

UNIVERSIDAD
INDUSTRIAL DE
SANTANDER



GRUPO DE ÓPTICA Y
TRATAMIENTO DE SEÑALES

***SISTEMA OPTICO DE RECONSTRUCCION TRIDIMENSIONAL PARA LA
DETECCION DE AMPOLLAS EN RECUBRIMIENTOS***

**ZAYRA MILENA PEREZ GUZMAN
LENNY ALEXANDRA ROMERO PEREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2004**

**SISTEMA OPTICO DE RECONSTRUCCION TRIDIMENSIONAL PARA LA
DETECCION DE AMPOLLAS EN RECUBRIMIENTOS**

**ZAYRA MILENA PEREZ GUZMAN
LENNY ALEXANDRA ROMERO PEREZ**

Trabajo de grado para optar al título de
Físico

Director
Dr. JAIME ENRIQUE MENESES FONSECA.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2004

AGRADECIMIENTOS

Expresamos sinceros agradecimientos:

- Al Dr. Jaime Meneses, por su paciencia, orientación y apoyo en la realización de este trabajo.
- Al Msc. Ferney Vesga por su valiosa colaboración.
- A la Corporación para la Investigación en Corrosión (C.I.C) por la colaboración prestada para la realización de este proyecto.
- A todas las personas que forman parte del Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales.
- A nuestras familias por su respaldo y su apoyo incondicional.
- A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron en al logro de nuestros objetivos.

TITULO*: SISTEMA OPTICO DE RECONSTRUCCION 3D PARA LA DETECCION DE AMPOLLAS EN RECUBRIMIENTOS

AUTORES: LENNY ALEXANDRA ROMERO Y ZAYRA MILENA PEREZ**

PALABRAS CLAVES: RECONSTRUCCION 3D, PROYECCION DE FRANJAS, ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIAS.

Resumen

¹En el campo de aplicaciones industriales, la presencia de ampollas en recubrimientos es un factor importante en la determinación de la calidad del recubrimiento y también en la posible presencia de efectos corrosivos en los sustratos. En el presente trabajo se implementa un sistema óptico de la reconstrucción tridimensional para la detección de ampollas en recubrimientos. El sistema óptico implementado explora una región de 4x3 mm, con una resolución de 10 micras, usando la técnica de proyección de franjas. Los cambios topográficos en la superficie son detectados por la deformación del sistema de las franjas proyectado en la superficie del cuerpo. La evaluación experimental del sistema implementado se basa en la exposición de muestras de recubrimientos a ambientes salinos controlados, y en la evaluación periódica del estado superficial. La presencia de las primeras ampollas en las superficies estará determinada por las características metrológicas del sistema de medida, principalmente resolución y precisión. De esta manera, fijando una resolución y precisión del orden de 10 micras, el sistema detectará la presencia de ampollas con variaciones en la altura de este orden. El software permite sincronizar la adquisición de las imágenes, la calibración del sistema y la reconstrucción de la topografía del cuerpo.

*Trabajo de Grado **Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Jaime Meneses

TITULO*: SYSTEM OPTICO OF THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION FOR THE DETECTION OF BLISTERS IN THE POLYMER COATED STEEL

AUTORES: LENNY ALEXANDRA ROMERO Y ZAYRA MILENA PEREZ**

PALABRAS CLAVES: THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION, SYSTEM OF FRINGES PROJECTED, ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY.

Abstract

In the industrial applications field, presence of blisters in polymer coated steel is an important factor in the determination of the quality of the polymer coated steel and also in the possible presence of corrosive effects in substrates. In the present work an optical system of three-dimensional reconstruction for the detection of blisters in polymer coated steel is implemented. The implemented optical system explores a region of 4x3 mm, with a resolution of 10 microns, using the technique of projection of fringes. So that the topographic changes in surface are detected by the deformation of the system of fringes projected on the surface of the body. The experimental evaluation of the implemented system is based on the exhibition of samples of coverings to controlled saline atmospheres, and on the periodic evaluation of the superficial state. The presence of the first blisters in the surfaces will be determined by the metrological characteristics of the measurement system, mainly resolution and precision. This way, fixing a resolution and precision of the order of 10 microns, the system will detect the presence of blisters with variations in the height of this order. The software allows synchronizing the acquisition image, system calibration and reconstructing the body topography.

*Trabajo de Grado ** Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Jaime Meneses

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	<u>1</u>
<u>LISTA DE TABLAS</u>	<u>6</u>
<u>INTRODUCCIÓN GENERAL</u>	<u>7</u>
<u>CAPITULO 1.</u>	
1.1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.2 CONCEPTOS GENERALES.....	12
1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS METODOS OPTICOS.....	14
1.4 RECONSTRUCCION 3-D POR PROYECCION DE FRANJAS.....	20
1.4.1 Codificación de la información.....	22
1.4.2 Extracción de la fase del sistema de franjas.....	24
1.5 CORRIMIENTO DE FASE A INTERVALOS REGULARES.....	25
1.6 CORRIMIENTO DE FASE A INTERVALOS NO REGULARES.....	27
<u>CAPITULO 2.</u>	
2.1 INTRODUCCIÓN.....	30
2.2 SISTEMA ÓPTICO.....	30
2.2.1 Sistema de Proyección.....	31
2.2.2 Sistema de Observación.....	33
2.2.3 Sistema de control, de adquisición y procesamiento de imágenes.....	34
2.3 CALIBRACION XY DEL SISTEMA DE ADQUISICION.....	34
2.4 CALIBRACION FASE-ALTURA.....	37

2.5 ANALISIS DE SISTEMA DE FRANJAS	43
--	----

CAPITULO 3.

3.1 INTRODUCCIÓN.....	54
-----------------------	----

3.2 CARACTERIZACION DEL SISTEMA DEMEDIDA.....	54
---	----

3.2.1 Precisión.....	54
----------------------	----

3.2.2 Repetibilidad.....	58
--------------------------	----

3.3 ANALISIS CUANTITATIVO DE LA PRESENCIA DE AMPOLLAS EN RECUBRIMIENTOS.....	59
---	----

3.3.1 Procedimiento Experimental.....	59
---------------------------------------	----

3.3.1.1 Preparación y Aplicación De Recubrimientos.....	59
---	----

SandBlasting o Limpieza con chorro abrasivo.....	60
---	----

Aplicación del recubrimiento.....	61
-----------------------------------	----

3.3.1.2. Exposicion de los recubrimientos en ambientes controlados.....	62
--	----

3.3.1.3 Monitoreos Por Reconstrucción 3D.....	64
---	----

Cupones E139 y E054. Con recubrimientos Mastic Epoxi Blanco Tipo barrera, de espesor 48 μm y 79 μm respectivamente.....	65
--	----

Cupones E084 y E066. Con recubrimientos Epoxi de altos sólidos Tipo barrera, con espesores de 77 μm y 65 μm respectivamente.....	71
---	----

Cupones E015 y E057. Con recubrimientos Epoxi Fosfato de Zinc Tipo Inhibidor de espesores 70 μm y 81 μm respectivamente.....	74
---	----

3.3.1.4 Medición Del Espectro De Impedancias.....	75
Dispositivos de medida.....	75
Datos obtenidos de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.....	77
Análisis de los diagramas de Bode.....	80
Cupones E139 y E054. Recubrimiento Mastic Epoxi Blanco tipo barrera.....	81
Cupones E084 y E066. Recubrimiento Epoxi de Altos Sólidos tipo barrera.....	82
Cupones E015 y e057. Recubrimiento Epoxi Fosfato de Zinc tipo inhibidor.....	83
 <u>CAPITULO 4.</u>	
CONCLUSIONES GENERALES.....	85
 <u>CAPITULO 5.</u>	
PERSPECTIVAS DE INVESTIGACION.....	87
 <u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	 88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Procedimiento para la reconstrucción tridimensional por vía óptica.....	13
Figura 2. Elementos de un Sistema Óptico.....	14
Figura. 3 Sistema Optico utilizado en el método de Proyección de Franjas.	21
Figura 4. Sistema de franjas proyectado sobre el plano de referencia antes y después de colocar el objeto.....	21
Figura 5. Corrimiento del sistema de franjas en función de Z.....	23
Figura 6. Imagen del montaje utilizado.....	31
Figura7. Condición de Scheimpflug.....	33
Figura 8. Imágenes de una rejilla de difracción ubicada: (A) Horizontal, (B) Verticalmente.....	35-36
Figura 9. Sistema de franjas a $Z=0$	37
Figura 10. Pasos para la obtención de la fase del plano.....	39-40
Figura 11. Fase continua obtenida a partir del sistema de franjas.....	41
Figura12. Variación de fase para una línea horizontal del mapa de fase.....	42

Figura13. Curva de Calibración.....	42
Figura 14. Corrimiento de las franjas desplazando el cuerpo.....	43
Figura15. Formación de la imagen de un punto del objeto sobre la cámara CCD a $Z=0$ y a un desplazamiento ΔZ cuando el plano de referencia no es perpendicular al eje óptico de la CCD.....	44
Figura 16. Formación de la imagen de un punto del objeto sobre la cámara CCD a $Z=0$ y a un desplazamiento ΔZ cuando el eje de desplazamiento no es paralelo al eje óptico.....	45
Figura 17. Sistema de franjas sobre la superficie de una moneda.....	46
Figura 18. Fase Discontinua.....	47
FIGURA 19. Corte horizontal de la fase discontinua.....	48
Figura 20. Función discontinua corregida.....	48
Figura 21. Fase continúa del cuerpo.....	48
Figura 22. Reconstrucción en fase del cuerpo.....	49
Figura 23. Reconstrucción 3D de la superficie de un cuerpo.....	50
Figura 24. Objeto utilizado para la reconstrucción 3D.....	51
Figura 25. Sistema de franjas proyectado sobre la superficie de una moneda.....	51

Figura 26. Reconstrucción 3D de la superficie.....	52
Figura 27. Sistema de franjas proyectado sobre la superficie de una moneda.....	53
Figura 28. Reconstrucción 3D de la superficie.....	53
Figura 29. Tornillo micrométrico utilizado para medir las variaciones de altura.....	55
Figura 30. Objeto de prueba para verificar la precisión del sistema.....	55
Figura 31. Sistema de franjas proyectado sobre la superficie del cuerpo.....	56
Figura 32. Reconstrucción Tridimensional.....	56
Figura 33. Corte realizado sobre la figura de reconstrucción 3D.....	57
Figura 34. Análisis de Repetibilidad.....	58
Figura 35. Preparación de superficie de acero al carbono 1020 con Sand-blasting.....	60
Figura 36. Estado de los cupones antes de la aplicación.....	61
Figura 37. Cupón después de aplicar el recubrimiento.....	62
Figura 38. Cámara de simulación para la exposición de los sistemas.....	62
Figura 39. Sistema de franjas proyectado sobre la superficie de un cupón en un área de exploración de 4 x 3 mm.....	64

Figura 40. Reconstrucción Tridimensional para el sistema de franjas de la figura 39.....	65
Figura 41. Estado 3D de los cupones E139 y E054 correspondientes al monitoreo 0 en diferentes zonas respectivamente.....	66-67
Figura 42. Estado 3D de los cupones E139 y E054 correspondientes al monitoreo 9 respectivamente.....	67-68
Figura 43. Estado 3D del cupón E139 correspondiente al monitoreo 8.....	69
Figura 44. Curvas de nivel de 3 zonas exploradas sobre el cupón E139 en el monitoreo 9.....	70
Figura 45. Estado 3D de los cupones E084 y E066 correspondientes al monitoreo 0 respectivamente.....	72
Figura 46. Estado 3D de los cupones E084 y E066 correspondientes al monitoreo 9 respectivamente.....	72
Figura 47. Curvas de nivel del cupón E084 correspondientes al monitoreo 9.....	73
Figura 48. Estado 3D de los cupones E015 y E057 correspondientes al monitoreo 0 respectivamente.....	74
Figura 49. Estado 3D de los cupones E015 y E057 correspondientes al monitoreo 9 respectivamente.....	75

Figura 50. Medidor automático de Impedancias.....	76
Figura 51. Celda electroquímica plana en el interior de la jaula de Faraday.....	76
Figura 52. Esquema general utilizado para las pruebas electroquímicas.....	77
Figura 53 Diagrama de Bode. Impedancia Vs. Frecuencias.....	78
Figura 54. Diagrama de Bode. Fase Vs. Frecuencias.....	78
Figura 55. Circuitos Equivalentes utilizados para modelar los espectros.....	80
Figura 56. Espectro de impedancia para los cupones E139 y E054.....	81
Figura 57. Espectro de impedancia para los cupones E084 y E066.....	82
Figura 58. Espectro de impedancia para los cupones E015 y E057.....	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Métodos ópticos de Reconstrucción 3D.....	17
Tabla 2. Métodos ópticos de reconstrucción 3D en función de las dimensiones transversales del objeto, Resolución, precisión y rango de medida.....	19
Tabla 3. Datos de la cámara utilizada.....	34
Tabla 4. Esquemas de los recubrimientos evaluados.....	61
Tabla 5. Numero de Monitoreos realizados y duración en horas entre monitoreos.....	63
Tabla 6. Ancho y altura correspondientes a las curvas de nivel.....	71
Tabla 7. Ancho y altura correspondientes a las curvas de nivel del cupón E084.....	73

INTRODUCCIÓN

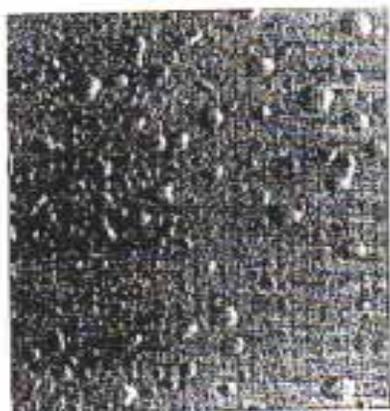
En la actualidad la corrosión se ha convertido en un problema en el cual nadie esta exento de poseerlo, ya que ha dejado de ser un fenómeno extraño e inentendible. La corrosión contribuye frecuentemente a daños irremediables en diversos materiales, que si no se tratan a tiempo, actuarán abruptamente dejando secuelas catastróficas. La tecnología ha avanzado de tal forma, que efectuando ensayos cortos en el laboratorio, podemos predecir el comportamiento a largo plazo de los materiales. Industrialmente existen diversos tipos de deterioro de superficies, pero en este trabajo se analizará cuantitativamente la presencia de ampollas en recubrimientos, como elemento indicador del posible deterioro superficial del sustrato. Actualmente el análisis de ampollas en recubrimientos se evalúa por medio de Normas preestablecidas por "The American Society for Testing and Materials" (ASTM), que permiten realizar una valoración cualitativa a través de una inspección visual de las muestras. Para evaluar este tipo de deterioro superficial se utiliza la norma ASTM D714-87^[13], que provee un procedimiento estándar para describir el tamaño y densidad de las ampollas. Esta norma emplea referencias fotográficas estandarizadas para evaluar los sistemas de recubrimientos sujetos a condiciones que produzcan ampollamiento. Para determinar cualitativamente la Frecuencia y Tamaño de ampollas en la superficie, la norma utiliza parámetros estandarizados mostrados en la figura 1A y 1B. De esta manera al comparar visualmente la muestra se clasifica según la frecuencia en: Denso (D), Medianamente Denso (MD), Mediano (M), Poco (F). De igual manera, para evaluar el tamaño se clasifica la muestra según el número del patrón que corresponda. Así el número 10, representa la muestra "sin ampollamiento". El número 8 representa el tamaño más pequeño de ampollamiento que se puede observar, los números 6, 4 y 2 representan tamaños progresivamente mayores.



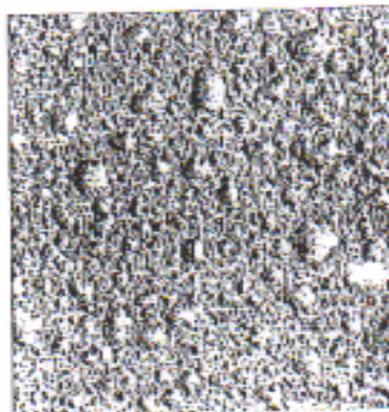
POCO



MEDIO

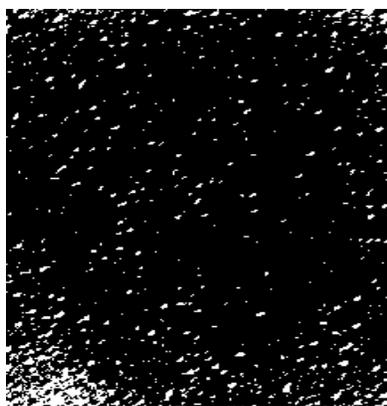


MEDIO DENSO

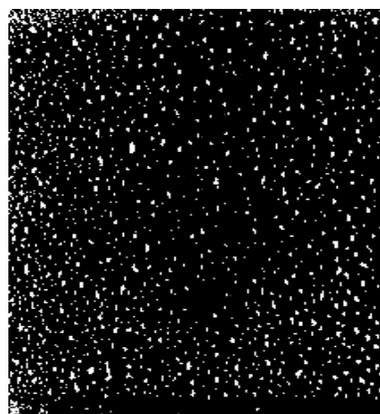


DENSO

Fig. 1A. Patrones de la norma ASTM D714-87 para determinar frecuencia con ampollas de tamaño N° 2.



MEDIO DENSO



DENSO

Fig. 1B. Patrones de la norma ASTM D714-87 para determinar frecuencia con ampollas de tamaño N° 4.

Es decir una descripción física más detallada del ampollamiento debe incluir las siguientes características:

- ✓ Distribución de tamaños, desde el punto de vista de unidades de medida.
- ✓ Frecuencia de ocurrencia por unidad de área.
- ✓ Modelo de distribución sobre la superficie, y
- ✓ Forma de las ampollas.

Debido a que la evaluación de este tipo de deterioro se basa en una inspección visual se introduce una inexactitud al momento de valorar la muestra. Por lo anterior se hace necesario desarrollar un sistema de medida que permita realizar una evaluación minuciosa y cuantitativa. De esta manera, es necesario implementar un sistema de medida por reconstrucción tridimensional que permita evaluar las variaciones en la topografía de la superficie del recubrimiento en función del tiempo de exposición.

De esta manera, en el presente trabajo se fundamenta la elaboración y caracterización de un sistema de reconstrucción tridimensional por vía óptica a partir del método de proyección de franjas, para la detección y evaluación cuantitativa de ampollas en recubrimientos. La evaluación experimental del sistema implementado se basa en la exposición de muestras de recubrimientos a ambientes salinos controlados, y en la evaluación periódica del estado superficial. La presencia de las primeras ampollas en las superficies estará determinada por las características metrológicas del sistema de medida, principalmente resolución y precisión. De esta manera, fijando una resolución y precisión del orden de 10 micras, el sistema detectará la presencia de ampollas con variaciones en la altura de este orden.

En las secciones siguientes se presentarán los conceptos básicos necesarios para la elaboración experimental del sistema de medida tridimensional. De igual manera se mostrarán los procedimientos de reconstrucción tridimensional de un objeto y la caracterización del sistema. Finalmente se presentará la evaluación experimental del sistema en la detección de ampollas en recubrimientos. En la última sección se presentan las conclusiones generales del trabajo realizado y las posibles perspectivas de investigación.

1. RECONSTRUCCIÓN 3-D

1.1. INTRODUCCIÓN

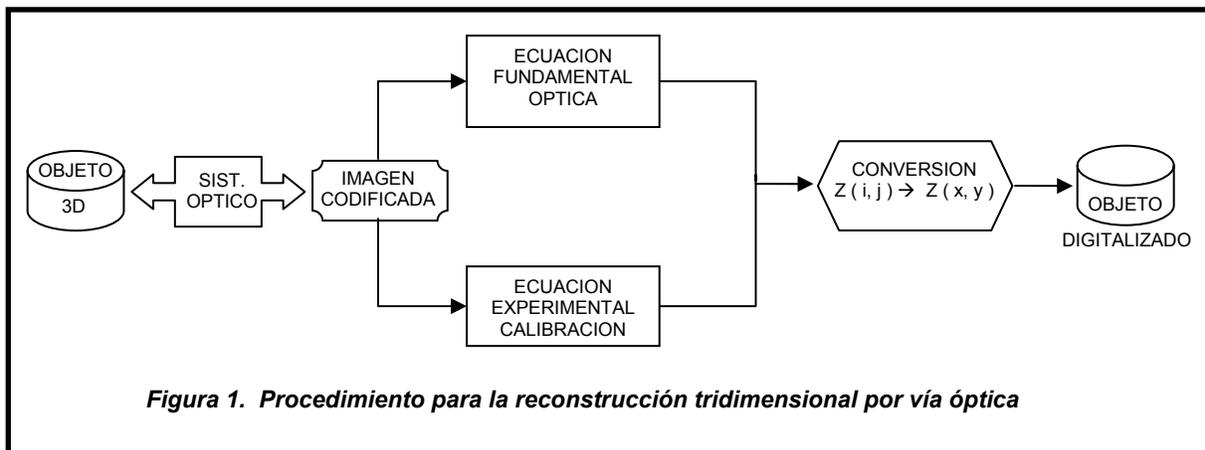
En este capítulo se da un concepto general de reconstrucción tridimensional, describiendo algunos métodos para obtener información topográfica de un objeto. Se presenta en detalle, la técnica óptica de proyección de franjas utilizada para implementar el sistema óptico de medida 3D de ampollas en recubrimientos.

1.2 CONCEPTOS GENERALES

La reconstrucción tridimensional por vía óptica, es el proceso mediante el cual, la topografía de un objeto es digitalizada. Es decir, a partir de un sistema de referencia (X, Y, Z), se calculan digitalmente las coordenadas de los puntos observados en la superficie de un cuerpo, empleando una técnica óptica de reconstrucción 3D. Debido a la naturaleza bidimensional de los dispositivos de digitalización de imágenes, los métodos ópticos de reconstrucción 3D permiten codificar la información tridimensional en diferentes alternativas tales como: deformación de una línea proyectada sobre el cuerpo, variación bidimensional del paso y orientación de franjas proyectadas o retardo temporal de pulsos enviados a la superficie, por ejemplo. De esta manera, una variable de naturaleza óptica es alterada en función de la topografía de la superficie del cuerpo. El tratamiento digital para la reconstrucción 3D, permite inicialmente: a) Calcular el valor de la variable óptica utilizada como codificación para todos los puntos de la superficie digitalizados y b) Calcular las alturas correspondientes a partir de la información obtenida anteriormente. El proceso de convertir digitalmente la variable óptica en altura puede realizarse de dos maneras. Por un lado, conociendo la ecuación fundamental que relaciona la altura de un punto con el valor de la variable óptica asociada en función de los parámetros del sistema. La precisión para medir los

parámetros del sistema y las aproximaciones utilizadas en obtener la ecuación fundamental determinan principalmente la precisión y resolución del sistema de medida 3D implementado. Por otro lado, una etapa de calibración permite obtener una ecuación experimental de conversión que tiene en cuenta todos los parámetros del sistema. La aproximación utilizada para interpolar la ecuación experimental determina principalmente la precisión y resolución del sistema de medida 3D implementado.

Usando una de estas dos alternativas, el tratamiento digital permite obtener una imagen, donde cada posición (i, j) digitalizada de la superficie, posee la altura correspondiente medida en función de las características metrológicas del sistema. Por lo tanto, otro proceso de conversión es requerido para transformar posiciones del sistema de adquisición $Z(i, j)$, en posiciones en el espacio coordenado del objeto $Z(x, y)$. De igual manera, hay dos alternativas para realizar esta conversión. Conociendo el factor de ampliación del sistema óptico de adquisición y asumiendo un sistema libre de aberraciones geométricas, se puede realizar un proceso lineal de conversión de coordenadas (i, j) del espacio imagen sobre la CCD a coordenadas (x, y) del espacio objeto. Por otro lado, un procedimiento de calibración del sistema formador de imágenes, permite obtener una ecuación experimental de conversión del espacio (i, j) al espacio (x, y) que tenga en cuenta la influencia de aberraciones, si son considerables. La figura 1, muestra el procedimiento para la reconstrucción tridimensional por vía óptica.



1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS METODOS OPTICOS

Un método óptico de Reconstrucción 3D hace referencia a una técnica que a partir de un sistema óptico codifica la topografía del cuerpo en función de los parámetros del sistema. Generalmente un sistema óptico de Reconstrucción 3D se compone de tres unidades:

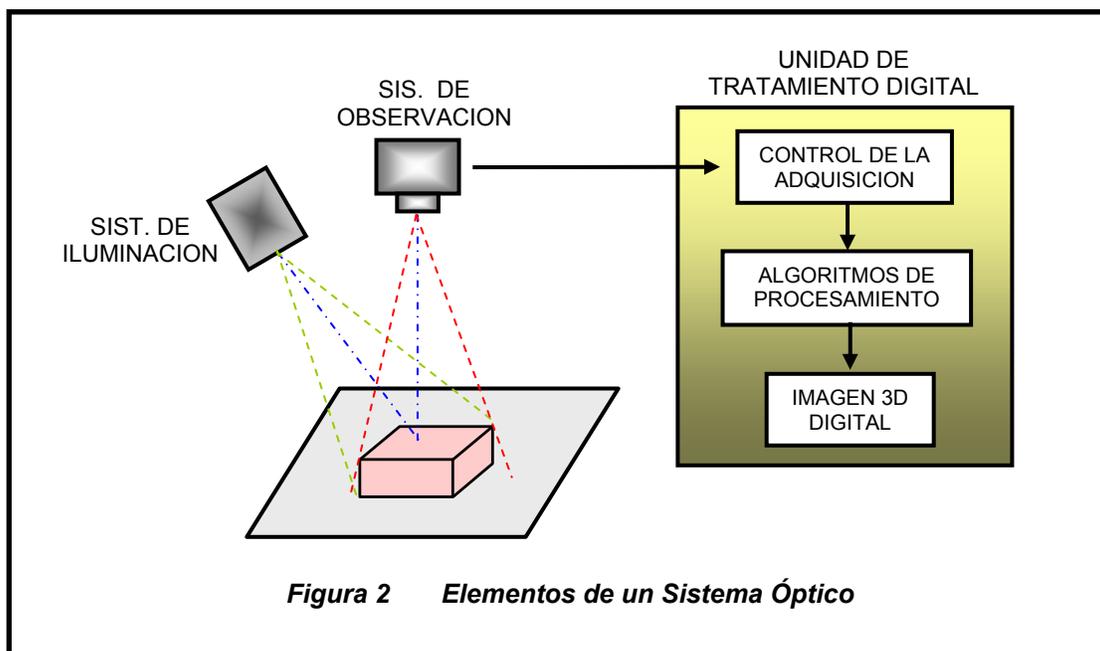


Figura 2 Elementos de un Sistema Óptico

1. Sistema de iluminación o Cabeza Óptica.
2. Sistema de Adquisición.
3. Unidad de Control y Tratamiento Digital.

La Figura 2 muestra los elementos básicos de un sistema óptico de Reconstrucción 3D. El sistema de iluminación es diseñado en función del método óptico y las condiciones metrológicas de reconstrucción: campo de observación, resolución, profundidades de campo; son algunas variables que definen las condiciones para diseñar el sistema de iluminación.

