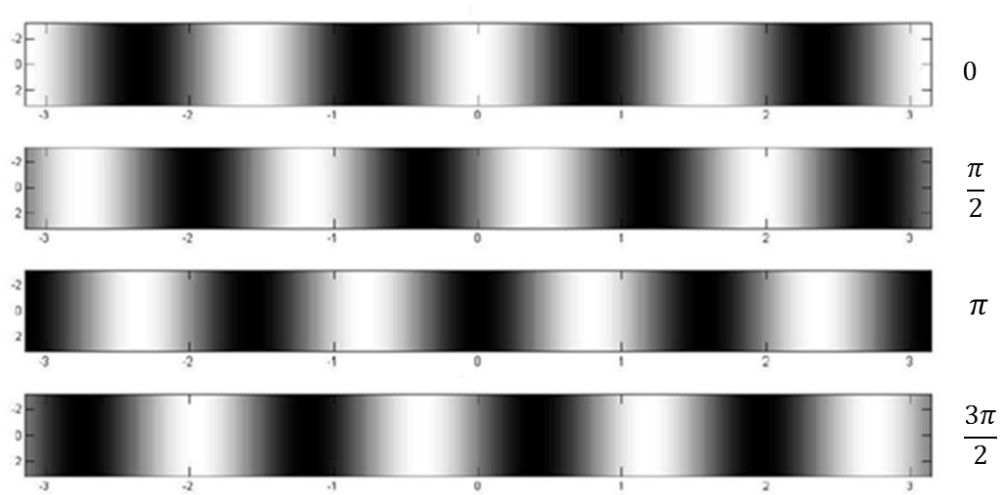


Figura 5.3 Patrón de franjas cosenoidales con desplazamiento de cuatro pasos.

5.4 Desenvolvimiento de fase

El método de desplazamiento de fase requiere de la función arco-tangente, esto nos da como resultado una fase envuelta en un rango de $[-\pi, \pi]$ y trae como consecuencia saltos o ambigüedades de fase en pixeles adyacentes.

El principio general de desenvolvimiento de fase consiste en integrar las discontinuidades de la fase envuelta cada vez que ésta presenta cambios de 2π . Si el término de fase se incrementa, la pendiente de la curva será positiva, y negativa si la fase disminuye [22].

La relación entre la fase envuelta y desenvuelta puede describirse como:

$$\phi_d(x_i, y_j) = \phi_e(x_i, y_j) + 2\pi n(x_i, y_j); \quad 1 \leq i \leq N; \quad 1 \leq j \leq M \quad (5.12)$$

Donde $\phi_d(x_i, y_j)$ representa la fase desenvuelta, $\phi_e(x_i, y_j)$ la fase envuelta y $n(x_i, y_j)$ es un número entero conocido como número de campo. N y M representan las columnas y filas de la imagen en píxeles.

Cuando el patrón de franjas de interés contiene dos pixeles por periodo, desenvolver la fase es más sencillo, teniendo dos píxeles por franja se concluye que los cambios en la fase no serán mayores a π , bajo este principio se reconstruye el mapa de fase. Para desenvolver la fase es necesario compararla entre píxeles, cuando la diferencia es mayor a π basta con sumar o restar 2π o múltiplos de 2π . Después de aplicar esta operación, las discontinuidades serán eliminadas ver figura 5.4.

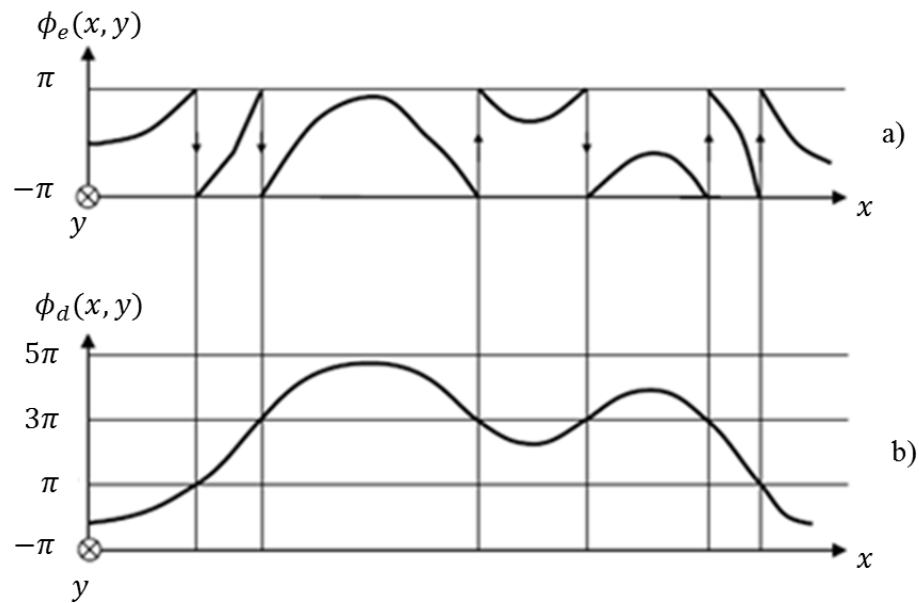


Figura 5.4 (a) Mapa de fase envuelta, (b) Mapa de fase desenvuelta.

Es necesario encontrar el número de campo correcto para desenvolver la fase en cada punto, considerando la ecuación 5.12 se propone: $n(x_1) = 0$, tomando en cuenta tres casos en cada píxel se tiene que:

$$\begin{aligned}
n(x_1) &= 0 \\
n(x_i) &= n(x_{i-1}) & \text{si } |\phi_e(x_i) - \phi_e(x_{i-1})| < \pi \\
n(x_i) &= n(x_{i-1}) + 1 & \text{si } \phi_e(x_i) - \phi_e(x_{i-1}) \leq -\pi \\
n(x_i) &= n(x_{i-1}) - 1 & \text{si } \phi_e(x_i) - \phi_e(x_{i-1}) \geq \pi \\
& & i = 2, 3, \dots, N
\end{aligned}$$

Este método es adecuado cuando se capturan imágenes en donde el patrón de franjas está libre de ruidos, baja modulación de franjas, presencia de sombras, entre otros, de otro modo el algoritmo identificara saltos bruscos de fase o discontinuidades, en donde dicha discontinuidad se deba únicamente al ruido excesivo o a la serie de eventos ya mencionados, si el patrón de franjas presenta este tipo de inconsistencias, existen numerosos algoritmos de desenvolvimiento para mejorar los resultados de fase o errores en la discontinuidad [23].

BIBLIOGRAFIA

1. B. Han and Y. Guo, “Thermal Deformation Analysis of Various Electronic Packaging Products by Moiré and Microscopic Moiré Interferometry”, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol 117, pp. 185-191 (1995)
2. J. Pekelsky, R. & V. M. Wijk., Moiré topography: Systems and applications. In: Non-Topographic Photogrammetry. 2nd ed. Karara, H. M. (ed.). Falls Church, VA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 231 – 263 ISBN 0-944426-23-9 (1989)
3. G. L. Cloud., “Optical methods of engineering analysis; Cambridge University Press, Cambridge”, (1998)

4. N. Munera, G. J. Lora, J. Garcia-sucerquia, "Evaluation of fringe projection and laser scanning for 3d reconstruction of dental pieces" *Dyna*, yeay 79, N. 171, Medellin, pp. 65- 73 (2012)
5. C.F. Brown, G. M. Gordon, and M. Song, "Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods", *Optical Engineering*, vol 39, No. 1, pp. 12-14
6. K. Creath. Wyant J.C., "Moire and fringe projection techniques", *Optical shop testing*, Malacara D., Editor, Wiley, New York (1992)
7. D. Post, Han B, Ifju P., *High Sensitivity Moiré: Experimental Analysis for Mechanics and Materials*, Chapter 3 and 4, Springer, New York (1994)
8. G. Cloud, L. Optical Methods in Experimental Mechanics. *Experimental Techniques*, (2005-2006)
9. D. Meadows, M. Johnson O, Allen J.B., "Generation of Surface Contours by moiré Patterns", *Appl. Opt.*, 9, pp. 942-947 (1970)
10. H. Takasaki, "moiré topography", *Appl. Opt.*, 9, pp. 1467-1472 (1970)
11. K. Patorski, *Handbook of the moiré fringe technique*, chapters 1, 9-11, Elsevier, Amsterdam (1993)
12. A. L. Beraldo, D. Albiero, A. M. Silva, I. M. Dal Fabbro, S. Rodrigues. "Moiré technique applied in compression stress of bamboo guadua". *Maderas, Ciencia y tecnología*, 9(3), pp 309-322 (2007)
13. K. J. Gasvik, M.E. Fourney. , "Projection Moiré Using Digital Video Processing: A Technique for Improving the Accuracy and Sensitivity", *Transactions of the ASME*, 53, pp. 652-656 (1986)

