



**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**

**Facultad de Ciencias Físico Matemáticas**

**Determinación del grosor de una película delgada  
mediante la combinación de micro-interferometría  
óptica y análisis digital de imágenes**

Tesis presentada al

**Colegio de Física**

como requisito parcial para la obtención del grado de

**LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA**

por

**Ivan Hernández Gutiérrez**

Asesorado por

**Dr. Valentín García Vázquez**

Puebla Pue.

**Diciembre de 2019**





**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**

---

**Facultad de Ciencias Físico Matemáticas**

---

**Determinación del grosor de una película delgada  
mediante la combinación de micro-interferometría  
óptica y análisis digital de imágenes**

Tesis presentada al

**Colegio de Física**

como requisito parcial para la obtención del grado de

**LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA**

por

**Ivan Hernández Gutiérrez**

Asesorado por

**Dr. Valentín García Vázquez**

Puebla Pue.

**Diciembre de 2019**



Título: Determinación del grosor de una película delgada mediante la combinación de micro-interferometría óptica y análisis digital de imágenes.

Estudiante: IVAN HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ

## COMITÉ

---

Dra. Areli Montés Pérez

Presidente

---

Dr. Juan Castillo Mixcoatl

Secretario

---

M.C. Pedro Tolentino Eslava

Vocal

---

Dr. Víctor Manuel Altuzar Aguilar

Vocal

---

Dr. Valentín García Vázquez

Asesor



# Agradecimientos

Deseo expresar mi gratitud a:

*Al Instituto de Física “Ing. Luis Rivera Terrazas” de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por las facilidades otorgadas en el uso de las instalaciones para la realización del trabajo de tesis.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca parcial otorgada durante la realización del trabajo de tesis. Proyecto: FOINS CONACYT Fronteras de la Ciencia 2016-1-2488, “Gradientes de Deformación para Controlar Dominios en Materiales Ferromagnéticos y Ferroeléctricos”. Responsable Técnico: Dr. Francisco Javier Flores Ruiz.*

*A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) por el complemento de beca para la finalización del trabajo de tesis. Proyecto: 100312733-VIEP, “Efectos Cuánticos en la Respuesta Óptica de Nanocapas de Metal no Local”. Responsable Técnico: Dr. Makarov Nykolay.*

*Al Laboratorio de Microscopía de Fuerza Atómica del Instituto de Física BUAP por el uso del Microscopio de Fuerza Atómica (AFM).*

*Al Dr. Francisco Javier Flores Ruiz por la asesoría metodológica en el uso del Microscopio de Fuerza Atómica.*

*Al Laboratorio Central del Instituto de Física BUAP por las facilidades brindadas en el uso del Perfilómetro, y a la Dra. Laura Elvira Serrano de la Rosa, técnico de este laboratorio, por la asistencia en el equipo de medición.*

*A los sinodales: Dra. Areli Montes Pérez, Dr. Juan Castillo Mixcóatl. M.C. Pedro Tolentino Eslava y Dr. Víctor Manuel Altuzar Aguilar, cuyos valiosos comentarios enriquecieron este trabajo.*

*Al Dr. Valentín García Vázquez no solo por ser el asesor en este trabajo, sino por ayudarme a pulir mi formación profesional con todos los consejos que me ha brindado.*

*A mis amigos y compañeros (que nada más me hacen bullying), siempre han estado para apoyarme y han hecho que cada momento en la carrera valiera la pena.*

*A todas aquellas personas que me han ayudado tanto en mi formación personal como en mi formación profesional.*

# Dedicatoria

*A mis padres Andrés Hernández Rosas y María Matilde Gutiérrez Campos, por estar siempre conmigo y nunca dejarme caer. Por todo el apoyo que me han dado y por qué siempre han confiado en mí. No tengo como pagarles todos los sacrificios que han hecho para darnos lo mejor a mi hermano y a mí. De todo corazón los amo.*

*A mi hermano Daniel Hernández Gutiérrez porque sin importar nada siempre estas al pendiente de mí y sé que siempre será así. Por todo gracias.*

*A mis abuelos paternos José de la luz Hernández Pérez y Ofelia Rosas Morales por qué siempre han creído en mí. Y por qué siempre han celebrado mis logros. Muchas gracias por todo su apoyo.*

*A mis abuelos maternos José Gonzalo Gutiérrez Rodríguez y María Matilde Campos Díez, por todos sus consejos y regaños. También porque siempre han visto por cada uno de sus nietos muchas gracias.*

*A mis padrinos José Guadalupe Hernández Rosas y Elvia J. Castillo López y a mis primos Juan Andrés Hernández Castillo y Ángeles Guadalupe Hernández Castillo por ser mi segunda familia. Muchas gracias por todo.*

*A Cristian Ivan Echavarry Ayala mi mejor amigo, que más que amigo eres otro hermano. Gracias por creer en mí y alentarme a ser mejor.*

*A Diana Karina Jiménez Hernández porque a pesar de todo siempre puedo contar contigo. Gracias por estar conmigo en los momentos más difíciles. Has sido un motor y una motivación para mí.*

*A mi sobrino Andrés Yahel, siempre estás en mis pensamientos.*

# ÍNDICE

<i>Agradecimientos</i> .....	<i>v</i>
<i>Dedicatoria</i> .....	<i>vii</i>
<i>ÍNDICE</i> .....	<i>viii</i>
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i> .....	<i>ix</i>
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i> .....	<i>xiii</i>
<i>Resumen</i> .....	<i>xiv</i>
<i>Capítulo 1 Introducción</i> .....	<i>- 1 -</i>
<i>Capítulo 2 Microscopía de Contraste de Interferencia Total</i> .....	<i>- 6 -</i>
<i>Capítulo 3 Desarrollo de Código para Análisis de Franjas</i> .....	<i>- 23 -</i>
<i>Capítulo 4 Parámetros Experimentales</i> .....	<i>- 44 -</i>
<i>Capítulo 5 Resultados</i> .....	<i>- 63 -</i>
<i>Capítulo 6 Discusión</i> .....	<i>- 69 -</i>
<i>Capítulo 7 Conclusiones</i> .....	<i>- 77 -</i>
<i>Apéndice A</i> .....	<i>- 79 -</i>
<i>Referencias</i> .....	<i>- 85 -</i>

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. Esquema de la estructura de un micro-interferómetro TIC. ....	- 7 -
FIGURA 2.2. Superposición de imágenes de una muestra cubiertas por un patrón de interferencia y desplazamiento de las franjas debido a la diferencia de camino óptico. ....	- 8 -
FIGURA 2.3. Determinación de espesores a incidencia normal. El medio inmediato es aire por lo que tiene un índice de refracción $n_m = 1$ . ....	- 9 -
FIGURA 2.4. Microscopio Carl Zeiss modelo AXIOPLAN 2 imaging del Laboratorio de Superconductividad y Magnetismo IFUAP. ....	- 10 -
FIGURA 2.5. Modulo C-DIC y esquema de construcción. ....	- 11 -
FIGURA 2.6. Lámpara de Halógeno modelo HAL100 como fuente de iluminación del microscopio Axioplan 2 imaging. ....	- 12 -
FIGURA 2.7. Escala de niveles para la intensidad de luz de la fuente de Halógeno del Microscopio Axioplan 2 imaging. ....	- 13 -
FIGURA 2.8. Prisma Wollaston Modificado rotatorio, también llamado prisma TIC de la marca Carl Zeiss usado para la generación del patrón de micro interferencia. ....	- 14 -
FIGURA 2.9. Remarcado en rojo, filtro de luz que permite pasar una longitud de onda de 544.3 nm fabricado por la compañía Carl Zeiss. ....	- 15 -
FIGURA 2.10. Cámara AxioCam ERc 5s utilizada para capturar las imágenes provenientes del microscopio AxioPlan 2 imaging. ....	- 15 -
FIGURA 2.11. Patrón de micro-interferencia generado a partir de luz blanca. ....	- 16 -
FIGURA 2.12. Patrón de micro-interferencia generado con luz a una longitud de onda de 544.3 nm. ....	- 17 -
FIGURA 2.13. Muestra de películas delgadas, usada para análisis de grosor, fabricada por Carl Zeiss .....	- 18 -
FIGURA 2.14. Imagen de la muestra fabricada por la compañía Carl Zeiss, obtenida usando el microscopio AxioPlan 2 imagign con un objetivo de 2.5 aumentos, capturada por la cámara AxioCam ERc 5s acoplada al microscopio. Se ve una matriz de escalones de 16 filas y 16 columnas. ....	- 18 -
FIGURA 2.15. (a) Patrón de micro-interferencia generado por con luz blanca sobre un escalón al azar de la matriz de escalones. (b) Patrón de micro-interferencia generado por con luz verde sobre un escalón al azar de la matriz de escalones. ....	- 19 -
FIGURA 2.16. Representación matricial de los escalones de la muestra fabricada por la compañía Carl Zeiss, nombradas de acuerdo a las coordenadas de la fila y columna en que se encuentra cada escalón. ....	- 20 -
FIGURA 2.17. Imágenes del escalón 0110. Del lado izquierdo se presenta remarcado en rojo la zona del doblete generado por la superposición de la imagen gemela y el desplazamiento de la franja de interferencia	

debido a la altura del escalón. Del lado derecho, de igual manera se presenta remarcado la zona del doblete y la franja desplazada..... - 21 -

FIGURA 2.18. Matriz de escalones divida en cuatro cuadrantes Q1, Q2, Q3 y Q4. Cada cuadrante es una mini matriz de 8x8 escalones. .... - 22 -

FIGURA 3.1. (a) Ventana de comandos con información. (b) Ventana de comandos después de ejecutar el comando `clc`..... - 25 -

FIGURA 3.2. Ventana generada por el comando `figure()`. .... - 26 -

Figura 3.3. Figura cargada a partir de los comandos `imagesc`, `title`, `impixelinfo` y `datacursormode`. La información de la imagen se presenta como Pixel info: (X,Y) [R G B]. Donde X y Y son las coordenadas de los pixeles y las letras R, G y B representan los valores de intensidad para las capas Roja=R, Verde=G y Azul=B, de la imagen..... - 27 -

FIGURA 3.4. (a) Imagen original de la película delgada y el patrón de micro interferencia. (b) Imagen con contraste mejorado. .... - 29 -

FIGURA 3.5. Mensaje en pantalla de salida realizado con el comando `disp`. El comando `input` muestra un mensaje pidiendo el ingreso de la posición de la fila 1..... - 30 -

FIGURA 3.6. Pantalla de salida con mensaje pidiendo el ingreso de la fila inicial para el análisis de las franjas. .... - 30 -

FIGURA 3.7. Marcas y etiquetas de las franjas de interferencia seleccionadas para análisis ..... - 31 -

FIGURA 3.8. (a) Zona específica (recuadro rojo) de la representación topográfica del patrón de interferencia. (b) Esquema topográfico del nivel de brillo de las franjas de interferencia. Los picos altos (cimas) representan las franjas verdes del patrón de interferencia y los picos bajos (valles) representan las franjas oscuras. ... - 33 -

FIGURA 3.9. Esquema topográfico del nivel de intensidad del patrón de interferencia luego de aplicar la transformación de los datos. Los picos altos (cimas) representan las franjas oscuras del patrón de interferencia y los picos bajos (valles) representan las franjas brillantes. .... - 34 -

FIGURA 3.10. Curvas gaussianas ajustadas y valores de intensidad de las franjas oscuras del patrón de interferencia. .... - 37 -

FIGURA 3.11. (a) Imagen con contraste mejorado de una película delgada con suciedad. (b) Curvas gaussianas ajustadas y valores de intensidad de las franjas oscuras del patrón de interferencia de la muestra con suciedad. .... - 39 -

FIGURA 3.12. Pantalla de salida con los grosores obtenidos por el Método Computacional desarrollado.. - 42 -

FIGURA 3.13. (a) Centros de las franjas encontrados por las curvas gaussianas y rectas ajustadas por mínimos cuadrados. (b) Centros de las franjas encontrados por mínimos cuadrados, sobrepuestos en el interferograma de la película delgada. .... - 43 -

FIGURA 4.1. Esquema de un objetivo de microscopio. En el interior se ve un sistema de lentes centrados al eje óptico (línea roja). En el exterior se aprecia el tubo que protege al sistema de lentes y las especificaciones del objetivo.....	- 45 -
FIGURA 4.2. Objetivo de microscopio de la marca Carl Zeiss usado en el laboratorio para obtener las imágenes del patrón de micro interferencia. En él se observan las propiedades de dicho objetivo.....	- 46 -
FIGURA 4.3. Imagen capturada haciendo uso de los distintos objetivos de microscopio. (a) Objetivo de 2.5X, (b) Objetivo de 10X, (c) Objetivo de 20X, (d) Objetivo de 50X. ....	- 47 -
FIGURA 4.4. Cambio en la posición de la imagen gemela al cambiar la inclinación de las franjas de interferencia. (a) Ángulo de 30°. (b) Ángulo de 45°. (c) Ángulo de 60°. (d) Ángulo de 75°. (e) Ángulo de 90°. (f) Ángulo de 105°. ....	- 49 -
FIGURA 4.5. Número de pixeles para muestreo en una franja de interferencia desplazada respecto al ángulo de inclinación en el que se encuentra. ....	- 51 -
FIGURA 4.6. Imagen del escalón 0101 con niveles de brillo (a) 0.0, (b) 1.0, (c) 2.0 y (d) 3.0. ....	- 52 -
FIGURA 4.7. Imagen del escalón 0101 con nivel de iluminación (a) 4.0, (b) 5.0, (c) 6.0 y (d) 7.0. ....	- 53 -
FIGURA 4.8. Histogramas de distribución de brillo de pixeles para los niveles de iluminación (a) 0.0, (b) 1.0, (c) 2.0 y (d) 3.0. ....	- 55 -
FIGURA 4.9. Histogramas de distribución de brillo de pixeles para los niveles de iluminación (a) 4.0, (b) 5.0, (c) 6.0 y (d) 7.0. ....	- 56 -
FIGURA 4.10. Menú de Opciones para resolución de la cámara digital AxioCam ERc 5s. ....	- 59 -
FIGURA 4.11. Comparación entre resoluciones. (a)1280x720, (b)1920x1080, (c)2560x1440, (d)2560x1920. ....	- 59 -
FIGURA 4.12. Conteo de pixeles sobre una franja oscura en la periferia de un escalón para los diferentes tamaños de imagen. (a) 0.9 Mpx, (b) 2.0 Mpx, (c) 3.7 Mpx y (d) 5.0 Mpx ....	- 60 -
FIGURA 4.13. Gráfico para determinar la mayor cantidad de pixeles entre dos franjas oscuras del patrón de interferencia para los diferentes tamaños de imágenes. De arriba abajo (0.9 Mpx, 2.0 Mpx, 3.7 Mpx y 5.0 Mpx). ....	- 61 -
FIGURA 5.1. Barras de error de las mediciones realizadas mediante AFM y Método Computacional (MC).- ...	- 66 -
FIGURA 5.2. Barras de error de las mediciones realizadas mediante Perfilometría y por el Código Computacional (MC).....	- 68 -
FIGURA 6.1. Grosos obtenidos por los tres métodos de medición (AFM, Perfilometría y Método Computacional) y sus respectivas barras de error.....	- 70 -
FIGURA 6.2. (a) Punta de prueba de un Perfilómetro. (b) Punta de prueba AFM. ....	- 71 -
FIGURA 6.3. (a) Muestra Q1_0106 con suciedad. (b) Muestra Q1_0106 limpia. ....	- 72 -
FIGURA 6.4. (a) Especificaciones de la muestra de prueba Bruker VGRP-15M. (b) Matriz de "escalones" de la muestra de prueba. ....	- 74 -

<i>FIGURA 6.5. Frontera mal definida de una Película delgada de Niobio crecida en el Laboratorio de Superconductividad y Magnetismo del Instituto de Física de la BUAP.....</i>	<i>- 75 -</i>
<i>FIGURA A.1. Microscopio de Fuerza Atómica modelo Dimension Edge System de la marca Bruker localizado en el Laboratorio de Microscopía de Fuerza Atómica del Instituto de Física de la BUAP.....</i>	<i>- 79 -</i>
<i>FIGURA A.2. Zona de medición para cada uno de los escalones Q1_0810, Q2_1416, Q3_1505 y Q4_0106. -</i>	<i>80</i>
<i>-</i>	
<i>FIGURA A.3. Imagen de la muestra Q3_1505 obtenida por AFM abierta con el software Gwyddion.....</i>	<i>- 80 -</i>
<i>FIGURA A.4. Perfil del escalón medido en AFM. ....</i>	<i>- 81 -</i>
<i>FIGURA A.5. Cálculo de altura mediante cursores.....</i>	<i>- 82 -</i>
<i>FIGURA A.6. Ajuste Gaussiano para cálculo de error en AFM. ....</i>	<i>- 82 -</i>
<i>FIGURA A.7. Perfilómetro Veeco Dektak 150 de la marca Bruker localizado en el Laboratorio Central del Instituto de Física de la BUAP. ....</i>	<i>- 83 -</i>
<i>FIGURA A.8. Perfil del escalón Q3_1505 y ajuste de la función escalón.....</i>	<i>- 84 -</i>

# ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Propiedades del objetivo de microscopio de 50X, usado para determinar el grosor de la película delgada.....</i>	<i>- 11 -</i>
<i>Tabla 4.1. Cantidad de pixeles en una franja oscura sobre un escalón, para los diferentes tamaños de imagen .....</i>	<i>- 61 -</i>
<i>Tabla 5.1. Grosos determinados por cálculo llevado a cabo con el Método Computacional (MC) desarrollado basado en la técnica de microscopía TIC.....</i>	<i>- 64 -</i>
<i>Tabla 5.2. Grosos determinados por cálculo llevado a cabo con el Método Computacional (MC) y mediante Microscopía de Fuerza Atómica (AFM).....</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Tabla 5.3. Grosos medios por Perfilometría (P) y grosos determinados por cálculo llevado a cabo por el Método computacional (MC). .....</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Tabla 6.1. Grosos determinados por cálculo llevado a cabo con el Método Computacional (MC) para las muestras Q1_0810, Q2_1416, Q3_1505 y Q4_0106 con suciedad y posteriormente limpias.....</i>	<i>- 73 -</i>

# Resumen

Se presenta un método para determinar de manera precisa el grosor de películas delgadas. Se utiliza un microscopio óptico de polarización de luz reflejada implementado para Microscopía de Contraste de Interferencia Total (TIC, por sus siglas en inglés), para obtener patrones de micro-interferencia. Las imágenes son analizadas mediante un algoritmo de computadora desarrollado para encontrar los centros de tres curvas gaussianas sobre una misma fila (barrido horizontal) haciendo uso de los niveles de intensidad de la imagen. Las curvas gaussianas corresponden a tres franjas de interferencia, dos de referencia y la franja desplazada debido al grosor de la película delgada. Este proceso se realizó barriendo varias filas siguiendo las mismas tres franjas (barrido vertical), obteniendo así tres conjuntos de datos los cuales corresponden a los centros de cada una de las franjas. Estos conjuntos de datos permiten hacer un análisis estadístico para calcular las distancias entre las tres franjas de interferencia. Para mejorar sustancialmente los resultados, el método se complementó con una regresión lineal por mínimos cuadrados aplicado a cada conjunto de datos, calculando las distancias con los datos ya suavizados. Con la finalidad de mejorar aún más los resultados, se aumentó la precisión en los cálculos optimizando los parámetros experimentales durante el uso del microscopio. Los resultados obtenidos fueron comparados con mediciones realizadas por Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) y Perfilometría, demostrando que el método desarrollado es viable, confiable, y altamente preciso.

# Capítulo 1

## Introducción

El desarrollo de tecnologías complejas que involucran el uso de películas delgadas ha traído muchos logros tecnológicos en nuestros días [Nieto 1994]. Por ejemplo, dispositivos tales como computadoras, películas antirreflejantes para diversos tipos de lente, entre otros [Regalado 1986]. Todo esto ha sido posible gracias a las múltiples propiedades de las películas delgadas. Dichas propiedades de las películas delgadas dependen fuertemente de su estructura y morfología. A su vez, son sensibles a las características geométricas, incluyendo el espesor de sus diferentes componentes. Por lo tanto, una amplia caracterización de las propiedades microscópicas de las películas delgadas implica una compleja caracterización.

### 1.1. Antecedentes

En la actualidad, la inmensa mayoría de los dispositivos tecnológicos avanzados que son fabricados para cualquier rama de la industria (electrónica, óptica, mecánica, etc.), requieren en algún momento de su construcción la síntesis y apilamiento de pequeñas capas de materiales sólidos de espesores menores a una micra. Estas capas las denominamos películas delgadas. Estas son empleadas para dos finalidades. La primera es optimizar alguna o varias propiedades de los sustratos a los que recubren o dotarlos de propiedades nuevas. La segunda aplicación es la fabricación de dispositivos con propiedades fisicoquímicas específicas y singulares [Espinós 2010]. Sin importar la aplicación que se les dé, las

múltiples propiedades de sistemas a base de multicapas de películas delgadas dependen fuertemente de su estructura y morfología. De igual manera, son sensibles a las características geométricas, incluyendo el espesor de sus componentes. Por tanto, es de suma importancia una amplia caracterización de las propiedades macroscópicas respecto a los aspectos mencionados anteriormente.

Técnicas estándar de caracterización, tales como Reflectometría de Rayos X (XRR), Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), espectros de Absorción o Trasmisión de luz, son técnicas habituales para analizar la estructura y la morfología de los sistemas en capas junto con su espesor [Regalado 1986, Nieto 1994]. Otra técnica es la Microscopía de Fuerza Atómica (AFM).

## **1.2. Planteamiento del Problema**

Las técnicas de caracterización mencionadas en el último párrafo son bastante precisas. Sin embargo, resultan ser costosas y requieren mucho tiempo de preparación experimental. Además, muchas resultan destructivas. Por ejemplo, en AFM se tiene la desventaja de pasar sobre la superficie de la película con una punta de prueba, lo cual podría dañarla [Kuncser 2012].

## **1.3. Propuesta**

En esta tesis se plantea utilizar técnicas interferométricas para la determinación de grosores. Se propone hacer uso de un micro-interferómetro de luz polarizada circularmente. Estas técnicas son de fácil operación, de bajo costo, y pueden proporcionar información rápida sobre la morfología de las películas, así como su espesor de una manera no invasiva. El rango en el que operan va desde decimas de nanómetros a unos pocos micrómetros [Schey 2002].

En esta tesis se reporta el uso el uso de la Microscopía de Contraste de Interferencia Total (TIC). Esta es una de las versiones más novedosas y de mayor rendimiento en la interferometría. En comparación con los interferómetros tradicionales, la Microscopía de Contraste de Interferencia Total funciona con luz polarizada circularmente evitando la alteración del contraste del patrón de interferencia [Apostol 2008]. Para el uso de esta técnica, se utilizó un microscopio óptico comercial de polarización de luz reflejada. Este microscopio cuenta con el arreglo de lentes necesario para utilizar la técnica de microscopía TIC [Vaupel 2014a].

Sin embargo, hasta nuestro conocimiento, no se ha reportado un método de análisis confiable para determinar la distancia entre las franjas de interferencia producidas experimentalmente con dicha técnica.

## **1.4. Objetivos**

El objetivo general del trabajo de tesis es el desarrollar un algoritmo computacional basado en la técnica de Microscopía de Contraste de Interferencia Total para obtener el grosor de una película delgada.

Como objetivos particulares se tiene los siguiente:

1. Familiarizarse con las componentes del microscopio óptico que permiten aplicar la técnica de microscopía TIC.
2. Desarrollar un código computacional que permita calcular la distancia entre las franjas de interferencia generadas con la técnica de microscopía TIC para poder obtener el grosor de una película delgada.
3. Optimizar experimentalmente los parámetros en el uso del microscopio para obtener imágenes del patrón de interferencia con la mejor calidad posible, para mejorar la precisión en las mediciones.

4. Comparar las mediciones obtenidas a partir del trabajo de tesis con mediciones hechas con las técnicas de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) y Perfilometría.
5. Analizar las ventajas y limitaciones del método de medición desarrollado en comparación con AFM y Perfilometría.

## 1.5. Organización de la Tesis

En el Capítulo 1 se presentan los antecedentes y el problema que se quiere resolver en el presente trabajo de tesis. También se presenta la metodología que se siguió para la resolución del problema.

El Capítulo 2 de esta tesis, explica el principio de operación de la técnica de Microscopía de Contraste de Interferencia Total. También presenta el microscopio óptico utilizado, así como la muestra de prueba utilizada para este trabajo. Por último, se muestra cómo se generan los patrones de micro-interferencia haciendo uso del microscopio óptico y la aplicación de la técnica de microscopía TIC.

En el Capítulo 3 se presenta el estudio de los parámetros experimentales en el uso del microscopio óptico para obtener imágenes digitales con la mejor calidad posible para su posterior análisis.

El Capítulo 4 explica, en que consiste el análisis digital de imágenes. Además, se describe de manera detallada el algoritmo computacional desarrollado en esta tesis para el análisis de las imágenes obtenidas con el microscopio óptico implementando la técnica de microscopía TIC.

En el Capítulo 5 de la tesis se presentan los cálculos obtenidos con el método de medición desarrollado. Se comparan los resultados obtenidos con el trabajo de tesis con mediciones obtenidas por Perfilometría y Microscopía de Fuerza Atómica.

En el Capítulo 6 se discuten las ventajas y desventajas del método de medición desarrollado en el presente trabajo de tesis.

En el Capítulo 7 se presentan las conclusiones y aportaciones más representativas del trabajo de tesis.

# Capítulo 2

## Microscopía de Contraste de Interferencia Total

En este capítulo se describe el principio de operación de la técnica de Microscopía de Contraste de Interferencia Total (TIC). También se describe el microscopio óptico de polarización de luz reflejada utilizado, así como los componentes que ayudan a la generación del patrón de micro-interferencia, en el microscopio. Se presenta también la obtención de los patrones de micro-interferencia.

### 2.1. Principio de Operación

El principio de la técnica TIC está basada en un patrón de interferencia inducido por el microscopio. La relación entre las diferencias de altura de la muestra corresponde a la diferencia de camino óptico [Schey 2002]. El análisis se realiza mediante el desplazamiento relativo de las franjas de interferencia con relación al medio inmediato [Lang 1968].

Como se describe en la FIGURA 2.1, la luz emitida por una fuente (F) pasa a través del colector (C). Luego es polarizada circularmente por un polarizador (P). El divisor de haz (D) refleja parte de la luz polarizada a través del prisma TIC. Éste divide la onda inicial en dos partes que se propagan con una leve desviación de la

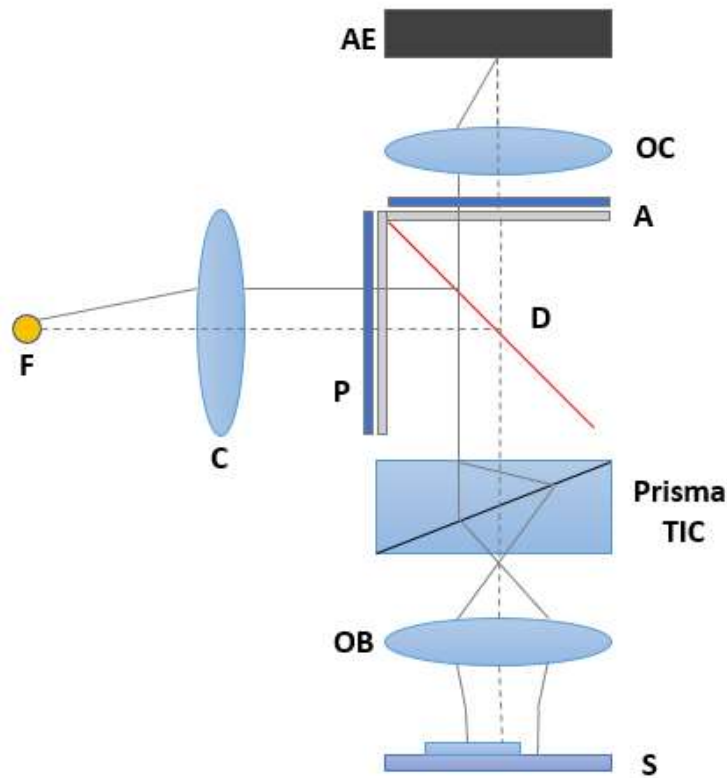
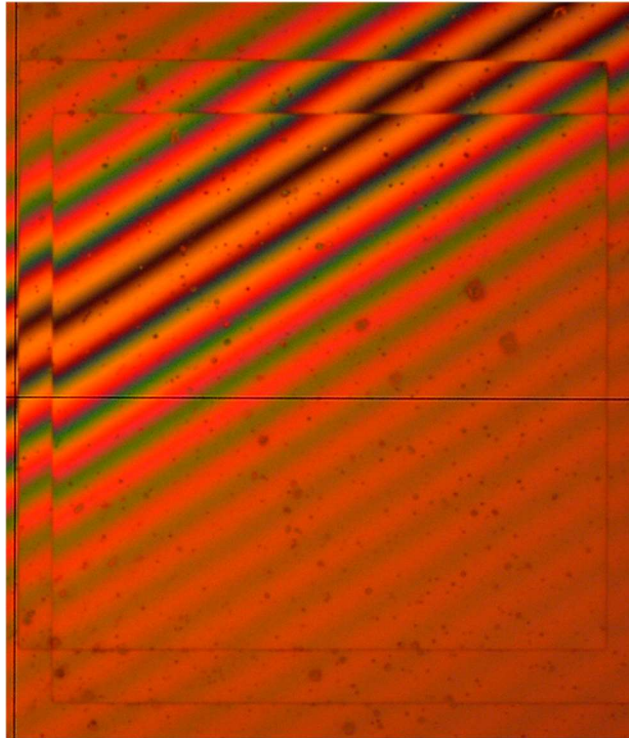


FIGURA 2.1. Esquema de la estructura de un micro-interferómetro TIC.

misma dirección [Dietrich 2006]. Posteriormente, la lente del objetivo (OB) enfoca la luz hacia la muestra. Luego, la luz se refleja en la muestra (S) y ésta sigue el camino inverso. Pasa a través del analizador circular (A) y la lente del ocular (OC), hasta llegar al plano del detector AE [Vaupel 2014<sup>a</sup>, Vaupel 2014<sup>b</sup>].