La utilización de dispositivos formadores de imágenes telecéntricas o no telecéntricas, la proyección de un punto, línea láser, la proyección de un patrón de intensidad sobre la superficie del cuerpo son algunos ejemplos que permiten definir la óptica utilizada en el sistema de iluminación. De igual manera, existen otros métodos en los cuales no hay control directo sobre la fuente de iluminación. En este caso solo es necesario adaptar el sistema de adquisición en función de las alternativas de codificación. Por ejemplo en el uso de visión estéreo se requieren al menos dos imágenes con diferentes ángulos de observación de la misma superficie.

El sistema de adquisición de la información, se diseña en función de la variable óptica que codifica la topografía. Generalmente se utilizan transductores de señal luminosa a señal eléctrica: Puntual (Fotodetector), lineal (Línea CCD) o Bidimensional (Matriz CCD). La interfase de digitalización de la información se sincroniza con el sistema de iluminación para adquirir el número de datos necesarios en la digitalización de la superficie del cuerpo. Así un punto láser proyectado sobre la superficie del cuerpo requiere de un sistema de barrido bidimensional para barrer la superficie del cuerpo. En cada posición (x, y) del sistema de barrido, se debe digitalizar la imagen del punto láser, desplazado por la topografía del cuerpo. Sin embargo, proyectando un patrón de líneas sobre la superficie, no es necesario sistemas adicionales de barrido y se requiere al menos una imagen, dependiendo del método óptico de proyección estructurado diseñado.

La Unidad de Tratamiento Digital de la información, permite realizar las transformaciones digitales necesarias para el proceso inverso de Reconstrucción 3D, mencionado en la sección anterior. Etapas intermedias como almacenamiento de la información, pre-tratamiento de datos, etapas de calibración experimental, etc. son requisitos en el tratamiento de imágenes.

Aunque los métodos ópticos pueden clasificarse de diferentes maneras; bibliográficamente ^[1], se puede agrupar en función del sistema de iluminación como métodos pasivos y activos. En los métodos pasivos no es necesario controlar la fuente de iluminación, pero el tratamiento digital para obtener información topográfica requiere un alto esfuerzo computacional. En los métodos activos el uso de un patrón de radiación simplifica el problema de la medida de la topografía. La tabla 1 muestra una clasificación de los métodos ópticos comúnmente usados

Clasificación		Método	Principio de Codificación	
A C T I V O S	Luz Estructurada	láser	El patrón puede ser un punto, una línea, múltiples líneas o un patrón definido.	Se basa en triangulación, la altura para cada punto se codifica en el corrimiento del patrón con respecto a una referencia debido a la topografía del cuerpo.
		Binaria	Se utilizan patrones binarios bidimensionales que codifican la información en uno ó en dos ejes	
		Nivel de gris	Usa un patrón de iluminación en niveles de gris.	
		Cromática	El patrón de iluminación está asociado a una matriz de color	
	Métodos a medida de fase	Proyección de franjas	La altura del objeto se codifica en la deformación local del paso y orientación de las franjas proyectadas que están contenidas en un término de fase, que se debe recuperar.	
		Moiré	La altura del cuerpo se codifica en curvas de Nivel, obtenidas por efecto Moiré debido a la proyección de sistemas de franjas de paso similar.	
		Interferometría	Consiste en variar el camino óptico y obtener información de fase de las franjas de interferencia. Puede ser a incidencia normal, oblicua o Interferometría a luz blanca	
	Tiempo de Vuelo		Para calcular la distancia absoluta de un punto del objeto se envía un pulso de luz (usualmente láser), y se mide el retardo de tiempo del haz reflejado,	
	Microscopía Confocal		El cuerpo se ubica en un sistema de desplazamiento axial y la altura se determina identificando la posición donde se encuentra el máximo de intensidad del sistema Confocal.	
	P A S I V O S	Visión estéreo	A partir de dos imágenes tomadas en diferentes ángulos, se busca la correspondencia entre características y se halla la profundidad, esto es semejante al modelo binocular humano.	
Shape from Shading		La información 3D se encuentra a través del manejo de sombras		

Tabla 1. Clasificación de los métodos ópticos comúnmente usados.

En general, la elección de una técnica óptica de Reconstrucción 3D depende de varias condiciones que impone el objeto en estudio. Se destacan principalmente:

- a) Medición absoluta de la topografía con respecto a un sistema de referencia, o medición relativa con respecto a la posición relativa en el sistema de adquisición y el cuerpo.
- b) Medición para estudio estático, sin movimiento en el intervalo de adquisición o dinámicos con objetos en movimiento o deformación superficial.
- c) Características del cuerpo como grado de absorción luminosa, discontinuidades en la topografía, sombras, etc.

De igual manera, la elección de un método óptico de Reconstrucción 3D depende de las condiciones metrológicas exigidas en la reconstrucción. Así un sistema de proyección estructurado es adecuado para campos de observación grandes en el rango de milímetros a metros, con resolución del orden de decenas de milímetros. Para resolución del orden de varias decenas de nanómetros a micras, las técnicas interferométricas son adecuadas; aunque el campo de observación es limitado a algunas décimas de milímetros a milímetros. La tabla 2 clasifica algunos métodos ópticos de reconstrucción 3D en función de las dimensiones transversales del objeto, resolución, precisión y rango de medida.

MÉTODO	RANGO DE MEDIDA	DIM. TRANSV. DEL OBJETO	PRECISIÓN $\pm \Delta Z$	RESOLUCIÓN RELATIVA
Proyección de Franjas	1 mm : 300 mm	1000 mm x 1000 mm	0.5 mm	1/1000 : 1/5000
Proyección de Franjas	0.1 mm : 50 mm	100 mm x 100 mm	0.05 mm	1/1000 : 1/5000
Proyección de Franjas	0.05 mm : 1 mm	50 mm x 50 mm	0.001 mm	1/500 : 1/5000
Microscopía interferométrica	0.001 mm : 0.05 mm	15 mm x 10 mm	0.0001 mm	1/100 : 1/5000
Interferometría con luz Blanca	2 nm : 400 μ m	5 mm x 5 mm	2 nm	1/100000
Microscopía Confocal	0.001 mm : 0.056 mm	1 mm x 1 mm	50 nm	1/100 : 1/5000
Interferometría UV	0.001 mm : 0.01 mm	0.3 mm x 0.3 mm	0.5 nm	1/2000
AFM	0.1 nm : 2000 nm	0.1 mm x 0.1 mm	0.01 nm	1/5 : 1/10000

TABLA 2. Métodos ópticos de reconstrucción 3D en función de las dimensiones transversales del objeto, Resolución, precisión y rango de medida. [2]

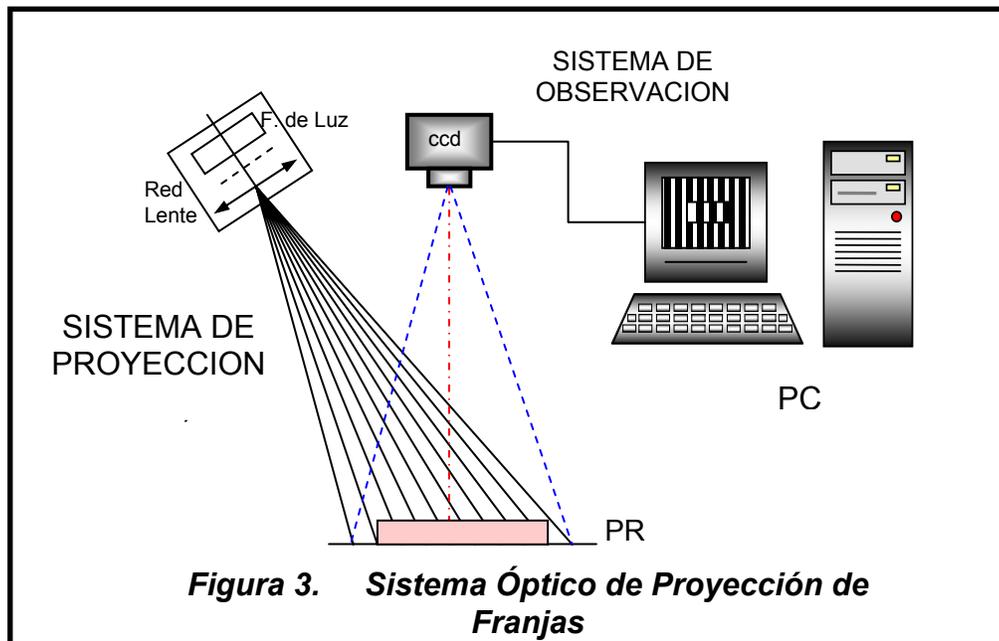
Las técnicas ópticas de reconstrucción 3D han tenido una gran acogida, ya que es una tecnología no invasiva, no requiere altos costos de implementación, y es útil en labores de inspección o supervisión, siendo cuantitativamente más objetiva, fiable y consistente que la inspección humana. Pueden alcanzar excelentes resoluciones, son de fácil automatización, evitando trabajos visuales fatigosos y altamente repetitivos.

Actualmente se aplican en diversos procesos científicos y militares, extendiéndose su uso además, en un amplio rango de sectores industriales para la

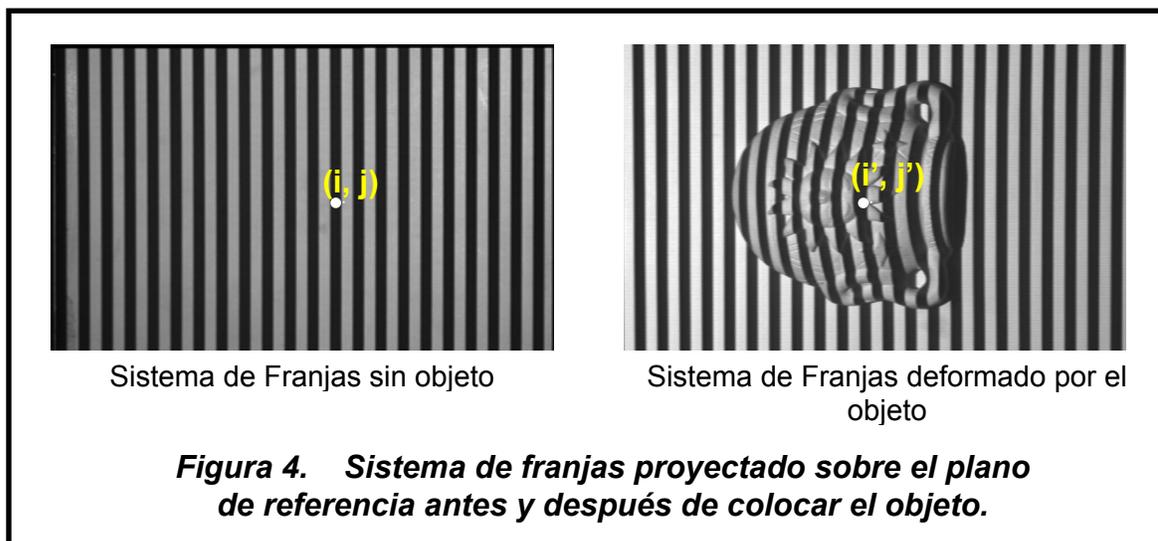
automatización de tareas anteriormente reservadas a la inspección visual humana. El uso de técnicas ópticas de reconstrucción 3D, se está extendiendo cada día más entre los diferentes sectores industriales, tanto en procesos de control de productos, como en control de procesos de producción. La utilización de esta tecnología, y los beneficios que conlleva, se centran principalmente en todas aquellas áreas en las que es importante determinada información metrológica, como por ejemplo, en los sectores industriales del metal (automatización, aluminio, acero etc.), alimentación (especialmente en envasados), Medicina, Computación y Electrónica, en el sector textil ^[3] para la medición del ancho de los tejidos o la determinación del grado de pilling de los tejidos sometidos a ensayos de resistencia a la formación del pilling, medición de parámetros en ensayos de control de calidad, como la medición del número de fibras que componen un hilo a partir de imágenes extraídas del microscopio, la capacidad de detectar personas, huellas dactilares, matriculas, etc.

1.4 RECONSTRUCCIÓN 3-D POR PROYECCION DE FRANJAS

Conscientes de las necesidades que existen actualmente en el medio científico-industrial, se fundamenta esta investigación con el objetivo de realizar un análisis topográfico de un objeto ubicado sobre una pantalla a cierta distancia, sin tocarlo, basándose en el procesamiento de datos por algoritmos computacionales. La técnica de Proyección de Franjas es el método óptico utilizado en este proyecto, se basa en la deformación que sufren las franjas proyectadas sobre el objeto, debido a la topografía de su superficie. La Figura 3 muestra el Sistema Óptico utilizado en el método de Proyección de Franjas.



El Sistema Óptico consta principalmente de dos partes: un sistema de proyección, donde es proyectado un patrón de franjas sobre la superficie de un objeto, y un sistema de observación, donde se observa el patrón de franjas proyectado sobre el plano de referencia antes y después de colocar el objeto. La deformación de las franjas es debida a la topografía propia del objeto. Si la superficie del objeto es plana, se obtiene una imagen con franjas paralelas y de paso constante, si la superficie no es plana las franjas se deformaran debido a la topografía del cuerpo.



La Figura 4 muestra un Sistema de Franjas antes y después de colocar el objeto. El corrimiento de las franjas, causado por la topografía del cuerpo es más evidente en la parte superior del objeto donde hay cambios fuertes en la altura ^[2].

1.4.1 CODIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La intensidad luminosa que registra la cámara CCD se puede escribir:

$$I(x, y) = I_o(x, y) + A(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (1)$$

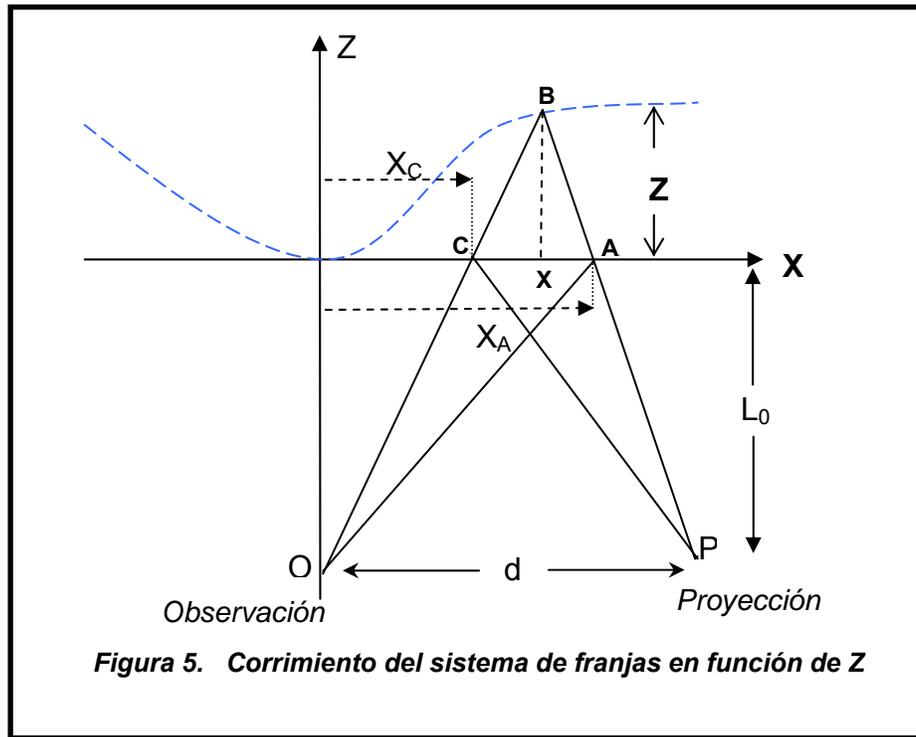
Donde $\phi(x,y)$ corresponde a la función fase, que indica como cambia el paso de la franjas al colocar el cuerpo. Es decir para la n-ésima franja ubicada sobre el plano de referencia en el píxel (i, j) , (ver figura 4), se introduce un desplazamiento al píxel (i', j) debido a la altura del cuerpo. Así el corrimiento que introduce el cuerpo, altera la función fase $\phi(x,y)$ de la ecuación (1). Entonces, matemáticamente el proceso de codificación consiste en deformar la función $\phi(x,y)$ del sistema de franjas y el proceso de reconstrucción 3D consiste en recuperar la función $\phi(x,y)$ y realizar la conversión inversa en altura.

Sobre el plano de referencia existe una fase inicial que es característica del sistema, y depende del paso de proyección y de los parámetros del sistema de proyección e inclusive de las aberraciones geométricas. La figura 5 muestra un diagrama del sistema óptico de proyección y observación. P y O son las pupilas de entrada y salida de los sistemas formadores de imágenes, el plano XY define el plano de referencia donde se focaliza el sistema de observación. El eje óptico del sistema de observación es perpendicular al plano de referencia, la altura se mide en dirección del eje Z. La franja que llega a A tiene una fase inicial ϕ_A , como se indica en la figura.

Cuando se ubica el objeto, la franja es interceptada por la superficie del cuerpo en B. Usando un modelo no telecéntrico de observación el punto B es proyectado en C sobre el plano de referencia, luego se debe cumplir:

$$\phi_{obj}(x_c) = \phi(x_A, 0) = \phi(x_C + \Delta) \quad (2)$$

Donde $\Delta = \overline{AC}$.



La codificación de la información, será entonces la deformación de la fase inicial en función del corrimiento Δ que es función de Z . Usando el modelo de observación no telecéntrico, el corrimiento Δ se puede calcular a partir de relaciones geométricas como:

$$\Delta = \frac{z * d}{z - L_0} \quad (3)$$

Definiendo:

$$\Delta\phi_{obj} = \phi_{obj}(x_c) - \phi(x_c, 0) \quad (4)$$

Se obtiene:

$$\Delta\phi_{obj} = \frac{2\pi\Delta}{P_0} = \frac{2\pi d}{P_0(z - L_0)} \quad (5)$$

Donde P_0 es el paso de las franjas medidas sobre el plano de referencia. Así, extrayendo ϕ_{OBJ} del sistema de franjas sobre el cuerpo y ϕ del sistema de franjas sobre el plano de referencia, se puede utilizar la ecuación fundamental (5) para calcular $z(x, y)$.

1.4.2 EXTRACCIÓN DE LA FASE DEL SISTEMA DE FRANJAS

Existen varias técnicas de extracción de fase donde se utilizan uno o varios diagramas de intensidad. Para obtener $\phi(x, y)$ los métodos más utilizados incluyen: Transformada de Fourier (TF) [4], Regresión no lineal [5] y Corrimiento de Fase [6].

La ecuación (1) indica la intensidad luminosa registrada por la cámara CCD, del sistema de franjas deformadas. $I_o(x, y)$ representa la intensidad luminosa del fondo continuo, $A(x, y)$ es el factor de contraste y $\phi(x, y)$ es la fase del sistema de franjas que representa las variaciones del paso y orientación de las mismas. La tarea principal de un método de extracción de fase es la de obtener $\phi(x, y)$ a partir de imágenes en intensidad luminosa digitalizadas.

1.5 CORRIMIENTO DE FASE A INTERVALOS REGULARES^[6].

La ecuación (1) indica que existen tres funciones incógnitas $I_o(x, y)$, $A(x, y)$ y $\phi(x, y)$. Para calcular $\phi(x, y)$ en cada punto de la imagen del sistema de franjas se requieren al menos tres datos en intensidad linealmente independientes. Estos datos se obtienen experimentalmente desplazando las franjas con respecto al cuerpo introduciendo una fase adicional φ_i en un rango de 0 y 2π . En este rango se adquieren N sistema de franjas desplazadas una fase φ_i definida por:

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{N} (i-1) \quad i = 1,2,3\dots N. \quad (6)$$

Así la ecuación (1) puede ser escrita:

$$I(x, y) = I_o(x, y) + A(x, y) \cos[\phi(x, y) - \varphi_i] \quad (7)$$

Utilizando las propiedades ortogonales de función senosoidales se encuentra:

$$\sum_{i=1}^N I_i * \cos(\varphi_i) = \frac{N * A(x, y)}{2} * \cos[\phi(x, y)] \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N I_i * \text{sen}(\varphi_i) = \frac{N * A(x, y)}{2} * \text{sen}[\phi(x, y)] \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N I_i = N * I_o \quad (10)$$

A partir de esas ecuaciones se calcula $\phi(x, y)$ y $A(x, y)$ usando:

$$tg(\phi) = \frac{\sum_{i=1}^N I_i * sen(\varphi_i)}{\sum_{i=1}^N I_i * cos(\varphi_i)} \quad (11)$$

$$A(x, y) = \frac{2}{N} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N I_i * sen(\varphi_i)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N I_i * cos(\varphi_i)\right)^2} \quad (12)$$

Para el algoritmo a cuatro imágenes, es decir N=4. Las ecuaciones generales para el corrimiento de fase serán:

$$tg(\phi) = \frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3} \quad (13)$$

$$2A(x, y) = \sqrt{(I_2 - I_1)^2 + (I_1 - I_3)^2} \quad (14)$$

Donde: I_1 , equivale a un corrimiento de fase $\varphi_1 = 0$; I_2 , corresponde a un corrimiento de fase $\varphi_2 = \pi/2$; I_3 a $\varphi_3 = \pi$; I_4 a $\varphi_4 = 3\pi/2$, respectivamente.

De esta manera conociendo φ_i y los valores de intensidad I_i se calcula la función $\phi(x, y)$. La ventaja de esta técnica es que permite obtener $\phi(x, y)$ para cada punto independiente de la influencia de los puntos vecinos. Regiones sin información de franjas (sombras), no afectan regiones útiles, a diferencia del método de la Transformada de Fourier.

1.6 CORRIMIENTO DE FASE A INTERVALOS NO REGULARES^[7].

En el método de corrimiento de fase a intervalos no regulares, la fase se calcula utilizando varios sistemas de franjas deformadas por el cuerpo pero desplazadas a intervalos no regulares de ψ_k . Introduciendo un corrimiento no regular, al sistema de franjas deformado y resolviendo un sistema de ecuaciones lineales, se calcula la fase para cada punto.

De igual manera:

$$I_k(x, y) = I_0(x, y) + A(x, y)\cos[\phi(x, y) + \psi_k] \quad (15)$$

La ecuación anterior indica la intensidad luminosa registrada por la cámara CCD, del sistema de franjas deformadas. $I_0(x, y)$ representa la intensidad luminosa del fondo continuo, $A(x, y)$ es el factor de contraste, $\phi(x, y)$ es la fase del sistema de franjas, y ψ_k representa el factor de fase no regular, introducido para cada sistema de franjas.

A partir de la ecuación (15) para cada punto de la imagen se obtiene:

$$I_k = a_0 + a_1 * \cos\psi_k + a_2 * \sin\psi_k \quad (16)$$

Conociendo ψ_k e I_k , la ecuación (16) permite definir un sistema lineal de k ecuaciones y tres incógnitas. Utilizando una función de error E y usando el método de mínimos cuadrados se puede calcular a_0 , a_1 y a_2 :

$$E = \sum_{k=0}^{N-1} (I_k - I'_k)^2 = \sum_{k=0}^{N-1} (a_0 + a_1 * \cos\psi_k + a_2 * \sin\psi_k - I'_k)^2 \quad (17)$$

Donde I'_k son los valores en intensidad experimentales.

Calculando $\frac{\partial E}{\partial a_0} = 0$, $\frac{\partial E}{\partial a_1} = 0$ y $\frac{\partial E}{\partial a_2} = 0$, se obtiene un sistema lineal de

Ecuaciones, que se pueden escribir matricialmente como:

$$A(\psi_k) a = b(\psi_k) \quad (18)$$

Donde:

$$A(\psi_k) = \begin{bmatrix} N & \sum_{k=0}^{N-1} \cos \psi_k & \sum_{k=0}^{N-1} \sin \psi_k \\ \sum_{k=0}^{N-1} \cos \psi_k & \sum_{k=0}^{N-1} \cos^2 \psi_k & \sum_{k=0}^{N-1} \cos \psi_k * \sin \psi_k \\ \sum_{k=0}^{N-1} \sin \psi_k & \sum_{k=0}^{N-1} \cos \psi_k * \sin \psi_k & \sum_{k=0}^{N-1} \sin^2 \psi_k \end{bmatrix}$$

$$a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

;

$$b(\psi_k) = \begin{bmatrix} \sum_{k=0}^{N-1} I'_k \\ \sum_{k=0}^{N-1} I'_k * \cos \psi_k \\ \sum_{k=0}^{N-1} I'_k * \sin \psi_k \end{bmatrix}$$

De la ecuación (19) se obtiene: $a = A^{-1}(\psi_k) b(\psi_k)$ (19)

Finalmente a partir de a_2 y a_1 se calcula $\phi(x, y)$ según:

$$\phi = -\tan^{-1} \frac{a_2}{a_1} \quad (20)$$

Así, la matriz A de (3 x 3) es conocida a partir de los valores ψ_k e I_k , para cada punto del sistema de franjas. El vector $b(\psi_k)$ se conoce para cada punto de la imagen del sistema de franjas usando los valores de ψ_k e I_k . Calculando A^{-1} y multiplicándolo por $b(\psi_k)$ se obtiene el vector a donde sus elementos corresponden a a_0, a_1 y a_2 . La fase $\phi(x, y)$ se obtiene según la ecuación (20). Esta técnica es utilizada en sistemas ópticos donde no se puede introducir un corrimiento regular de fase.

2. SISTEMA OPTICO DE RECONSTRUCCION 3D IMPLEMENTADO

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el sistema óptico implementado para la determinación cuantitativa de la forma 3D de ampollas en recubrimientos. El sistema óptico se implementó a partir de la técnica de proyección de franjas; consta de un sistema de proyección, un sistema de adquisición de imágenes y una unidad de adquisición, control y tratamiento de imágenes. Se explican los procedimientos experimentales de calibración para determinar los parámetros del sistema óptico. De igual manera se explica el procedimiento para realizar la reconstrucción 3D digital de cualquier objeto.

2.2 SISTEMA ÓPTICO

El montaje óptico para la reconstrucción 3D consiste de un sistema de proyección, donde se proyecta un patrón de franjas sobre la superficie de un objeto, un sistema de adquisición, donde se registra el patrón de franjas proyectado sobre el plano de referencia antes y después de colocar el objeto y una unidad de adquisición y tratamiento donde se sincroniza la adquisición de imágenes y se realiza el tratamiento de la información. La figura 6, muestra el sistema óptico utilizado para el registro de información 3D usando la técnica de proyección de franjas, construido a partir del esquema de la figura 2.

