

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE
EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA

EVALUACION DE FORMAS DE SUPERFICIES:
COMPARACION DE DISTINTAS TECNICAS OPTICAS.

T E S I S
MAESTRIA EN CIENCIAS

Amalia Martinez Garcia

RESUMEN de la tesis de Amalia Martínez García, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS con opción en OPTICA. Ensenada, Baja California, México. Mayo de 1987.

EVALUACION DE FORMAS DE SUPERFICIES : COMPARACION DE DISTINTAS TECNICAS OPTICAS.

Resumen aprobado

Diana Tentori S.
M. en C. Diana Tentori Santacruz.
Director de Tesis.

Se hace un estudio comparativo de diferentes sistemas ópticos y de su grado de complejidad para la obtención de información sobre la forma de una superficie no pulida. Se analizan sus principios de funcionamiento, su geometría, se compara la precisión de las técnicas y su sensibilidad, para de acuerdo a ello poder sugerir el tipo de técnica a utilizar en los siguientes procesos: medición de superficies patrón, control de calidad de superficies terminadas y control de calidad de superficies durante el proceso de fabricación.

Se presentan resultados experimentales de las técnicas: Interferometría de holograma de desplazamientos rígidos, Franjas de Young y Técnica de Moiré.

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y
DE EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA

DIVISION DE FISICA APLICADA

DEPARTAMENTO DE OPTICA

EVALUACION DE FORMAS DE SUPERFICIES :
COMPARACION DE DISTINTAS TECNICAS OPTICAS

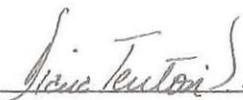
TESIS

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios
para obtener el grado de Maestro en Ciencias presenta:

AMALIA MARTINEZ GARCIA.

Ensenada, B.C., Mayo de 1987.

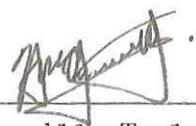
TESIS APROBADA PARA SU DEFENSA POR:



M.C. Diana Tentori Santacruz, Director del Comité



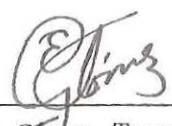
M.C. Martín Luis Celaya Barragán, Miembro del Comité



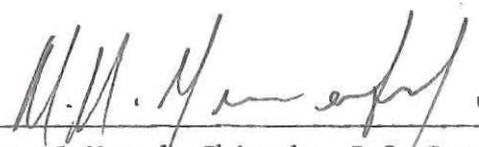
Dr. Hector Escamilla Taylor, Miembro del Comité



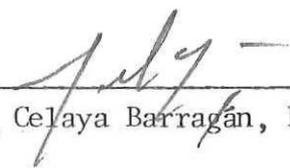
M.C. Ricardo Villagómez Tamez, Miembro del Comité



Dr. Enrique Gómez Treviño, Miembro del Comité



M.C. Manuel Yamada Shinoda, Jefe Interino del Departamento de Optica



M.C. Martín Luis Celaya Barragán, Director de la División de Física Aplicada



M.C. Cuauhtémoc Nava Button, Director Académico del CICESE

Tesis presentada en Mayo 29, 1987.

DEDICATORIA

Con cariño:

a mis padres Julia y Alfonso,
que con el mejor de sus deseos
me inculcaron las bases que
han hecho posible alcanzar las metas
que me he propuesto.

a mis hermanos Beni y Martin
por ser mis primeros amigos.

a quien quiso compartir conmigo
su ideal.

a mis amigos por su indudable apoyo.

a mis maestros
por sus conocimientos transmitidos.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis M. en C. Diana Tentori por su constante asesoría durante el desarrollo del presente trabajo.

A los miembros de mi comité de tesis M. en C. Martín Celaya, Dr. Héctor Escamilla, M. en C. Ricardo Villagomez y Dr. Enrique Gomez por la revisión y crítica de la tesis.

A mis maestros y compañeros de estudio, así como a todos aquellos que de una u otra forma contribuyeron para la finalización de mi trabajo.

A Javier Camacho y Marco Antonio García por la excelente realización de los dibujos.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C. y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
INTRODUCCION	1
I TECNICAS PARA ANALIZAR FORMAS DE SUPERFICIES.	4
I.1 IntroduccIón.	4
I.2 Interferometria de holograma de desplazamientos rígidos.	4
I.3 Franjas de Young.	9
I.4 Medidas de contorno utilizando franjas proyectadas producidas por dos fuentes puntuales.	15
I.5 Técnicas de Moiré.	23
I.6 Obtención de mapeos de contorno por Interferometria de patrones de granulado (ESPI).	36
II ANALISIS TEORICO-EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE ALGUNAS TECNICAS PARA EVALUAR LA FORMA DE LA SUPERFICIE DE UN OBJETO NO PULIDO.	50
II.1 IntroduccIón.	50
II.2 Interferometria de holograma de desplazamientos rígidos.	50
II.3 Franjas de Young proyectadas.	61
II.4 Método de franjas de Moiré.	66
III DISCUSION SOBRE LA APLICACION, INTERVALO DE MEDIDA Y PRECISION DE LAS TECNICAS.	78
III.1 IntroduccIón.	78
III.2 Interferometria de holograma de desplazamientos rígidos.	78
III.3 Franjas de Young.	81
III.4 Medidas de contorno utilizando franjas proyectadas producidas por dos fuentes puntuales.	83
III.5 Técnicas de Moiré.	86
III.6 Obtención de mapeos de contorno por Interferometria de patrones de granulado (ESPI).	95

CONTINUACION DEL CONTENIDO

Página

IV CONCLUSIONES.

104

LITERATURA CITADA

107

APENDICE I

109

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1 Diagrama vectorial del sistema holográfico para Interferometría.	6
2 Diagrama para el análisis teórico de las franjas de Young.	10
3 Lugar geométrico de Interferencia para un holograma grabado con dos fuentes.	18
4 Mapeo holográfico de contornos con dos fuentes de iluminación.	18
5 Métodos básicos para holografía. a) Objeto iluminado por planos igualmente espaciados. b) Objeto iluminado por una onda plana paralela al eje.	20
6 Sistema de mapeo de contornos Moiré cuando la fuente y el observador están en el infinito.	25
7 Geometría asociada al sistema de mapeo de contornos de Moiré cuando la fuente y el observador están a distancias finitas de la rejilla.	29
8 La sombra de una rejilla se proyecta hacia un objeto difuso y se graba por una cámara colocada perpendicularmente a ella.	35
9 (a) Caminos de los rayos de referencia y del objeto en un sistema de mapeo de contornos por Interferometría electrónica de patrones de granulado (ESPI). A es el divisor de rayos, B es la superficie del objeto, C es el plano Imagen. (b) Representación de los pulsos descritos por la E_c (49).	37

10 Sistema de mapeo de contornos usando Interferometría de patrones de moteado a dos longitudes de onda.	40
11 Arreglos ópticos para el mapeo de contornos de componentes de forma regular por medio de frentes de onda generados convencionalmente: método I.	42
12 Arreglos ópticos para HIC: a) Grabado de los hologramas, b) Reconstrucción y Contorneo.	43
13 Geometría del movimiento de granulado para estudiar el contorno.	46
14 Esquema de filtraje del método de campo total.	46
15 Esquema del conjunto experimental.	47
16 Fotografía correspondiente al interferómetro de Fraunhofer utilizado en el análisis de formas de superficies mediante desplazamientos rígidos.	51
17 Interferómetro holográfico de Fraunhofer utilizado en el análisis de formas de superficies mediante desplazamientos rígidos.	52
18 a) Imágenes correspondientes a un holograma de doble exposición en un movimiento de traslación, donde $H_0 = 70$ cm. La relación de amplificación es $1:1/2$. Para una superficie plana en $-x_1 = -2$ cm, $x_0 = 0$ cm y $x_2 = 4$ cm.	54
19 b) Imágenes correspondientes a un holograma de doble exposición en un movimiento de traslación, donde $H_0 = 70$ cm. La relación de amplificación es $1:1/2$. Para una superficie convexa en $-x_2 = -4$ cm y $x_0 = 0$ cm.	55

- 20 Diagrama de las posiciones de observación y cambios ΔH en la superficie analizada. 56
- 21 a) Imágenes correspondientes a un holograma de doble exposición en un movimiento de traslación, donde $H_0 = 1.09$ m. La relación de amplificación es 1:1/2. Para una superficie plana en $-x_2 = -4$ cm y $x_1 = 2$ cm. 57
- 22 b) Imágenes correspondientes a un holograma de doble exposición en un movimiento de traslación, donde $H_0 = 1.09$ m. La relación de amplificación es 1:1/2. Para una superficie convexa en $-x_1 = 2$ cm, $x_0 = 0$ cm y $x_3 = 4$ cm. 58
- 23 Interferómetro holográfico de Fraunhofer utilizado en el análisis de formas de superficies mediante franjas de Young. 62
- 24 Fotografía del Interferómetro holográfico de Fraunhofer utilizado en el análisis de formas de superficies mediante franjas de Young. 63
- 25 Fotografía de las franjas de Young en una superficie plana. (radio que delimita la superficie: 4.93 cm, utilizando un vernier). 65
- 26 Sistema óptico para mapeo de contornos Moiré. 67
- 27 Fotografía del sistema óptico para mapeo de contornos Moiré. 68
- 28 Fotografías correspondientes a mapeos de Contornos Moiré para una superficie convexa con variación angular en la dirección de observación conservando h constante ($h_1 = h_2 = 42.1$ cm, diámetro de delimitación = 3.59 cm).
 a) $d = 12.2$ cm, $\theta = 10^\circ$, b) $d = 23.3$ cm, $\theta = 25^\circ$,
 c) $d = 30.3$ cm, $\theta = 35^\circ$, d) $d = 35.1$ cm, $\theta = 40^\circ$,
 e) $d = 42$ cm, $\theta = 45^\circ$. 70
- 29 Fotografías correspondientes a mapeos

- de contornos Moiré para una superficie cóncava con una variación angular en la dirección de observación conservando h constante ($h_1 = h_2 = 42.2$ cm, diámetro de delimitación 4.99 cm).
a) $d = 12.2$ cm, $\theta = 10^\circ$, b) $d = 23.3$ cm, $\theta = 25^\circ$,
c) $d = 35.1$ cm, $\theta = 40^\circ$, d) $d = 52$ cm, $\theta = 50^\circ$.
- 71
- 30 Fotografías correspondientes a mapeos de contornos Moiré para una superficie plana con variación angular en la dirección de observación conservando h constante ($h_1 = h_2 = 42.1$ cm).
a) $d = 12.2$ cm, $\theta = 10^\circ$, b) $d = 23.3$ cm, $\theta = 25^\circ$,
c) $d = 35.1$ cm, $\theta = 40^\circ$, d) $d = 52$ cm, $\theta = 50^\circ$.
- 72
- 31 Proyección de la rejilla.
- 96

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>		<u>Página</u>
I	Diferencia de altura para dos puntos en una superficie convexa cuando cambia la posición de observación.	73
II	Parámetros de fabricación de rejillas de de ultra alta precisión.	94
III	Características principales de las técnicas.	103

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica

1	Error asociado al término $2 \tan \beta \delta x$. (Franjas de Young)	12
2	Error asociado al término $2 \tan \beta \delta x$ en la región de $\delta x \leq .10 \text{ mm}$ (Franjas de Young).	13
3	Error asociado al término $\Delta x \sec^2 \beta \delta \beta$ ($\delta \beta = 1.75 \times 10^{-2} \text{ rad} = 1^\circ$) (Franjas de Young).	14
4	Error porcentual al medir el número de franjas. (Moiré).	92
5	Error porcentual para diferentes precisiones de medida en el periodo. (Moiré)	92
6	Error porcentual al medir el periodo de la rejilla. (Moiré)	93
7	Error porcentual en el periodo	

CONTINUACION DE LA LISTA DE GRAFICAS

Página

Introducido por la alineación de la rejilla. (Moiré)	93
8 Error porcentual en la diferencia de altura por el método HIC.	99

EVALUACION DE FORMAS DE SUPERFICIES:
COMPARACION DE DISTINTAS TECNICAS OPTICAS

INTRODUCCION

El análisis topográfico de un objeto no sólo es uno de los temas de estudio más importantes en la metrología óptica, sino que actualmente tiene además una gran importancia en Inspección Industrial de partes maquinadas, robótica, visión por computadora, microscopía y diagnósticos médicos. Para evaluar la forma geométrica de la superficie de un objeto opaco se han ideado diferentes técnicas que son: Interferometría de holograma de desplazamientos rígidos (Liu H. K.: 1977, Hecht N.L. 1973), franjas de Young (Takasaki: 1979), franjas proyectadas producidas por dos fuentes (MacGovern: 1972, Thalmann: 1985, Abramson: 1976, Hildebrand: 1967), técnicas de Moiré (Kafri: 1981, 1983, Meadows: 1970, Livnat: 1985) y por Interferometría de patrones de granulado (ESPI) (Denby 1976, Fercher: 1986, Jaisingh: 1981, Khetan: 1976, Goodman: 1984, 1963, Goslowsky: 1982).

Cada una de estas técnicas presenta ventajas y desventajas en su funcionamiento. La técnica de franjas proyectadas presenta sensibilidad y costos medios y los

arreglos consisten en sistemas holográficos por lo que es necesario el uso de fuentes de luz coherentes. Las técnicas de Moiré consisten en arreglos sencillos que requieren de la proyección de una rejilla, su sensibilidad es media y su costo es bajo, éstas no requieren de luz coherente. Se presentan limitaciones en la observación de algunas pendientes debidas a las posiciones de iluminación y observación. En cuanto a las técnicas de Interferometría de patrones de granulado se tiene que ESPI (Electronic Speckle Patern Interferometry) y HIC (Holographic Illumination Contouring) tienen sensibilidad alta. Su costo es alto y se requiere de arreglos holográficos por lo que la coherencia es necesaria. Se requiere de dos longitudes de onda. No se requiere de proceso fotográfico ya que se utiliza un equipo de video más un procesamiento electrónico de la Información.

Se tiene como objetivos analizar algunos métodos propuestos en la literatura para evaluar la forma geométrica de una superficie opaca, realizando este análisis tanto teórica como experimentalmente. Además se compara las distintas características de las técnicas ya que en la bibliografía revisada no se encuentra dicha comparación.

Se pretende indicar, tomando como base su precisión, la utilidad en los siguientes procesos: medición de una superficie patrón, control de calidad de superficies terminadas y control de calidad de superficies durante el

proceso de fabricación.

En el capítulo I se presenta el análisis teórico de las técnicas anteriormente mencionadas.

El capítulo II corresponde a la parte experimental y resultados. También se presenta el análisis del error de las técnicas correspondientes.

En el capítulo III se discute la aplicación de las técnicas así como su precisión tanto de las técnicas desarrolladas teóricamente como experimentalmente.

El capítulo IV comprende las conclusiones.

Se agrega un apéndice donde se analiza la modificación de la intensidad debido a los patrones de granulado producidos por una superficie rugosa.

I TECNICAS PARA ANALIZAR FORMAS DE SUPERFICIES

I.1 INTRODUCCION.

Se analiza teóricamente las técnicas obteniéndose las relaciones correspondientes a la forma de la superficie. Se describen los tipos de arreglos y su complejidad.

I.2 INTERFEROMETRIA DE HOLOGRAMA DE DESPLAZAMIENTOS RIGIDOS

Al realizar experimentos de Interferometria de holograma de desplazamientos rigidos se observa que la posición de las franjas varia dependiendo de la distancia entre el objeto y el observador. A continuación se presenta el análisis desarrollado para determinar si la aplicación de esta técnica puede proporcionar una información satisfactoria sobre el perfil de la superficie.

La forma geométrica de las franjas para un objeto plano que sufre un desplazamiento rigido fue calculado por H.K.Liu et al (1977) y N.L.Hecht et al (1973).

Dentro de los trabajos mencionados se considera la siguiente geometria:

En la Fig.1. se supone que la superficie frontal del

objeto coincide con el plano x-y del sistema de coordenadas cartesianas, \vec{S} : representa el vector de posición desde la fuente al origen, el cual se localiza sobre la placa prueba. \vec{H} : vector de posición desde el origen al punto de observación sobre el holograma. \vec{S} y \vec{H} son coplanares con el plano x-z. θ_S y θ_H ángulos que hacen \vec{S} y \vec{H} con el eje x, respectivamente. P' punto desplazado desde su posición original P con un vector de desplazamiento \vec{D} . \vec{t} y \vec{R} son vectores de posición desde el origen a los puntos P y P', respectivamente. \vec{S}_1 y \vec{S}_2 son vectores de posición desde la fuente láser a los puntos P y P'. \vec{H}_1 y \vec{H}_2 son los vectores de posición desde P y P' al punto de observación en el holograma.

La diferencia de fase en P se relaciona al cambio en la longitud del camino óptico L, resultante de la traslación de P a P'.

$$L = (S_2 + H_2) - (S_1 + H_1) = (S_2 - S_1) + (H_2 - H_1) \approx L_1 + L_2 \quad (1)$$

donde L_1 y L_2 son el término de primer orden y el término de segundo orden respectivamente de desarrollos binomiales. La Ec.(1) se obtuvo considerando que $t \ll S$ y $D \ll S$.

En términos de la aproximación binomial mencionada:

$$L_1(x, y) = (1/S + 1/H) [D_x X + D_y Y + 1/2(D_x^2 + D_y^2 + D_z^2)]$$

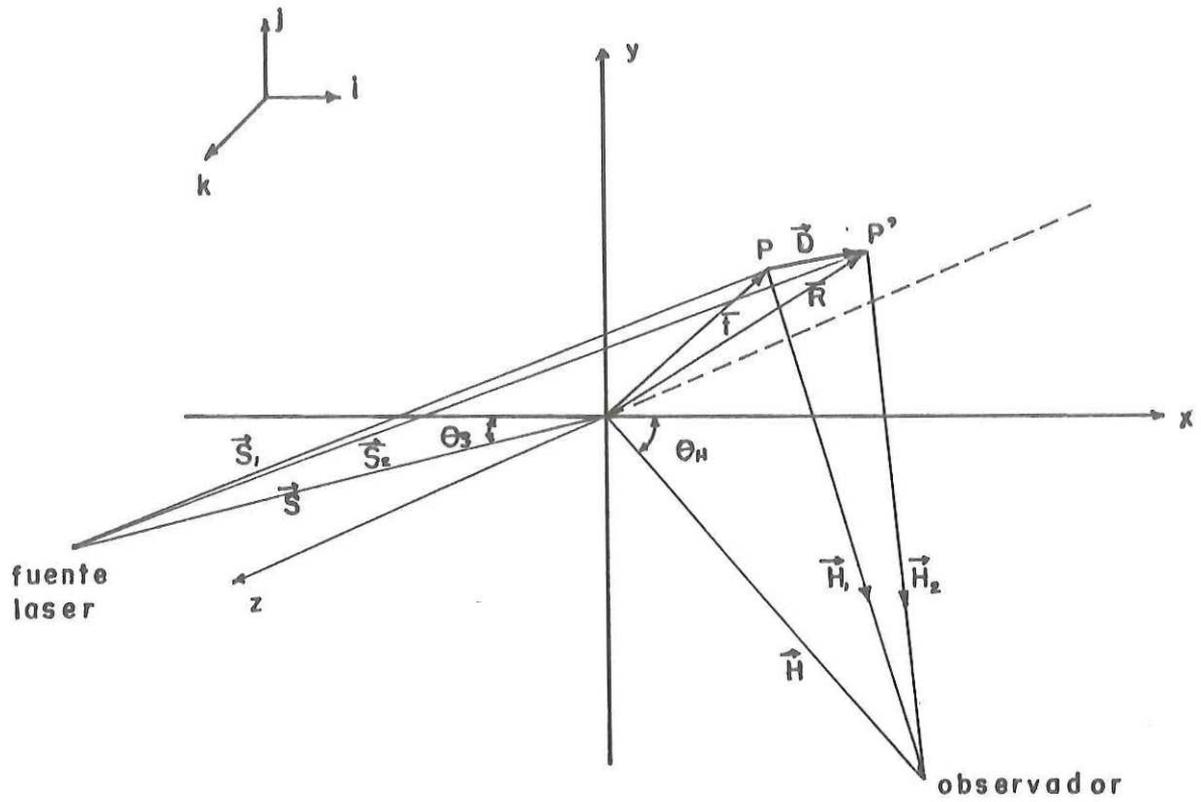


Figura 1.- Diagrama vectorial del sistema holográfico para interferometría.

$$-[(\cos\theta_H - \cos\theta_S)D_x + (\sin\theta_H + \sin\theta_S)D_z] \quad . \quad (2)$$

Si el objeto sufre un movimiento rígido, se supondrá que el cambio en el contraste de las franjas se debe al cambio ΔL en la longitud del camino entre el punto $P(x,y)$ y el origen $(0,0)$:

$$\Delta L_1 = L_1(x, y) - L_1(0, 0) \quad . \quad (3)$$

Cuando se tiene un desplazamiento lateral puro en el plano x - y , sustituyendo la Ec.(2) en la Ec.(3) se tiene que

$$\Delta L_1 = (1/S + 1/H) (D_x X + D_y Y) \quad . \quad (4)$$

En la Ec.(4) se considera que el plano objeto es perpendicular al eje óptico del sistema de observación : es decir $\theta_H = \pi/2$ y que el desplazamiento es lateral puro en la dirección "x" es decir, $D_y = 0$ y $D_z = 0$.

El lugar geométrico de las franjas está dado por:

$$\Delta L_1 = (1/S + 1/H) D_x X = (2n-1)\lambda/2 \quad , \quad (5)$$

donde n es un entero positivo que indica el orden de la franja en (x,y) con respecto al origen, y λ es la longitud de onda del láser.

Si $D_z = D_y = 0$ las franjas son perpendiculares al eje "x" con un espaciado entre cualquier par de franjas vecinas dado por:

$$\Delta x = \lambda / \{ [1/S + 1/H] D_x \} \quad . \quad (6)$$

Se analiza ahora la contribución debida a la forma del objeto. Considerando lo anterior y suponiendo que la fuente de iluminación está en el infinito (luz colimada) se tiene de la Ec.(2) la siguiente expresión para la franja oscura de orden n:

$$L_1(x, y, 0) = [D_x X_1 + \frac{1}{2} D_x^2] / H_1 = (2n-1) \lambda / 2 \quad . \quad (7)$$

Si la posición del observador con respecto al objeto es distinta (H_2), para la misma franja de interferencia, el camino óptico recorrido será:

$$L_2(x, y, 0) = [D_x X_2 + \frac{1}{2} D_x^2] / H_2 = (2n-1) \lambda / 2 \quad . \quad (8)$$

De las Ecs. (7) y (8) se obtiene:

$$H_2 / H_1 = [X_2 + D_x / 2] / [X_1 + D_x / 2] \quad . \quad (9)$$

Haciendo $H_2 = H + \delta H$, $X_2 = X + \delta X$ ($H_1 = H$ y $X_1 = X$) se tiene que:

$$\delta H = H \delta x / (x + D_x/2) \approx (H/x) \delta x , \quad (10)$$

La relación obtenida para la variación de la posición de las franjas con el perfil de la superficie (Ec. 10) muestra que la sensibilidad de esta técnica en general decrece considerablemente conforme el observador se aleja del objeto. Suponiendo valores para estos parámetros: $H = 50$ cm. y $x = 1$ cm. y ya que D_x es muy pequeño se obtiene $\delta H = 50 \delta x$ i.e. una variación de 1 cm. en la profundidad del perfil se traduce en una variación de 0.2 mm en la posición de la franja de Interferencia.