Las dos ondas, generan dos imágenes superpuestas de la superficie de la muestra [Danz 2004, Kagalwala 1998]. Éstas están cubiertas por las franjas de interferencia impuestas por la diferencia de camino óptico (FIGURA 2.2). El máximo de intensidad es obtenido en el punto de intersección donde la diferencia de camino óptico es cero [Davidson 2002]. Así como en cualquier posición transversal, la diferencia de camino es un número entero de  $\lambda$  [Lang 1968].



*FIGURA 2.2. Superposición de imágenes de una muestra cubiertas por un patrón de interferencia y desplazamiento de las franjas debido a la diferencia de camino óptico.*

Para obtener el grosor de una muestra, una película de tamaño lateral finito deber ser crecida sobre un sustrato. En esta situación, la imagen observada consiste de patrones de interferencia similares. Éstos corresponden a la superficie del sustrato reflejante y la película reflejante, los cuales son interrumpidas por franjas de interferencia adicionales formadas sólo en la región de paso (la interfranja  $a$  está relacionada con la diferencia de camino,  $\lambda$  FIGURA 2.3) [Kuncser 2012]. Estas nuevas franjas se desplazan respecto a las anteriores por una distancia  $b$  debido a la diferencia de camino óptico  $\Delta$ . Entonces  $\Delta$  puede ser expresada en términos de la longitud de onda como la ecuación (2.1). La diferencia de camino óptico está relacionada con el espesor de la película  $d$  [Schey 2004].

$$\Delta = \frac{b}{a} \lambda \quad (2.1)$$

A partir de la peculiar disposición geométrica del experimento, podemos relacionar  $\Delta$  y  $d$  de la siguiente manera. La diferencia de camino  $\Delta$ , puede expresarse a incidencia normal como  $\Delta=2d$  [Apostol 2008], por lo que el espesor de la película puede calcularse a partir de la ecuación (2.2) [Vaupel 2014<sup>a</sup>].

$$d = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{b}{a} \quad (2.2)$$

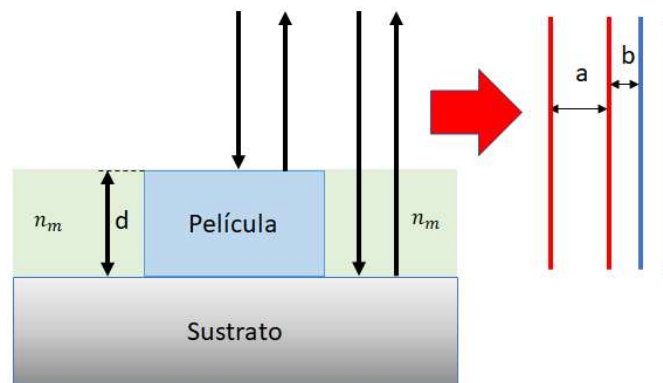


FIGURA 2.3. Determinación de espesores a incidencia normal. El medio inmediato es aire por lo que tiene un índice de refracción  $n_m = 1$ .

## 2.2. Microscopio Óptico de Polarización de Luz Reflejada

Para este trabajo de tesis se usó un microscopio de la compañía Carl Zeiss modelo AXIOPLAN 2 Imaging localizado en el Laboratorio de Superconductividad y Magnetismo del Instituto de Física de la BUAP. Este es un microscopio óptico de polarización de luz reflejada, diseñado para aplicaciones de Microscopía de Contraste de Fase [Murphy 2001, Inoué 1995]. Cuenta con una platina rotatoria de movimiento mecánico manual, la cual permite barrer la muestra tanto en el eje óptico

del microscopio (dirección Z) como en los ejes transversales (direcciones X-Y). El microscopio AxioPlan se muestra en la FIGURA 2.4.



*FIGURA 2.4. Microscopio Carl Zeiss modelo AXIOPLAN 2 imaging del Laboratorio de Superconductividad y Magnetismo IFUAP.*

El sistema óptico del microscopio AXIOPLAN se compone de un juego de cuatro objetivos con aumentos de 2.5X, 10X, 20X y 50X. Mientras que los oculares tienen un aumento de 10X, dando una magnificación total de 25X, 100X, 200X y 500X. Las características de los objetivos usados se presentan en la Tabla 2.1.

<b>Fabricante</b>	Carl Zeiss
<b>Clase de Objetivo</b>	EPIPLAN
<b>Diseño Especial</b>	NEOFLUAR
<b>Método de Contraste</b>	POL
<b>Magnificación/Apertura Numérica</b>	50X/0.80
<b>Medio de Inmersión</b>	Aire
<b>Longitud del tubo/Grosor del cubre-objeto</b>	$\infty / 0$

Tabla 2.1. Propiedades del objetivo de microscopio de 50X, usado para determinar el grosor de la película delgada.

Los objetivos están dentro de la clase EpiPlan [Davidson 2002], esto nos dice que se usa para iluminación superficial de la muestra a través del objetivo por lo que la muestra no debe estar cubierta con un cubre-objeto [Groot 2015]. El diseño NeoFluar permite lograr imágenes de contraste ricas con excelente homogeneidad y alta resolución [Allen 1969, Zeiss 2007]. Mientras que el método de contraste POL, genera baja birrefringencia mediante luz polarizada, lo que le da a la imagen un mejor contraste [Inoué 1995, Cap. 17].

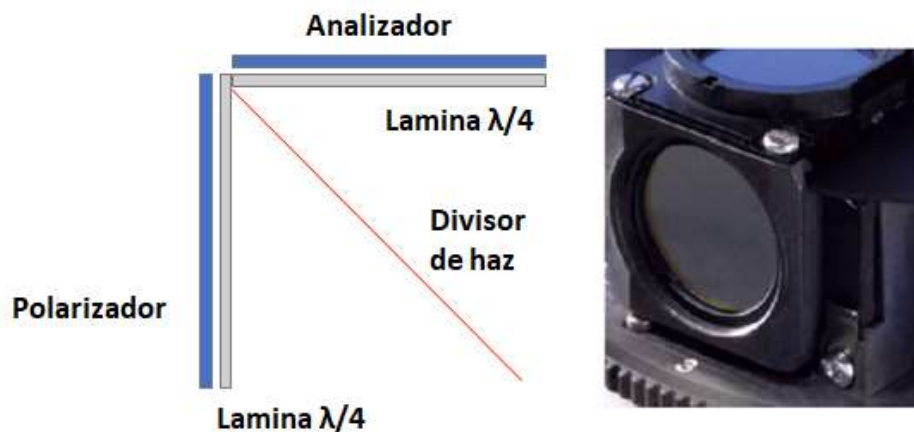


FIGURA 2.5. Módulo C-DIC y esquema de construcción.

El microscopio cuenta con un módulo reflector C-DIC formado por un polarizador lineal, una lámina de  $\lambda/4$  para generar luz polarizada circularmente (mediante un retraso en la fase de la onda de  $90^\circ$ ), una lámina semireflectora, una segunda lámina de  $\lambda/4$  y finalmente un analizador (polarizador) lineal [Dietrich 2006, Vaupel 2014<sup>a</sup>]. En la FIGURA 2.5 se puede observar el módulo C-DIC.



*FIGURA 2.6. Lámpara de Halógeno modelo HAL100 como fuente de iluminación del microscopio Axioplan 2 imaging.*

El microscopio usa como fuente de iluminación una lámpara de Halógeno modelo HAL 100 manufacturada por Carl Zeiss, mostrada en la FIGURA 2.6 la cual es alimentada con 12V con una potencia de 100W. El nivel de iluminación de la fuente de halógeno es regulado mediante un potenciómetro y esta calibrada por el fabricante en una escala de 10 niveles [Zeiss], como se puede apreciar en la FIGURA 2.7.

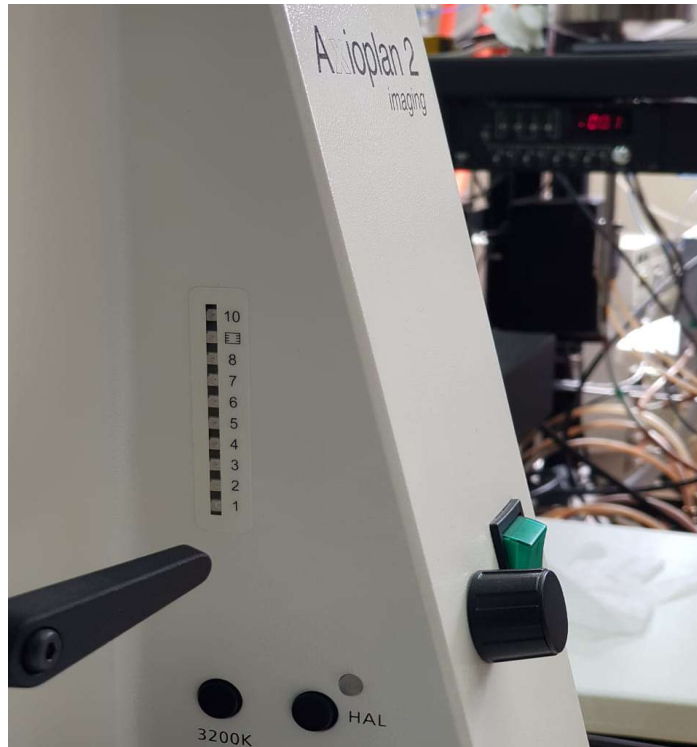
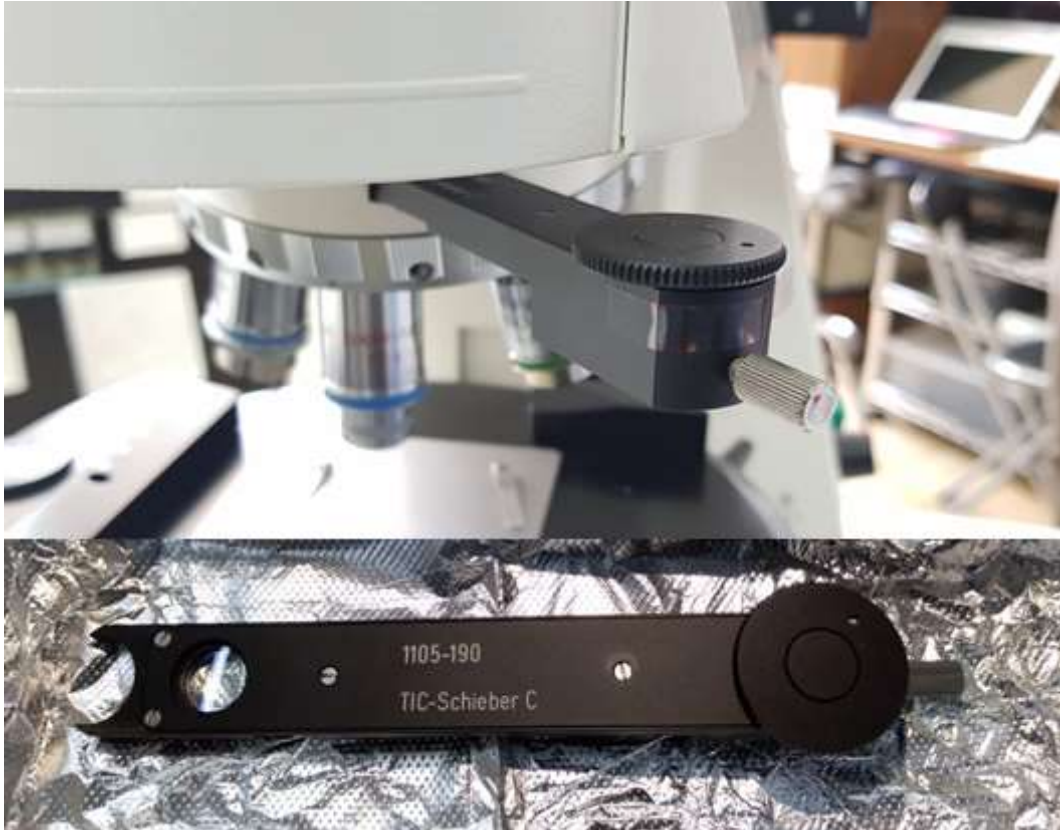


FIGURA 2.7. Escala de niveles para la intensidad de luz de la fuente de Halógeno del Microscopio Axioplan 2 imaging.

## 2.3. Interferómetro

Un interferómetro de luz blanca Michelson emplea un espejo en el llamado objetivo Mirau para generar una onda plana con el cambio de la fase de la referencia. Por el contrario, en TIC, la función del espejo la toma la superficie de muestra junto al objeto a ser perfiladas. Por lo tanto, TIC no requiere objetivos Mirau, y no hay estabilización de las trayectorias del haz a través de la amortiguación de vibraciones. [Gonzalez-Laprea 2011, Vaupel 2014<sup>a</sup>]. Para las aplicaciones de Microscopía de Contraste de Fase, de manera concreta para la técnica de Microscopía de Contraste de Interferencia Total (TIC) el microscopio cuenta con carrusel en donde va colocado un prisma Wollaston Modificado rotatorio [Allen 1969, Danz 2004, Dietrich 2006], también llamado prisma TIC (FIGURA 2.8). Este, divide

el haz proveniente de la fuente del microscopio en dos haces idénticos separados y ortogonales, propagándose en direcciones diferentes por una separación angular muy pequeña llamada de desplazamiento lo que ayuda a producir las franjas de



*FIGURA 2.8. Prisma Wollaston Modificado rotatorio, también llamado prisma TIC de la marca Carl Zeiss usado para la generación del patrón de micro interferencia.*

interferencia [Kagalwala 1998, Lang 1968]. El sistema rotatorio del prisma TIC ayuda a variar el ángulo de inclinación de las franjas del patrón de interferencia controlando el contraste de la imagen [Danz 2004, Vaupel 2014<sup>b</sup>].

Para poder realizar el cálculo de la altura de la muestra en forma de escalón se requiere de una longitud de onda fija [Murphy 2001, Cap. 3]. El equipo cuenta con un filtro, el cual permite pasar luz de una longitud de onda de 544.3 nm (luz verde), a partir de la luz blanca generada por la lámpara de Halógeno. Este filtro es de la compañía Carl Zeiss y se muestra en la FIGURA 2.9.



FIGURA 2.9. Remarcado en rojo, filtro de luz que permite pasar una longitud de onda de 544.3 nm fabricado por la compañía Carl Zeiss.

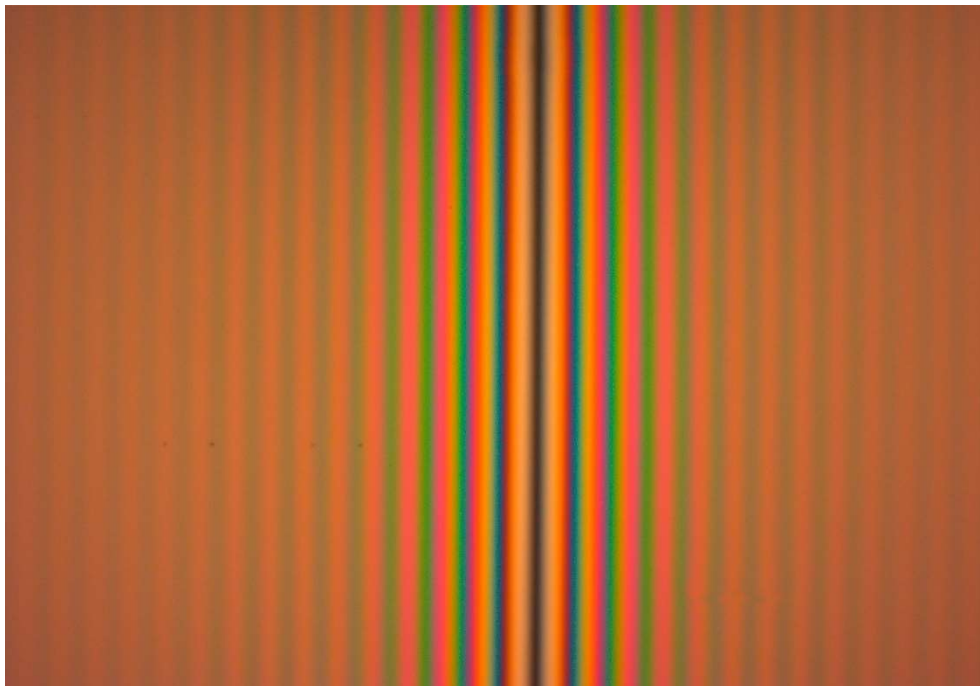
Para capturar las imágenes de la muestra a analizar, se usó una cámara digital de alta resolución con un sensor CMOS a color para aplicaciones de microscopía de luz, de la compañía Carl Zeiss modelo AxioCam ERc 5s, la cual se muestra en la FIGURA 2.10. Esta cámara cuenta con cuatro modos de resolución siendo la resolución máxima de 5 Megapíxeles (2560x1920) asignando un tamaño de pixel de 2.2  $\mu\text{m}$  x 2.2  $\mu\text{m}$ . Las imágenes capturadas son almacenadas en formato JPG [Zeiss 2015], un formato de compresión de imágenes con alta calidad, tanto en color como en escala de grises.



FIGURA 2.10. Cámara AxioCam ERc 5s utilizada para capturar las imágenes provenientes del microscopio AxioPlan 2 imaging.

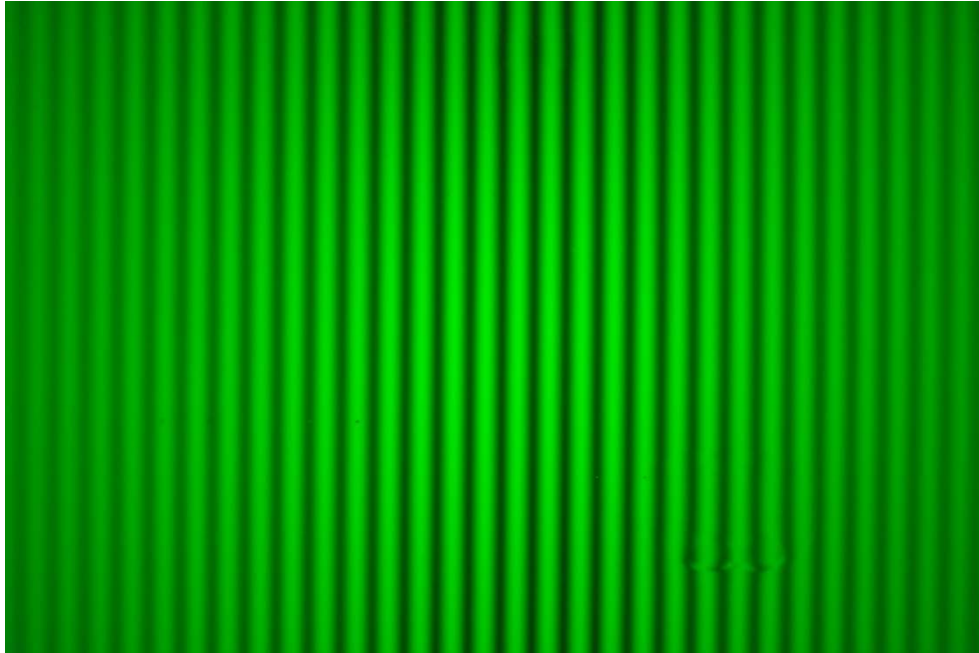
## 2.4. Obtención de Patrones de Interferencia

Para la generación del patrón de micro-interferencia se utilizó el microscopio AxioPlan 2 imaging en conjunto con el prisma TIC y el módulo reflector C-DIC mediante luz blanca generada por la lámpara de halógeno HAL 100. En la FIGURA 2.11 podemos observar el patrón de micro-interferencia generado a partir de luz blanca. El patrón obtenido es una combinación del fenómeno de interferencia y difracción [Davidson 2002]. Este último fenómeno es apreciable en las zonas “oscuras” del patrón de micro-interferencia, en lugar de tener franjas sin iluminación podemos ver el espectro electromagnético correspondiente al halógeno de la fuente de luz [Murphy 2001, Cap. 3]. Al añadir en el microscopio el filtro de luz verde con



*FIGURA 2.11. Patrón de micro-interferencia generado a partir de luz blanca.*

longitud de onda a 544.3 nm, el patrón es modificado obteniendo franjas brillantes verdes y franjas oscuras como se puede apreciar en la FIGURA 2.12.



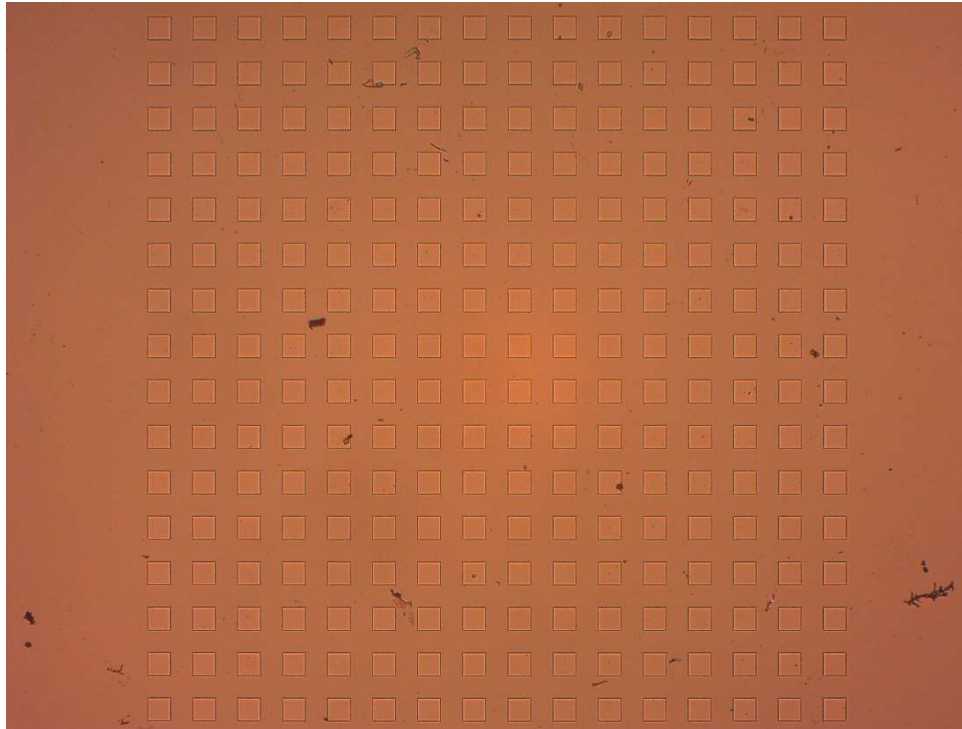
*FIGURA 2.12. Patrón de micro-interferencia generado con luz a una longitud de onda de 544.3 nm.*

Como muestra de prueba se utilizó una matriz de 256 escalones con un tamaño aproximado de  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  cada una, fabricada por la compañía Carl Zeiss, mostrada en la FIGURA 2.13. Los escalones están hechos de silicio sobre una oblea de silicio. Cada uno de estos, tiene un grosor medido en 104 nm de acuerdo a las especificaciones del fabricante.



*FIGURA 2.13. Muestra de películas delgadas, usada para análisis de grosor, fabricada por Carl Zeiss*

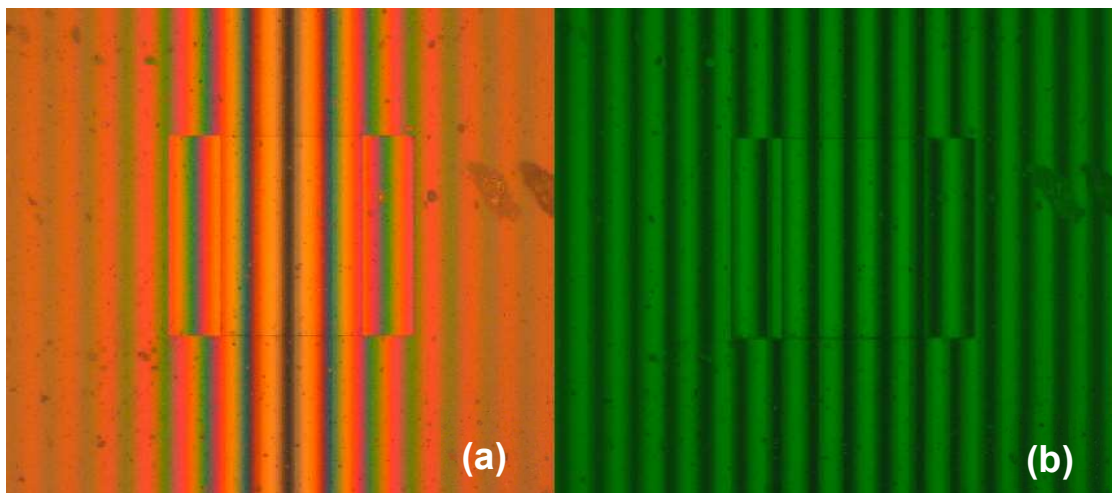
La muestra fabricada por la compañía Zeiss fue examinada usando el microscopio AxioPlan 2 imaging y el objetivo de microscopio con aumento de 2.5X. Con el objetivo usado y el aumento dado por los oculares del microscopio tenemos



*FIGURA 2.14. Imagen de la muestra fabricada por la compañía Carl Zeiss, obtenida usando el microscopio AxioPlan 2 imagign con un objetivo de 2.5 aumentos, capturada por la cámara AxioCam ERc 5s acoplada al microscopio. Se ve una matriz de escalones de 16 filas y 16 columnas.*

un aumento total de 25X, con lo cual pudimos observar claramente la matriz de escalones. Esta matriz está definida por 16 filas con 16 columnas de escalones como puede observarse en la FIGURA 2.14.

Después de examinar la muestra, nos centramos en un escalón al azar de la matriz de escalones para generar el patrón de micro-interferencia y observar si hay corrimiento de franjas como plantea la teoría descrita en la Sección 2.1. El patrón fue generado usando los dos tipos de luz (blanca y verde) independientemente, esto para observar con mayor detalle cómo se da el corrimiento de las franjas. La FIGURA 2.15 muestra el patrón de interferencia generado sobre el escalón para los dos tipos de luz y también se puede apreciar la imagen gemela de la muestra sobrepuesta.