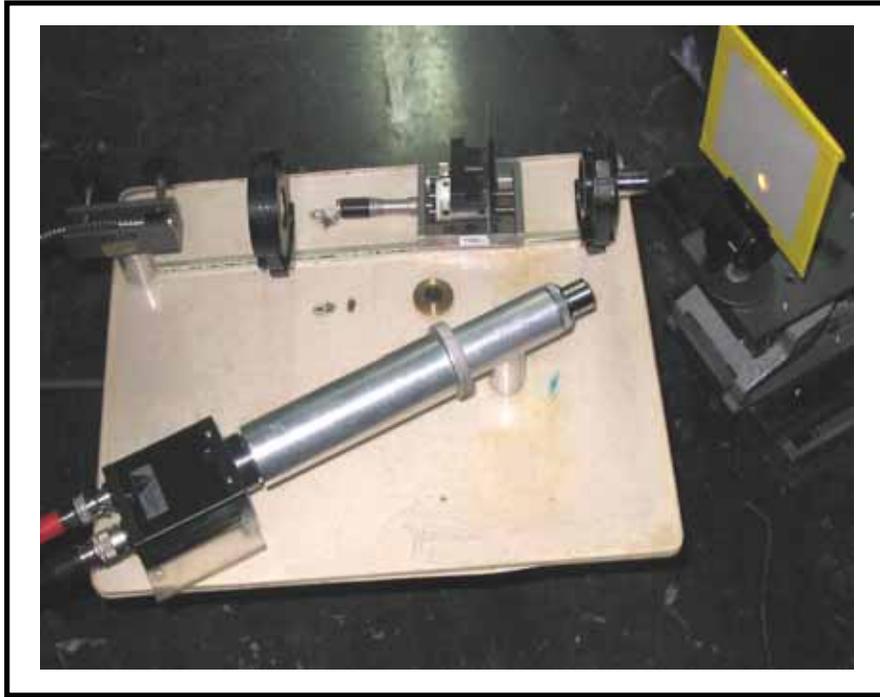


Figura 6. Imagen del montaje óptico para el registro de información 3D usando la técnica de proyección de franjas

2.2.1 SISTEMA DE PROYECCION

El sistema de proyección consta:

- Una fuente de iluminación fibrada
- Una rejilla de difracción intercambiable
- Una lente de proyección.
- Un objetivo

La fuente de luz es un aspecto de vital importancia en los sistemas ópticos de reconstrucción 3D y afectan de forma fundamental los algoritmos a utilizar bajo esas condiciones. Una iluminación arbitraria del entorno no suele ser aceptable ya que muy probablemente se obtienen imágenes con un bajo contraste, reflexiones

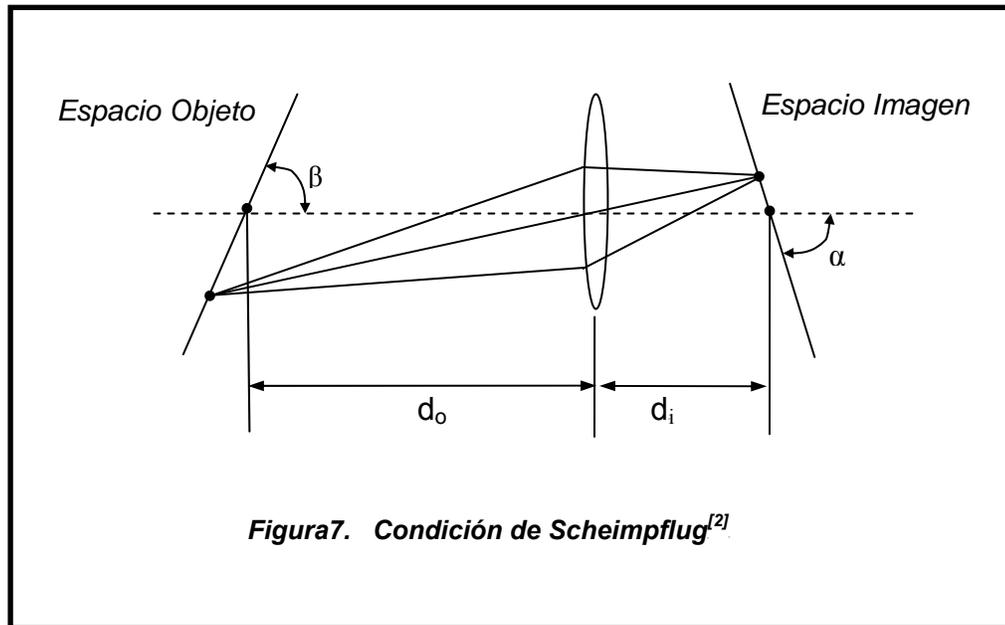
especulares, además de sombras y detalles indeseables. Los objetivos de una iluminación adecuada son, básicamente, independizar las condiciones del entorno y resaltar los rasgos de interés de una determinada aplicación.

La fuente de iluminación utilizada fue una lámpara fibrada marca Oriel Modelo 77500. Un sistema óptico focaliza la radiación proveniente de una lámpara incandescente sobre un ramillete de fibras ópticas de diámetro externo 3 mm. La radiación de salida del otro extremo del ramillete se utiliza para iluminar la rejilla de difracción ubicada sobre un soporte. La rejilla puede intercambiarse para alterar el paso de las franjas sobre el plano de referencia sin variar la distancia de proyección. Se utilizó una lente de focal 4 cm y diámetro 2.2 cm. Para producir la imagen de la rejilla sobre el plano de referencia se utilizó, un objetivo de focal 1cm. y diámetro 1.2cm. Se fijó una distancia de proyección de 10 cm, obteniéndose un campo imagen de 1x1cm con una rejilla, inicialmente de 30 líneas/ mm. Debido a las condiciones experimentales del montaje, el eje óptico de proyección no es perpendicular al plano de referencia. En estas condiciones de proyección, la nitidez de las franjas se degrada en los extremos. Para mejorar el contraste de las franjas en toda la región imagen se ajustó una leve rotación al soporte de la rejilla. Teóricamente se puede demostrar que existe un ángulo α , donde se focaliza completamente la imagen sobre el plano de referencia ubicado a un ángulo β , como se muestra en la figura 7, dada por la ecuación:

$$\tan(\alpha) = G_t * \tan(\beta) \quad (21)$$

Donde

$$G_t = \frac{d_0}{d_i} \quad (22)$$



2.2.2 SISTEMA DE OBSERVACION

En el sistema de observación se utilizó una cámara CCD con el eje óptico ubicado perpendicular al plano de referencia. Se utilizó un soporte especialmente diseñado para adaptarlo a la cámara CCD y ubicar un objetivo de focal 1 cm. y diámetro 1.2 cm. La distancia imagen fue aproximadamente de 18 cm medida entre la matriz CCD y la lente. En estas condiciones se obtuvo un campo de observación de 3 x 4 mm. Las especificaciones técnicas de la cámara se muestran en la tabla siguiente:

CAMARA DE VIDEO SONY XC75CE	
CAPTURA	CCD Interlínea
ELEMENTOS	752 x 582 (H/V)
ZONA DE DETECCION	½ Pulgada
DIMENSIONES DE LA CELDA SENSIBLE	8.6 x 8.3 μ m (H/V)
DIMENSIONES DE LA MATRIZ	7.95 x 6.45 mm (H/V)

Tabla 3. Datos de la cámara utilizada^[2]

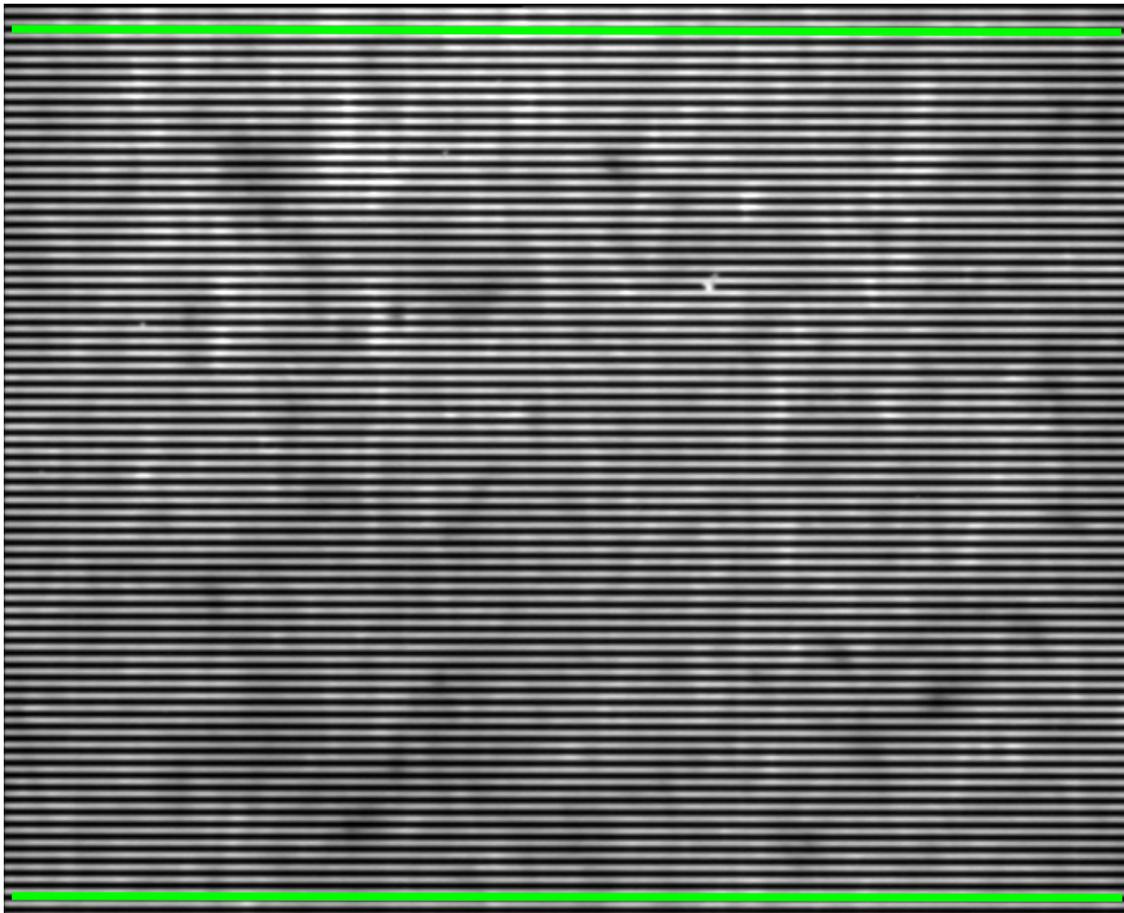
2.2.3 SISTEMA DE CONTROL, DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Se utilizó una tarjeta de adquisición Meteor II de Matrox Imaging para digitalizar las imágenes enviadas por la CCD, por medio de un software de adquisición construido en C++. Las imágenes se almacenan en el computador para ser posteriormente procesadas. Cada imagen digitalizada tiene una resolución de 640x480 píxeles a 8 bits (monocromática).

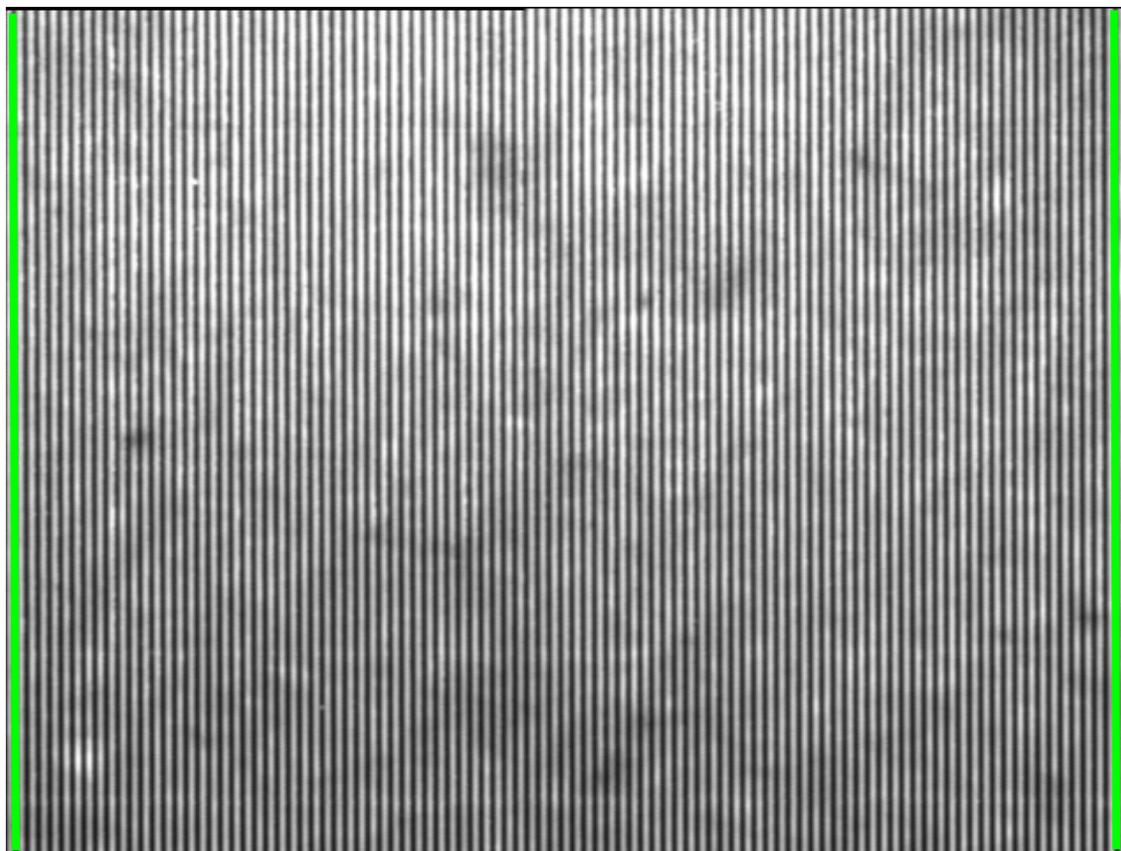
2.3 CALIBRACION XY DEL SISTEMA DE ADQUISICION

Como se mencionó en la sección 1.4.1, el tratamiento digital proporciona una imagen de alturas para cada punto en el espacio imagen. Es necesario realizar un proceso de conversión píxeles a milímetro sobre el plano de referencia, para obtener la imagen digital 3D del cuerpo en el sistema coordenado, ubicado sobre el espacio objeto. Utilizando información de la lente de observación y las distancias objeto e imagen, se puede calcular el factor de ampliación geométrica. Este factor permite convertir milímetros en el espacio imagen a mm en el espacio

objeto. La utilización de este factor depende entre otras cosas, de la presencia de aberraciones geométricas. En este caso el proceso de conversión no será lineal y se tendrían que definir más parámetros característicos. Para determinar la presencia de aberraciones se utilizó como objeto, una rejilla de difracción de 30 líneas /mm, ubicada horizontal y verticalmente. Las figuras muestran las imágenes adquiridas por la CCD de la rejilla ubicada sobre el plano de referencia:



(A)



(B)

**Figura 8. Imágenes de una rejilla de difracción ubicada:
(A) Horizontal, (B) Verticalmente**

Sobre cada figura se ubican líneas verticales y horizontales para evidenciar la no distorsión por aberración geométrica. Sabiendo que la separación entre líneas es de 1/30 mm se estableció en promedio, los siguientes factores:

$$F_x = 5.33 \mu\text{m/píxel}$$

$$F_y = 5.33 \mu\text{m/píxel}$$

2.4 CALIBRACION FASE – ALTURA

En la sección 1.4 se mencionó que el proceso de reconstrucción 3D utilizando el método de proyección de franjas, consiste en extraer la función $\phi(x, y)$ de la ecuación (1) donde esta función codifica la topografía del cuerpo. Utilizando el algoritmo de corrimiento de fase a intervalos regulares o no regulares, esta función puede ser calculada a partir de un algoritmo de tratamiento de imágenes. De esta manera se obtiene una imagen en radianes para cada punto en píxeles. Es por lo tanto, importante realizar un proceso de conversión de fase en alturas para cada punto analizado. De igual manera es posible realizar este proceso de conversión a partir de dos procedimientos diferentes. Un procedimiento es por medio de la ecuación (5) citada en el capítulo anterior, en donde se hace necesario medir los parámetros del sistema, dificultándose así obtener medidas precisas del sistema. La otra forma es por medio de un procedimiento experimental que relacione la variación de la fase en función de la altura. Esto se obtiene desplazando el plano de referencia a intervalos regulares conocidos y para cada posición se calcula la variación de fase. La figura (9) muestra el sistema de franjas a una posición $Z=0$, sobre el plano de referencia.

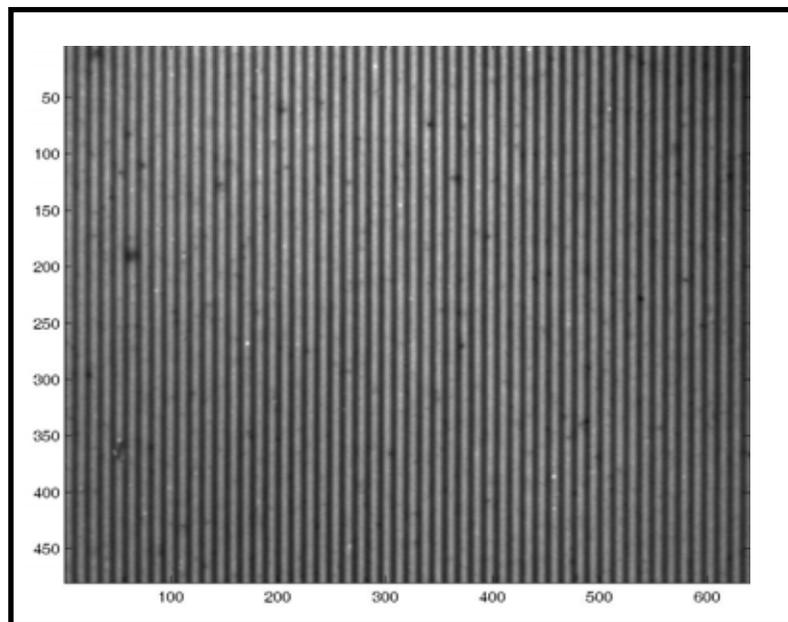


Figura 9. Sistema de franjas a $Z=0$

La fase de este sistema de franjas fue calculada utilizando el algoritmo de la transformada de Fourier. La figura 10, indica detalladamente todo el proceso para extraer la fase por medio de la técnica de transformada de Fourier. Debido a la frecuencia espacial portadora del sistema de franjas, la distribución en intensidad puede escribirse como:

$$I(x, y) = I_0(x, y) + C(x, y) \exp(i2\pi f_0 x) + C^*(x, y) \exp(-i2\pi f_0 x) \quad (23)$$

Donde:
$$C(x, y) = \frac{A}{2} \exp(i\phi(x, y, z)) \quad (24)$$

Y f_0 es la frecuencia portadora de las franjas, siendo P_0 el paso medio, $f_0 = \frac{1}{P_0}$.

El asterisco indica el complejo conjugado. Teniendo en cuenta las propiedades de la Transformada de Fourier la ecuación (23) toma la forma:

$$I(f, y) = \bar{I}_0(f, y) + \bar{C}(f - f_0, y) + \bar{C}^*(f + f_0, y) \quad (25)$$

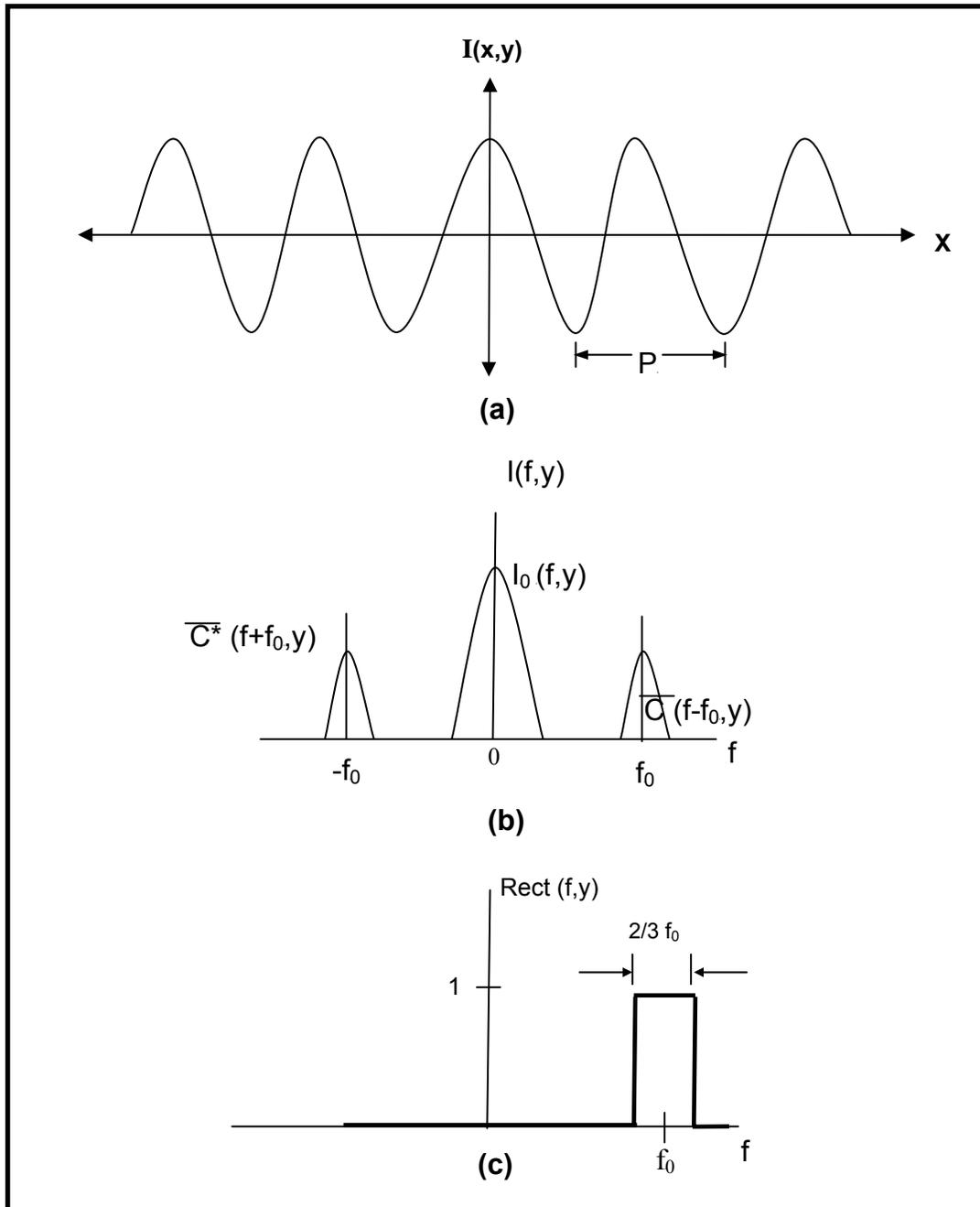
Asumiendo que las variaciones frecuenciales de I_0 y A son pequeñas comparadas con f_0 , $I(f, y)$ posee 3 lóbulos separados, (ver figura b). El lóbulo central corresponde a $\bar{I}_0(f, y)$ y los lóbulos laterales corresponden a $\bar{C}(f, y)$ centrados en $\pm f_0$. Para obtener $\Phi(x, y)$ es necesario, calcular $C(f, y)$ y realizar la Transformada de Fourier inversa. Aislado un lóbulo lateral y calculando la Transformada de Fourier inversa se obtiene

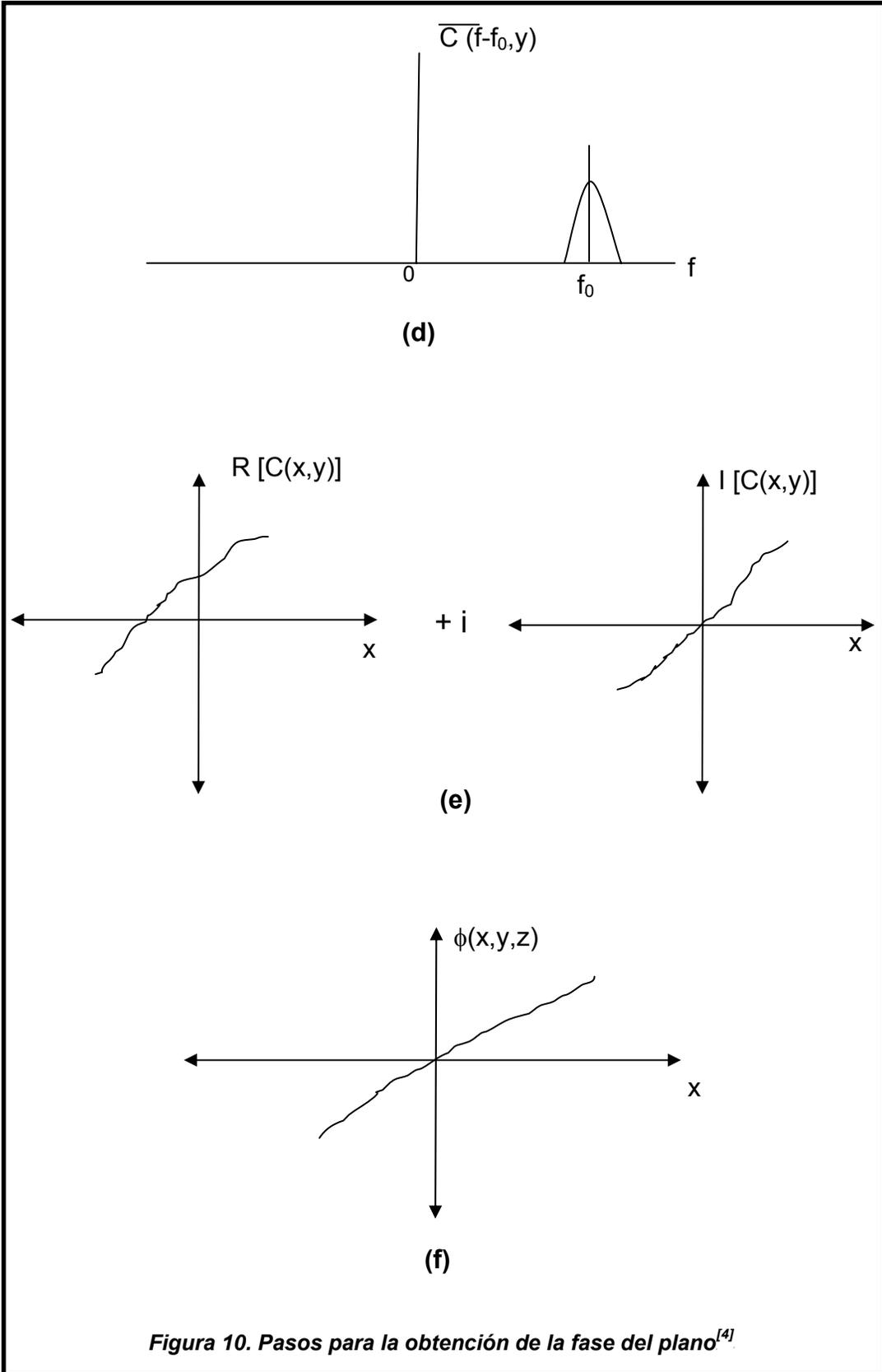
$$C(x, y) \exp(2\pi f_0 x) = \frac{A}{2} \exp(i\phi(x, y, z) + 2\pi f_0 x) \quad (26)$$

La fase de esta función compleja corresponde a:

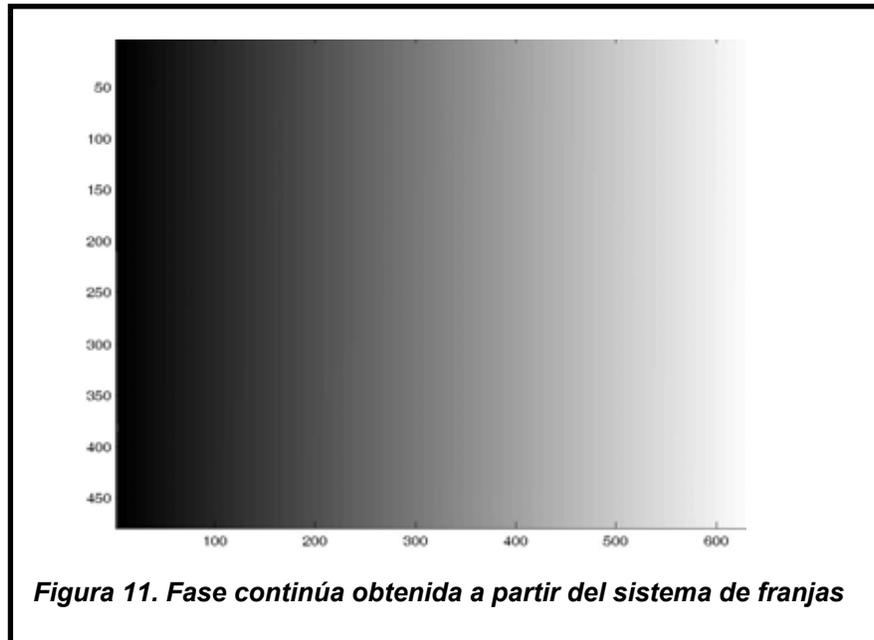
$$\phi(x, y, z) + 2\pi f_0 x \quad (27)$$

Es decir, calculando la fase de la función compleja obtenida de la transformada de Fourier inversa, se obtiene la función fase definida en la ecuación (27). Esta función corresponde a la fase portadora, línea correspondiente a $2\pi f_0$ y la fase introducida por el cuerpo $\phi(x, y, z)$

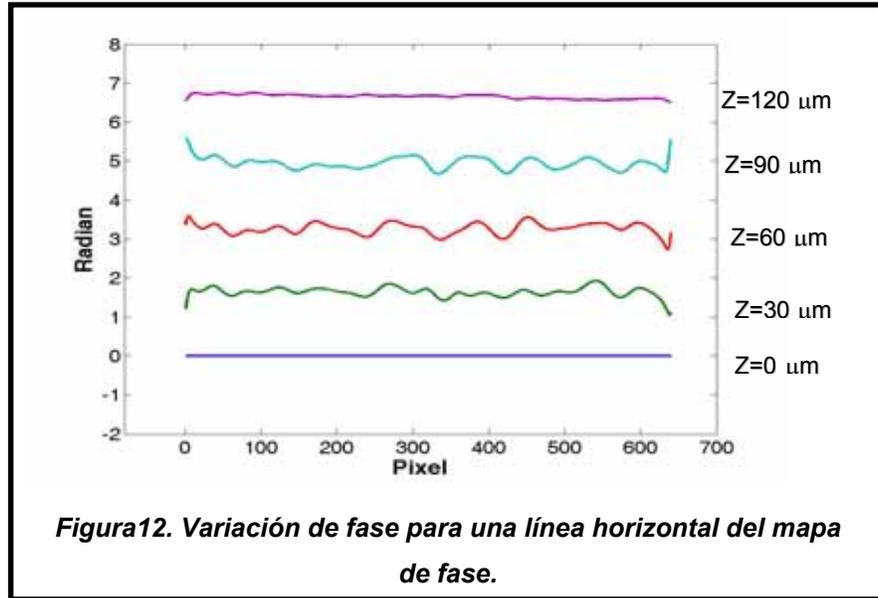




La figura siguiente muestra la fase obtenida utilizando este procedimiento a partir de la figura (9).