1.3 FRANJAS DE YOUNG

Esta técnica ha sido propuesta en la literatura (Takasaki, 1979), sin embargo no se ha discutido su funcionamiento de acuerdo a un modelo teórico.

De la Fig.2 se tiene que la posición a lo largo del eje z de un punto sobre la superficie del objeto está dada por:

$$z = \Delta x \operatorname{tg} \beta , \quad (11)$$

donde Δx es la desviación a lo largo del eje x de una franja de Interferencia y β es el ángulo entre el haz de luz colimada y el eje x .

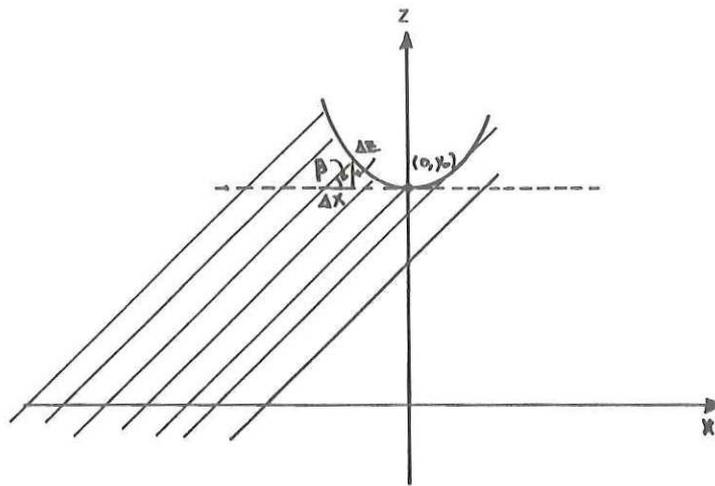


Figura 2.- Diagrama para el análisis teórico de las franjas de Young.

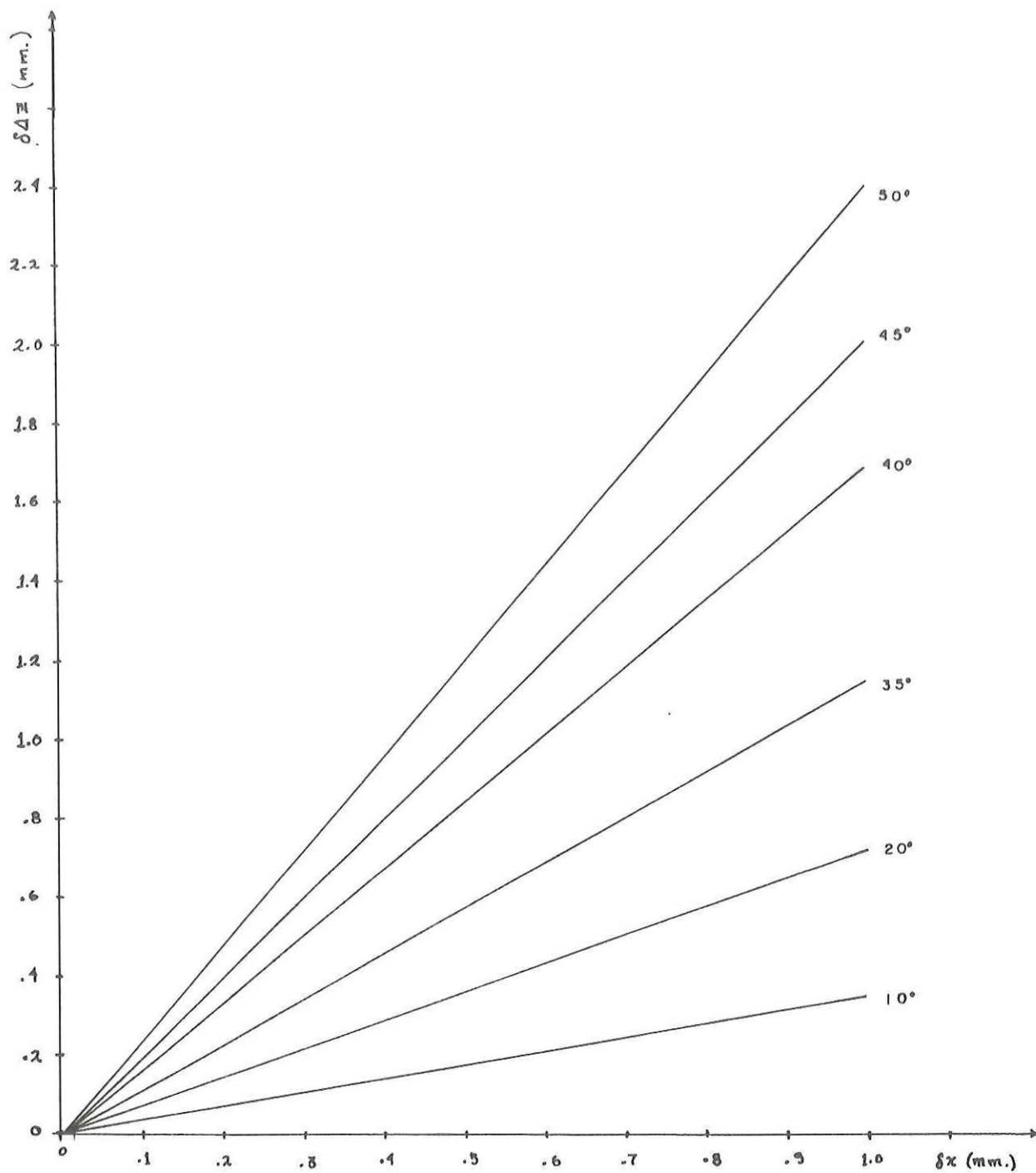
De la Ec.(11):

$$z = (x_2 - x_1) \operatorname{tg} \beta, \quad (12)$$

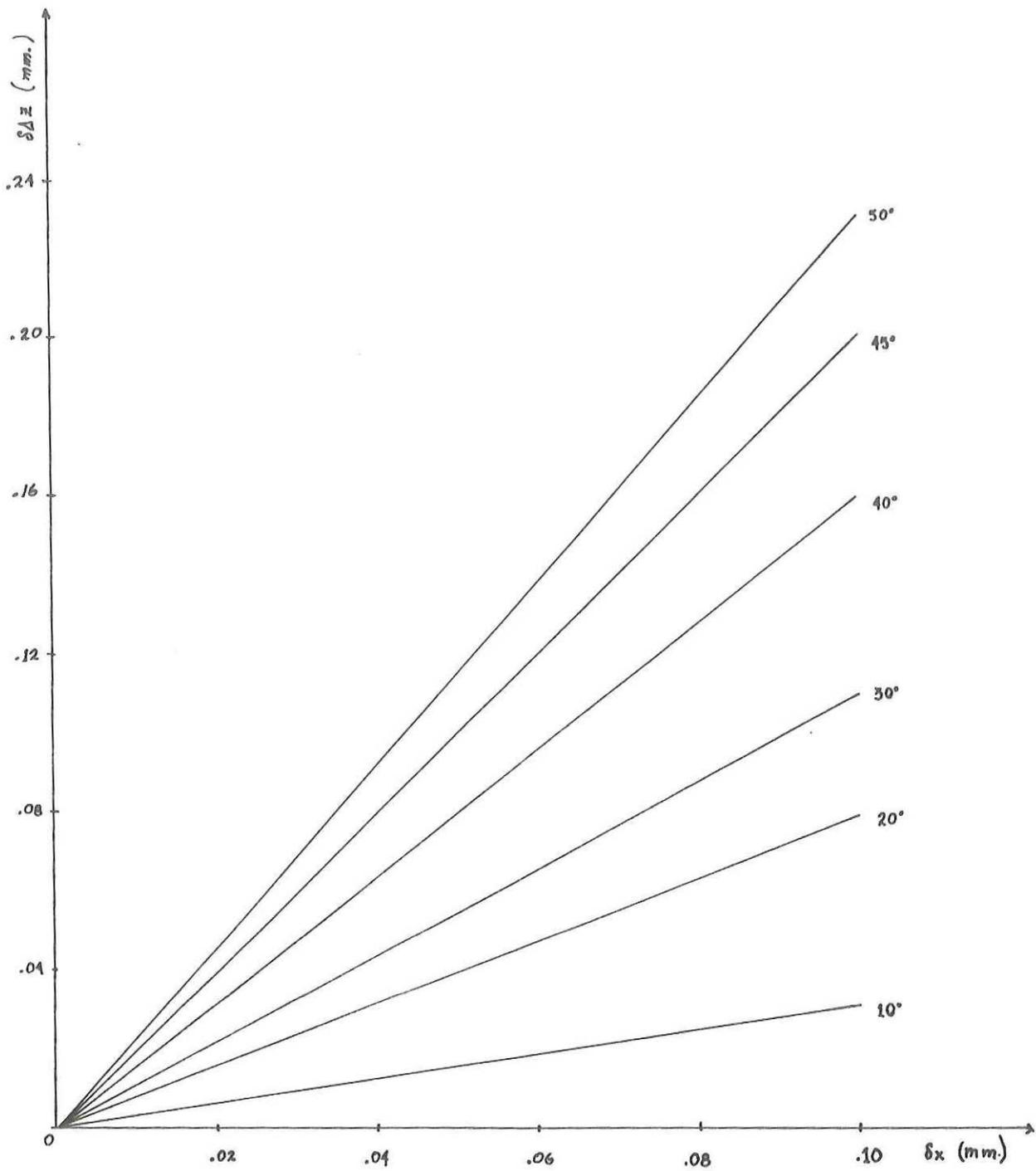
donde x_2 es la posición de la franja sobre el eje x y x_1 es la posición de esa misma franja para un objeto plano. En este caso se tiene de nuevo una relación muy sencilla entre el perfil y la posición de las franjas: con la ventaja de que la variación en la posición de las franjas puede ser más o menos sensible al perfil de la superficie, variando el ángulo β al que incide la luz. Específicamente para $\beta = 45^\circ$, $\Delta z = \Delta x$ y para ángulos menores $\Delta z > \Delta x$: i.e. la detectabilidad en profundidad de este arreglo es similar a la capacidad de localización de la posición de la franja sobre el plano del objeto. Considerando que se desea detectar un cambio en profundidad de 1 mm, haciendo uso de la Ec.(11), si se utiliza un ángulo $\beta = 30^\circ$ la variación en la posición de la franja será de 1.7 mm, lo cual es fácil de medir. A continuación se considera la precisión asociada a la medida, utilizando de nuevo una aproximación lineal en la contribución del error asociado a cada uno de los parámetros de medida:

$$\delta z = 2 \operatorname{tg} \beta \delta x + \Delta x \sec^2 \beta \delta \beta \quad (13)$$

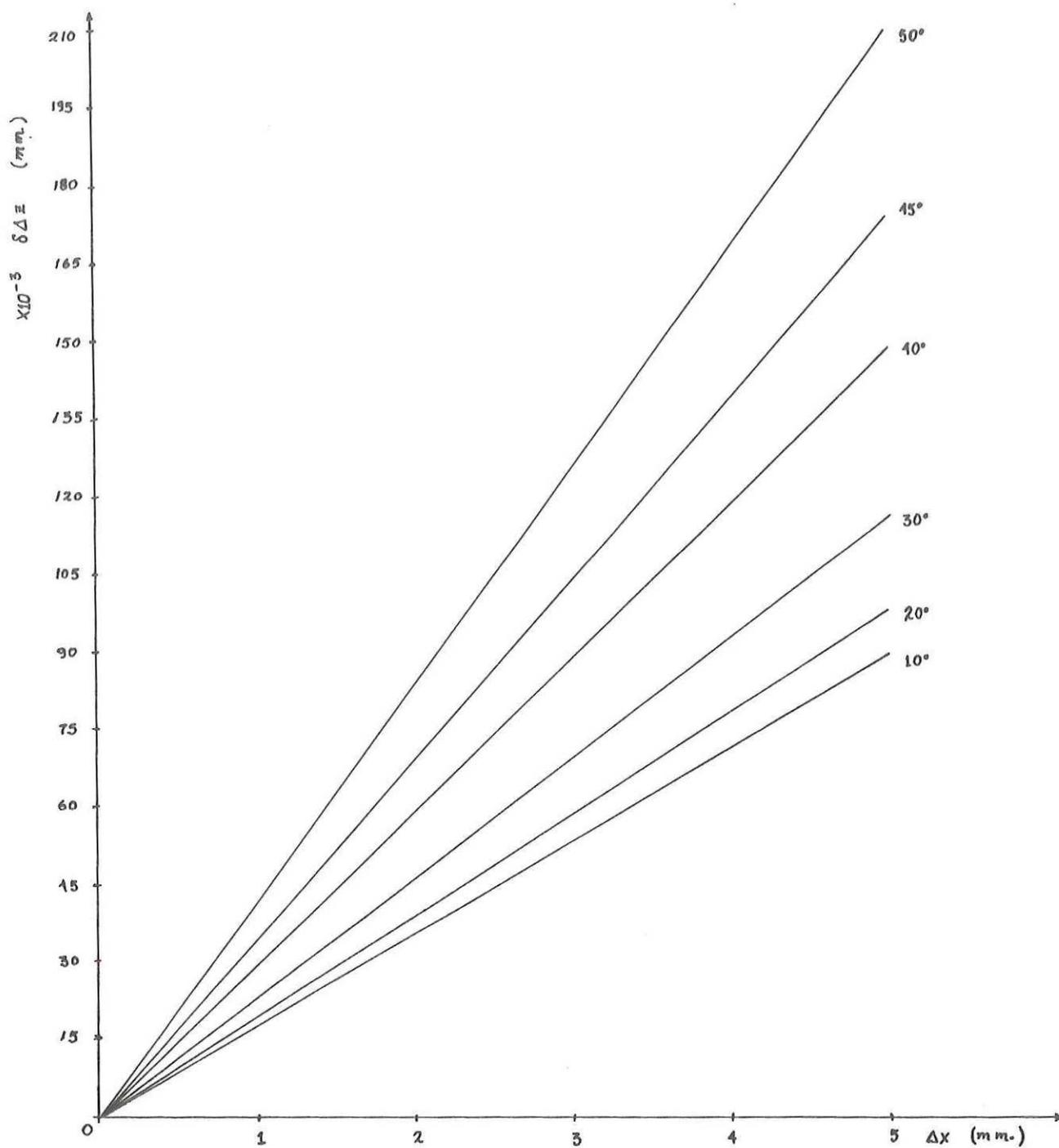
Teóricamente se tiene que el error $\delta \Delta z$ crece con β (el ángulo de incidencia de la luz como se muestra en la Fig.2).



Gráfica 1.- Error asociado al término $2\tan\beta \delta x$.



Gráfica 2.- Error asociado al término $2\tan\beta \delta x$ en la región de $\delta x < 0.10$ mm.



Gráfica 3.- Error asociado al término $\Delta x \sec^2 \beta \delta \beta$
 ($\delta \beta = 1.75 \times 10^{-2}$ rad = 1°).

La contribución de cada término en la ecuación anterior se muestra separadamente en las gráficas 1 y 3.

Del primer término de la Ec.13 se tiene que para $\beta = 30^\circ$ el error en la medida del perfil es proporcional al error en la medida de la posición de las franjas a lo largo del eje x. Con respecto a β , para un error de 1° en la medida del ángulo ($\beta = 30^\circ \pm 1^\circ$) el error en la medida del perfil es menor del 2.5%.

1.4 MEDIDAS DE CONTORNO UTILIZANDO FRANJAS PROYECTADAS PRODUCIDAS POR DOS FUENTES PUNTUALES.

La técnica de proyección de franjas fué propuesta para medir contornos por Alan J. MacGovern (1972) y aplicada por R. Thalmann y R. Dändliker (1985) utilizando dos fuentes puntuales localizadas a una distancia finita. N. Abramson (1976) propuso generarlas holográficamente y mostró que son equivalentes a un patrón de franjas de Young proyectado sobre el objeto. B.P. Hildebrand y K.A. Haines (1967) analizan el patrón de franjas tridimensional generado por dos fuentes puntuales. El grabado puede realizarse con ambas fuentes simultáneamente o por una exposición en secuencia. Es posible considerar al holograma como la suma de dos hologramas separados que dan dos imágenes denotadas por s_1 y s_2 . Ya que la posición de las imágenes es independiente de

la posición de las fuentes la imagen ocupará el mismo espacio. La única diferencia está en las fases de las imágenes. De aquí que las imágenes puedan ser expresadas como

$$s_1 = K s \exp(\pm i k_1 r_{01}') \quad (14)$$

$$s_2 = K s \exp(\pm i k_1 r_{02}') \quad (15)$$

Los términos de la fase que son los mismos para ambas imágenes están contenidos en la constante K. La intensidad de las imágenes combinadas se puede denotar como:

$$I = 2K^2 |s|^2 (1 + \cos k_1 [r_{01}' - r_{02}']) \quad (16)$$

La máxima brillantez ocurre cuando el argumento de la Ec.(16) es un múltiplo de 2π rad.

$$k_1 (r_{01}' - r_{02}') = 2n\pi \quad (17)$$

$$r_{01}' - r_{02}' = n\lambda_1 \quad (18)$$

Esta es la ecuación de una familia de hiperboloides de dos láminas cuyos ejes pasan a través de las dos fuentes puntuales. Se muestra una sección transversal de esos

hiperboloides en la Fig.(3). Si el objeto se coloca en tal iluminación, entonces la imagen tendrá franjas brillantes en las localizaciones de las curvas que se muestran. Para un contorno perfecto de altitud constante, las fuentes (x_{01}, y_{01}, z_{01}) y (x_{02}, y_{02}, z_{02}) deben ser colocadas al infinito.

Entre los arreglos experimentales para obtener la forma de superficie está el propuesto por R. Thalmann y R. Dändliker (Fig. 4).

El patrón de franjas de contorno en el objeto se genera por la interferencia de dos fuentes de iluminación distintas. Las franjas se pueden observar en tiempo real así como holográficamente (por una exposición simple iluminando simultáneamente el objeto con ambas fuentes o por doble exposición iluminando en cada caso al objeto con cada una de las fuentes de iluminación).

El patrón de franjas debido a la interferencia de las dos fuentes esféricas de iluminación (superficies de interferencia de fase constante $\phi = 2n\pi r$) es una familia de hiperboloides de dos láminas con foco en las dos fuentes. En el campo lejano de las fuentes, las superficies de las franjas son aproximadamente planas y paralelas a la dirección media de iluminación (Fig.4).

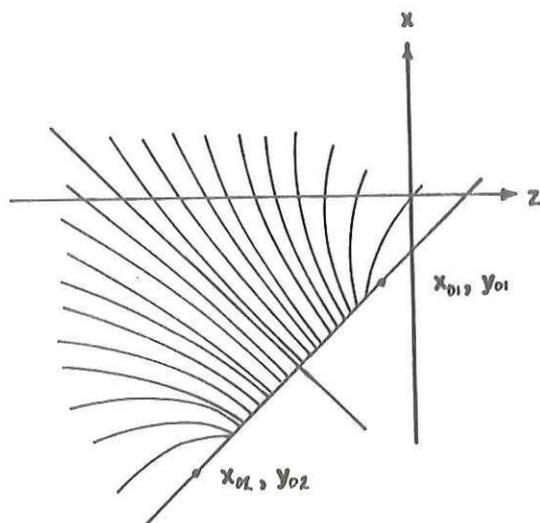


Figura 3.- Lugar geométrico de interferencia para un holograma grabado con dos fuentes.

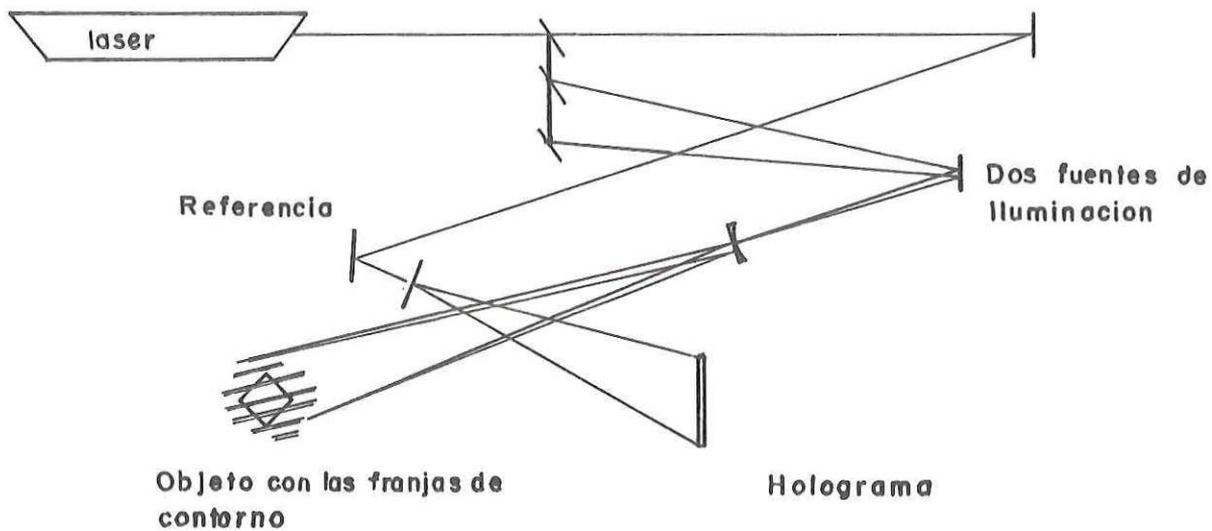


Figura 4.- Mapeo holográfico de contornos con dos fuentes de iluminación.