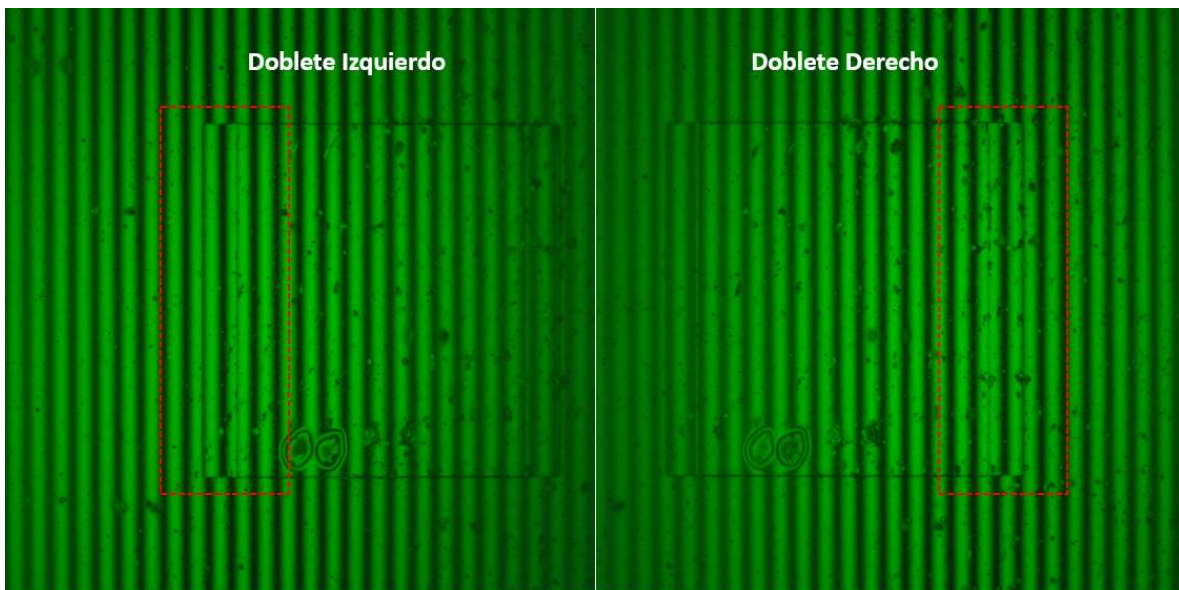


*FIGURA 2.15. (a) Patrón de micro-interferencia generado por con luz blanca sobre un escalón al azar de la matriz de escalones. (b) Patrón de micro-interferencia generado por con luz verde sobre un escalón al azar de la matriz de escalones.*

En la FIGURA 2.15.(a), con el patrón de micro-interferencia generado con luz blanca, podemos observar como se desplazan las franjas de interferencia de acuerdo a la region del “doblete” generado por la superposición de la imagen gemela [Danz 2004]. En el doblete del lado izquierdo la franja esta desplazada hacia el mismo lado. De igual forma el doblete del lado derecho genera un desplazamiento de franjas en el mismo sentido.

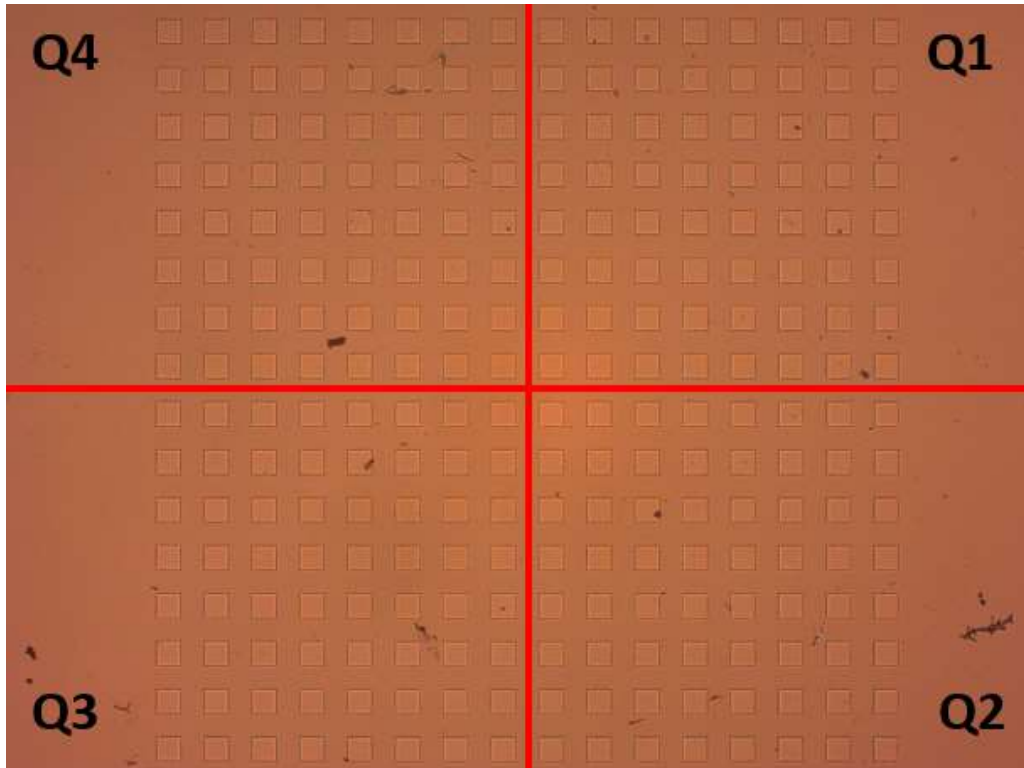


A cada uno de los 256 escalones se le hizo captura de dos imágenes, una para la franja recorrida en el “doblete” izquierdo del escalón y otra para la franja desplazada en el “doblete” derecho. En la FIGURA 2.17 se presentan las dos imágenes capturadas del escalón 0110, en esta podemos observar en los recuadros rojos cada uno de los dobletes del escalón y la franja desplazada debido a la altura de dicho escalón.



*FIGURA 2.17. Imágenes del escalón 0110. Del lado izquierdo se presenta remarcado en rojo la zona del doblete generado por la superposición de la imagen gemela y el desplazamiento de la franja de interferencia debido a la altura del escalón. Del lado derecho, de igual manera se presenta remarcado la zona del doblete y la franja desplazada.*

Dado que la muestra usada tiene un gran número de escalones, decidimos dividir la muestra en cuatro cuadrantes, los cuales se muestran en la FIGURA 2.18. Cada cuadrante tiene ocho filas con ocho columnas de escalones. Para el análisis de las alturas optamos por tomar cuatro escalones, uno por cada cuadrante. Estos se escogieron analizando cada una de las imágenes de cada escalón, tomando los más limpios en cada cuadrante.



*FIGURA 2.18. Matriz de escalones dividida en cuatro cuadrantes Q1, Q2, Q3 y Q4. Cada cuadrante es una mini matriz de 8x8 escalones.*

Como se puede apreciar en la FIGURA 2.17, el escalón 0110 presenta suciedad, esto pasa para una buena parte de los escalones de la muestra, por lo cual se realizó un proceso de lavado para eliminar la mayor cantidad posible de suciedad y poder realizar de manera adecuada el análisis de las alturas de los escalones mediante el código computacional desarrollado para el presente trabajo de tesis, el cual se presenta en el Capítulo 3. Cabe mencionar que dicho código computacional ha sido realizado a la par de cada uno de los pasos mencionados en la presente sección.

# Capítulo 3

## Desarrollo de Código para Análisis de Franjas

En este capítulo se describe de manera detallada el código computacional desarrollado para determinar la altura de los escalones de la muestra analizada. Dicho código se basa en un seguidor de líneas, de modo que podamos diferenciar en el patrón de interferencia, las franjas oscuras de las brillantes para poder medir el corrimiento de estas, y así determinar la altura.

### 3.1. Análisis Digital de Imágenes

El análisis o procesamiento digital de imágenes, actualmente es usado por varias áreas de la ciencia, tales como la óptica, electrónica, matemáticas, informática entre otras. Este consiste en hacer un mapeo de una imagen sobre puntos discretos a los cuales se les asigna un par de coordenadas y un valor de intensidad [Mejia 2005, Cap. 1]. Cuando las coordenadas y los valores de intensidad asignados son todas cantidades finitas y discretas, decimos que la imagen es una imagen digital. Estos valores pueden ser alterados mediante una computadora, permitiendo efectuar operaciones para alcanzar un objetivo deseado. Dentro del análisis digital de imágenes, se pueden distinguir tres tipos de procesamiento [Mejia 2005, Murphy 2001].

1. Procesamiento Óptico: En este, se emplean arreglos de lentes para mejorar las características de la imagen.
2. Procesamiento Analógico: Consiste en el uso de sistemas eléctricos para la alteración de las imágenes.
3. Procesamiento Digital: Manipulación de los datos de una imagen por medio de la computadora.

En el procesamiento digital de imágenes se pueden clasificar cinco áreas principales [Mejia 2005, Murphy 2001]: 1) La adquisición es el proceso por el cual se obtiene una imagen. 2) El preprocesado, son las técnicas necesarias para mejorar la imagen, incluye técnicas tales como la reducción de ruido entre otros. 3) El proceso que divide una imagen en objetos de interés es llamado segmentación. 4) El proceso de descripción (representación) diferencia las características convenientes entre un objeto y otro. 5) Finalmente, el proceso de reconocimiento e interpretación se encarga de identificar los objetos de interés y les asocia un significado. Todos estos procesos se agrupan de acuerdo a la complejidad y el grado de detalles dependiendo de la aplicación de interés.

Para poder hacer procesamiento digital de imágenes, se requiere el equipo necesario para obtener una imagen digital o digitalizar una imagen real. Estos equipos son llamados digitalizadores, los cuales deben ser capaces de dividir la imagen en pequeñas regiones llamadas pixeles [Murphy 2001, Cap. 13]. También deben ser capaces de medir el nivel de iluminación de cada pixel, cuantizar dicha medición para producir un valor entero y posteriormente escribir estos datos en un medio de almacenamiento con un formato apropiado para que puedan ser procesados posteriormente mediante algún tipo de software. La mayoría de los digitalizadores asignan valores de brillo a los pixeles en un rango entre 0 y 255 para diferentes modos de color como escala de grises y RGB [Murphy 2001, Cap. 15]. En nuestro caso contamos con la cámara digital AxioCam descrita en el Capítulo 2, la cual genera la imagen digital que necesitamos. El análisis de estas imágenes se realizó mediante el sistema de cómputo MatLab. Este software es capaz de procesar la información de imágenes digitales para los diferentes formatos de

imagen, permitiendo la manipulación de dicha información mediante el desarrollo de un algoritmo [Matlab 1998]. De manera particular, deseamos analizar el desplazamiento de las franjas de interferencia debido a la altura de la muestra analizada. Para esto se desarrolló un algoritmo, el cual se describe en las siguientes secciones.

## 3.2. Lectura de Imagen

Antes de empezar cualquier código computacional se debe asegurar uno de trabajar únicamente con los datos necesarios y en un área de trabajo determinado. Para llevar esto a cabo, empezamos el código computacional con una serie de comando que nos aseguren estar trabajando únicamente con los datos que las imágenes que deseamos analizar y que no tenemos más de un área (ventanas) de trabajo. El comando `clear` sirve para limpiar la memoria del sistema eliminando todas las variables del espacio de trabajo actual, `clc` borra todo el texto de la ventana de comandos, lo que resulta en una pantalla clara (FIGURA 3.1). Mientras que el comando `close all` elimina todas las figuras cuyos identificadores no estén ocultos.

```
clear
clc
close all
FileName = '2019.06.25 - ESCALON - 0805 - 500X - INT 4.0 - DOBLETE
DER.jpg';
A = imread (FileName);
```

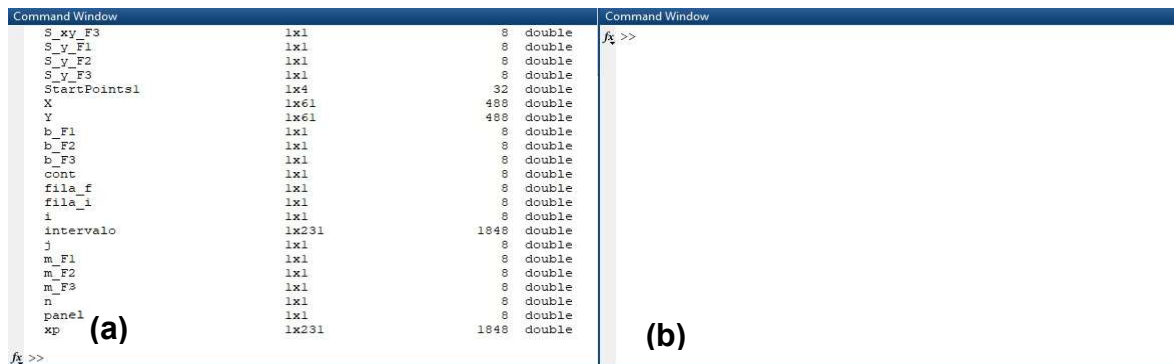
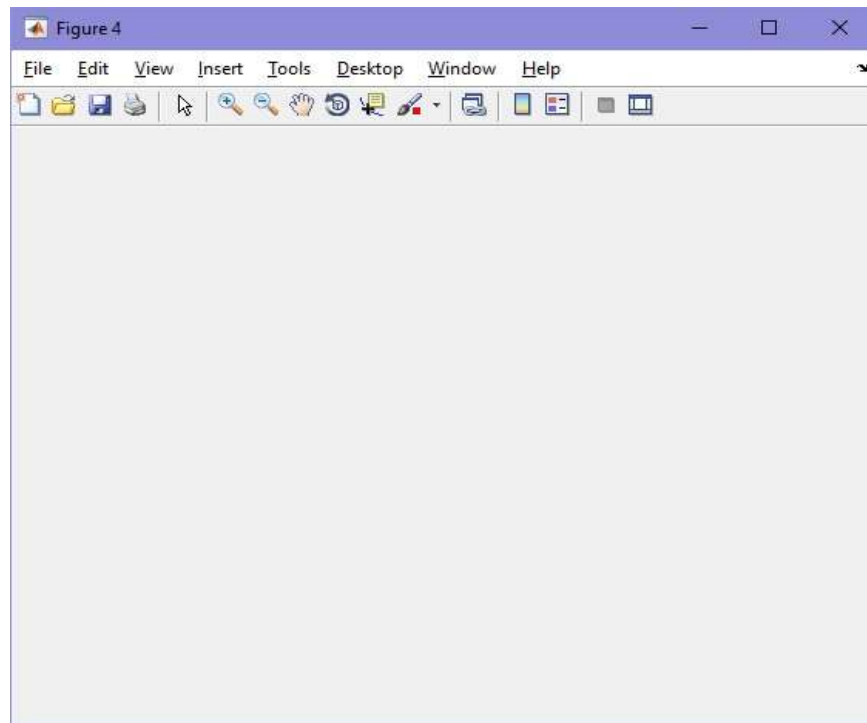


FIGURA 3.1. (a) Ventana de comandos con información. (b) Ventana de comandos después de ejecutar el comando `clc`.

El comando `imread` lee la imagen del archivo especificado por `filename`, infiriendo el formato del archivo a partir de su contenido. Se genera una matriz de matrices. Esta tiene la forma  $A(m,n,p)$  donde  $m$  representa número de fila (pixel en la coordenada  $y$ ),  $n$  es el número de columna (pixel en la coordenada  $x$ ) y  $p$  representa el número de matriz o color de la capa (1=Red, 2=Green y 3=Blue ). Por otro lado, comando `figure()` abre una nueva ventana para algún tipo de imagen (graficas, figuras, etc) como se ve en la FIGURA 3.2.

```
figure(1)
imagesc(A);hold on
title ('IMAGEN ORIGINAL')
impixelinfo
datacursormode
```



*FIGURA 3.2. Ventana generada por el comando `figure()`.*

El comando `imagesc` muestra el archivo cargado en `imread` en la ventana abierta por el comando `figure()`. Mientras que el comando `hold on` conserva la figura actual y ciertas propiedades de ejes para que los comandos de gráficos posteriores se agreguen al gráfico existente. Con el comando `title` asignamos el título en la

figura. Por último, los comandos `impixelinfo` y `datacursormode` permiten visualizar la información de la imagen. Esta información son las coordenadas de la imagen en píxeles y el valor de intensidad asignado a cada píxel en formato RGB (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

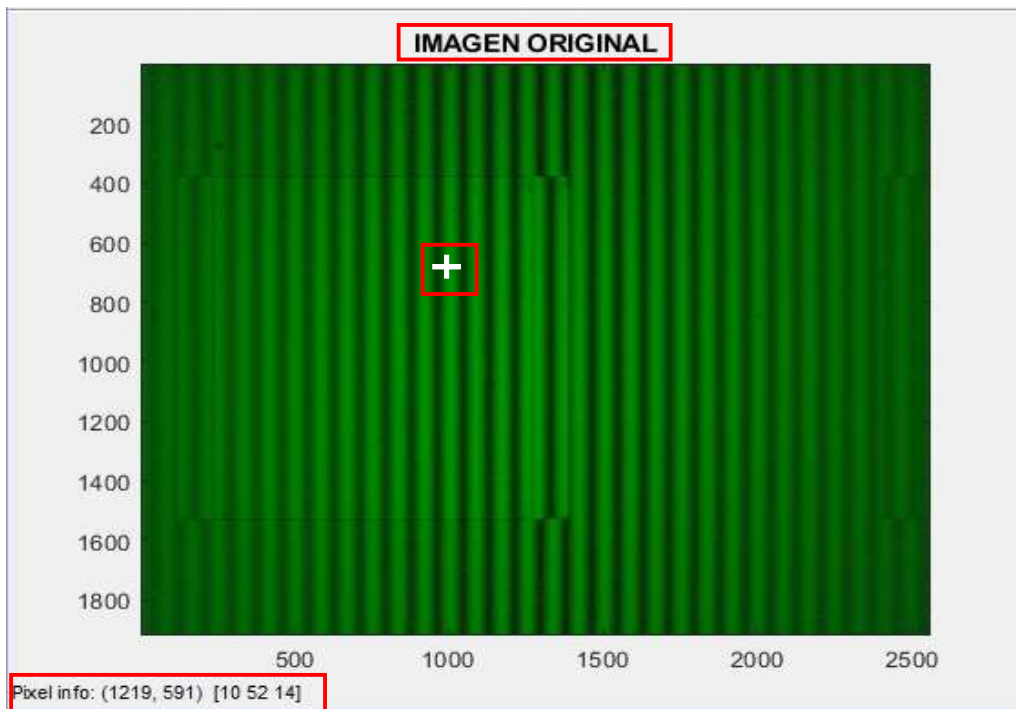


Figura 3.3. Figura cargada a partir de los comandos `imagesc`, `title`, `impixelinfo` y `datacursormode`. La información de la imagen se presenta como `Pixel info: (X,Y) [R G B]`. Donde X y Y son las coordenadas de los píxeles y las letras R, G y B representan los valores de intensidad para las capas Roja=R, Verde=G y Azul=B, de la imagen.

### 3.3. Mejora de Contraste

Dentro del análisis digital de imágenes muchas veces es requerido que las imágenes a analizar sean “retocadas” mediante procesos computacionales [Mejia 2005, Cap. 3]. Esto con el fin de mejorar u obtener los datos necesarios para el análisis como se explicó en la Sección 3.1. En el Método Computacional desarrollado, se realizó una mejora de contraste a las imágenes obtenidas con la cámara AxioCam.

Para hacer la mejora de contraste, hacemos que las capas R (roja) y B (azul) sean cero. Esto lo podemos hacer ya que nos encontramos en una longitud de onda que caen dentro del color verde (capa G), por lo que la información correspondiente a las otras dos capas será mínima y de nula utilidad para el análisis.

```
% Mejora de contraste
A(:, :, 1) = 0; % Capa Roja
A(:, :, 3) = 0; % Capa Azul
```

Posteriormente tomamos los valores máximos y mínimos de la capa verde para poder contrastar la imagen. Luego, a la capa G de la imagen le aplicamos un filtro mediante los valores máximos y mínimos de dicha capa. El filtro consiste en quitarle a la capa verde los valores mínimos que esta tiene y multiplicar cada nivel de cada pixel por la razón entre el valor máximo permitido de la imagen (255) y la diferencia (contraste) entre los valores mínimos y máximos de la capa verde. Finalmente, el comando `imadjust` asigna los valores de la imagen de color verdadero a los nuevos valores RGB.

```
MaximaIntensidad = max (max ( A(:, :, 2) ) );
MinimaIntensidad = min (min ( A(:, :, 2) ) );
A(:, :, 2) = ((255) / (MaximaIntensidad - MinimaIntensidad)) * (A(:, :, 2) - MinimaIntensidad);
A = imadjust(A,[0 0.15 0; 1 0.7 1],[,]);
figure(2)
imagesc(A);hold on
title ('IMAGEN CON CONTRASTE MEJORADO')
impixelinfo %Mostrar (x, y) y (R, G, B) de cada pixel
datacursormode
```

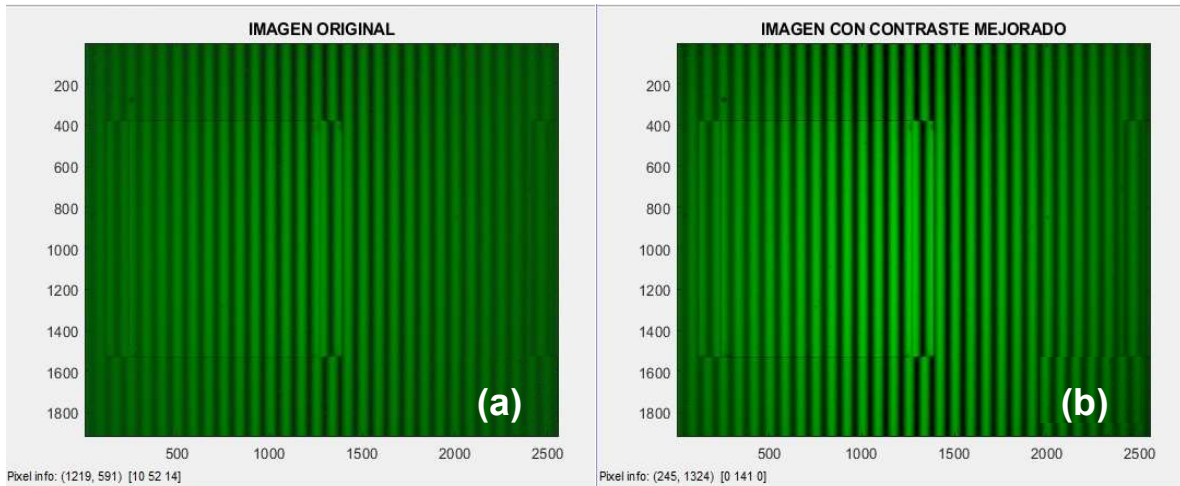


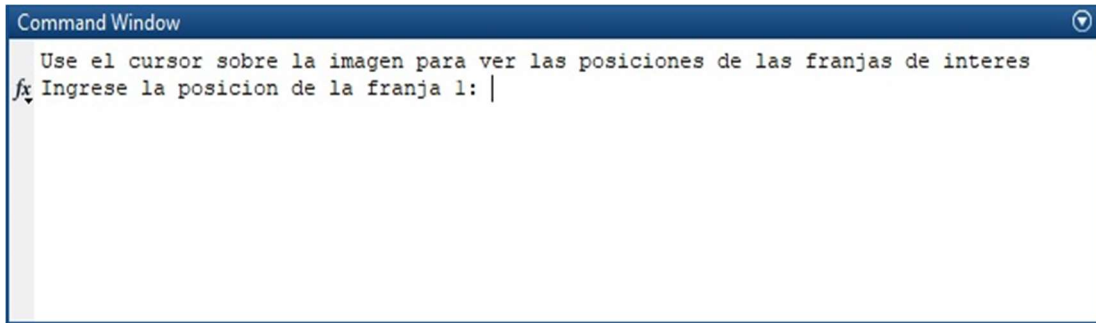
FIGURA 3.4. (a) Imagen original de la película delgada y el patrón de micro interferencia. (b) Imagen con contraste mejorado.

Una vez que hemos realizado las operaciones necesarias para mejorar el contraste de la imagen procedemos a mostrar los resultados obtenidos mediante los comandos figure, imagesc, title y los demás comandos mencionados anteriormente. En la FIGURA 3.4.(b) podemos apreciar claramente la mejora de contraste realizada a la imagen original capturada por la cámara del microscopio.

### 3.4. Eleccion de Franjas

Para empezar a realizar el análisis de las franjas de micro-interferencia, luego de realizar la mejora de contraste, es necesario elegir las franjas adecuadas haciendo uso del cursor y la información que este provee en la imagen. El análisis solo requiere de la información de tres franjas sobre una misma fila. Los datos son ingresados manualmente gracias al comando input. El comando disp muestra en pantalla un mensaje en cual se pide usar el cursor para ingresar los datos que se piden, uno a la vez, como se ve en la FIGURA 3.5.

```
% Ponemos manualmente los centros aproximados de los picos de interés
disp('Use el cursor sobre la imagen para ver las posiciones de las
franjas de interés')
POS_FRANJAS(1)=input('Ingrese la posición de la franja 1: ');
POS_FRANJAS(2)=input('Ingrese la posición de la franja 2: ');
```



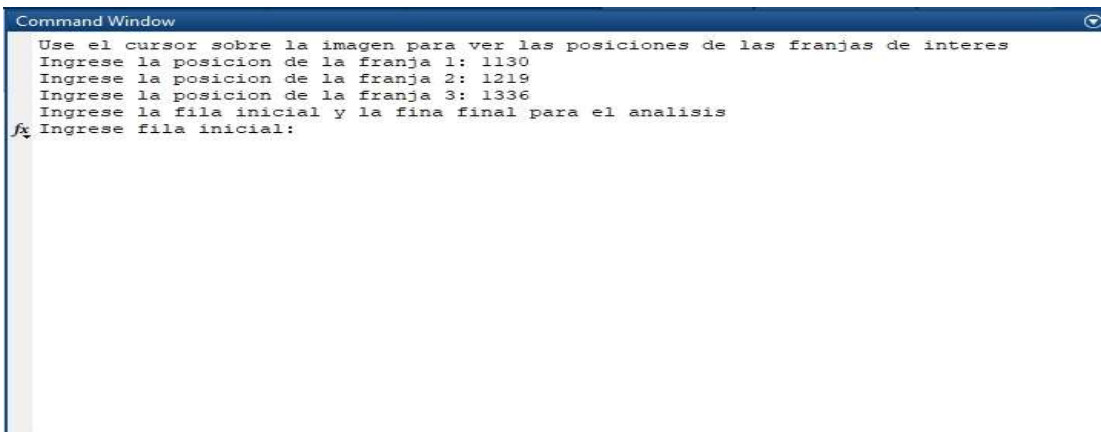
```
Command Window
Use el cursor sobre la imagen para ver las posiciones de las franjas de interes
fx Ingrese la posicion de la franja 1: |
```

FIGURA 3.5. Mensaje en pantalla de salida realizado con el comando disp. El comando input muestra un mensaje pidiendo el ingreso de la posición de la fila 1.

```
POS_FRANJAS(3)=input('Ingrese la posición de la franja 3: ');
```

Para que el análisis de la altura del escalón sea preciso, es necesario barrer (recorrer) la mayor área posible de la muestra. Por esto se escoge una fila inicial `fila_i` y una fila final `fila_f`. La información de estas filas se obtiene usando el cursor sobre la imagen. Luego, la información se ingresa manualmente, de manera análoga a la posición de las franjas (FIGURA 3.6).

```
% Escogemos la fila inicial y final para el análisis
disp('Ingrese la fila inicial y la fina final para el análisis')
fila_i = input('Ingrese fila inicial: ');
fila_f = input('Ingrese fila final: ');
```



```
Command Window
Use el cursor sobre la imagen para ver las posiciones de las franjas de interes
Ingrese la posicion de la franja 1: 1130
Ingrese la posicion de la franja 2: 1219
Ingrese la posicion de la franja 3: 1336
Ingrese la fila inicial y la fina final para el analisis
fx Ingrese fila inicial:
```

FIGURA 3.6. Pantalla de salida con mensaje pidiendo el ingreso de la fila inicial para el análisis de las franjas.