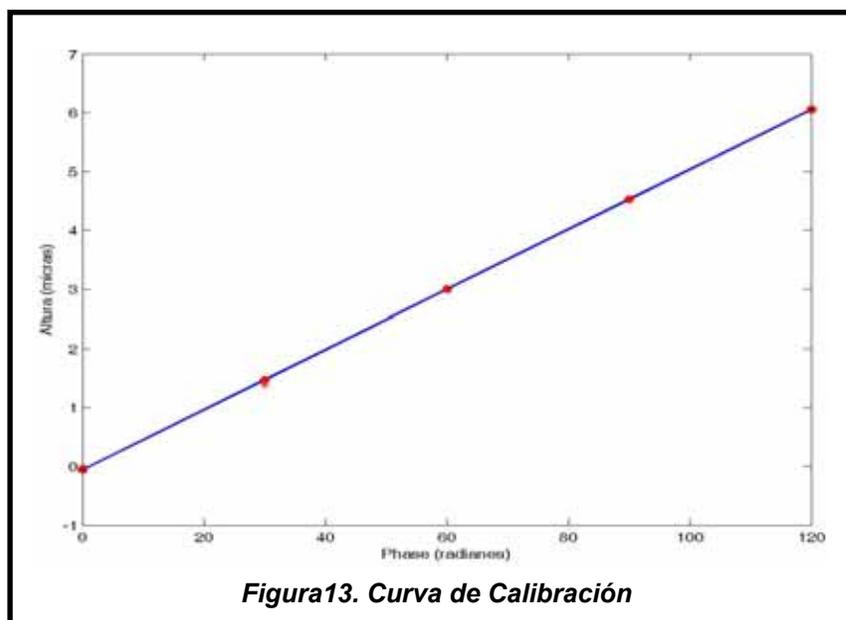
Desplazando el plano de referencia a intervalos de $30\mu\text{m}$ dentro de la profundidad de campo del sistema, se calcula la fase utilizando el procedimiento anterior. Así, para un desplazamiento máximo de $120\mu\text{m}$ se obtiene 5 diagramas de fase. De esta manera se puede obtener una relación experimental entre la variación de la fase con respecto a la fase en $z=0$ y la altura. La figura siguiente muestra la variación en la fase para una línea horizontal, ubicada en la parte central del diagrama. Cada línea corresponde a la variación de la fase para una posición Z , donde la variación de la fase se calcula restando la fase a una posición Z , menos la fase a $Z=0$.



Utilizando un ajuste lineal por mínimos cuadrados, se calcula una relación experimental de la forma:

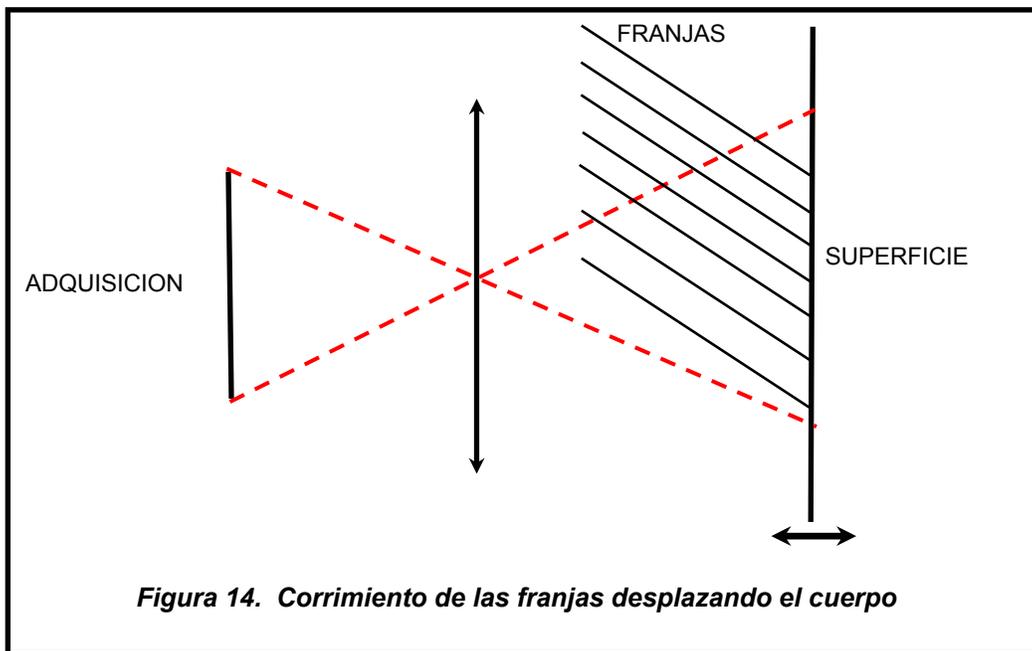
$$\Delta\phi = m * Z + B \quad (28)$$

Donde $\Delta\phi$ corresponde a la diferencia entre la fase a una altura Z y la fase a Z=0. La figura (13), muestra el ajuste lineal, obteniéndose una pendiente $m=0.0051$ rad/ μm . Con este valor se concluye que 2π radianes se obtiene para una altura del cuerpo de $123.14 \mu\text{m}$.



2.5 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE FRANJAS

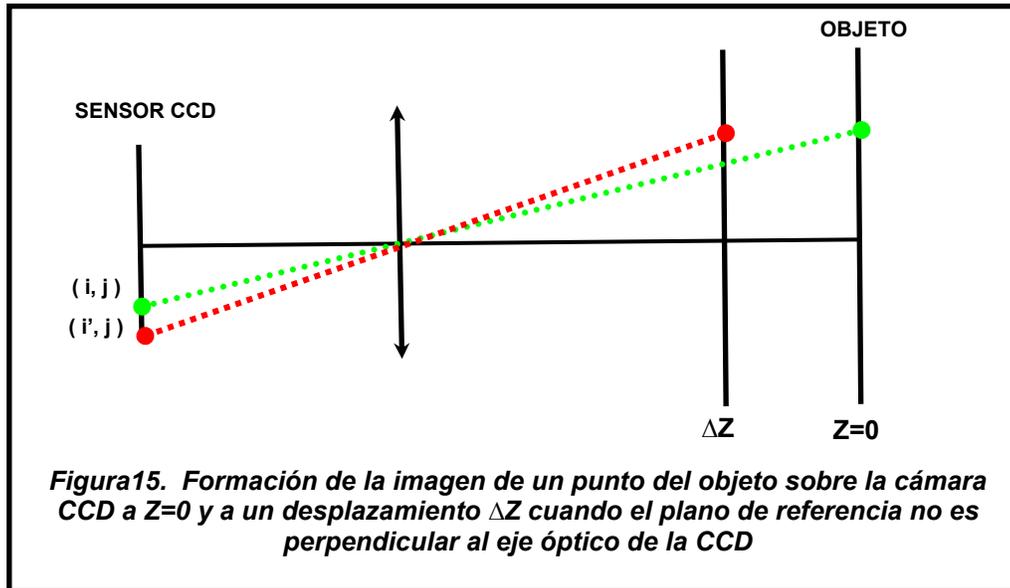
Con el fin de implementar el algoritmo de corrimiento de fase, es necesario generar un desplazamiento relativo entre las franjas y la superficie del cuerpo. Generalmente para sistemas de proyección de franjas se desplaza la rejilla de difracción, utilizando un sistema de microdesplazamiento, tal como un piezo eléctrico. De igual manera es posible introducir un desplazamiento de las franjas, desplazando el cuerpo en dirección del eje óptico del sistema de observación, como se muestra en la siguiente figura:



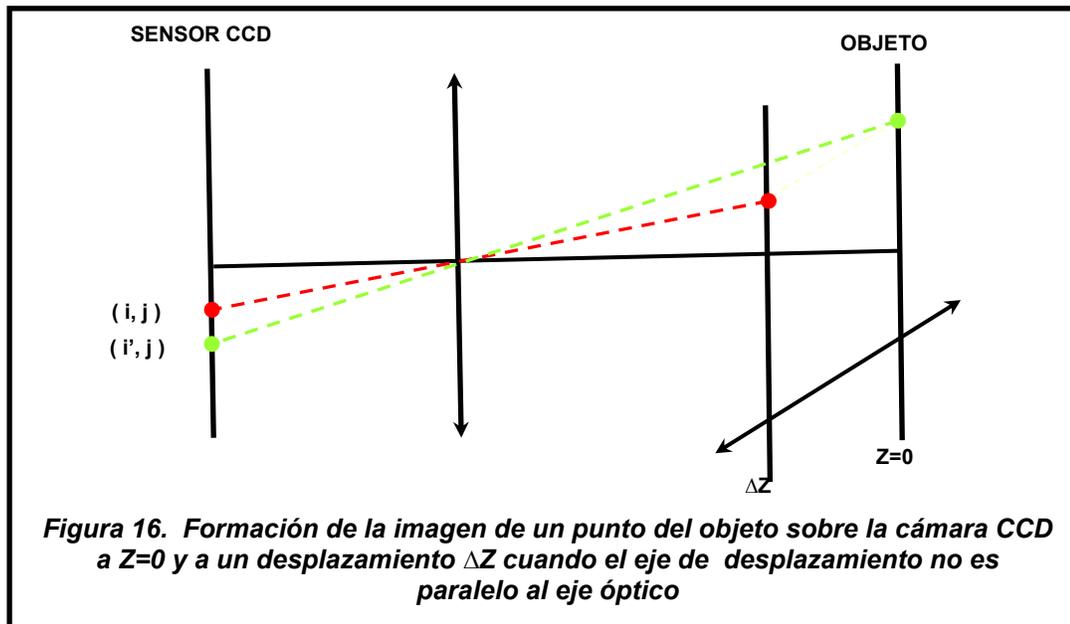
Para utilizar este procedimiento e introducir un corrimiento entre las franjas y la superficie del cuerpo, se debe verificar que:

1. Un punto (i,j) sobre la imagen del objeto no debe desplazarse, al desplazar el cuerpo. Es decir, teniendo el punto A del objeto a $Z=0$, la imagen correspondiente debe formarse sobre la CCD en el píxel (i, j) (ver figura 15). Al mover el objeto un ΔZ , la imagen del mismo punto debe formarse sobre la CCD en

el mismo píxel (i, j) y no en un píxel diferente (i', j) como se muestra en la figura (15). De esta manera se obtiene un corrimiento de las franjas sin detectar desplazamiento lateral del cuerpo.



2. El eje de desplazamiento debe ser paralelo al eje óptico. Es decir, teniendo el punto A del objeto a $Z=0$, la imagen correspondiente debe formarse sobre la CCD en el píxel (i, j) . Al mover el objeto un ΔZ , la imagen del mismo punto debe formarse sobre la CCD en el mismo píxel (i, j) y no en un píxel diferente (i', j) , como se muestra en la figura. De esta manera se obtiene un desplazamiento de las franjas sin desplazamiento lateral del cuerpo.



Utilizando la curva de calibración, es posible introducir un desplazamiento regular en Z para obtener variaciones de fase regulares. Así para utilizar el algoritmo de corrimiento de fase con 4 sistemas de franjas, se debe desplazar el cuerpo a intervalos de $\frac{123.14}{4} = 30.78\mu\text{m}$. Por razones experimentales, es más fácil utilizar un sistema de desplazamiento de $10\ \mu\text{m}$ de precisión para realizar desplazamientos del cuerpo a valores enteros no regulares en fase. De esta manera, el sistema implementado utiliza el algoritmo de corrimiento a intervalos no regulares, para el cálculo de la fase del sistema de franjas. La siguiente figura, muestra el sistema de franjas sobre la superficie de un cuerpo de $4 \times 3\ \text{mm}$.

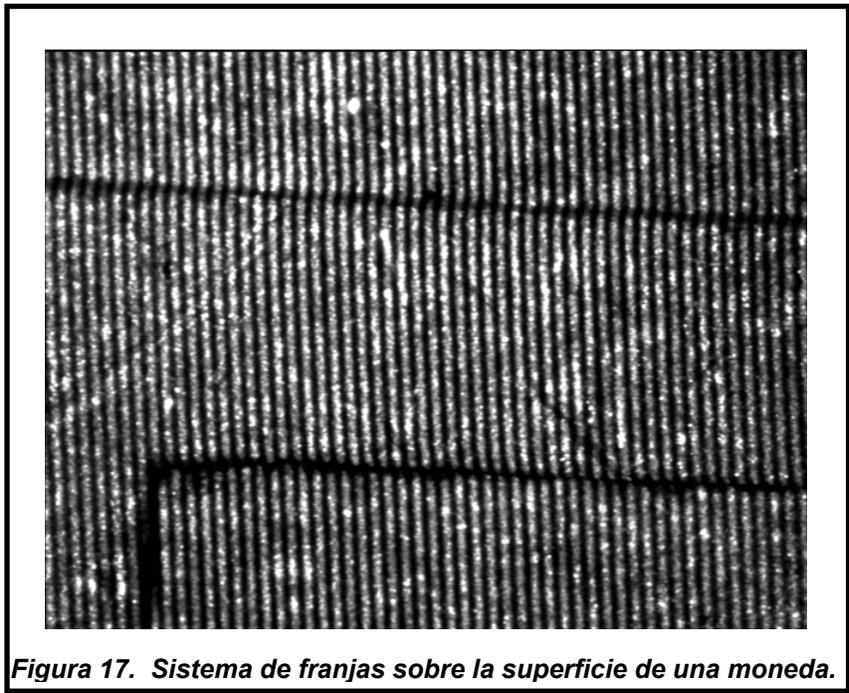


Figura 17. Sistema de franjas sobre la superficie de una moneda.

Desplazando el cuerpo cada 30 micras, se tomaron 5 imágenes correspondientes a variaciones de fase: 0rad, 1.53rad, 3.06rad, 4.59rad, 6.12rad. Utilizando el algoritmo mencionado en la sección 1.6, se calcula la fase discontinua.

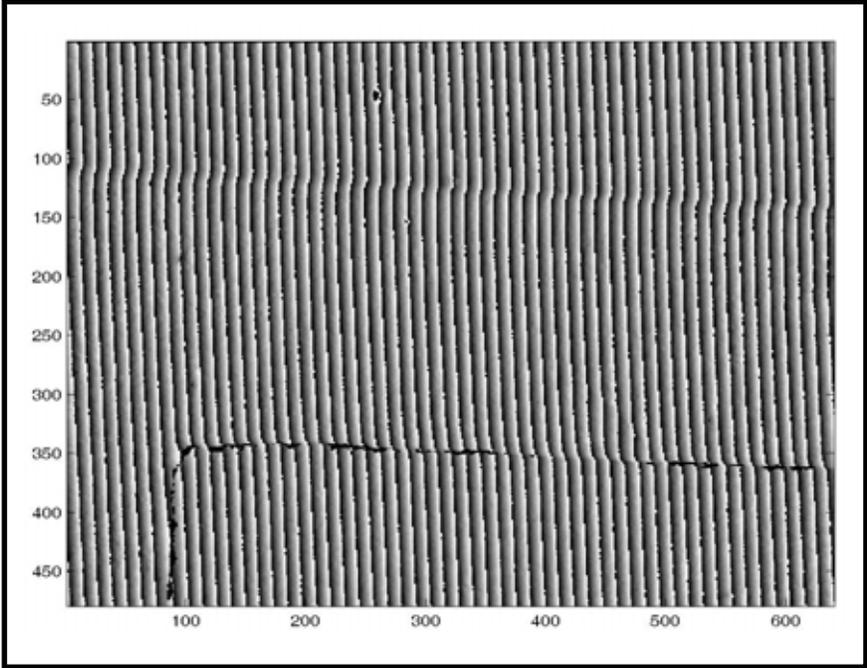
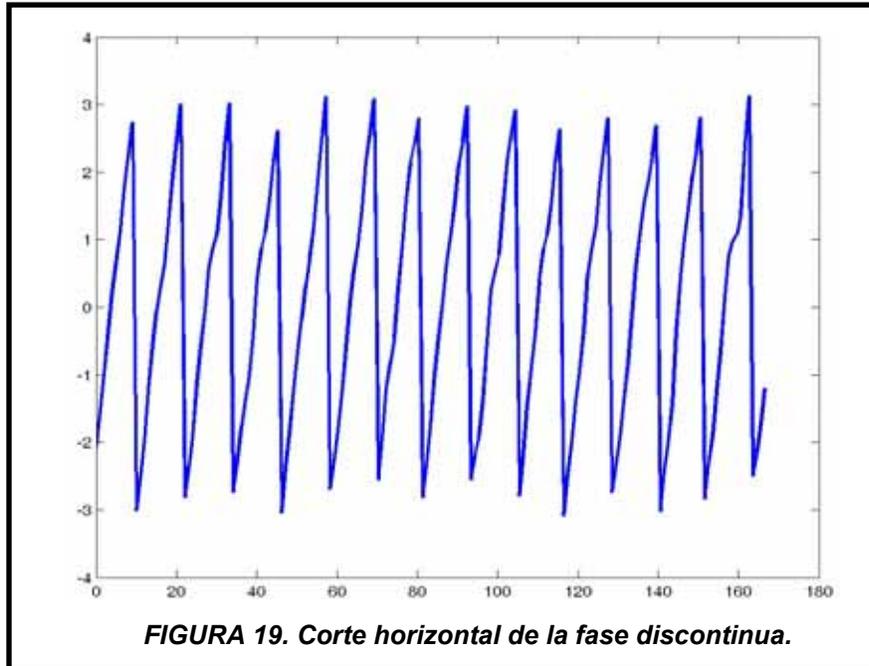
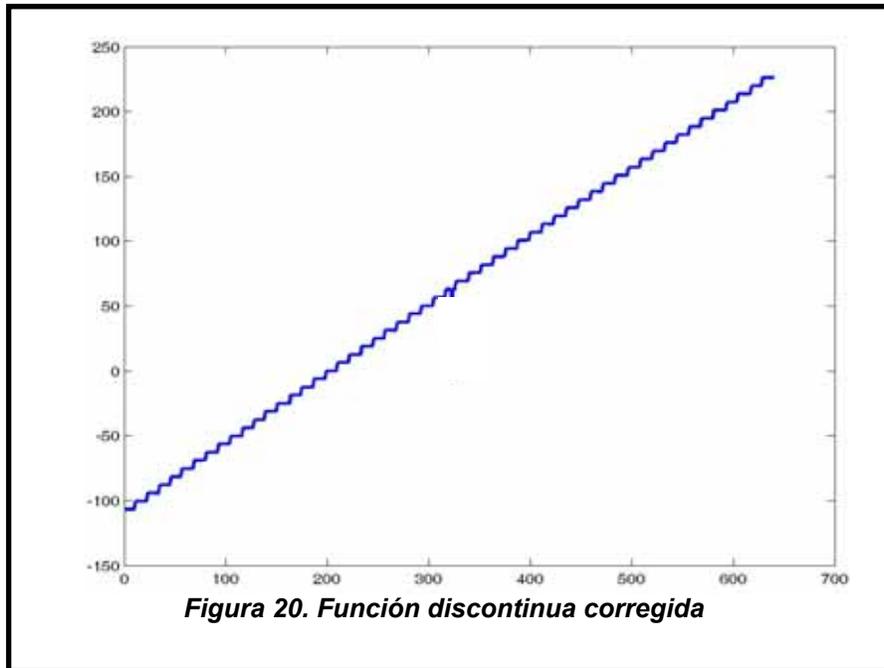


Figura 18. Fase Discontinua

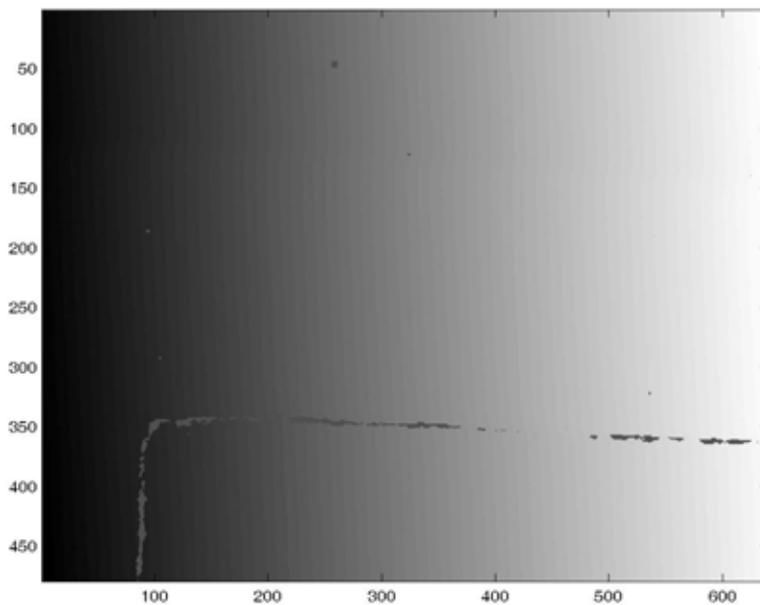
Debido a la utilización de la función arcotangente, la fase obtenida presenta puntos de discontinuidad acotadas entre $-\pi$ a π . La figura (19) muestra un corte horizontal de la fase discontinua.



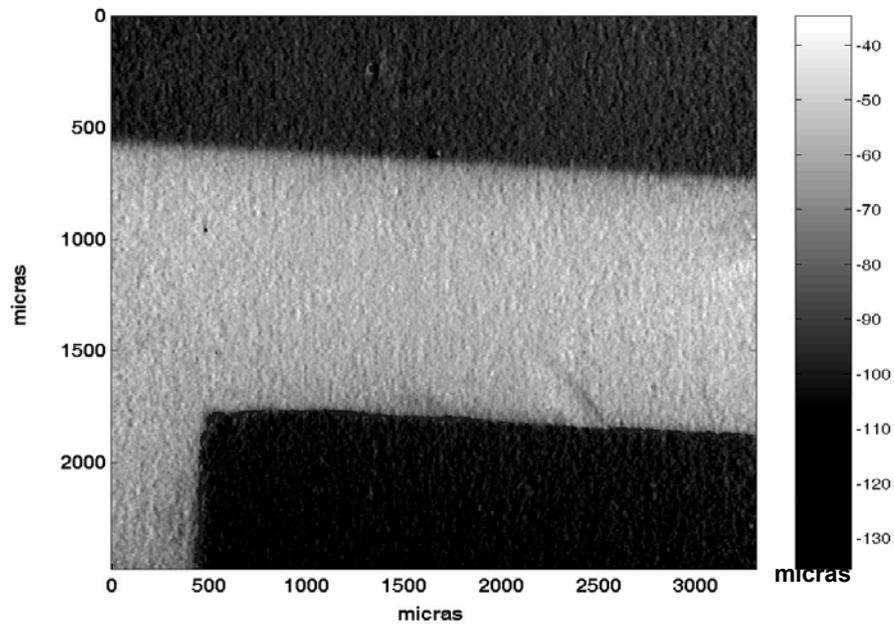
Antes de obtener la altura del cuerpo, es necesario realizar la conversión de fase discontinua a fase continua. Este procedimiento se realiza adicionando valores enteros de 2π en función de la discontinuidad en la fase. Una transición de π a $-\pi$, requiere de un valor de $+2\pi$ para corregir la discontinuidad. En caso contrario, se debe adicionar -2π . La figura 20 muestra el valor de la función discontinua a valores enteros de 2π necesarias para corregir la fase mostrada en la figura (19).



De igual manera se puede establecer un procedimiento de corrección 2D para detectar los puntos de discontinuidad y adicionar o restar los valores apropiados de 2π necesarios para corregir la fase. La figura (21) muestra la fase continua obtenida de la fase discontinua de la figura (20).



Este procedimiento se repite para calcular la fase Φ_0 sobre el plano de referencia ($Z=0$). Con el fin de utilizar la curva de calibración de la figura (13) se debe obtener $\Delta\Phi$ introducido por el cuerpo, restando $(\Phi-\Phi_0)$. La figura siguiente muestra Z de la figura (21). Usando los parámetros de calibración Fase – Altura definidos en la figura 13.



