

***CARACTERIZACION DE MATERIALES POR REFLECTIVIDAD EN
AMPLITUD Y FASE CON MICROSCOPIA INTERFERENCIAL***

CARLOS JAVIER PERUCHO LOZANO

***UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FISICA
BUCARAMANGA
2007***

**CARACTERIZACION DE MATERIALES POR REFLECTIVIDAD EN
AMPLITUD Y FASE CON MICROSCOPIA INTERFERENCIAL**

CARLOS JAVIER PERUCHO LOZANO

*Trabajo presentado como requisito
Para optar al título de Físico*

Director
ARTURO PLATA GOMEZ
Doctor en Física

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FISICA
BUCARAMANGA
2007**

Dios Padre, Santa Maria

Con mi guía, solo manifesté gratitud por mostrarme en el camino a las grandiosas personas que estuvieron conmigo en todos estos años de estudio y hacerme llegar hasta este punto de mi vida, no hubiera imaginado que conseguiría estar donde estoy; gracias por darme la oportunidad de encontrarme en este mundo y conocer a las grandiosas personas que me rodean; son mi familia.

A mis padres Edelmira Lozano y Gerardo Perucho

Que me apoyaron en todo momento, por su paciencia, por creer en mí y por darme la oportunidad de seguir adelante con mis estudios impulsándome, dando lo mejor de sí y manifestarme todo su amor.

Dilma, Liliana, Beatriz, Patricia, Mario y Mauricio.

Hermanos, me incentivaron y apoyaron en cualquier tarea que realizara, siempre con una sonrisa y un cálido abrazo.

AGRADECIMIENTOS

*Cordialmente a mi director de proyecto **Dr. ARTURO PLATA GÓMEZ** gracias por su apoyo, su constancia, por tenderme la mano y ser el consejero, siempre enseñándome a vencer cada obstáculo que surgía; amigo y crítico que me impulso para llegar a dar lo mejor de mi.*

*A mis amigos y compañeros **FREDY A. RODRÍGUEZ, ELBER RODRÍGUEZ** y **CARLOS T. CORREDOR** estuvieron conmigo en todo momento y en el transcurso de la carrera me enseñaron que con perseverancia y paciencia se puede alcanzar cualquier objetivo.*

*A **EDWIN F. MENDOZA, CARLOS A. CHACON** por compartir sus dudas, logros y dificultades a lo largo de este proyecto; me ayudaron a mejorar, y me respaldaron en todo momento.*

***AI GRUPO DE OPTICA Y TRATAMIENTO DE SEÑALES, PROFESORES Y COMPAÑEROS** por su colaboración y disposición cuando lo necesitaba, las dudas se resolvían mejor cuando encontraba un equipo dispuesto a ser participe del proceso de formación.*

*Por la colaboración, para poder realizar este trabajo al **CENTRO DE EXCELENCIA EN NUEVOS MATERIALES-CENM.***

TABLA DE CONTENIDO

	<i>Pág.</i>
<i>INTRODUCCION</i>	<i>1</i>
<i>1. COHERENCIA</i>	<i>3</i>
<i>1.1 COHERENCIA TEMPORAL</i>	<i>5</i>
<i>1.2 COHERENCIA ESPACIAL</i>	<i>6</i>
<i>2. FASE</i>	<i>7</i>
<i>2.1 DIFERENCIA DE FASE</i>	<i>7</i>
<i>2.2 FASE CONJUGADA</i>	<i>8</i>
<i>3 INTERFEROMETRIA</i>	<i>10</i>
<i>3.1 INTERFEROMETRIA A DOS ONDAS</i>	<i>11</i>
<i>4. ESPECTROSCOPIA POR TRANSFORMADA DE FOURIER</i>	<i>14</i>
<i>4.1 CONCEPTO DE E.T.F.</i>	<i>14</i>
<i>4.2 OBTENCIÓN DEL ESPECTRO</i>	<i>17</i>
<i>5. MICROSCOPIO INTERFEROMETRICO</i>	<i>20</i>
<i>5.1 EL INTERFEROMETRO DE MIRAU</i>	<i>20</i>
<i>5.2 INTERFEROMETRIA CON LUZ BLANCA</i>	<i>21</i>
<i>6. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE SUPERFICIES</i>	<i>24</i>

6.1 DETECCION DE MÁXIMOS	24
6.2 EXTRACCION DE TOPOGRAFÍA	24
6.3 INTERFEROGRAMA	25
7. CARACTERIZACION DE TEXTURA	26
7.1 TEXTURA POR TRANSFORMADA DE FOURIER	27
7.2 TEXTURA POR CORRELACION	30
8. RESULTADOS	32
8.1 VISUALIZACIÓN DE TEXTURA	34
8.2 MEDIDAS POR CORRELACIÓN	38
8.3 FASE DE LOS MATERIALES	42
8.4 REFLECTIVIDAD DE LOS MATERIALES	47
8.5 CARACTERISTICAS DE SUPERFICIE POR TRANSFORMADA DE FOURIER	50
9. CONCLUSIONES	52
10. BIBLIOGRAFIA	54
10.1 REFERENCIAS	57
11. ANEXOS	A1
11.1 OBTENCION DE DATOS DE MAXIMA INTENSIDAD	A1
11.2 OBTENCION DE DATOS DEL INTERFEROGRAMA	A4

LISTA DE TABLAS

	<i>Pág.</i>
<i>Tabla 8.2-1 MEDIDA DE CORRELACIÓN DE LAS MUESTRAS</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 8.2-2 MEDIDA DE CORRELACION PARA EL MATERIAL ALUMINIO</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 8.2-3 MEDIDA DE CORRELACION PARA EL MATERIAL NO DEFINIDO</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 8.3-1 ANGULOS DE FASE EN LA REFLEXIÓN</i>	<i>46</i>

LISTA DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
1.a.-1.c. CONCEPTO DE COHERENCIA	3
1.a. COHERENCIA TEMPORAL	6
1.b. COHERENCIA ESPACIAL	6
3.a. INTERFERENCIA A DOS ONDAS	11
4.a. MONTAJE INTERFERÓMETRO MICHELSON	14
4.2a. INTERFEROGRAMA CON RANGOS A TOMAR	18
4.2.b.-4.2.g. ESPECTROS DE LOS RANGOS TOMADOS	18
5.a. MONTAJE INTERFERÓMETRO DE MIRAU	21
5.2a. INTERFEROGRAMA MODULADO	23
6.3a.-6.3.b. INTERFEROGRAMA EN 2D Y FASE EN 3D DE UNA MUESTRA	25
8a. MONTAJE EXPERIMENTAL	33
8.1a.-8.1o. TOPOGRAFIA, MAXIMA INTENSIDAD Y TEXTURA PARA LAS MUESTRAS	35
8.2a. CORRELACIÓN DE LAS IMÁGENES DE MAXIMAS INTENSIDADES	40

8.3a. IMÁGENES DE INTERFEROGRAMAS, FASES Y REFLECTIVIDAD DE LAS MUESTRAS EN 2D	42
8.3b.-8.3c FASE DE UN INTERFEROGRAMA	45
8.4a. PERFILES DE REFLECTIVIDAD DE LAS MUESTRAS	47
8.5a. COMPARACIÓN IMÁGENES DE MAXIMA INTENSIDAD CON SU TRANSFORMADA COSENO.	50
A1-A5. OBTENCIÓN DE DATOS DE MÁXIMA INTENSIDAD	A1
B1-B7. OBTENCIÓN DE DATOS DEL INTERFEROGRAMA	A5.

INTRODUCCION

Conocemos los objetos que nos rodean en base a sus características físicas, la topografía, el efecto debido a la iluminación o rugosidad. Gracias a la detección de la luz conocemos sus cualidades a grandes dimensiones. Aprovechando el avance de la tecnología y la reducción de tamaño de los instrumentos tecnológicos se proponen nuevos conceptos para la caracterización de los objetos reflectivos. El microscopio óptico diseñado para observar superficies con una resolución transversal al nivel de micras, combinado con las técnicas interferométricas de alto contraste, enseña una técnica que ofrece un estudio de superficie de tipo no invasivo con resoluciones axiales del orden de nanómetros.

El diseño de un sistema que realice un movimiento de tipo nanométrico junto a un modelo interferométrico, forma una línea de investigación para el estudio de superficies, encontrando su reflectividad y permitiendo su caracterización. Los diferentes estudios de modelos de identificación por contornos asocian a una muestra un conjunto de medidas a nivel local que son significativos a la participación de las propiedades físicas tales como reflectividad, topografía, textura y absorción. El diseño de un sistema usando la microscopía interferencial hará efectivo los estudios de estado de superficies sin entrar en contacto con las superficies y no ser perjudicial para la muestra estudiada.

Si se tiene una resolución mejorada gracias a la microscopía confocal y se agrega a la misma técnica el proceso de interferometría; se obtiene un modelo óptico para el estado de superficie, que ofrece detalles de la muestra trabajada. Si se suma a este modelo un sistema de adquisición de imágenes, se pueden adquirir datos óptimos por este procedimiento.

El desarrollo de este proyecto busca por medio de la microscopía interferencial extraer parámetros basados en la reflectividad de materiales metálicos, obteniendo información de su fase y su variación en la amplitud. De esta manera se pueden valorar dichos parámetros e identificar los efectos de la iluminación sobre los materiales metálicos.

Se pretende evaluar una muestra, con respecto a un sistema que adquiere imágenes de tipo intensidad, topográfica e interferográfica.

Haciendo uso del método de detección de máximos, se aprovecha la propiedad del interferograma y se extrae una imagen de topografía y máxima intensidad para el límite entre dos materiales metálicos contenidos en cada una de las cinco muestras que se estudiaron; agregando a este una reconstrucción del interferograma, se obtienen datos que hasta el momento el sistema puede ofrecer.

El trabajo presentado esta estructurado de esta manera: En los tres primeros capítulos se recurre a una descripción teórica de los fundamentos del proceso de interferometría, estableciendo las condiciones presentadas para el adecuado funcionamiento del sistema. En el capítulo cuatro se enfatiza en el estudio del interferograma y su tratamiento en el proyecto, y en el capítulo quinto, se realiza un análisis de los componentes que forman el sistema que se trabajó para la obtención de datos y su almacenamiento.

El capítulo sexto y séptimo, dan a conocer cómo se obtuvo la información tratada y los métodos utilizados. En el octavo capítulo, se muestran los resultados experimentales, así como también las descripciones respectivas de los procesos, lo cual, nos permitirá aportar conclusiones claras en el capítulo nueve. En los capítulos diez y once, se dan a conocer los recursos empleados para el desarrollo del proyecto.

De esta manera, pretendo que el desarrollo de la presente tesis, sirva de base para posteriores trabajos de investigación, en lo concerniente a imágenes obtenidas por medio de la reflectividad en materiales metálicos.