Una vez que se han ingresado los datos necesarios, se procede marcar las franjas seleccionadas. Esto se realiza sobre la imagen con contraste mejorado

gracias al comando hold on, usado en la línea de código al momento de mostrar dicha imagen. Para poner las marcas se hace uso del comando plot. Este crea un gráfico de líneas 2D, de los datos de Y frente a los valores correspondientes de X. En este caso lo usamos para colocar una marca con dos asteriscos blancos sobre las franjas de interés (FIGURA 3.7), uno en la fila inicial y el otro en la fila final. Además, cada una de las franjas son etiquetadas con un número mediante un ciclo for el cual ejecuta un grupo de instrucciones en un bucle un número especificado de veces.

```
% Enumeramos los picos
NoFranja = [1,2,3];
plot(POS_FRANJAS(1:length(POS_FRANJAS)),fila_i,'W*')
plot(POS_FRANJAS(1:length(POS_FRANJAS)),fila_f,'W*')
for i = 1: length(NoFranja)
% Etiquetar las franjas poniendo un número justo
% arriba de los *
text ( POS_FRANJAS(i) - 0, fila_i - 100, num2str (i),...
      'Color', 'white', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold',
      'HorizontalAlignment', 'center' )
end
```

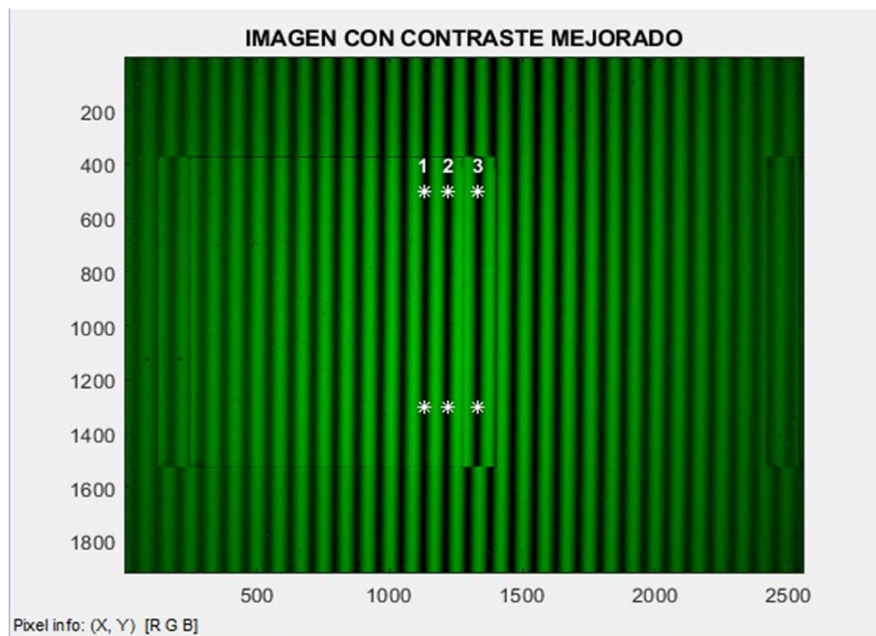


FIGURA 3.7. Marcas y etiquetas de las franjas de interferencia seleccionadas para análisis

## 3.5. Distancia entre franjas mediante Curvas Gaussianas

Para obtener la altura de los escalones mediante un seguidor de línea, primero es necesario obtener el centro de las franjas en cada una de las filas seleccionadas. Estos centros se obtienen mediante un ajuste llevado a cabo por una Curva Gaussiana. El Método Computacional desarrollado, usa los centros de las franjas encontrados por las curvas gaussianas que posteriormente son ajustados a una línea recta (de ahí el nombre de seguidor de línea) mediante un ajuste lineal por Mínimos Cuadrados. Por ahora describiremos la parte del código empleado para realizar el ajuste por curvas gaussianas.

En el ajuste por curvas gaussianas, primero necesitamos definir las variables que vamos a utilizar. Así, definimos la variable *n*, como el número de filas que se van a barrer. La variable *Coordenadas* crea tres matrices de *n* filas y 2 columnas. Estas matrices sirven para guardar los centros de las franjas encontrados por las curvas gaussianas de cada fila. El comando *linspace* usado en la variable *xp* genera un vector fila de *n* puntos espaciados una distancia  $(\text{fila}_f - \text{fila}_i)/(n-1)$  el cual será usado más adelante.

```
% AJUSTE POR CURVAS GAUSSIANAS
% Definimos las variables que vamos a usar
n = (fila_f-fila_i) +1;
Coordenadas = zeros (n,2,length(NoFranja));
xp = linspace(fila_i,fila_f,n);
% Empezamos un contador
cont=0;
% Creamos un vector para guardar las posiciones de los centros de
% las franjas
POS_F_temp = zeros (1,length(NoFranja));
```

Dado que el corrimiento se realiza en las franjas oscuras, es necesario hacer una transformación a los datos de la imagen. Para poder ajustar las curvas gaussianas, debemos hacer que los valores más bajos de la imagen sean detectados. MatLab asigna como valor máximo de intensidad 255 (unidades

arbitrarias), esto para las zonas brillantes en las tres capas de colores de RGB y como valor mínimo 0 para las zonas oscuras [Matlab 1998]. En la FIGURA 3.8.(b) podemos ver una representación topográfica del patrón de micro-interferencia en una zona específica (FIGURA 3.8.(a)), donde las “cimas” (zona roja) representan

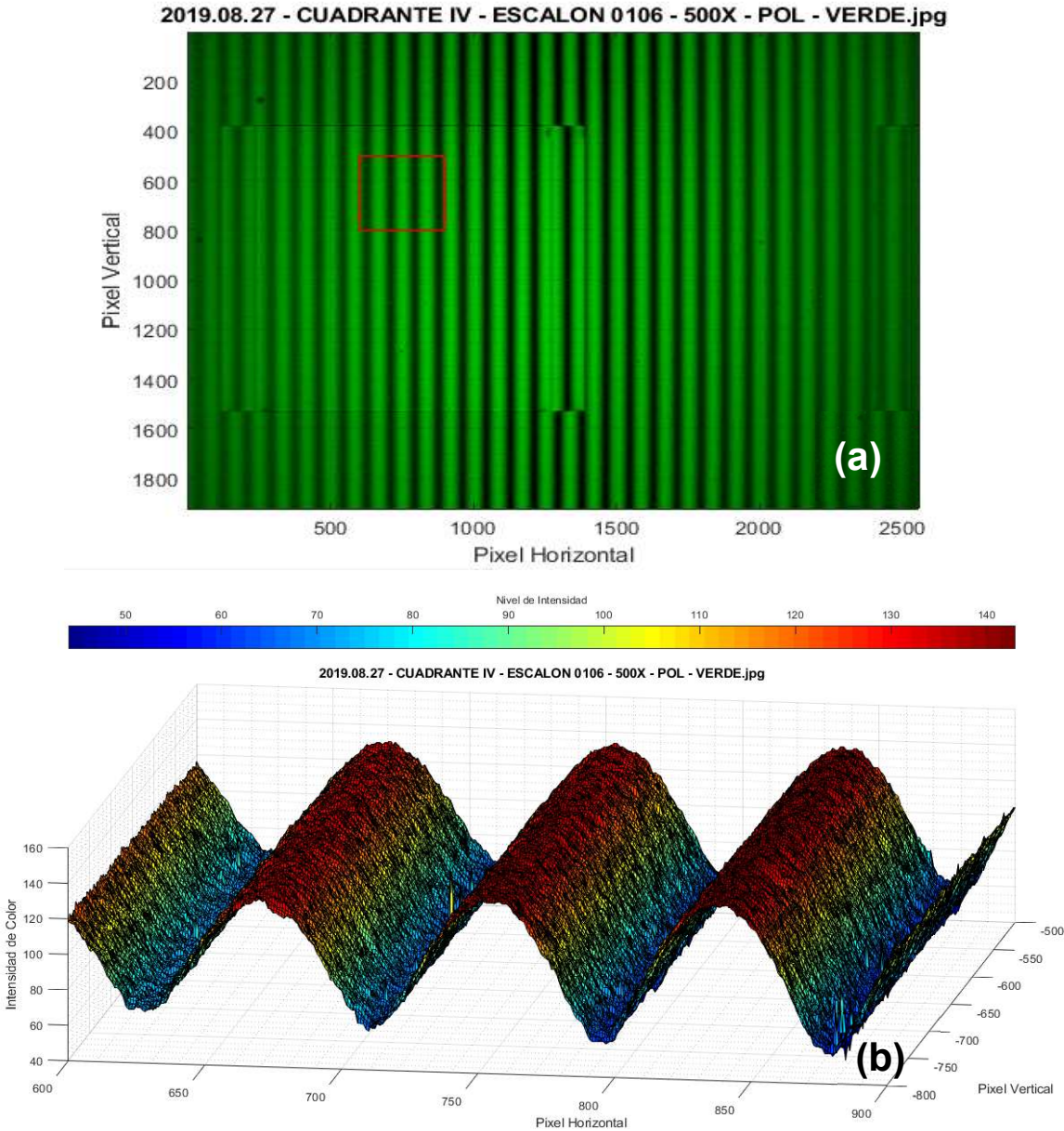


FIGURA 3.8. (a) Zona específica (recuadro rojo) de la representación topográfica del patrón de interferencia. (b) Esquema topográfico del nivel de brillo de las franjas de interferencia. Los picos altos (cimas) representan las franjas verdes del patrón de interferencia y los picos bajos (valles) representan las franjas oscuras.

las franjas verdes del patrón, mientras que los “valles” (zona azul) representan las franjas oscuras.

La transformación realizada, consiste en tomar el nivel máximo de intensidad permitido (255) y restarle los valores de la imagen original. Con esto hacemos que los valores de las franjas oscuras (mínimos) sean máximos y que los valores de las franjas brillantes (máximos) sean mínimos. De esta manera, las franjas oscuras del patrón de interferencia se representan topográficamente como “cimas” (FIGURA 3.9) y por lo tanto es posible realizar el ajuste por curvas gaussianas.

```
% Hacemos la transformación de picos  
G = 255 - A;
```

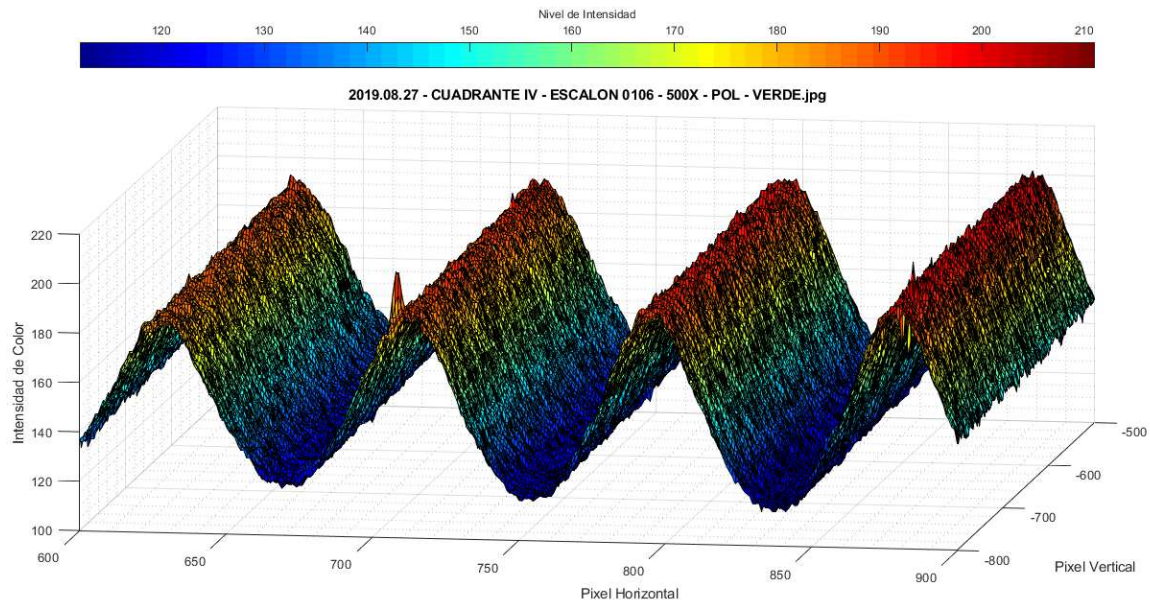


FIGURA 3.9. Esquema topográfico del nivel de intensidad del patrón de interferencia luego de aplicar la transformación de los datos. Los picos altos (cimas) representan las franjas oscuras del patrón de interferencia y los picos bajos (valles) representan las franjas brillantes.

Después de que hemos realizado la transformación de los picos de intensidad, podemos realizar los ajustes de las curvas gaussianas a las franjas oscuras. Para ello debemos recorrer todas las filas del rango escogido, que va desde fila\_i hasta fila\_f. Este recorrido se efectúa mediante un ciclo for el cual empieza el ciclo con la fila inicial y se termina en la fila final. Dentro del ciclo se va

aumentando el contador creado anteriormente y se va mostrando. Esto para poder
 visualizar que las acciones dentro del ciclo se están llevando a cabo.

```

for j=fila_i:fila_f

    % Aumentamos el contador
    cont=cont+1
    % Tomamos los valores de intensidad de la imagen para cada
    fila en la capa verde de la imagen
    G1=G(j, :, 2);
    G1=double(G1);
    % Ajustamos las curvas Gaussianas a los picos en cada fila
    empezando
    % con los valores de las posiciones ingresadas para cada
    franja
    for i=1:length(POS_FRANJAS)
        % Definimos los limites para la curva gaussiana
        PixelLimiteA = POS_FRANJAS(i) - 30;
        PixelLimiteB = POS_FRANJAS(i) + 30;
        X = double ( PixelLimiteA : 1 : PixelLimiteB ) ;
        Y = double (G1 (PixelLimiteA: PixelLimiteB) );
        % Definimos la ecuacion de la curva gaussiana
        GaussEqn = 'a1*exp(-((x-b1)/c1)^2) + d1';
        % Escogemos los puntos iniciales para el ajuste
        StartPoints1 = [60, POS_FRANJAS(i), 15, 50];
        CurvaAjustada = fit ( X', Y', GaussEqn, 'Start',
        StartPoints1);
        CoeficientesDelAjuste = coeffvalues (CurvaAjustada);
        % Guardamos los valores de los centros de la curva
        gaussiana para
        % cada fila barrida desde la fila inicial hasta la final
        Coordenadas(cont, :, NoFranja(i))=[j,
        CoeficientesDelAjuste(2)];
        % Guardamos la posicion del centro de la franja ajustada
        por la
        % curva gaussiana como parametro para la siguiente fila
        POS_F_temp(i) = CoeficientesDelAjuste(2);
        % Mostramos los datos de las franjas oscuras y la curva
        gaussiana
        % ajustada a esos datos
        figure (3)
        panel = 1 + mod (j, 4);
        set (gcf, 'color', [0.7          0.8          0.9] )
        subplot (2, 2 , panel)
        plot ( CurvaAjustada, X,Y), grid on
        legend ('off')
        title ( ['fila ', num2str(j) ] )
    end
    POS_FRANJAS=POS_F_temp;
end
  
```

Dentro del ciclo usamos el comando `double` en los datos de la imagen ya que proporciona suficiente precisión para la mayoría de las tareas computacionales. Ahora es necesario pasar por las franjas seleccionadas para poder realizar el ajuste a cada una de estas. Para ello se realiza un ciclo `for` dentro del ciclo que recorre las filas. Este nuevo ciclo toma el valor del centro de cada franja ingresado manualmente. Con esto define un límite inferior (`PixelLimiteA`) y uno superior (`PixelLimiteB`) para que la curva gaussiana sea ajustada. Los límites definidos son usados para crear dos vectores fila: `X` y `Y`. El vector `X` tiene como datos los píxeles que van desde el `PixelLimiteA` hasta `PixelLimiteB`. Mientras que el vector `Y` tiene los valores de intensidad de los píxeles que se encuentran en el vector `X`. Después definimos la ecuación de la curva gaussiana que vamos a ajustar junto con sus puntos iniciales mediante los comandos `GaussEqn` y `Startpoints1`. El ajuste se realiza usando el comando `fit`, en el cual debemos dar como parámetros de entrada los transpuestos de los vectores `X` y `Y`, la ecuación gaussiana `GaussEqn` y los puntos iniciales `StartPoints1`. Los coeficientes de la curva se almacenan en la variable de nombre `CurvaAjustada`. Estos datos son recuperados gracias al comando `coeffvalues`. Dentro de los coeficientes de la curva gaussiana encontramos los centros de las franjas oscuras correspondientes a los centros de las curvas. Los centros son guardados finalmente en la matriz `Coordenadas` junto a la fila en la cual fue realizado el ajuste. Esto último se hace para cada una de las franjas. El vector `POS_F_temp` guarda temporalmente las posiciones de las franjas para ser usados en la siguiente iteración del ciclo `for` como punto inicial del centro de la curva gaussiana.

Para observar que los ajustes de las curvas son realizados de manera correcta creamos una nueva figura. En esta, se muestran los puntos correspondientes a los valores de intensidad de las franjas oscuras y sus respectivas curvas ajustadas para cada fila, como se puede observar en la FIGURA 3.10.

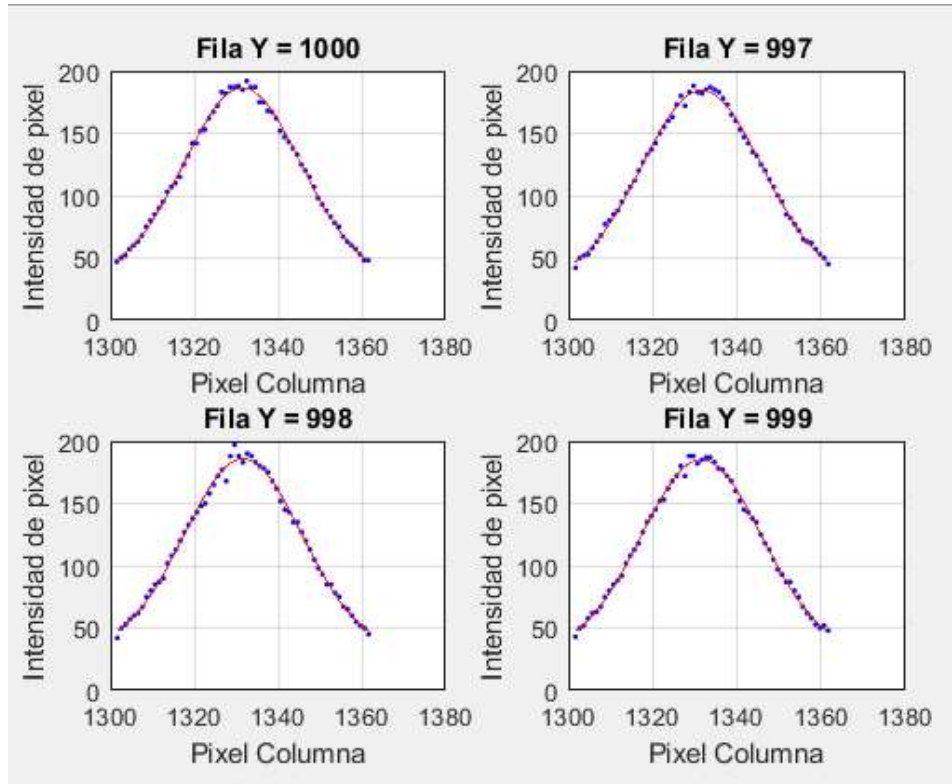


FIGURA 3.10. Curvas gaussianas ajustadas y valores de intensidad de las franjas oscuras del patrón de interferencia.

Una vez que se ha realizado el ajuste gaussiano a las franjas oscuras en cada una de las filas barridas, podemos realizar el cálculo del grosor de la película delgada. Para esto, debemos tomar las posiciones de los centros de las curvas gaussianas ajustadas para cada una de las franjas, en todas las filas barridas. Estos datos se encuentran almacenados en las tres matrices Coordenadas. Por lo que deben ordenarse los datos de cada franja.

```

%% CALCULO DEL GROSOR POR CURVAS GAUSSIANAS
% Guardamos los datos de las filas y las posiciones de los picos
Gaussianos
Franja1=Coordenadas(:, :, 1);
Franja2=Coordenadas(:, :, 2);
Franja3=Coordenadas(:, :, 3);

```

Después de ordenar los datos de cada franja, realizamos los cálculos necesarios para obtener la altura del escalón. Los cálculos se basan en la técnica de Microscopia de Contraste de Interferencia Total descrita en el Capítulo 2. Sin embargo, para realizar estos cálculos, primero debemos obtener la distancia que

hay entre las franjas 1 y 2 y también la distancia entre las franjas 2 y 3. Con estas distancias podemos encontrar el desplazamiento de la franja (D1) haciendo la diferencia entre las distancias D12 y D23.

```
% Calculamos las distancias entre franjas
D12 = Franja2(:,2) - Franja1(:,2);
D23 = Franja3(:,2) - Franja2(:,2);
% Calculamos el desplazamiento de la franja
D1 = abs( D23-D12 );
```

Ya que se ha obtenido el desplazamiento de la franja oscura debido a la altura del escalón, debemos aplicar la ecuación (2.2) mostrada en el Capítulo 2. Sin embargo, antes de aplicar esta ecuación, debemos tomar en cuenta si la franja desplazada se encuentra al lado Derecho o en el lado Izquierdo de las otras dos franjas. De no tomar en cuenta esto, los resultados serán erróneos.

```
% Calculamos el grosor de la muestra mediante los picos Gaussianos
clc
disp('Si la franja desplazada se encuentra el lado derecho ingrese
DER, si se encuentra en el lado izquierdo ingrese IZQ')
band = input ('','s');
if band == 'DER'
    Grosor_Ga (:)=(D1./D12)*(544.3/2); % Si el doblete está en el
lado Derecho
    %Grosor_Ga (:)=(D1./D12)*(544.3); %
else
    Grosor_Ga (:)=(D1./D23)*(544.3/2); % Si el doblete está en el
lado Izquierdo
    %Grosor_Ga (:)=(D1./D23)*(544.3);
end
% Calculamos el grosor promedio, su desviación estándar y el error
% porcentual
Grosor_Ga_prom = mean(Grosor_Ga);
S_Ga = std(Grosor_Ga);
E_Ga_porcentual = (S_Ga/Grosor_Ga_prom)*100;
```

La posición de la franja desplazada es ingresada manualmente. Esto para poder corroborar de qué lado se encuentra la franja, viendo cualquier imagen, ya sea la original o la de contraste mejorado. Una vez que se ha elegido la opción DER o IZQ, se procede a realizar el cálculo de la altura en cada una de las filas. Posteriormente se calcula el promedio de las alturas de cada fila, el error absoluto de las mediciones (desviación estándar) y el error porcentual, para obtener así una altura media del escalón y su error de medición.

# 3.6. Mejora mediante Mínimos Cuadrados

El cálculo de la altura del escalón realizado mediante curvas gaussianas sirve como un estimador de la altura de la muestra. Sin embargo, este puede presentar un error de medición alto, sobre todo si la muestra está sucia. Esta suciedad puede hacer que los centros de las curvas gaussianas estén desplazados del centro las franjas oscuras del patrón de micro-interferencia, como se puede apreciar en la FIGURA 3.11.

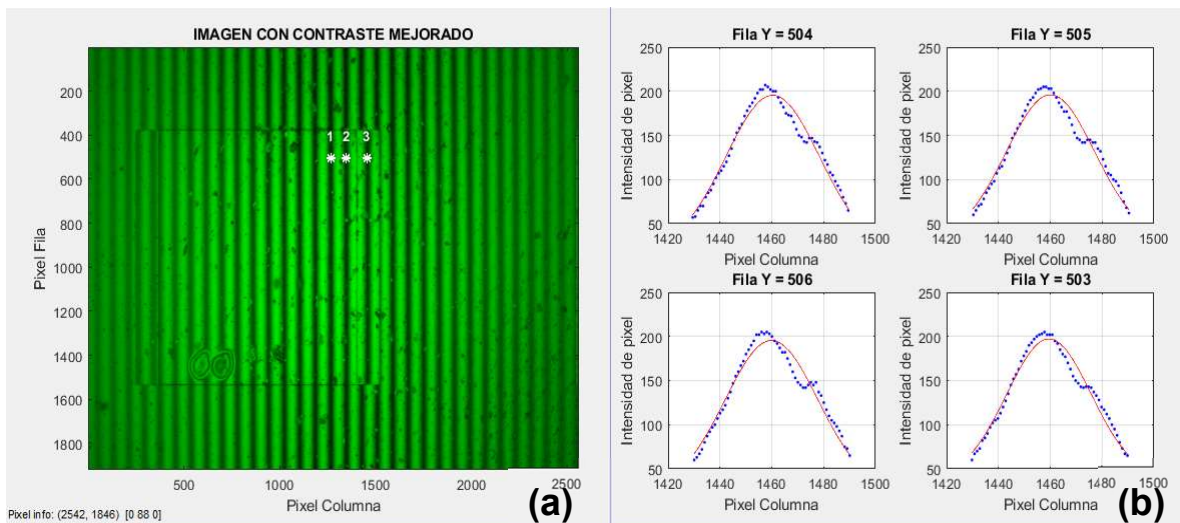


FIGURA 3.11. (a) Imagen con contraste mejorado de una película delgada con suciedad. (b) Curvas gaussianas ajustadas y valores de intensidad de las franjas oscuras del patrón de interferencia de la muestra con suciedad.

Debido a esto, realizamos un ajuste lineal por mínimos cuadrados para obtener así una línea recta de la forma  $y = mx + b$ , la cual siga de manera más precisa las franjas oscuras del patrón de micro-interferencia, pasando por el centro de las franjas. Para realizar el ajuste por mínimos cuadrados tomamos los datos de cada franja almacenados en las matrices Franja1, Franja2 y Franja3.

Para encontrar las rectas  $y = mx + b$  de cada una de las franjas debemos obtener los valores  $m$  y  $b$  mediante las ecuaciones (3.1) y (3.2).

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad (3.1)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - m \sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{y} - m\bar{x} \quad (3.2)$$

Las expresiones dentro de las ecuaciones (3.1) y (3.2) son calculadas una a la vez y usan los datos de las franjas. Los valores  $x_i$  son las filas recorridas en el ajuste gaussiano. Mientras que los valores  $y_i$  son los valores de los centros de las curvas gaussianas de cada fila recorrida.

```

%% AJUSTE LINEAL POR MINIMOS CUADRADOS
% Hacemos el ajuste lineal a cada una de las franjas

% Franja 1
S_xy_F1 = sum(Franja1(:,1).*Franja1(:,2));
S_x_F1 = sum(Franja1(:,1));
S_y_F1 = sum(Franja1(:,2));
S2_x_F1 = (S_x_F1)^2;
S_x_F1_2 = sum(Franja1(:,1).*Franja1(:,1));
m_F1 = (S_xy_F1 - ((S_x_F1*S_y_F1)/n))/(S_x_F1_2 - (S2_x_F1/n));
b_F1 = mean(Franja1(:,2)) - m_F1*mean(Franja1(:,1));

% Franja 2
S_xy_F2 = sum(Franja2(:,1).*Franja2(:,2));
S_x_F2 = sum(Franja2(:,1));
S_y_F2 = sum(Franja2(:,2));
S2_x_F2 = (S_x_F2)^2;
S_x_F2_2 = sum(Franja2(:,1).*Franja2(:,1));
m_F2 = (S_xy_F2 - ((S_x_F2*S_y_F2)/n))/(S_x_F2_2 - (S2_x_F2/n));
b_F2 = mean(Franja2(:,2)) - m_F2*mean(Franja2(:,1));

% Franja 3
S_xy_F3 = sum(Franja3(:,1).*Franja3(:,2));
S_x_F3 = sum(Franja3(:,1));
S_y_F3 = sum(Franja3(:,2));
S2_x_F3 = (S_x_F3)^2;
S_x_F3_2 = sum(Franja3(:,1).*Franja3(:,1));
m_F3 = (S_xy_F3 - ((S_x_F3*S_y_F3)/n))/(S_x_F3_2 - (S2_x_F3/n));
b_F3 = mean(Franja3(:,2)) - m_F3*mean(Franja3(:,1));
%% CALCULO DEL GROSOR POR AJUSTE LINEAL (MINIMOS CUADRADOS)
% Calculamos las posiciones de los centros de las franjas para
cada fila usando la recta (y = mx + b)
% obtenida por el ajuste lineal por mínimos cuadrados
intervalo=fila_i:fila_f;

```

```

Franja1_MC = m_F1.*(intervalo) + b_F1;
Franja2_MC = m_F2.*(intervalo) + b_F2;
Franja3_MC = m_F3.*(intervalo) + b_F3;

```

Después de obtener los coeficientes m y b de las rectas, correspondientes a cada franja, procedemos a calcular las posiciones de los centros mediante las rectas  $Franja\_MC = m\_F * (intervalo) + b\_F$ . El intervalo usado, son las coordenadas de las filas barridas. Una vez que se han obtenido los centros de las franjas, realizamos un proceso análogo al cálculo de las distancias entre franjas, hecho para los centros de las franjas obtenidos por las curvas gaussianas.

```

% Calculamos las distancias entre franjas (Mínimos Cuadrados)
D12_MC = Franja2_MC - Franja1_MC;
D23_MC = Franja3_MC - Franja2_MC;
% Calculamos el desplazamiento de la franja (Mínimos Cuadrados)
D1_MC = abs( D23_MC-D12_MC );

```

De igual manera que con las curvas gaussianas, después de calcular las distancias D12\_MC, D23\_MC y el corrimiento de la franja D1\_MC, aplicamos la ecuación (2.2) para poder determinar la altura del escalón Grosor\_MC en cada una de las filas recorridas. Posteriormente se hace el promedio de las alturas para así obtener la altura relativo a toda la muestra Grosor\_MC\_prom y su correspondiente error de medición S\_MC.

```

% Calculamos el grosor de la muestra (Mínimos Cuadrados)
if band == 'DER'
    Grosor_MC(:)=(D1_MC./D12_MC)*(544.3/2); % Si el doblete está
en el lado Derecho
    %Grosor_MC(:)=(D1_MC./D12_MC)*(544.3);
else
    Grosor_MC(:)=(D1_MC./D23_MC)*(544.3/2); % Si el doblete está
en el lado Izquierdo
    %Grosor_MC(:)=(D1_MC./D23_MC)*(544.3);
end
% Calculamos el grosor promedio, su desviación estándar y el error
% porcentual
Grosor_MC_prom = mean(Grosor_MC)
S_MC = std(Grosor_MC)
E_MC_porcentual = (S_MC/Grosor_MC_prom)*100

```

```

Command Window
Si la franja desplazada se encuentra el lado derecho ingrese DER, si se encuentra en el lado izquierdo ingrese IZQ
DER

Grosor_MC_prom =

    103.8518

S_MC =

    0.6732

E_MC_porcentual =

    0.6483

fx >> |

```

FIGURA 3.12. Pantalla de salida con los grosores obtenidos por el Método Computacional desarrollado.