14. M. T. Saito, E. M. Yoshimura, F. F. Palacios., et al. "Utilization of fringe projection technique for evaluation of wound dimensions and of healing progress". In: Advanced Biomedical and Clinical Diagnostic Systems XI Proc of SPIE: USA; (2013)
15. J. L. Doty., "Projection Moiré for Remote Contour Analysis", *J. Opt. Soc. Am.*, 73, pp.366-372 (1983)
16. S. S. Gorthi and P. Rastogi, "Fringe projection techniques: ¿Whither we are?" *Opt Laser Eng*, vol. 48, pp. 133–140, (2010)
17. F. G. Chen, M. Brown, and M. Song., "Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods," *Opt Eng*, vol. 39(1), pp. 10–22, (2000)
18. M. Takeda, Ina H., Kobayashi S., "Fourier-Transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry", *J. Opt. Soc. Am.*, 72, pp. 156-160 (1982)
19. D. Bone J., Bachor H.A., Sandeman R.J., "Fringe-Pattern Analysis Using a 2-D Fourier Transform", *Appl. Opt.*, 25, pp. 1653-1660 (1986)
20. D. W. Robinson, G. T. Reid., "Interferogram Analysis", Institute of Physics Publishing Cap.6 (1993)
21. O. Sasaki and H. Okazaki., "Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement," *Appl. Opt.*, vol.25, no. 18, pp. 3137-3140 (1986)
22. D. Malacara., "interferogram Analysis for Optical Testing", Second. CRC press, (2005)
23. D. Malacara, Servin M, Malacara Z., "*Interferogram Analysis for Optical Testing*", Chapters 2 and 11, Taylor & Francis, Boca Raton (2005)

Capítulo 6

Desarrollo experimental y resultados

6.1 Introducción

En este capítulo se presentan resultados experimentales correspondientes a la evaluación de cambios en la topografía al aplicar un esfuerzo mecánico y así detectar fracturas en algunos objetos de prueba usando la técnica de proyección de franjas. En el caso de detección de fracturas también se aplica la técnica de líquidos penetrantes fluorescentes. Se lleva a cabo una simulación numérica por medio del software de *Solidworks* correspondiente a la evaluación del campo de deformación en el caso del objeto con la fractura. También se llevó a cabo un experimento el cual consiste en perturbar térmicamente el objeto bajo estudio y medir sus cambios de relieve.

6.2 Descripción del sistema óptico

El sistema de proyección de franjas consiste básicamente en tres componentes esenciales, un proyector digital, una cámara de alta resolución (CCD) y el objeto de interés. Este sistema se encuentra configurado de tal manera que, al proyectar un patrón de franjas, éste sea capturado por la cámara. Las franjas se desvían de su posición inicial acorde al relieve del objeto de estudio. El esquema óptico utilizado se muestra en la figura 6.1.

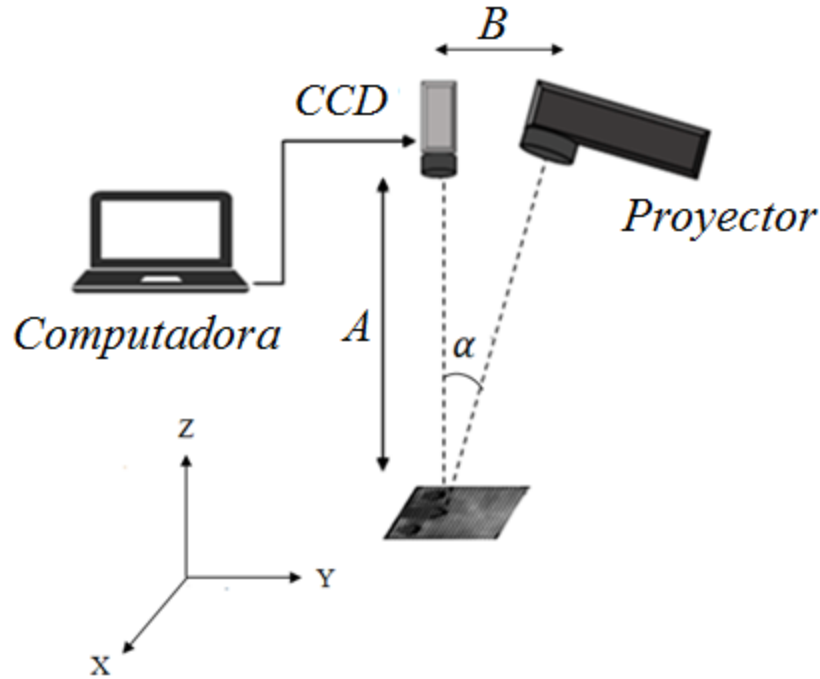


Figura 6.1 Esquema del arreglo óptico en donde $A=450\text{ mm}$, $B=80\text{ mm}$ y $\alpha = 10^\circ$.

Proyector

Es la fuente de luz blanca cuya luz se codifica en luz estructurada. Las franjas son proyectadas sobre un plano de referencia y posteriormente sobre el objeto de estudio. El modelo del proyector usado es; (DELL 109WX, resolución WXGA 1280×800). Las franjas tienen perfil cosenoidal y representadas por niveles de grises.

Cámara CCD

La cámara es el componente encargado de realizar el proceso de captura de las imágenes, en este trabajo se utilizó una cámara CCD, por sus siglas en inglés (*Charge Coupled Device*). Este tipo de cámaras está conformado por una matriz de microsensors sensibles a la radiación luminosa, cada uno genera un valor de tensión que es discretizado y forma un píxel de la imagen final. Frente a la matriz fotosensible se ubica un objetivo o lente que forma la imagen del objeto sobre el plano que contiene la matriz. La cámara utilizada en esta aplicación es una cámara (Pixelink model PL-B776, QXGA resolution 2048×1536 , Pixel Pitch $3.2 \times 3.2\text{ }\mu\text{m}^2$)

6.3 Alineación y descripción del sistema de proyección de franjas

La figura 6.1 muestra un sistema óptico de proyección de franjas con incidencia vertical, ubicándose en el plano x, z . La cámara se encuentra en el eje óptico y el proyector está a un ángulo α , la sensibilidad del sistema viene dada por el ángulo entre el proyector y la cámara, de este modo la cámara captura el cambio de fase en las franjas dada la deformación que el objeto produce en éstas. La alineación del proyector con respecto a la cámara se realizó proyectando una serie de rectángulos concéntricos de color negro sobre la superficie, luego utilizando el software de “NIMAX”, es posible visualizar desde la computadora la superposición de los rectángulos concéntricos proyectados sobre el plano de referencia con el centro de la cámara. El proceso de alineación consistió en ajustar de forma manual tanto el proyector como la cámara hasta obtener una inclinación correcta visualizada tanto en la computadora como en la proyección. El arreglo óptico utilizado puede apreciarse en la figura 6.2.

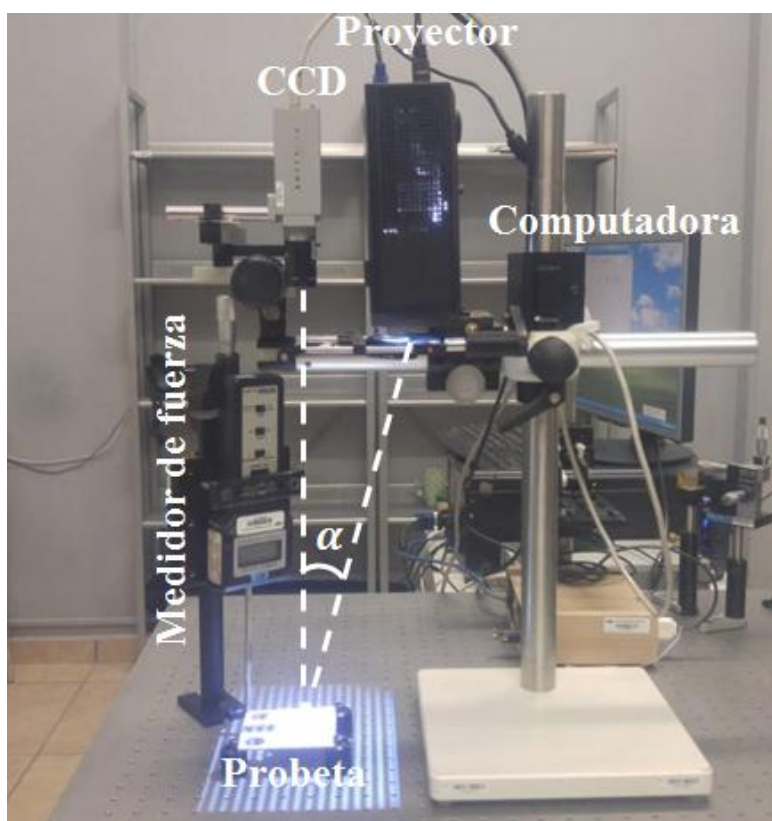


Figura 6.2 Arreglo experimental del sistema de proyección de franjas.