1. COHERENCIA

La detección de la luz es un proceso medido en el espacio y en el tiempo. En el desarrollo de la ecuación de intensidad (ecuación 1.1) se asume que la diferencia de fase (φ) es una constante en el tiempo, significa que se ha asumido que los campos eléctricos E_1 y E_2 tienen la misma frecuencia particular.

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos \varphi \quad (1.1)$$

Matemáticamente, una onda sinusoidal pura de longitud temporal finita puede tener una frecuencia extendida de acuerdo con el teorema de Fourier. Es por esto, que no existen fuentes que emitan luz a una frecuencia particular.

Si se imagina el diseño de dos trenes de ondas parciales sucesivos (Figura 1a, 1b, 1c), [7] los dos trenes de onda tienen la misma amplitud y longitud L_c , con una diferencia de fase abrupta. En la figura 1a, podemos apreciar una situación en la cual, los dos trenes de ondas viajan a igual longitud de camino, aunque la fase de la onda original fluctúa aleatoriamente. La diferencia de fase entre las dos ondas parciales superior e inferior permanece constante en el tiempo.

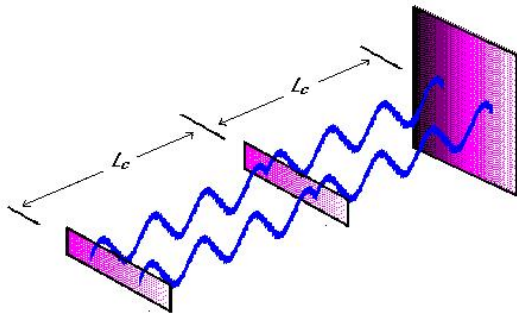


Figura 1a

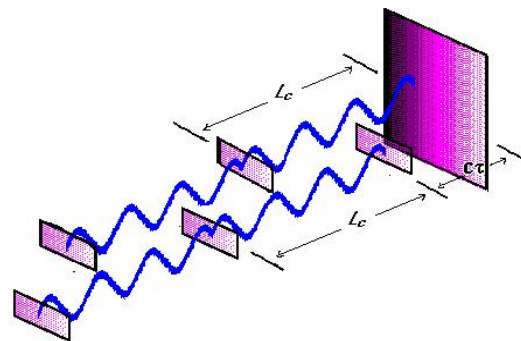


Figura 1b

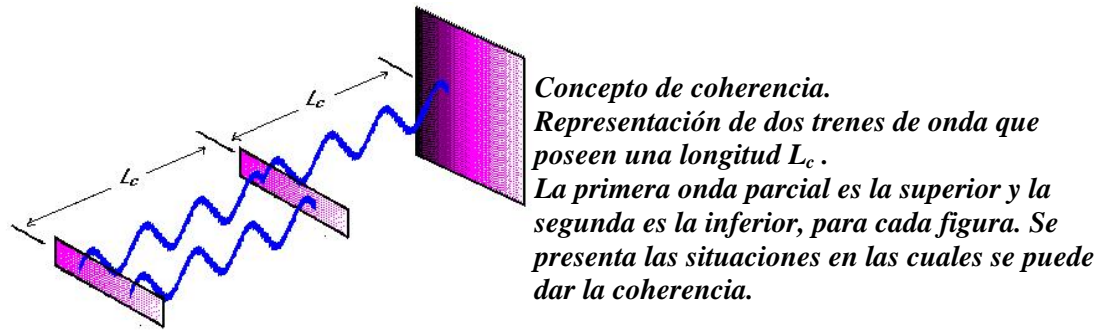


Figura 1c

La figura 1c muestra la situación en la que uno de los trenes de onda ha viajado una longitud de camino L_c y ha recorrido mas camino que el segundo tren, llegando primero a un plano de observación. La cabeza del tren de la onda parcial retrasada coincide con el extremo del correspondiente tren de la onda parcial mas larga, y la diferencia de fase fluctúa aleatoriamente, mientras los sucesivos trenes de onda continúan pasando.

Como resultado, $\cos \varphi$ varia aleatoriamente entre +1 y -1. Cuando se mide sobre muchos trenes de onda, $\cos \varphi$ llega a ser cero y el resultado de la intensidad es:

$$I = I_1 + I_2 \quad (1.2)$$

La interferencia debido a la fase se presenta en la figura 1b. Aquí se muestra el caso intermedio donde la segunda onda parcial ha viajado una longitud L , recorriendo un camino mas largo que la onda parcial superior, donde $0 < L < L_c$. Medido sobre muchos trenes de onda, la diferencia de recorrido entre los dos trenes varia aleatoriamente en un periodo de tiempo proporcional a $\tau = L/c$, mientras el resto, permanece constante, en un periodo de tiempo proporcional a $\tau_c - \tau$ donde $\tau_c = L_c/c$. El resultado se puede observar como un patrón de interferencia, de acuerdo con la ecuación de intensidad, pero con contraste reducido. Para explicar esta pérdida de contraste, la ecuación 1.1 se puede escribir como:

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} |\gamma(\tau)| \cos \varphi \quad (1.3)$$

donde $|\gamma(\tau)|$ es el valor absoluto del valor de $\gamma(\tau)$. Este valor esta relacionado con el patrón de contraste.

Si se introduce la definición de visibilidad de contraste:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (1.4)$$

donde I_{max} y I_{min} son vecindades máximas y mínimas del patrón de interferencia, descrito en la nueva ecuación de interferencia. Sin embargo $\cos \varphi$ varía entre +1 y -1, obteniendo:

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} |\gamma(\tau)| \quad (1.5)$$

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2(I_1 I_2)^{1/2} |\gamma(\tau)| \quad (1.6)$$

Incluyendo I_{max} e I_{min} en la ecuación de contraste se obtiene:

$$v = \frac{2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma(\tau)|}{I_1 + I_2} \quad (1.7)$$

En el caso de dos ondas de igual intensidad, $I_1 = I_2$, se obtiene que $V = |\gamma(\tau)|$. Este es el término de grado complejo de coherencia y es una medida de la capacidad de dos campos de ondas para interferir. De ahí se obtiene $|\gamma(0)| = 1$, que representa el caso de coherencia completa; mientras $|\gamma(\tau_c)| = 0$ representa el caso de incoherencia, y $0 \leq |\gamma(\tau)| \leq 1$ representa la coherencia parcial. [7]

1.1 COHERENCIA TEMPORAL

Si una luz fuese monocromática, su variación de frecuencia $\Delta\nu$ sería cero y por lo tanto su variación temporal Δt sería infinita, pero esto en la realidad no es posible. Sin embargo, sobre un intervalo mucho más corto que Δt una onda real se comporta como si fuera monocromática. En efecto, el tiempo de coherencia es el intervalo temporal sobre el cual, podemos predecir razonablemente la fase de la onda luminosa en un punto dado del espacio, (fig. 1.1a). Se podría decir, que si Δt es grande, la onda tiene un alto grado de coherencia y viceversa. El efecto surge del ancho de banda finito de la fuente, relacionado con la extensión finita del tren de onda en el tiempo o en el espacio. Esto dependería intrínsecamente de la estabilidad de la fase en el tiempo. [22]

1.2 COHERENCIA ESPACIAL

La coherencia espacial se usa con más frecuencia para describir efectos que surgen debido a la extensión finita de la fuente de luz ordinaria. Si se llega a tener una fuente monocromática extendida, sobre la cual se toman dos puntos radiadores, separados a una distancia lateral mayor que λ , estos puntos radiadores se comportarían de manera independiente. Ahora, si se analiza la fuente dentro de una región distante del campo de radiación, idealizando la fuente como si fuese puntual, se encontraría la correlación de fase resultante entre dos puntos lateralmente espaciados en el campo luminoso (fig. 1.2b). La coherencia espacial lateral está íntimamente relacionada al concepto de frente de onda. Por lo tanto, si dos puntos desplazados lateralmente están sobre el mismo frente de onda en un tiempo dado, se dice, que los campos en esos puntos, son coherentes espacialmente. [22]

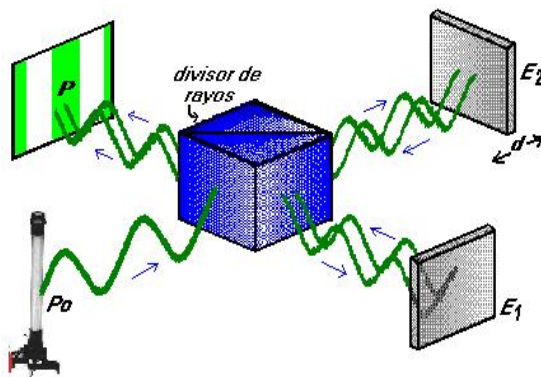


Figura 1.1a.
Coherencia temporal:
 Grado de coherencia de una onda cuando el Δt es grande como para producir Interferencia en un plano de observación P.

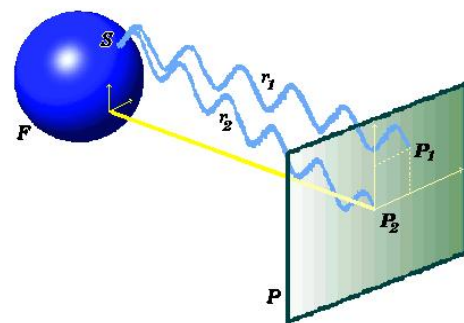


Figura 1.2b.
Coherencia Espacial:
 Coherencia de los campos luminosos en dos puntos P_1, P_2 por una fuente extendida F, a una gran distancia del plano P.

2 FASE

Si se tiene una onda plana descrita como:

$$E(r, t) = E_0 \cos(k \cdot r - \omega t + \varepsilon) \quad (2.1)$$

donde $\theta = k \cdot r - \omega t + \varepsilon$; $E(r, t)$ se presenta como una onda progresiva. Si se plantea un recorrido de media onda ó $\varepsilon = \pi$, con movimiento en la dirección de la onda, y luego, se compara con una onda similar a 2.1 con $\theta = k \cdot r - \omega t$, la diferencia de fase relativa π sería una constante.

Si la onda parte de una fase inicial φ dicho ángulo ε es una contribución constante a la fase original, siendo independiente del recorrido de la onda en términos del espacio y del tiempo.

Si la fase en algún proceso no es de gran importancia, sólo la ecuación mejorada trigonométricamente podría utilizarse, ya fuese como seno o como coseno, pero aún así, las ecuaciones serían equivalentes. Entonces, se obtendría una constante implícita en la onda, que pertenecería al ámbito de la coherencia óptica. [22]

2.1 DIFERENCIA DE FASE

Si existen dos puntos r_1 y r_2 a lo largo de la dirección de propagación, las fases son $\theta_1 = k \cdot r_1 - \omega t + \varepsilon$ y $\theta_2 = k \cdot r_2 - \omega t + \varepsilon$ respectivamente, y la diferencia de fase es:

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = k \cdot (r_1 - r_2) \quad (2.2)$$

Sin embargo, la diferencia de fase entre dos puntos a lo largo de la dirección de propagación de la onda plana es igual a la diferencia de longitud de camino geométrico multiplicado por el número de onda. Generalmente ello se cumple para cualquier rayo de luz.