El Intervalo de franjas está dado por

$$\Delta = 2\pi / |\Delta k_x| \quad , \quad (19)$$

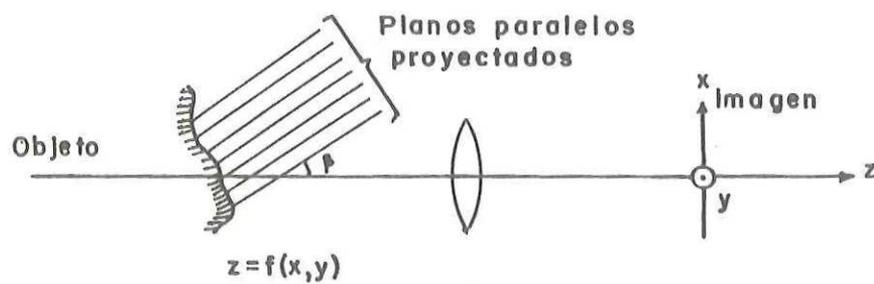
donde Δk_x denota la diferencia entre los dos vectores de onda de Iluminación.

Los métodos de franjas de Moiré aplicados a la determinación de la forma de la superficie pueden relacionarse con un holograma Imagen. Un análisis detallado de esta equivalencia ha sido desarrollado por Alan J. MacGovern (1972) considerando el método de franjas proyectadas generalizado, (Fig.5) en el cual las franjas (planos paralelos en el espacio) se proyectan hacia el objeto tridimensional. La lente forma la Imagen del objeto, permitiendo obtener un grabado fotográfico de la Intersección de las franjas con la superficie del objeto.

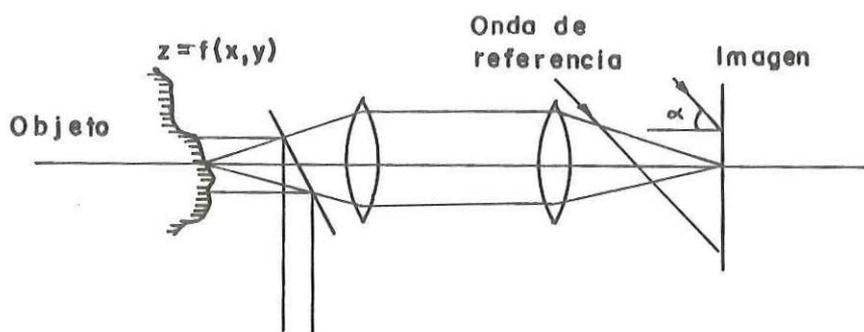
Si se considera un sistema de coordenadas cartesianas con la dirección z a lo largo del eje de la lente, la superficie del objeto se puede describir como $z = f(x,y)$. El conjunto de planos igualmente espaciados está dado por la ecuación

$$z' = (x-nd)/\text{tg } \beta \quad , \quad (20)$$

donde $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, d es el espaciado (en la



a



b

Figura 5.- Métodos básicos para holografía.
 a) Objeto iluminado por planos igualmente espaciados.
 b) Objeto iluminado por una onda plana paralela al eje.

dirección x) de los planos, y es el ángulo de los planos con respecto al eje z . Los planos son paralelos al eje "y". (Para $n=0$ el plano pasa a través del eje "y").

Las líneas de intersección de los planos con la superficie cambiando z' por z están dados por

$$x = f(x, y) \operatorname{tg} \beta + nd \quad . \quad (21)$$

Estas ecuaciones también representan las líneas en la imagen fotográfica.

De la Fig.5b si el objeto es iluminado con una onda plana paralela al eje z , el arreglo telescópico produce un frente de onda en el plano imagen cuya fase está dada por

$$\phi(x, y) = (2\pi/\lambda) 2f(x, y) \quad , \quad (22)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz utilizada.

Esta distribución interfiere con una onda plana a un ángulo α , formando franjas donde la diferencia de fase entre la onda plana de referencia y la onda del objeto es un múltiplo entero de 2π , es decir,

$$(2\pi/\lambda) x \operatorname{sen} \alpha - (2\pi/\lambda) 2f(x, y) = n2\pi \quad , \quad (23)$$

dando

$$x = [2f(x, y)/\text{sen } \alpha] + n(\lambda/\text{sen } \alpha) \quad . \quad (24)$$

Comparando las Ecs.(21) y (24) se muestra que la fotografía de las líneas de intersección de los planos con el objeto es directamente equivalente a un holograma imagen plano. La longitud de onda equivalente, λ_e , está dada por

$$\lambda_e/\text{sen } \alpha_e = d \quad , \quad (25)$$

donde α_e es el ángulo de referencia equivalente. También

$$2/\text{sen } \alpha_e = \text{tg } \beta \quad . \quad (26)$$

Por geometría

$$d = S/\cos \beta \quad , \quad (27)$$

donde S es el espaciado particular de los planos. Por consiguiente

$$\lambda_e = 2S/\text{sen } \beta \quad . \quad (28)$$

Lo anterior demuestra que la fotografía de las franjas proyectadas es el equivalente directo de un holograma imagen plano del objeto grabado con una longitud de onda λ_e .

1.5 TECNICAS MOIRE

El fenómeno de Moiré se presenta al superponer dos rejillas de espaciamiento similar. Se le da el nombre de franjas primarias a cualquier conjunto de franjas que combinadas con otras similares producen al superponerse un conjunto nuevo de franjas a las cuales se les da el nombre de franjas secundarias.

Las franjas de Moiré son franjas secundarias, es decir, que son producidas al superponerse dos patrones de franjas primarias. Cuando una de las rejillas primarias se distorsiona, el patrón de Moiré se deforma de acuerdo a ello, por lo que de la desviación de las franjas se puede derivar cuantitativamente la distorsión de la rejilla original. También se pueden obtener franjas de Moiré al superponer una rejilla con su sombra proyectada sobre la superficie de un objeto. La importancia de las franjas de Moiré radica según lo reportado por algunos autores en que permiten la detección de pequeñas distorsiones de la rejilla deformada haciendo posible la medición de pequeños desplazamientos con sensibilidad comparable a la obtenida con la interferometría clásica.

Se estudia la generación del mapeo de contornos por

técnicas Moiré en dos casos: a) cuando se tienen la fuente y el observador en el infinito, es decir, se trabaja con luz colimada y se observa en el plano focal de una lente (Deflectometría Moiré, O.Kafri: 1981,1983: Meadows:1970) : b) cuando se tiene una fuente puntual a una distancia finita, es decir, luz no colimada y se observa sobre el mismo plano de la lente focal.

Generación de mapeo de contornos Moiré con la fuente y el observador en el infinito (Meadows: 1970).

En la Fig. 6 se muestra el sistema usado en el mapeo de contornos Moiré. Se tiene la fuente al infinito y se considera que los rayos hacen un ángulo α con la vertical: se supone que el observador también está en el infinito y que la línea de observación hace un ángulo β con la vertical.

Se proyecta una rejilla senoidal que es iluminada por una fuente de luz no coherente. Bajo esas condiciones, el observador verá un mapa de contornos de la superficie al observar la superficie a través de la rejilla. La intensidad de modulación de la rejilla está dada por

$$T(x) = 1/2 + 1/2 \text{ sen}(2\pi x/p) \quad , \quad (29)$$

donde p es el período de la rejilla.

La sombra que está proyectada sobre el objeto está

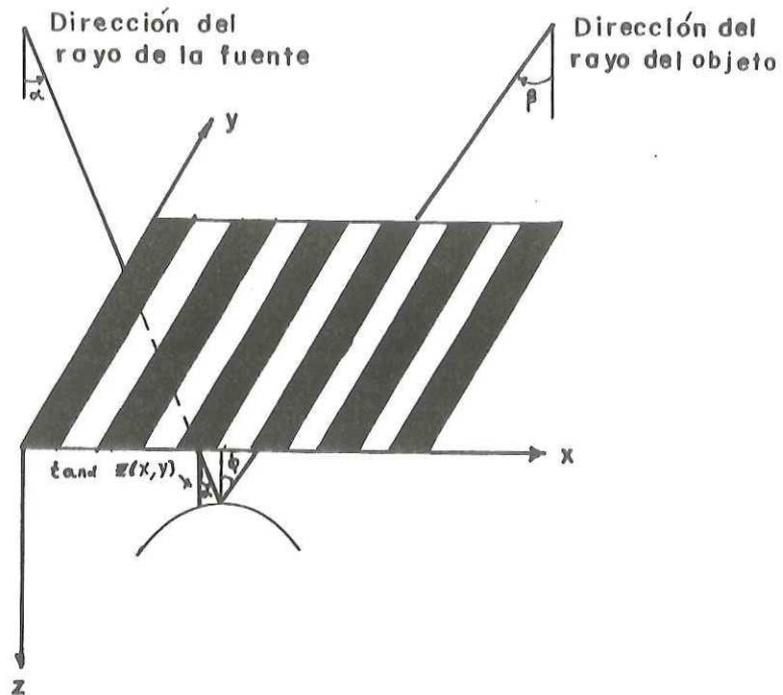


Figura 6.- Sistema de mapeo de contornos de Moiré cuando la fuente y el observador están en el infinito.

desplazada en la dirección x por una distancia $z(x,y)\tan \alpha$ con respecto a la rejilla, como puede observarse en la Fig. 6.

Si se considera que la superficie es un difusor lambertiano, que ϕ es el ángulo entre el rayo reflejado y la normal a la superficie y que B es la intensidad de la iluminación, entonces la intensidad de la sombra en la superficie está dada por

$$I_0(x, y) = (B/2) \cos\{\phi(x, y, z(x, y))\} \{\sin(2\pi/p)X [x - z(x, y)\tan\alpha + 1]\} \quad (30)$$

donde $B\cos\{\phi(x, y, z)\}$ es la intensidad dispersada en la dirección ϕ . Si la pendiente de la superficie varía lentamente, lo suficiente para considerar que $\cos\{\phi(x, y, z)\}$ es esencialmente constante entonces la Ec.(30) se puede escribir como

$$I_0(x, y) = K\{\sin(2\pi/p) [x - z(x, y)\tan\alpha + 1]\} \quad (31)$$

donde $K = (B/2) \cos\{\phi(x, y, z)\}$ es una constante. En caso contrario, la intensidad de la luz reflejada por el objeto variará para diferentes partes del mismo al observarlo desde una posición fija, o bien variará para una misma parte del objeto si cambia la posición de observación. En el desarrollo que se da a continuación no se toma en cuenta esta

variación en la intensidad de la luz reflejada debida al ángulo entre la dirección de observación y la normal a la superficie.

Cuando el observador ve la superficie a través de la rejilla, verá el producto de $I_0(x,y)$ y la intensidad de transmisión de la rejilla:

$$\begin{aligned}
 I_1(x,y) &= (K/2) [\text{sen}(2\pi/p)(x-z\text{tg } \alpha) + 1] [\text{sen}(2\pi/p) \\
 &\quad (x + z\text{tg } \beta) + 1] \\
 &= (K/2) [1 + \text{sen}(2\pi/p)(x-z\text{tg } \alpha) + \text{sen}(2\pi/p)(x + z\text{tg } \beta) \\
 &\quad + \text{sen}(2\pi/p)(x - z\text{tg } \alpha)\text{sen}(2\pi/p)(x + z\text{tg } \beta)] \quad (32)
 \end{aligned}$$

Desarrollando el último término en la Ec.(32):

$$\begin{aligned}
 I_1(x,y) &= (K/2) [1 + 2x \text{sen}(2\pi/p) + z(\text{tg } \beta - \text{tg } \alpha)\text{sen}(2\pi/p) \\
 &\quad - \cos(2\pi/p) [2x + z(\text{tg } \beta - \text{tg } \alpha)] \\
 &\quad + \cos(2\pi z/p)(\text{tg } \alpha + \text{tg } \beta)] \quad (33)
 \end{aligned}$$

Si existe simetría entre las direcciones de iluminación : es decir , $\text{tg } \beta - \text{tg } \alpha \approx 0$, el último término en la Ec.(33), $(K/4)[\cos 2\pi z/p (\text{tg } \alpha + \text{tg } \beta)]$, es el único que depende de z y produce líneas de contorno en la superficie. En este caso si dos puntos z_1 y z_2 están separados por N franjas la diferencia en altura es Δz y está dada por

$$\Delta z = Np / (\text{tg } \alpha + \text{tg } \beta) \quad (34)$$

Si se trabaja fuera de la condición de simetría, los otros términos de la Ec.(33) que dependen también del perfil de la superficie generan franjas de ruido, que de cualquier manera son menos contrastadas que las correspondientes al término asociado a la (Ec.34.) Si la altura de la superficie varía lentamente, el término del contorno producirá franjas anchas comparadas con las franjas finas producidas por los otros términos.

La resolución del sistema está determinada por la Ec.(34) y puede ser ajustada al variar α , β o p .

Generación de Contornos con la fuente y el observador colocados a una distancia finita de la rejilla (Meadows: 1970).

En la Fig. 7, la fuente está colocada a una altura h_1 sobre la rejilla, el observador está a una altura h_2 arriba de la rejilla, y la fuente y el observador están separados por una distancia d .

Sin embargo, el incremento en altura entre dos franjas Moiré consecutivas no será el mismo para cualquier conjunto de dos franjas. Esto está en contraste con el caso discutido anteriormente, donde el incremento en altura entre dos conjuntos de franjas es el mismo y está dado por la Ec.(34).

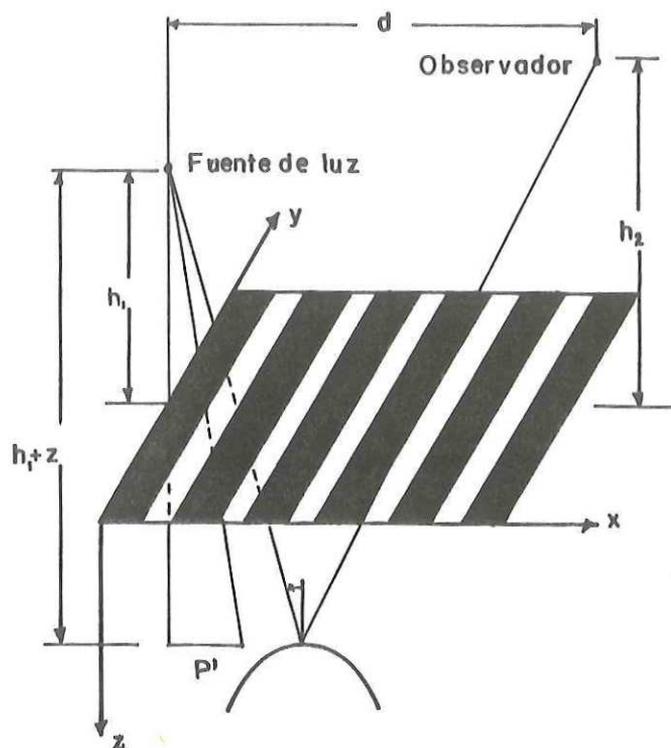


Figura 7.- Geometría asociada al sistema de mapeo de contornos de Moiré cuando la fuente y el observador están a distancias finitas de la rejilla.

Para este caso se obtiene a continuación la Intensidad del patrón de la sombra en la superficie. Ya que la luz es no colimada, el periodo de la rejilla proyectada se incrementa conforme la distancia entre la superficie y la rejilla aumenta. Si el periodo de la rejilla es p , el periodo de la sombra en $z = 0$ será también p y el periodo p' en el plano $z = z(x,y)$ será

$$p' = \{[h_1 + z(x,y)]/h_1\}p \quad . \quad (35)$$

La Intensidad de la sombra de la rejilla proyectada por la fuente hacia la superficie está dada por

$$I_2(x,y) = \{I/[r^2(x,y,z(x,y))]\} \\ \{1/2 + 1/2 \text{sen}\{2\pi h_1 x/[h_1 + z(x,y)]p\} \\ \cos\phi(x,y,z(x,y))\} \quad , \quad (36)$$

donde $r(x,y,z)$ es la distancia desde la fuente a la porción particular de la superficie iluminada, e I es la Intensidad de la fuente. Se supone que la superficie está suficientemente cercana a la rejilla de modo tal que los efectos de difracción son despreciables. Si el observador mira la superficie a través de una pequeña abertura, la Intensidad $I_3(x,y)$ en el punto (x,y,z) en la superficie será la Intensidad en el punto particular multiplicada por la Intensidad de transmisión de la porción de la rejilla a través de la cual la luz pasa en su camino al observador.

$I_3(x,y)$ está dada por

$$\begin{aligned}
 I_3(x,y) &= (I/r^2) \cos\phi(x,y,z) [W + W \operatorname{sen}[2\pi h_1 x/p(h_1+z)] \times \\
 &\quad [W + W \operatorname{sen}2\pi/p[(dz + h_2 x)/(h_2 + z)]] \\
 &= (I/4r^2) \cos\phi(x,y,z) [1 + \operatorname{sen}(2\pi/p)h_1 x/(h_1+z) \\
 &\quad + \operatorname{sen}(2\pi/p)(dz + h_2 x)/(h_2 + z) \\
 &\quad + \operatorname{sen}(2\pi/p)h_1 x/(h_1 + z) \\
 &\quad \operatorname{sen}2\pi/p (dz + h_2 x)/(h_2 + z)] . \tag{37}
 \end{aligned}$$

Desarrollando el último término se obtiene

$$\begin{aligned}
 I_3(x,y) &= (I/4r^2) \cos\phi(x,y,z) [1 + \operatorname{sen}(2\pi/p)h_1 x/(h_1 + z) \\
 &\quad + \operatorname{sen}(2\pi/p)(dz + h_2 x)/(h_2 + z) \\
 &\quad + W \cos(2\pi/p) [h_1 x/(h_1 + z) \\
 &\quad - (dz + h_2 x)/(h_2 + z)] \\
 &\quad - W \cos(2\pi/p) [h_1 x/(h_2 + z) \\
 &\quad + (dz + h_2 x)/(h_2 + z)]] . \tag{38}
 \end{aligned}$$

En este caso, se observa que no hay ningún término que dependa únicamente de z ; i.e. no hay una forma simple de encontrar la diferencia en altura entre dos puntos por el patrón de Moiré formado. Sin embargo, si la fuente y el observador están colocados a una misma altura, se produce un término en la expresión para $I_3(x,y)$ el cual sólo depende de z . Si la altura de la fuente es suficientemente grande comparada con la variación en altura de la superficie y $\phi(x,y,z)$ es relativamente constante sobre la superficie, el coeficiente $[I/4r^2(x,y,z)] \cos\phi(x,y,z) = C$ será

aproximadamente constante sobre la superficie.

Cuando $h_1 = h_2 = h$ la expresión para $I_3(x,y)$ se reduce a .

$$\begin{aligned}
 I_3(x,y) = & C \left[1 + \sin(2\pi/p)hx/(h+z) + \sin(2\pi/p)(dz+hx)/(h+z) \right. \\
 & + \frac{C}{2} \cos(2\pi/p) [(2hx+dz)/(h+z)] \\
 & \left. + \frac{C}{2} \cos(2\pi/p) [dz/(h+z)] \right] . \quad (39)
 \end{aligned}$$

Si además se considera que $h \gg d$; $h \gg z$, entonces el último término en la expresión anterior, $(C/2) \cos[2\pi dz/p(h+z)]$, es el único que depende de z , por lo que este término permite obtener información acerca del contorno de la superficie del objeto. Cuando estas condiciones entre h, d y z no se cumplen, además de las franjas asociadas al último término se tendrán otras franjas de ruido debidas a la contribución de los primeros términos.

Debido a la manera por la cual z entra en el término del contorno, si no se satisface la condición $h \gg z$, las franjas no varían senoidalmente con z . Por consiguiente la diferencia en altura entre dos puntos no puede determinarse simplemente contando el número de franjas entre ellos. Para determinar la diferencia en altura entre dos puntos, z_1 y z_2 , se debe conocer el número de franjas N_1 entre el punto z_1 y $z = 0$ y el número de franjas, N_2 , entre el punto z_2 y $z = 0$.

En z_1 , el argumento del término del contorno es

$$2\pi dz_1/p(h + z_1) = 2\pi N_1 \quad (40)$$

y en z_2

$$2\pi dz_2/p(h + z_2) = 2\pi N_2 \quad (41)$$

Entonces:

$$\Delta z = z_2 - z_1 = N_2 ph/(d - pN_2) - N_1 ph/(d - pN_1) \quad (42)$$

que es el caso general.

Debido a la dificultad en determinar el número de franjas entre z_1 y $z = 0$, es conveniente diseñar el arreglo experimental de modo tal que $h \gg z_1$ y bajo estas condiciones es posible hacer un desarrollo de Taylor del argumento de

$$(C/2) \cos[2\pi dz/p(h + z)] \quad (43)$$

de donde se tiene que las franjas de contorno están dadas aproximadamente por

$$(C/2) \cos[2\pi dz/phi] \quad (44)$$

Ya que el argumento del término de contorno es lineal en z , entonces el número N de franjas entre cualesquiera dos puntos determina la diferencia en altura entre los puntos mencionados, de acuerdo con la relación:

$$\Delta z = z_2 - z_1 = Nph/d \quad (45)$$

Mapeo no escalado de niveles de altura usando técnicas Moiré.

Otra técnica (Livnat: 1985) consiste en proyectar mediante luz colimada la sombra de una rejilla de transmisión en el plano $y-z$ (Fig.8) que se representa como $z = np$, donde p es el espaciado de la rejilla y $n = 0, +1, +2, \dots$, la superficie del objeto está dada por:

$$f(x, y) = z \quad (46)$$

Un observador en el plano $x-y$: i.e. colocado perpendicularmente al plano de la rejilla verá un mapa de contornos dado por

$$f(x, y) = np \quad (47)$$

donde entre cualesquiera dos curvas de nivel se tiene un

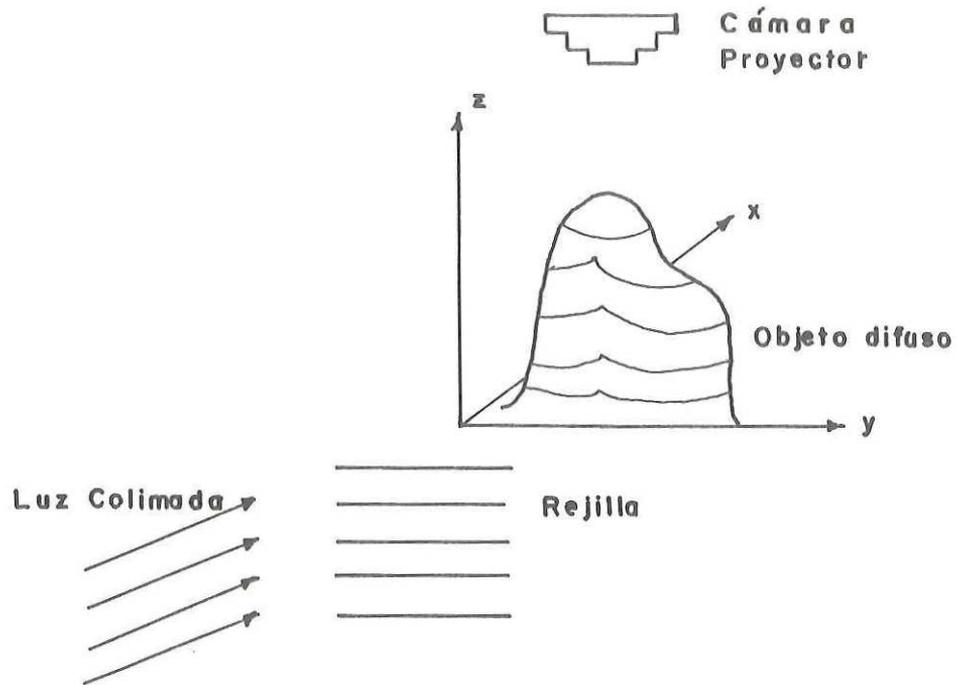


Figura 8.- La sombra de una rejilla se proyecta hacia un objeto difuso y se graba por una cámara colocada perpendicularmente a ella.