6.4 Medición de cambios de la topografía de una placa metálica sometida a un esfuerzo mecánico

El objeto de estudio corresponde a una placa metálica cuyas dimensiones fueron obtenidas mediante un vernier digital y corresponden a las dimensiones mostradas en la figura 6.3. La placa es cubierta por un revelador removible el cual no daña la superficie con el propósito de tener un objeto difuso, ver figura 6.4.

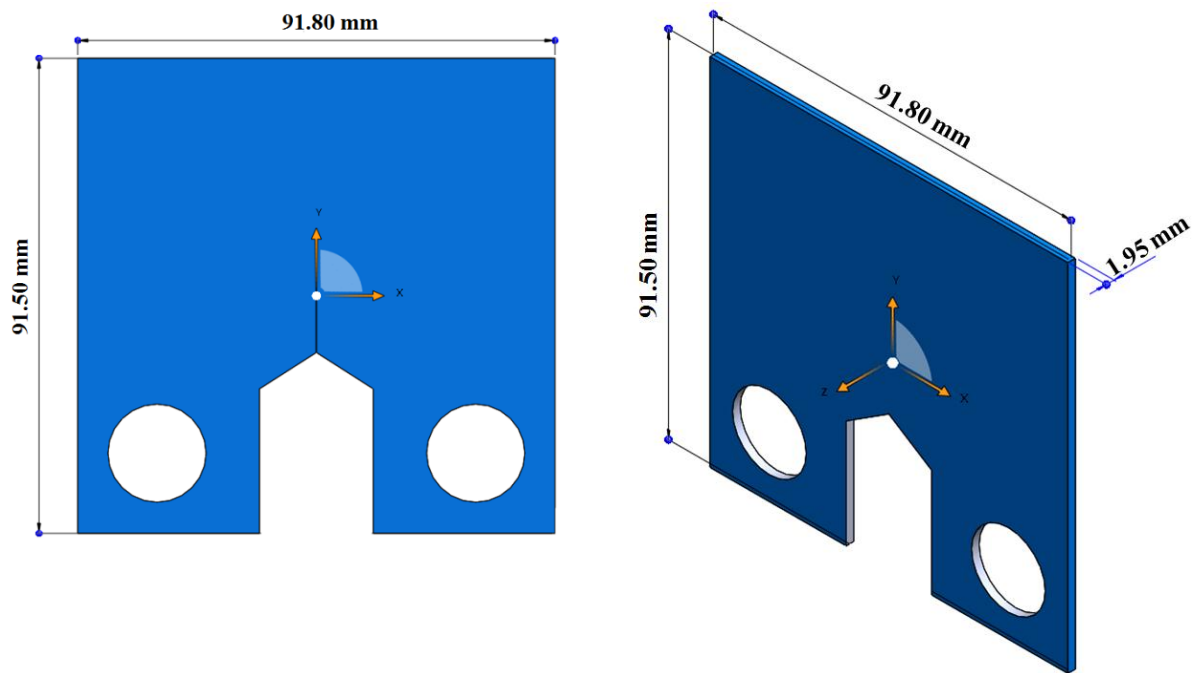


Figura 6.3 Dimensiones en milímetros de los ejes X, Y y Z del objeto de estudio.

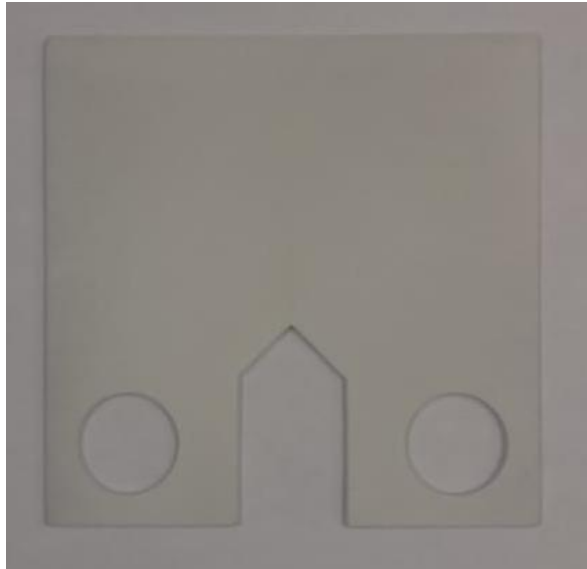


Figura 6.4 Objeto de prueba con revelador aplicado.

La técnica de proyección de franjas ha sido aplicada con éxito para monitorear cambios que involucraron deformaciones fuera de plano de $10\text{ }\mu\text{m}$. En este trabajo se implementó el método de desplazamiento de fase, donde cuatro patrones de franjas cosenoidales con un desplazamiento relativo de $\pi/2$ se proyectaron secuencialmente sobre la superficie del objeto. Un procedimiento de procesamiento de imágenes bien definido conduce primero a una distribución de fase envuelta dada por la ecuación 5.5. La fase desenvuelta es sustituida en la ecuación 4.22 para obtener el campo de desplazamiento en unidades de longitud.

En la figura 6.5 se puede observar la captura por medio de la cámara CCD del patrón de franjas proyectado sobre la placa metálica.

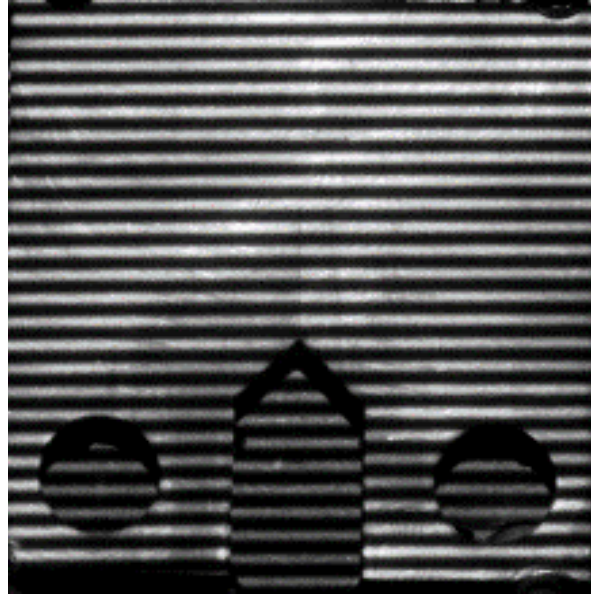


Figura 6.5 Proyección de franjas sobre la muestra.

La figura 6.6 muestra las fases desenvueltas correspondientes a un estado inicial y final de la probeta metálica cuando ésta ha sufrido un esfuerzo mecánico. El arreglo implementado en este trabajo puede monitorear cambios en la forma que involucren deformaciones fuera de plano mayores de 0.001 mm .