Cuando la luz pasa a un medio diferente del aire, se tendría que multiplicar la longitud del camino geométrico por el índice de refracción n del medio, para obtener la diferencia de fase: [7]

Longitud de camino óptico = n * (longitud de camino geométrico);
 Diferencia de fase = k * (longitud de camino óptico).

2.2 FASE CONJUGADA

Partiendo de la onda plana descrita anteriormente (2.1) y describiendo su parte real como:

$$E(r, t) = \text{Re} \left\{ \left(\frac{E_0}{r} \right) \exp[i(k \cdot r - \omega t)] \right\} \quad (2.3)$$

La ecuación indica que el campo eléctrico de la fuente E_0 cae en magnitud como el inverso del radio, y el campo eléctrico se propaga como una onda plana con velocidad $c = \omega/k$ lejos de la fuente. Si la onda está confinada en una sola coordenada (z), la solución puede aproximarse y cambiar, para producir:

$$E(z, t) = \left(\frac{E_0}{z} \right) \exp \left\{ ik \left[\frac{i(x^2 + y^2)}{2z} \right] \right\} \exp[i(k \cdot z - \omega t)] \quad (2.4)$$

El primer término de la ecuación describe la magnitud del campo eléctrico como una función de la posición en la dirección z . El segundo término describe la fase del campo eléctrico en el plano transversal, como una función de la posición a lo largo del eje z ; este término describe la difracción del rayo. El término final, es la propagación de la onda y describe su movimiento en la dirección positiva de z . Si la solución se divide en una parte espacial y en una parte temporal y además, la parte espacial es conjugada, el resultado será:

$$E(z, t) = E^*(z) f(t) = \left(\frac{E_0}{z} \right) \exp \left\{ -ik \left[\frac{i(x^2 + y^2)}{2z} \right] \right\} \exp[-i(k \cdot z + \omega t)] \quad (2.5)$$

Esta onda esta viajando en la dirección negativa del z , pero también, puede regresar hacia la fuente, como lo plantea el tercer termino de la componente del campo eléctrico.

Además, el radio de curvatura es negativo, pero es un negativo relativo a una fuente opuesta a la fuente original; la misma curvatura aparecería como si la onda se expandiera, pero en dirección contraria. De tal modo, los rayos estarían indicando convergencia hacia la fuente original.

El proceso de conjugación de fase se obtiene, conjugando solamente, la componente espacial de un campo eléctrico. Un espejo convencional, metálico o dieléctrico, cambia la dirección de propagación, pero no afecta la fase de las componentes transversales. [24]

3. INTERFEROMETRIA

Con una fuente puntual de luz blanca, se produce un sistema de franjas por cada longitud de onda, y sus intensidades, son agregadas a cualquier punto en el plano de observación.

Si en un interferómetro, la diferencia de camino óptico al centro del plano de observación es cero para todas las longitudes de onda, el sistema de franjas, tendrán un máximo en este punto, obteniendo como resultando una franja central blanca. Sin embargo, el espaciamiento de las franjas varía con la longitud de onda. Estos espaciamientos, cambian rápidamente, mientras que el punto de observación se mueve lejos del centro del patrón, obteniendo como resultando, una secuencia de interferencia de colores. Estos colores, serán menos saturados, a medida que la diferencia de camino se incremente. [1]

La microscopía de luz óptica, provee una poderosa herramienta, examinando, evaluando, y cuantificando la micro-estructura de materiales. Esta tiene una resolución transversal de aproximadamente 250 nanómetros con una similar profundidad de campo. Además, los instrumentos tienen la ventaja de ser relativamente sencillos en su forma simple y su facilidad de operar. Definitivamente para las muestras de materiales pulidos, el microscopio óptico sigue siendo el más útil para establecer la micro-estructura de un rango de materiales.

Sin embargo, con alguna técnica visual el valor de la información derivada depende críticamente del proceso de muestreo seleccionado para la región visualizada; que representaría solo una pequeña fracción del volumen total del material. Por eso la selección de la muestra es una etapa importante en cualquier evaluación micro-estructural, ello debe asegurar que toda esta necesaria y apropiada información puede ser observada, de hecho es a menudo satisfactorio tomar datos de diferentes regiones de la muestra, examinando las tres secciones ortogonales para proporcionar el apropiado muestreo representativo. [17]

3.1 INTERFEROMETRIA A DOS ONDAS

Una gran parte del análisis de interferometría se efectúa sin especificar la forma particular de los frentes de onda y por consiguiente los resultados son muy generales. Sin embargo, se puede simplificar el análisis considerando dos fuentes puntuales P_1 y P_2 emitiendo ondas monocromáticas de la misma frecuencia en un medio homogéneo. Además, separadas una distancia d que es mucho mas grande que λ . Colocando un punto de observación P lo suficientemente lejos como para que el frente de onda sea considerado como plano (fig. 3a).

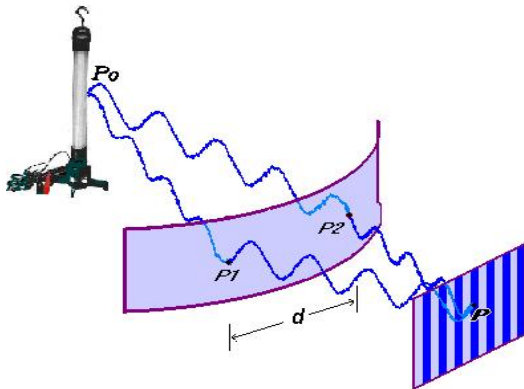


Figura 3a
Interferencia a dos Ondas:
Representación de la radiación de una fuente en un punto P_0 , cuyas ondas emitidas recorren una gran distancia hasta llegar a P .

Se consideran solo ondas polarizadas linealmente de la forma:

$$\vec{E}_1(r, t) = \vec{E}_{01} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_1) \quad (3.1)$$

$$\vec{E}_2(r, t) = \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_2) \quad (3.2)$$

Por definición se tendría que:

$$I = \langle \vec{E}^2 \rangle \quad (3.3)$$

donde $\langle \vec{E}^2 \rangle$ es el promedio en el tiempo de la magnitud de la intensidad del campo eléctrico al cuadrado. Por consiguiente $E^2 = \vec{E} \cdot \vec{E}$ en donde,

$$E^2 = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \quad (3.4)$$

Si se toma el promedio de las intensidades se tiene:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (3.5)$$

donde $I_1 = \langle \vec{E}_1^2 \rangle$, $I_2 = \langle \vec{E}_2^2 \rangle$, y $I_{12} = 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle$, la ultima expresión se conoce como el término de interferencia. Para el caso que se esta trabajando se llega a:

$$E_1 \cdot E_2 = \vec{E}_{01} \cdot E_{02} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - wt + \varepsilon_1) \times \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - wt + \varepsilon_2) \quad (3.6)$$

Recordando que el promedio del tiempo de alguna función f(x), tomado sobre un intervalo T, es

$$\langle f(x) \rangle = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} f(\tau') d\tau' \quad (3.7)$$

El periodo τ de las funciones armónicas es $2\pi/w$ y para este caso $T \gg \tau$.

El coeficiente $1/T$ de la integral tiene un efecto dominante.

Después de Multiplicar y sacar el promedio, la ecuación 3.6 queda

$$\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \varepsilon_2) \quad (3.8)$$

Donde $\langle \cos^2(wt) \rangle = 1/2$, $\langle \sin^2(wt) \rangle = 1/2$, $\langle \cos(wt) \sin(wt) \rangle = 0$. El término de Interferencia es:

$$I_{12} = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos \varphi \quad (3.9)$$

Y φ , es igual a $(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \varepsilon_2)$, es la diferencia de fase que proviene de combinar una diferencia de longitud de trayectoria y una diferencia de fase inicial. Normalmente \vec{E}_{01} es paralelo a \vec{E}_{02} por lo que la intensidad se reduce a:

$$I_{12} = E_{01} \cdot E_{02} \cos \varphi \quad (3.10)$$

Y la intensidad total queda:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (3.11)$$

El resultado de la intensidad no llega a ser solamente la suma de las intensidades $I_1 + I_2$ de las dos ondas parciales, sino que el término $2(I_1 I_2)^{1/2} \cos \varphi$ es el término de interferencia. I es mínima cuando $\cos \varphi = -1$, las dos ondas se encuentran en anti-fase, lo cual lleva a la interferencia destructiva; y cuando $\cos \varphi = 1$, la intensidad es máxima, las dos ondas están en fase y resulta una interferencia constructiva.

Si $I_1 = I_2 = I_0$, la ecuación de intensidad resulta:

$$I = 2I_0 [1 + \cos \varphi] = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) \quad (3.12)$$

Es decir la intensidad varía entre 0 y $4I_0$. [22] [7]

4. ESPECTROSCOPIA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (E.T.F.)

Para una fuente de muchas frecuencias, el interferograma es la suma de los flujos de cada patrón de longitud de onda. El análisis de Fourier hace posible convertir el interferograma en una señal de espectro versus la frecuencia. En el análisis de Fourier de picos del interferograma para cada frecuencia, se determina la magnitud del flujo a esta frecuencia conocida como el coeficiente de Fourier. [17]

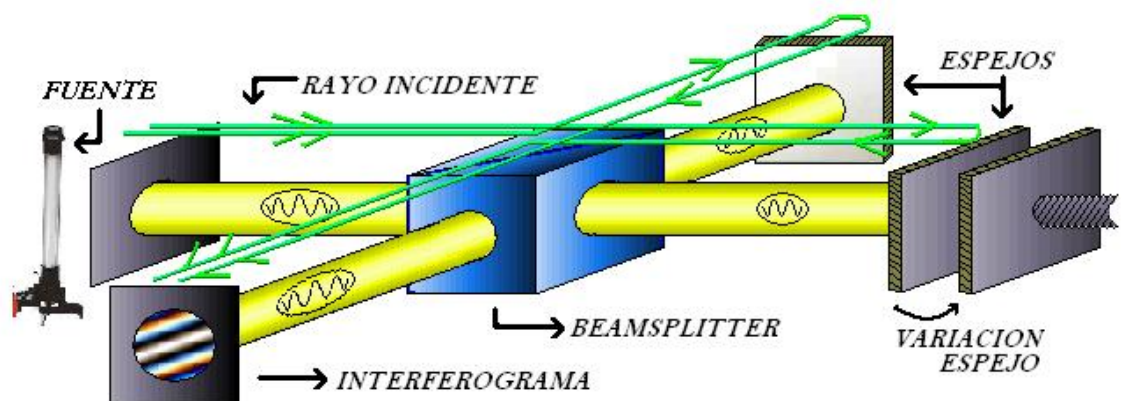


Figura 4a
Representación del montaje realizado por Michelson
Con el fin de producir interferencia por división de
Amplitud de la onda.