Una vez obtenida la topografía del cuerpo en micras, se utilizan los parámetros de conversión píxeles a micras para el plano XY. De esta manera se obtiene una figura 3D digital de la superficie del cuerpo, como se muestra en la siguiente figura:

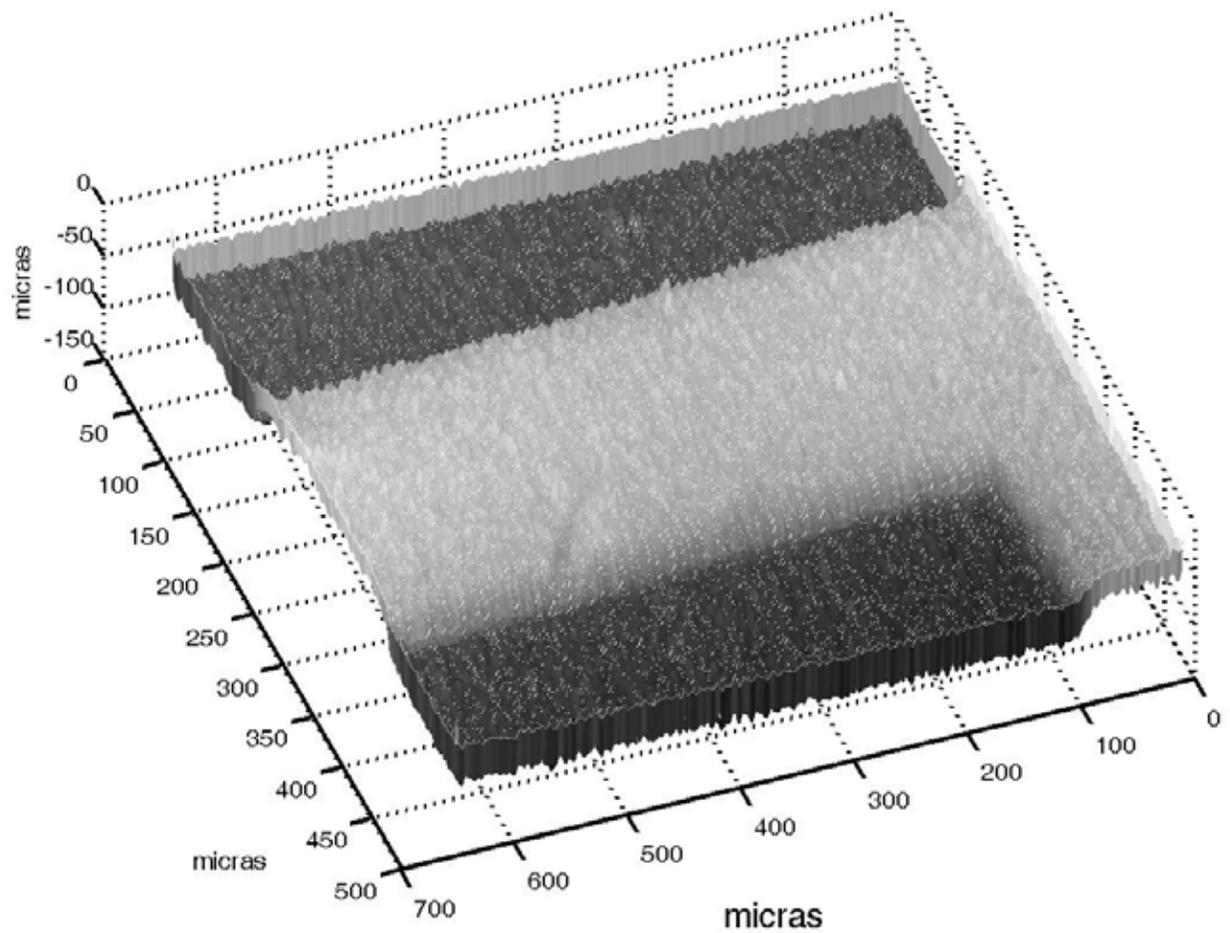


Figura 23. Reconstrucción 3D de la superficie de un cuerpo

Siguiendo el procedimiento de reconstrucción y el procedimiento de calibración explicado anteriormente, se reconstruyeron varios objetos. Las siguientes figuras muestran las imágenes de cada uno de los patrones de franjas proyectado sobre el objeto y la reconstrucción 3D correspondiente.

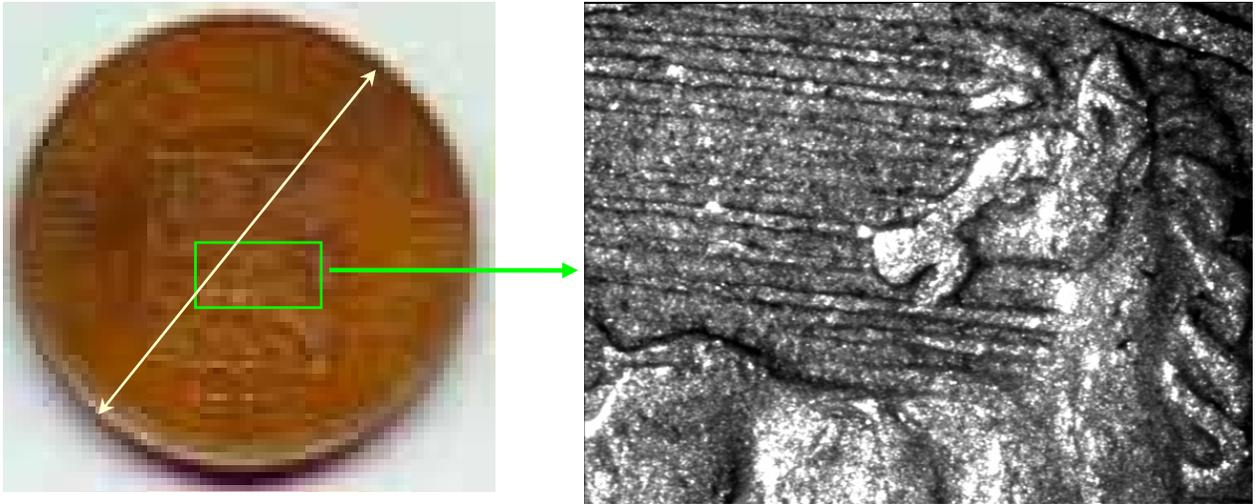


Figura 24. Objeto utilizado para la reconstrucción 3D. Moneda de 5 Centavos de Bolívar.



Figura 25. Sistema de franjas proyectado sobre la superficie de una moneda.

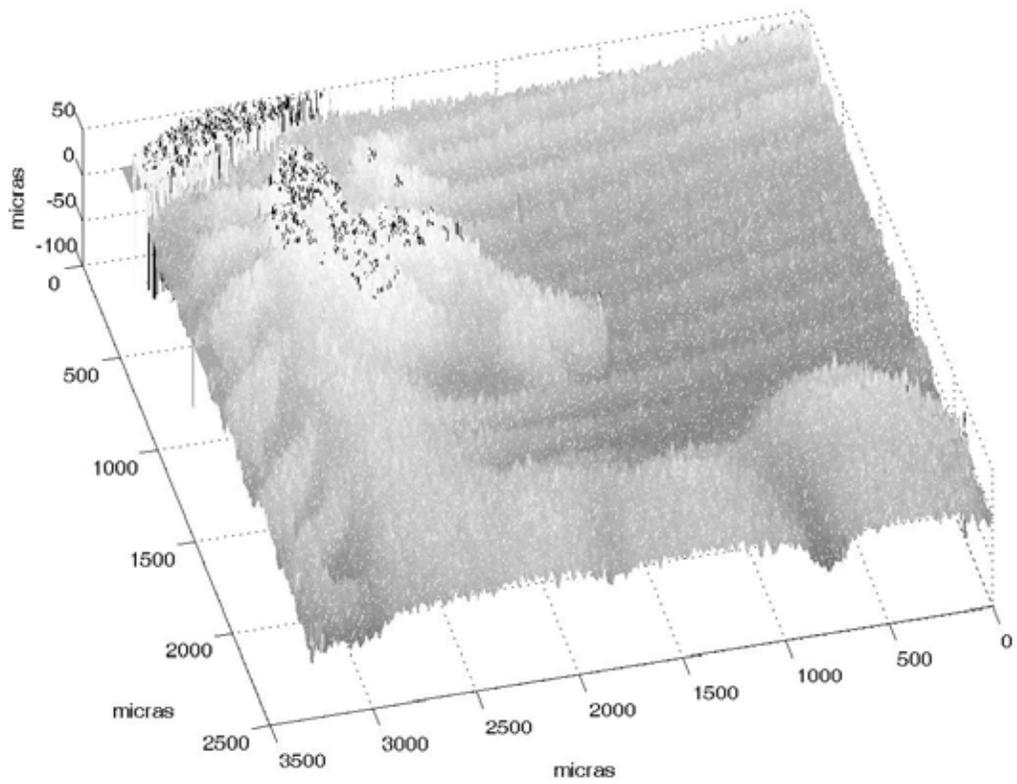


Figura 25. Reconstrucción 3D de la superficie.

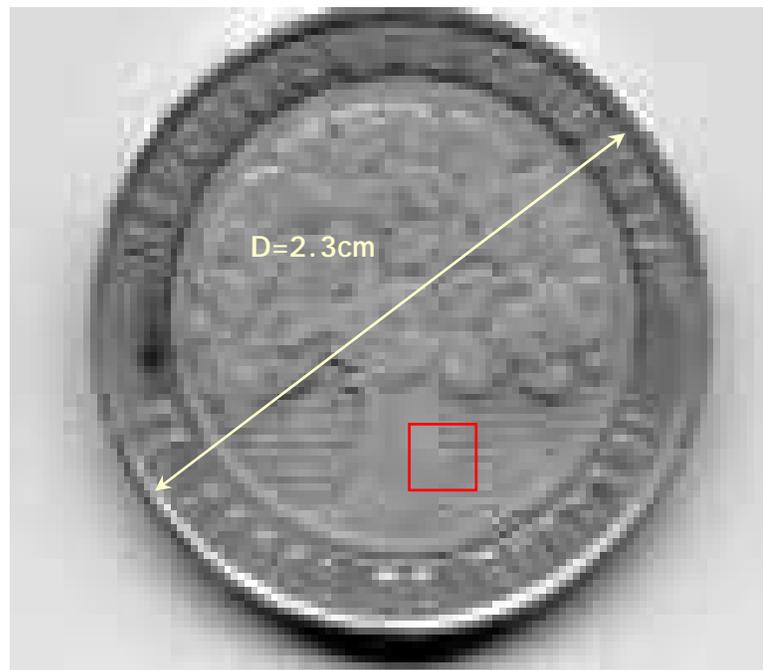


Figura 26 Objeto utilizado para la reconstrucción 3D. Moneda de 500 pesos

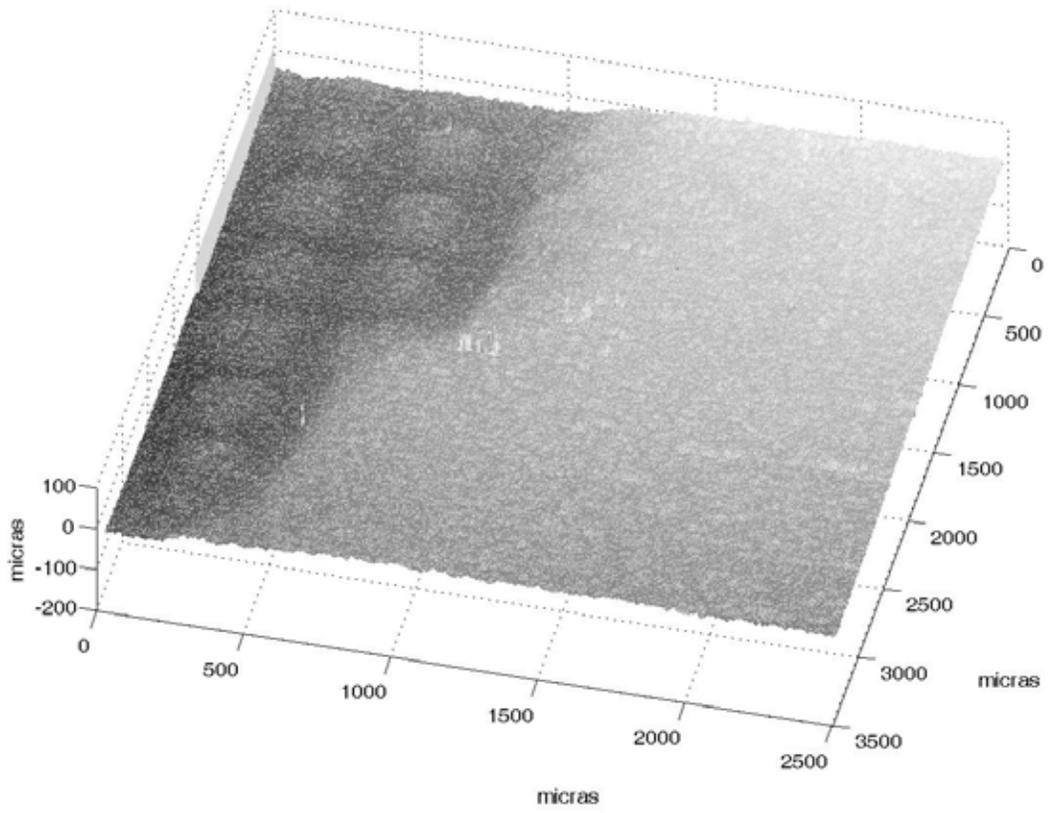
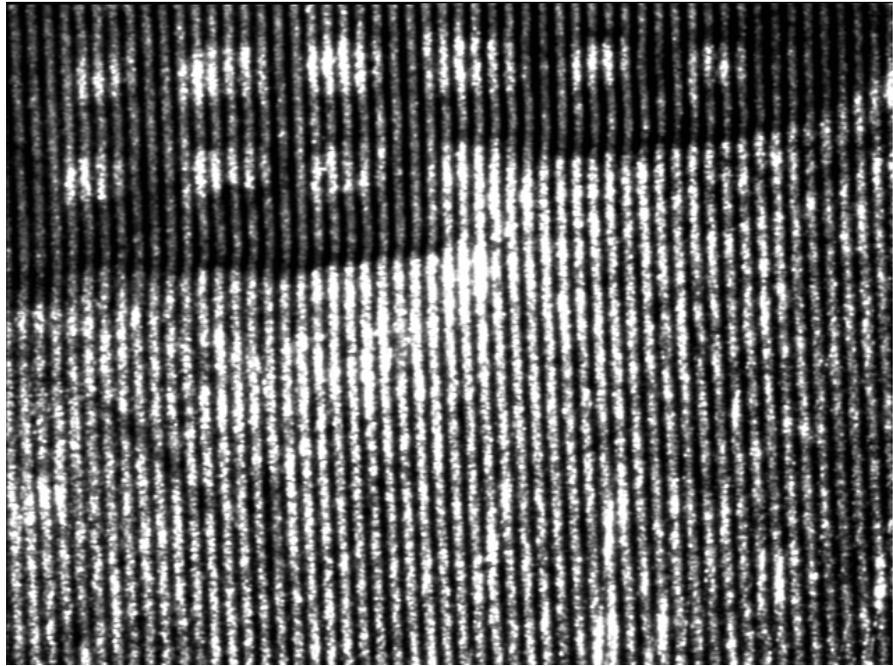


Figura 28. Reconstrucción 3D de la superficie.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 INTRODUCCION

En este capítulo se calcula la precisión del método, comparando las medidas obtenidas por el método óptico y las obtenidas con el método por contacto. Se hace un análisis de repetitividad para encontrar la influencia del comportamiento dinámico en la reconstrucción 3D el objeto. De igual manera se evalúa el sistema de reconstrucción 3D en el campo industrial al determinar la aparición de ampollas en recubrimientos. Estos datos tridimensionales son comparados con las medidas del espectro de impedancias, procedimiento comúnmente estudiado para evaluar el estado electroquímico de la muestra.

3.2 CARACTERIZACION DEL SISTEMA DE MEDIDA

3.2.1 PRECISIÓN

Para evaluar la precisión del sistema implementado se reconstruyen objetos de formas diferentes y alturas conocidas, de esta forma se puede comparar la medida reportada por el sistema de reconstrucción y la medida obtenida por un método de contacto, de precisión conocida. En el método de contacto se utilizó un tornillo micrométrico, el cual consta de una punta que se desplaza paralela al plano de referencia haciendo contacto continuamente con la superficie del cuerpo. El otro extremo de la punta está ubicada en un sistema de lectura por desplazamiento vertical, detectando la variación de altura por medio de un indicador análogo, como se muestra en la figura 29. La precisión de la altura medida depende del indicador, el cual tiene un rango de precisión de $\pm 10\mu\text{m}$.

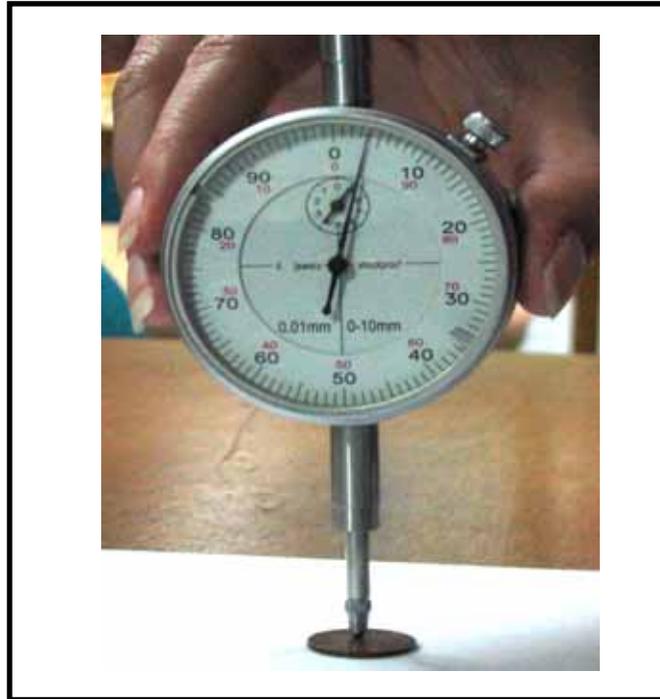


Figura 29. Tornillo micrométrico utilizado para medir las variaciones de altura.

La figura 30 muestra el objeto de prueba utilizado para verificar la precisión del sistema de reconstrucción 3D implementado. Las figuras 31 y 32 muestran las imágenes del sistema de franjas proyectado sobre la superficie del cuerpo y la reconstrucción 3D de la sección rectangular indicada en la figura (30).

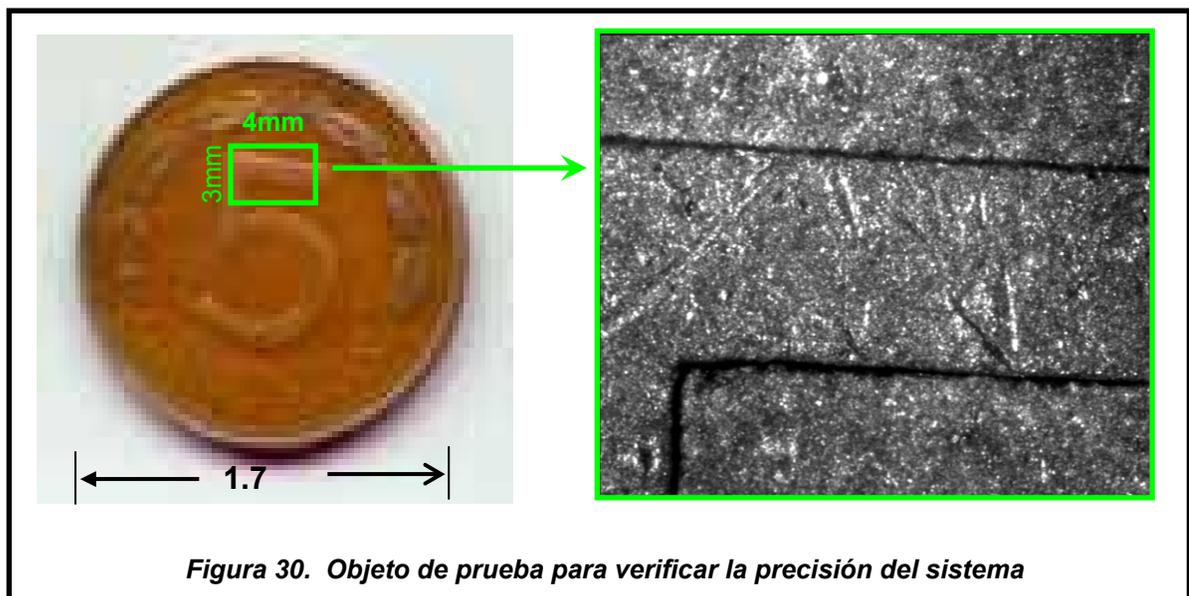


Figura 30. Objeto de prueba para verificar la precisión del sistema

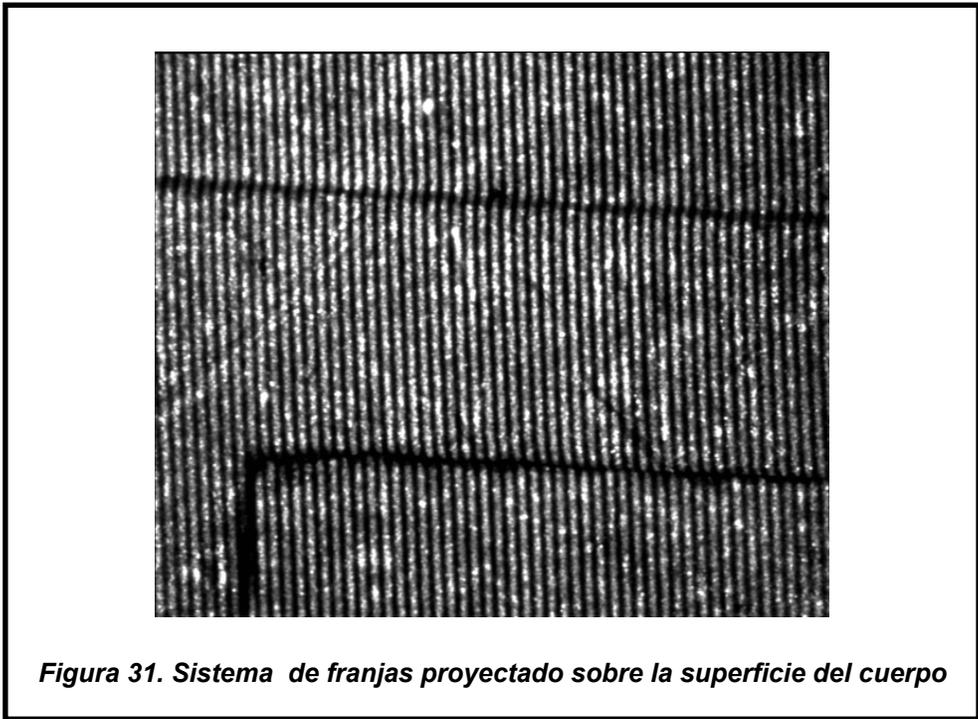


Figura 31. Sistema de franjas proyectado sobre la superficie del cuerpo

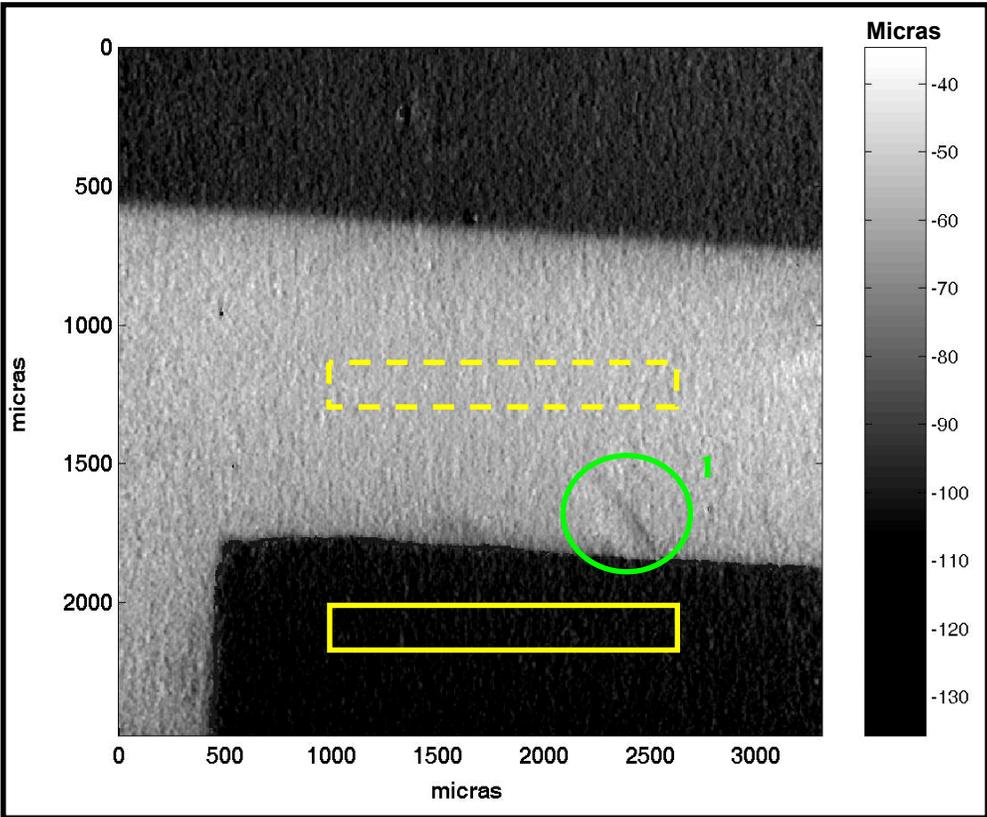


Figura 32. Reconstrucción Tridimensional

La figura 33 muestra un corte realizado sobre la imagen de reconstrucción 3D. La línea a trazos sobre la figura, indica el valor promedio medido con el tornillo micrometrico a diferentes posiciones sobre el objeto. Las regiones rectangulares indicadas en la figura 32 permiten calcular la diferencia de altura media y desviación estándar del detalle 3D en la figura. Realizando la diferencia entre los valores medios y usando la desviación Standard mas grande se obtiene:

$$40 \pm 10\mu\text{m}.$$

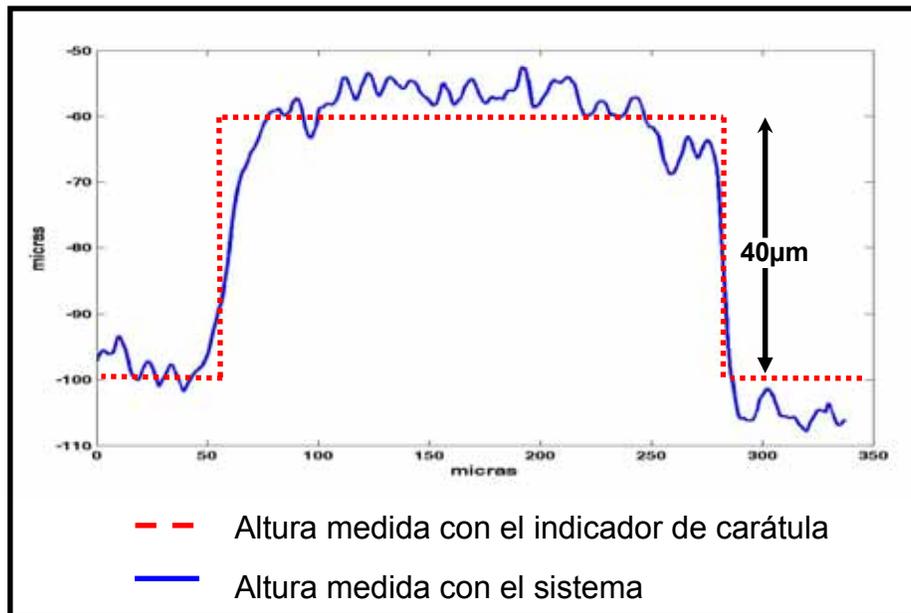


Figura 33. Corte realizado sobre la figura de reconstrucción 3D

Los valores anteriores nos indican que existe una fuerte coincidencia entre los valores indicados por el tornillo micrometrico y el sistema de Reconstrucción 3D. De la misma manera, la notoria discontinuidad en la altura del objeto medida por el sistema y la desviación estándar en el cálculo de la altura permite concluir que el sistema puede medir fácilmente un detalle del orden de $40 \mu\text{m}$. De igual manera, el sistema de reconstrucción 3D implementado permite resolver detalles inferiores a $40 \mu\text{m}$, como el indicado en la región 1 de la figura (32), que corresponde a la variación en la topografía del objeto (ver figura 30). Según lo anterior, se concluye que el sistema puede resolver detalles del orden de $10 \mu\text{m}$.