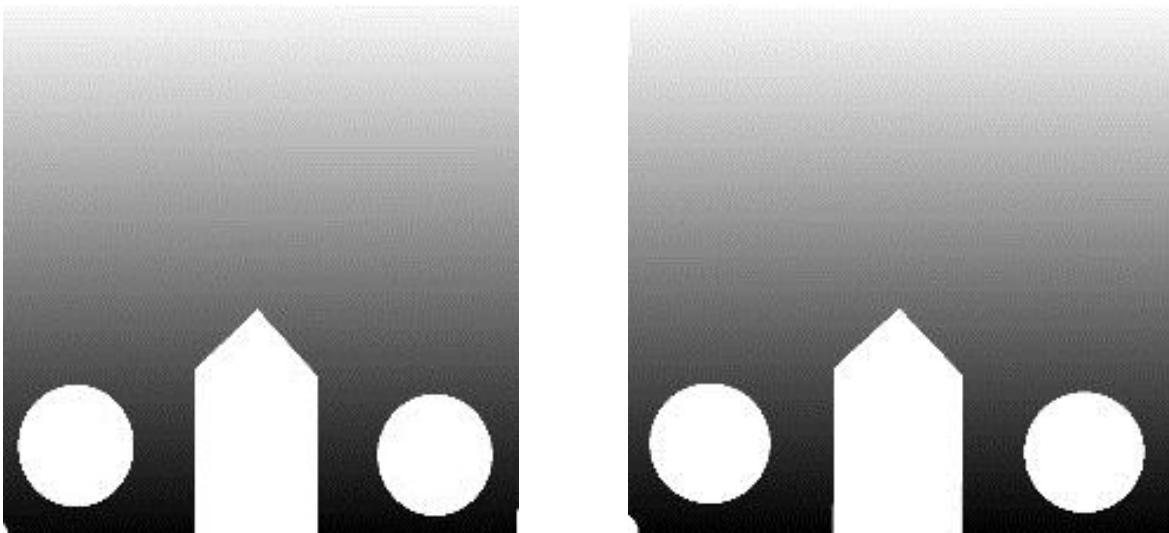


Figura 6.6 a) Fase desenvuelta del objeto sin carga aplicada, b) fase desenvuelta del objeto con carga aplicada.

La dirección de tracción fue Z y la tensión fue de 14.8 N . El periodo de la rejilla proyectada es $p = 3.66 \text{ mm}$. Haciendo uso de la ecuación 4.20, se obtiene el campo de desplazamiento el cual es representado en la figura 6.7.

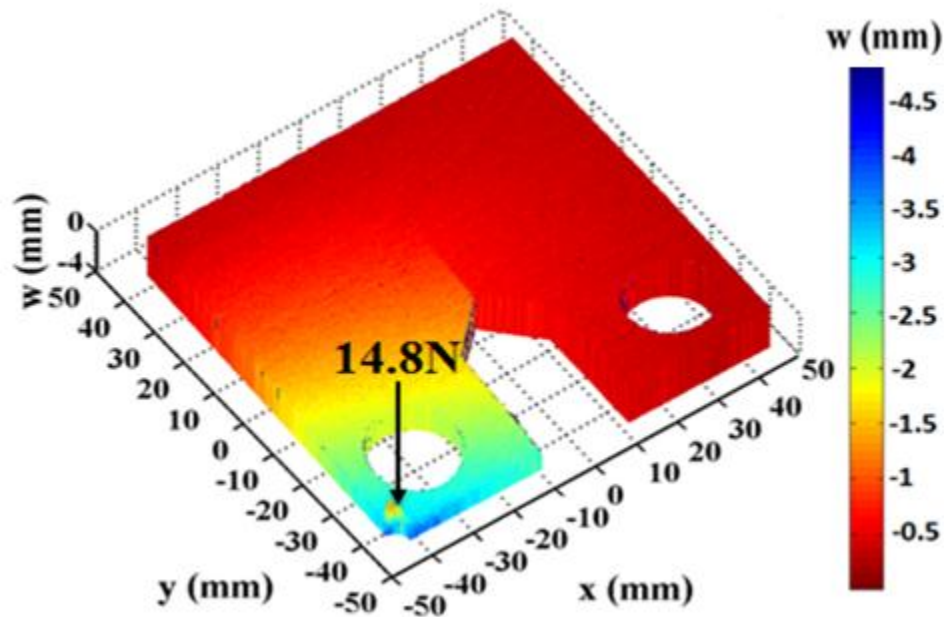


Figura 6.7 Desplazamiento relativo W inducido en la muestra durante la carga mecánica aplicada.

Las figuras 6.8 y 6.9 muestran perfiles de la gráfica mostrada en la figura 6.7

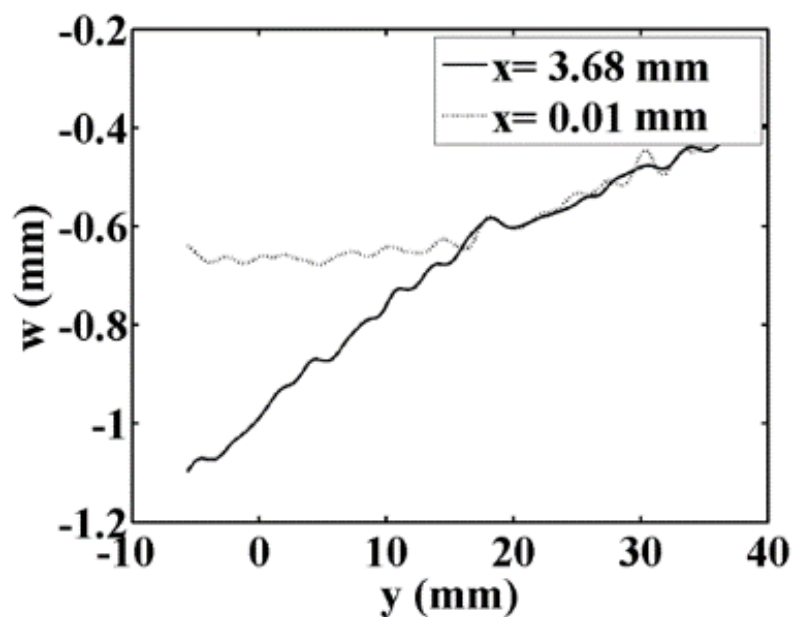


Figura 6.8 Gráfica unidimensional del perfil de la muestra a lo largo del eje y .

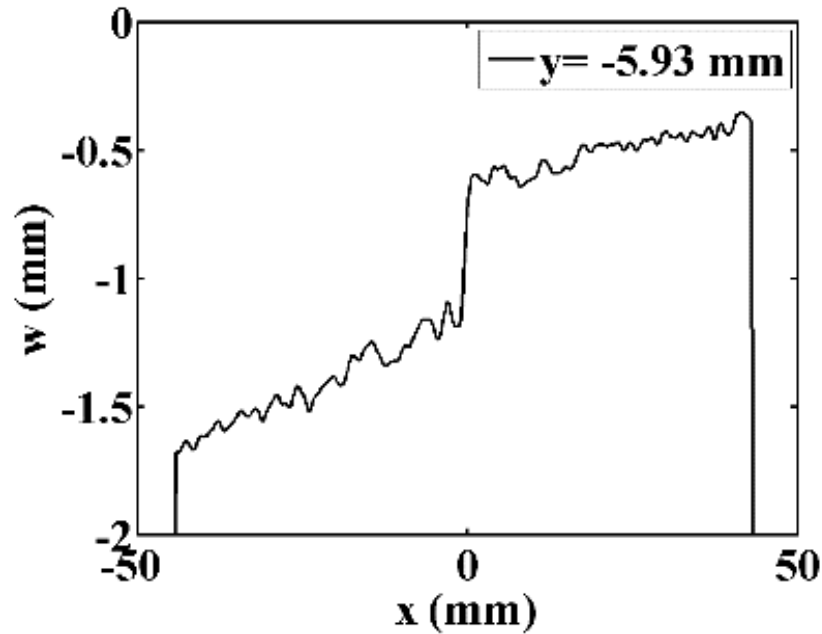


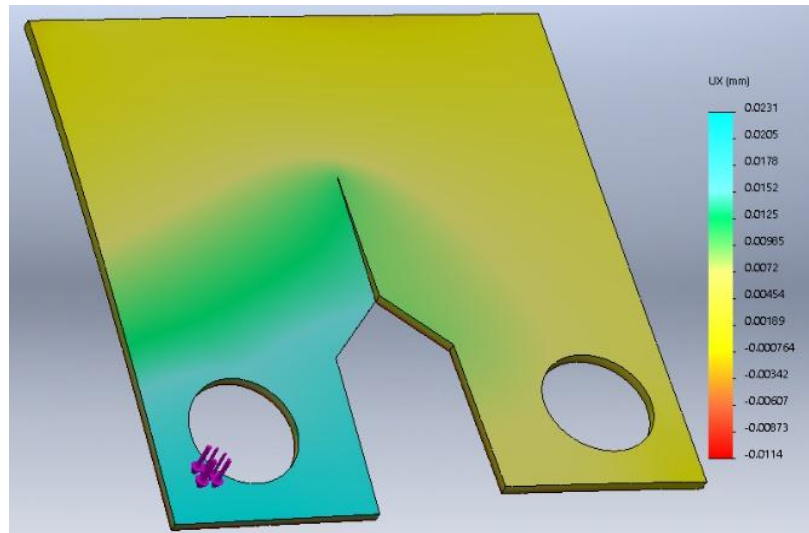
Figura 6.9 Gráfica del perfil de la muestra a lo largo del eje x.