Finalmente podemos observar en pantalla los resultados obtenidos por el Método Computacional desarrollado (FIGURA 3.12). Adicionalmente, se grafican los centros obtenidos por las curvas gaussianas y la recta obtenida por el ajuste de mínimos cuadrados para cada una de las franjas (FIGURA 3.13.(a)) mediante el comando subplot(m,n,p), el cual divide la figura actual en una cuadrícula de m por n y crea ejes en la posición especificada por p . También se grafican los centros de las franjas, obtenidos por el ajuste de mínimos cuadrados, sobre el interferograma del escalón analizado, es decir, sobre la imagen con contraste mejorado (FIGURA 3.13.(b)).

```

figure(4)
subplot(3,1,1),hold on
grid on, grid minor
plot(Franja1(:,1)',Franja1(:,2)','.y','MarkerSize',12)
legend('Franja1')
plot(xp,Franja1_MC,'r-','LineWidth',1.5,'DisplayName','Recta y1 =
m1 x + b1')

subplot(3,1,2),hold on
grid on, grid minor
plot(Franja2(:,1)',Franja2(:,2)','.g','MarkerSize',12)
legend('Franja2')
plot(xp,Franja2_MC,'r-','LineWidth',1.5,'DisplayName','Recta y2 =
m2 x + b2')

subplot(3,1,3),hold on
grid on, grid minor
plot(Franja3(:,1)',Franja3(:,2)','.b','MarkerSize',12)
legend('Franja3')

```

```

plot(xp,Franja3_MC,'r-','LineWidth',1.5,'DisplayName','Recta y3 =
m3 x + b3')
figure (2), hold on
plot (Franja1_MC, intervalo, 'r.')
plot (Franja2_MC, intervalo, 'r.')
plot (Franja3_MC, intervalo, 'r.')

```

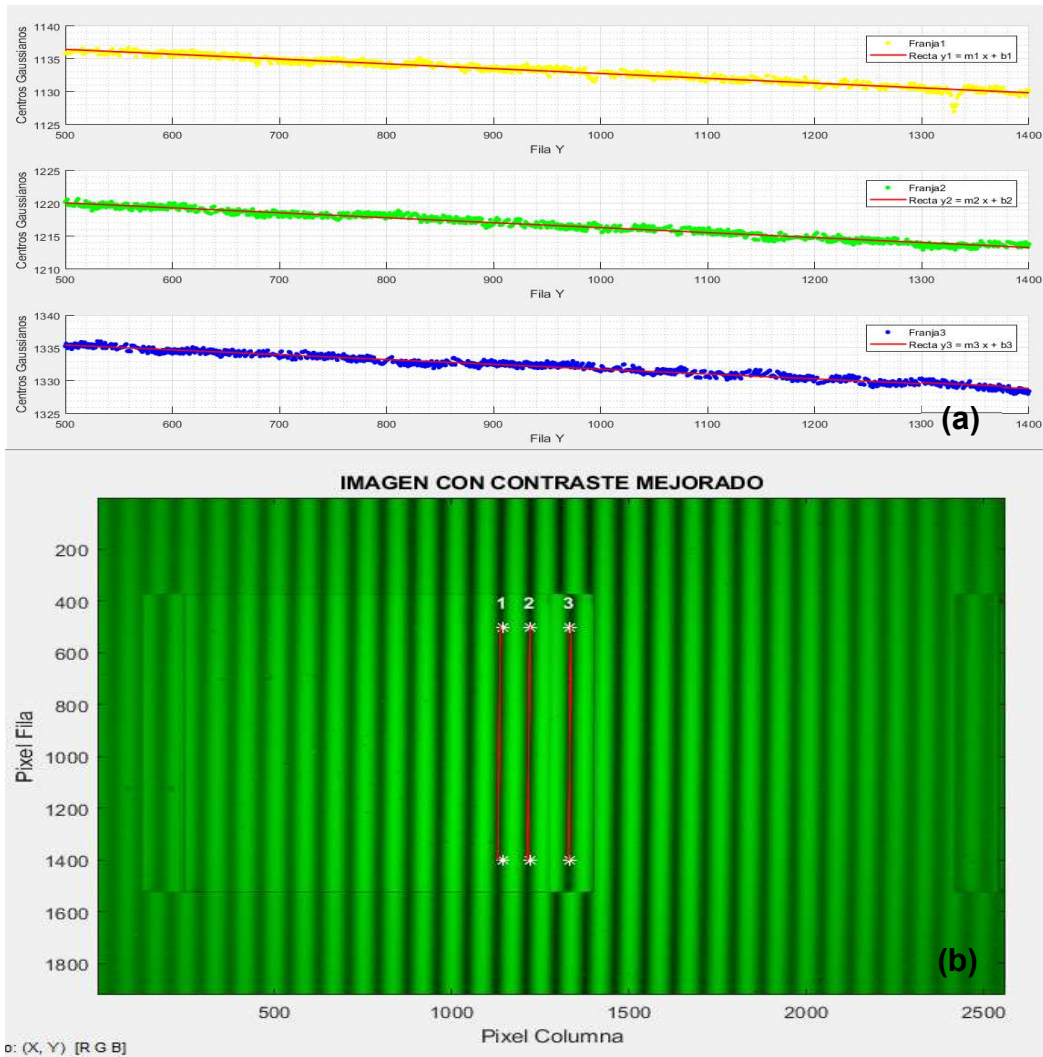


FIGURA 3.13. (a) Centros de las franjas encontrados por las curvas gaussianas y rectas ajustadas por mínimos cuadrados. (b) Centros de las franjas encontrados por mínimos cuadrados, sobrepuestos en el interferograma de la película delgada.

El Método Computacional desarrollado en este capítulo se utilizó para determinar la altura de cuatro escalones de la matriz presentada en el Capítulo 2. Los resultados obtenidos de los escalones se muestran en el Capítulo 5.

# Capítulo 4

## Parámetros

## Experimentales

En este capítulo se describen los parámetros del equipo utilizado para la obtención de los patrones de interferencia. Se presentan los procesos de optimización de cada uno de estos parámetros con la finalidad de obtener las mejores imágenes posibles.

### 4.1. Introducción

El propósito de esta tesis es determinar los grosores de una película delgada a partir de imágenes con patrones de micro-interferencia. Las imágenes, por lo tanto, deben de obtenerse con la mayor calidad posible. A continuación, se definen los criterios de calidad para lograr esta meta. Se indican también los ajustes que pueden realizarse en el microscopio.

Los parámetros estudiados fueron: *la resolución de la fotografía tomada por la cámara del microscopio, los objetivos del microscopio, el ángulo de inclinación de las franjas de interferencia, y los niveles de iluminación.*

Para cada uno de estos parámetros experimentales, se obtuvieron imágenes de patrones de interferencia variando el valor de cada uno de ellos. Con estos resultados se logró correlacionar el valor de los parámetros y la calidad de la imagen obtenida. Se utilizaron histogramas como criterio de calidad.

Este proceso de optimización permitirá determinar los parámetros adecuados para la obtención de imágenes de patrones de micro-interferencia con la mayor calidad posible.

## 4.2. Objetivos de Microscopio

El objetivo es el componente óptico más importante en un microscopio. Este es también el de mayor dificultad de diseño, ya que está compuesto por un sistema de lentes muy complejo. Estos, permiten a los microscopios proporcionar imágenes reales magnificadas, concentrando los haces de luz procedentes de las muestras, formando así una imagen intermedia que posteriormente se magnifica por los oculares [Davidson 2002]. El objetivo de microscopio por su proximidad, es el componente más cercano a la muestra para la formación de imágenes.



*FIGURA 4.1. Esquema de un objetivo de microscopio. En el interior se ve un sistema de lentes centrados al eje óptico (línea roja). En el exterior se aprecia el tubo que protege al sistema de lentes y las especificaciones del objetivo.*

Los objetivos más sencillos que se pueden encontrar están conformados de una sola lente de aumento con una distancia focal muy corta, pero de gran potencia. Esto exige que el objetivo sea colocado muy próximo al espécimen de interés, para

que la luz sea enfocada dentro del tubo del objetivo. Los objetivos más complejos y caros están constituidos de una serie de lentes. Estos sistemas de lentes ayudan en gran medida a mejorar la calidad de la imagen obtenida, eliminando una serie de aberraciones que la afectaría [Davidson 2002].

El sistema de lentes, por sencillo que sea, se dispone dentro de un tubo de soporte o camiseta de metal, de modo que las lentes estén centradas y los ejes ópticos coincidan exactamente con eje óptico del sistema (FIGURA 4.1). Las propiedades individuales de los objetivos se identifican en el grabado al exterior del tubo de soporte [Zeiss 2007]. Este grabado contiene las especificaciones



*FIGURA 4.2. Objetivo de microscopio de la marca Carl Zeiss usado en el laboratorio para obtener las imágenes del patrón de micro interferencia. En él se observan las propiedades de dicho objetivo.*

necesarias para su uso correcto (FIGURA 4.2). Para encontrar la imagen más apropiada, que nos ayude a determinar la altura de los escalones, se usaron cuatro

objetivos de microscopio con las mismas propiedades, descritas en el Capítulo 2, exceptuando la magnificación de la imagen.

### 4.2.1. Comparación de Amplificaciones

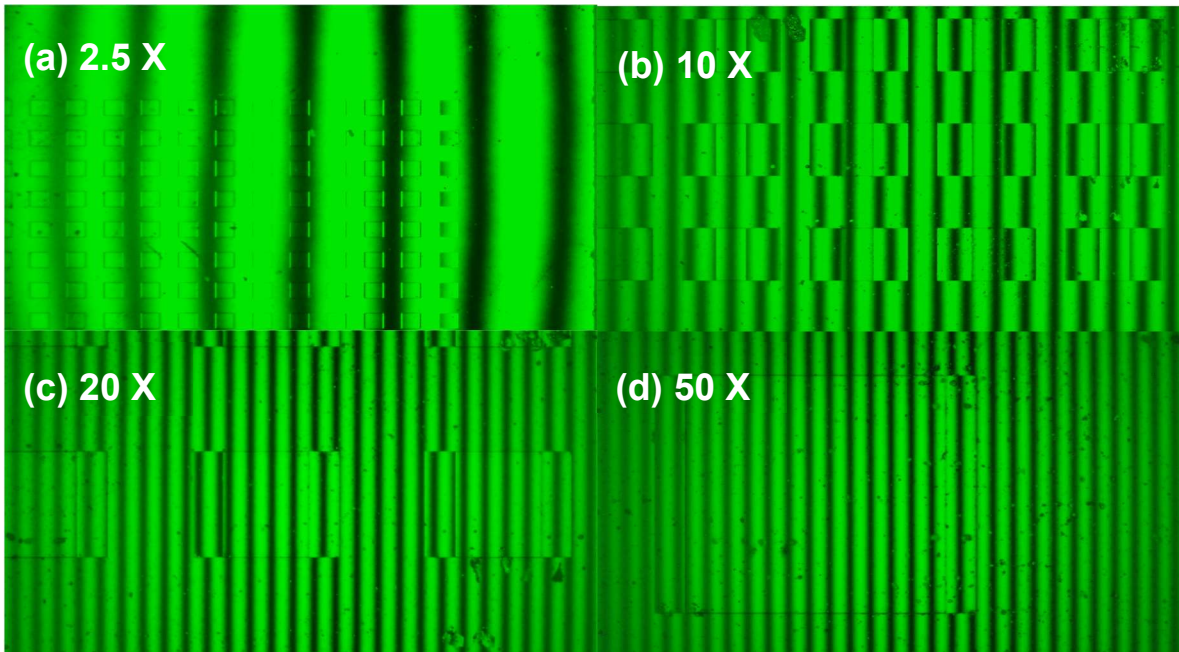


FIGURA 4.3. Imagen capturada haciendo uso de los distintos objetivos de microscopio. (a) Objetivo de 2.5X, (b) Objetivo de 10X, (c) Objetivo de 20X, (d) Objetivo de 50X.

La FIGURA 4.3 muestra las imágenes que se generan con los distintos objetivos de microscopio. Se puede observar que con una magnificación de 2.5X (FIGURA 4.3.(a)), al generar el patrón de micro-interferencia las franjas del patrón son muy gruesas, sufriendo una leve curvatura. Por otro lado, el corrimiento de la franja debido a la altura del escalón no es visible. Con el objetivo con magnificación 10X, se obtiene una imagen en la cual es posible apreciar el corrimiento de franjas debido a la altura de los escalones (FIGURA 4.3.(b)). La distancia que hay entre franjas es más pequeña que con el objetivo de 2.5X, sin embargo, no permite hacer las mediciones de manera adecuada sobre una misma fila ya que la distancia entre escalones es “muy corta”. Esto es importante ya que en el Método Computacional las mediciones se realizan haciendo barridos sobre filas. Usando el objetivo con magnificación 20X, tenemos una mejor definición del patrón de micro-interferencia

(FIGURA 4.3.(c)). Además, debido al aumento, la distancia entre los escalones es mayor, lo que permite tener al menos tres franjas necesarias para obtener la altura del escalón. También, debido al aumento usado, es posible observar con más detalle la muestra. Con el objetivo de magnificación 50X (FIGURA 4.3.(d)) logramos observar un único escalón de la matriz de escalones. También se puede observar franjas de interferencia bien definidas. Esto nos brinda un mayor número de píxeles para cada escalón, lo cual nos da mayor precisión al momento de hacer las mediciones con el algoritmo computacional desarrollado para este trabajo de tesis.

## **4.3. Ángulo de inclinación de las franjas**

Un parámetro importante que debemos tomar en cuenta para poder determinar la altura de los escalones es el ángulo de inclinación de las franjas de micro-interferencia. Este parámetro afecta la posición de la imagen gemela generada por la técnica de Microscopía de Contraste de Interferencia Total (TIC), como se puede apreciar en la FIGURA 4.4. Este cambio en la posición de la imagen gemela hace que la región de análisis cambie, dando mayor o menor información del escalón a analizar de acuerdo al número de píxeles que se tiene sobre una franja de interferencia [Danz 2004]. Gracias al equipo usado, descrito en el Capítulo 2, podemos cambiar el ángulo de las franjas de interferencia, permitiéndonos elegir la más adecuada.

### 4.3.1. Comparación de Ángulos

Usando un ángulo aproximado de  $30^\circ$  respecto a la horizontal, podemos observar que la imagen gemela se encuentra orientada más verticalmente (hacia arriba o abajo) que lateralmente (ver FIGURA 4.4.(a)). También se observa el corrimiento de las franjas en las orillas de las imágenes superpuestas. Sin embargo, debido a la inclinación de las franjas la región de análisis se ve reducido en gran medida. Dicho de otra forma, el corrimiento de las franjas está limitado en una zona específica del escalón y por tanto las franjas oscuras desplazadas tienen menor número de píxeles para muestreo, además no recorren lateralmente a la muestra en su totalidad. Esto haría que la altura medida con el código computacional sea menos precisa ya que no se tendría información de toda la muestra. Usando un ángulo de inclinación de  $45^\circ$  podemos observar que la imagen gemela se encuentra

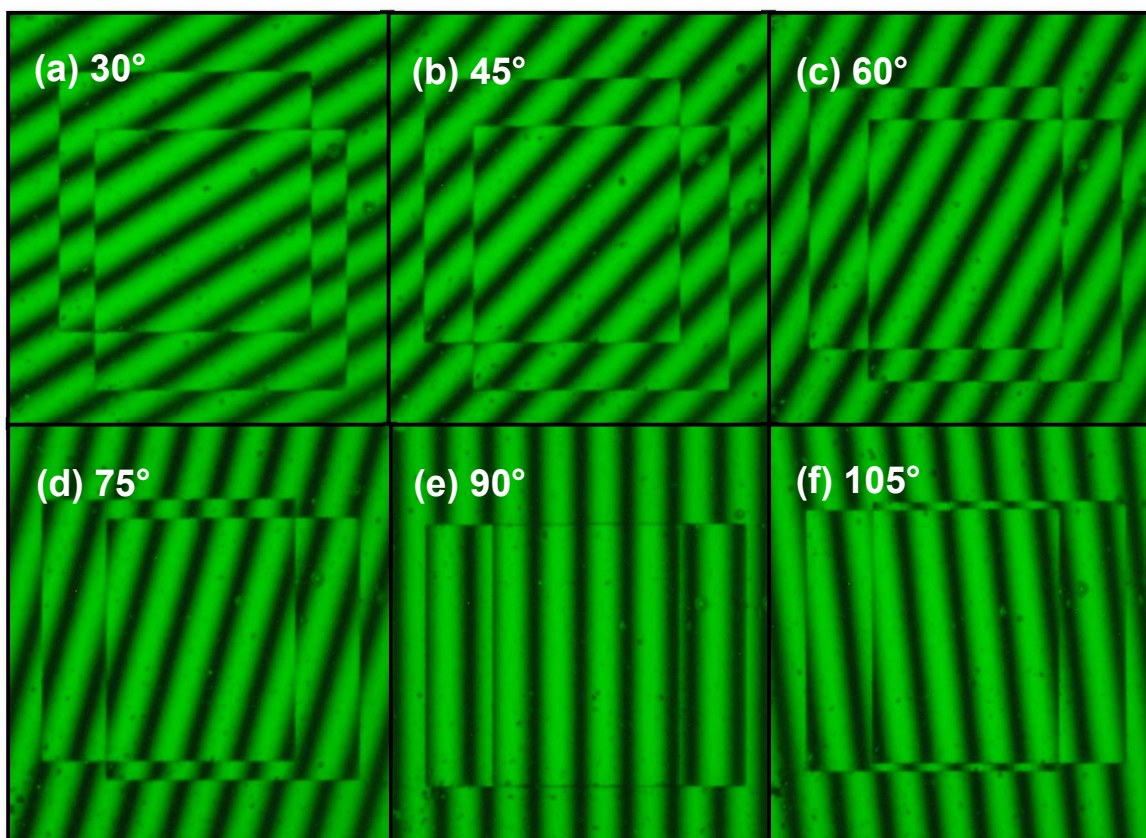
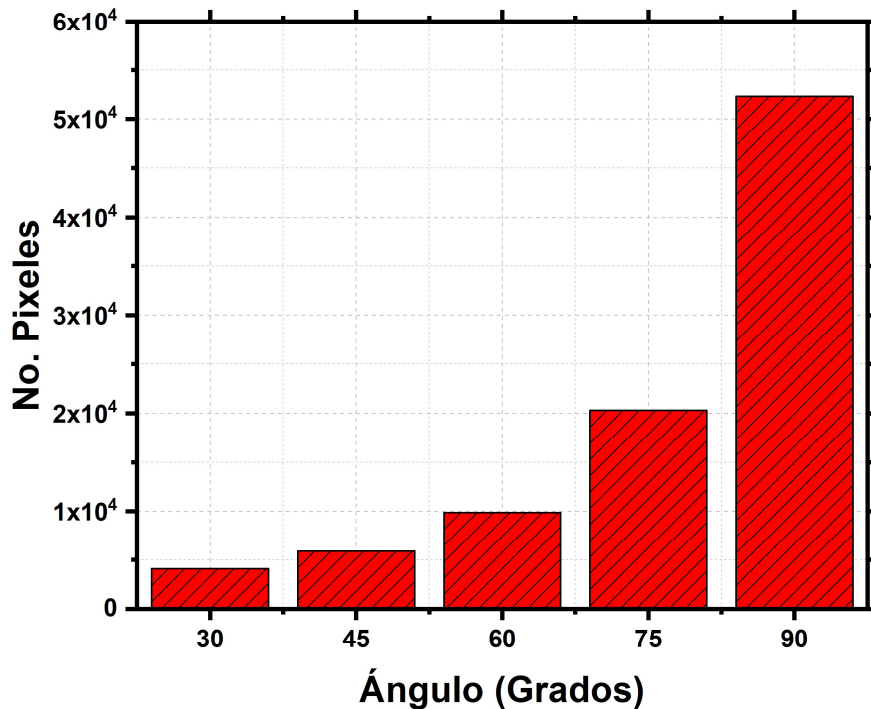


FIGURA 4.4. Cambio en la posición de la imagen gemela al cambiar la inclinación de las franjas de interferencia. (a) Ángulo de  $30^\circ$ . (b) Ángulo de  $45^\circ$ . (c) Ángulo de  $60^\circ$ . (d) Ángulo de  $75^\circ$ . (e) Ángulo de  $90^\circ$ . (f) Ángulo de  $105^\circ$ .

igualmente distribuida, tanto vertical como lateralmente (FIGURA 4.4.(b)). Sin embargo, el corrimiento de franjas sigue permaneciendo en una región pequeña para el análisis. Esto quiere decir que la longitud de las franjas desfazadas sigue siendo pequeña. Por lo que las mediciones seguirán teniendo baja precisión. Al utilizar un ángulo de  $60^\circ$ , podemos observar que la imagen gemela tiene una orientación mayormente lateral que vertical (FIGURA 4.4.(c)). También es posible ver que el corrimiento de franjas ocupa una mayor región. Además, se puede apreciar un aumento en la longitud de las franjas desplazadas. Esto último nos brinda mayor información de la muestra, haciendo un poco más precisas las mediciones. Sin embargo, el escalón sigue sin ser cubierta en su totalidad por las franjas desplazadas. Para el ángulo de inclinación de  $75^\circ$ , la imagen gemela se encuentra orientada casi por completo de manera lateral (ver FIGURA 4.4.(d)). Es decir que en la región superior de la muestra tenemos una menor parte de la imagen gemela. Además, es claramente apreciable el aumento en la longitud de las franjas desplazada, lo que hace posible analizar una mayor parte de la muestra. Teniendo así mayor precisión en el cálculo de la altura del escalón.

En el caso del ángulo de inclinación a  $90^\circ$  (FIGURA 4.4.(e)), la imagen gemela está totalmente orientada de manera lateral. Es decir que se encuentra sobrepuesta al lado derecho o izquierdo de la muestra. También, se puede ver únicamente el corrimiento de dos franjas de interferencia, una en el doblete izquierdo y otra en el doblete derecho. Estas franjas desplazadas, abarcan en su totalidad la longitud del escalón, lo cual es óptimo para hacer la medición de la altura de dicho escalón. Esto nos permite tener una mayor precisión en la medición debido a que tenemos mayor cantidad de píxeles para muestrear, esto se ve más claro en el histograma mostrado en la FIGURA 4.5.



*FIGURA 4.5. Número de pixeles para muestreo en una franja de interferencia desplazada respecto al ángulo de inclinación en el que se encuentra.*

Como se ha podido observar en las imágenes obtenidas para los diferentes ángulos de inclinación de las franjas de micro-interferencia, al ir aumentando el ángulo respecto a la horizontal, la imagen gemela se coloca cada vez más de manera lateral. Al llegar a los 90°, la imagen se acopla ya sea en el lado derecho o izquierdo de la muestra y la franja de interferencia desplazada recorre por completo la longitud del escalón, es decir, hay un mayor número de pixeles en la imagen sobre las franjas oscuras. Si sobrepasáramos el ángulo de 90°, se obtendrían imágenes similares a las obtenidas para los ángulos de 75, 60, 45 y 30, con la diferencia en el sentido que van las franjas. Por esta razón, lo más conveniente para realizar las mediciones de la altura del escalón, es capturar las imágenes con las franjas a 90° desde la horizontal.

## 4.4. Intensidad de luz

Otro de los parámetros importantes que se deben tener en cuenta para poder realizar las mediciones de la altura de los escalones usando la técnica de microscopía TIC, es la intensidad de luz con la que estamos iluminando la muestra. Este factor es de suma importancia, ya que, la cantidad de información útil para el análisis puede variar dependiendo del grado de iluminación aplicada. De manera más específica, la cantidad de luz que apliquemos sobre el escalón ayudara a mejorar la formación de franjas de interferencia. Si el nivel de intensidad es demasiado bajo, habrá una saturación en las franjas oscuras. Dicho de otra manera, las zonas brillantes serán poco visibles y la imagen estará demasiado oscura de

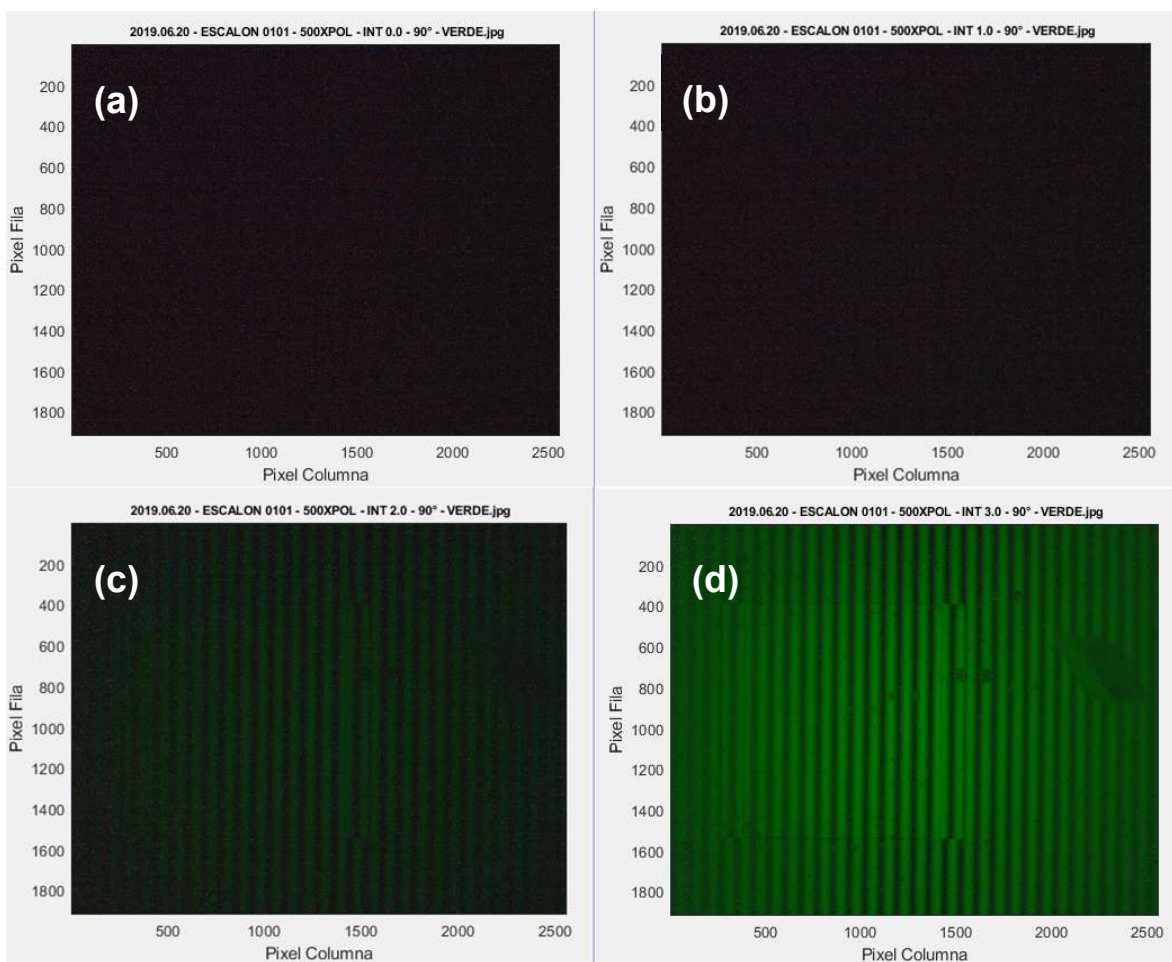


FIGURA 4.6. Imagen del escalón 0101 con niveles de brillo (a) 0.0, (b) 1.0, (c) 2.0 y (d) 3.0.

manera general [Mejia 2005, Cap. 5]. Por otro lado, si el nivel de luz aplicado es muy alto, las franjas oscuras podrían dejar de observarse, debido a que el brillo será demasiado intenso. Además, el sensor de la cámara utilizada para capturar las imágenes podría dañarse por el excesivo nivel de iluminación.