3.2.2 REPETITIVIDAD.

Otra característica importante en la caracterización de un sistema de medida consiste en la determinación del grado de influencia del ruido temporal en la realización de la medida. La estabilidad del sistema esta influenciada por una ligera variación del valor medido en función del tiempo o número de muestras tomadas. No se pretende realizar un estudio estadístico completo de este fenómeno, pero si es importante tener una idea de estabilidad de la medida en función de la influencia del ruido, debido a los sistemas de adquisición de imágenes y fuente de iluminación utilizados, principalmente.

La figura 34 muestra varios cortes realizados sobre la reconstrucción 3D a diferentes instantes de tiempo, usando el mismo objeto y la misma línea de corte que el utilizado en el cálculo de la precisión.

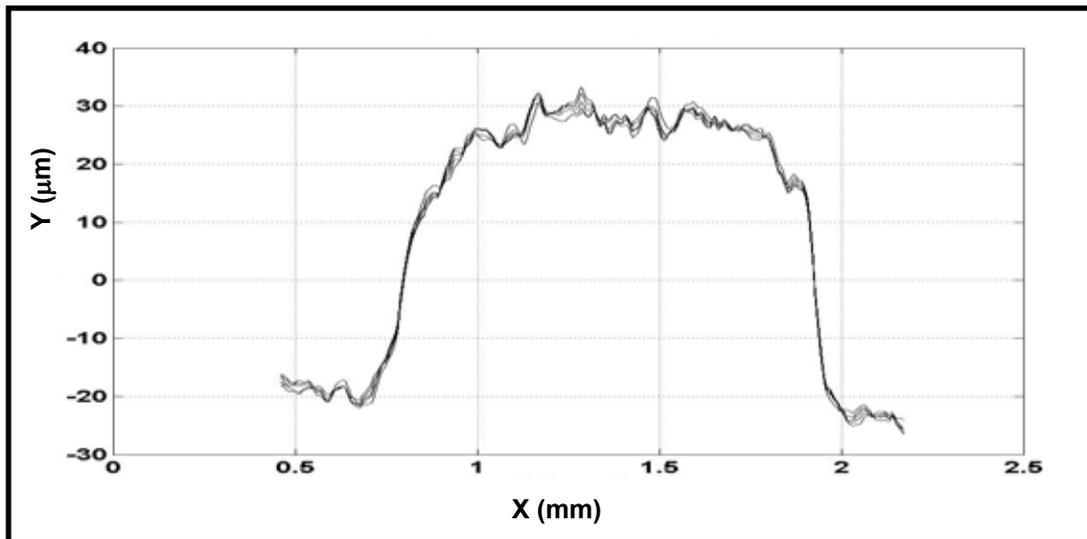


Figura 34. Análisis de Repetitividad

Los datos obtenidos muestran que la variación de la altura en función del tiempo producen una desviación estándar de $0.6 \mu\text{m}$ para una altura del orden de $40 \mu\text{m}$, lo cual produce un error del 1.7% en promedio. Este valor es inferior a la precisión

del sistema de medida lo cual nos indica que es mas fuerte la influencia de los errores en el calculo de la precisión que los errores por comportamiento dinámico del sistema.

3.3 ANALISIS CUANTITATIVO DE LA PRESENCIA DE AMPOLLAS EN RECUBRIMIENTOS.

El objetivo final de este trabajo consiste en determinar la presencia de ampollas en recubrimientos, usando información 3D de la superficie. Se pretende, por lo tanto, determinar la presencia de ampollas en recubrimientos sometidos a condiciones ambientales controladas. En las secciones siguientes se muestra el procedimiento experimental para la preparación de cupones, la exposición controlada, los monitoreos realizados y el análisis de los datos.

3.3.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.3.1.1 PREPARACIÓN Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS^[14]

Para el análisis cuantitativo de ampollas en recubrimientos, se prepararon 6 probetas de acero al carbono 1020 con grosor de 3 mm y área de 7.6 x 2 cm² comunmente llamados cupones. A la superficie de cada probeta se le aplicaron diferentes recubrimientos y se expusieron a condiciones ambientales controladas, con el fin de generar ampollas en las superficies. Para la realización de la probeta y la aplicación del recubrimiento se sigue un procedimiento estandar definido por las siguientes etapas:

- Limpiar el material de toda impureza que pueda ocasionar fallas prematuras en el sistema de protección.
- Proporcionar una superficie que pueda humectarse fácilmente para una buena adherencia del recubrimiento.

Los contaminantes típicos que se deben eliminar son: humedad, aceites, grasas, sales, óxidos, productos de la corrosión y toda clase de mugre. Para que la pintura recubierta cumpla sus objetivos es absolutamente indispensable que se adhiera completamente al sustrato y esto sólo se consigue mediante una preparación adecuada de la superficie.

Los métodos que se describen a continuación son aceptados comúnmente para la preparación de la superficie:

1. ***SandBlasting o Limpieza con chorro abrasivo.*** La limpieza por este método es la más efectiva para suprimir todo tipo de impurezas y especialmente para la aplicación de sistemas de pinturas sometidas a las condiciones de uso más agresivas. En esta etapa se afecta la rugosidad de la superficie para mejorar la adhesión del recubrimiento. Se expone la superficie a un flujo de partículas abrasivas (arena) con características como tipo y tamaño de partícula del abrasivo empleado. La figura 35 muestra la aplicación de Sand-Blasting .



Figura 35. Preparación de superficie de acero al carbono 1020 con sand-blasting.

La figura 36 muestra el estado del cupón después de ser preparado.

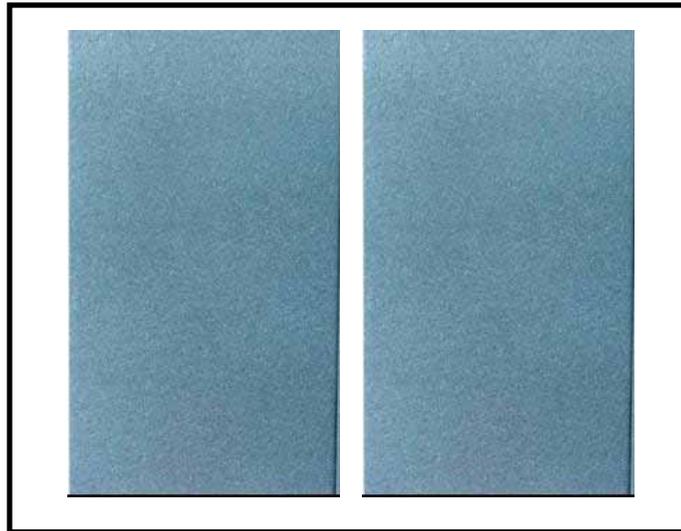


Figura 36. Estado de los cupones antes de la aplicación

2. **Aplicación del recubrimiento.** Con el fin de obtener fácilmente la aparición de las ampollas se aplicaron 3 recubrimientos sobre 6 cupones, variándose el espesor y las características de los mecanismos de protección de cada recubrimiento. La tabla 4 resume los espesores de recubrimientos utilizados. La figura 37 muestra un cupón después de aplicar el recubrimiento

Sistema	Mecanismo	Resina	Espesor
E054	Barrera	Epóxica	79 μ m
E139			48 μ m
E066	Barrera	Epóxica	65 μ m
E084			77 μ m
E057	Inhibidor	Epóxica	81 μ m
E015			70 μ m

Tabla 4. Esquemas de los recubrimientos evaluados.

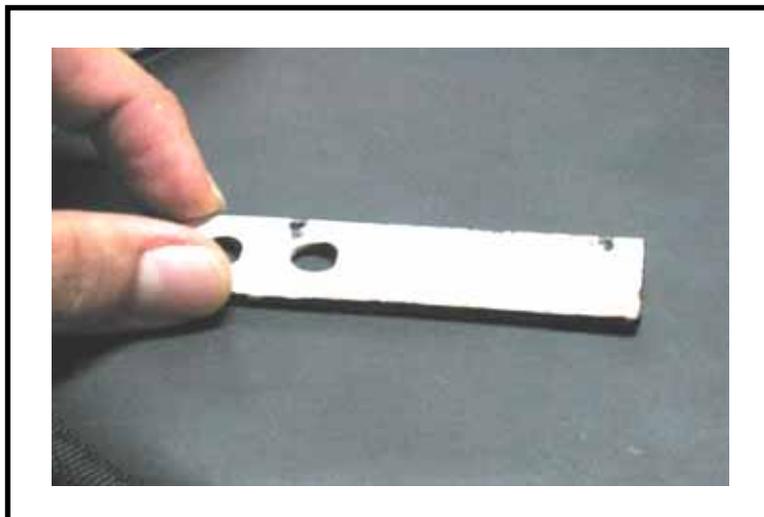


Figura 37. Cupón después de aplicar el recubrimiento

3.3.1.2. EXPOSICIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS EN AMBIENTES CONTROLADOS^[14].

Una vez preparados los cupones se procedió a exponerlos en ambientes salinos controlados, con el fin de evaluar la presencia de ampollas o variaciones en la topografía del cuerpo. La exposición de los cupones aplicados se llevo a cabo en una cámara de niebla cíclica salina SFC850 de ATLAS CORPORATION, con una solución al 5% en peso de NaCl como electrolito La figura 38, muestra la cámara donde fueron expuestos los cupones para la evaluación.



Figura 38. Cámara de simulación para la exposición de los sistemas.

Los cupones fueron expuestos continuamente en la cámara de niebla y monitoreados periódicamente con el fin de evaluar la degradación de la topografía de la superficie. Cada monitoreo consistía en la determinación de la forma 3D a partir del sistema óptico implementado y la confrontación con la medida del espectro de impedancia electroquímica, procedimiento utilizado para evaluar el estado electroquímico del cupón.

La tabla 5 muestra el número de monitoreos realizado y la duración en horas entre monitoreos.

Monitoreo	Tiempo de Exposición (Horas)	Intervalo entre Monitoreos (Horas)
0	0	0
1	15	15
2	32	17
3	72	40
4	86	14
5	110	24
6	206	96
7	254	48
8	398	144
9	566	168

Tabla 5. Numero de Monitoreos realizados y duración en horas entre monitoreos

3.3.1.3 MONITOREOS POR RECONSTRUCCION 3D

La figura 39, muestra un sistema de franjas típico sobre la superficie de un cupón. El área explorada por imagen corresponde a 4 X 3 mm. Utilizando el sistema óptico de reconstrucción tridimensional se calculó la forma 3D de cada zona del cupón. La figura 40 muestra la reconstrucción 3D para el sistema de franjas de la figura 39. Con el fin de explorar una región de 1 cm² se analizaron diferentes zonas de 4x3 mm.

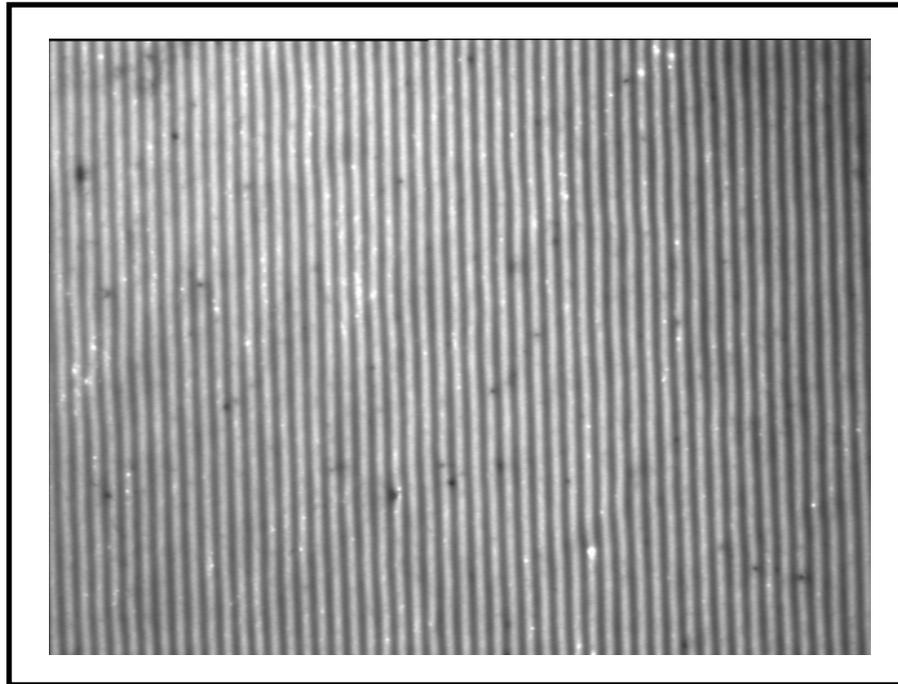


Figura 39. Sistema de franjas proyectado sobre la superficie de un cupón en un área de exploración de 4 x 3 mm.

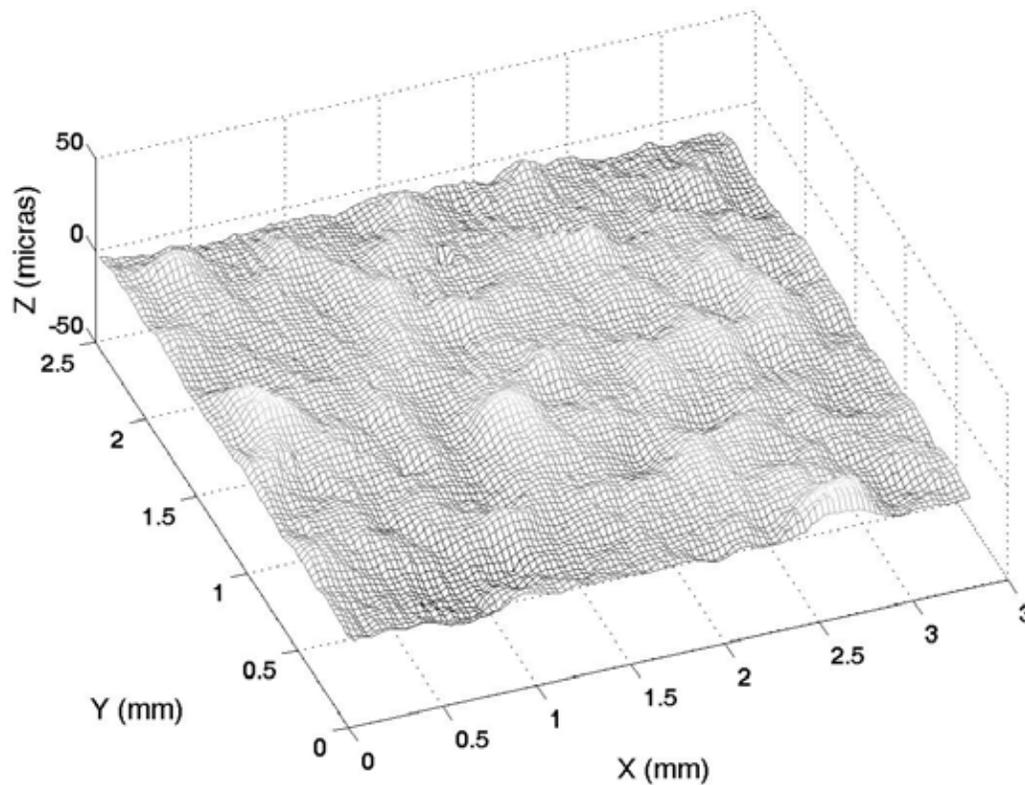
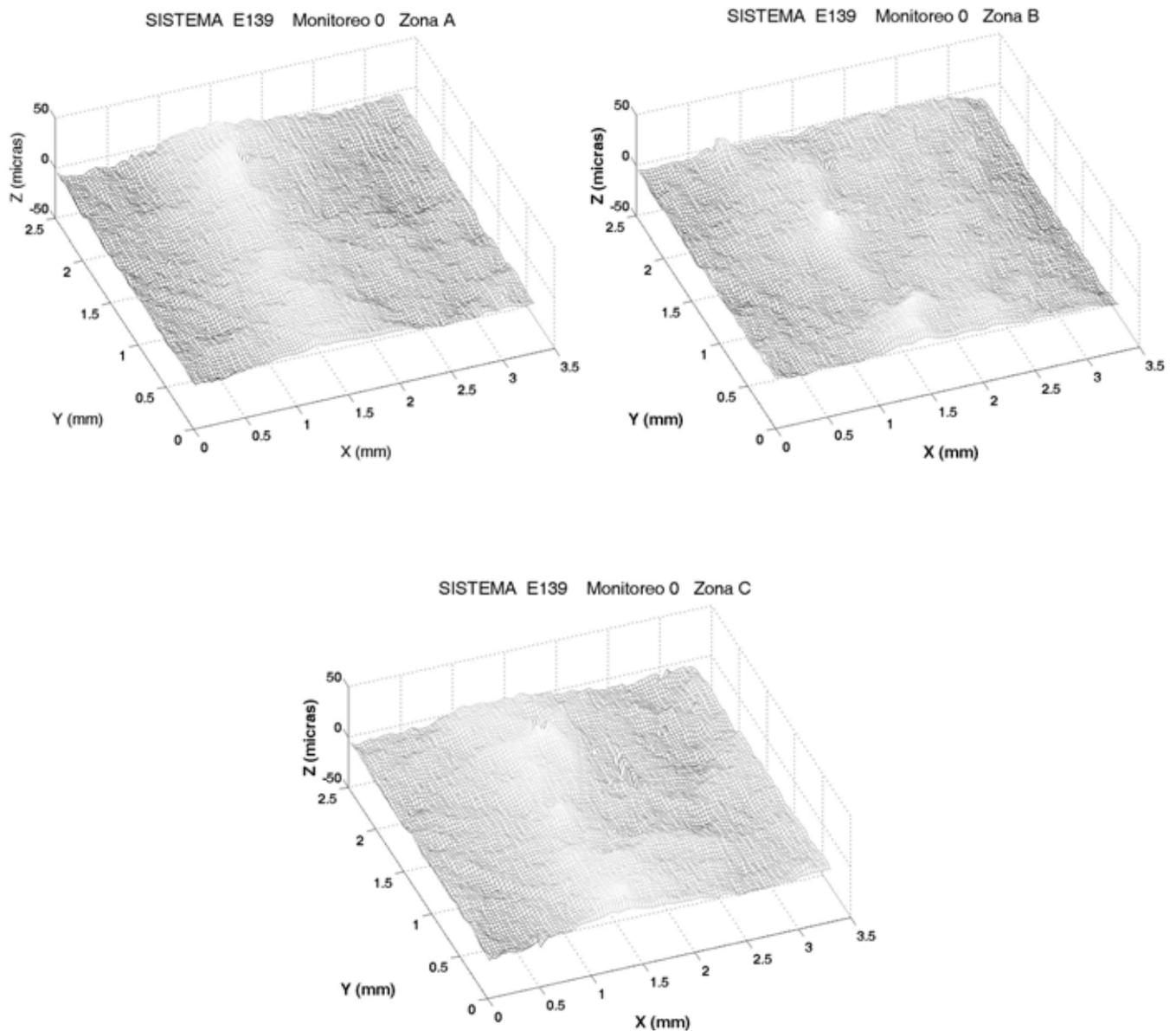


Figura 40. Reconstrucción Tridimensional para el sistema de franjas de la figura 39.

A continuación se analizan las imágenes de reconstrucción 3D de cada pareja de cupones sobre los cuales se aplicaron el mismo tipo de recubrimiento a diferentes espesores:

- a. **Cupones E139 y E054. Con recubrimientos Mastic Epoxi Blanco tipo barrera, de espesor 48 μm y 79 μm respectivamente.** La figura 41 muestra el estado 3D de los cupones en el monitoreo 0, antes de introducirlos en la cámara. La figura 42 muestra el estado de los cupones en el monitoreo 9, para varias zonas de exploración típicas. Esto indica que el cupón E139 generó ampollas en su superficie. Analizando la secuencia 3D de reconstrucción para todas las zonas

exploradas, en los diferentes monitoreos, se observa que en el monitoreo 8, figura 43, se detectan las primeras ampollas aisladas en la superficie del cupón E139. El cupón E054 no presenta variación de altura por presencia de ampollas en la superficie para cualquier zona en cualquier monitoreo. Es importante destacar que el recubrimiento posee un mecanismo de protección tipo barrera, comúnmente utilizado en materiales sometidos a ambientes salinos.



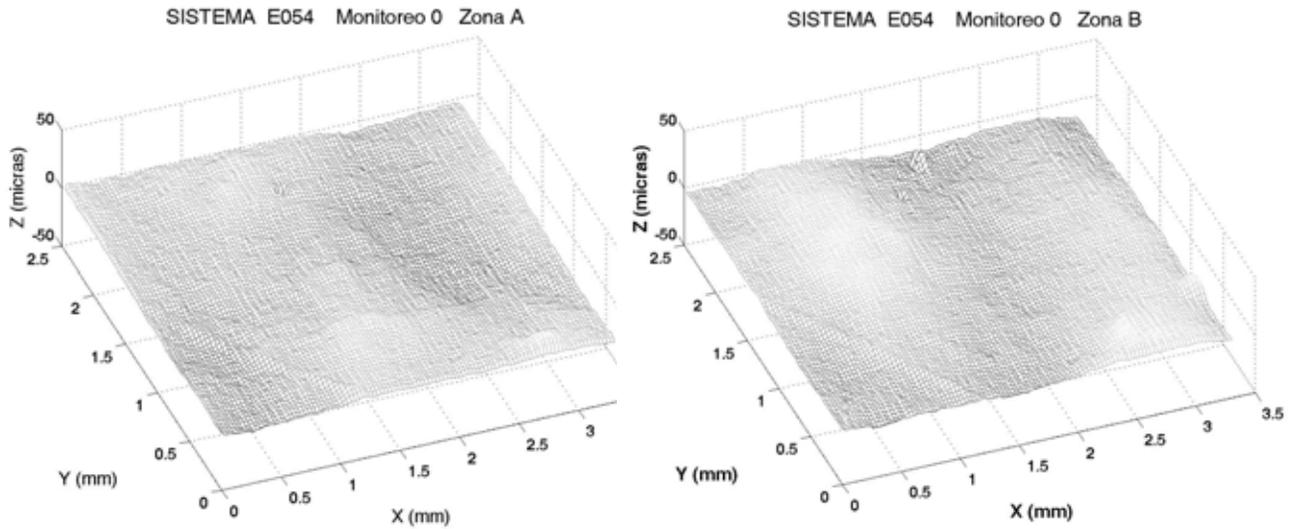
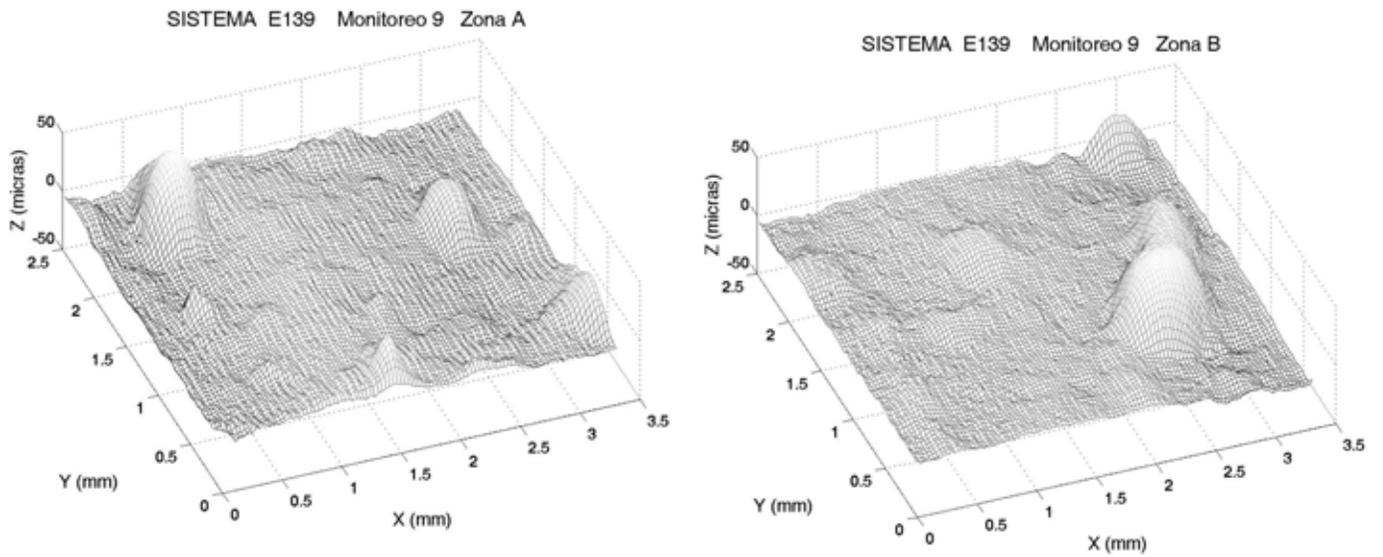


Figura 41. Estado 3D de los cupones E139 y E054 correspondientes al monitoreo 0 en diferentes zonas respectivamente.