6.5 Simulación de análisis de esfuerzos mediante SolidWorks

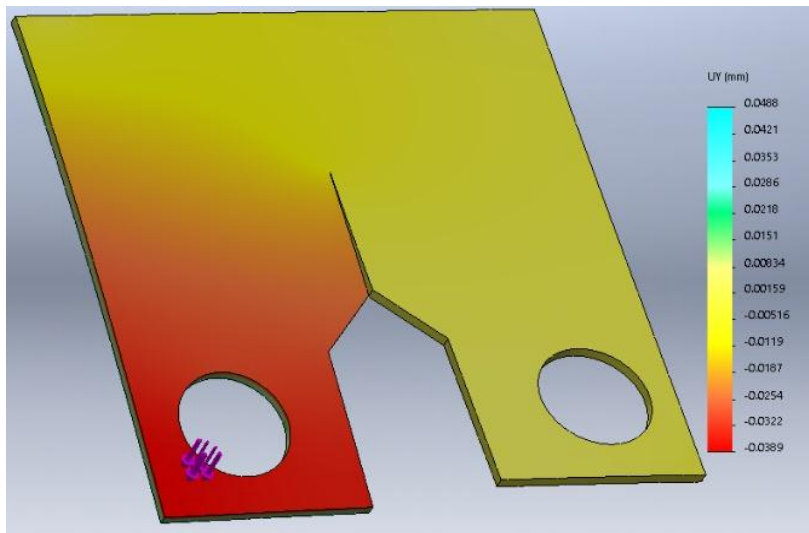
Con el propósito de realizar una comparación de la prueba experimental, se llevó a cabo una simulación efectuada por *SolidWorks*, el software permite diseñar el objeto de interés y calcular desplazamientos en plano y fuera de plano, deformaciones y tensiones de los componentes con cargas internas y externas.

Para este caso de estudio se fijó la placa metálica en tres de sus esquinas simulando las condiciones reales a las que se encuentra el objeto, en la última esquina se aplicó una fuerza con una magnitud de 14.8N igualando así la fuerza real aplicada en el ensayo. La figura 6.10 muestra los resultados de las deformaciones de la placa aplicando las condiciones experimentales presentadas en la figura 6.7. En este caso, se utilizan elementos de placa 3D que suponen un material isotrópico. Las propiedades del material utilizadas son el módulo de *Young*, $Y = 6.9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, y la razón de *Poisson*, $\gamma = 0.33$. La simulación, figura 6.9, muestra los campos de desplazamiento de la placa. Dado que la fuerza mecánica está aplicada en la dirección z, $W(x,y)$ excede los desplazamientos en plano, $U(x,y)$ y $V(x,y)$. Los desplazamientos máximos $U(x,y)$, $V(x,y)$ y $W(x,y)$ son .0231 mm, .0488 mm y 3.043 mm respectivamente.

a)



b)



c)

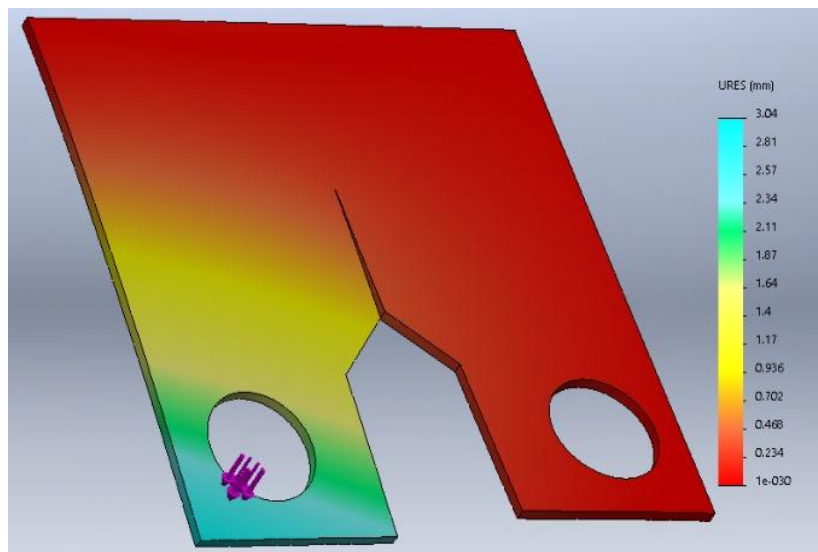


Figura 6.10 Resultados de la simulación de FEM en placa usando condiciones experimentales. La placa presenta desplazamientos en el plano y fuera del plano: a) $U(x,y)$, b) $V(x,y)$, c) $W(x,y)$.

El propósito de la simulación consiste en llevar a cabo una comparación entre los resultados obtenidos con el arreglo óptico de proyección de franjas y los resultados de la simulación por *SolidWorks*, los resultados experimentales y simulados son similares. En la tabla 6.1 se muestra el error relativo del sistema de proyección de franjas implementado, este error se obtuvo haciendo una comparación entre las dimensiones reales de un objeto conocido y las dimensiones obtenidas mediante el sistema de proyección de franjas. El error relativo correspondiente es de .32%. La tabla 6.2 muestra el error relativo evaluado en el máximo valor del campo de desplazamiento obtenido por proyección de franjas y por simulación en *SolidWorks*, siendo de 4.40%. El sistema de proyección de franjas solo es sensible a desplazamientos fuera del plano, por lo que la información correspondiente a desplazamientos en el plano no se obtiene experimentalmente.

Objeto conocido	Altura (mm)	Error relativo
Dimensiones reales	49.78	0.32 %
Proyección de franjas	49.62	

Tabla 6.1 Tabla de error relativo de la técnica de proyección de franjas.

Placa metálica cuadrada	Desplazamiento máximo fuera de plano (mm)	Error relativo
Proyección de franjas	3.18	4.40%
Análisis de esfuerzos mediante SolidWorks	3.04	

Tabla 6.2 Tabla de error relativo del sistema de proyección de franjas y la simulación en *SolidWorks*.

Posteriormente se hizo la prueba por líquidos penetrantes fluorescentes para la pieza metálica bajo estudio, los pasos efectuados para llevar a cabo el ensayo son los mismos ya mencionados en el capítulo 3, para este caso se empleó el penetrante por aerosol. En la siguiente imagen se puede apreciar que la parte más brillante en la pieza corresponde a la fisura detectada.

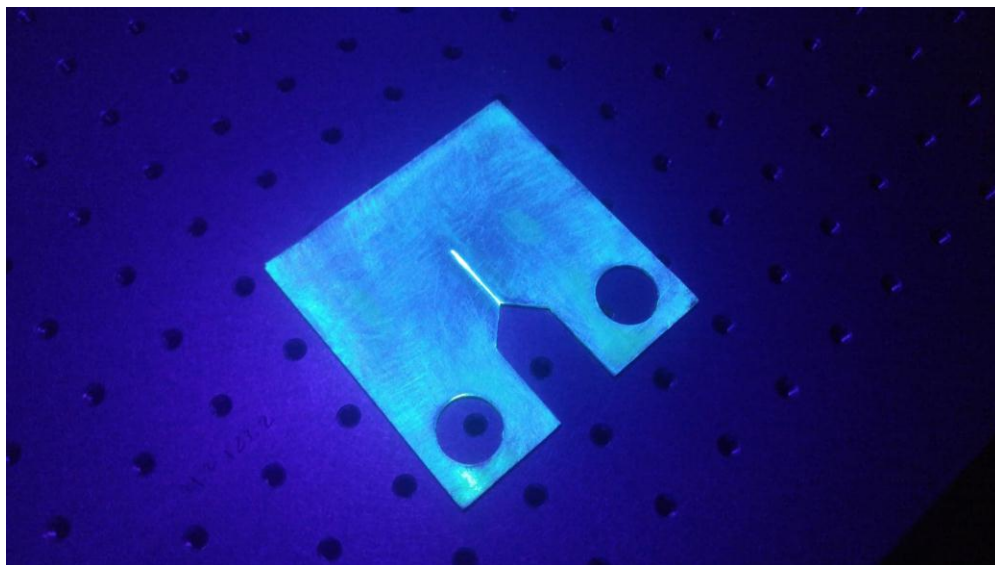


Figura 6.11 Aplicación de líquidos penetrantes fluorescentes sobre la muestra metálica.