4.1 CONCEPTO DE E.T.F.

El componente óptico mas básico para obtener el espectro de la transformada de Fourier, es un interferómetro tipo Michelson; es posible con un interferómetro semejante y una instrumentación asociada codificar la información espectral con respecto a una fuente en forma de una señal

eléctrica llamada interferograma. Este, cuando es apropiadamente analizado produce el espectro de la fuente.

La ecuación para la porción de señal puede darse como:

$$I(x, y, z, \lambda) = A(x, y, \lambda) + B(x, y, \lambda) \cos \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) z + \varphi \right] \quad (4.1)$$

Es una onda coseno, y la intensidad depende de la fuente. Donde $A(x, y, \lambda) = I_1 + I_2$ y $B(x, y, \lambda) = 2(I_1 I_2)^{1/2}$, se relaciona con la ecuación planteada anteriormente (3.11); $I(x, y, z, \lambda)$ es la intensidad de salida como una función del desplazamiento z ; $B(x, y, \lambda)$ es la función de correlación de los dos frentes de onda, donde se puede decodificar, conociendo el espectro de la fuente, la reflectividad en amplitud y fase de la muestra; la señal $I(x, y, z, \lambda)$ constituye el interferograma.

La frecuencia de oscilación depende de dos factores. Primero, de la frecuencia de llegada de la radiación electromagnética y segundo, de la velocidad del desplazamiento de uno de los espejos del interferómetro para la toma del interferograma. Cada frecuencia de salida puede ser tratada independientemente y por lo tanto la salida puede ser la suma de todas las oscilaciones coseno causadas por todas las frecuencias ópticas en la fuente.

En una diferencia de camino cero para las longitudes de onda, todas están en fase y si la muestra se mueve o el espejo si es el caso; ellos rápidamente suman hacia un valor promedio estable. El resultado de la señal que se obtiene por el movimiento de la muestra es el interferograma.

Esto puede ser expresado matemáticamente como:

$$I(x, y, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(x, y, \lambda) d\lambda + \int_{-\infty}^{+\infty} B(x, y, \lambda) \cos \left(\frac{2\pi z}{\lambda} \right) d\lambda \quad (4.2)$$

Esta ecuación es simplemente la integral de la ecuación para la fuente sobre el dominio de la longitud de onda λ ; $I(x, y, z)$ es otra vez el interferograma y $B(x, y, \lambda)$ es una función de la longitud de onda, es el espectro.

Matemáticamente la ecuación 4.2 es la transformada coseno de Fourier; la información se puede decodificar realizando la transformada inversa:

$$A(x, y, \lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, z) dz \quad (4.3)$$

$$B(x, y, \lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, z) \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) d\lambda \quad (4.4)$$

Las ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4 proveen una relación entre el interferograma $I(x,y,z)$ y el espectro $B(x,y,\lambda)$. Midiendo el interferograma, el espectro puede ser encontrado tomando su transformada de Fourier; la operación matemática se indica por la ecuación 4.4.

Generalizando, pocas veces los interferogramas son simétricos, esta dificultad de hallarlos es perfectamente compensada por el interferómetro, por el uso de un rango extenso de longitudes de onda. Esta no perfecta compensación lleva componentes de seno en el interferograma y por lo tanto asimetría. Esto significa que, en general el interferograma y el espectro pueden ser relacionados por la transformada compleja de Fourier,

$$I(x, y, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(x, y, \lambda) e^{2\pi iz\lambda} d\lambda \quad (4.4)$$

y

$$B(x, y, \lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, z) e^{-2\pi iz\lambda} dz \quad (4.5)$$

El término exponencial contiene contribuciones seno y coseno.

Es útil considerar un interferograma compuesto, combinación de los interferogramas monocromáticos. Cada interferograma puede tener un gran máximo central y en los lados puede ser una pequeña fluctuación sinusoidal.

La información con respecto al fondo puede ser contenida en la porción central del interferograma y la fluctuación sinusoidal en los lados, puede ser indicativo de la presencia de una estrecha banda en el espectro. Esto es ilustrado en la figura 4.2a con un interferograma experimental.

El interferograma resulta de la observación de una fuente con ancho de banda; solo una pocas y débiles bandas absorbidas están presentes como puede verse desde los espectros de las figuras 4.2b, 4.2d y 4.2f. [12]

4.2 OBTENCIÓN DEL ESPECTRO

La transformada de Fourier de una onda como la mostrada en la figura *4.2a*, vista de una manera simple, su transformación de Fourier en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia produce un pico de ancho cero y una frecuencia de la onda oscilante, figura *4.2f*.

En un interferograma las componentes de frecuencia están directamente relacionadas al espectro de la fuente.

Los límites de la integral en la transformada de Fourier, relaciona el rango de $-\infty$ a $+\infty$. En otras palabras, para reconstruir el espectro exacto de la fuente, el interferograma debe ser medido de $-\infty$ a $+\infty$.

Esto es obviamente imposible, como se ve para un espejo de un interferómetro de Michelson, que puede ser movido una distancia finita; es importante considerar que efectos tiene esto en el espectro resultante.

Los efectos de tomar ciertos rangos del interferograma para la resolución se puede dar por transformación experimental al tomar los diferentes rangos para restringirlo. De la figura *4.2a* hay que notar que para una corta extensión del interferograma (rangos α, β, γ), la información del fondo continuo es obtenida y discutida, según se aumenta la medida de la información del interferograma respecto a la limitación de los lóbulos laterales; Puede ser visto, por supuesto la equivalencia al mejoramiento en la resolución.

El interferómetro solo contiene la frecuencia normal de la forma de la onda a un bajo rango de frecuencias, la fase relaciona todas las frecuencias, y utilizando la transformada de Fourier se obtiene el espectro. [12]

El mejoramiento de la resolución con respecto al espectro incluye la obtención de la información de fase, como se observa en la figura *4.2b*; el espectro obtenido para el rango α contiene la información de frecuencia relacionada con el fondo continuo, cuando se toma el rango β figura *4.2d*, se obtiene una mejor percepción de lo que pertenece al fondo continuo, a la frecuencia en el espectro y a los lóbulos del espectro que no son relevantes al proyecto.

En el rango γ figura *4.2f*, es de notar la degradación de los lóbulos y el realzamiento de la información destacada de la fuente.

Por este precedente se tiene la confianza de obtener información de fase concreta cuando se trabaja con todo el interferograma y no con subsecciones que pueden disimular lo verdaderamente logrado con el mismo.

Hay que notar que al aumentar el rango de medida, se mejora la información en el espectro, y se consiguen particularidades en la fase que podrían interpretarse como grandes aportes de información Fig. 4.2c, 4.2e, 4.2g. Aunque se haya aumentado el rango, estos datos se pueden mejorar al hacer un análisis del mismo, en este caso 4.2g se relaciona a una linealidad y se aproxima a esta sin perder el concepto de lo que se tiene. Obteniendo resultados legítimos al abarcar la totalidad del interferograma.

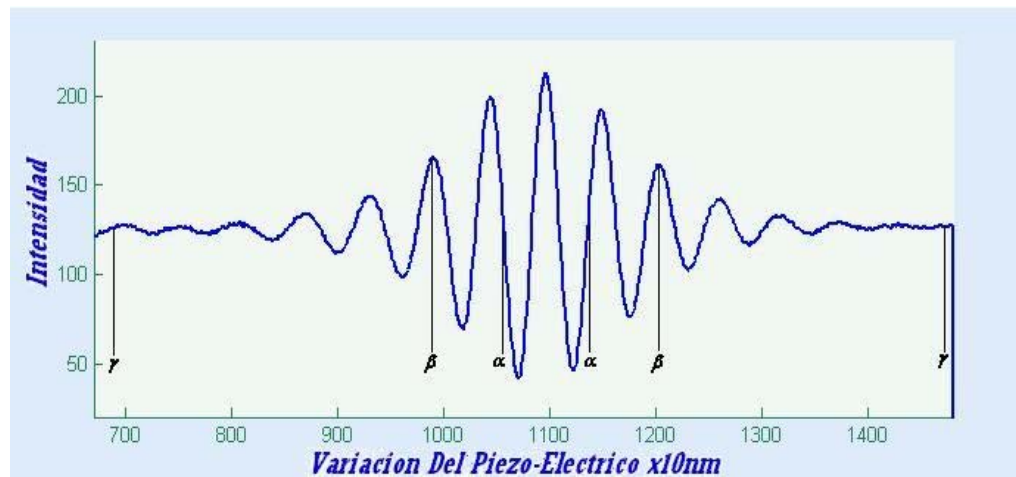
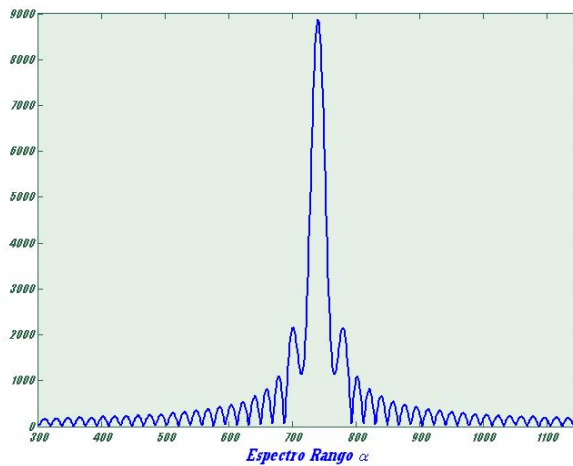
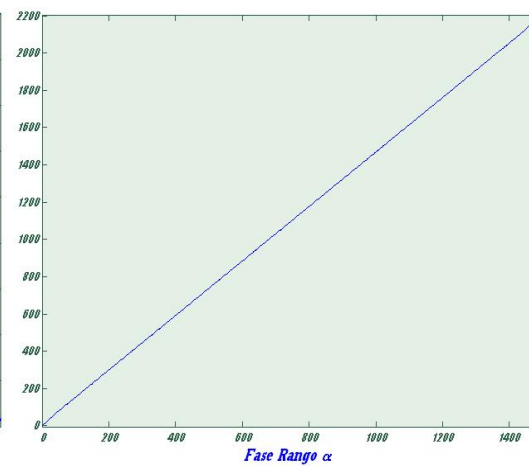