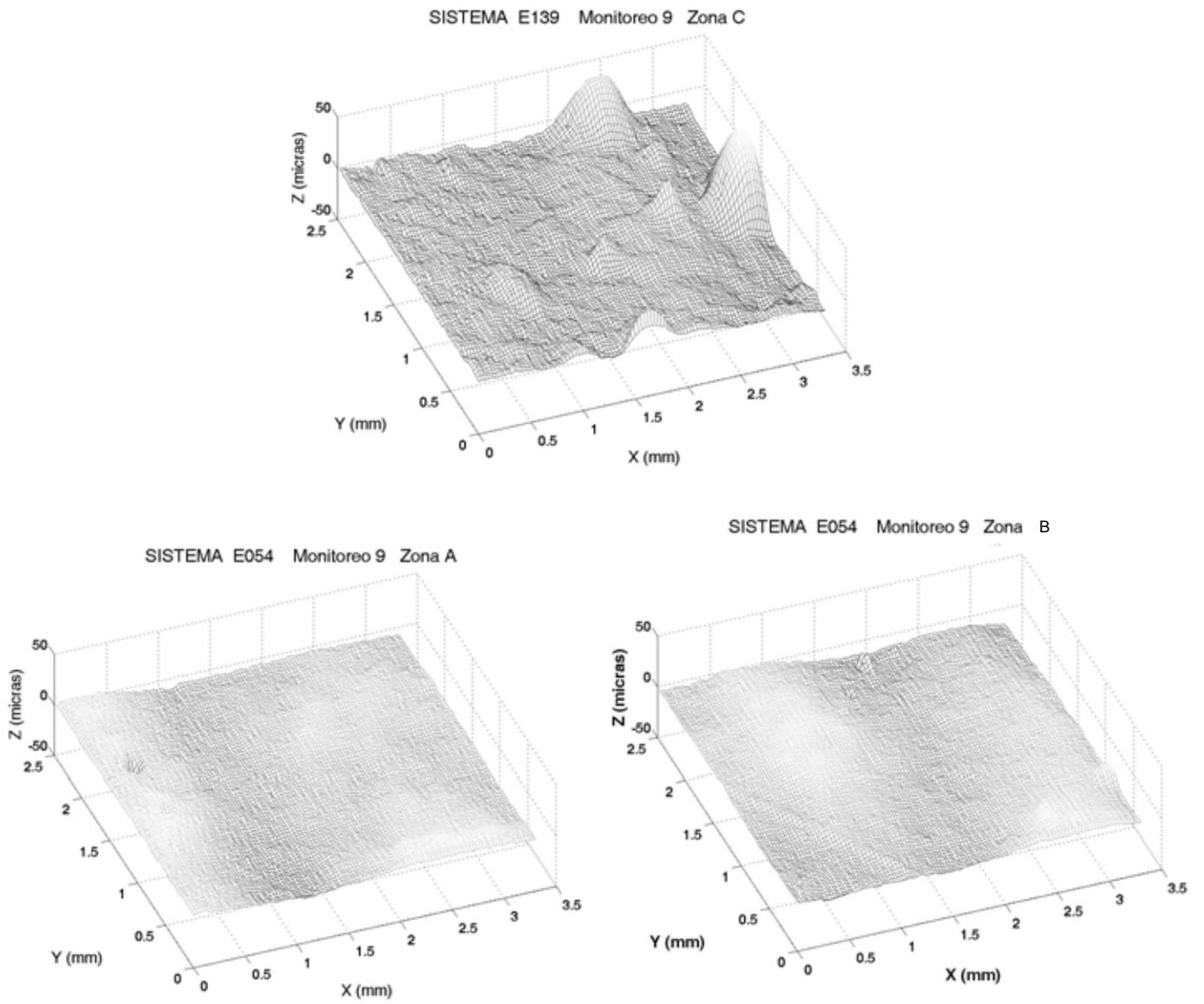


Figura 42. Estado 3D de los cupones E139 y E054 correspondientes al monitoreo 9 respectivamente.

SISTEMA E139 Monitoreo 8 Zona A

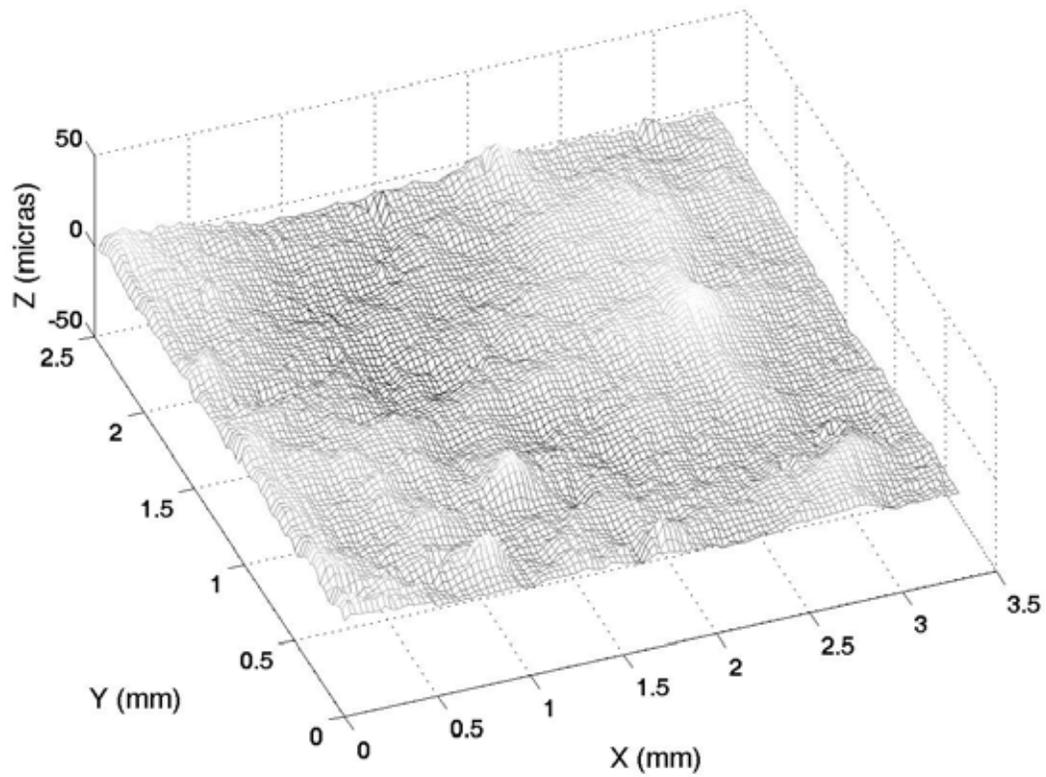


Figura 43. Estado 3D del cupón E139 correspondiente al monitoreo 8.

La figura 44 muestra las curvas de nivel de las zonas mostradas en la figura 42 sobre el cupón E139 en el monitoreo 9.

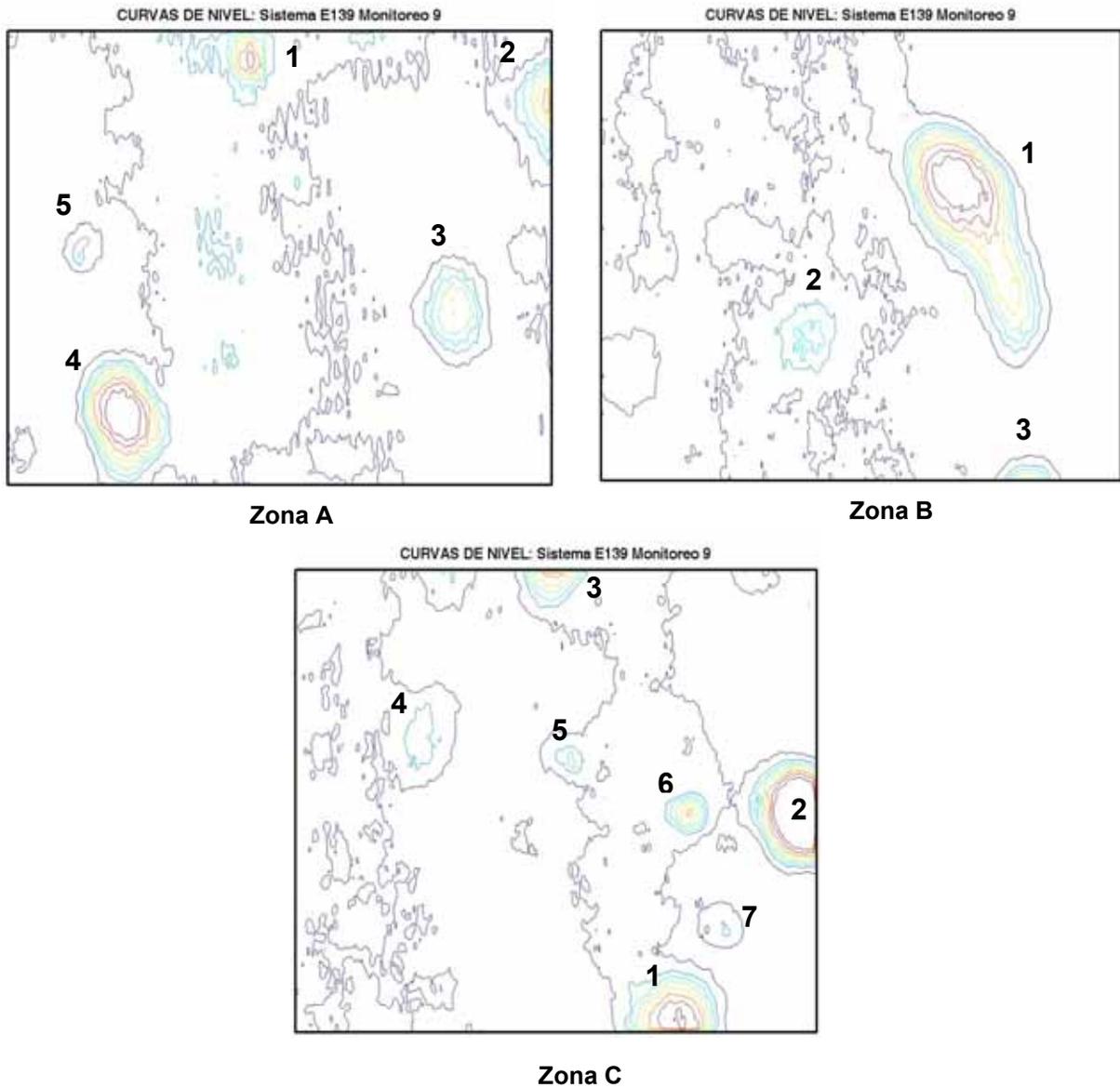


Figura 44. Curvas de nivel de 3 zonas exploradas sobre el cupón E139 en el monitoreo 9.

Según las anteriores curvas de nivel, podemos obtener parámetros de las ampollas como ancho y altura como se indica en la tabla 6:

E139		Zona A (micras)	Zona B (micras)	Zona C (micras)
Ancho promedio (micras)	1	191	1553	527
	2	485	370	420
	3	428	344	321
	4	656	----	320
	5	207	----	148
	6	----	----	155
	7	----	----	135
Altura máxima (micras)	1	27.5	50.2	49.2
	2	22.8	13	70
	3	34.4	28.6	20.5
	4	60.5	----	13.1
	5	16.45	----	11.4
	6	----	----	24.5
	7	----	----	7.5

Tabla 6. Ancho y altura correspondientes a las curvas de nivel.

b. Cupones E084 y E066. Con recubrimientos Epoxi de altos sólidos tipo barrera, con espesores de 77 μm y 65 μm respectivamente. La figura 45 muestra el estado 3D de los cupones en el monitoreo 0, para 2 zonas típicas sobre los cupones. De la misma manera, la figura 46 muestra el estado 3D de los cupones en el monitoreo 9. De estas figuras se concluye que después de 566 horas de exposición en cámara, los recubrimientos no presentan ampollamiento considerable. Sin embargo, el cupón E084 presentó ampollas aisladas en regiones muy específicas de la superficie en el monitoreo 9, como lo muestra la

figura 46. Las ampollas presentan una altura máxima de 13.2 micras y diámetro en la base de 478 micras respectivamente.

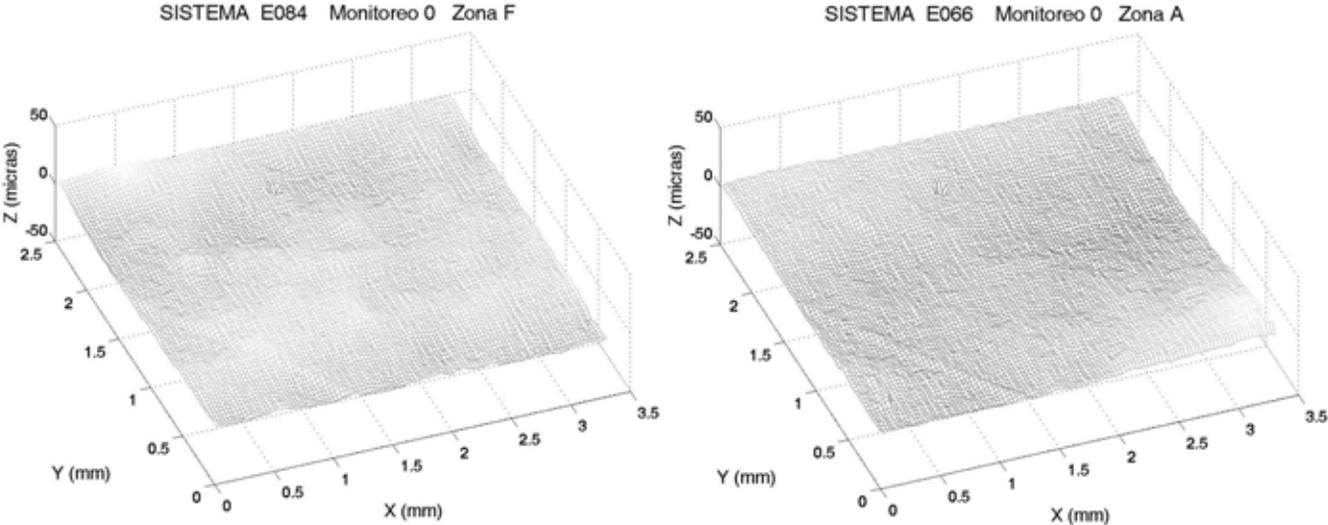


Figura 45. Estado 3D de los cupones E084 y E066 correspondientes al monitoreo 0 respectivamente.

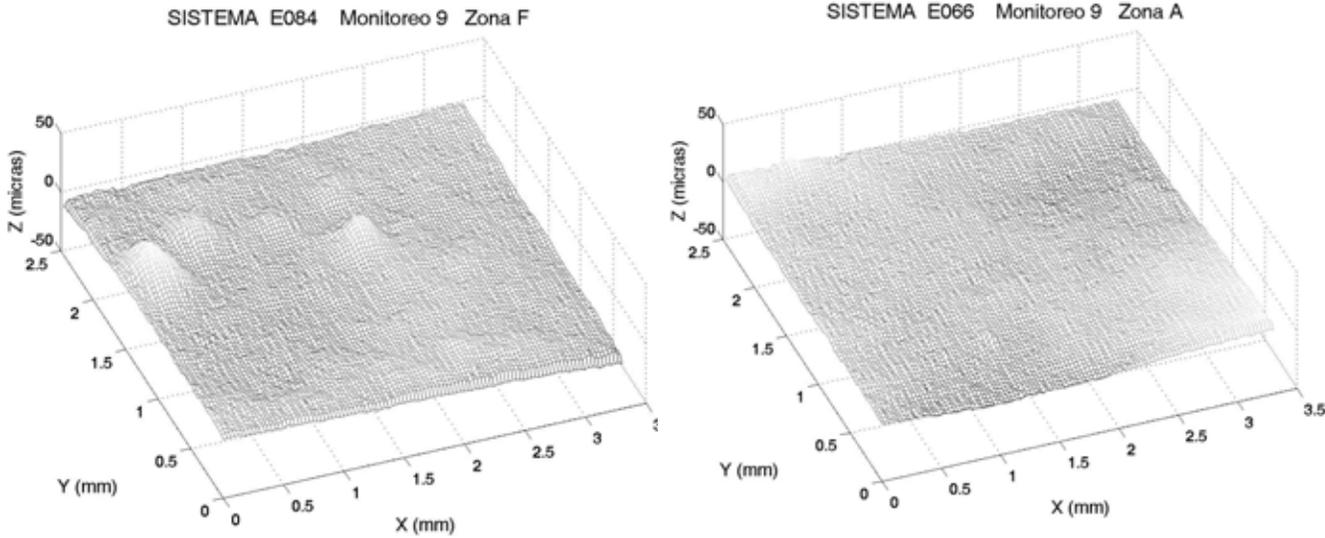


Figura 46. Estado 3D de los cupones E084 y E066 correspondientes al monitoreo 9 respectivamente.

La figura 47 muestra las curvas de nivel de la zona explorada sobre el cupón E084 que presentó ampollas en el monitoreo 9.

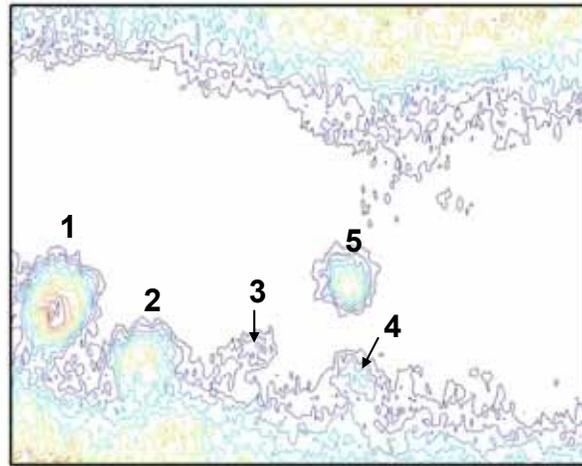


Figura 47. Curvas de nivel del cupón E084 correspondientes al monitoreo 9.

A partir de las anteriores curvas de nivel, podemos obtener parámetros de las ampollas como el ancho y la altura como lo muestra la tabla 7.

E084		Zona F (micras)
Ancho promedio (micras)	1	4 78
	2	342
	3	184
	4	163
	5	254
Altura máxima (micras)	1	23.9
	2	18.6
	3	7.7
	4	8.0
	5	14.35

Tabla 7. Ancho y altura correspondientes a las curvas de nivel del cupón E084.

c. **Cupones E015 y E057. Con recubrimientos Epoxi Fosfato de Zinc tipo Inhibidor de espesores $70\ \mu\text{m}$ y $81\ \mu\text{m}$ respectivamente.** La figura 48 muestra el estado 3D de los cupones en el monitoreo 0. La figura indica que las superficies presentaban detalles topográficos antes de la exposición en la cámara. En el monitoreo 9 no se presentaron ampollas en la superficie de los cupones, aunque se evidencian variaciones leves en altura y forma de los detalles topográficos, como se indica en la figura 49. Las flechas sobre las figuras de reconstrucción 3D indican detalles topográficos comunes en las zonas exploradas para los monitoreos 0 y 9.

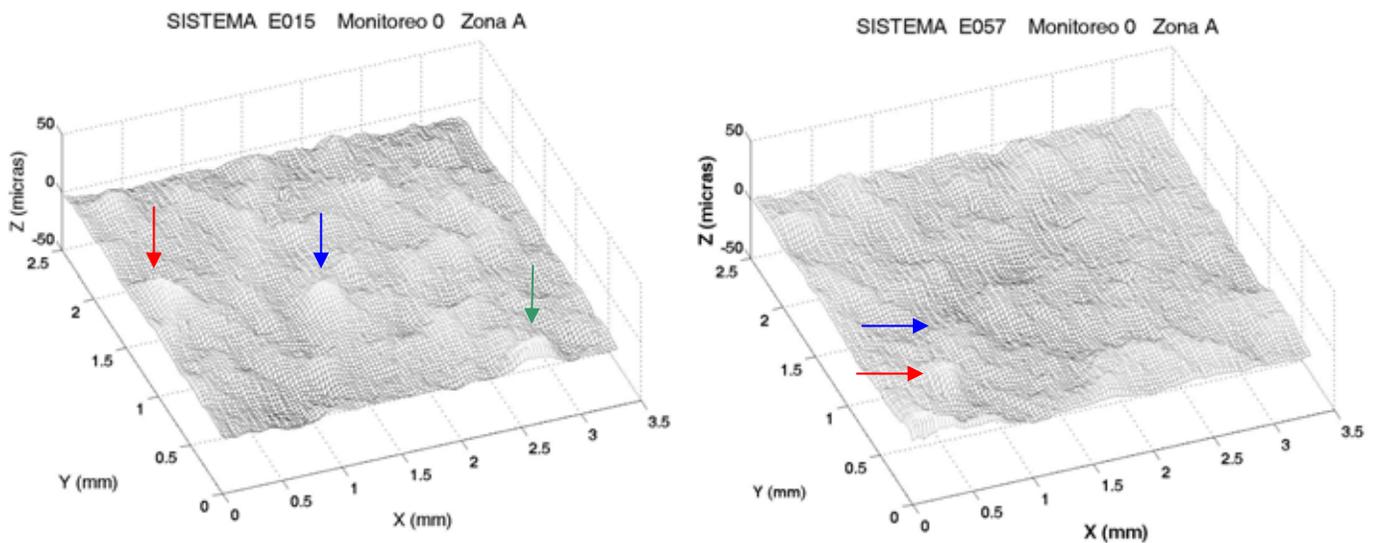


Figura 48. Estado 3D de los cupones E015 y E057 correspondientes al monitoreo 0 respectivamente.

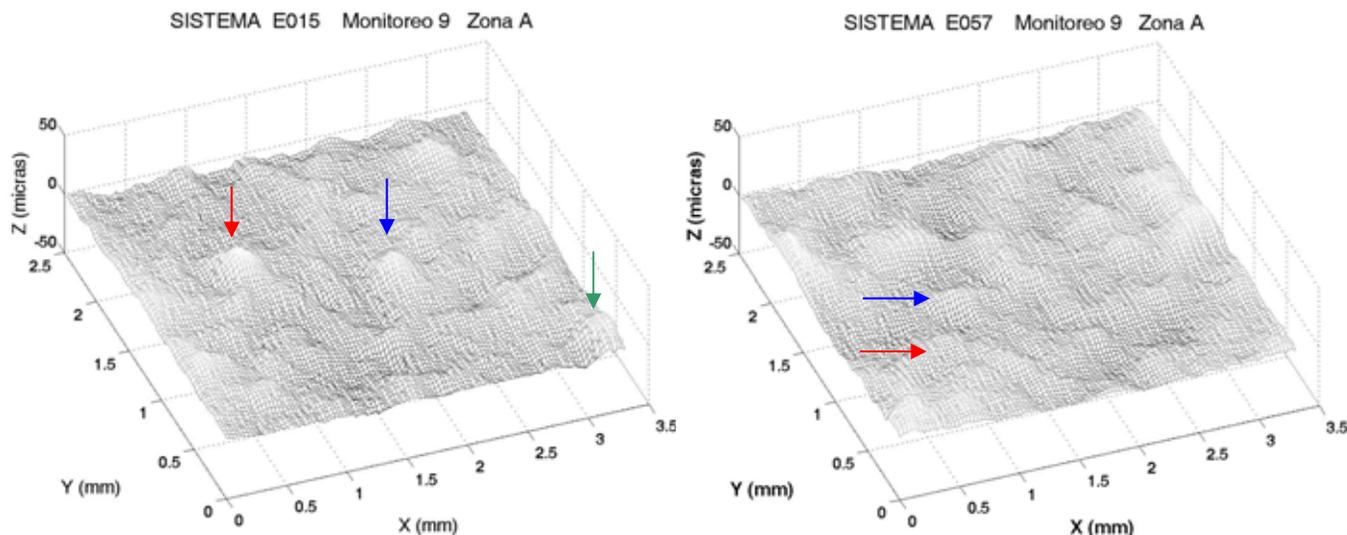


Figura 49. Estado 3D de los cupones E015 y E057 correspondientes al monitoreo 9 respectivamente.

3.3.1.4 MEDICION DEL ESPECTRO DE IMPEDANCIAS^[14]

a. Dispositivos de medida.

Los recubrimientos fueron monitoreados por Espectroscopía de impedancia Electroquímica (E.I.S), durante el tiempo total de exposición y simultáneamente con los monitoreos de reconstrucción 3D. Las pruebas de E.I.S. se realizaron usando un analizador automático de impedancias IM6 ZAHNER Espectroscopy Measurement (Figura 50) pertenecientes a la C.I.C (Corporación para la Investigación en Corrosión, UIS-Guatiguará). Los espectros fueron tomados en el un rango de 20 KHz hasta 20 mHz; usando una celda plana con un área total de exposición de 1cm² y contraelectrodo de acero inoxidable.



Figura 50. Medidor automático de Impedancias.

Para atenuar el ruido producido por las corrientes inducidas, las pruebas se realizaron en el interior de una jaula de Faraday. En la figura 51 se observa la celda electroquímica plana en el interior de la celda de Faraday, la cual es conectada a tierra.

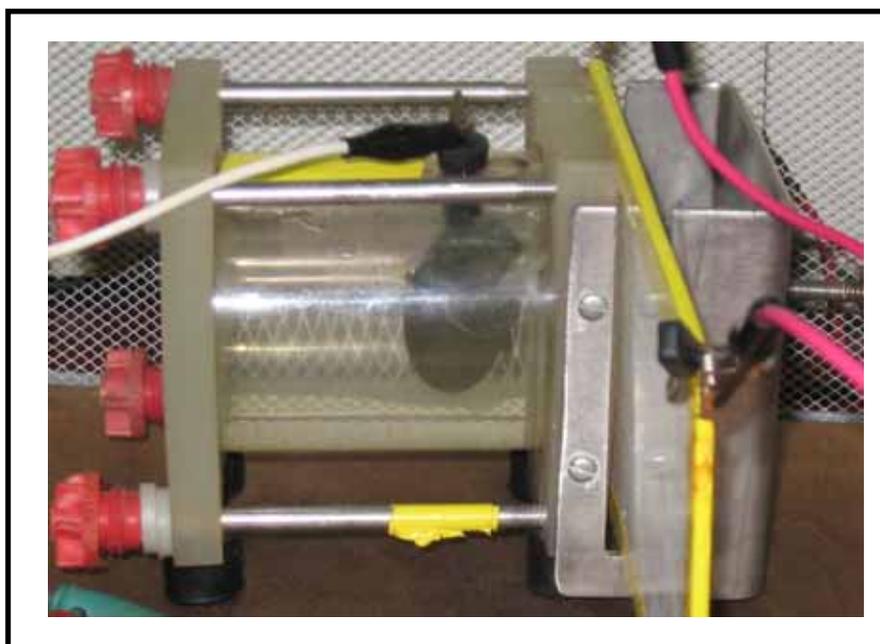


Figura 51. Celda electroquímica plana en el interior de la jaula de Faraday.

La Figura 52 muestra un esquema general de las pruebas.



Figura 52. Esquema general utilizado para las pruebas electroquímicas.

b. Datos obtenidos de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica ^[14].

Cada cupón fue sometido al analizador automático de impedancias en los monitoreos indicados en la tabla 5. Los datos obtenidos del analizador corresponden a la variación del logaritmo de la impedancia en función de la frecuencia de la señal eléctrica alterna aplicada a cada cupón en los monitoreos. El analizador también reporta la variación de la fase de la señal eléctrica aplicada a cada cupón. Las figuras 53 y 54 muestran los datos obtenidos para un cupón en los diferentes monitoreos realizados. Estos diagramas son conocidos como diagramas de Bode. De esta manera se obtiene el comportamiento de los diagramas de Bode en función del tiempo (monitoreos) para los seis cupones analizados.