Como se describió en el Capítulo 2, el microscopio utilizado permite un rango de intensidad de iluminación que va desde cero hasta diez. Gracias a esto, tomamos imágenes del patrón de micro-interferencia para los diferentes niveles de luz (ver FIGURA 4.6 y FIGURA 4.7) y así poder determinar cuál de estos es el más apropiado para el análisis de la altura de los escalones.

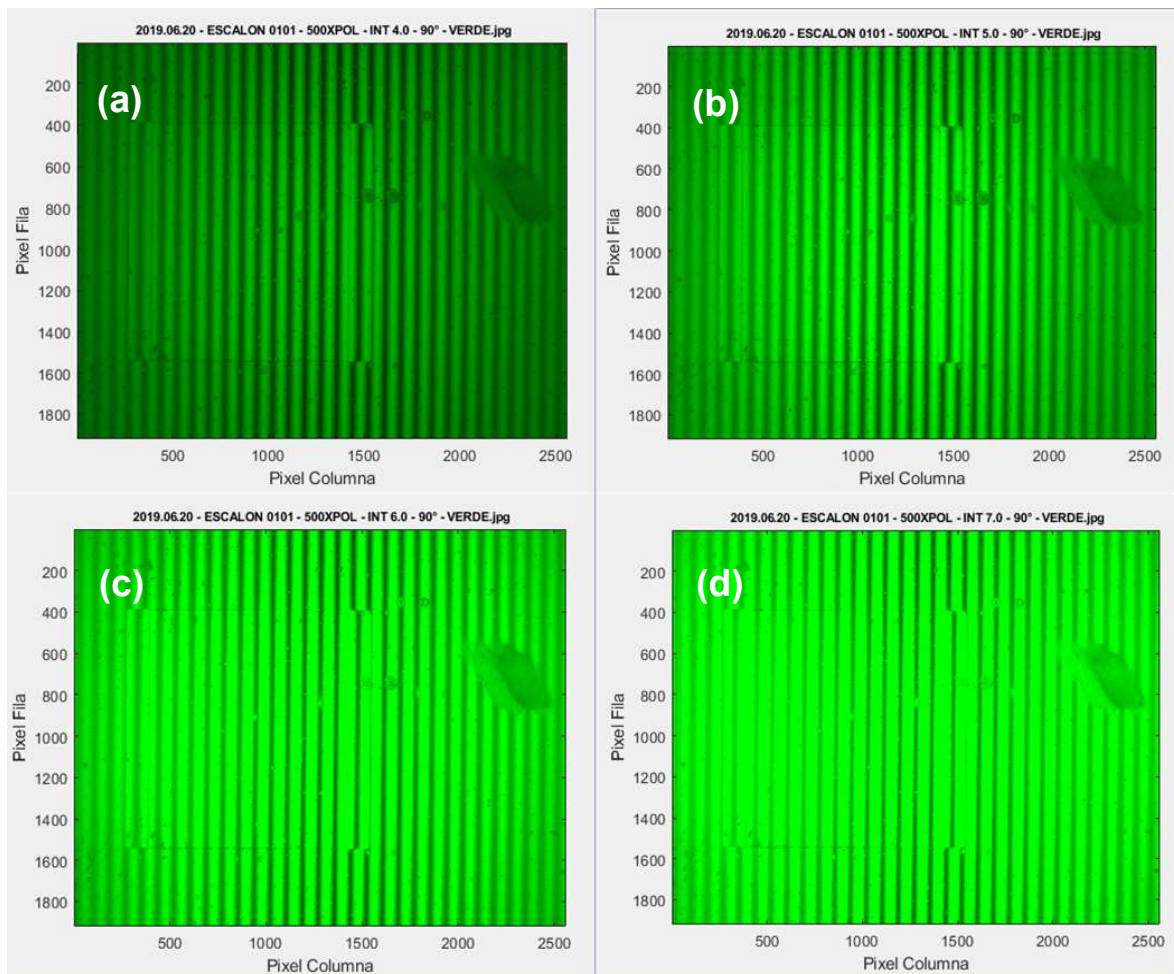


FIGURA 4.7. Imagen del escalón 0101 con nivel de iluminación (a) 4.0, (b) 5.0, (c) 6.0 y (d) 7.0.

Para poder determinar el nivel de intensidad apropiado, nos ayudamos observando el histograma de valores para las imágenes tomadas con diferentes niveles de iluminación. En este histograma se representa la distribución del nivel de brillo de cada pixel [Mejia 2005, Cap. 5]. Con esto nos aseguraremos que los valores de los pixeles se encuentren centrados entre los valores límites permitidos (0,255), para que así la imagen no esté muy oscura o tenga demasiado brillo.

#### **4.4.1. Comparación de niveles de iluminación**

Aunque pudiese parecer innecesario capturar la imagen de la muestra sin iluminación (FIGURA 4.6.(a)). Esta imagen y su respectivo histograma de valores (FIGURA 4.8.(a)) sirven como referencia para descartar las imágenes con bajo nivel de iluminación. Si el histograma de las imágenes con iluminación se encuentra en el mismo rango o muy cercano al de la imagen completamente oscura, entonces se descarta.

En el histograma de la imagen con iluminación 0.0 los valores de los pixeles se encuentran distribuidos entre 0 y 50. Así, tomamos como parámetro que los niveles de intensidad se encuentren distribuidos por encima de un valor de 50. Sin embargo, ya que la imagen cuenta con zonas oscuras, debido al patrón de interferencia, habrá pocos pixeles que tengan un valor de intensidad por debajo de este parámetro establecido. Al aplicar iluminación sobre la muestra con un nivel de intensidad de 1.0, la imagen obtenida (FIGURA 4.6.(b)) es aún muy oscura. Tanto que no se puede apreciar ni el patrón de micro-interferencia, ni el escalón. Observando su histograma de niveles de intensidad (FIGURA 4.8.(b)), podemos ver que tiene una distribución muy similar al del histograma obtenido con iluminación 0.0. Los valores de los pixeles siguen permaneciendo entre 0 y 50. Evidentemente, este nivel de iluminación queda descartado para poder realizar cualquier clase de medición. En la imagen obtenida aplicando un nivel de intensidad de 2.0, es posible apreciar mínimamente el patrón de micro-interferencia. En esta, las franjas brillantes reflejan el bajo nivel de iluminación aplicado (FIGURA 4.6.(c)). Los pixeles que representan estas franjas apenas sobrepasan el valor de 50 como podemos

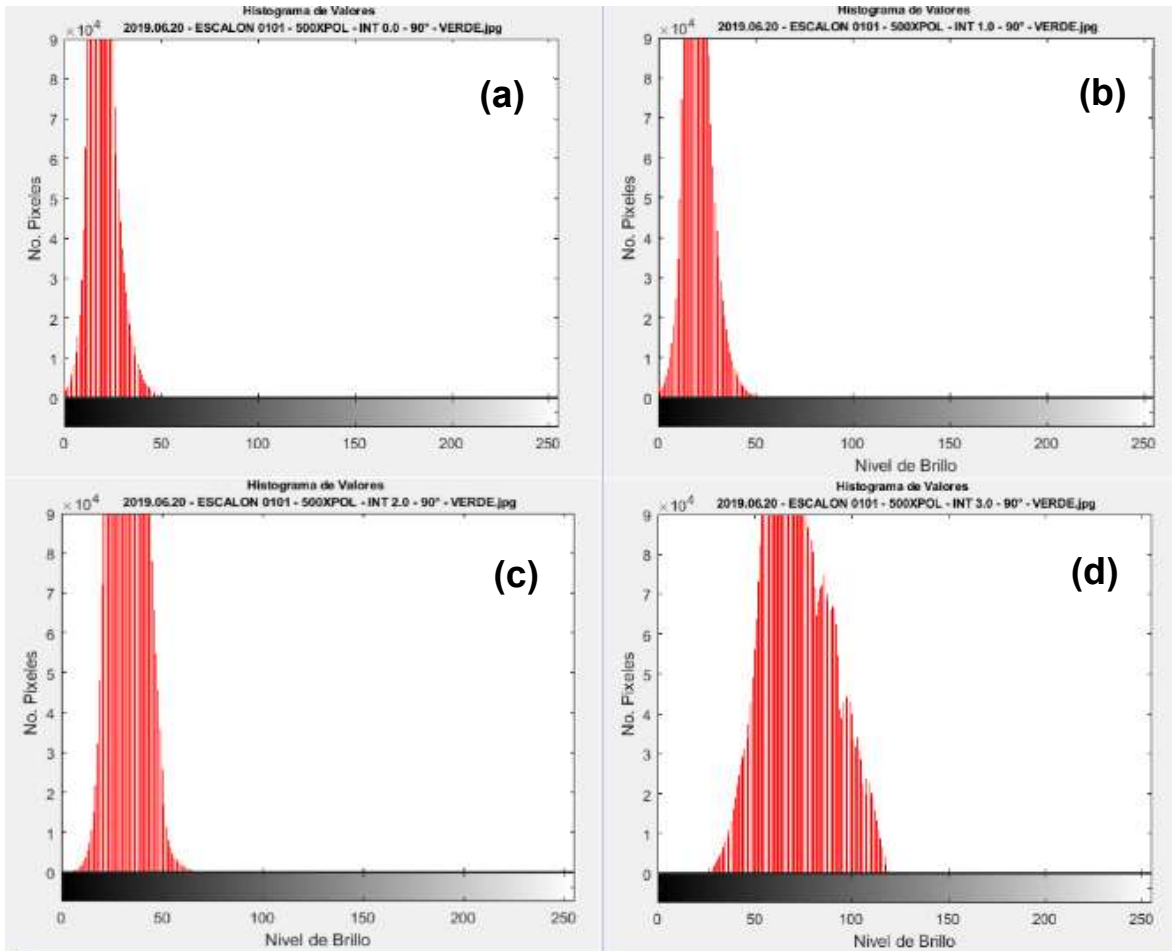


FIGURA 4.8. Histogramas de distribución de brillo de píxeles para los niveles de iluminación (a) 0.0, (b) 1.0, (c) 2.0 y (d) 3.0.

observar en el histograma de distribución de valores (FIGURA 4.8.(c)). Así, la imagen sigue siendo muy oscura, por lo que el análisis de la altura del escalón será poco confiable (muy poco preciso). Con un nivel de intensidad de 3.0 aplicada sobre la muestra, podemos observar con mayor claridad el patrón de micro-interferencia, además es posible observar el escalón y su imagen gemela (FIGURA 4.6.(d)). También, es posible observar más detalles en la imagen, como manchas de suciedad o imperfecciones en la muestra. Observando el histograma de la imagen (FIGURA 4.8.(d)), la distribución de los valores de intensidad muestra un mayor número de píxeles que sobrepasan el valor límite inferior establecido anteriormente.

La FIGURA 4.7.(a) muestra la imagen obtenida al iluminar un escalón con una intensidad de 4.0. En esta, podemos ver claramente las franjas de micro-

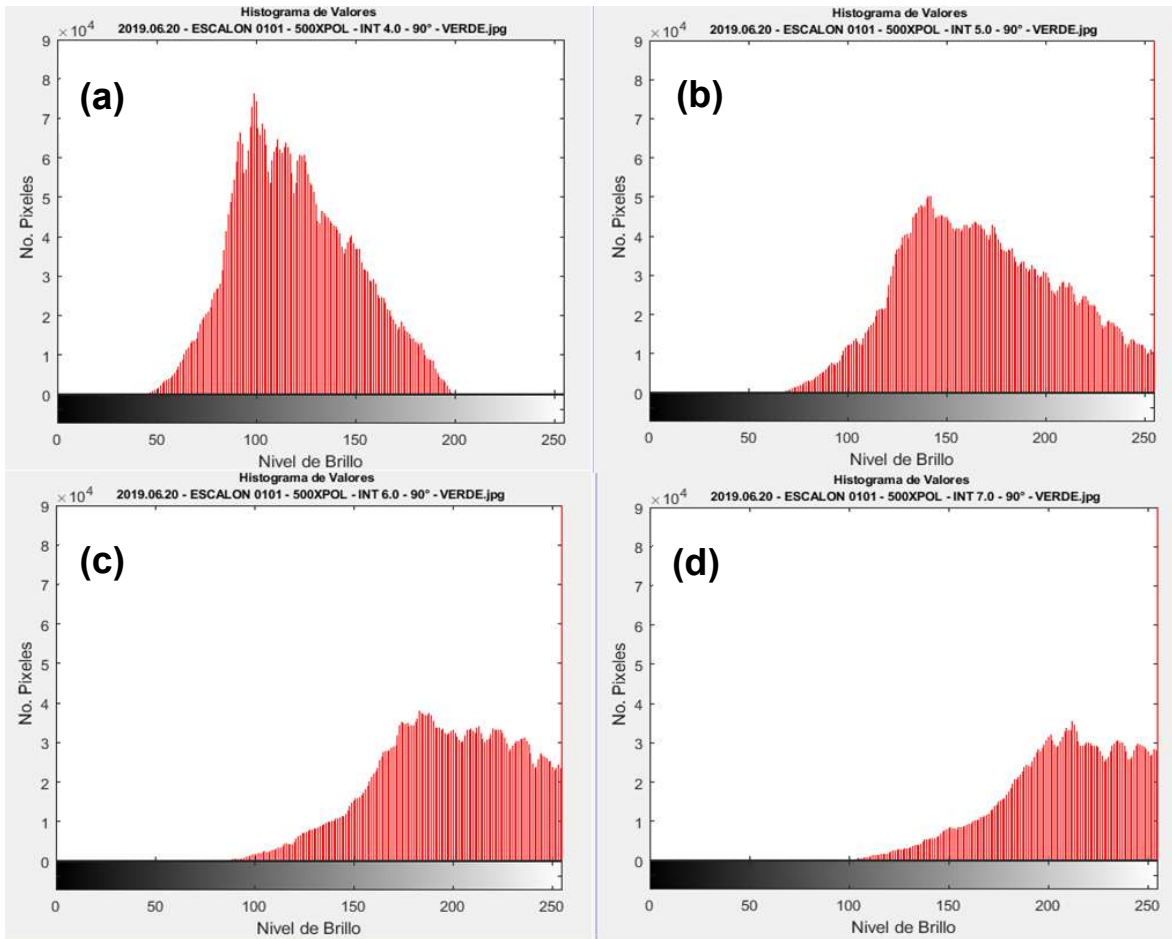


FIGURA 4.9. Histogramas de distribución de brillo de píxeles para los niveles de iluminación (a) 4.0, (b) 5.0, (c) 6.0 y (d) 7.0.

interferencia, así como la frontera de muestra y su imagen gemela. Con este nivel de iluminación, podemos diferenciar mejor las zonas sucias de la muestra. En su histograma (FIGURA 4.9.(a)) podemos apreciar como la distribución de valores se encuentra centrada entre los niveles de brillo 50 y 200. Lo cual da pauta para poder realizar el análisis de la altura del escalón. Aplicando una iluminación con intensidad de 5.0, podemos observar en la imagen obtenida (FIGURA 4.7.(b)), como las franjas brillantes del patrón de micro-interferencia empiezan a saturarse. Es decir, varios de los píxeles en la imagen han alcanzado el valor de intensidad más alto (255), para hacer esto más evidente el color del histograma ha sido modificado. También, en el histograma podemos ver que, para las zonas oscuras, los píxeles tienen asignado un valor por arriba de 60 (FIGURA 4.9.(b)). Lo que nos dice que las franjas

oscuras del patrón de interferencia están siendo opacadas por el brillo presente en la imagen. Para el nivel de iluminación con intensidad de 6.0, podemos ver que el brillo en la imagen es tan alto, que la frontera del escalón empieza a no ser visible (FIGURA 4.7.(c)). También podemos observar cómo las franjas oscuras están cada vez más atenuadas por las franjas brillantes. Por su parte, el histograma nos muestra como se ha saturado la imagen debido al nivel tan alto de iluminación para la mayoría de los píxeles de la imagen, mientras que los píxeles que representan las franjas oscuras tienen valores por arriba de 100 (FIGURA 4.9.(c)). La imagen obtenida usando un nivel de iluminación de 7.0 (FIGURA 4.7.(d)) es muy similar a la que se obtiene al iluminar la muestra con intensidad 6.0. El brillo presente es muy alto, haciendo que algunas franjas oscuras del patrón de interferencia sean apenas perceptibles. Por su parte, el histograma de valores nos muestra una distribución en la cual los píxeles correspondientes a una buena parte de las franjas oscuras, han superado un valor de 150 (FIGURA 4.9.(d)).

De acuerdo con las imágenes obtenidas para los diferentes niveles de intensidad de luz aplicada a la muestra con película delgada en forma de escalón. Y retomando el parámetro establecido para imágenes sin iluminación. La imagen cuyo histograma de valores obtuvo la mejor distribución de brillo, según nuestro interés, es la imagen obtenida aplicando el nivel de intensidad 4.0 (FIGURA 4.7.(a)). La distribución de niveles de brillo de esta imagen se encuentra centrada entre los valores 50 y 200. Lo que nos permite observar de manera clara las franjas brillantes y oscuras del patrón de interferencia sin saturar la imagen de brillo o haciéndola demasiado oscura. Además, nos permite ver claramente el escalón y su imagen gemela. Así como detalles extras en la muestra.

## **4.5. Resolución de la cámara**

La resolución de una imagen nos indica los detalles que pueden observarse en esta. Así, tener mayor resolución se traduce en obtener una imagen con más detalle o calidad visual. Las imágenes digitales son almacenadas como mapa de

bits, el cual describe el tamaño de la imagen con dos números enteros [Mejia 2005, Cap. 2]. El primer número es la cantidad de columnas de pixeles (ancho de la imagen) y el segundo es la cantidad de filas de pixeles (alto de la imagen). Estos dos números multiplicados nos dan el total de pixeles que tenemos en la imagen, lo cual es de suma importancia a la hora de analizar la imagen.

El tamaño en pixeles de una imagen digital está limitado por la capacidad del dispositivo de captura. Por ejemplo, si empleamos una cámara de un teléfono celular con un sensor de 8 megapíxeles (8 Mpx) podremos capturar imágenes con un máximo de ocho millones de pixeles (8,000,000 pixeles). Sin embargo, esto no nos dice el tamaño exacto de las fotografías. La resolución de una imagen digital es la relación entre el tamaño de pixeles de la imagen y sus dimensiones físicas. Esta se manifiesta mediante un dispositivo de salida como una pantalla o una impresora. Así, una mayor resolución implica una mayor cantidad de pixeles por unidad de longitud, lo que se expresa en un nivel de detalle mayor en la imagen. Tomando en cuenta lo anterior descrito, y haciendo uso de la cámara AxioCam ERc 5s de la compañía Carl Zeiss, obtuvimos las imágenes que posteriormente analizamos. Esta cámara nos ofrece la posibilidad de obtener 4 diferentes tamaños de imagen [Zeiss 2015] cuya máxima capacidad es de 2560 columnas de pixeles por 1920 filas de pixeles ( $2560 \times 1920 = 5 \text{ Mpx}$ ), como se puede apreciar en la siguiente lista.

1. 1280x720 pixeles (0.9 Mpx)
2. 1920x1080 pixeles (2.0 Mpx)
3. 2560x1440 pixeles (3.7 Mpx)
4. 2560x1920 pixeles (5 Mpx), máxima capacidad del sensor.

En la FIGURA 4.10 se presenta el menú de opciones de la cámara, haciendo uso de estos modos de captura, se tomaron imágenes del patrón de interferencia sobre la muestra. Esto con el fin de comparar diferencias entre las imágenes capturadas y con ello elegir la más adecuada para el objetivo deseado.

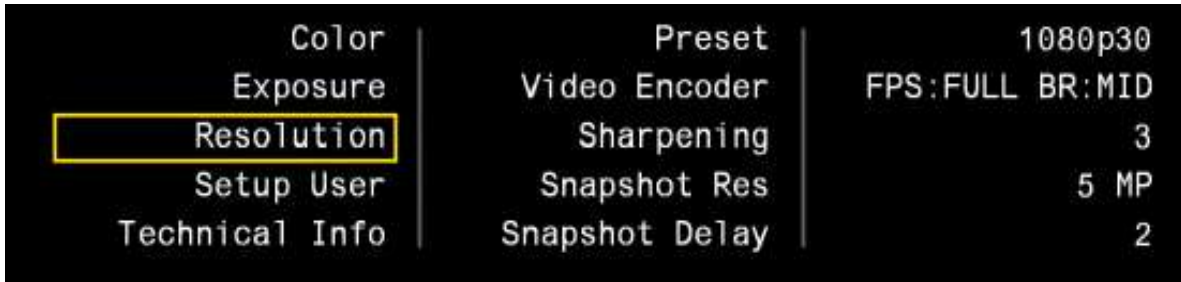


FIGURA 4.10. Menú de Opciones para resolución de la cámara digital AxioCam ERc 5s.

### 4.5.1. Comparación de Resoluciones

En la FIGURA 4.11 se puede observar cada una de las imágenes capturadas con las opciones de captura de la cámara utilizada. Para las opciones de captura de 0.9 Mpx, 2.0 Mpx y 3.7 Mpx el tamaño de la imagen es el mismo, la única

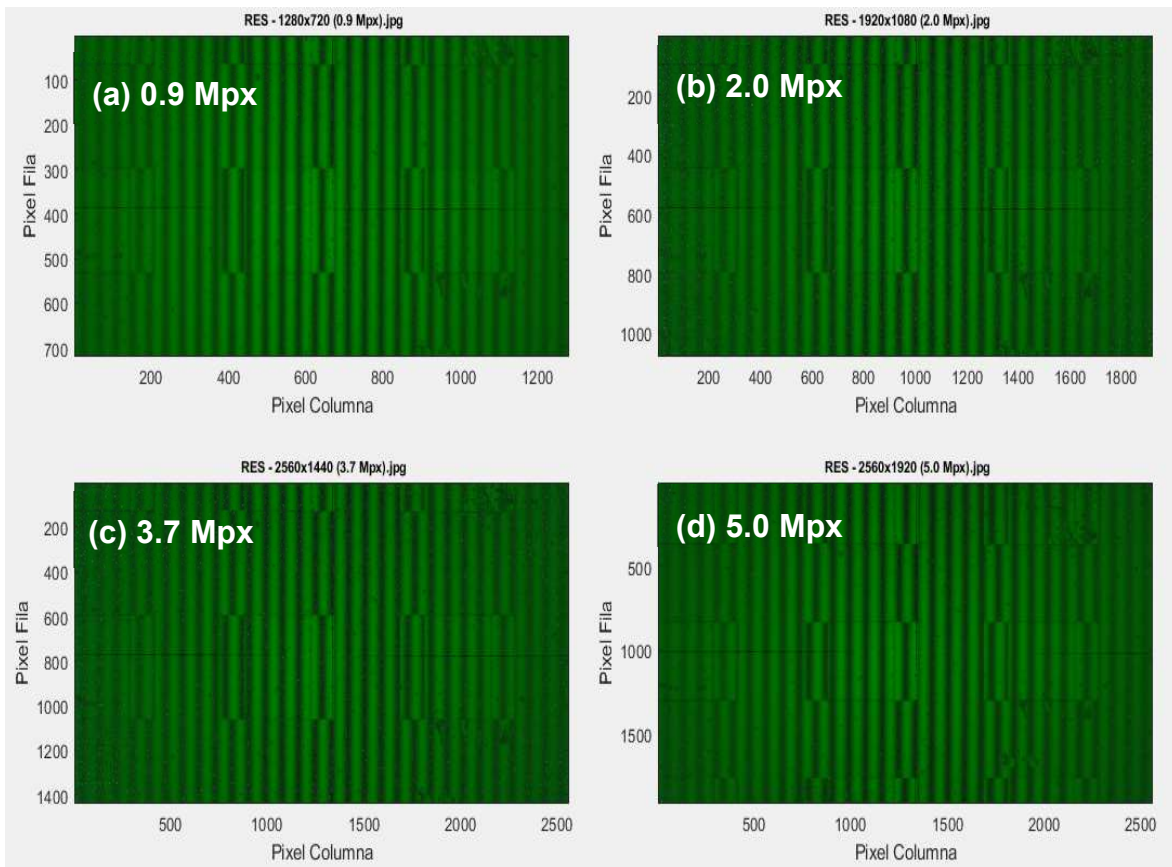


FIGURA 4.11. Comparación entre resoluciones. (a) 1280x720. (b) 1920x1080, (c) 2560x1440, (d) 2560x1920.

diferencia es la cantidad de pixeles que contiene la imagen, dicho de otra forma, el tamaño de los pixeles cambia, mientras mayor cantidad de pixeles tenga una imagen con las mismas dimensiones más pequeño será el tamaño del pixel. Por otro lado, podemos ver que la imagen con 5 Mpx (FIGURA 4.11.(d)) es diferente a las demás. Esta tiene una mayor cantidad de pixeles, sin embargo, sus dimensiones son mayores (verticalmente), por lo que puede que no exista cambio en el tamaño de los pixeles. Esto es de suma importancia ya necesitamos tener la mayor cantidad de pixeles para poder muestrear de mejor manera las franjas oscuras del patrón de interferencia como se explicó en la sección 4.3.

Para determinar cuál de los tamaños de imagen nos da mayor información sobre una franja oscura que recorra totalmente la longitud de un escalón, se realizó un conteo de cuantos pixeles están sobre la franja. Este conteo se realizó escogiendo un pixel fila inicial y uno final sobre una misma columna. Con estos datos se calculó la diferencia la cual nos dice cuántos pixeles están sobre la franja.