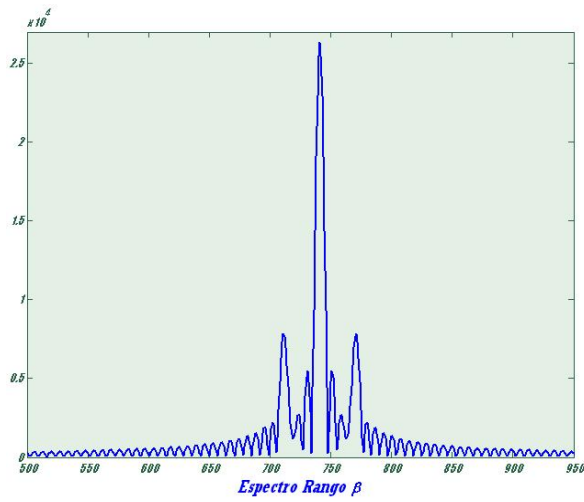
Figura 4.2a



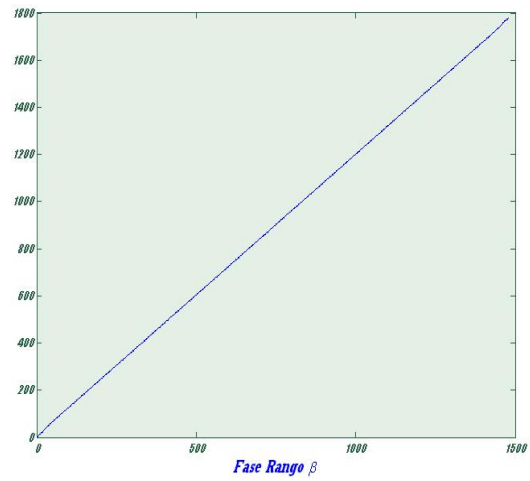
4.2b



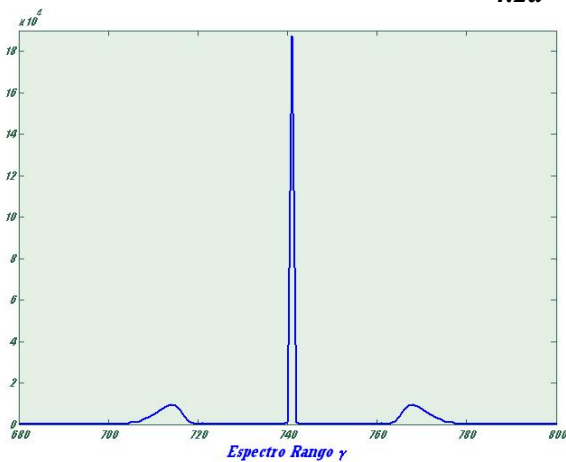
4.2c



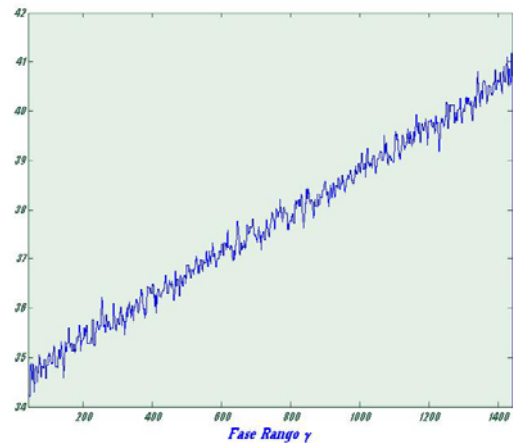
4.2d



4.2e



4.2f



4.2g

Figura 4.2 Estudio de la resolución del espectro y fase al tomar tres rangos de longitud del interferograma. En 4.2a se encuentra el Interferograma con los rangos a tomar α , β , γ ; 4.2b-4.2d, 4.2f - 4.2c, 4.2e, 4.2g se dan como espectro y una sección de la fase de los rangos α , β , y γ respectivamente

La figura del interferograma dada anteriormente fig. 4.2a corresponde a uno de los materiales de la muestra (aluminio), y se divide en tres secciones para decodificar el espectro y la fase. Al tomar el rango más extenso se obtiene un espectro fig. 4.2f, con sus lóbulos perteneciente al fondo continuo y a la frecuencia del interferograma. De este mismo se obtiene la fase fig. 4.2g que ofrece una mejor resolución en comparación con las fases de los rangos α , β ; en base a esto, al decodificar la información se toman los rangos mas extensos de los interferogramas.

5 MICROSCOPIO INTERFEROMETRICO

La interferencia de dos rayos en microscopios es ampliamente usada para estudiar la transparencia de los objetos, y la estructura de las superficies. Los primeros instrumentos usados para cada estudio se basaron en los interferómetros de Michelson y Mach Zehnder. En el caso del interferómetro de Michelson para grandes aumentos, la configuración apropiada se puede dar para un divisor de rayos que dirige la luz a dos objetivos idénticos, uno viendo la superficie del objeto estudiado, y el otro un espejo de referencia, este sistema se adapta a la microscopia y el diseño se modifica a dimensiones reducidas, que pueden ser contenido en un microscopio; el diseño usado comúnmente y más adecuado es el interferómetro tipo Mirau; modelo que ajusta su sistema al objetivo del microscopio.

5.1 EL INTERFEROMETRO DE MIRAU

El interferómetro de Mirau usa un sistema óptico muy compacto el cual puede ser incorporado en un objetivo de microscopio, como el mostrado en la figura *5.1a*, la luz de un iluminador incide a través del objetivo de microscopio en un divisor de rayos. El rayo transmitido va a la superficie del objeto, mientras el rayo reflejado esta dirigido a un lugar aluminizado en la superficie frontal del objetivo del microscopio. El segundo rayo reflejado es recombinado en el mismo divisor de rayos y retorna a través del objetivo. El patrón de interferencia es formado en los contornos del plano imagen de las desviaciones de la superficie del objeto. [1]

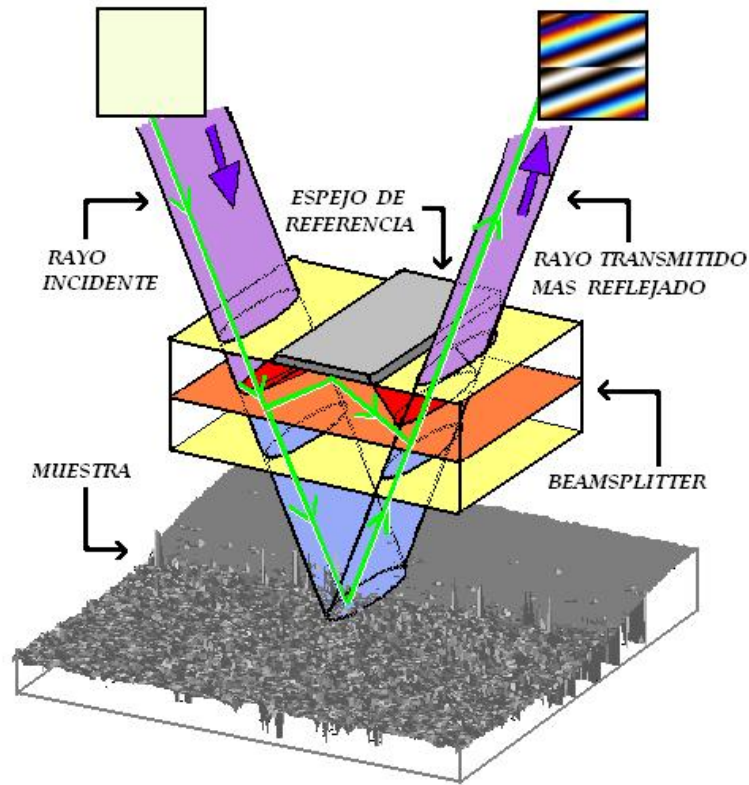


Figura 5.1a Representación del modelo interferométrico ideado por Mirau contenido en el objetivo del microscopio. El rayo incidente se divide en dos (rojo y azul) y luego recorren uno la superficie del material y otro un espejo de referencia, se vuelven a unir formando el patrón de franjas.

5.2 INTERFEROMETRIA CON LUZ BLANCA

El problema de las ambigüedades de fase 2π es mejorado usando luz blanca y examinando el objeto a profundidad. Se asume que el origen de coordenadas es tomado en un punto en el eje z en el cual los dos caminos ópticos son iguales, y la superficie estudiada es movida a lo largo del eje z (eje perpendicular al plano de la muestra), en series de pasos de tamaño Δz . Volviendo a expresar la ecuación (4.1) en función de diferencias de longitudes, la intensidad en cualquier punto en el plano imagen, correspondiente a un punto del objeto con altura h , puede ser escrita como:

$$I(z) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} g(p) \cos \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) p + \varphi_0 \right] \quad (5.1)$$

Donde I_1 y I_2 son las intensidades de los dos rayos que actúan independientemente, $g(p)$ es la franja visible, o función de coherencia (la cual corresponde a la envolvente de las franjas de interferencia), y el $\cos[(2\pi/\lambda)p+\varphi_0]$ es una modulación cosenoidal. En la ecuación 5.1, λ corresponde a la longitud de onda de la fuente; $p=2(z-h)$ es la diferencia en las longitudes de los caminos ópticos atravesados por los rayos, y φ_0 es la diferencia de fase que cambia debido a la reflexión en el divisor de rayos y los espejos.

La figura 5.2a muestra las variaciones de intensidad en un punto dado de la imagen cuando el objeto es examinado a lo largo de la altura del eje Z. Cada uno de estos patrones de interferencia puede ser procesado para obtener la envolvente de las variaciones de intensidad (la función de franjas visibles), determinando el pico de amplitud de variación de intensidad, así como la localización de este pico a lo largo del eje examinado. Los valores de la amplitud del pico corresponden a una imagen del objeto puesto a prueba; mientras los valores de localización de este pico a lo largo del eje medido ofrecen información de altura en la superficie en los puntos correspondientes.

El método mas ampliamente usado en recuperación de la función visible de franjas de los datos muestreados es el filtrado digital en el dominio frecuencial. Este proceso implica dos transformadas de Fourier (directa e inversa) a lo largo de la dirección z por cada píxel en la muestra. Además, el tamaño del paso en la dirección z corresponde a un cambio en la diferencia de camino óptico menor que un cuarto de la longitud de onda; típicamente, el paso Δz esta alrededor de los 50 nm.

Consecuentemente, este procedimiento requiere una gran cantidad de memoria y tiempo de procesamiento, estos requerimientos pueden ser reducidos y obtener buena precisión, por modificación del muestreado y técnicas de procesamiento. [1]

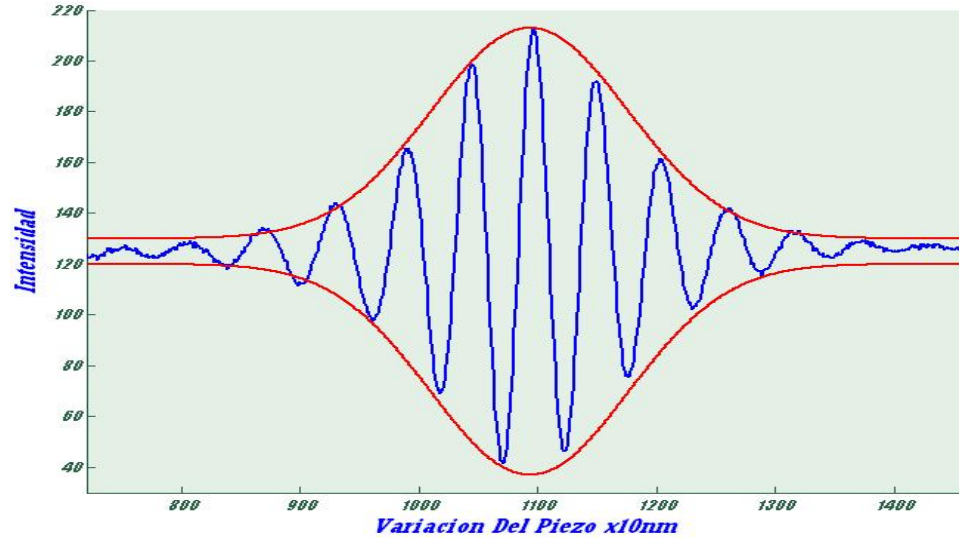


Figura 5.2a Imagen de un interferograma modulado. Iluminación realizada con luz blanca sobre la muestra que contiene el material de aluminio.

6. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE SUPERFICIES

6.1 DETECCION DE MÁXIMOS

Es una técnica que utiliza el interferograma creado por una fuente policromática, en la cual se presenta un máximo de intensidad en los puntos donde la diferencia de camino óptico es cero. La técnica consiste en localizar la posición de máxima intensidad del interferograma para todos los puntos de la muestra, desplazando en dirección vertical uno de los brazos del interferómetro. El método utilizado trata de desplazar la muestra verticalmente, movimiento que está dirigido por un piezo-eléctrico, cuya finalidad es desplazar la franja de intensidad máxima del interferograma para el área de estudio. Los pasos del piezo eléctrico serán guardados para formar una imagen que llegue a contener los 256 niveles pedidos para el tratamiento de la imagen, asociando a cada nivel una altura respectiva; si Δz es el paso dado por el piezo-eléctrico, la resolución axial del sistema es: [3] [23]

$$R=[(Z/256)+1]. \Delta z \quad (6.1)$$

6.2 EXTRACCION DE TOPOGRAFÍA

Siguiendo el proceso para la obtención de máximos, al obtener para cada punto la máxima intensidad en una ubicación en píxeles, se guarda la altura de dicho máximo en el área x-y en que se está trabajando.

De esta manera se conserva la relación que existe para las tres coordenadas x-y-z, y la altura de la superficie tiene correspondencia con el intervalo del paso límite entre los extremos (mínimo desplazamiento en el cual se encontró un máximo de intensidad y el máximo desplazamiento en el que se encontró el máximo de intensidad), en el que se encontraron todos los máximos de intensidad en el área x-y. [23]

6.3 INTERFEROGRAMA

Buscando aprovechar el comportamiento del interferograma con luz blanca, se acciona el piezo-eléctrico, y tomando como referencia una línea de la imagen de la muestra se graba la intensidad que pasa por esta durante todo el barrido del piezo. Se obtiene así una imagen con las dimensiones del desplazamiento total del piezo-eléctrico. En la Fig. 6.3a y fig. 6.3b se observan dos sistemas de franjas producidos en los límites de dos materiales de una muestra estudiada; los cuales dan a conocer el cambio de reflectividad de un material comparado con otro. El interferograma de toda la pieza muestra el estado de superficie de los materiales dando las cualidades ópticas necesarias y válidas para el estudio.

La modulación de las franjas en cada material da a conocer el estado de rugosidad del material (ver Anexo B). [3]

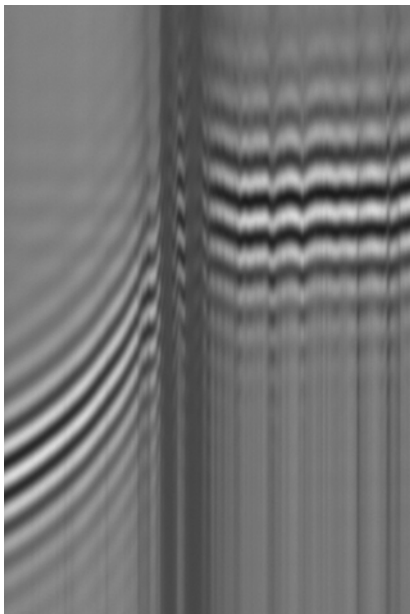


Figura 6.3a
Imagen adquirida que contiene el interferograma de dos materiales. La franja central oscura representa el límite para los mismos; lado izquierdo interferograma primer material, lado derecho interferograma segundo material.

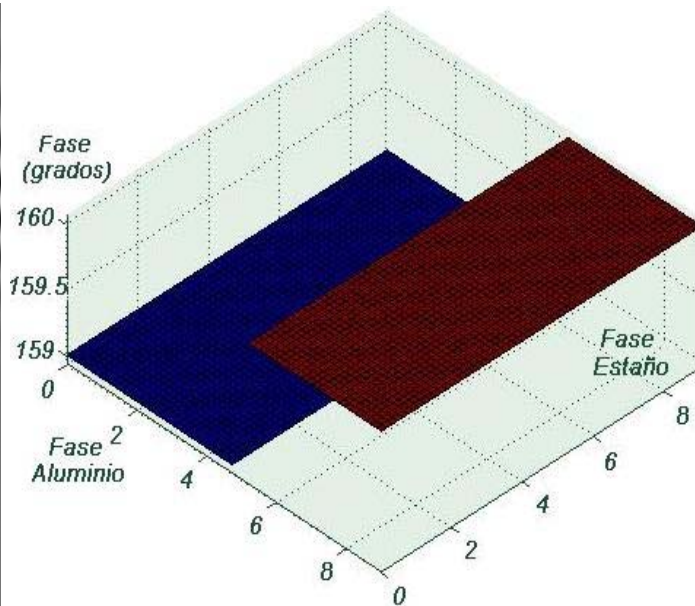


Figura 6.3b
Representación de la fase del interferograma en 3D. El plano inferior corresponde a la primera parte del interferograma, y el superior corresponde a la segunda parte (el interferograma y el plano de fases es del objeto cuatro).

7 CARACTERIZACION DE TEXTURA

Las medidas de una imagen con respecto a su textura pueden utilizarse para dividir dicha imagen en segmentos, y estos segmentos tendrían una noción de lo que esta textura puede depender. Las secciones que se estudian deben ser morfológicamente uniformes y tendrán aproximadamente la misma dimensión por todas las partes de la región texturada. La descripción de la textura suele ser cualitativa por la desigualdad que esta presenta y que se da para las condiciones de visión; las desigualdades se distinguen en las inmediaciones de un punto en una imagen.

El estudio de textura en los materiales depende intrínsecamente del tamaño de la vecindad de la observación. [4]

La observación de la textura depende sobretodo de las condiciones de iluminación, ángulos de visión y distancia, además del color y de la forma, esta, ayuda a distinguir al objeto en algún escenario. La textura agrega realismo a las imágenes sintetizadas. [6]

El estudio de superficie se realiza con herramientas que aportan de una manera significativa descripciones concretas. Para el estudio de superficie los modelos como análisis por histograma o detección de bordes, no son tan competentes ante las muestras como son la correlación y la transformada de Fourier.

Sabemos del histograma que se trabaja en base a los niveles de intensidad con respecto al tamaño de la imagen en píxeles; pero en este proyecto se trabajan superficies pulidas y consideradas planas, por lo tanto tendría una iluminación uniforme sobre la planicie de la muestra y el aporte sería inapreciable.

La detección de bordes podría no ser concreta al momento de ilustrar una delimitación, ya que se podría presentar el hecho de que no hubiese uniformidad en un solo material y la técnica no lo considere para ambos materiales, y los resultados carezcan de confiabilidad.

7.1 TEXTURA POR TRANSFORMADA DE FOURIER

Varios estudios han considerado el análisis textural basado en el espectro de Fourier de una región de la imagen, porque el grado de las variaciones de la textura es proporcional a su período espacial. Una región de textura gruesa debe concentrar su energía espectral de Fourier en las frecuencias espaciales bajas. Inversamente, las regiones de textura fina deben exhibir una concentración de la energía espectral en altas frecuencias espaciales. Aunque esta correspondencia existe a un cierto grado, las dificultades se presentan a menudo debido a cambios espaciales en el período y la fase del patrón de la repetición en la textura. [14]

Teniendo las respectivas imágenes de cada parte de las muestras, preparadas para este nuevo proceso, se implementa la transformada de Fourier bidimensional; se analizan sus periodicidades y la cantidad de información que posean así como imprevistos que surjan y que son detectados en el proceso. [14]

Se puede hacer un filtrado para obtener la estructura periódica, ya que la información de toda la imagen se concentraría en las bajas frecuencias espaciales, mientras que la periodicidad en las altas frecuencias espaciales, obteniendo un descriptor para los objetos en estudio.

Dicho filtrado se hará en el espacio de frecuencia, esto por la evidente diferencia entre lo que es cíclico para la imagen de lo que no lo es.

Para extraer la información correspondiente a alguna trama periódica de los metales, se diseña un filtro que reduzca las frecuencias correspondientes al fondo de la imagen y realce las frecuencias correspondientes a las periodicidades de la misma, como máximos locales o picos destacados. [13]

La transformada de Fourier de dos dimensiones para la función imagen $F(x,y)$ esta definida como:

$$\mathfrak{F}(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) \exp\{-i(ux + vy)\} dx dy \quad (7.1)$$

donde u y v son las frecuencias espaciales y $i = \sqrt{-1}$. Simbólicamente, la transformada de Fourier es escrita como

$$\mathfrak{F}(u, v) = TF\{F(x, y)\} \quad (7.2)$$

En general, el coeficiente de Fourier $\mathfrak{F}(u,v)$ es un número complejo que puede ser representado de una forma real e imaginaria como:

$$\mathfrak{F}(u, v) = R(u, v) + iI(u, v) \quad (7.3)$$

O en la forma de magnitud y ángulo de fase como:

$$\mathfrak{F}(u, v) = M(u, v) \exp\{i\varphi(u, v)\} \quad (7.4)$$

donde:

$$M(u, v) = [R^2(u, v) + I^2(u, v)]^{1/2} \quad (7.5)$$

$$\varphi(u, v) = \arctan\left\{\frac{I(u, v)}{R(u, v)}\right\} \quad (7.6)$$

Una condición suficiente para la existencia de la transformada de Fourier de $F(x,y)$ es que sea absolutamente integrable. Esto es,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)| dx dy < \infty \quad (7.7)$$

La función de entrada $F(x,y)$ puede ser recuperada de esta transformada de fourier por inversión de la formula

$$F(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathfrak{F}(u, v) \exp\{i(ux + vy)\} dudv \quad (7.8)$$

O en un operador de la forma:

$$F(x, y) = TF^{-1} \{ \mathfrak{F}(u, v) \} \quad (7.9)$$

Las funciones $\mathfrak{F}(u, v)$ y $F(x, y)$ son llamada la transformada de Fourier directa e inversa. [4]