6.6 Detección en cambio de topografía por aplicación de calor

En esta sección se muestran los resultados obtenidos referentes a los cambios de topografía debido a cambios de temperatura. En esta parte del trabajo se utilizó una pistola de calor para aumentar la temperatura de la superficie del objeto de estudio, para monitorear los cambios reales de temperatura de la pieza metálica se utilizó un termómetro, este componente tiene una termocupla la cual se adhirió a la placa. La figura 6.12 muestra el arreglo utilizado con los componentes ya mencionados.

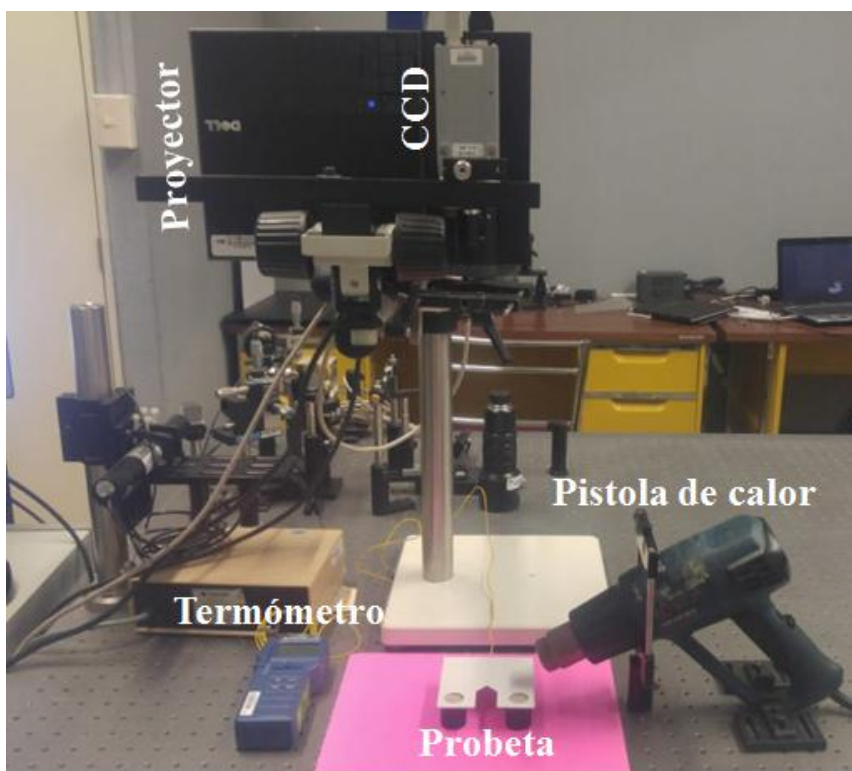


Figura 6.12 Sistema de proyección de franjas para detectar cambios en la topografía del objeto por aplicación de calor.

La placa se colocó sobre cuatro bases circulares y fue calentada por el aire de una pistola de calor, figura 6.13.

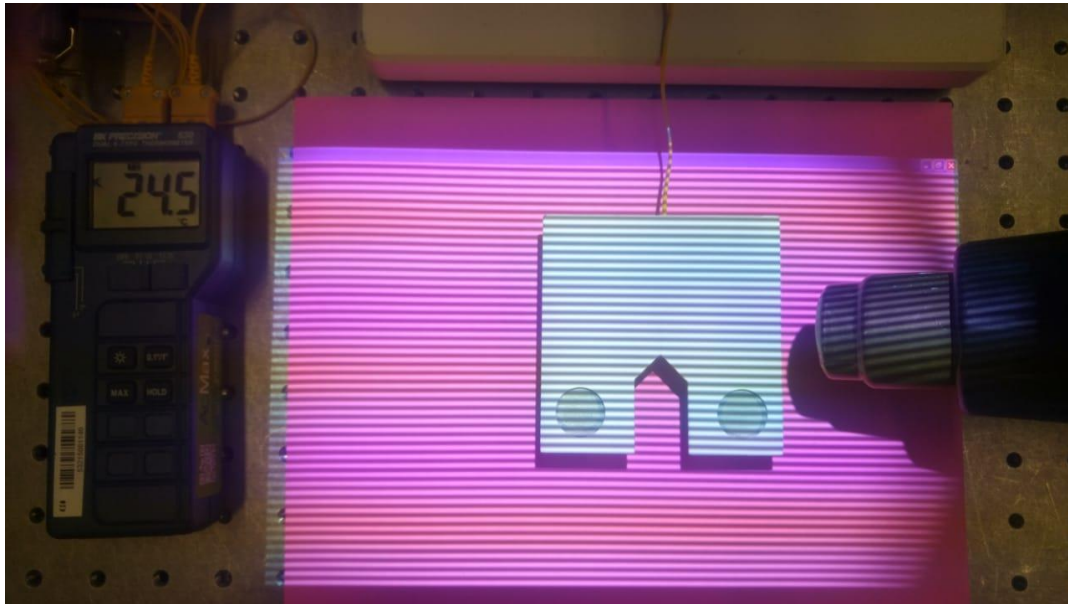


Figura 6.13 Componentes utilizados para detectar temperatura y aplicar calor.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para esta prueba, en donde se puede visualizar el cambio de topografía dado el cambio térmico en la placa. Los resultados muestran una comparación del objeto en su estado inicial, es decir, a temperatura ambiente con respecto a un incremento en la temperatura mediante aplicación de calor.

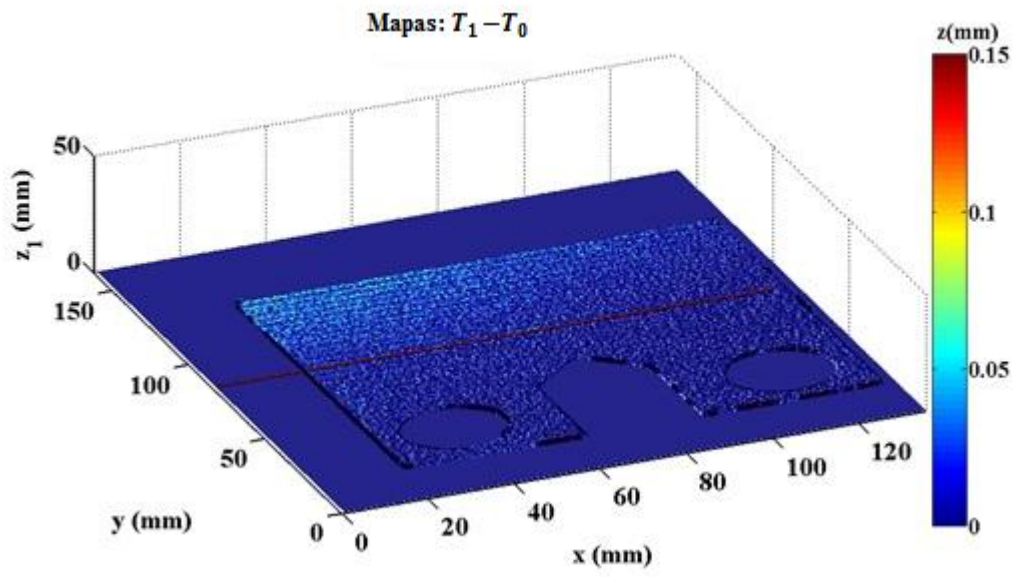


Figura 6.14 Topografía del objeto en donde se comparan el estado T_1 con respecto a T_0 .

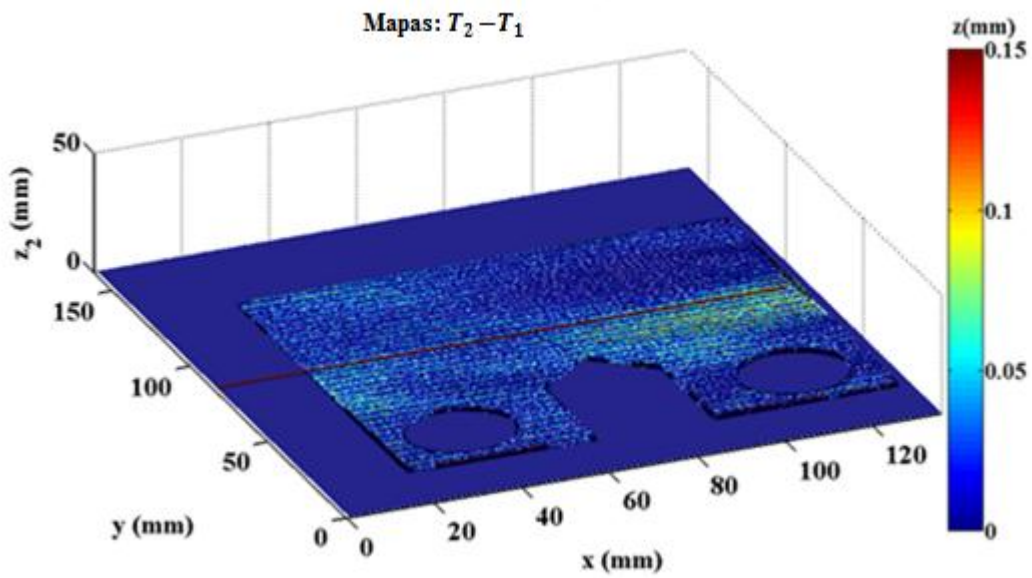


Figura 6.15 Topografía del objeto en donde se comparan el estado T_2 con respecto a T_1 .