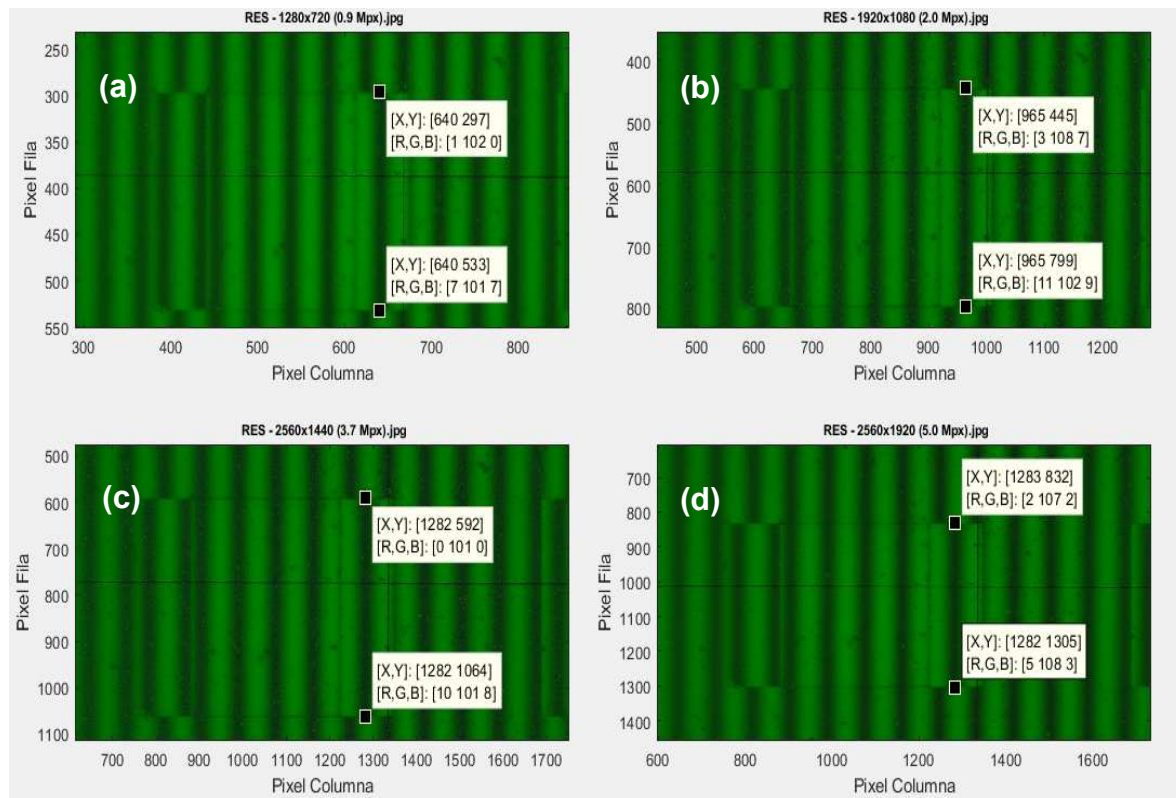


FIGURA 4.12. Conteo de pixeles sobre una franja oscura en la periferia de un escalón para los diferentes tamaños de imagen. (a) 0.9 Mpx, (b) 2.0 Mpx, (c) 3.7 Mpx y (d) 5.0 Mpx

Tamaño de Imagen en Pixeles	No. de Pixeles sobre la franja
1280x720 (0.9 Mpx)	236 ± 1 pixel
1920x1080 (2.0 Mpx)	354 ± 1 pixel
2560x1440 (3.7 Mpx)	472 ± 1 pixel
2560x1920 (5.0 Mpx)	473 ± 1 pixel

Tabla 4.1. Cantidad de pixeles en una franja oscura sobre un escalón, para los diferentes tamaños de imagen

En la Tabla 4. se muestra la cantidad de pixeles para una franja oscura del patrón de interferencia sobre un escalón para los diferentes tamaños de imagen. De acuerdo a los datos obtenidos en la tabla podemos decir que las imágenes con 3.7 y 5.0 megapíxeles son óptimas para realizar el análisis del grosor de la película

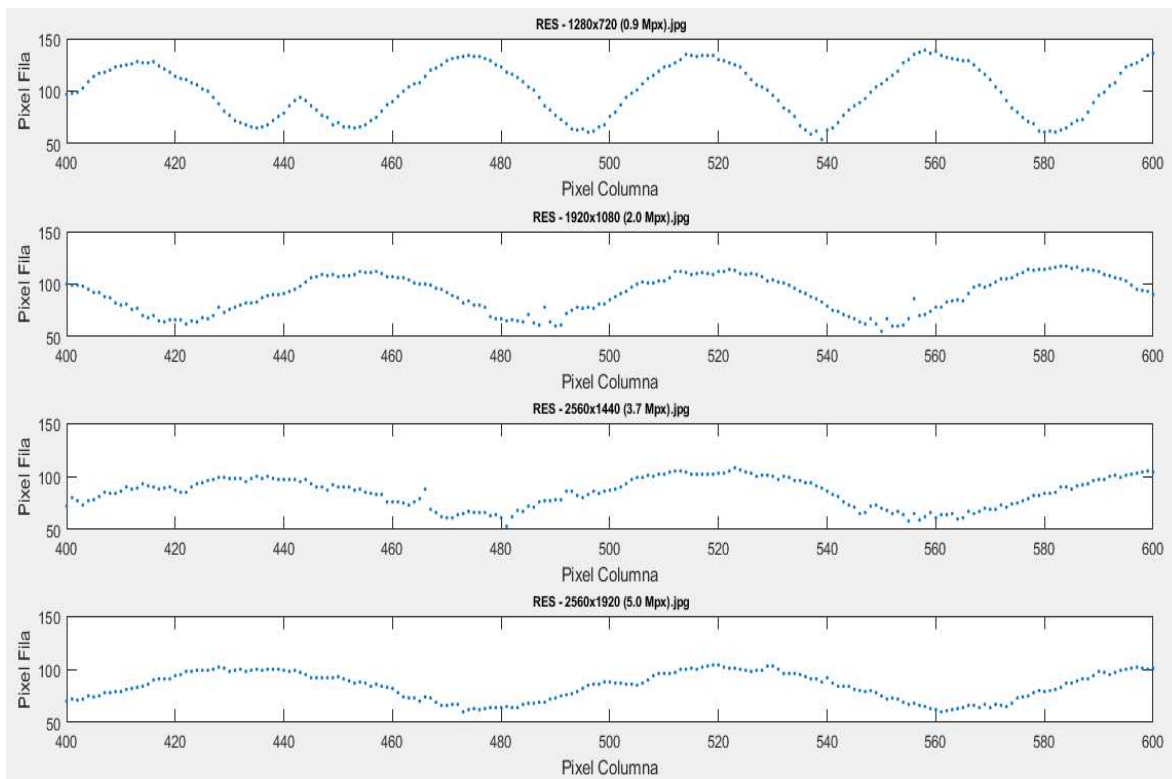


FIGURA 4.13. Gráfico para determinar la mayor cantidad de pixeles entre dos franjas oscuras del patrón de interferencia para los diferentes tamaños de imágenes. De arriba abajo (0.9 Mpx, 2.0 Mpx, 3.7 Mpx y 5.0 Mpx).

delgada usando el código computacional desarrollado. Sin embargo, falta determinar cuál de las imágenes tiene un mayor número de píxeles entre dos franjas de interferencia oscuras. Para esto se graficó una pequeña parte de las columnas de píxeles (de 400 a 600) para las diferentes imágenes de la FIGURA 4.11, sobre una misma fila, como se puede apreciar en la FIGURA 4.13. Con esto podemos decir que las imágenes con 3.7 y 5.0 Mpx nos darán resultados similares ya que tienen a primera vista la misma cantidad de píxeles entre franjas, por elección propia decidimos utilizar la imagen de 5.0 Mpx.

Con todo lo realizado en el presente capítulo, hemos determinado los mejores parámetros para capturar la imagen que nos ayudara a realizar la medición de la altura de los escalones con la mayor precisión posible. Las imágenes pueden ser capturadas con un tamaño de 3.7 o 5 Mpx para poder tener la mayor cantidad de información de la imagen. Para la muestra utilizada, que tiene un tamaño aproximado de 100 micrómetros por 100 micrómetros, el objetivo de microscopio debe tener un aumento de 50X, de modo que al combinarse con el aumento de los oculares del microscopio la magnificación total sea de 500X. Para poder muestrear por completo el escalón, las franjas de interferencia deben tener un ángulo de inclinación de 90° respecto a la horizontal. Por último, el parámetro más importante, la intensidad de luz aplicada sobre la muestra debe ser 4.0, de este modo aseguramos un buen equilibrio para las zonas brillantes y oscuras del patrón de interferencia sin saturar la imagen o haciendo está muy oscura.

# Capítulo 5

## Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del Método Computacional desarrollado en esta tesis. Estos resultados son comparados con las alturas obtenidas de cada muestra medida por Perfilometría y por Microscopía de Fuerza Atómica (AFM). Los resultados corresponden a cuatro muestras escogidas, una por cada cuadrante de la matriz de “escalones” presentada en el Capítulo 2.

### 5.1. Resultados con el Método Computacional

De la matriz de “escalones” presentada en el Capítulo 2, se tomaron cuatro muestras, una por cada cuadrante. Las muestras están etiquetadas de la siguiente manera Q#\_YYXX, en donde “Q#” representa el número de cuadrante en el cual está la muestra, mientras que el sufijo “YYXX” representan las coordenadas YY y XX del escalón dentro de la matriz de escalones.

Los resultados obtenidos de las cuatro muestras se presentan en la Tabla 5.1.

MUESTRA	GROSOR MC
Q1_0810	103.82 nm ± 0.55 nm
Q2_1416	104.45 nm ± 0.63 nm
Q3_1505	103.71 nm ± 0.44 nm
Q4_0106	102.78 nm ± 0.18 nm

*Tabla 5.1. Grosos determinados por cálculo llevado a cabo con el Método Computacional (MC) desarrollado basado en la técnica de microscopía TIC.*

En la Tabla 5.1 podemos observar las alturas de los escalones obtenidos por el cálculo realizado con el Método Computacional desarrollado. De las cuatro muestras analizadas, la muestra Q2\_1416 tiene una altura calculada en 104.45 nm siendo esta la que más se acerca a la altura que reporta el fabricante 104 nm. Las tres muestras restantes difieren en promedio 1.69 nm del espesor especificado por el fabricante. Las incertidumbres en las mediciones son relativamente bajas. Para poder tener idea de la precisión de las mediciones obtenidas, las muestras Q1\_0810, Q2\_1416, Q3\_1505 y Q4\_0106 se midieron por otras técnicas comunes para determinar el espesor de películas delgadas.

## 5.2. Comparación con Mediciones de AFM

Con la finalidad de comparar nuestros resultados con otras técnicas, en la Tabla 5.2 se presenta la altura obtenida por Microscopía de Fuerza Atómica (ver Apéndice A) y las obtenidas con el algoritmo desarrollado en el trabajo de tesis.

MUESTRA	GROSOR MC	GROSOR AFM
Q1_0810	103.82 nm ± 0.55 nm	103.70 nm ± 9.15 nm
Q2_1416	104.45 nm ± 0.63 nm	106.10 nm ± 9.43 nm
Q3_1505	103.71 nm ± 0.44 nm	106.80 nm ± 7.53 nm
Q4_0106	102.78 nm ± 0.18 nm	105.80 nm ± 7.16 nm

Tabla 5.2. Grosos determinados por cálculo llevado a cabo con el Método Computacional (MC) y mediante Microscopía de Fuerza Atómica (AFM).

Para la muestra Q1\_0810, podemos ver que las alturas obtenidas con los dos métodos difieren en apenas 0.12 nm. En las otras muestras, la diferencia es mayor. La mayor diferencia se encuentra en la muestra Q3\_1505 en donde la discrepancia entre los dos métodos es de 3.09 nm. Nótese, sin embargo, que las barras de error que se obtienen en Microscopía de Fuerza Atómica son mayores que las que se obtienen con el código computacional desarrollado. Para las muestras Q2\_1416, Q3\_1505, Q4\_0106, las alturas obtenidas con ambos métodos difieren en promedio 2.59 nm. Sin embargo, al comparar las barras de error de todas las muestras para los dos métodos, las medidas obtenidas son estadísticamente iguales. Esta comparación estadística se aprecia mejor en la FIGURA 5.1, en donde se muestran los resultados obtenidos con ambos métodos y sus respectivas barras de error.

En la FIGURA 5.1 se puede observar con mayor claridad los datos presentados en la Tabla 5.2. En la figura, los cuadrados en color negro representan las alturas obtenidas por AFM con sus correspondientes barras de error de igual color. Los resultados obtenidos por el Método Computacional están representados por triángulos de color azul. Para estas últimas, sus barras de error son apenas apreciables comparadas con las de AFM. Las más evidentes se presentan en las muestras Q2\_1416 y Q3\_1505 en donde se obtuvo un error de medición relativamente más grande que en las otras dos muestras.

Dado que las barras de error de las mediciones obtenidas coinciden en cada muestra para los dos métodos de medición, podemos decir que las alturas son

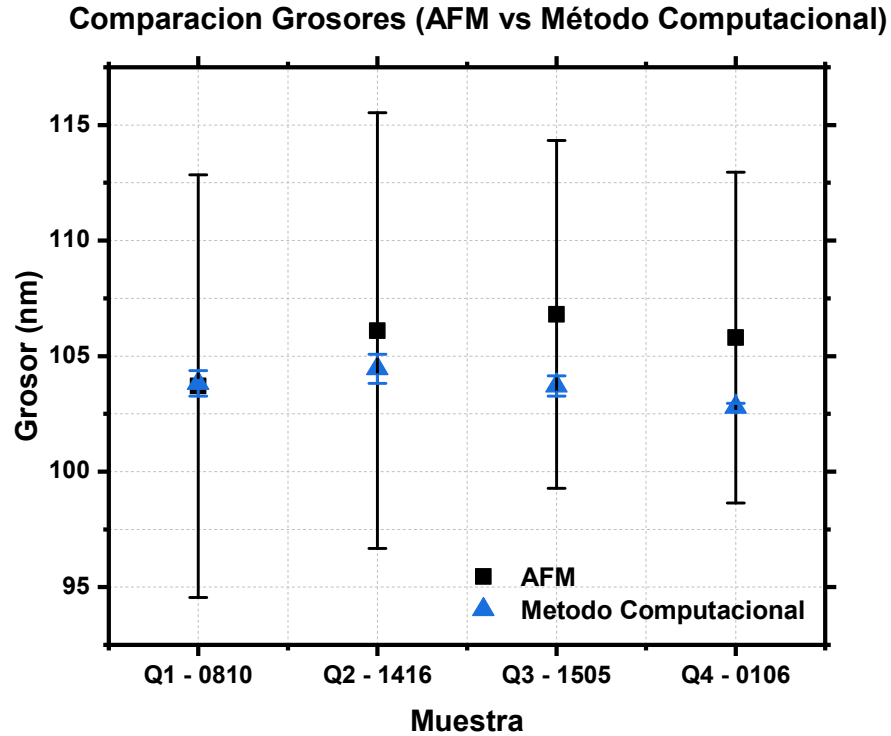


FIGURA 5.1. Barras de error de las mediciones realizadas mediante AFM y Método Computacional (MC).

estadísticamente iguales. La duda que surge ahora es saber qué medida es la más adecuada. La discrepancia promedio entre las mediciones de las muestras es de  $1.97 \text{ nm}$ , el cual es un valor relativamente “grande” para la escala en la que se está midiendo. Por lo tanto, es necesario comparar los resultados obtenidos por el Método Computacional con una técnica de medición menos localizada.

## 5.3. Comparación con Mediciones de Perfilometría

Como se mencionó al final de la sección anterior, las mediciones obtenidas con el Método Computacional deben compararse con una técnica de medición más

confiable que permita analizar áreas de mayor extensión. En esta sección se comparan las alturas de los escalones Q1\_0810, Q2\_1416, Q3\_1505 y Q4\_0106 obtenidos por el Método Computacional y los obtenidos con un Perfilómetro.

Los resultados obtenidos presentan en la Tabla 5.3.

MUESTRA	GROSOR MC	GROSOR P
Q1_0810	103.82 nm ± 0.55 nm	103.73 nm ± 0.68 nm
Q2_1416	104.45 nm ± 0.63 nm	104.93 nm ± 0.55 nm
Q3_1505	103.71 nm ± 0.44 nm	103.29 nm ± 0.54 nm
Q4_0106	102.78 nm ± 0.18 nm	102.31 nm ± 0.60 nm

Tabla 5.3. Grosos medios por Perfilometría (P) y grosos determinados por cálculo llevado a cabo por el Método computacional (MC).

En la Tabla 5.3 podemos observar las alturas obtenidas por el cálculo realizado por el Método Computacional. También se presenta el resultado obtenido de cada muestra medidas por Perfilometría, (ver Apéndice A). En la Tabla podemos ver como las alturas obtenidas son bastante parecidos entre los dos métodos. También podemos ver que la diferencia más grande entre las medidas se da en la muestra Q2\_1416. Dicha diferencia es de apenas 0.68 nm. En contraste, para la muestra Q1\_0810, las alturas medidas difieren en 0.09 nm, siendo estos resultados, al igual que en la sección anterior, los más cercanos entre los dos métodos.

De manera análoga a las comparaciones realizadas entre AFM y el Método Computacional, al observar los errores de medición obtenidos por Perfilometría y el Método Computacional podemos asegurar que las medidas obtenidas son estadísticamente iguales, como se puede apreciar en la FIGURA 5.2.

### Comparacion Grosos (Perfilómetro vs Método Computacional)

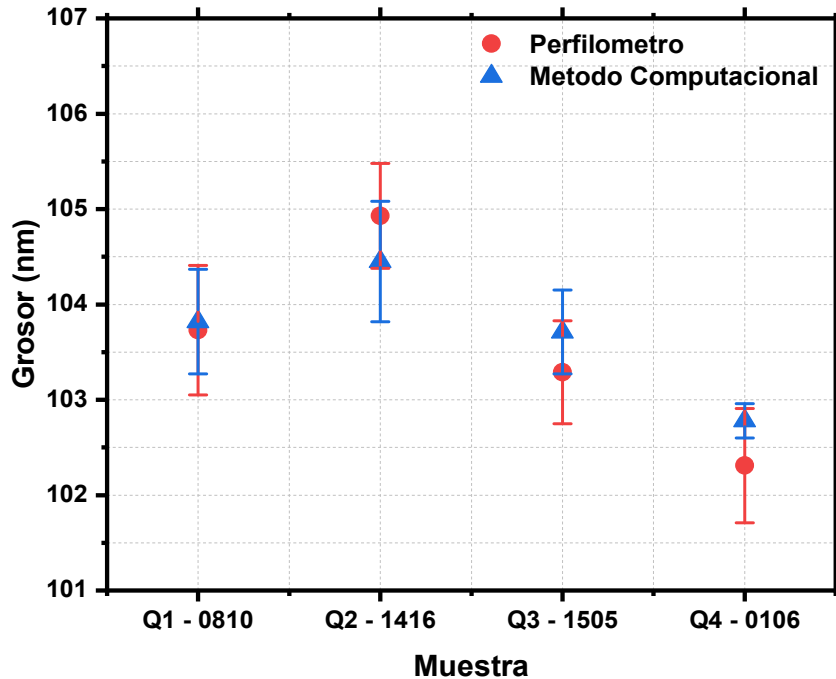


FIGURA 5.2. Barras de error de las mediciones realizadas mediante Perfilometría y por el Código Computacional (MC).

En la FIGURA 5.2, los valores de las alturas obtenidas por el Perfilómetro están representados por los puntos en color rojo junto a sus respectivas barras de error, igualmente en rojo. Al igual que en la sección anterior, los resultados obtenidos por el Método Computacional son los representados por los triángulos azules y sus respectivas barras de error.

Observando nuevamente las barras de error, ahora para todos los tres métodos, podemos apreciar que las mediciones obtenidas son estadísticamente iguales. Aún más, las alturas obtenidas por el Método Computacional caen dentro de las barras de error del Perfilómetro. Esto mismo ocurre para los resultados obtenidos mediante Perfilometría, estos caen dentro de las barras de error del Método Computacional, exceptuando la muestra *Q4\_0106*, ya que esta muestra presenta un error muy pequeño en comparación con las demás muestras. Mientras que en la FIGURA 5.1, solo las mediciones obtenidas por el Método Computacional, están dentro de las barras de error obtenidas por AFM.

# Capítulo 6

## Discusión

En este capítulo se discuten los resultados presentados en el Capítulo 5. Se indican también las ventajas y limitaciones del Método Computacional con respecto a las mediciones hechas por Perfilometría y Microscopía de Fuerza Atómica.

### 6.1. Ventajas del Método Computacional

#### 6.1.1. Incertidumbres pequeñas

Como se indicó en el Capítulo 5, los valores numéricos de las alturas obtenidas mediante el Método Computacional y aquellas obtenidas con AFM y Perfilometría son muy parecidos entre sí. Las alturas obtenidas por Microscopía de Fuerza Atómica, sin embargo, presentan incertidumbres en las mediciones bastante grandes en comparación con los otros dos métodos de medición. Por otra parte, los errores obtenidos por Perfilometría son ligeramente más grandes que los del Método Computacional, teniendo una discrepancia promedio de 0.14 nm. La FIGURA 6.1 muestra una representación gráfica de esta comparación. En todos los casos, el Método Computacional ofrece valores con la menor incertidumbre.

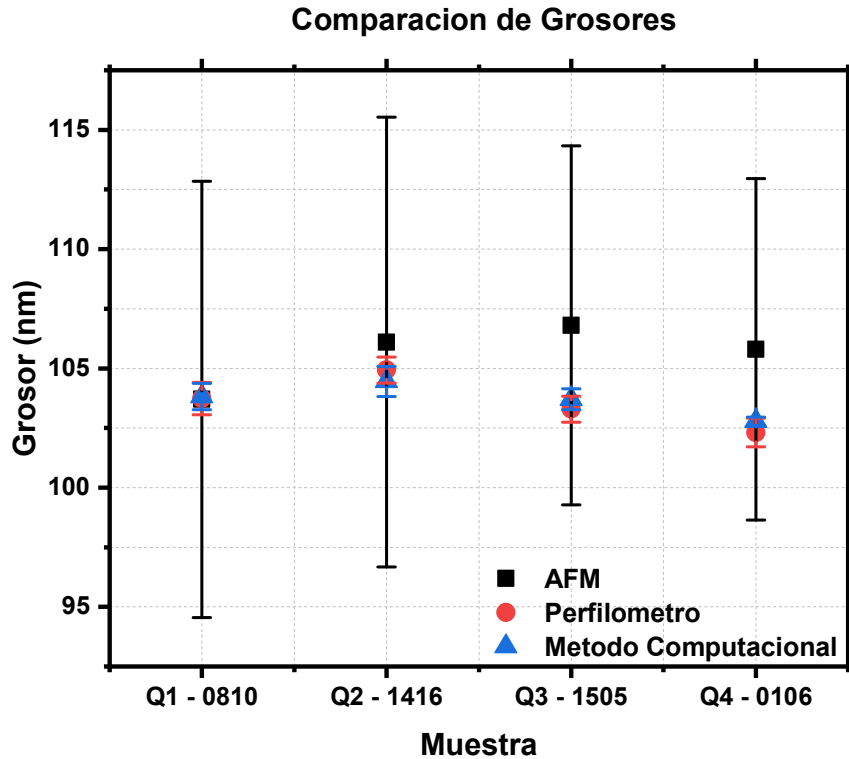


FIGURA 6.1. Grosos obtenidos por los tres métodos de medición (AFM, Perfilometría y Método Computacional) y sus respectivas barras de error.

## 6.1.2. Tiempo que tarda una medición

Para lograr que las mediciones con Perfilometría y AFM sean lo más precisas posibles, se requiere invertir un tiempo considerable. En estos métodos de medición se deben tener en cuenta varios parámetros necesarios para una buena toma de datos. Debido a esto, se necesita tomar varias lecturas para encontrar los parámetros correctos y así evitar mediciones con una gran incertidumbre. Además, se necesita que los equipos estén bien calibrados. De lo contrario, se corre el riesgo de tener mediciones incorrectas (carencia de exactitud). En el caso del Método Computacional, el realizar las mediciones no requiere de mucho tiempo. Además, los parámetros más importantes a tener en cuenta son el enfocamiento de la muestra y la intensidad de luz aplicada para que la imagen no se sature.

### 6.1.3. Técnica de medición no destructiva

Como se indicó en la Sección 6.1.2, las mediciones hechas por Perfilometría y Microscopía de Fuerza Atómica requieren de ciertos parámetros para obtener buenos resultados. Entre estos parámetros se encuentra la fuerza que se aplica sobre la muestra, ya que la muestra es presionada por una punta de prueba (FIGURA 6.2) para la medición en los métodos mencionados. El control en este parámetro es de suma importancia. Si se aplica demasiada fuerza, se puede dañar la superficie de la muestra y hacerla inservible. Además, se corre el riesgo de dañar la punta de prueba, lo cual implica tener que parar las mediciones de la muestra en progreso y de las siguientes. El proceso de medición puede continuar si se cuenta con una punta de repuesto. Sin embargo, de no tener un repuesto es necesario comprarlo. Cabe mencionar que el precio de estas suele ser alto (entre 200 y 7000 dólares). En contraste, el Método Computacional tiene una gran ventaja ante estos dos métodos de medición. La medición únicamente requiere del patrón de interferencia generado por la diferencia de camino óptico recorrido por la luz entre el sustrato y la película delgada. En otras palabras, nunca se toca la muestra de manera mecánica. Por lo tanto, no hay manera de dañar la muestra.

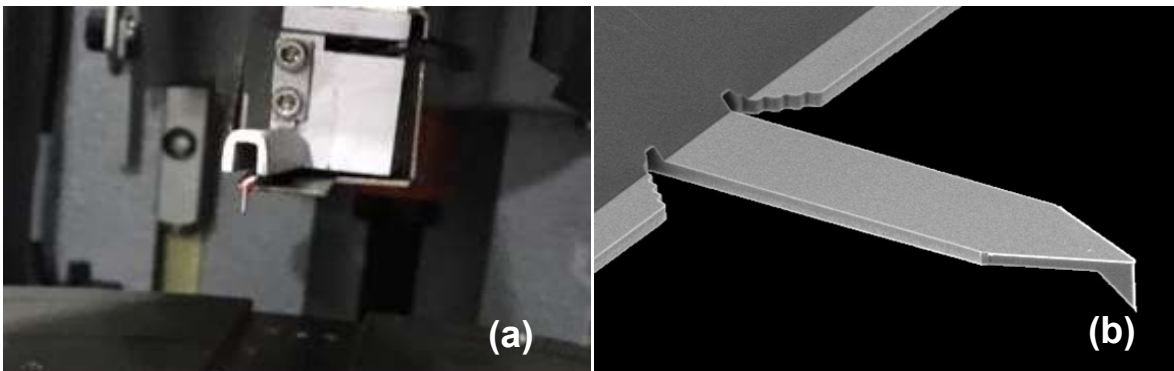


FIGURA 6.2. (a) Punta de prueba de un Perfilómetro. (b) Punta de prueba AFM.

## 6.1.4. Mediciones sobre áreas sucias

Para que se puedan realizar mediciones por Perfilometría y AFM se necesita que una punta de prueba toque el escalón que se quiere medir. Debido a esto, se necesita que la muestra este completamente limpia. Si la muestra a medir tiene suciedad de alguna clase, las mediciones realizadas mediante Perfilometría y Microscopía de Fuerza Atómica se verán afectadas en el grado en que este contaminada la muestra. La suciedad puede interponerse entre la punta de prueba y la superficie del escalón. Además de llegar a dañar la muestra, una sección contaminada hará que la altura medida tenga un valor mayor al real. En el caso más favorable, que la muestra no esté demasiado sucia y la suciedad sea apenas perceptible, las mediciones realizadas variarán mínimamente. Al contrario, si la suciedad es considerable, las mediciones pueden variar completamente. Por su parte, con el Método Computacional obtenemos una gran ventaja sobre las mediciones por Perfilometría y AFM, ya que se pueden llegar a medir muestras con suciedad relativamente alta sin variar demasiado los resultados obtenidos. Sin embargo, lo más recomendable es tener muestras limpias.

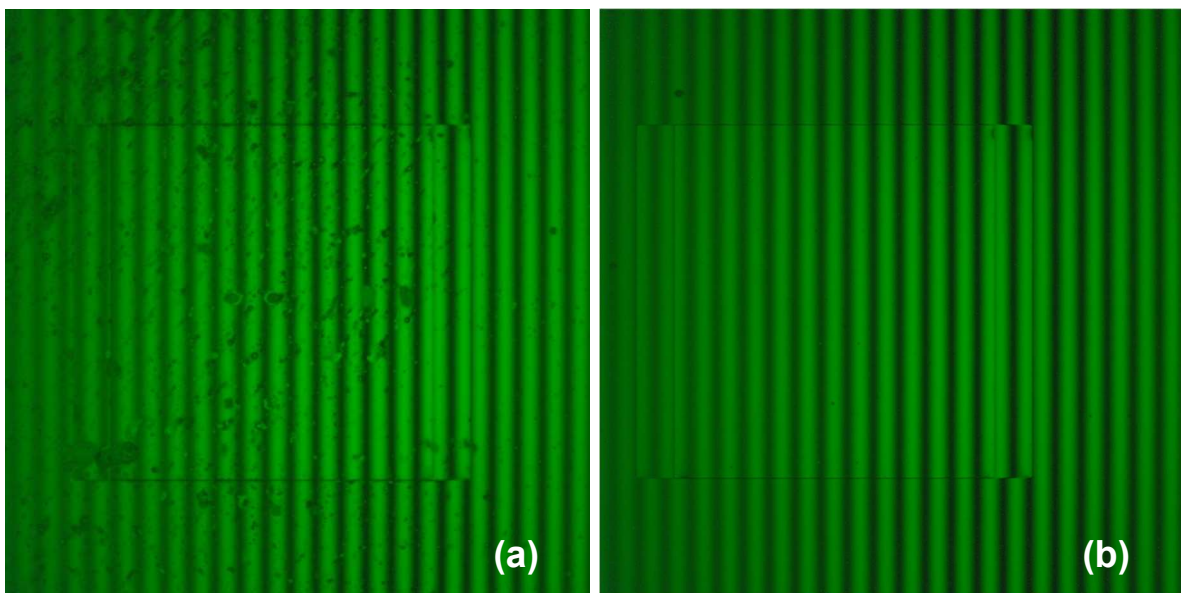


FIGURA 6.3. (a) Muestra Q1\_0106 con suciedad. (b) Muestra Q1\_0106 limpia.