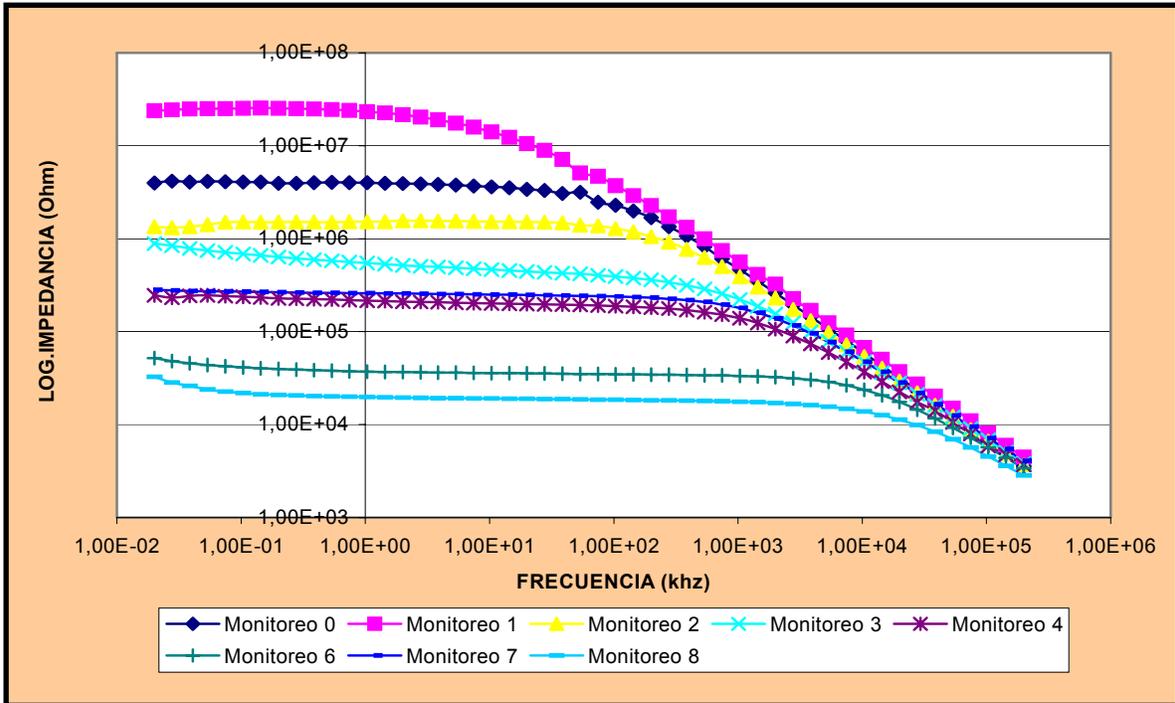


Figura 53 Diagrama de Bode. Impedancia Vs. Frecuencias

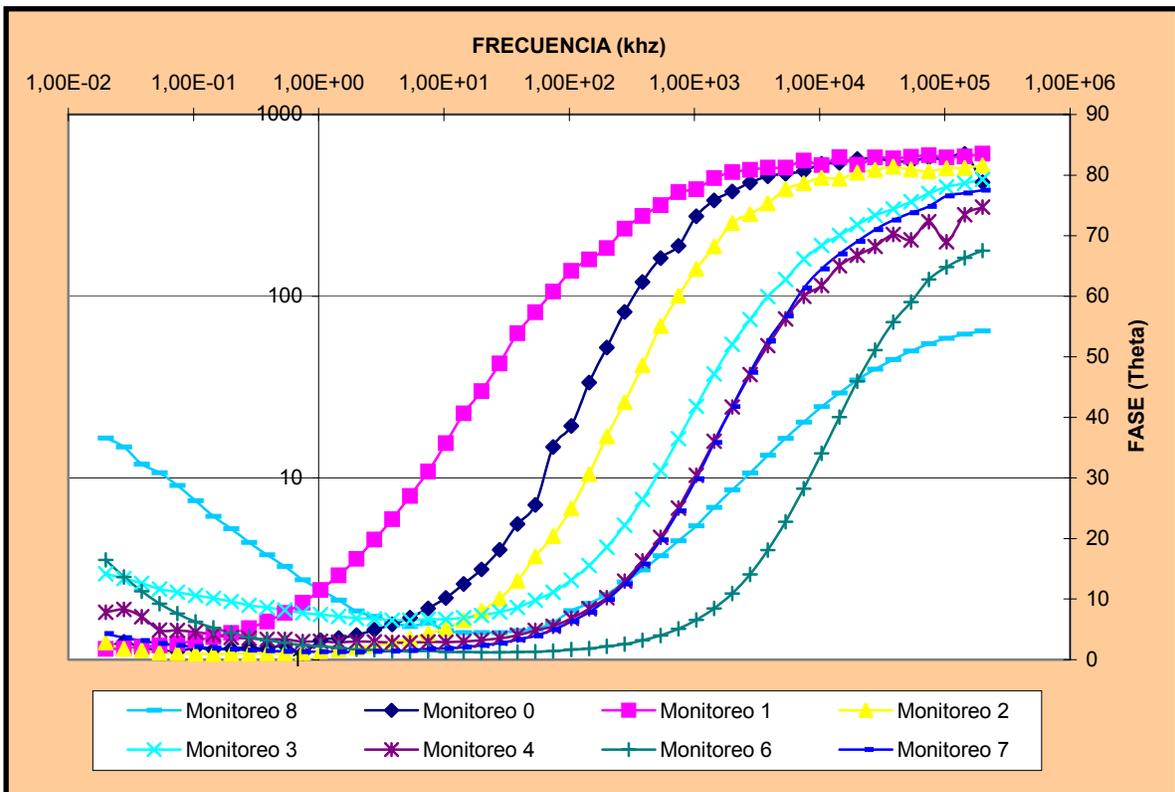


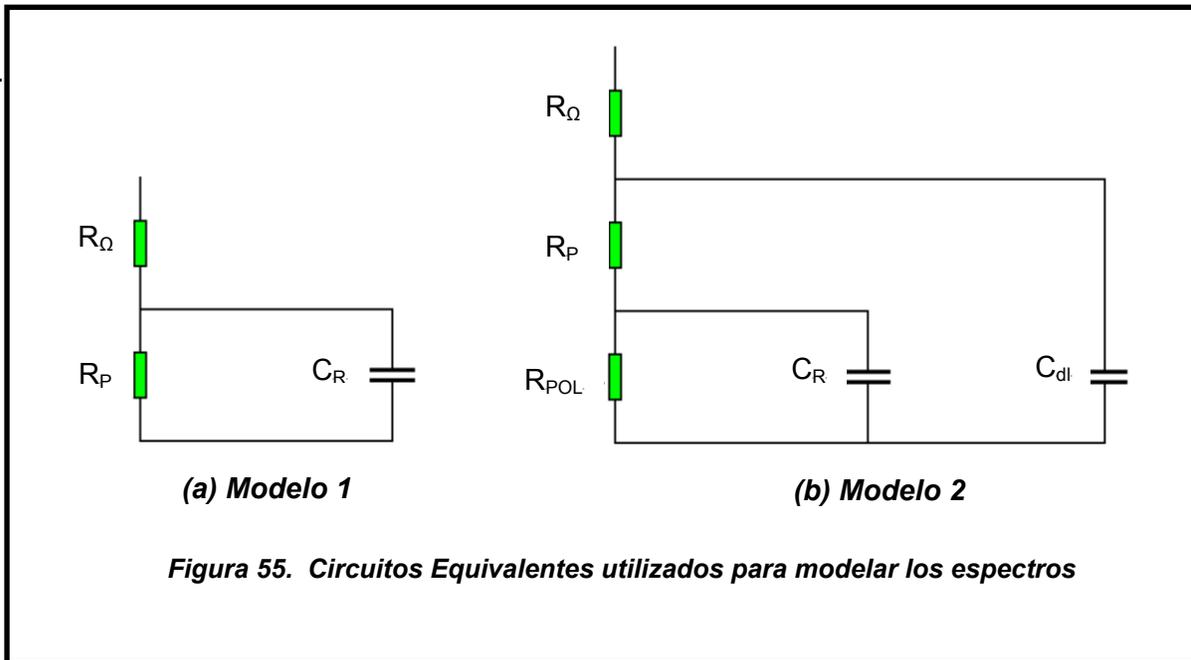
Figura 54. Diagrama de Bode. Fase Vs. Frecuencias

El comportamiento de los diagramas de Bode de impedancias obtenido, corresponde inicialmente a un crecimiento de la impedancia al disminuir la frecuencia de la señal aplicada. Este comportamiento es típico de un sistema que posee una película no conductora entre el sustrato y el recubrimiento, comportamiento de impedancia capacitiva. Finalmente a bajas frecuencias el diagrama presenta una pendiente media cero, comportamiento típico de sistemas resistivos. De igual manera el comportamiento de los diagramas de Bode en función del tiempo (monitoreo) se altera pasando de menos capacitivo a mas resistivo, lo cual indica que se incrementa la presencia de agentes agresivos a través de la película en función del tiempo. Este análisis se obtiene observando la disminución de la impedancia en función del tiempo de los diagramas de Bode de impedancia.

De igual manera la figura 54 muestra el comportamiento de los diagramas de Bode en fase, en función de la frecuencia de la señal a diferentes instantes del tiempo (monitoreo). Inicialmente, el diagrama presenta una fase de 90 grados a frecuencias altas, decayendo gradualmente al disminuir la frecuencia (ver figura 54). Ese comportamiento es característico en sistemas capacitivos. Al incrementar el tiempo de exposición la fase a frecuencias altas tiende a disminuir, se observa un crecimiento en la fase o domo a bajas frecuencias, este fenómeno se explica debido a la formación de una película protectora o doble capa. Al incrementar el tiempo de exposición, la altura del domo a bajas frecuencias crece considerablemente y la fase disminuye a altas frecuencias, lo cual indica que el sustrato es afectado por diferentes agentes agresivos, posible formación de ampollas en la superficie.

c. **Análisis de los diagramas de Bode**^[14]

Debido a la tendencia resistiva y capacitiva de los diagramas de Bode, se pretende modelar el comportamiento eléctrico de los cupones a través de circuitos equivalentes, mostrados en la figura 55.



El modelo numero 1 se utiliza clásicamente para modelar el comportamiento de los cupones en diagramas de Bode en fase sin formación del domo o cupones que no han sufrido daño alguno durante la exposición al ambiente. La resistencia R_{Ω} , representa la resistencia de la solución utilizada en la celda. La combinación en paralelo de C_R y R_p , representan la interfase; donde C_R es la capacitancia del recubrimiento y R_p es la resistencia de poro (recubrimiento).

El modelo 2 se utiliza para cupones con domos en el diagrama de Bode de fase. La resistencia R_{POL} , representa la resistencia de polarización o resistencia de transferencia de carga, C_{dl} es la capacitancia de doble capa. Esta doble capa es producida por los agentes agresivos que han penetrado al sustrato.

Los datos de resistencia y capacitancia de los modelos 1 y 2 se obtienen a partir de los valores de impedancia de los diagramas de Bode. Para los diagramas obtenidos, los valores experimentales de resistencias y capacitancias fueron calculados usando un software de simulación llamado THALES instalado con el analizador automático de impedancias. A continuación se representan los valores de R_p o resistencia de recubrimiento en función del tiempo (monitoreos).

1. CUPONES E139 Y E054. RECUBRIMIENTO MASTIC EPOXI BLANCO TIPO BARRERA

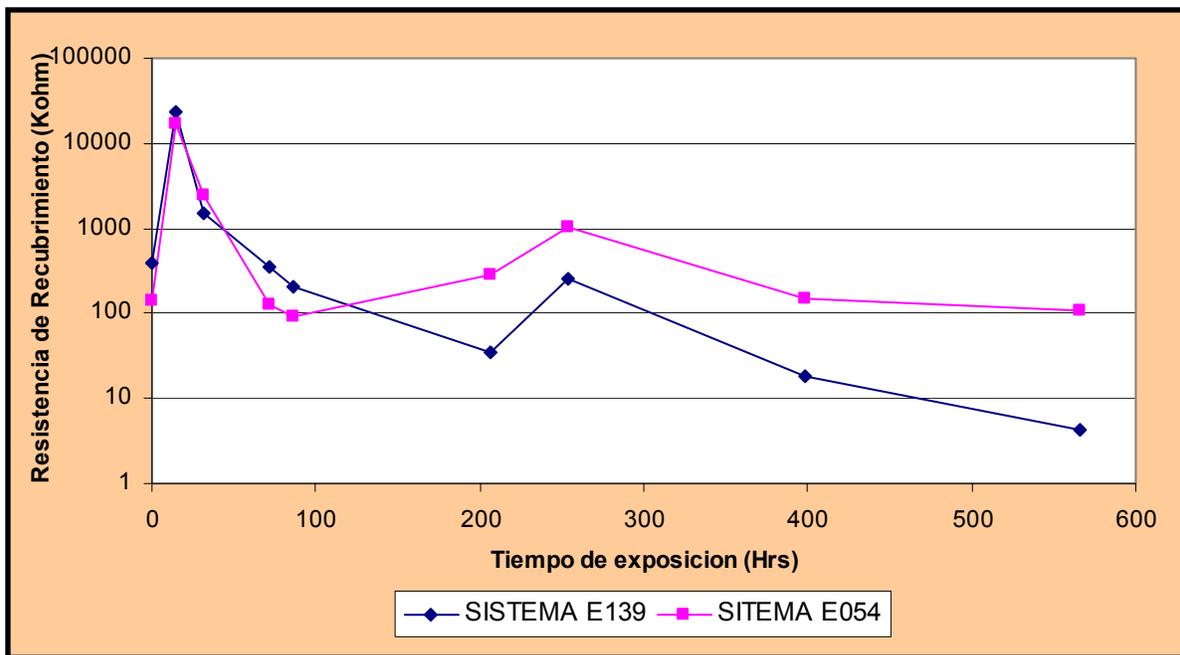


Figura 56. Espectro de impedancia para los cupones E139 y E054

La figura muestra la variación de R_p en función del tiempo de exposición en la cámara. A partir de 15 horas de exposición de las probetas en ambiente salino se observa un progresivo decaimiento de la impedancia debido a la penetración de

agentes agresivos al interior de los poros del recubrimiento, lo que implica cambios en la permitividad y permeabilidad eléctrica del recubrimiento ya que los poros de este se encuentran saturados de agentes agresivos. Posteriormente, estos agentes agresivos actúan sobre el sustrato de tal manera que forman una película de óxido protectora incrementando la impedancia a partir de las 206 horas de exposición. Sobre las 256 horas de exposición la película de óxido deja de comportarse como capa protectora, permitiendo pasar los agentes agresivos hacia el sustrato, indicando un decaimiento de la impedancia. En el monitoreo 9 después de 566 horas de exposición presenta una disminución de la resistencia el cupón E139, este cupón está ligado a la presencia de ampollas sobre la superficie. Sin embargo el cupón E054 no presenta la presencia de ampollas a pesar de la disminución en la resistencia.

2. CUPONES E084 Y E066. RECUBRIMIENTO EPOXI DE ALTOS SÓLIDOS TIPO BARRERA

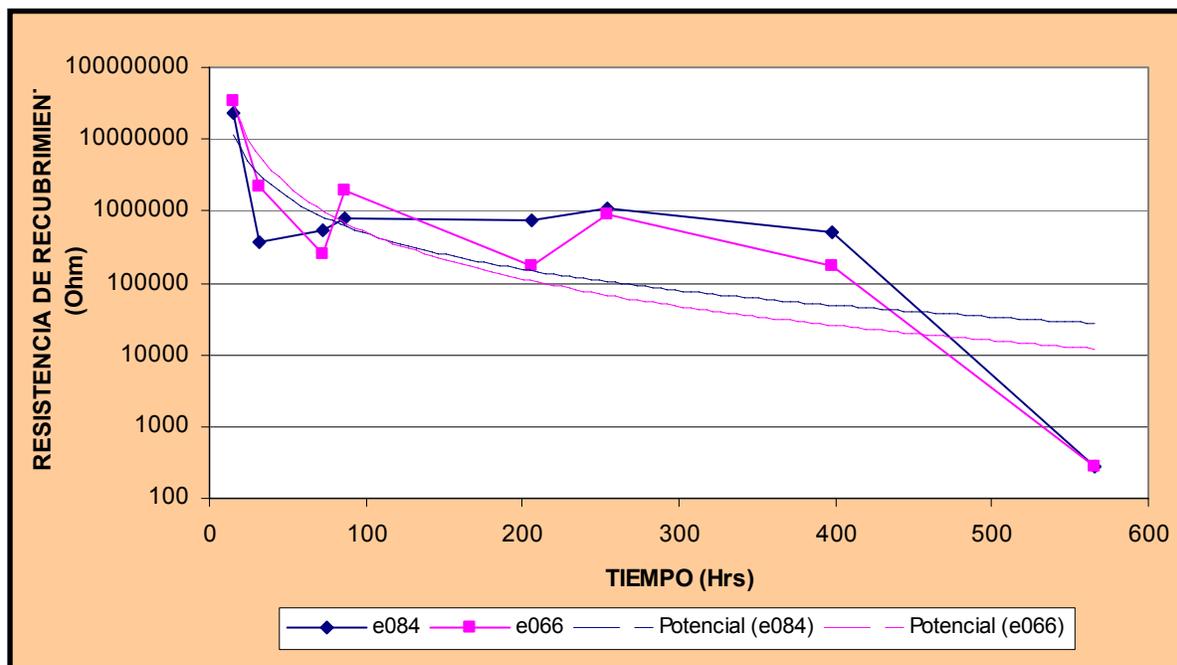


Figura 57. Espectro de impedancia para los cupones E084 y E066

El decaimiento de la impedancia observado durante las primeras 15 horas de exposición en ambiente salino, es una tendencia normal en este tipo de recubrimientos, corresponde a la acumulación de electrolitos sobre los poros del recubrimiento. Debido al mecanismo de protección anticorrosivo tipo Barrera, estos agentes agresivos tardan en depositarse en el sustrato, evitando la oxidación rápida del mismo. Los pequeños aumentos y disminuciones en la impedancia son debidos posiblemente a mecanismos de absorción y desorción del electrolito propio de este tipo de recubrimientos, entonces, a partir del gráfico mostrado anteriormente se puede concluir que aun no hay formación de películas de oxido depositadas en el sustrato. En el monitoreo 9, después de 566 horas de exposición, el cupón E084 presentó ampollas aisladas en regiones muy específicas sobre las superficie, indicando que se inicia el daño en el sustrato por la posible formación de la película de oxido.

3. CUPONES E015 Y E057. RECUBRIMIENTO EPOXI FOSFATO DE ZINC TIPO INHIBIDOR

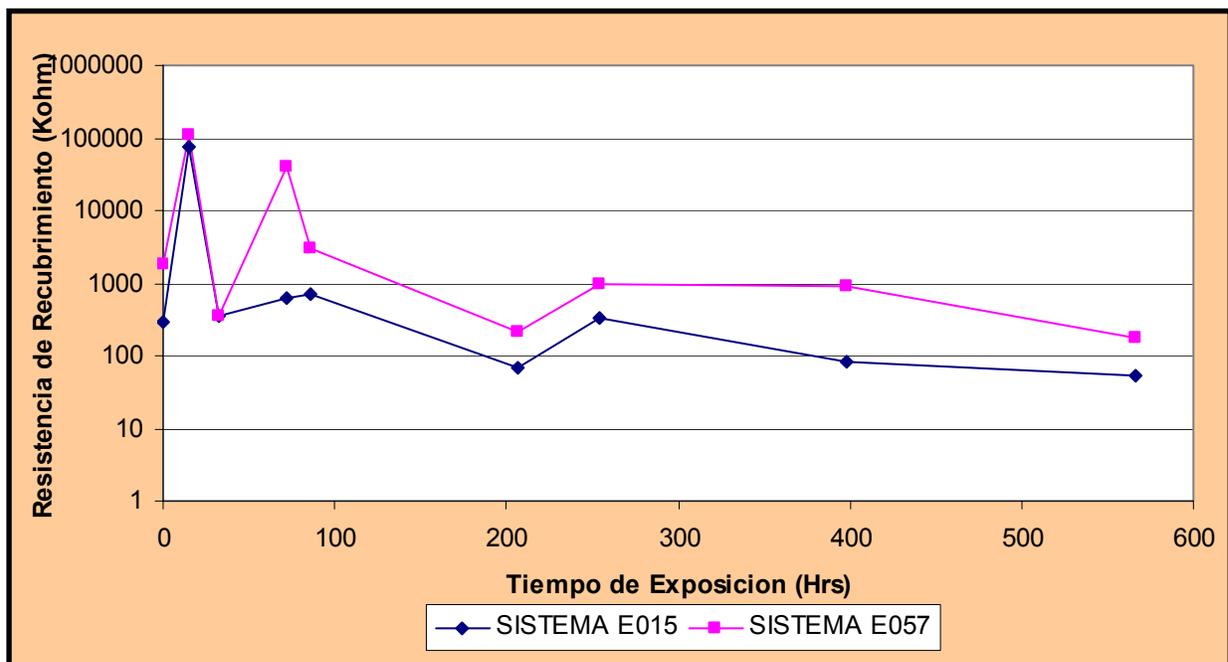


Figura 58. Espectro de impedancia para los cupones E015 y E057

La figura anterior muestra la resistencia R_p del recubrimiento en función del tiempo. En el primer monitoreo se observa un incremento de la Resistencia debido a que el recubrimiento no se encontraba completamente curado. Después de 72 horas de inmersión en un ambiente salino, se observa incremento en la resistencia, posiblemente debido a la formación de una capa protectora compuesta por un fosfato primario, $(\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2)$, cuya función es la de mantener protegido el sustrato por un periodo de tiempo, luego la impedancia sufre un decaimiento temporal indicando así, la disolución del fosfato primario y promoviendo la formación de un fosfato secundario (FeHPO_4) observado por un aumento leve de la resistencia después de 254 horas de inmersión. Transcurridas 398 horas de inmersión se observa nuevamente un decaimiento de la resistencia empezándose a formar posiblemente una capa pasivadora de fosfato terciario insoluble $(\text{Fe}(\text{PO}_4)_2)$, el cual se precipita sobre el acero. Esta capa protege la superficie observándose la no presencia de ampollas.

4. CONCLUSIONES GENERALES

En la realización del presente trabajo se puede concluir:

1. Se diseño y construyó un sistema de reconstrucción 3D por vía óptica a partir de la técnica de proyección de franjas. El sistema implementado permite reconstruir objetos en un campo de observación de 4 x 3 mm a una resolución del orden de 10 micras. Se demostró que el análisis del comportamiento dinámico del sistema de medida introduce errores inferiores del error incluido en la medida de la precisión del sistema.
2. En la elaboración del sistema de metrología 3D se recurrieron a alternativas metodológicas poco utilizadas en ambientes industriales ópticos tradicionales. Se destaca la introducción del corrimiento de fase a partir del desplazamiento del cuerpo dejando quieta la rejilla la difracción. Esto implicaba controlar el desplazamiento del cuerpo de tal manera que no produjera corrimientos de los puntos de su superficie en la mayor distancia desplazada. De igual manera y debido a desplazamientos irregulares en la fase, se implemento un algoritmo de corrimiento de fase más general al utilizado comúnmente (algoritmo por corrimientos regulares). La utilización de un procedimiento de calibración experimental permitió calcular los parámetros de conversión fase en altura para la reconstrucción final del cuerpo.
3. Se utilizo el sistema de medida 3D para la detección de ampollas en recubrimientos. Se prepararon 6 cupones de acero al carbono 1020 de dimensión 7.6 x 2 cm². A las superficies de cada cupón se le aplicaron tres recubrimientos variando el espesor y el mecanismo de protección. Los seis cupones fueron expuestos a condiciones ambientales salinas durante

566 horas. A intervalos periódicos fueron monitoreados controlando el estado superficial a partir del sistema de medida 3D y el estado electroquímico mediante el Espectro de Impedancias. Debido a los mecanismos de protección y al procedimiento de preparación de los cupones, únicamente el cupón E139 generó ampollas en su superficie después de 566 horas (monitoreo 9) de exposición en ambientes salinos. Observando la superficie del cupón se detectaron ampollas aisladas después de 398 horas. Estas ampollas poseen una altura máxima que oscilan entre 12 y 37 micras y un diámetro promedio de 0.256 mm. Este cupón presentó una fuerte disminución en la resistencia del recubrimiento según los diagramas de Bode para el monitoreo del Espectro de Impedancia después de 566 horas de exposición, lo cual implica que hay daño en el sustrato, manifestándose por la presencia de ampollas.

El cupón E084 muestra la presencia aislada de ampollas después de 566 horas de exposición. Las ampollas poseen una variación de altura máxima de 7.7 a 23.9 μm con diámetros que oscilan entre 0.163 mm a 0.478 mm. De igual manera la resistencia de recubrimiento disminuyó fuertemente en este monitoreo, indicado en el inicio de un posible daño en el sustrato.

De esta manera se concluye que el monitoreo 3D concuerda con el análisis de los espectros de impedancia para los cupones analizados. Es importante destacar que el sistema permite detectar la presencia aislada de ampollas de altura máxima que oscila alrededor de 10 μm . La facilidad del sistema de reconstrucción 3D para inspeccionar la presencia de ampollas, complementa el análisis del espectro de impedancias en el monitoreo de un sistema sustrato-recubrimiento.

5. PERSPECTIVAS DE INVESTIGACION

Observando el comportamiento de los cupones en función del tiempo de exposición, se puede plantear la posibilidad de realizar un análisis mas detallado de la variación del estado superficial en función de las posibles alteraciones del sistema sustrato-películas-recubrimiento, debido a procesos electroquímicos. Es decir, en los procesos intermedios antes de la aparición de las primeras ampollas, el estado superficial del cupón se altera debido a procesos electroquímicos al interior del sistema. Este comportamiento es medido a partir de la variación en la forma 3D de la superficie. De igual manera, se puede utilizar la influencia 3D para establecer factores cuantitativos, que caractericen las ampollas en la superficie de la muestra; de esta manera se obtendrá un sistema de medida mas completo que se anexara al análisis por espectroscopia de impedancias para el monitoreo de las muestras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Amaya y Z. Valderrama. "Reconstrucción de Objetos a partir del método de Grises". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. (2003)
- [2] J. Meneses. "Systeme Optique pour la mesure des deformations de la voute plantaire sous charge statique" Tesis de Doctorado. Université de Franche-Comté (1998)
- [3] Instituto Tecnológico Textil. "Análisis de la tecnología de Visión Artificial aplicada al sector Textil". Ministerio de Ciencia y tecnología. España. 2002. [www.aitex.es/estudios/Abstract_\(visión\).htm](http://www.aitex.es/estudios/Abstract_(visión).htm).
- [4] S. Xiansu y C. Wenjing, "Fourier Transform Profilometry: A review", Opt. Laser Eng. 35 263-284. (2001).
- [5] F. Chen, G. M. Brown y M. Song, "Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods", O. E. 39, 10-22 (2000).
- [6] Zhang Song, Zhang Ping. "Reconstrucción tridimensional del contorno usando el método del desplazamiento de fase". Depto. de Ingeniería Industrial. SUNY
- [7] G. Lai y T. Yatagai. "Generalized phase-shifting interferometry". J. Opt. Soc. Am. A/Vol.8, No.5. (1991)
- [8] H. J. Tiziani, "Optical Measurement techniques and applications", Artech. House, Boston (1997)
- [9] R. Windecker, S. Franz y J. Tiziani, "Optical roughness measurements with fringe projection", Appl. Opt. 38, 2837-2842 (1999).

[10] W. Juptner y W. Osten, "Fringe'97: Automatic processing of fringe patterns", Akademie Verlag, Berlin (1997).

[11] S. De Nicolas y P. Ferrero, "Fourier transform method of fringes analysis for moiré interferometry", J. Opt. A, Pure Appl. Opt. 2, 228-233 (2000).

[12] S. Xiansu y X. Lian, "Phase unwrapping algorithm used on fringe frequency analysis in Fourier-transform profilometry", Opt. Eng. 40,637-643 (2001).

[13] Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints. Norma ASTM D714-87.

[14] L.F. Vesga, Contribución a la determinación experimental de variables electroquímicas en procesos de corrosión con Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, Tesis de pos-grado, UIS 1998.

[15] F. Mansfeld, "use of the electrochemical impedance spectroscopy for the study of corrosion protection by polymer coatings. Journal of Applied Electrochemistry, 25 (1995). 187-202.

[16] L. F. Vesga, E. Vera, J. H. Panqueva "El Uso de los Análisis de E.I.S. para el Reconocimiento de los Diferentes Mecanismos de Protección de Pigmentos Anticorrosivos en Recubrimientos Orgánicos". 6to Congreso Colombiano de Protección y Corrosión. Santa Fe de Bogotá. Octubre 31- Noviembre 2 (2001).