Incremento en z dado por $\pm np$.

1.6 OBTENCION DE MAPEOS DE CONTORNO POR INTERFEROMETRIA DE PATRONES DE GRANULADO (ESPI)

Al evaluar la forma de una superficie utilizando ESPI (Denby: 1976), la superficie analizada se ilumina con luz de una longitud λ_1 . La luz retrodispersada por la superficie se hace interferir con una onda de referencia y el resultado de esta interferencia se almacena en el plano imagen ya sea fotográficamente o electrónicamente con un tubo de televisión. De esta manera se guarda la información sobre la distribución de amplitud y fase contenida en el frente de onda retrodispersado. Posteriormente se cambia la longitud de onda a λ_2 y se repite el procedimiento de nuevo. El patrón de granulado resultante se superpone posteriormente con el almacenado. Así los patrones de granulado en λ_1 y λ_2 pueden ser comparados entre sí en el plano imagen.

El modelo matemático para mapear contornos con dos longitudes de onda es el siguiente. Supóngase como se muestra en la Fig. 9a, que hay dos caminos $ABC = n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2$, $AC = m_1 \lambda_1 = m_2 \lambda_2$. Donde λ_1 y λ_2 son las longitudes de onda y A, B, C son los puntos en el divisor del haz, el objeto y el tubo de vidicon (plano imagen) respectivamente.

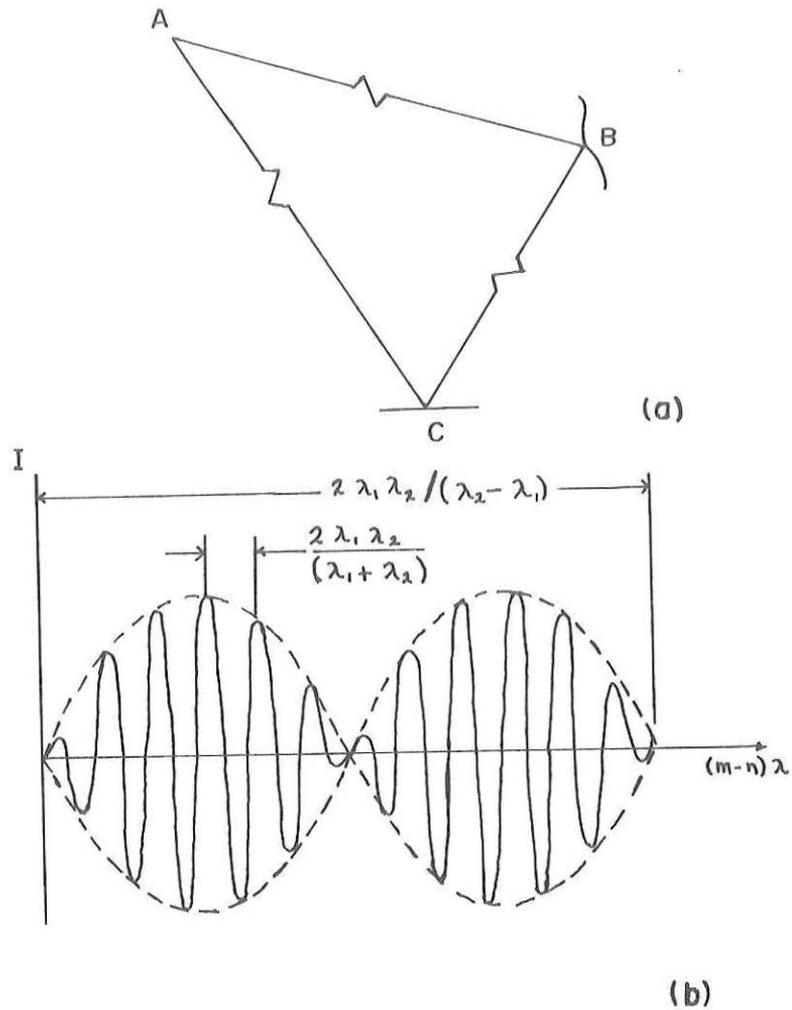


Figura 9.- (a) Caminos de los rayos de referencia y del objeto de un sistema de mapeo de contornos por interferometría electrónica de patrones de granulado (ESPI). A es el divisor de rayos, B es la superficie del objeto, C es el plano imagen.

(b) Representación de los pulsos descritos por la Ec.(49).

La amplitud compleja de la onda escalar en el plano imagen es:

$$U_i = A_R \exp(-jk_i m_i \lambda_i) + A_S \exp(-jk_i n_i \lambda_i) , \quad (48)$$

donde A_R y A_S son las amplitudes de los frentes de onda de referencia y del objeto respectivamente y k es el número de onda. La substracción de las intensidades de las dos longitudes de onda realizada por el sistema ESPI, suponiendo que su respuesta es lineal, se puede expresar como:

$$\begin{aligned} I &= |U_2|^2 - |U_1|^2 \\ &= \{ [A_R^2 + A_S^2 + 2A_R A_S \cos k_2 (m_2 \lambda_2 - n_2 \lambda_2)] \\ &\quad - [A_R^2 + A_S^2 + 2A_R A_S \cos k_1 (m_1 \lambda_1 - n_1 \lambda_1)] \} \\ &= 2A_R A_S [2 \sin \{ 2\pi \{ [\lambda_2 - \lambda_1 / \lambda_1 \lambda_2] (m_1 - n_1) / 2 \} \} \times \\ &\quad \sin \{ 2\pi \{ [\lambda_1 + \lambda_2] / 2\lambda_1 \lambda_2 \} (m_1 - n_1) \lambda_1 \} \end{aligned} \quad (49)$$

La Ec.(49) representa una distribución de pulsos de intensidad senoidal con un periodo

$$(m_1 - n_1) \lambda_1 = 2\lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (50)$$

modulado por un término de amplitud $2\lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$, (Fig.9b). El valor máximo para la amplitud (de los pulsos) de I ocurre dos veces en un ciclo, por consiguiente dos pulsos consecutivos representan un cambio en el camino dado por

$$(m_1 - D_1)\lambda_1 = \lambda_1\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (51)$$

El periodo $2\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)$ muestra que la variación no deseada en el camino óptico produce un desplazamiento en la posición de los pulsos. Este término se manifiesta como un patrón de Interferencia en el caso de los frentes de onda suaves. Cuando se aplica este término para el mapeo de contornos utilizando ESPI el portador en la Ec.(49), presenta la distribución aleatoria del frente de onda granulado. La Interferencia en el plano Imagen entre el frente de onda suave de referencia y el frente granulado producido por un área pequeña en la superficie del objeto puede expresarse por la Ec.(48).

El perfil de la superficie macroscópica puede ser determinado de las diferencias de fase si la longitud de onda efectiva $\lambda = \lambda_1\lambda_2/|\lambda_1 - \lambda_2|$ del término de Interferencia domina sobre el efecto de dispersión asociado a la rugosidad de la superficie bajo prueba (Fercher: 1986, Apéndice 1).

A continuación se describen los arreglos experimentales que se basan en el uso de la técnica ESPI con dos longitudes de onda. Estos métodos requieren un frente de onda de referencia muy similar al del objeto, el cual se compara con la forma de la superficie del objeto. En la Fig.10 se

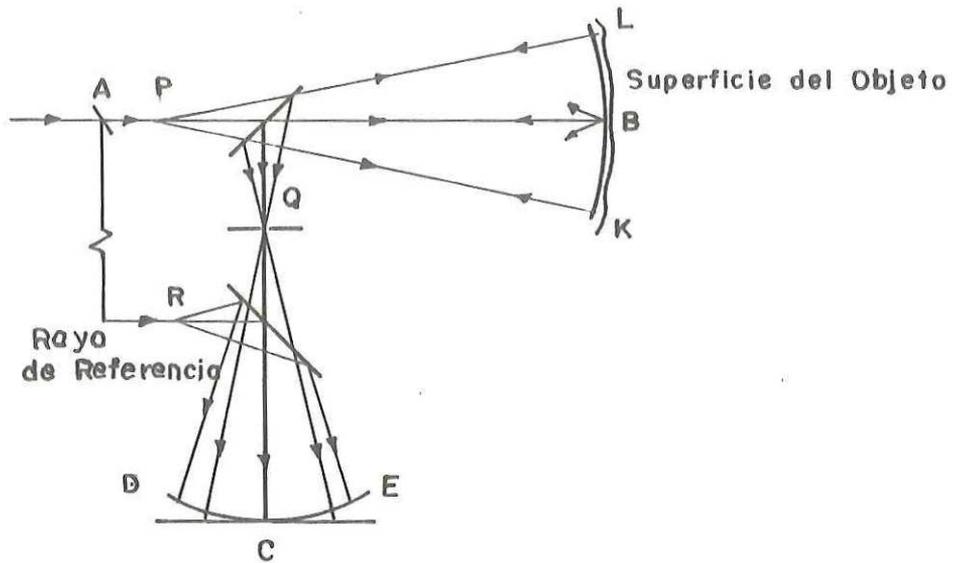


Figura 10.- Sistema de mapeo de contornos usando interferómetros de patrones moteado a dos longitudes de onda.

muestra la iluminación de la superficie de un objeto y su superposición con el frente de referencia.

El frente de referencia se abre en R originando un frente de onda esférico DCE. La luz reflejada por el objeto se colecta en la abertura Q que es la imagen del punto R en el rayo de referencia. Entonces el frente de onda del objeto se compara exactamente con el frente de onda esférico de referencia DCE. Cuando la longitud de onda se cambia no hay un cambio de fase relativo en los mismos caminos R y Q entre los puntos correspondientes de los frentes de onda de referencia y del objeto en el plano imagen. Se produce un cambio de fase relativo entre P y Q cuando se cambia la longitud de onda, produciendo las franjas de contorno.

En la Fig.11 se muestra un arreglo óptico para combinar los frentes de onda de referencia y del objeto en un Interferómetro de patrón de granulado. Las superficies cuyo perfil se desean conocer pueden ser planas, esféricas o cilíndricas.

En este arreglo en vez de utilizar un divisor de haz convencional que haga coincidir el eje óptico del frente de onda del objeto con el de referencia, se usa un espejo con un pequeño orificio. Comparando con el divisor de haz convencional, el uso del arreglo propuesto evita reflexiones secundarias y degradación del frente de onda de referencia

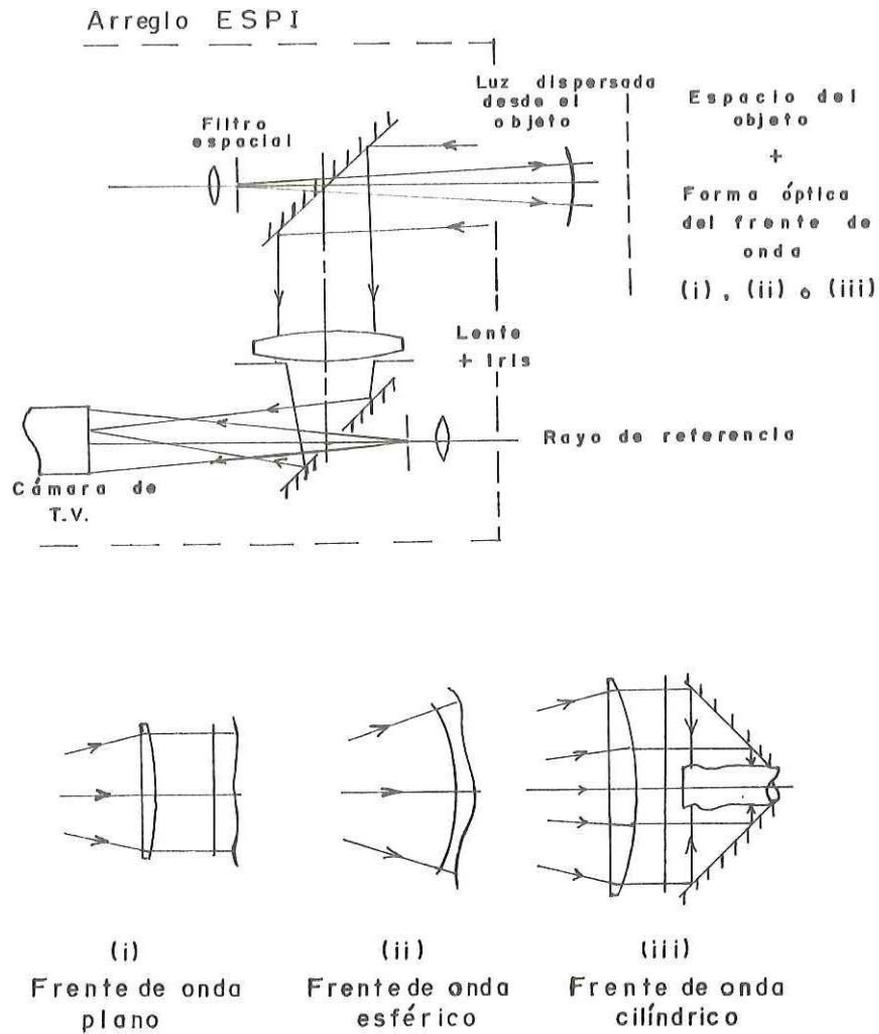


Figura 11.- Arreglos ópticos para el mapeo de contornos de componentes de forma regular por medio de frentes de onda generados convencionalmente : método I.

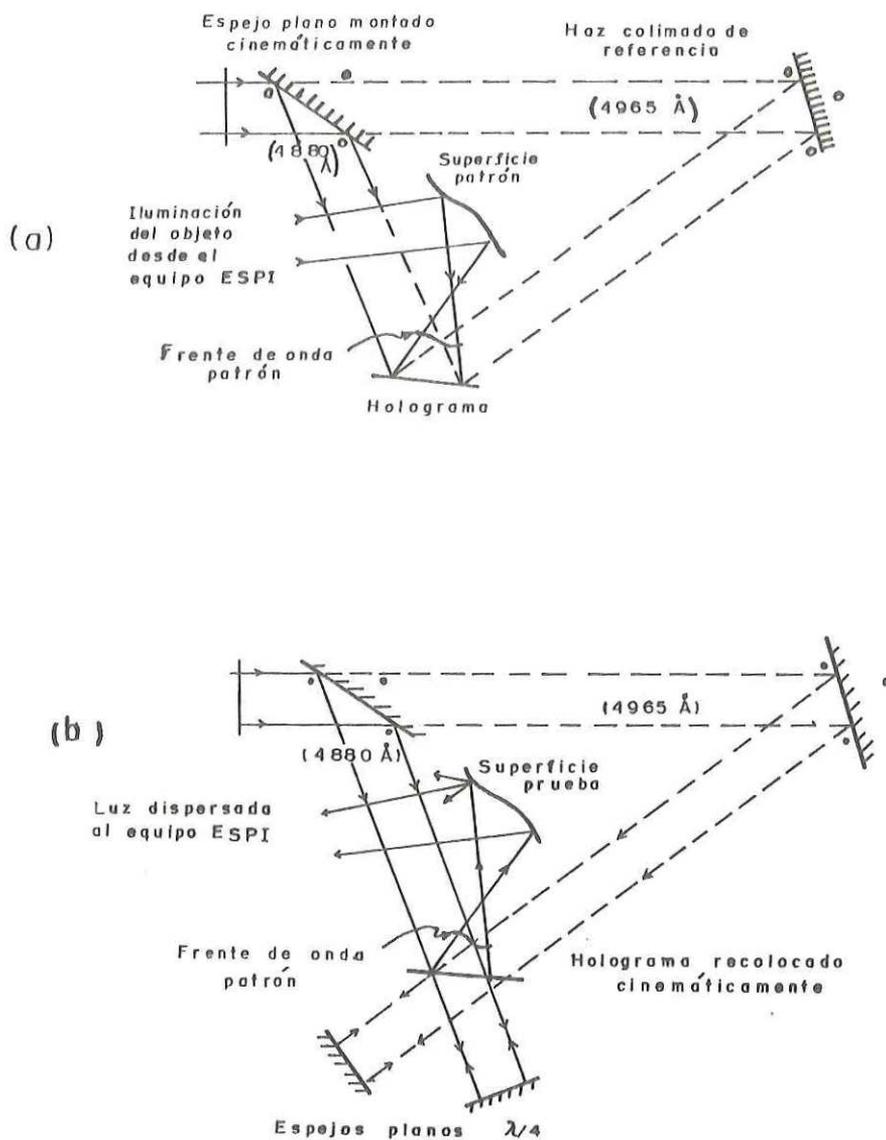


Figura 12.- Arreglos ópticos para HIC :
 a) Grabado de los hologramas.
 b) Reconstrucción y contorno.

causada por el polvo en la superficie entre el filtro espacial y la cara del vidicón.

En cada uno de los tres casos se ilumina la superficie normalmente, y la luz dispersada de la superficie que está cercana a la dirección normal se colecta por la lente imagen. El intervalo del mapeo de contorno está dado por:

$$\delta = \lambda_1 \lambda_2 / 2(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (52)$$

En esta relación, δ representa el cambio en profundidad por franja, medido a lo largo de la normal a la superficie. El primer patrón de granulado de Interferencia se graba usando λ_1 y se sustrae del patrón modificado formado por λ_2 en la cámara de grabado.

METODO HOLOGRAFICO:

El método HIC (Holographic Illumination Contouring) incorpora la reconstrucción holográfica de un frente de onda patrón el cual se usa como referencia (Denby: 1976). Las componentes bajo prueba se iluminan bajo la misma geometría usada para grabar el holograma del frente de onda que servirá de referencia, de tal forma que el frente de onda reflejado por cada una de éstas se compara con el reflejado por la forma patrón.

El holograma se graba usando dos longitudes de onda:
 I.e. se graban dos hologramas de la superficie patrón con cada una de las longitudes de onda en una misma placa holográfica como se muestra en la Fig.12a .

MAPEO DE CONTORNOS POR GRANULADO LASER

En esta técnica (Jaisingh: 1981), para determinar los contornos de una superficie mediante Interferometría de granulado se graba un Interferograma de doble exposición dando una pequeña inclinación entre las exposiciones, luego el Interferograma se somete a un filtraje de Fourier para obtener los contornos de la superficie. El objeto bajo estudio (Fig.13) se ilumina con luz láser colimada y se observa mediante una cámara cuyo eje es paralelo a la iluminación (Fig.15). Bajo estas condiciones su imagen se forma en un plano colocado a una distancia D . Si el objeto se inclina una pequeña cantidad ϕ , el movimiento lateral total U en el plano de la película está dado por

$$U = M(2h\phi + R\phi\cos\alpha) , \quad (53)$$

donde M es el factor de amplificación y el término $2h$ surge del cambio en el ángulo de reflexión en la luz reflejada por la superficie del objeto. Esto es válido para cualquier ángulo de incidencia y cualquier punto sobre la superficie

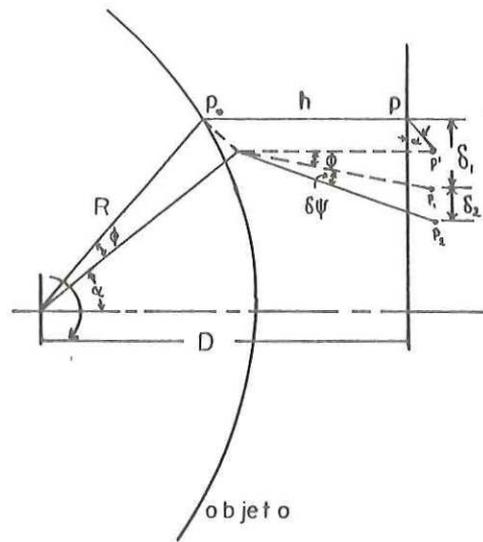


Figura 13.- Geometría del movimiento de granulado para estudiar el contorno.

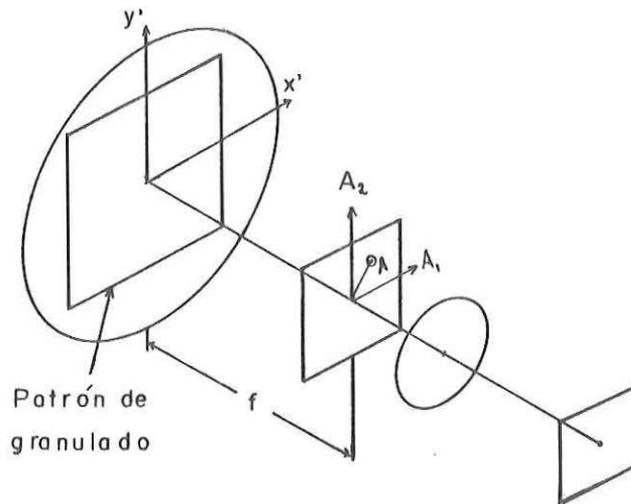


Figura 14.- Esquema de filtraje del método de campo total.

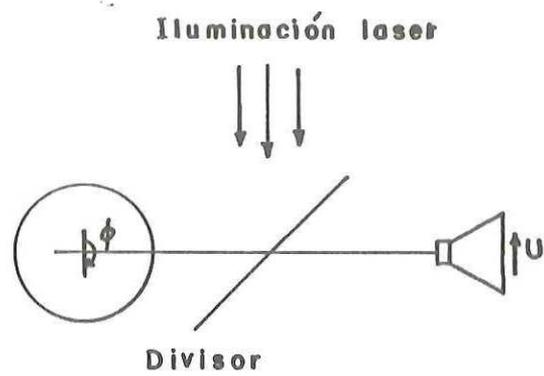


Figura 15.- Esquema del conjunto experimental.

del objeto, independientemente de su estructura, por lo que la aproximación considerada (Jaisingh: 1981) no es necesaria.

Ya que

$$\cos \alpha \approx (D - H)/R \quad , \quad (54)$$

entonces:

$$U = M\phi(2h + D - h) \quad (55)$$

$$U = M\phi h + M\phi D \quad (56)$$

La ecuación (56) representa el desplazamiento del granulado en cualquier punto.