Se puede volver a expresar la transformada de Fourier en términos de sus componentes reales e imaginarios:

$$\mathfrak{F}(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) \cos(ux + vy) dx dy - i \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) \sin(ux + vy) dx dy \quad (7.10)$$

Si $F(x, y)$ es una función real, entonces la transformada de Fourier se puede obtener calculando la transformada coseno:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) \cos(ux + vy) dx dy \quad (7.11)$$

Y la transformada seno:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) \sin(ux + vy) dx dy \quad (7.12)$$

Si $F(x, y)$ no es sólo valores reales, pero es uniforme, se necesitaría solamente calcular la transformada coseno. Si $F(x, y)$ es compleja, puede ser expresada como $F(x, y) = \eta(x, y) + i\xi(x, y)$ y la transformada de Fourier será:

$$\mathfrak{F}(u, v) = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(x, y) \cos(ux + vy) dx dy + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \xi(x, y) \sin(ux + vy) dx dy \right] - i \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \xi(x, y) \cos(ux + vy) dx dy - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(x, y) \sin(ux + vy) dx dy \right] \quad (7.13)$$

Esta ecuación demuestra el cálculo para la transformada de Fourier de una función general; debemos evaluar las transformada seno y coseno de los componentes reales e imaginarios de $F(x,y)$. En general, la transformada de Fourier es una función compleja, representada como:

$$\mathfrak{F}(u, v) = F(u, v) \exp - i\varphi(u + v) \quad (7.14)$$

Se traza la amplitud del espectro $F(u)$ y la fase del espectro $\varphi(u)$. Si la función original $F(x,y)$ es real y uniforme, entonces $\varphi(u)$ es una constante y se ignora.[27]

7.2 TEXTURA POR CORRELACION

La función del correlación se ha sugerido como la base de una medida de la textura [4] [6]. Aunque se ha demostrado que es posible generar campos estocásticos visualmente diversos con la misma función de correlación, éste no elimina necesariamente la utilidad de una característica de correlación fijada para las imágenes naturales.

La salida de cualquier sistema lineal es la convolución de la función de entrada y la respuesta impulsional del sistema. En dos dimensiones la convolución de dos funciones, $F(x,y)$ y $h(x,y)$, es:

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(u, v) h(x - u, y - v) dudv \quad (7.15)$$

La cual también puede ser escrita como

$$f(x, y) = g(x, y) * h(x, y) \quad (7.16)$$

donde el símbolo * denota la operación de convolucion.

La correlación cruzada de dos funciones, $g(x,y)$ y $h(x,y)$, es:

$$c(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g^*(u, v) h(x + u, y + v) dudv \quad (7.17)$$

donde $g^*(u,v)$ es el complejo conjugado de $g(u,v)$. La ecuación anterior puede describirse como:

$$c(x, y) = g(x, y) \otimes h(x, y) \quad (7.18)$$

Donde el símbolo \otimes denota la operación de correlación [1]. Una comparación de la ecuación 7.18 con la ecuación 7.15 muestra que la correlación cruzada puede también ser expresada como una convolucion

$$c(x, y) = g^*(x, y) * h(-x, -y) \quad (7.19)$$

La autocorrelación de una función $g(x,y)$ es entonces:

$$\begin{aligned} a(x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g^*(u, v) g(x+u, y+v) dudv \\ &= g(x, y) \otimes g(x, y) \end{aligned} \quad (7.20)$$

8. RESULTADOS

Las regiones de los materiales metálicos que son analizados no presentan características singulares con respecto así mismos, su topografía se describe por su superficie pulida y su color esta dado por los niveles de gris. De esta manera se presentan materiales con las mismas condiciones iniciales, haciendo que en su estudio por transformada de Fourier no existan factores que involucren a unas muestras y a otras no. Desigualdad que impediría la caracterización de los mismos.

Con el fin de obtener unas imágenes apropiadas para el estudio, se analizaron diferentes regiones; cinco reconstrucciones que contenían topografía, imagen de máxima intensidad e interferograma para cada muestra, y de la cual se seleccionó una reconstrucción para cada objeto. Este estudio se realizó con un microscopio interferométrico (Nikon Eclipse ME600) y con una fuente de luz blanca ver Fig. 8.a. La reconstrucción se realizó con ayuda de un piezoeléctrico cuyo desplazamiento es controlado por un programa en visual C++ con ayuda de una herramienta de matrox, la librería MIL, la cual permite hacer adquisiciones dinámicas y obtener la información deseada.

Cada muestra contiene dos materiales los cuales se analizan en el limite de los mismos, son preparados con la idea de tener la superficie de la muestra totalmente plana; de allí que estas fueron pulidas. La adquisición de las imágenes se realizaron en un limitado tiempo después de preparadas, esto con el fin de que no llegasen a ser alteradas por un cambio físico o químico y que estuvieran en las mejores condiciones posibles.

La obtención de los datos fue obtenida con un objetivo Mirau a un factor de ampliación de 50X y una región de estudio que no excedía una longitud de ochenta micras.



Figura 8a. Montaje experimental para el estudio de las muestra; El computador esta conectado al piezo eléctrico por medio del traslador (ampliación inferior), quien se encarga del movimiento de la muestra, información que es captada por una CCD (ampliación superior derecha), las muestras (lateral izquierdo) son ubicadas con se indica en la ampliación lateral derecho.

8.1 VISUALIZACION DE TEXTURA

En las imágenes de topografía y de intensidad tomadas para cada muestra que aparecen a continuación presentan la concepción de lo que se daría como textura. Al tener la imagen representativa de la topografía se dan los datos reales del estado de superficie de la muestra y se conoce las verdaderas dimensiones de la región tomada, y teniendo una imagen de máxima intensidad de todos los puntos de la muestra para cada material, se observa la dependencia de esta a su estado de superficie, convergiendo los dos conceptos en uno solo.

Al describir los detalles presentados en la superficie del material*, convino tener la superficie lo mas llana posible de manera que se restara una geometría aditiva a la muestra, simplificando la separación de los detalles pertenecientes a ese único material de una magnitud que implicaría ser descartada.

De esta manera el concepto de textura se fortalece atribuyéndose de una forma cualitativa como se presenta ante los sentidos; partiendo del hecho de tener la superficie del material, su textura no se ve evidenciada ya sea por iluminación o por la capacidad del microscopio, entonces el superponer la iluminación que presenta el material en general con los detalles de la topografía, da a cada píxel de la topografía una iluminación correspondiente y uniforme.

A la ubicación espacial de la topografía se le asigna la imagen de máxima intensidad que posee el material para el mismo píxel. Se obtiene una nueva imagen que contiene la información de su estado de superficie con su iluminación correspondiente, resaltando detalles, precisando el realce contenido para dicho material con la aplicación que puede tener el sistema empleado.

Se presentan características en los materiales de manera cuantitativa pero en el caso de textura es más sencilla una manera cualitativa.

* *Las muestras u objetos presentados para interpretarse mejor se designan en dos secciones, lado **a** (izquierdo) y lado **b** (derecho) para el material señalado.*

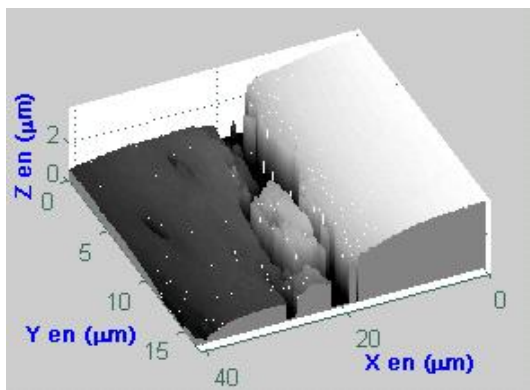


Figura 8.1a

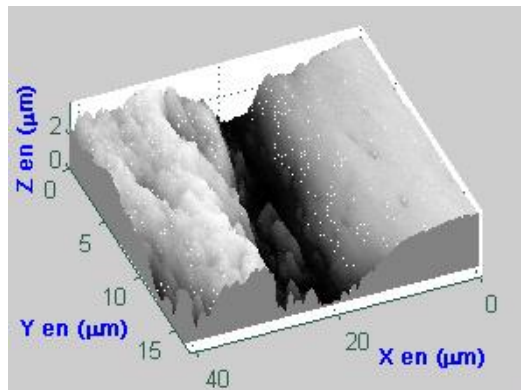


figura 8.1b

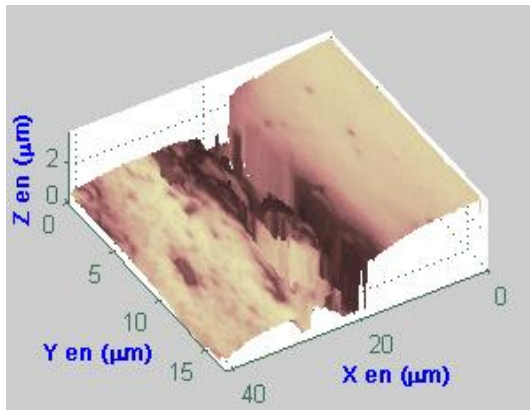


Figura 8.1c

Imagen de topografía Fig. 8.1a, intensidad fig.8.1b, y la unificación en una imagen dada como representación de la textura fig. 8.1c, imágenes pertenecientes al primer objeto. Se divide en dos secciones la sección derecha y 1b sección izquierda de las imágenes

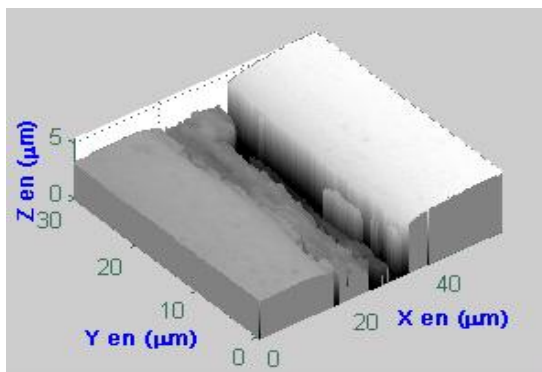


Figura 8.1d

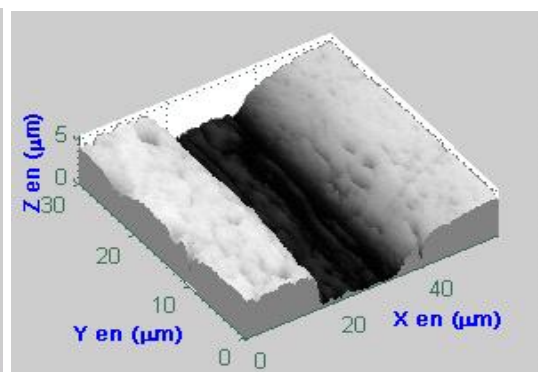
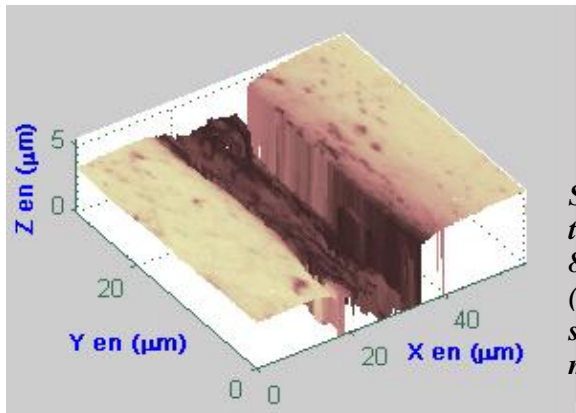


Figura 8.1e

Se tiene una muestra que contiene los materiales Aluminio (1b), y uno que no se ha definido (1a), en la imagen de máxima intensidad, se hace notar la equivalencia que hay entre ambos, que tan reflectivos llegan a ser, esto se ilustra en la *figura 8.3a-a* y al representar la textura la muestra cambia lo suficiente al compararla con su topografía. Y del segundo objeto, la tendencia a una similitud en su estado de superficie, *Fig. 8.1f*. tienen el mismo material.