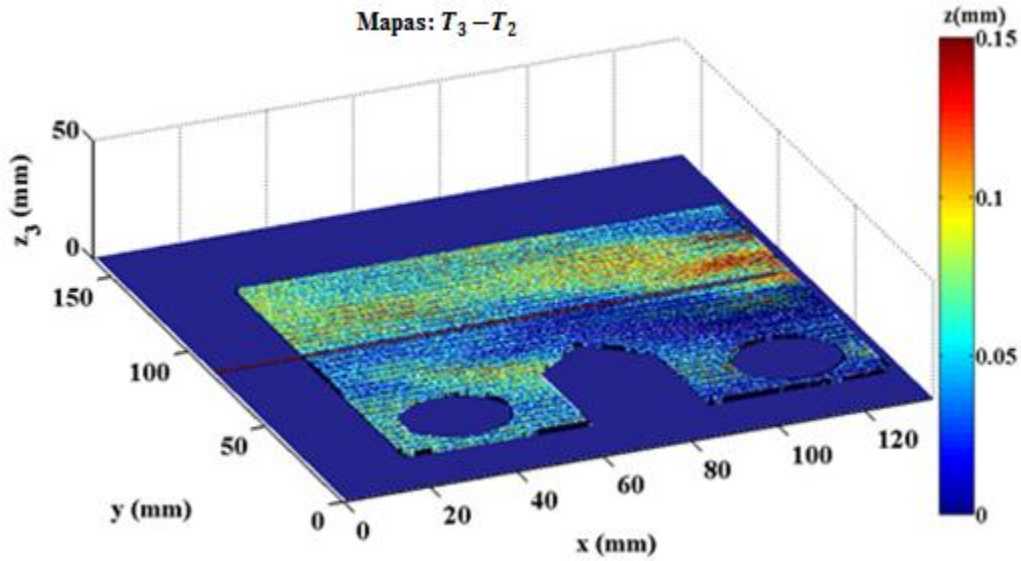


Figura 6.16 Topografía del objeto en donde se comparan el estado T_3 con respecto a T_2 .

En la figura 6.17 se puede apreciar un cambio en el perfil en milímetros correspondiente a cada una de las imágenes anteriores, el perfil con mayor apreciación corresponde a Z_3 , ya que en esta comparación se nota un mayor cambio en la topografía de la placa, la temperatura aplicada es de aproximadamente 192 °C. El perfil Z_2 hace referencia a la diferencia que hay entre la placa a una temperatura de 143 °C con respecto a la misma placa con una temperatura de 85 °C. El perfil en Z_1 se pierde, esto puede deberse a la diferencia que existe entre la topografía del estado normal de la placa, es decir, a temperatura ambiente, con respecto al estado de la placa a una temperatura de 85 °C.

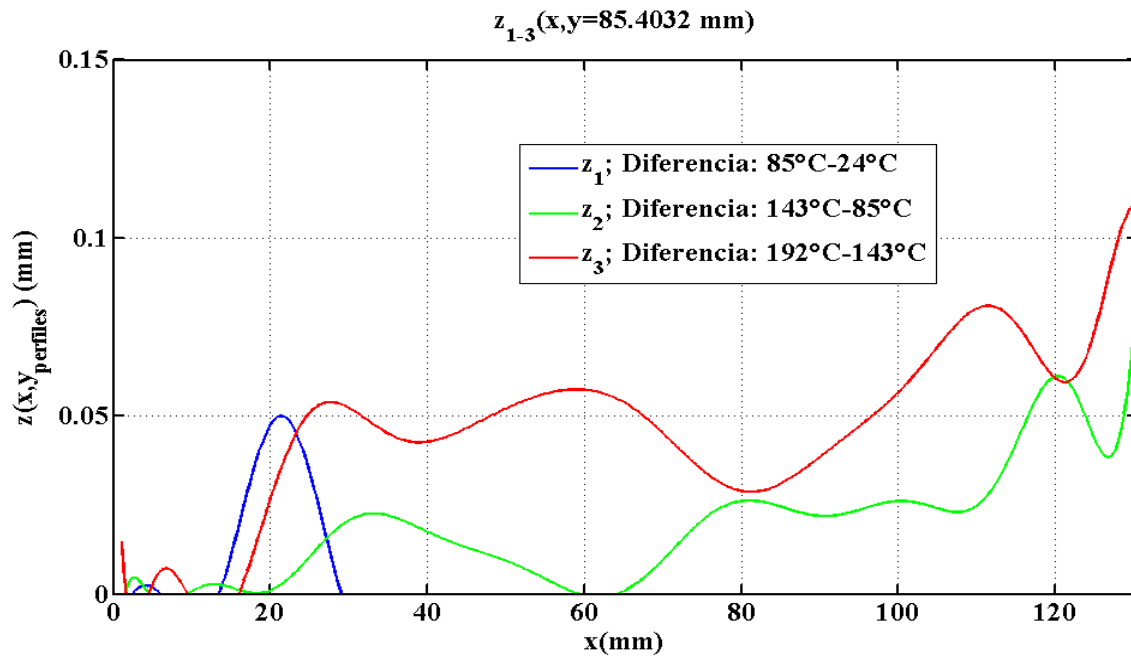


Figura 6.17 Perfil de cambios en topografía para cada una de las diferencias de estados.

Otro objeto de estudio corresponde a una componente aeroespacial, figura 6.18. Se evalúa el cambio topográfico dada una perturbación térmica.



Figura 6.18 Pieza aeroespacial.

Se realizó el mismo procedimiento antes mencionado para obtener la altura del objeto aeroespacial, primero se proyectó un patrón de franjas sobre una superficie de referencia y después sobre el objeto de estudio, esta vez se colocaron dos termocuplas, una en cada lado de la pieza como se puede observar en la figura 6.19. La figura 6.20 muestra la topografía a temperatura ambiente de 24⁰ C. Esta pieza en particular presenta errores de fundición, soldadura y desbastes.

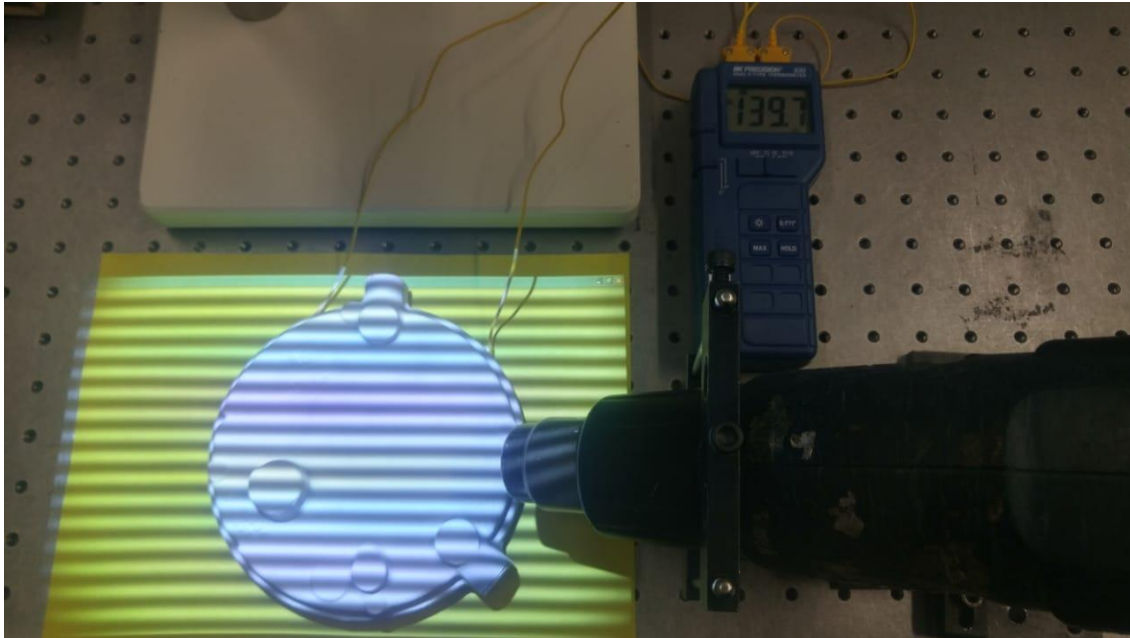


Figura 6.19 Componentes empleados para detectar y aplicar calor a un objeto metálico aeroespacial.