Al filtrar un Interferograma de doble exposición mediante el método de campo total como se muestra en la Fig. 14, las franjas representan contornos de igual desplazamiento (Khetan: 1976).

El incremento en el desplazamiento Δ entre dos franjas sucesivas está dado por $\Delta = (\lambda f)/A$, donde λ es la longitud de onda de la luz filtrada, f es la distancia al plano de la transformada, y A es la posición de la abertura.

Entonces, cuando un Interferograma de granulado con un desplazamiento de campo dado por la Ec.(56) se filtra, el desplazamiento entre dos franjas sucesivas está dado por:

$$(M\zeta h + M\zeta D)_{n+1} - (M\zeta h + M\zeta D)_n = f/\lambda \quad , \quad (57)$$

donde los subíndices representan el orden de la franja. En la Ec.(57) todos los parámetros son constantes excepto h , reduciéndose a:

$$M\zeta(h_{n+1} - h_n) = \lambda f/\lambda \quad , \quad (58)$$

donde h es la profundidad de la n -ésima franja. La Ec.(58) representa la posición de las franjas de contorno de la superficie.

La sensibilidad de esta técnica depende de la inclinación dada entre las dos exposiciones. Debido al deterioro en la definición de las franjas, es posible solamente realizar pequeños desplazamientos ($\approx 5 \times 10^{-3}$ rad).

Las ventajas de esta técnica sobre otros métodos de granulado reportados (Jaisingh : 1981) es que no requiere de fluidos o del uso de dos longitudes de onda.

II ANALISIS TEORICO-EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE ALGUNAS TECNICAS PARA EVALUAR LA FORMA DE LA SUPERFICIE DE UN OBJETO NO PULIDO.

II.1 INTRODUCCION.

Se presenta la parte experimental de las técnicas. Interferometria de holograma de desplazamientos rigidos, franjas de Young proyectadas y método de franjas de Moiré, así como los resultados obtenidos para cada una de ellas.

Se hace el análisis de error y se discuten los factores más determinantes. Se calcula las contribuciones al error considerando que se desean precisiones del 1%.

II.2 INTERFEROMETRIA DE HOLOGRAMA DE DESPLAZAMIENTOS RIGIDOS.

Se inició el estudio de la forma de una superficie utilizando técnicas de Interferometria de tiempo real para determinar el intervalo de trabajo: y de doble exposición para obtener patrones de franjas estables y con buen contraste. Se realizó un desplazamiento rigido del objeto perpendicular a la dirección de observación bajo la geometria de un arreglo óptico de Fraunhofer (Fig.17)

Este consistía de un láser He-Ne de 35 mw (1), un



Figura 16.- Fotografía correspondiente al interferómetro holográfico de Fraunhofer utilizado en el análisis de formas de superficies mediante desplazamientos rígidos.

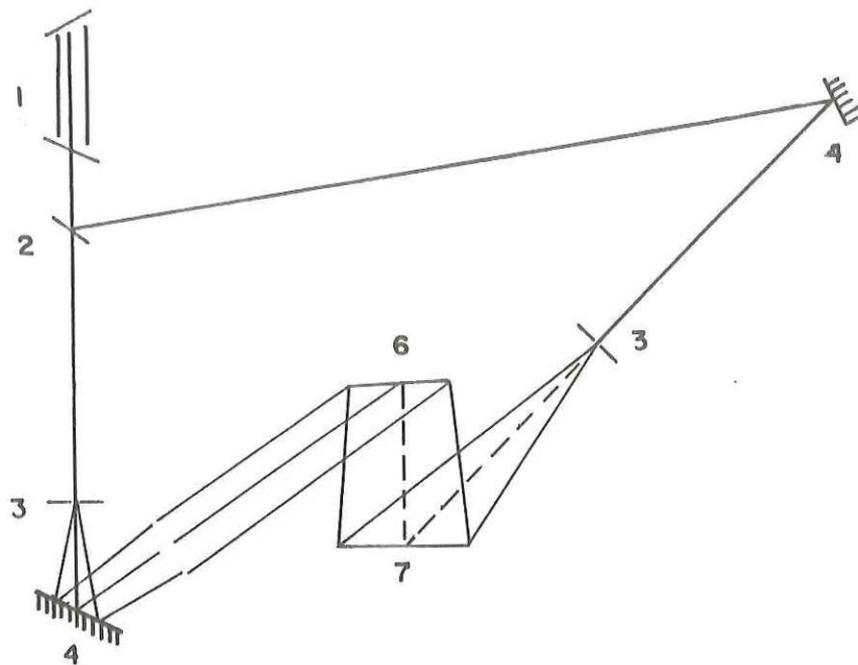


Figura 17. - Interferómetro holográfico de Fraunhofer utilizado en el análisis de formas de superficies mediante desplazamientos rígidos.

atenuador variable (2), un filtro espacial (3), un espejo plano (4), una lente colimadora (5), un objeto (6) y una placa holográfica 8E75 (7).

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Se tomó un holograma de doble exposición para un desplazamiento lateral $D_x = 5.55 \times 10^{-2}$ mm de una superficie plana y de una superficie convexa cuyos diámetros fueron respectivamente 9.85 cm y 7.5 cm. En la Figs.18 y 19 se muestran los patrones de franjas observadas a una distancia de 70 cm.

En estas fotografías puede observarse que existe otro factor que domina sobre el perfil de la superficie, ya que para la superficie plana se obtuvo una mayor deformación de las franjas que para la superficie convexa.

Con el propósito de investigar su origen se realizaron observaciones de estos patrones de franjas conservando fija la posición del holograma y variando la posición de observación en x como se muestra en la Fig.20.

Se obtuvieron patrones de interferencia también para una posición del observador $H_o = 1.09$ m. Las imágenes correspondientes se muestran en las Figs.21 y 22. En ambos

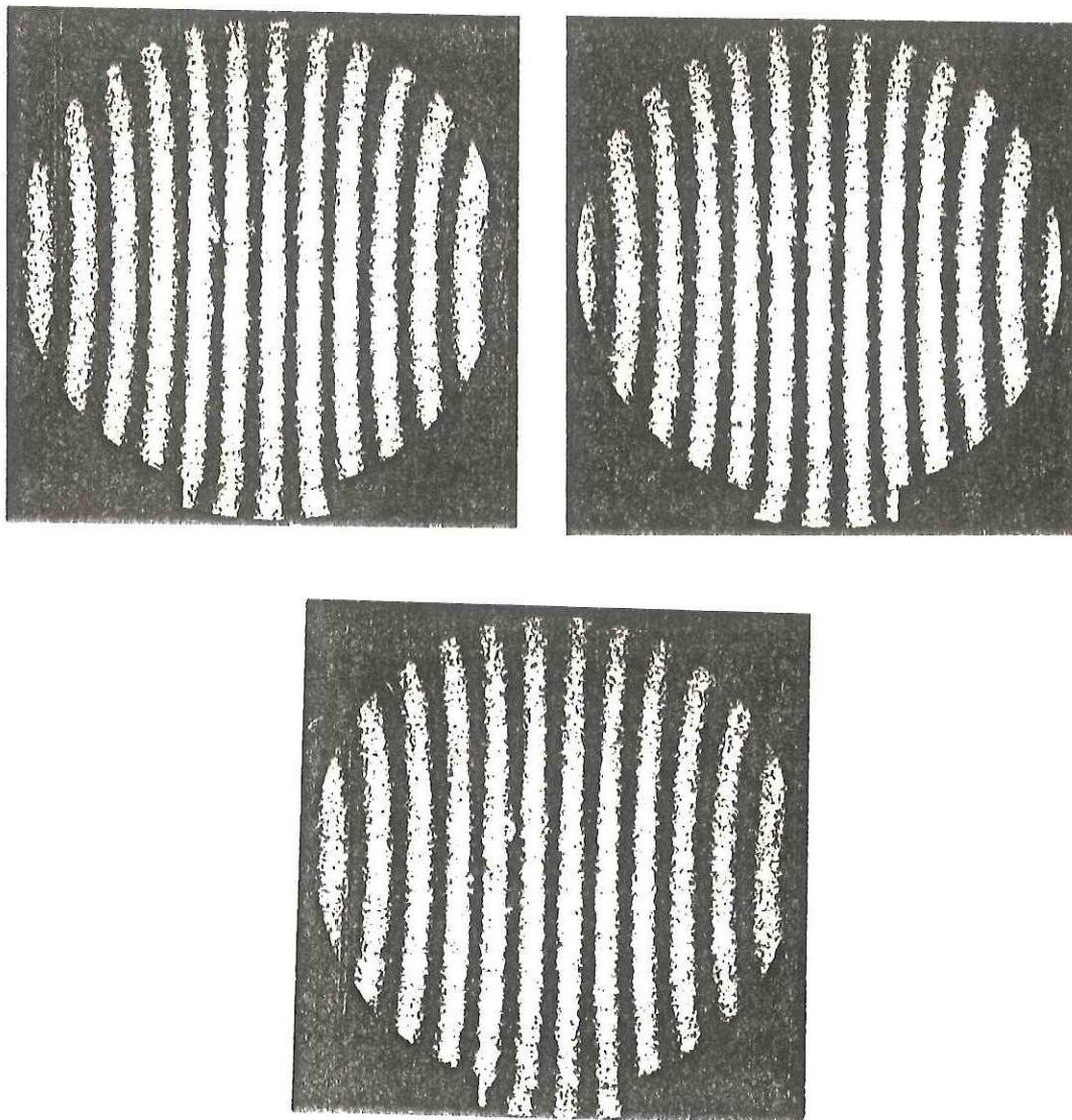


Figura 18.- a) Imágenes correspondientes a un holograma de doble exposición en un movimiento de traslación, donde $H_0 = 70\text{cm}$. La relación de amplificación es $1:1/2$. Para una superficie plana en $-x = -2\text{ cm}$, $x_0 = 0\text{ cm}$ y $x_2 = 4\text{ cm}$.

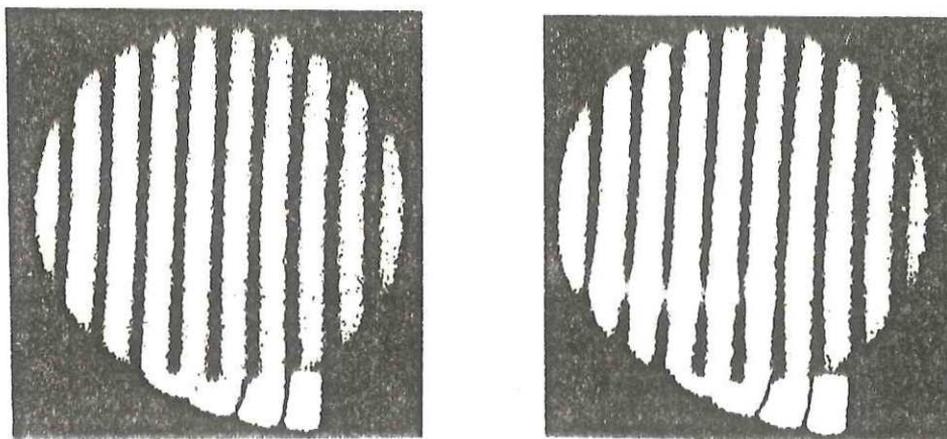


Figura 19.- b) Imágenes correspondientes a un holograma de doble exposición en un movimiento de traslación, donde $H_0 = 70$ cm . La relación de amplificación es $1:1/2$. Para una superficie convexa en $-x_2 = -4$ cm y $x_0 = 0$ cm.

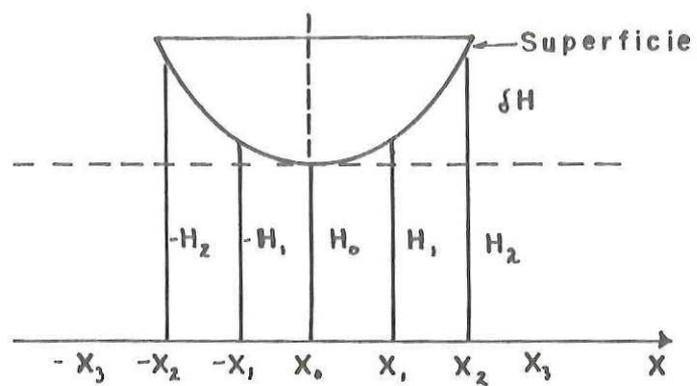


Figura 20.- Diagrama de las posiciones de observación y cambios δH en la superficie analizada.

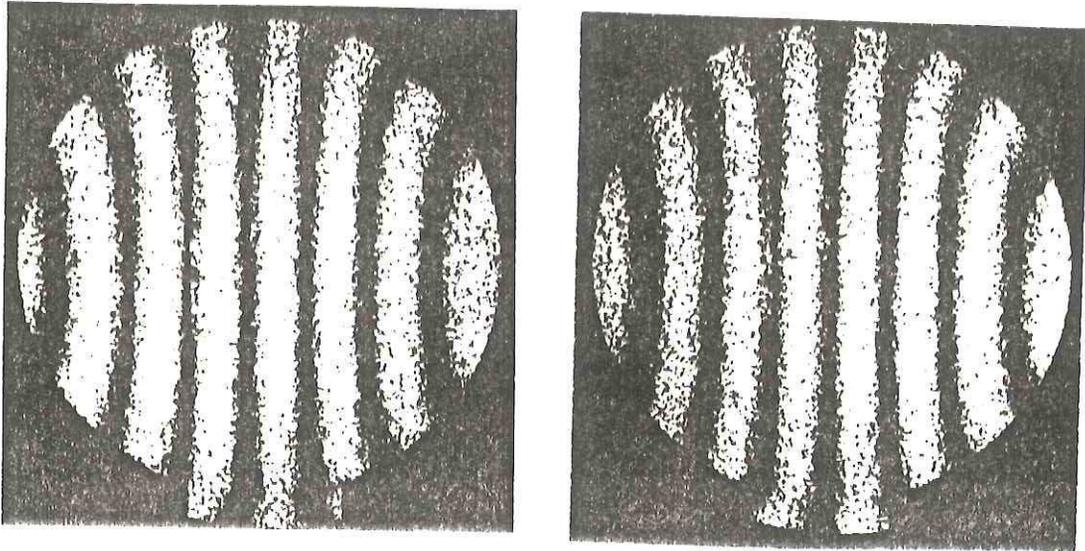


Figura 21.- a) Imágenes correspondientes a un holograma de doble exposición en un movimiento de traslación, donde $H_0=1.09$ m. La relación de amplificación es $1:1/2$. Para superficie plana en $-x_2 = -4$ cm y $x_1 = 2$ cm.

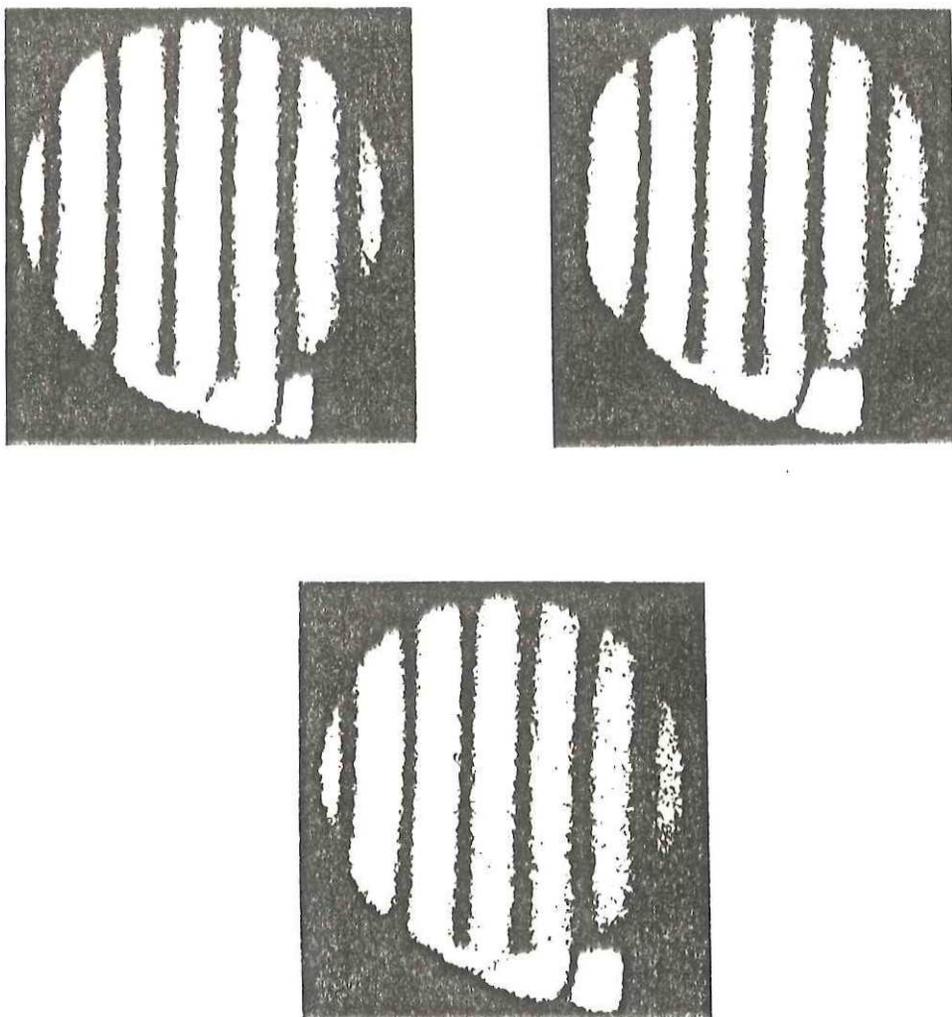


Figura 22.- b) Imágenes correspondientes a un holograma de doble exposición en un movimiento de traslación, donde $H_0 = 1.09$ m. La relación de la amplificación es $1:1/2$. Para una superficie convexa en $-x = 2$ cm, $x_0 = 0$ cm y $x_3 = 4$ cm.

casos (Figs.18 y 19, Figs.21 y 22) se seleccionaron patrones de franjas con posiciones similares de los máximos de Interferencia para poder compararlos más fácilmente.

Comparando los resultados para los valores de H se observa que para los dos tipos de superficies el número de franjas disminuye conforme aumenta la distancia del observador a la superficie, de acuerdo a la relación (6). En referencia a la variación de la posición de observación a lo largo del eje x, puede verse que como lo predice la Ec.(9) la variación en la posición de las franjas de Interferencia es muy pequeña bajo las condiciones del experimento reportado.

ANALISIS DE ERROR

Como Dx es despreciable comparado con x entonces la Ec.(9) puede escribirse como:

$$\delta H \approx H(x_2 - x_1)/x_1 = H \delta x/x \quad (59)$$

donde $x_2 - x_1 = \delta x$. En este caso x es la posición real de la franja y x_1 es la posición que tendría si el objeto fuera plano. Utilizando una aproximación lineal en la contribución del error asociado a cada parámetro

$$\partial(\delta H) = (x_2 - x_1) \partial H/x_1 + H \partial x_2/x_1 + H x_2 \partial x_1/x_1^2 \quad (60)$$

Si $\partial x_2 = \partial x_1$ y además se considera que $x_2/x_1 \approx 1$ (franjas contiguas, poco espaciadas) se tiene volviendo a la notación anterior que

$$\partial(\delta H) \approx x \partial H/x + 2H\partial x/x \quad (61)$$

Si se desean medir cambios en la altura de la superficie con una exactitud del 1%

$$\partial(\delta H) \times 100 / \delta H = 1\% \quad (62)$$

se debe satisfacer, considerando sólo la contribución del primer término:

$$\partial H \times 100 / H \leq 1 \quad (63)$$

donde se ha hecho uso de la (Ec.59). Para $H_0 = 70$ cm se tiene que el error en ∂H en esta medida debe ser menor de 7 mm: i.e. la precisión en la medición de H no es una limitante para alcanzar la exactitud propuesta.

Respecto al segundo término, para satisfacer la exactitud del 1%

$$(\partial x / x) \times 200 \leq 1 \quad (64)$$

en nuestro experimento $x = 9.85$ cm y 7.5 cm.

$$\Delta x = 9.85 \text{ cm} / 200 = .49 \text{ mm} \quad (65)$$

$$\Delta x = 7.5 \text{ cm} / 200 = .37 \text{ mm} \quad (66)$$

y conforme nos acercamos al eje óptico, este valor se va haciendo cada vez menor.

Tendrían que usarse arreglos con valores pequeños de la distancia entre el objeto y el sistema de observación (H), para poder incrementar el valor de Δx ya que el factor que modula la sensibilidad está dado por la razón x/H . Sin embargo este acortamiento en la distancia de trabajo está limitado debido a que se trabaja en la aproximación de Fresnel. La precisión en la medida de la posición de la franja es el factor que limita la exactitud de esta técnica.

11.3 FRANJAS DE YOUNG PROYECTADAS

Para generar las franjas de Young se utilizó el arreglo que se muestra en la Fig.23. Aquí se hace uso de una fibra óptica para poder cambiar la posición de la fuente.

El arreglo consta de un láser de He-Ne de 35mw (1), de un divisor de haz (2), de un filtro espacial (3), de una fibra óptica (4), de una lente colimadora (5), de una

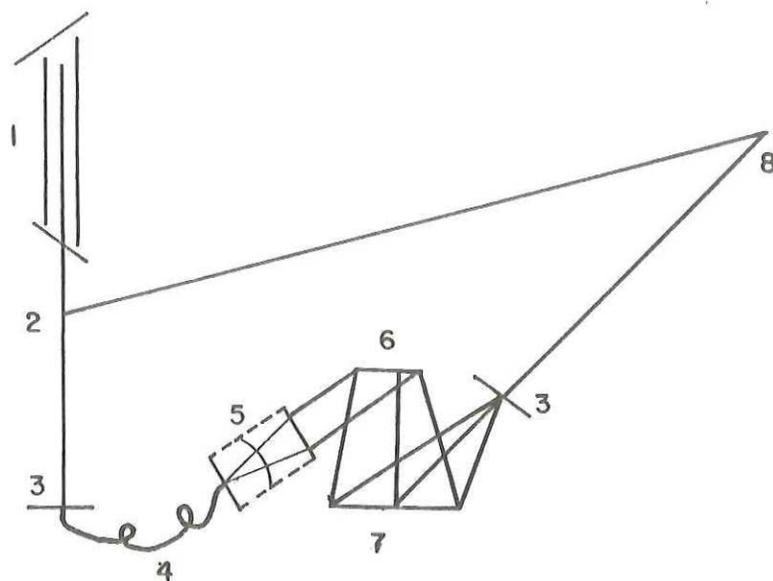


Figura 23.- Interferómetro holográfico de Fraunhofer utilizado en el análisis de formas de superficies mediante franjas de Young.