A modo de ejemplo, se realizaron mediciones de los escalones Q1\_0810, Q2\_1416, Q3\_1505 y Q4\_0106 previas a las presentadas en el Capítulo 5. En estas mediciones previas, las muestras se encontraban con suciedad, como se muestra en la FIGURA 6.3.(a). En la Tabla 6.1 se presentan los resultados. Se puede observar que las alturas obtenidas de la muestra sucia y de la muestra limpia no varían mucho entre sí. La discrepancia más grande entre los valores obtenidos es de 0.88 nm. Estas mediciones pueden variar por diversos factores. Entre estos factores se encuentran la suciedad sobre el escalón, las pequeñas variaciones en la intensidad de luz, el proceso de limpieza y el enfoque dado a la imagen. La muestra limpia se presenta en la FIGURA 6.3.(b).

MUESTRA	GROSOR MUESTRA SUCIA	GROSOR MUESTRA LIMPIA
Q1_0810	104.33 nm ± 1.14 nm	103.82 nm ± 0.55 nm
Q2_1416	104.16 nm ± 0.69 nm	104.45 nm ± 0.63 nm
Q3_1505	103.23 nm ± 0.37 nm	103.71 nm ± 0.44 nm
Q4_0106	101.90 nm ± 3.44 nm	102.78 nm ± 0.18 nm

*Tabla 6.1. Grosos determinados por cálculo llevado a cabo con el Método Computacional (MC) para las muestras Q1\_0810, Q2\_1416, Q3\_1505 y Q4\_0106 con suciedad y posteriormente limpias.*

## 6.2. Limitaciones

### 6.2.1. Tamaño de los escalones

Una de las limitaciones encontradas usando el Método Computacional es el tamaño de la muestra. Las muestras Q1\_0810, Q2\_1416, Q3\_1505 y Q4\_0106 tienen un tamaño lateral de aproximadamente 100 µm. Para estas muestras de escalones, la franja de micro-interferencia que se desfasa por la altura del escalón puede ser detectada a partir del objetivo de microscopio con un aumento de 10X.

Sin embargo, la medición se ve alterada debido a que el corrimiento no se realiza de manera apropiada. Por esa razón, y tal como se explica en el Capítulo 3, las imágenes de las muestras se tomaron con la máxima magnificación posible por los objetivos de microscopio (50X). Sin embargo, para muestras menores a  $50\ \mu\text{m}$  de tamaño lateral, no es posible hacer las mediciones correctas.



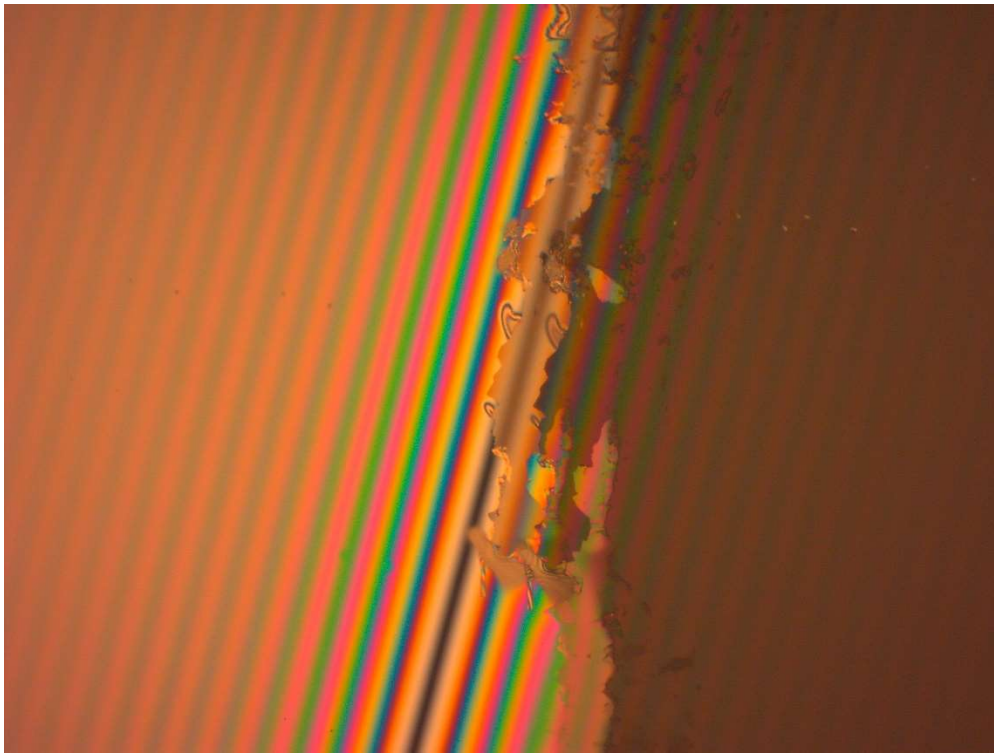
FIGURA 6.4. (a) Especificaciones de la muestra de prueba Bruker VGRP-15M. (b) Matriz de “escalones” de la muestra de prueba.

Para ilustrar esta limitante, se realizó la medición de una muestra de prueba de  $10\ \mu\text{m}$  de ancho con una altura de escalón de  $177\ \text{nm}$ . Esta es una muestra bastante pequeña. Por esta razón se utilizó el objetivo de microscopio con la mayor magnificación que tenemos en el laboratorio (50X). Esta muestra presenta una matriz de escalones, las cuales pueden ser observadas en la FIGURA 6.4.(b).

Al comparar las FIGURAS FIGURA 6.4.a y FIGURA 6.3, podemos ver claramente la diferencia de tamaños de los escalones. Además, en la FIGURA 6.4.b no es posible ver la imagen gemela producida por la técnica de Microscopia de Contraste de Interferencia Total. A pesar de esto último, se puede apreciar un corrimiento de la franja negra. Sin embargo, debido al tamaño reducido de la muestra, al realizar las mediciones de la altura de los escalones se obtuvo un valor de  $118\ \text{nm}$  aproximadamente. Este resultado tiene un error aproximado de  $59\ \text{nm}$ .

## 6.2.2. Frontera de los escalones

Otra de las limitaciones del Método Computacional es la definición de la frontera de la muestra. Si la frontera de la muestra no se encuentra bien definida y delineada, se puede producir un corrimiento completamente erróneo o incluso no encontrarse el corrimiento. Un ejemplo de esto se aprecia en la FIGURA 6.5, en donde se presenta la frontera irregular de una película delgada de Niobio depositada sobre sustrato monocristalino de silicio.



*FIGURA 6.5. Frontera mal definida de una Película delgada de Niobio crecida en el Laboratorio de Superconductividad y Magnetismo del Instituto de Física de la BUAP.*

En la FIGURA 6.5 se puede observar claramente como la frontera está mal definida. Aun podemos ver un ligero desplazamiento en la franja negra. Sin embargo, este corrimiento no es lo suficientemente apreciable como para hacer el cálculo del grosor de la película. Al observar con cuidado la parte superior de la imagen, se puede ver que la franja negra desplazada se dobla ligeramente hacia la

izquierda haciendo que el desplazamiento sea menor. Esto conduce a que el cálculo del grosor se produzca de manera errónea.

Esta desventaja, sin embargo, podría servir como un parámetro de mejora en la fabricación de las películas delgadas con escalones mejor definidos. Por ejemplo, para los resultados mostrados en el Capítulo 5 se usó una muestra comercial. Esta muestra fue fabricada por la Compañía Carl Zeiss mediante algún proceso bien establecido. En este caso, las fronteras de los escalones pudieron distinguirse claramente, como se mostró en los capítulos anteriores, haciendo que los cálculos obtenidos con el método computacional correspondieran con las alturas de los escalones especificadas por la compañía. Podemos entonces usar el método de medición desarrollado como un parámetro de control de calidad en los procesos de fabricación de las películas delgadas.

# Capítulo 7

## Conclusiones

Usando un microscopio óptico de luz reflejada y con polarización circular, se lograron obtener exitosamente patrones de micro-interferencia en muestras planas. En muestras con estructura de escalón, se pudieron obtener imágenes gemelas sobrepuestas con corrimiento de franjas de interferencia debido a la altura del escalón.

Se estudiaron los parámetros experimentales en el uso del microscopio para lograr imágenes de patrones de micro-interferencia que permitan analizarlas con la mayor precisión posible. La resolución de la imagen tomada debe ser de 5 Mpx. Esta es la máxima resolución alcanzada por la cámara AxioCam ERc 5s utilizada para esta tesis. Para muestras con un tamaño alrededor de 100  $\mu\text{m}$  de ancho, el objetivo de microscopio adecuado es el de 50X con polarizador, el cual, junto con el tubo ocular, produce 500 aumentos. La intensidad de luz aplicada a la muestra puede variar dependiendo del material del que este hecho las muestras de prueba. Sin embargo, la intensidad no debe saturar de brillo la imagen resultante. Para las muestras analizadas, encontramos que la mejor opción es aplicar una intensidad de 4.0 (unidades arbitrarias) basado en la escala de la lámpara del microscopio. Por último, para muestras de alrededor de 100  $\mu\text{m}$  de ancho, la inclinación de las franjas de interferencia más adecuada es a  $90^\circ$  (verticales). Con esta inclinación obtenemos más datos en las fotografías capturadas, lo que permite obtener una mayor precisión en el cálculo de las alturas de los escalones.

Se desarrolló un Método Computacional para determinar las alturas a partir de imágenes de patrones de interferencia. El método está basado en la técnica de Microscopia de Contraste de Interferencia Total (TIC). El algoritmo de cómputo

permite obtener alturas bastante precisas. Se realizó el cálculo en imágenes obtenidas de escalones reales. Los valores de las alturas calculadas fueron comparables con los medidos mediante la técnica de Perfilometría y Microscopia de Fuerza Atómica.

El Método Computacional desarrollado tiene ventajas sobre las técnicas de AFM y Perfilometría. Puede emplearse en muestras con suciedad relativamente alta sin afectar considerablemente el cálculo. Además, es una técnica no invasiva, por lo que la muestra no corre el peligro de ser dañada. Para que las mediciones por el Método Computacional puedan llevarse a cabo con buenos resultados, se requiere que el tamaño de los escalones sea mayor a 50  $\mu\text{m}$  de ancho y que las fronteras de los escalones estén bien definidas.

# Apéndice A

## A.1. Microscopio de Fuerza Atómica

Para comparar las mediciones obtenidas a partir del trabajo de tesis con un método de medición probado, se utilizó un Microscopio de Fuerza Atómica modelo Dimension Edge System de la compañía Bruker. El Microscopio de Fuerza Atómica se encuentra en el Laboratorio de Microscopía de Fuerza Atómica del Instituto de Física de la BUAP.



*FIGURA A.1. Microscopio de Fuerza Atómica modelo Dimension Edge System de la marca Bruker localizado en el Laboratorio de Microscopía de Fuerza Atómica del Instituto de Física de la BUAP.*

Los escalones fueron medidos siguiendo una metodología establecida. Se tomaron las mediciones de cada una de las muestras Q1\_0810, Q2\_1416, Q3\_1505 y Q4\_0106 en una misma zona como se muestra en la FIGURA A.2.

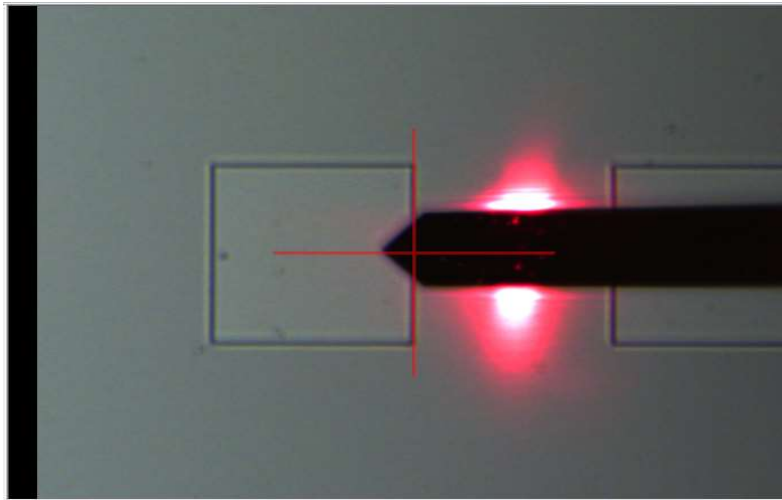


FIGURA A.2. Zona de medición para cada uno de los escalones Q1\_0810, Q2\_1416, Q3\_1505 y Q4\_0106.

Las imágenes que se obtuvieron (FIGURA A.3) de las muestras fueron analizadas usando el software Gwyddion. Este software permite determinar diversas características de un material, a partir de la imagen generada con el Microscopio de Fuerza Atómica.



FIGURA A.3. Imagen de la muestra Q3\_1505 obtenida por AFM abierta con el software Gwyddion.

El procedimiento para analizar la altura del escalón mediante el software fue el siguiente.

1. Aplicar la función *Level Row* en la parte de la imagen correspondiente al sustrato
2. Aplicar una máscara sobre el sustrato
3. Usar la función *Polynomial Background* únicamente sobre la región de la máscara
4. Quitar máscara
5. Verificar el perfil del escalón (FIGURA A.4)

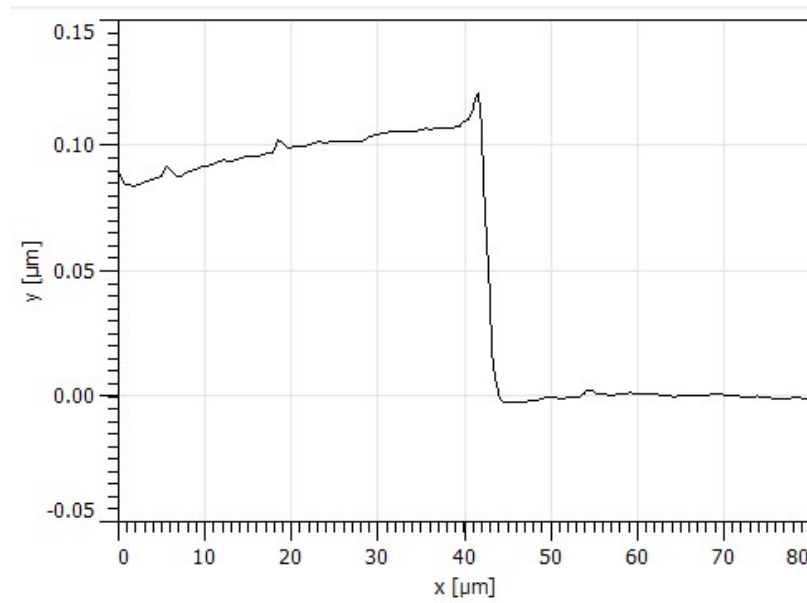


FIGURA A.4. Perfil del escalón medido en AFM.

6. Usar la función *1D Statistical*
7. Calcular la altura mediante dos cursores, como se muestra en la FIGURA A.5
8. Calcular el error mediante ajustes gaussianos

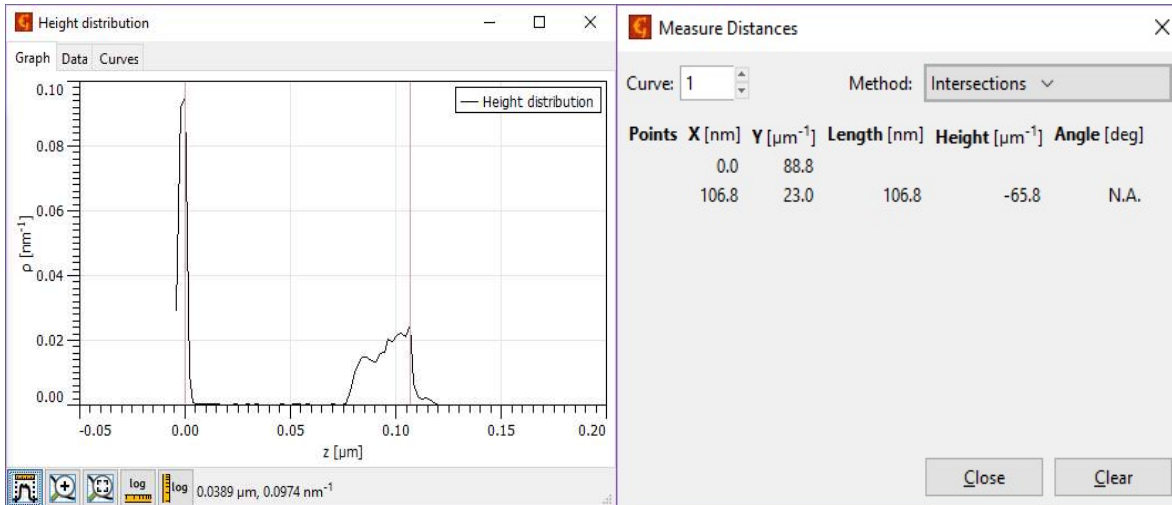


FIGURA A.5. Cálculo de altura mediante cursores.

El cálculo del error se realizó ajustando una curva Gaussiana a los picos generados por la función *1D Statistical* (FIGURA A.5). Esto con el fin de encontrar el centro de dichos picos, usando la *Anchura a Media Altura (FWHM)* dada por el valor  $b$  del ajuste gaussiano, como se ve en la FIGURA A.6.

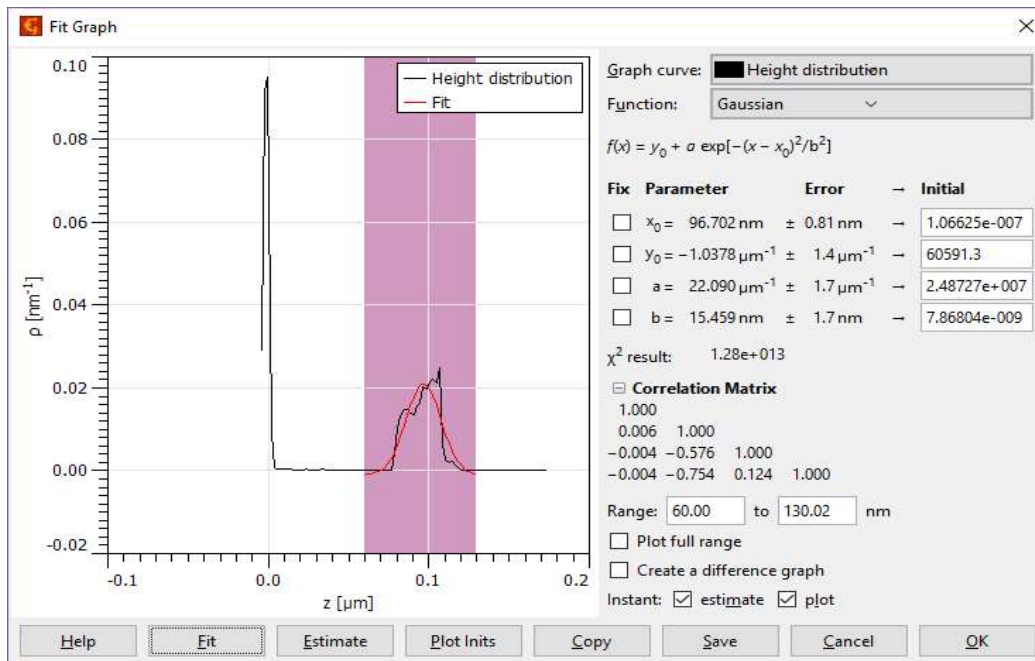


FIGURA A.6. Ajuste Gaussiano para cálculo de error en AFM.

El ancho *Anchura a Media Altura* de una curva gaussiana está relacionado con el error de medición de acuerdo a la ecuación (A.1).

$$\sigma = \frac{FWHM}{2.3548} \quad (\text{A.1})$$

## A.2. Perfilómetro

También, se utilizó un Perfilómetro Veeco Dektak 150 de la compañía Bruker para comparar las mediciones de las alturas de los escalones obtenidas en el presente trabajo de tesis. El perfilómetro se encuentra en el Laboratorio Central del Instituto de Física de la BUAP.



*FIGURA A.7. Perfilómetro Veeco Dektak 150 de la marca Bruker localizado en el Laboratorio Central del Instituto de Física de la BUAP.*

Para las mediciones de Perfilometría tuvimos que experimentar con los parámetros del perfilómetro para obtener mediciones precisas. Los parámetros encontrados fueron: Distancia de barrido de 1000  $\mu\text{m}$ , duración de medición 30s, fuerza aplicada sobre la muestra 15 mg.

El perfilómetro genera un archivo con los datos de la medición los cuales analizamos usando el software Origin 2018. La figura muestra el perfil de un escalón obtenido por perfilometría. El cálculo de la altura y su respectivo error de medición se realizaron mediante el ajuste de la función escalón.

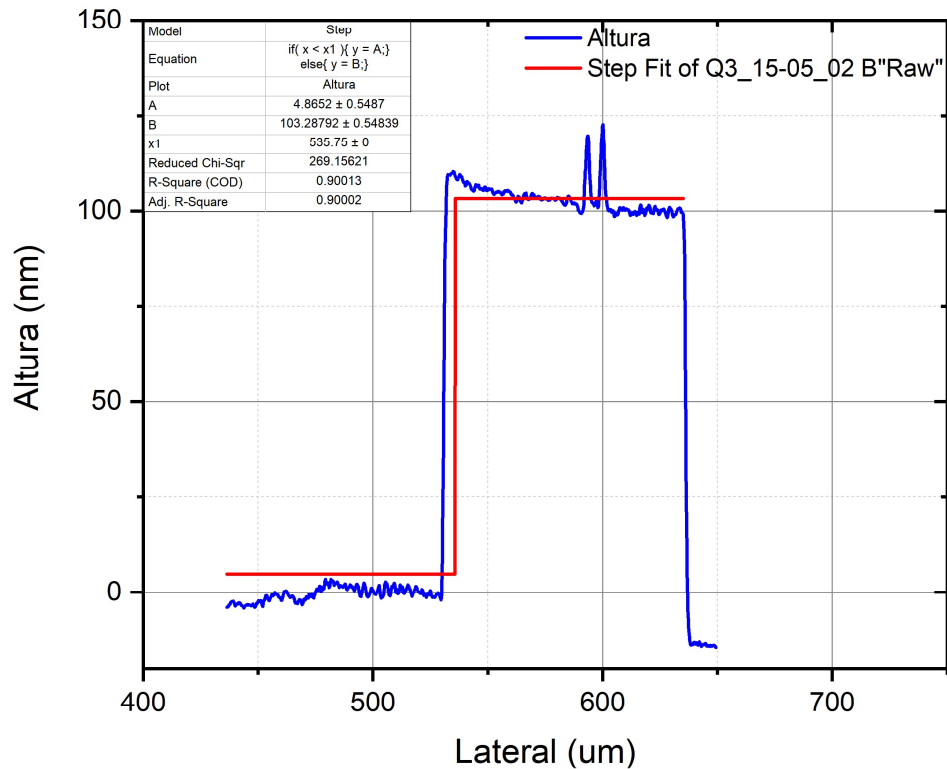


FIGURA A.8. Perfil del escalón Q3\_1505 y ajuste de la función escalón.

# Referencias

- [Allen 1969] R.D. Allen, G. B. David, G. Nomarski, (1969). "*The Zeiss-Nomarski differential interference equipment for transmitted-light microscopy*", Zeitschrift fur Wissenschaftliche Mikroskopie und Mikroskopische Technik, Vol. 64, pp. 193-221.
- [Apostol 2008] D. Apostol, V. Damian, P. Logofatu, (2008). "*Nanometrology of Microsystems: Interferometry*", Romanian Reports in Physics, Vol. 60, pp. 815–828.
- [Danz 2004] R. Danz, P. Gretscher, (2004). "*C–DIC: a new microscopy method for rational study of phase structures in incident light arrangement*", ELSEVIER Thin Solid Films, Vol. 462–463, pp. 257-262.
- [Davidson 2002] M. Davidson, M. Abramowitz, (2002). "*Optical Microscopy*", Encycl. Imaging Sci. Technol, Vol. 2, pp. 120.
- [Dietrich 2006] Peter Dietrich, Peter Schnuell, (2006). "*Prism Changing Arrangement*", US Patente No. US 2006/0103923-A1.
- [Espinós 2010] J. Espinós, (2010). "*Aplicaciones Tecnológicas de Películas Delgadas*", Cuadernos de Divulgación Científica, Encuentros con la Ciencia, Vol. 2, pp. 25-28.
- [Gonzalez-Laprea 2011] J. González-Laprea, A. Marquez, K. Noris-Suárez, R. Escalona, (2011). "*Study of bone cells by quantitative phase microscopy using a Mirau interferometer*", Revista Mexicana de Física, Vol. 57, pp. 435-440.
- [Groot 2015] P. Groot, J. Biegen, (2015). "*A new class of wide-field objectives for 3D interference microscopy*", SPIE Optical Metrology, Vol. 9525, pp. 22-25.
- [Inoué 1995] S. Inoué, R. Oldenbourg, (1995). "*Microscopes*", Handbook of Optics: Devices Measurements and Properties, Chapter 17, Vol. 2, pp. 17.1 - 17.52.

- [Kagalwala 1998] F. Kagalwala, T. Kanade, (1998). “*Computational Model of Image Formation Process in DIC Microscopy*”, Conference Paper, Proceedings of Three-Dimensional and Multidimensional Microscopy V, Vol. 3261, pp. 193-207.
- [Kuncser 2012] C. Kuncser, A. Kuncser, S. Antohe, (2012). “*Learning by scientific and experimental reasoning: practical prominence of errors and their elimination in Total Interference Contrast Microscopy*”, Romanian Reports in Physics, Vol. 64, pp. 143–154.
- [Lang 1968] W. Lang, (1968). “*Nomarski differential interference-contrast microscopy*”, Reprinted From Zeiss Information, Vol. 70, pp. 114-120.
- [Matlab 1998] “Image Processing Toolbox User’s Guide”, The MathWorks, Inc.
- [Mejia 2005] J. Mejía, (2005). “*Apuntes de Procesamiento Digital de Imágenes*”, UASLP Facultad de Ingeniería, Área de Computación e Informática, Ed. 1, San Luis Potosí.
- [Murphy 2001] D.B. Murphy, (2001). “*Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging*”, 1 ed., EE. UU. Wiley-Liss Inc.
- [Nieto 1994] E. Nieto, J.F. Fernández, P. Duran, C. Moure, (1994). “*Películas Delgadas: fabricación y aplicaciones*”, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Vol. 33.
- [Regalado 1986] L. Regalado, (1986). “*Las Películas Delgadas y sus Aplicaciones en Óptica*”, Revista Mexicana de Física, Vol. 32, No. 4, pp. 601-612.
- [Schey 2002] B. Schey, (2002). “*C-TIC Optische Höhenmessung auf nm-Skala*”, Mikroskopie von Carl Zeiss.
- [Schey 2004] B. Schey, R. Danz, V. Smoje, (2004). “*Gepulste Laserdeposition und TIC-Mikroskopie - zwei Methoden für die effektive und intelligente Schichtentwicklung*”, Photonik, Mikroskopie, Vol. 3, pp. 42-45.
- [Vaupel 2014<sup>a</sup>] M. Vaupel, (2014). “*Interference Contrast Profilometry with Zeiss TIC*”, Carl Zeiss Microscopy.

[Vaupel 2014<sup>b</sup>] Matthias Vaupel, Helmut Lippert, (2014). "*Method for Determining Roughness data and/or Topography data of Surface in Material Microscopy*", US Patente No. US 2014/0285814-A1.

[Zeiss] Zeiss. "Operating Manual", Axioplan 2 imaging and Axiophot 2, Universal Microscopes.

[Zeiss 2007] Zeiss (2007). "Objectives from ZEISS - Exceeding Your Expectations", Brilliant Imaging for Research and Routine Work in Life Sciences.

[Zeiss 2015] Zeiss, (2015). "User Guide. AxioCam ERc 5s", Microscope Camera.