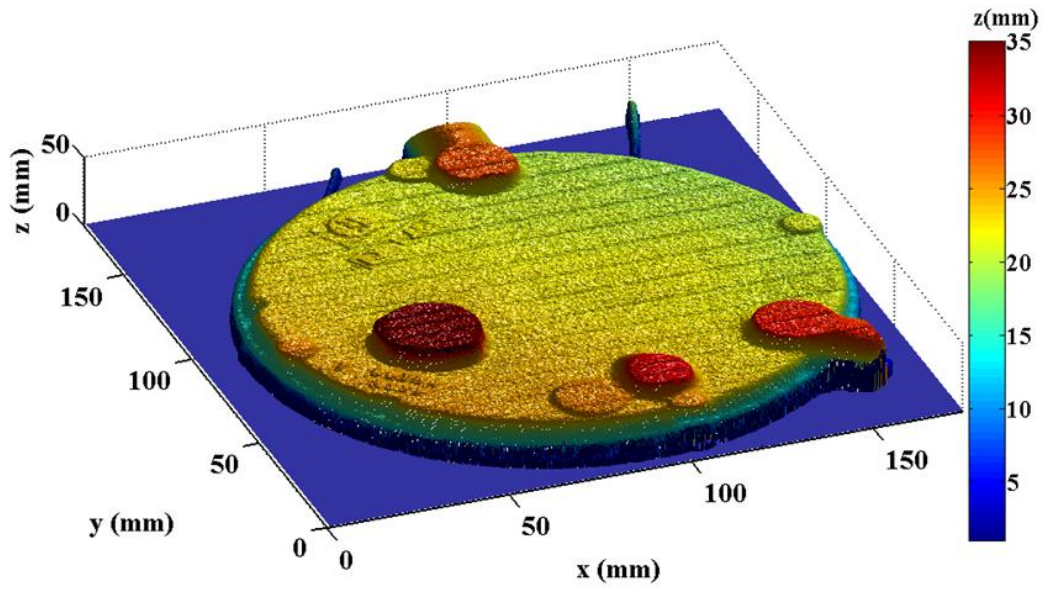


Figura 6.20 Topografía del objeto metálico aeroespacial.

La figura 6.21 muestra cambios en las topografías debido a expansiones térmicas y que corresponden a 60°C y 100°C respectivamente.

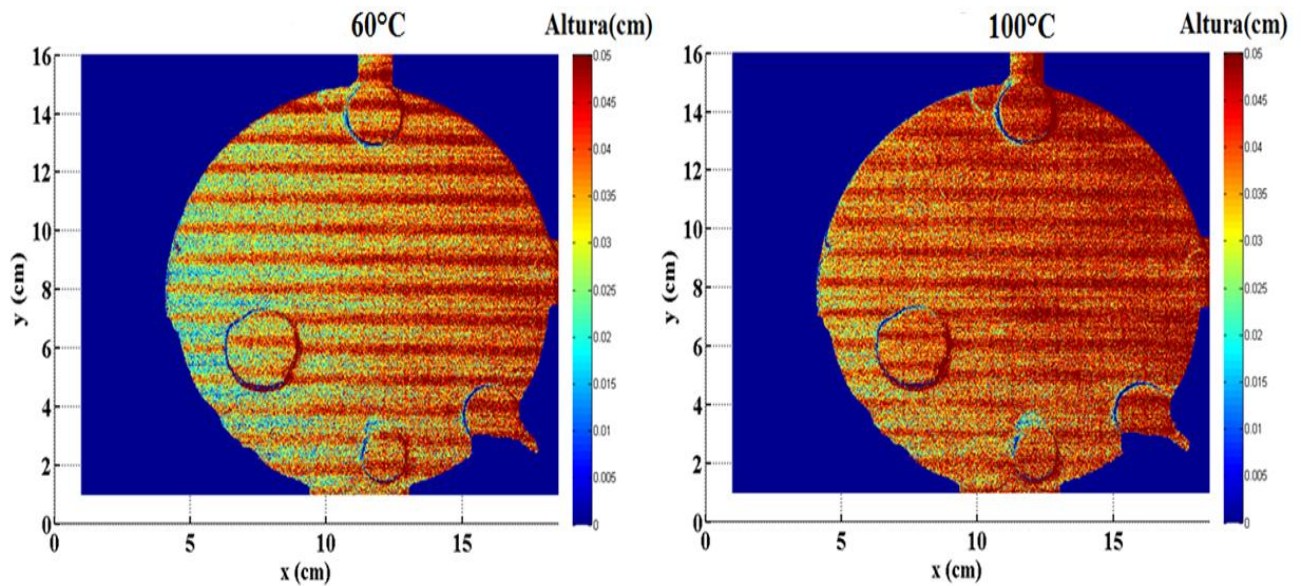


Figura 6.21 Topografía de cambios por temperatura.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

7.1 Conclusiones

En el presente trabajo se implementó la técnica de proyección de franjas para la detección de una fractura en una probeta de aluminio cuyas dimensiones son de: 91.50 mm de altura, 91.80 mm de largo y 1.95 mm de ancho. Se presentan resultados en el caso de que la probeta fue sujeta a un esfuerzo mecánico dentro de la región lineal. La segunda prueba corresponde a una perturbación térmica en dicha probeta. Para el caso de la aplicación de un esfuerzo mecánico se hizo una simulación utilizando el método de elemento finito. Los resultados obtenidos de la simulación y de la medición óptica presentan una buena aproximación. La diferencia máxima entre ellos es de 0.14 *mm*, esta diferencia puede observarse en la tabla 6.2.

La placa metálica fue analizada mediante la prueba no destructiva de líquidos penetrantes fluorescentes, a diferencia de la prueba por líquidos penetrantes, proyección de franjas permite obtener registros de las áreas inspeccionadas para ser evaluadas y analizadas cuantitativamente. Por lo tanto, se puede concluir que el uso de la técnica de proyección de franjas sirve como herramienta para tener una evaluación más completa al momento de inspeccionar y evaluar materiales o piezas industriales. Una de las desventajas de realizar la simulación de esfuerzos por elemento finito mediante SolidWorks es que, se desarrolla en un entorno virtual y a menudo el modelo estructural de un material no es exactamente fiel a la realidad, es decir, las condiciones de contorno y las propiedades deben de estar cuidadosamente bien definidas ya que en el diseño y procesos de fabricación las mediciones exactas son necesarias para cumplir con las normas de seguridad y calidad.

Otro objeto de prueba corresponde a una pieza aeroespacial con una altura máxima de 3.17 *cm* y con un diámetro de 15.5 *cm*, en la figura 6.21 la zona observada corresponde a 14 *cm*

aproximadamente, este objeto fue sujeto solo a pruebas térmicas, obteniéndose información del cambio topográfico.

7.2 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone:

- Desarrollar un algoritmo de desenvolvimiento de fase más robusto para obtener topografía de objetos geoméricamente más complejos.
- Obtener mejores resultados de topografía por medio de equipo actualizado como una cámara “*area scan*” y un proyector 3DLP con alta resolución.
- Implementar el método de cálculo de fase por transformada de Fourier para estudiar eventos dinámicos.
- Comparar los resultados de la técnica de proyección de franjas al medir los cambios de la topografía dada una perturbación térmica con alguna otra técnica, así como hacer una simulación en CAD.

ANEXOS

Participación en congresos

- Congreso vértice, del 25 al 27 de abril 2018, UABC, Ensenada, Baja California.
- Congreso ISOT (*International Symposium On Optomechatronic Technology*) del 5 al 8 de noviembre 2018, Cancún, Quintana Roo.

Participación en cursos

- II Coloquio de ingeniería industrial, “Metrología óptica” del 28 de mayo al 01 de junio 2018, Ensenada, Baja California.
- “Diseño óptico-mecánico aplicado a sistemas de iluminación, del 25 de septiembre al 03 de octubre 2018, CIO, León, Guanajuato.