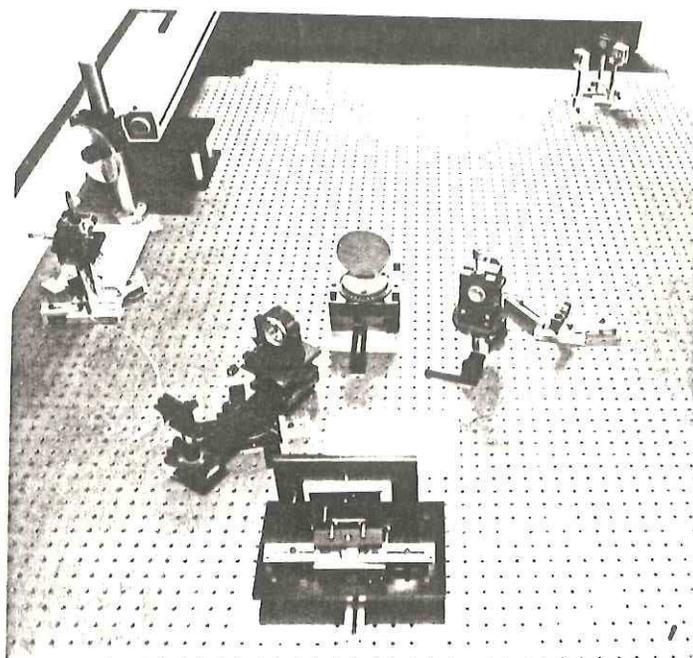


Figura 24.- Fotografía del interferómetro holográfico de Fraunhofer utilizado en el análisis de formas de superficies mediante franjas de Young.

superficie prueba (6), de la placa holográfica (7) y de un espejo plano (8).

Se grabó en el holograma el frente de onda proveniente de la lente colimadora determinando así la posición para la fuente de iluminación: posteriormente la lente se giró generando así una segunda fuente ligeramente desplazada de la anterior.

El uso de una fibra óptica en el arreglo Fraunhofer presentó el problema de insuficiente intensidad luminosa para grabar el holograma por lo que se eliminó la fibra óptica y se utilizó el mismo arreglo de los experimentos de evaluación de formas de superficies mediante desplazamientos rígidos. En este caso se hizo patente la importancia de utilizar en esta técnica una lente de buena calidad. Las franjas de Young se proyectaron sólo en una parte de la superficie ya que el tamaño del haz de luz colimado no es suficiente para iluminar completamente el objeto.

Las franjas se proyectaron en la superficie cuya forma se desea analizar a la vez que en una superficie plana de referencia colocada en el mismo plano de la orilla de la superficie prueba.

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

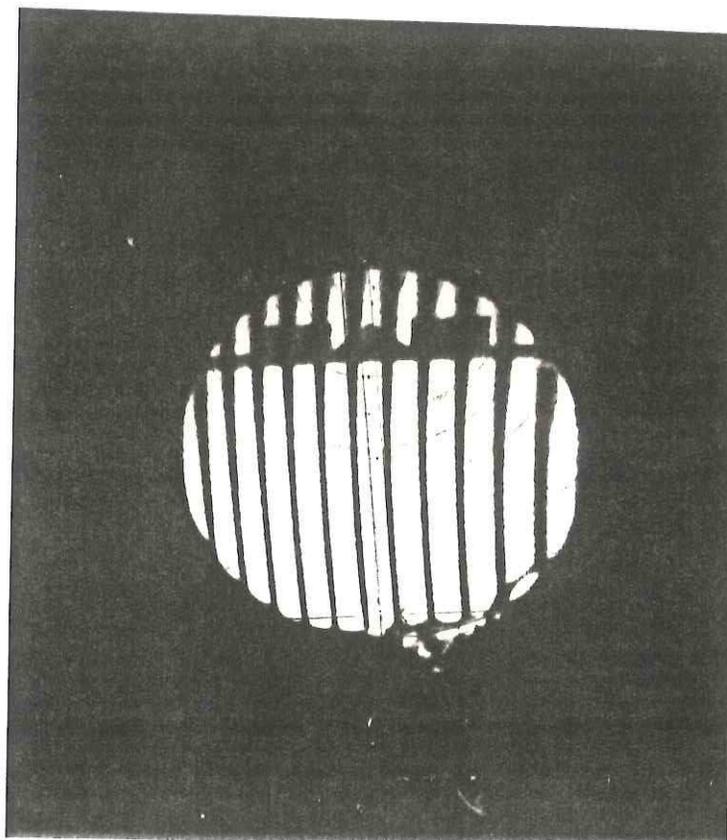


Figura 25. - Fotografía de las franjas de Young en una superficie plana (radio que delimita la superficie : 4.93 cm, utilizando un vernier).

Se observa que para una superficie plana (Fig.25) no se obtienen franjas completamente rectas lo cual se debió también en este caso a la calidad del frente de onda usado para generar las franjas de Young. Pudo observarse que conforme se incrementa el ángulo entre el haz que incide sobre la superficie y la dirección de observación esta contribución se hace aún mayor, funcionando el arreglo cada vez más como un Interferómetro de desplazamiento lateral.

11.4 METODO DE FRANJAS DE MOIRE

Utilizando el arreglo de D.M. Meadows (1970) se generan contornos teniendo la fuente y el observador a una distancia finita de la rejilla.

Utilizando el arreglo óptico de la Fig.26 se proyectan franjas de Moiré sobre superficies cuya forma se desea analizar.

La componente de la distancia en z de la fuente a la rejilla y del observador a la rejilla son iguales: es decir $h_1 = h_2$ de acuerdo a lo requerido en la Ec.(45).

Se trabaja con luz no colimada proyectando una rejilla sobre un objeto cuya forma se desea analizar y se observan los patrones Moiré a diferentes ángulos β como se muestra en

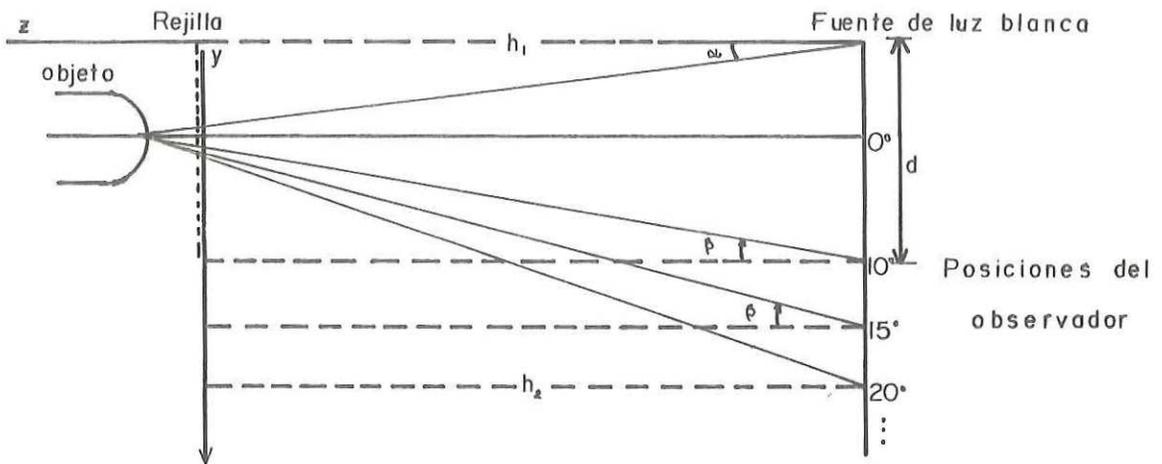


Figura 26.- Sistema óptico para mapeo de contornos Moiré.

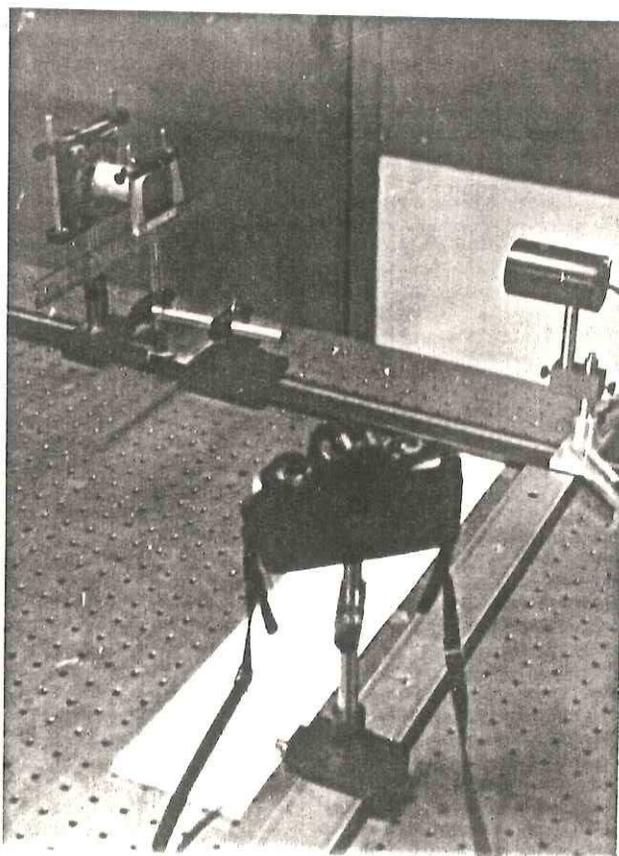


Figura 27.- Fotografía del sistema óptico para mapeo de contornos Moiré.

la Fig. 26. Se utiliza una escala como referencia para amplificar los patrones en una relación de 1:1. Los objetos analizados corresponden a una superficie convexa, una superficie cóncava y una superficie plana, respectivamente. Los patrones se obtienen superponiendo la rejilla con su sombra.

Teóricamente se tiene que la separación entre dos puntos con respecto a la profundidad está dado (Meadows: 1970) por:

$$\Delta z = Nph/d \quad , \quad (67)$$

donde N es el número de franjas entre los puntos z_1 y z_2 , p es el periodo de la rejilla, h es la distancia entre fuente y rejilla y d es la separación entre la fuente y el observador.

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Se obtuvieron patrones de Moiré (Fig. 28) para h constante y diferentes posiciones del observador sobre d. Las posiciones en d variaron angularmente entre 10° y 50° como se muestra en la Fig. 26.

El patrón de Moiré nos da información cualitativa y cuantitativa acerca de la forma de una superficie .

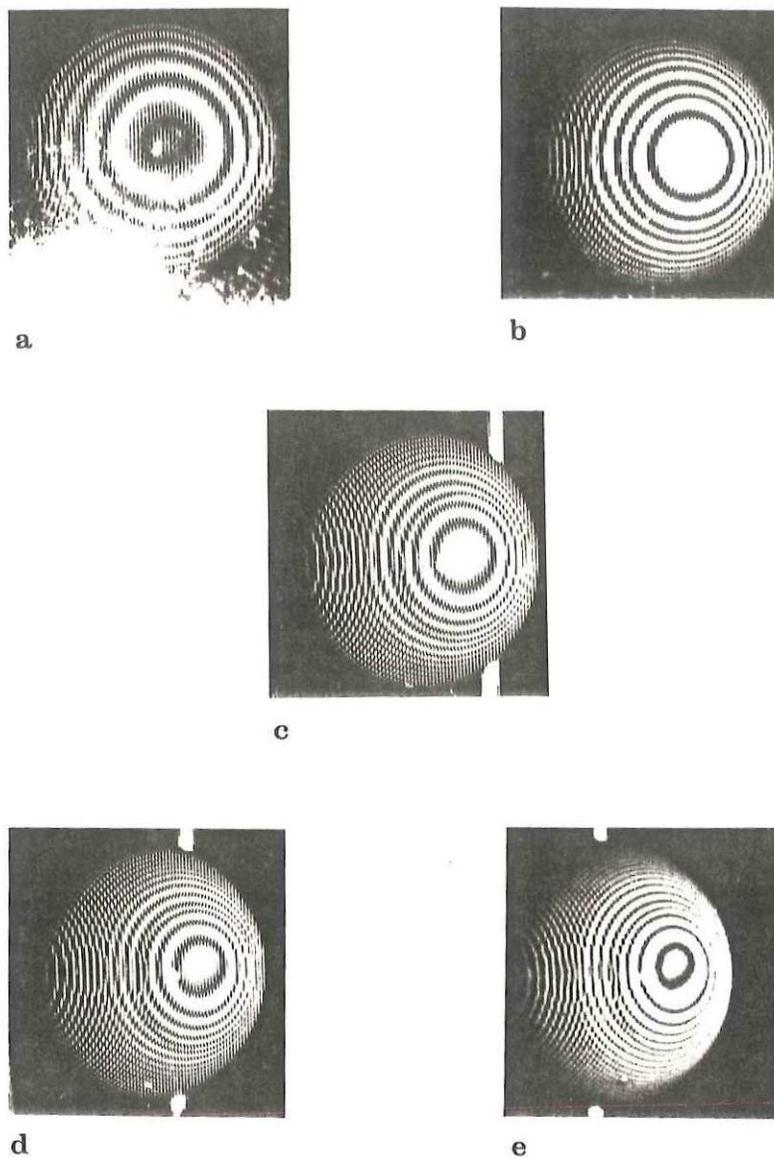


Figura 28.- Fotografías correspondientes a mapeos de contornos Moiré para una superficie convexa con variación angular en la dirección de observación conservando h constante ($h_1 = h_2 = 42.1$ cm, diámetro de delimitación = 3.59 cm).

- a) $d = 12.2$ cm, $\theta = 10^\circ$;
- b) $d = 23.3$ cm, $\theta = 25^\circ$;
- c) $d = 30.3$ cm, $\theta = 35^\circ$;
- d) $d = 35.1$ cm, $\theta = 40^\circ$;
- e) $d = 42.0$ cm, $\theta = 45^\circ$;

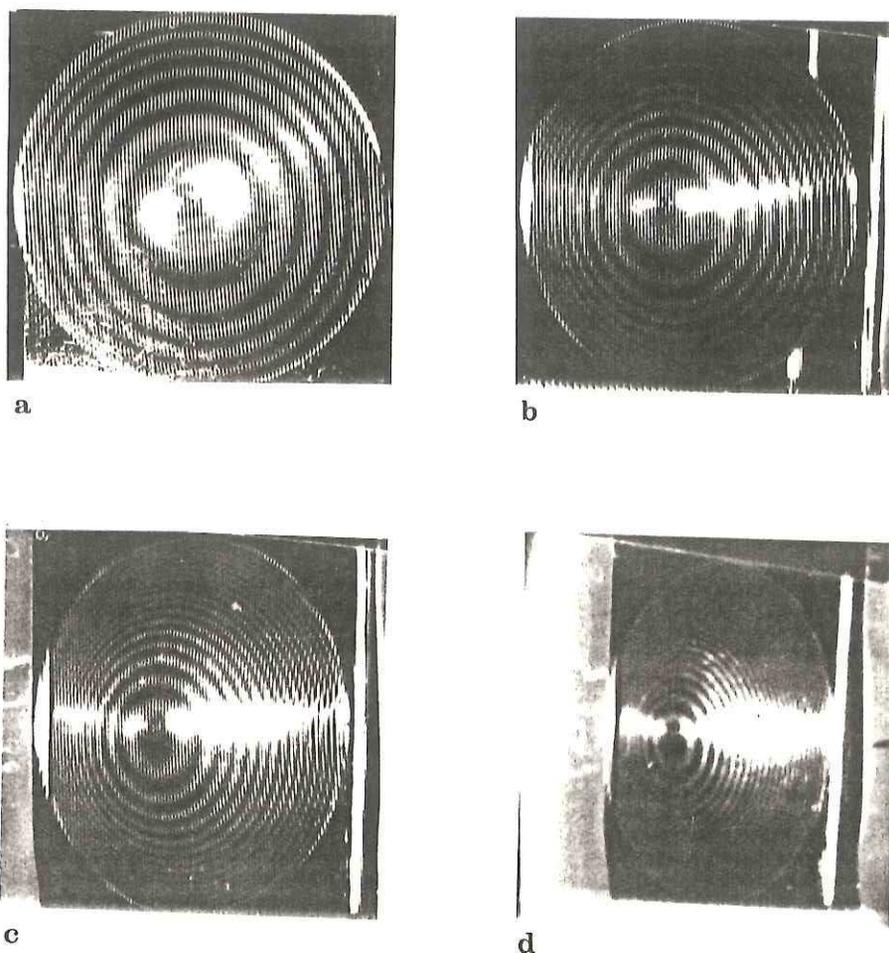


Figura 29.- Fotografías correspondientes a mapeos de contornos Moiré para una superficie cóncava de con una variación angular en la dirección de observación conservando h constante ($h_1 = h_2 = 42.1$ cm, diámetro de delimitación 4.99 cm).

- a) $d = 12.2$ cm, $\theta = 10^\circ$;
- b) $d = 23.3$ cm, $\theta = 25^\circ$;
- c) $d = 35.1$ cm, $\theta = 40^\circ$;
- d) $d = 52.0$ cm, $\theta = 50^\circ$.

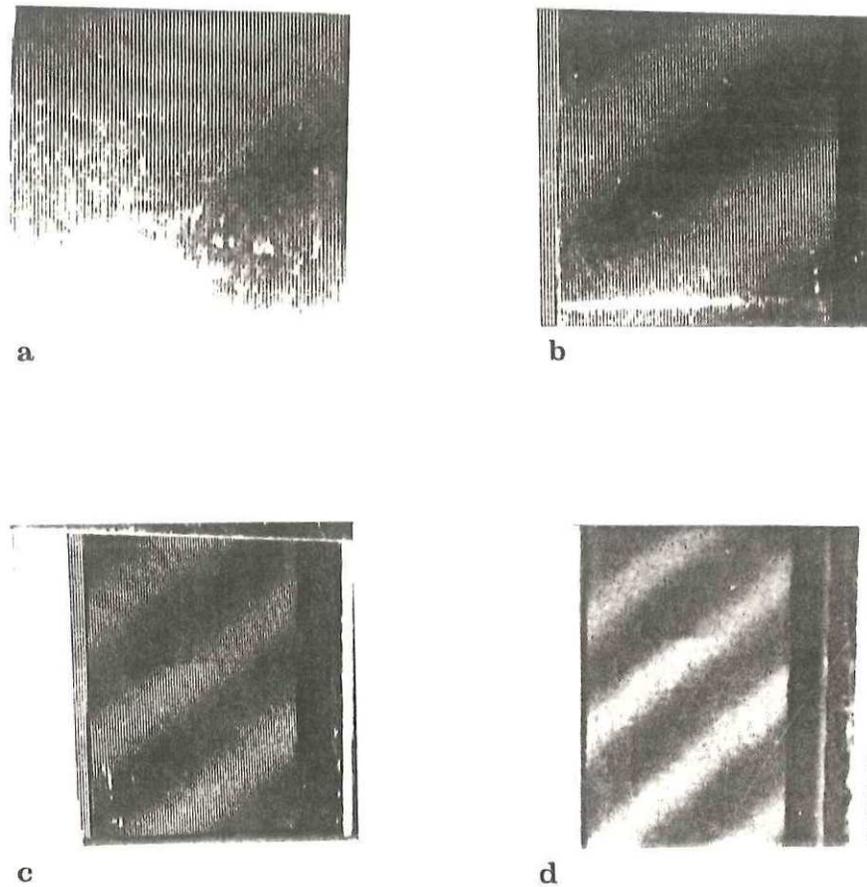


Figura 30.- Fotografías correspondientes a mapeos de contornos Moiré para una superficie plana con variación angular en la dirección de observación conservando h constante ($h_1 = h_2 = 42.1$ cm)

- a) $d = 12.2$ cm, $\theta = 10^\circ$;
- b) $d = 23.3$ cm, $\theta = 25^\circ$;
- c) $d = 35.1$ cm, $\theta = 40^\circ$;
- d) $d = 52.0$ cm, $\theta = 50^\circ$.

Trabajando en tiempo real se obtuvo la diferencia en altura para dos puntos de la superficie variando la posición de observación, luego se midió esta diferencia con un microscopio.

Se tiene que para una superficie convexa el número de franjas entre los dos puntos de acuerdo a la posición del observador está dado en la tabla 1.

Tabla 1. Diferencia de altura para dos puntos en una superficie convexa cuando cambia la posición del observador

θ ($^{\circ}$)	10	15	20	25	30	35	40
d (cm)	12.2	16.0	20.1	23.3	27.1	30.3	35.1
N	3	4	5	5	6	7	8
z (mm)	5.176	5.262	5.236	4.517	4.660	4.860	4.797

Para valores mayores de θ no se tiene resolución visual suficiente para contar el número de franjas. Δz se obtiene de acuerdo a la Ec.(45), donde p es el período (Inverso de la

frecuencia) de la rejilla.

La frecuencia de la rejilla se midió usando un microdensitómetro Perkin Elmer mod.10 siendo $f = 2$ franjas/mm. Utilizando un microscopio para medición se obtuvo una diferencia de altura $\Delta z = 5$ mm para un punto sobre la superficie del objeto y el vértice de dicha superficie. La profundidad de este mismo punto con respecto al vértice se midió utilizando las franjas Moiré. Se observa que para $\theta = 35^\circ$ (Fig.28) la diferencia Δz determinada por el patrón de Moiré y el microscopio de medición es muy cercana comparada con las diferencias obtenidas para los otros ángulos.

ANALISIS DE ERROR.

De la Ec. (45) se tiene que

$$\frac{\partial \Delta z}{\Delta z} = \left(\frac{\partial N}{N} \right) + \left(\frac{\partial P}{P} \right) + \left(\frac{\partial h}{h} \right) + \left(\frac{\partial d}{d} \right) \quad , \quad (68)$$

donde $\frac{\partial N}{N}$ es el error en la medición del número de franjas entre los puntos donde se quiere determinar la profundidad. Este error es doble ya que se presenta en la ubicación de la franja correspondiente a la posición de referencia y en la ubicación de la franja correspondiente a la posición cuya profundidad relativa se desea conocer. Como puede verse de

la Fig. 28, existe un error máximo cuando se mide la profundidad de un punto con respecto al vértice ya que la franja que comprende este último es más ancha que las demás.

Se obtiene un error mínimo cuando el ancho de las franjas es el mismo que el de la rejilla proyectada lo cual ocurre si la luz es colimada. En nuestro caso se tiene luz no colimada por lo que el ancho de las franjas en el objeto depende de la distancia rejilla-objeto.

Para calcular el error introducido en la ubicación de cada franja se puede leer su ancho mediante el microdensitómetro. Para las franjas cuyo ancho coincide con la de la rejilla el error llega a ser:

$$\partial N/N = 2 (5\mu/240\mu) = 4.16\% \quad . \quad (69)$$

$\partial P/P$ es el error en la medición del periodo de la rejilla de donde para calcular el error en el periodo se mide la frecuencia mediante el microdensitómetro dando

$$\partial P/P = 5\mu/0.5 \times 10^3 \mu = 1\% \quad . \quad (70)$$

La contribución en el error de la medición de la componente de la distancia en z entre la rejilla y la fuente (que es la misma que de la rejilla al observador) es la que es dada por el instrumento de medición que es igual a .5 mm y

la de paralaje calculándose para un ángulo de 5° que es de 1.6020 mm de tal forma que se obtiene un total en el error de

$$\partial h/h = .5\text{mm}/421\text{mm} + 1.61\text{mm}/421\text{mm} = 0.5\% \quad (71)$$

si el ángulo se reduce a 1° , este valor baja al 0.13%.

Tomando las mismas consideraciones de contribución en el error para d la distancia entre fuente y observador se obtiene

$$\partial d/d = .5\text{mm}/303.0\text{mm} + 1.157\text{mm}/303.0\text{mm} = .55\% \quad (72)$$

si el ángulo se reduce a 1° , este valor decrece a 0.18%.

El error total para Δz es

$$\partial \Delta z / \Delta z = 5.44\% ; \partial \Delta z = 0.272 \quad (73)$$

Se observa que la mayor contribución al error es la dada por $\partial N/N$ es decir la medición del número de franjas entre dos puntos dados .

Una alternativa para mejorar esta medida consiste en leer las franjas tomando una orilla como referencia en vez de considerar la incertidumbre en la posición asociada al ancho total de la franja.

Otra manera de disminuir esta contribución consiste en aumentar la frecuencia de la rejilla.

Cuando se mide la diferencia de profundidad mediante el microscopio se considera que la contribución en el error del Instrumento es de .05 mm equivalente al 1%.

Si consideramos un ángulo de 5° , se obtiene un error para el paralaje que equivale al .38%. El error total obtenido es entonces de 1.38% de donde $\Delta z = 0.069$ mm. Considerando el error en la técnica de Moiré y el error de medida en el microscopio, se tiene que dentro del error experimental todos los valores coinciden, salvo el correspondiente a 25° .

III DISCUSION SOBRE LA APLICACION DE LAS TECNICAS, EL INTERVALO DE MEDIDA Y PRECISION

III.1 INTRODUCCION.

Se hace un estudio de los sistemas ópticos para la obtención de información de la forma de la superficie en cuanto a las componentes requeridas y la complejidad asociada al proceso de medida.

Se compara la precisión de las técnicas y su sensibilidad para de acuerdo a ello poder sugerir el tipo de técnica a utilizar en los siguientes procesos: medición de superficies patrón, control de calidad de superficies terminadas y control de calidad de superficies durante el proceso de fabricación.

Se discuten los resultados experimentales obtenidos tanto de las técnicas realizadas en el laboratorio como de las encontradas en la literatura.

III.2 INTERFEROMETRIA DE HOLOGRAMA DE DESPLAZAMIENTOS RIGIDOS

Esta técnica requiere del uso de luz láser. Para un desplazamiento lateral ($D_x = 5.55 \times 10^{-2}$ mm) las franjas que aparecen presentan poco corrimiento debido a la baja

detectabilidad de esta técnica. Experimentalmente se tiene poca sensibilidad a la forma en observaciones cercanas al eje óptico, como se mostró en la Ec. (9).

Ya que la teoría presentada es válida sólo para desplazamientos pequeños observados de modo que la aproximación Fresnel pueda utilizarse, i.e. $x \ll H$; y por otra parte la desviación de la franja es proporcional al cambio en la profundidad del perfil multiplicado por x/H ; es necesario hacer un compromiso entre ambos factores para obtener una sensibilidad máxima. Esta técnica requiere del uso de arreglos cortos para obtener una precisión mejor. La precisión de medida es porcentual; i.e. conservando la misma precisión en la medida de cada parámetro (posición de las franjas y distancia objeto sistema de observación), el valor neto del error asociado a diferencias de altura entre dos puntos sobre el objeto se incrementa en forma directa con la altura relativa entre los mismos.

En lo que respecta a ruido, se tiene el asociado a la forma del frente de granulado de la luz láser y la modulación de la intensidad de la luz asociada a la rugosidad de la superficie. El granulado de la luz láser y la dispersión en la superficie rugosa limitan la precisión de medida en la posición de las franjas de interferencia. El granulado de la luz láser puede promediarse fácilmente por medios ópticos, pero la componente de la luz incidente dispersada por la

superficie rugosa en la dirección de observación, depende de la pendiente de la superficie del objeto. Este factor limita la precisión en la localización de las franjas en mayor o menor medida, dependiendo de los cambios en el valor de la pendiente de la superficie del objeto y de la distribución angular de la radiancia de la superficie rugosa. Es necesario estudiar esta dependencia para determinar los límites válidos en la detección de fase a partir de máximos o mínimos de densidad óptica. Cabe hacer notar que de los resultados obtenidos se tiene que la variación en la posición de las franjas de interferencia ∂x con el perfil del objeto tiene una dimensión tal que esta corrección debe considerarse como un factor de ruido en el análisis de deformaciones por interferometría de holograma, cuando éste llega a precisiones de fracciones de franja, al igual que la forma del frente de onda utilizado.

En base a su baja sensibilidad esta técnica se recomienda para superficies que tienen pendientes grandes.

Si se supone un error de $\delta H/H \times 100 < 1\%$ para la diferencia de altura entre dos puntos, se tiene que la contribución mayor se debe al error introducido al establecer el corrimiento de la franja. Para esta precisión el error máximo permitido para las superficies plana y convexa respectivamente, es de $\partial x = .49$ mm y $\partial x = .37$ mm los cuales se observan son difíciles de obtener.

Esta técnica requiere gran estabilidad mecánica como cualquier sistema óptico cuyo principio de funcionamiento se basa en la Interferometría de holograma.

Experimentalmente se trabajó con un arreglo de dimensiones relativamente grandes ya que el camino óptico es de 3.07 m. Sin embargo éste se puede reducir utilizando iluminación colimada y limitar el campo de observación para trabajar en la aproximación de Fresnel, como lo plantea el modelo teórico.

III.3 FRANJAS DE YOUNG

Este método tiene sensibilidad media. Cuando el ángulo de proyección de franjas es de 45° se tiene que $\Delta z = \Delta x$, es decir, la diferencia de profundidad entre dos puntos está directamente dada por Δx : donde esta distancia representa el corrimiento de la posición de la franja entre el lugar que ocuparía cuando se tiene una superficie plana y su posición sobre una superficie distinta de ésta. Conforme β disminuye, la iluminación tiende a ser tangente a la superficie. Aunque se pierde información del lado no iluminado se tiene una mayor sensibilidad en el cambio de la posición de las franjas. Teóricamente se tiene que el error en la medida de la profundidad crece con el ángulo de medición.

Uno de los problemas que se presentan al evaluar las imágenes obtenidas es el hecho de que no se puede tomar como referencia de escala el borde del objeto a menos que el sistema óptico de información se enfoque sobre éste, lo cual limita el tipo de superficie que puede ser analizado. Es necesario contar dentro del campo de observación con una escala colocada en un plano sobre el cual se enfoca el sistema de observación.

Se tiene que para disminuir el error, la proyección de franjas tendría que ser casi tangente a la superficie. Para poder analizarla completamente es entonces recomendable tener a la vez, dos proyecciones de franjas, siendo ambas iluminaciones casi tangentes a la superficie y simétricas respecto al eje óptico del sistema de observación.

Teóricamente se tiene que el error $\delta \Delta z$ crece con el ángulo de incidencia de la luz como se analizó en la Ec. (13).

El error fue analizado en función de sus dos términos como se muestra en las gráficas 1, 2 y 3. Ambos términos muestran que el error $\delta \Delta z$ crece conforme el ángulo de incidencia β . De las gráficas se observa que la mayor contribución al error está dada por el primer término $2 \operatorname{tg} \beta \delta x$.

De la gráfica 1 se tiene que amplificando la parte correspondiente a $\delta \Delta z < 0.1 \text{ mm}$ y $\delta x < 0.1 \text{ mm}$ se obtiene la gráfica 2, en donde puede apreciarse que para $\beta = 45^\circ$ se tiene un error en $\delta \Delta z$ de 0.02 mm para $\delta x = 10 \mu\text{m}$ por lo que esta medida debe realizarse con un microdensitómetro.

De la gráfica 3 se puede ver que $\delta(\Delta z) = 0.02 \text{ mm}$ para $\beta = 45^\circ$ cuando $\Delta x = 0.57 \text{ mm}$.

A partir de estos resultados puede verse que no se requiere gran precisión en la medida del ángulo β , pero sí es importante ubicar con bastante precisión la posición de la franja, siendo esta última la contribución dominante en el error. No obstante es posible obtener con esta técnica una precisión del 1% si se cuenta con la óptica adecuada para generar franjas rectas que representen líneas con una desviación menor de $10 \mu\text{m}$.

III.4 FRANJAS PROYECTADAS Y HOLOGRAFIA

MEDIDAS DE CONTORNO UTILIZANDO FRANJAS PROYECTADAS PRODUCIDAS POR DOS FUENTES

En el método propuesto por Thalmann y Dändliker (1985) la precisión en la determinación del contorno del objeto depende principalmente de los errores en la medición de la

fase.

Suponiendo que ambas fuentes de iluminación están en el plano $y = 0$. El error estadístico δz como una función de la medición del error en la fase $\delta\phi$ está dada por:

$$\delta z \approx (d_g/k) (\delta\phi / \sin\alpha \Delta s) \quad (74)$$

donde d es la distancia de las fuentes al punto objeto $P(x)$, $k = 2\pi/\lambda$, $\delta\phi$ es el error en la medición de la fase, α es el ángulo que hacen los planos de las franjas con respecto al eje óptico y Δs es la distancia entre las fuentes de iluminación. La densidad de las franjas en el objeto la determina Δs . Dado que la densidad de las franjas máxima generalmente está limitada por la resolución del detector, no es adecuado estimar un error absoluto δz para la medición del contorno del objeto. Lo conveniente es indicar el error relativo al número de puntos resueltos en la imagen detectada y relativo al tamaño lateral del objeto. Si N_f es el número de franjas de contorno que atraviesan el objeto y L es la extensión lateral del objeto, el error relativo $\delta z/L$ de la ecuación anterior es:

$$\delta z/L = \delta\phi / 2\pi N_f \tan \alpha \quad (75)$$

Para estimar el error mínimo de un sistema dado, N_f puede reemplazarse por la razón del número de puntos

resueltos por el detector (píxeles) y el número mínimo de píxeles dentro de una franja, necesarios para conseguir una precisión máxima en la interpolación de la franja.

Se presentan ejemplos numéricos (Thalman: 1985) para la estimación del error relativo mínimo $\delta z/L$ (L es la extensión lateral) en la determinación del contorno del objeto con sistemas heterodinos y cuasi-heterodinos. Con ambos sistemas, típicamente 200 píxeles pueden resolver la imagen. Se supone que el número mínimo de píxeles dentro de una franja es 10, y $\tan \alpha = 0.5$. Para el sistema cuasi-heterodino es razonable una precisión en la medición de la fase de 1/100 de una franja, lo cual conduce a $\delta z/L = 10^{-3}$. Para un sistema heterodino, errores mínimos de fase de 1/1000 de una franja conducen a una precisión máxima relativa para el mapeo de contornos de $\delta z/L = 10^{-4}$. Por lo tanto para un objeto de 10 cm de diámetro $\delta z = 0.1 \mu\text{m}$, por lo que se puede medir con una precisión mejor del 1% en cambios en la altura mayores de $10 \mu\text{m}$.

Se muestra que para obtener una precisión razonable, el ángulo de iluminación no debe ser muy pequeño. La elección del ángulo de incidencia es un compromiso entre una buena sensibilidad y el evitar sombras en el objeto.

Esta es entonces una técnica muy precisa, limitada sólo por el hecho de que la fase y la densidad óptica están

relacionadas en una forma lineal, de tal manera que la Interpolación de franjas de Interferencia sea válida.

INTERFEROMETRIA DE SANDWICH DE HOLOGRAMAS.

En este método se tiene que el patrón de franjas es Independiente del punto de observación (franjas objetivas).

La principal desventaja al usar este método para propósitos de mapeo de contornos es que su sensibilidad es cero si la dirección de iluminación y la dirección de observación coinciden. Usualmente uno quiere que las superficies de intersección sean normales a la línea de observación (como es el caso con las líneas de nivel de los mapas). Para producir este resultado también el rayo de iluminación tiene que ser normal a la línea de observación, y en ese caso una gran parte de la superficie tiene sombras. La principal ventaja de este método es su simplicidad. Un análisis más profundo del mismo requiere de trabajo experimental utilizando esta técnica.

III.5 TECNICA MOIRE

Generación de mapeo de contornos Moiré con la fuente y el observador en el infinito

El sistema en esta forma tiene serias desventajas para usarlo en contornos en gran escala. Es inconveniente en muchos casos tener la fuente y el observador lejos de la rejilla ya que en este caso es difícil que las direcciones de observación y de iluminación satisfagan la relación $\tan \beta - \tan \alpha = 0$. Si esto no ocurre, la ecuación $\Delta z = Np / (\tan \alpha + \tan \beta)$ no es válida (Meadows: 1970). Si la fuente y el observador se colocan cerca, entonces se debe usar un sistema colimado y la superficie que se evalúa queda restringida al tamaño de la lente colimadora, lo cual limita fuertemente las dimensiones de los objetos que se pueden evaluar.

Derivando la expresión para Δz se obtiene que el error está dado por:

$$\frac{\partial \Delta z}{\Delta z} = \frac{\partial N}{N} + \frac{\partial P}{P} + \frac{(\sec^2 \alpha \partial \alpha + \sec^2 \beta \partial \beta)}{(\tan \alpha + \tan \beta)} \quad (76)$$

Considerando $\partial \alpha = \partial \beta = 1^\circ$, $\alpha = \beta = 45^\circ$, $\partial N/N = 4.16\%$, $\partial P/P = 1\%$, los dos últimos valores obtenidos en la Ecs. (69) y (70) se tiene que $\partial \Delta z / \Delta z = 7.16\% = 0.0716$,

Generación de contornos con la fuente y el observador colocados a una distancia finita de la rejilla.

Considerando que z/h es pequeño entonces la diferencia

entre dos puntos está dada por (Ec. 42).

$$\Delta Z = N\lambda h/d \quad (77)$$

La profundidad de campo de los sistemas de mapeo de contornos Moiré está limitada por difracción: mientras que la profundidad de campo de sistemas de mapeo de contornos holográficos está limitada por la profundidad de campo del holograma.

En general, los métodos holográficos pueden obtener resoluciones del orden de la longitud de onda de la luz, mientras que en sistemas Moiré se producen resoluciones alrededor de 25λ (Meadows: 1970).

El método de mapeo de contornos Moiré también produce términos de ruido debidos a otros términos de superposición de las líneas de la rejilla, que pueden tender a obscurecer el patrón de contornos y dificultan su interpretación en forma automática.

Esta técnica es sencilla, sin embargo con ella no es posible identificar si la superficie es convexa o cóncava observando únicamente los patrones de Moiré.

Es importante tener una alineación correcta de la rejilla respecto a la posición de observación. En cuanto a

la resolución, ésta se puede aumentar si se aumenta el ángulo de observación o la resolución de la rejilla. Esta técnica es de bajo costo.

El tamaño del objeto está casi ilimitado al hacer correcciones para una fuente puntual de iluminación. Se tiene que este método no es sensible al color. Se puede usar casi cualquier perfil de franjas. En análisis Moiré e Interferometría, el perfil de la franja es amplio, y para obtener una resolución mejor que una décima de franja se requiere equipo caro y cuidados especiales. En general sólo resulta válido considerar las orillas de las franjas como puntos de referencia para aplicar la Ec. (77).

De los resultados experimentales (Figs.28,29 y 30) se tienen las siguientes observaciones generales sobre los patrones para los tres tipos de superficies analizadas.

Conforme aumenta la separación entre fuente y observador el número de franjas aumenta para los casos analizados, ya que la divergencia de los rayos es menor y por lo tanto las frecuencias de la rejilla y de su sombra son más altas.

El contraste disminuye conforme aumenta el ángulo de observación, como es de esperarse para una superficie difusora.

Para un ángulo de observación $\theta \approx 0^\circ$ se observan pocas franjas pero se detecta la superficie casi totalmente. Para ángulos crecientes se pierde información de un lado de la superficie pero aumenta el número de franjas y con ello la resolución por lo que para analizar una parte de la superficie se puede escoger una posición tal que haya un número suficiente de franjas y que no se pierda visibilidad.

La resolución de la rejilla está relacionada en forma directa con la resolución del sistema.

En este método no se requiere estabilidad mecánica estricta como es el caso de los métodos holográficos e Interferométricos.

La fuente de Iluminación no necesita ser coherente.

Si el espaciado de la rejilla es grande comparado con la longitud de onda de la luz, los efectos de difracción pueden ser ignorados.

Con respecto a la precisión de la técnica, el error porcentual está dado por la Ec. 68

$$\frac{\partial \Delta Z}{\Delta Z} = \frac{\partial N}{N} + \frac{\partial P}{P} + \frac{\partial h}{h} + \frac{\partial d}{d} \quad (78)$$

donde $\frac{\partial N}{N}$ es el error en la medición del número de franjas

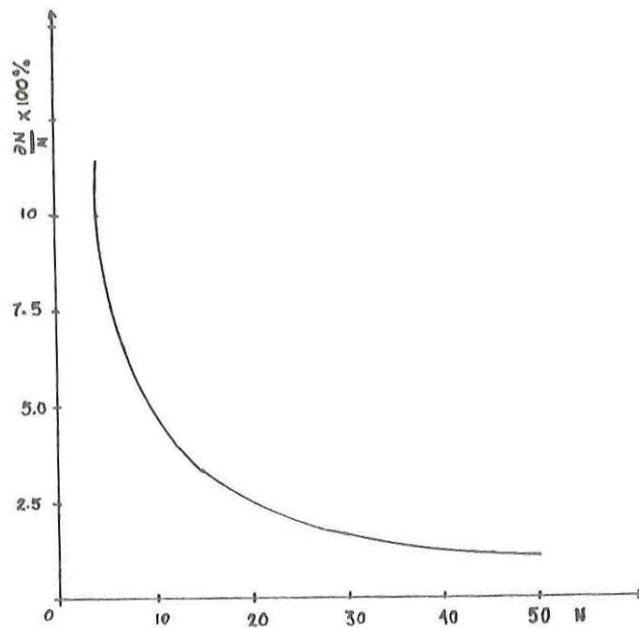
entre los puntos donde se quiere determinar la profundidad, $\partial P/P$ es el error asociado a la medida de la frecuencia, $\partial h/h$ es el error debido a la medida en la componente en z de la distancia de la rejilla a la fuente de iluminación y $\partial d/d$ es la contribución al error por la incertidumbre en la medida de la distancia entre la fuente y el observador.

Para minimizar el error asociado al primer término de la Ec.(68) se sugiere medir el número de franjas tomando como referencia la orilla de las franjas. Como se puede observar en las fotos correspondientes a las Figs.28,29 y 30, las orillas de las franjas no están bien definidas, por lo tanto para franjas delgadas se puede considerar que $\pm \partial N$ corresponde a la mitad del ancho total w de la franja i.e. $\partial N = (1/4)w$ y en el caso de franjas anchas, es necesario medir su perfil para determinar la posición de la orilla y el valor correspondiente de ∂N . De las mismas fotos puede observarse que en términos generales, el ancho de la franja tiene aproximadamente las mismas dimensiones que la separación de la franja vecina, por lo que

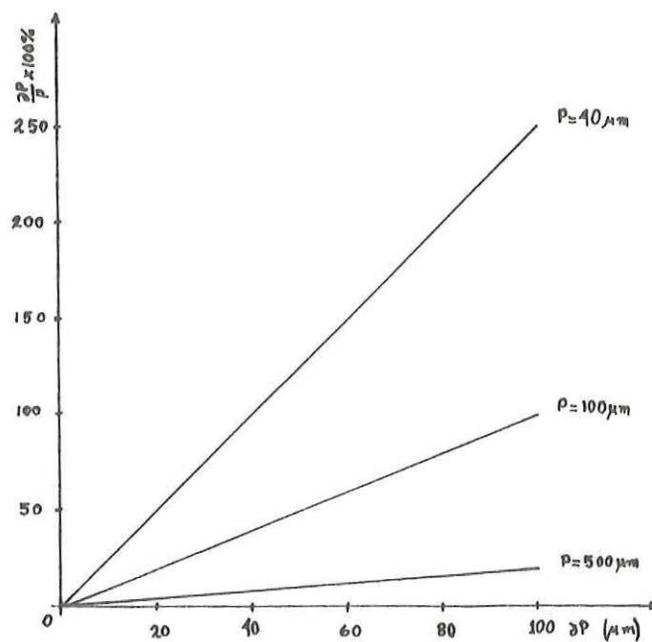
$$\partial N/N \approx 2[(1/4)w]/Nw = 1/2N \quad . \quad (79)$$

Por lo tanto se obtendrá una precisión alta en la medición de puntos distantes.

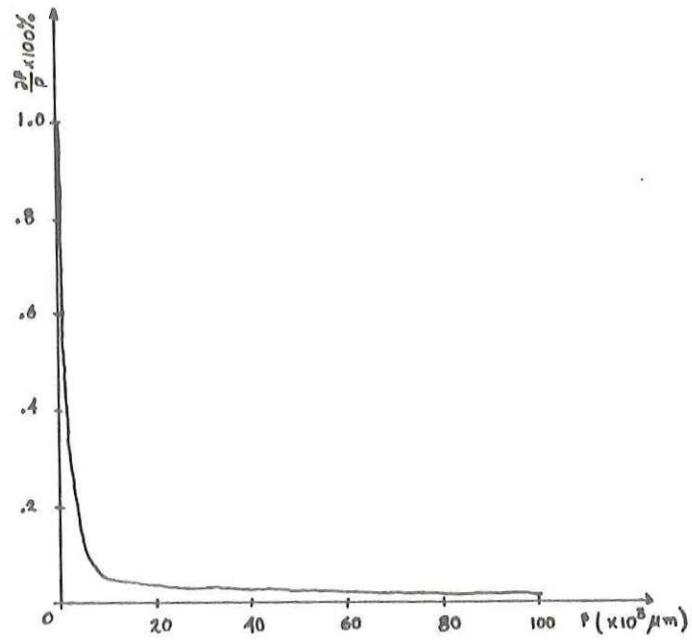
En la gráfica 4 se muestra el error porcentual debido a



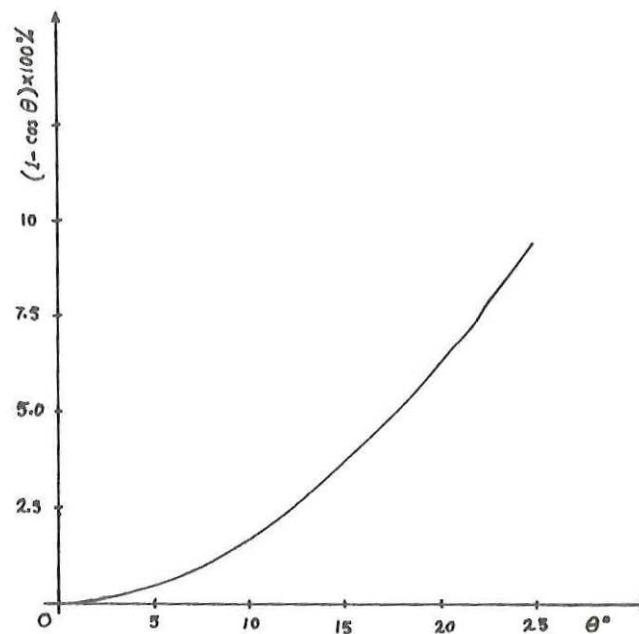
Gráfica 4.- Error porcentual al medir el número de franjas.



Gráfica 5.- Error porcentual para diferentes precisiones de medida en el periodo.



Gráfica 6.- Error porcentual al medir el periodo de la rejilla.



Gráfica 7.- Error porcentual en el periodo introducido por la alineación de la rejilla.

este término.

Respecto al error asociado a la medida del periodo de la rejilla, su valor porcentual para valores del periodo de 40 μm , 100 μm y 500 μm y diferentes precisiones de medida se presentan en la gráfica 5. Se observa que el uso de una rejilla de frecuencia alta impone limitaciones importantes a la contribución del error asociado a este parámetro, el cual debe medirse con una precisión alta. Experimentalmente se usó como precisión máxima 5 μm , que corresponde al diámetro mínimo de las ventanas de lectura de un microdensitómetro (Perkin Elmer mod. 10).

Para alcanzar una precisión mejor que el 1% es necesario usar rejillas de alta calidad. Una rejilla bidimensional actualmente puede fabricarse con una precisión entre 1/4 μm y 2.5 μm (Levy Max Autograph:1987), dependiendo de sus dimensiones. En la tabla II se listan las tolerancias dadas por el fabricante para diferentes áreas en rejillas de ultra alta precisión.

Tabla II Parámetros de fabricación de rejillas de ultra alta precisión.

Dimensiones del campo	Tolerancia a 20 C
1.6" x 1.6"	± 0.25
2.0" x 2.0"	± 0.25
4.0" x 4.0"	± 0.50
8.0" x 8.0"	± 1.00
10.0" x 10.0"	± 1.30
20.0" x 20.0"	± 2.50

De acuerdo con esto, la tolerancia de fabricación de la rejilla no impone un límite en lo que respecta a la posibilidad de alcanzar una precisión de medida del 1%. Sin embargo debe considerarse la contribución al error debida a la alineación de la rejilla dentro del arreglo óptico.

De la Fig. 31, el error en la frecuencia de la rejilla producida por la variación en el ángulo de observación es

$$\Delta F = p - p_{ef} = p(1 - \cos \theta) \quad , \quad (80)$$

por lo que el error porcentual asociado es de $(1 - \cos \theta)$ 100%. En la gráfica 7 se muestra la variación de este valor con θ .

De acuerdo con estos resultados, el campo angular de observación debe limitarse para evitar compensar por la presencia de este efecto.

Con respecto a las distancias de la rejilla a la fuente de iluminación y de la fuente al observador, como puede verse de los datos obtenidos (Ecs. 71 y 72) no resultan limitantes para la precisión de la medida.

III.6 OBTENCION DE MAPEOS DE CONTORNO POR INTERFEROMETRIA DE PATRONES DE GRANULADO (ESPI)

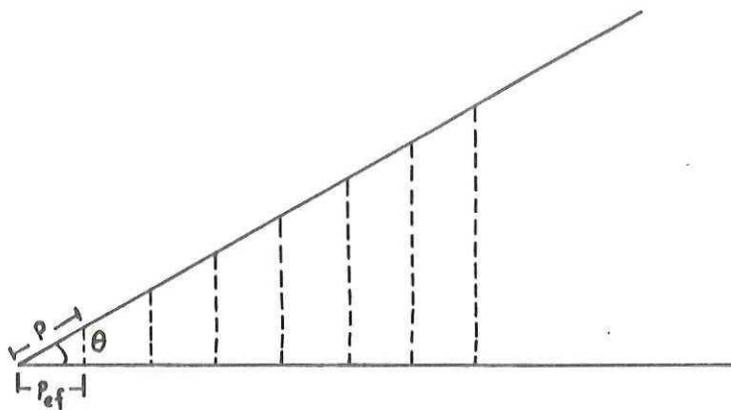


Figura 31.- Proyección de la rejilla.

El uso del ESPI tiene ventajas significantivas sobre los métodos holográficos, en términos de procesamiento rápido, operación de tiempo real práctica y simplificación del arreglo óptico.

Para esta técnica se requiere de un láser de argón, vidicon o cámara de televisión, equipo de video de grabado más un procesamiento electrónico de la información. No se requiere de un proceso fotográfico.

Hay limitaciones en la información que puede ser deducida del patrón de franjas del mapeo simple. El patrón no distingue de colinas y valles en la superficie del objeto y no puede identificarse el orden cero. El conocimiento de la posición del orden cero y de los órdenes de las otras franjas se necesita en el caso de utilizar HIC (Holographic Illumination Contouring) para determinar la diferencia en la forma absoluta entre dos superficies que se comparan entre sí: i.e. superficie bajo prueba contra superficie patrón. Si no se conocen los números de los órdenes de las franjas, sólo es posible realizar mediciones relativas. El análisis de franjas curvadas irregularmente (como se hizo por HIC) debe tomar en cuenta el cambio de sensibilidad sobre la superficie.

La inspección rápida de tales componentes requiere el procesamiento de datos en la computadora.

La expresión para el error en el mapeo del contorno a partir de la Ec.(49) está dada por

$$\partial\delta/\delta = \partial\lambda_1/\lambda_1 + \partial\lambda_2/\lambda_2 \quad (81)$$

sin considerar ningún otro parámetro.

Para HIC se tiene que el contorno está dado por:

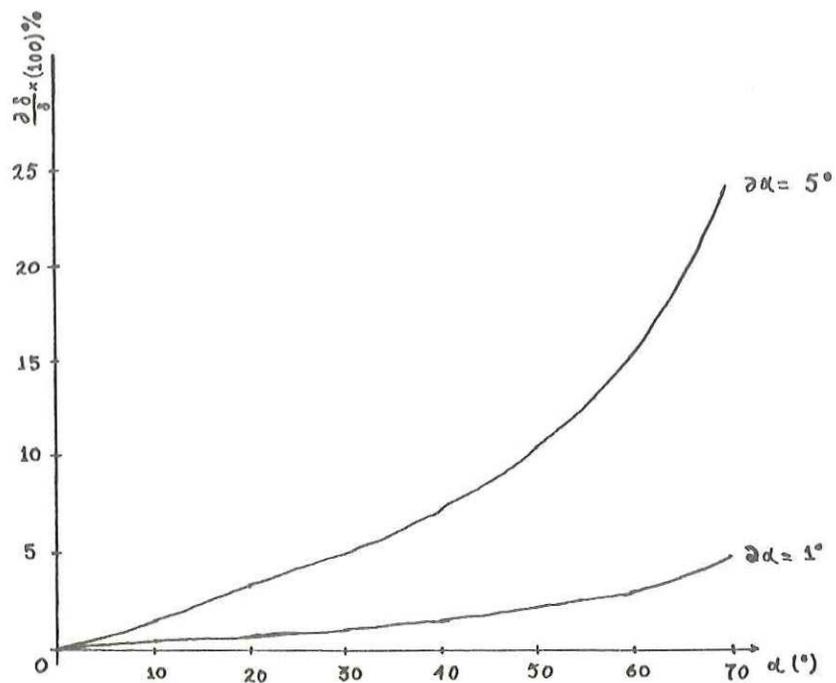
$$2\delta \cos\alpha = \lambda_1 \lambda_2 / \lambda_2 - \lambda_1 \quad (82)$$

siendo α el ángulo de observación con respecto a la normal en la superficie. Se tiene que el error es :

$$\partial\delta/\delta = (\partial\lambda_1/\lambda_1) + (\partial\lambda_2/\lambda_2) + \tan\alpha \partial\alpha \quad (83)$$

Ya que se usa luz láser, la contribución de los términos debidos al ancho de banda de las líneas de emisión, es despreciable.

El término $\tan\alpha \partial\alpha$ se presenta en la gráfica 8, considerando ángulos de observación comprendidos entre $1/2^\circ$ y 70° y precisiones $\partial\alpha$ entre 1° y 5° .



Gráfica 8. - Error porcentual en la diferencia de altura por el método de HIC.

MAPEO DE CONTORNOS POR GRANULADO LASER

La sensibilidad de esta técnica depende de que tanta inclinación se le dé al objeto entre las exposiciones. Se recomiendan sólo pequeñas cantidades de inclinación ($\approx 5 \times 10^{-3}$ rad) debido a los efectos de deterioración de la franja (Jaisingh: 1981). Sin embargo, puede obtenerse un valor típico de 0.5 cm/ franja.

A continuación se presenta el análisis de error en esta técnica usando como datos los reportados por G. K. Jaisingh y F. P. Chiang (1981). De la Ec. 58 se tiene que el error está dado por:

$$\partial \Delta h / \Delta h = \partial \lambda / \lambda + \partial f / f + \partial A / A + \partial M / M + \partial \phi / \phi \quad . \quad (84)$$

En el trabajo mencionado se analizó un objeto esférico de 5 cm de radio que fue iluminado por un láser de He-Ne de 15 mw. Se grabó un patrón de granulado de doble exposición con una lente de longitud focal de 150 mm y con una amplificación $M = 1$. La inclinación dada al objeto fue de $\phi = 2 \times 10^{-3}$ rad entre las exposiciones. Se filtró el patrón de granulado en $f = 65$ cm usando una abertura colocada en $A = 3$ cm. Con los datos anteriores se obtiene que $h = 0.72$ cm.

Analizando el error se tiene que $\partial \lambda / \lambda \approx 3.3 \times 10^{-6}$

(Tentori: 1986), $\partial f/f = 7.7 \times 10^{-4}$, $\partial \phi/\phi = 4.8 \times 10^{-3}$ y $\partial M/M \approx 0$. Estas contribuciones al error son muy pequeñas por lo que resultan despreciables, por lo tanto se obtiene que el error únicamente depende del error al determinar la posición de la abertura en el sistema de Filtraje de Fourier.

Si se desea un error de $\partial \Delta h/\Delta h = 1\%$ significaría que Δ debe ser medido con una precisión de $\partial \Delta = \pm .3$ mm. Una abertura de estas dimensiones trabajando con luz coherente produce una contribución fuerte de difracción, por lo que no es posible usarla para observar el patrón de franjas de granulado transmitido por ella. Si se admite un error de $\partial h/h = 10\%$ entonces significaría que el error $\partial \Delta = \pm 3$ mm, lo cual ya es posible utilizar. De los casos anteriores se concluye que este sistema de medición no es muy preciso.

La ventaja de esta técnica sobre otras reportadas utilizando el granulado de luz láser es que no se requiere de fluidos o de dos longitudes de onda de luz láser.

SINTESIS DE TECNICAS.

En la tabla III se presentan concentradas las técnicas para la evaluación de formas de superficies, tratándolas comparativamente entre sí, así como sus características más importantes.

De acuerdo a las necesidades se puede recurrir a dicha tabla para seleccionar la técnica más conveniente de acuerdo a los parámetros de interés según sea el caso.

TABLA III C.		
OBTEN- TECNICAFUN.	ECUACION DEL ERROR	TIPO DE PROCESO EN QUE SE PUEDE UTILIZAR.
Interferometría lograma de de mientos rígiular nto.	$\frac{\partial(\delta H)}{\delta H} = \frac{\partial H}{H} + 2 \frac{\partial x}{\Delta x}$	Control de calidad de superficies termina-- das con gran pendien- te.
Franjas de Yc al --	$\frac{\partial \Delta z}{\Delta z} = 2 \frac{\partial x}{\Delta x} + \frac{\sec \beta}{\csc \beta} \frac{\partial \beta}{\beta}$	Control de calidad de superficies por compa- ración.
Medidas de C utilizando f proyectadas das por dos	$\frac{\partial z'}{z'} = \frac{1}{(x - nd)} \frac{\partial x}{(x - nd)} + \frac{d \partial n}{(x - nd)} + \frac{n \partial d}{(x - nd)} + \frac{\partial \beta}{\sen \beta \cos \beta}$	Control de calidad de superficie por compa- ración.
Técnica de Mno co mina- de ob super	$\frac{\partial \Delta z}{\Delta z} = \frac{\partial N}{N} + \frac{\partial P}{P} + \frac{\partial h}{h} + \frac{\partial d}{d}$	Control de calidad de superficies durante - el proceso de fabrica- ción.
ESPI el ra el ob- s a - ncia - onda -	$\frac{\partial \delta}{\delta} = \frac{\partial \lambda_1}{\lambda_1} + \frac{\partial \lambda_2}{\lambda_2}$	Medida de superficies patrón.
HIC	$\frac{\partial \delta}{\delta} = \frac{\partial \lambda_1}{\lambda_1} + \frac{\partial \lambda_2}{\lambda_2} + \text{Error } \partial x$	Medida de superficies patrón.
Mapeo de con- granulado l y sis- jer.	$\frac{\partial \Delta h}{\Delta h} = \frac{\partial \lambda}{\lambda} + \frac{\partial f}{f} + \frac{\partial A}{A} + \frac{\partial M}{M} + \frac{\partial \phi}{\phi}$	Control de calidad de superficies durante - el proceso de fabrica- ción.

IV CONCLUSIONES.

Experimentalmente se tiene que la técnica de desplazamientos rígidos presenta sensibilidad muy baja. La variación en la posición de las franjas es notable sólo cuando la diferencia en profundidad es grande de un punto con respecto a otro. En base a su baja sensibilidad se recomienda para el control de calidad de superficies terminadas con gran pendiente. La precisión de esta técnica también es baja.

El método de franjas de Young proyectadas presenta sensibilidad media.

Cuando el ángulo de proyección de franjas es de 45° se tiene que $\Delta z = \Delta x$, es decir, la diferencia de profundidad entre dos puntos está directamente dada por Δx donde esta distancia representa el corrimiento de la posición de la franja entre el lugar que ocuparía cuando se tiene una superficie plana y su posición sobre una superficie distinta de ésta.

Conforme β disminuye, la iluminación tiende a ser tangente a la superficie. Aunque se pierde información del lado no iluminado se tiene una mayor sensibilidad en el cambio de las franjas.

Teóricamente se tiene que el error en la medida de la profundidad crece con el ángulo de iluminación.

Tanto en la técnica de desplazamientos rígidos como de franjas de Young proyectadas se observó experimentalmente que requieren de óptica de alta calidad para generar un patrón de franjas rectas que permita una precisión satisfactoria en la medida del perfil de una superficie al aplicar estas técnicas.

Uno de los problemas que se presentan al evaluar las imágenes obtenidas es el hecho de que no se puede tomar como referencia de escala el borde del objeto a menos que el sistema óptico de información se enfoque sobre éste, lo cual limita el tipo de superficie que puede ser analizado.

Se tiene que para disminuir el error, la proyección de franjas tendría que ser casi tangente a la superficie. Para poder analizar la superficie completamente y a la vez, se puede tener dos proyecciones de franjas donde ambas iluminaciones sean casi tangentes y simétricas.

La técnica de Moiré es sencilla, no presenta problemas de estabilidad mecánica y no requiere de iluminación coherente.

La resolución se puede variar aumentando la de la

rejilla o aumentando el ángulo de observación.

Entre las desventajas se tiene que no es posible identificar si la superficie es convexa o cóncava observando únicamente los patrones de Moiré.

Es importante tener una alineación correcta de la rejilla respecto a la posición de observación. La sensibilidad de esta técnica es media y el arreglo no es complejo.

Se recomienda en el control de calidad de superficies durante el proceso de fabricación.

Tanto la técnica ESPI como HIC presentan una sensibilidad alta comparadas con las técnicas anteriores. Su costo es alto e implica un arreglo holográfico más un procesamiento electrónico. Se sugiere su uso en la medida de superficies patrón.

La técnica de mapeo de contornos por granulado laser presenta sensibilidad baja y consiste de un arreglo que requiere filtraje Fourier. El error introducido en las mediciones es considerable. Se sugiere en el control de calidad de superficies durante el proceso de fabricación.

LITERATURA CITADA.

- Abramson Nils. 1976. Sandwich hologram Interferometry.3: Contouring, p. 200-205. Applied Optics 15.
- Denby D., G.E. Quintanilla and J.N. Butters. 1976. Contouring by electronic speckle pattern Interferometry, The engineering uses of coherent optics, p.171-197, Robertson, E.R. (Ed), Cambridge University Press.
- Fercher A. F. and U. Vry. 1986. Two-wavelength speckle Interferometric technique for rough surface contour measurement, p. 623-626. Optical Engineering 25.
- Goodman J.W. 1963. Stanford electronics laboratories technical report, TR 2303-1 (SEL-63-140), Stanford Univ.
- Goodman J.W. 1984. Statistical properties of laser speckle patterns, In laser speckle and related phenomena, J.C. Dainty, ed., p.9-75, Springer-Verlag, Berlin.
- Goslowsky H. and I. Menzel.1982. Speckle contouring In real time, p. 4392-4393. Applied Optics 21.
- Hecht Norman L., John E. Minardi, David Lewis, and Richard L. Fusek. 1973. Quantitative theory for predicting fringe pattern formation in holographic Interferometry, p.2665- 2676. Applied Optics 12.
- Hildebrand B. P. and K. A. Haines. 1967. Multiple-source holography applied to contour generation, p. 155-162. Journal of the optical society of America 57.
- Takasaki Hiroshi. 1979. The development and the present status of Moiré topography, p. 1009-1019. Optica Acta 26.
- Jaisingh G. K. and F. P. Chiang. 1981. Contouring by laser speckle, p. 3385-3387. Applied Optics 20.
- Kafri O. and A. Livnat. 1981. Reflective surface analysis

- using Moiré deflectometry, p. 3098-3099. Applied Optics 20.
- Kafri O., A. Livnat, and E. Keren. 1983. Optical second differentiation by shearing Moiré deflectometry, p. 650-652. Applied Optics 22.
- Khetan P. R. and F. P. and Chiang. 1976 p. 2205- . Applied Optics 15.
- Levy Max Autograph. Large scale precision artworks masters, Bulletin 1100.
- Liu H. K. and R.L. Kurtz. 1977. A practical method for holographic interference fringe assessment, p. 176-186. Optical Engineering 16.
- Livnat A. and O. Kafri. 1985. Slope and deformation mapping by grating projection technique, p. 150-152. Optical Engineering 24.
- MacGovern Alan J. 1972. Projected fringes and holography, p. 2972-2974. Applied Optics 11.
- Meadows D. M., W. O. Johnson, and J. B. Allen. 1970. Generation of surface contours by Moiré patterns, p.942-947. Applied Optics 9.
- Tentori Diana and Martin Celaya. 1986. Continuous angle measurement with a Jamin Interferometer, p. 215-220. Applied Optics 25.
- Thalmann R. and R. Dandliker. 1985. Holographic contouring using electronic phase measurement, p. 930-933. Optical Engineering 24.

APENDICE I

ANALISIS DE LA MODIFICACION EN LA DISTRIBUCION DE INTENSIDAD A LA CORRELACION DE PATRONES DE GRANULADO PRODUCIDOS POR UNA SUPERFICIE RUGOSA EN FUNCION DE LA RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE.

La superficie del objeto rugoso puede ser descrito por su coordenada $Z(x,y)$ con respecto a algun plano de referencia. Para este caso Z es una función estocástica y se puede descomponer en una función $z(x,y)$ que representa la superficie macroscópica y una función $H(x,y)$ que representa la rugosidad de la superficie :

$$Z(x, y) = z(x, y) + H(x, y) \quad (85)$$

La función $H(x,y)$ describe la estructura microscópica de la superficie. Se supone que $H(x,y)$ es homogénea y se comporta como una variable ergódica gaussiana.

Para un punto en la superficie existe una diferencia de fase entre el rayo del objeto y el de referencia la cual se mantiene constante para ambas longitudes de onda en un mismo punto.

Suponiendo la coordenada macroscópica $z(x)$ constante dentro del sitio iluminado del objeto de prueba e

Incorporando cualquier variación en $H(x)$. Entonces la diferencia de fase $\Delta\phi$ es (Fercher: 1986)

$$\Delta\phi(\epsilon) = \arg \left\{ \frac{\exp(i4\pi/\Lambda) z(\epsilon) \int_{-\epsilon_0}^{\epsilon_0} \exp[i(4\pi/\lambda_2)H(x+\epsilon)] dx}{\int_{-\epsilon_0}^{\epsilon_0} \exp[i(4\pi/\lambda_1)H(x+\epsilon)] dx} \right\} \quad (86)$$

con la longitud de onda efectiva

$$\Lambda = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2| \quad (87)$$

El primer factor exponencial de la Ec.(86) es obviamente el resultado deseado, el cociente describe un error estadístico causado por la estructura microscópica de la superficie. Aparte de este error estadístico el contorno de la superficie macroscópica es

$$z(\epsilon) = (\Lambda/4\pi)\Delta\phi(\epsilon) \quad (88)$$

Por otra parte para la interferencia de dos campos moteados cuyas amplitudes obedecen una estadística gaussiana, Goodman (1984) demostró que la función de densidad de probabilidad de las intensidades es:

$$P(I_1, I_2, \Delta\phi) = \frac{\exp[-I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} |\mu| \cos(\Delta\phi - \psi)]}{2\pi(1 - |\mu|^2)} \quad (89)$$

donde ψ es la fase del coeficiente de correlación de las dos amplitudes de moteado y $\Delta\phi$ es la diferencia de fase entre dichas amplitudes complejas. Goodman (1963) también demostró que el coeficiente de correlación de estos dos campos complejos está dado por la función característica C_z de la función de densidad de probabilidad del perfil de la superficie $z(x)$: $\mu(\lambda) = C_z(2/\lambda)$ y en el caso de que tenga un perfil que satisfaga una estadística gaussiana $\mu(\lambda) = \exp(14\pi z/\lambda) \exp(-8\pi^2 \sigma_H^2 / \lambda^2)$ donde σ_H es la desviación estándar del perfil de la superficie microscópica. Por lo que para una superficie de este tipo se debe satisfacer que $\pi\sigma_H^2 \gg \lambda^2$ para poder obtener la información sobre la forma de la superficie utilizando interferometría de dos longitudes de onda.