Segundo objeto estudiado, figuras de topografía, intensidad y textura, fig. 8.1d, fig. 8.1e, fig. 8.1f respectivamente. Primer lado (2a), es la sección izquierda de las figuras, segundo lado (2b) es la sección derecha de las mismas.

Figura 8.1f

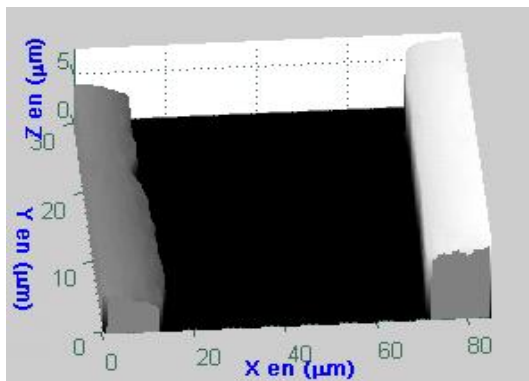


Figura 8.1g

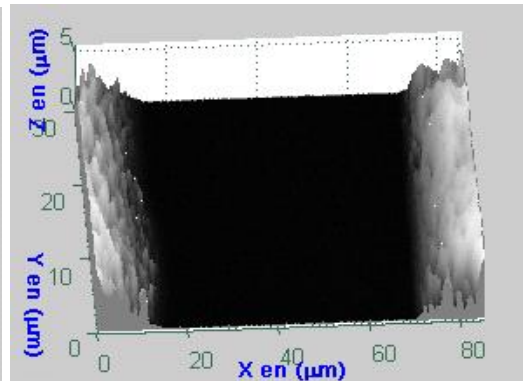


Figura 8.1h

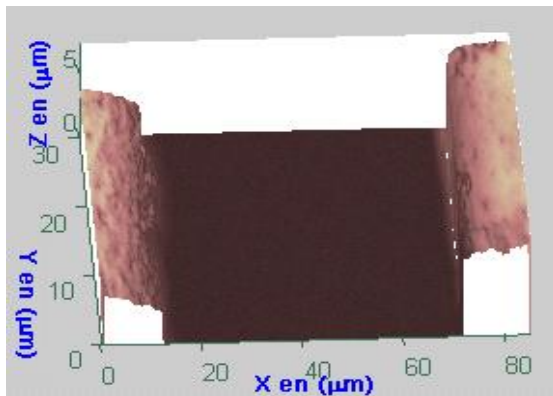


Figura 8.1i

Imágenes del tercer objeto, hay que notar que la región oscura representa vacío entre los dos materiales.

Topografía, intensidad, textura, fig.8.1g, fig8.1h, fig8.1i, respectivamente.

Primer parte (3a) lado izquierdo, segunda parte (3b) lado derecho.

Para las muestras vistas se ve claramente en las imágenes de textura la similitud del material que no está definido. Para todas; se encuentra localizado en la región derecha de las mismas. Y presentan el mismo carácter en la rugosidad dado por la distribución de iluminación uniforme.

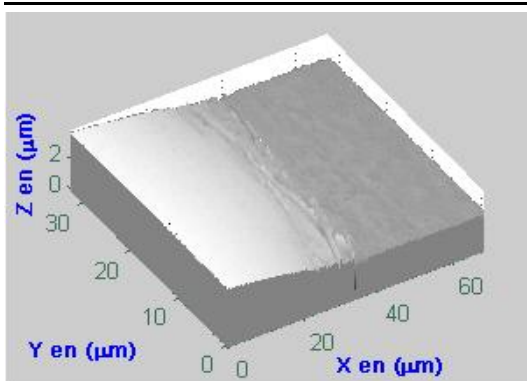


Figura 8.1j

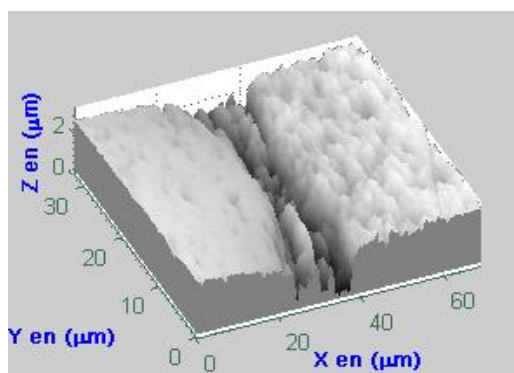


Figura 8.1k

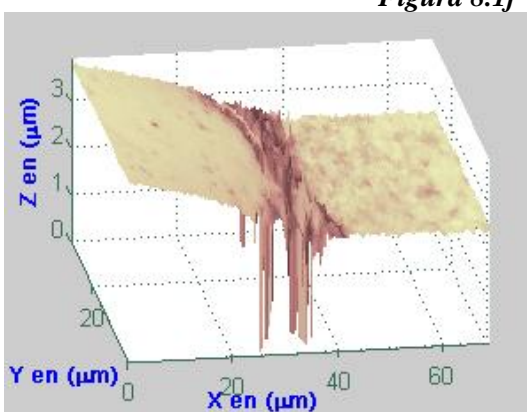


Figura 8.1l

Cuarto objeto, sección 4a lado izquierdo (aluminio), sección 4b lado derecho (estaño). Topografía, intensidad, textura, Fig.8.1j, fig.8.1k, fig.8.1l respectivamente

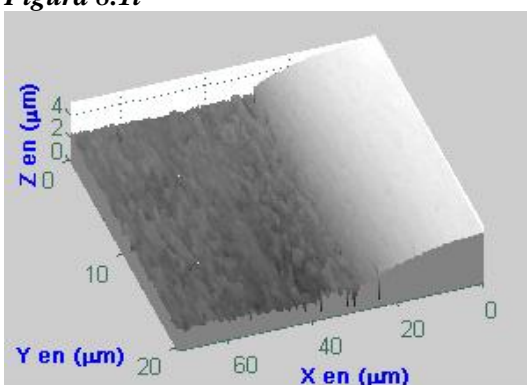


Figura 8.1m

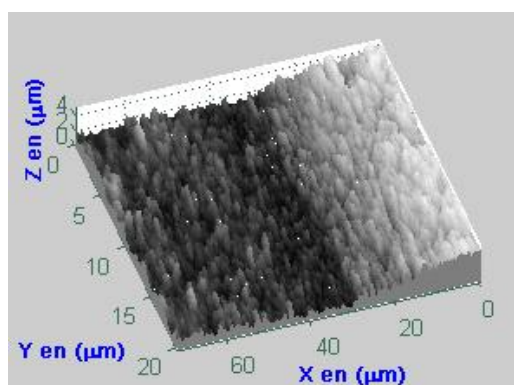
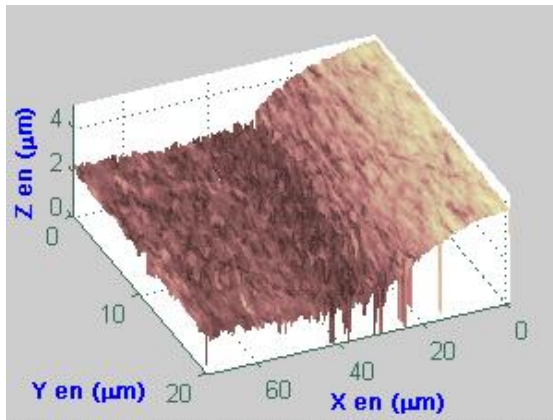


Figura 8.1n

En los objetos 4 y 5 los materiales de 4b (estaño) y 5b (plomo) muestran cierta similitud en las imágenes de máxima intensidad. En su distribución de luminosidad, el estaño contiene plomo, se hace evidente la rugosidad distintiva de los materiales en sus texturas, aunque estos posean valores de máximas intensidades diferentes. 4a, 5a son aluminio y se ve la influencia del material vecino, haciendo que sea diferente su imagen de textura *fig. 8.1l, 8.1o*.



Quinto objeto, sección 5a lado derecho (aluminio), 5b lado izquierdo de la figura (plomo); topografía, intensidad, textura, fig.8.1m, fig8.1n, fig8.1o, respectivamente

Figura 8.1o

8.2 MEDIDAS POR CORRELACION

Para las medidas de correlación en los objetos, se tiene en cuenta las dimensiones de las imágenes de los materiales; se parte del hecho de tomar los datos correspondientes a las imágenes de máximas intensidades, de allí cada objeto se divide en dos secciones del mismo tamaño, que son usados en la correlación. Estas secciones se identifican por el número del objeto y el lado que poseen. Ver tabla 8.2-1.

MEDIDAS POR CORRELACIÓN

5b	0.6240	0.3069	0.5184	0.4847	0.3775	0.3369	0.3590	0.3036	0.3103	1
5a	0.5717	0.3130	0.5023	0.4825	0.3596	0.4356	0.3536	0.3227	1	0.3103
4b	0.5746	0.3221	0.5110	0.5050	0.3666	0.4324	0.3555	1	0.3227	0.3036
4a	0.5749	0.3109	0.5160	0.4851	0.3664	0.4362	1	0.3555	0.3536	0.3590
3b	0.5751	0.3065	0.5336	0.4896	0.3568	1	0.4362	0.4324	0.4356	0.3369
3a	0.5795	0.3057	0.5286	0.4864	1	0.3568	0.3664	0.3666	0.3596	0.3775
2b	0.5660	0.3085	0.5226	1	0.4864	0.4896	0.4851	0.5050	0.4825	0.4847
2a	0.5847	0.3125	1	0.5226	0.5286	0.5336	0.5160	0.5110	0.5023	0.5184
1b	0.5709	1	0.3125	0.3085	0.3057	0.3065	0.3109	0.3221	0.3130	0.3069
1a	1	0.5709	0.5847	0.5660	0.5795	0.5751	0.5749	0.5746	0.5717	0.6240
	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b

Tabla 8.2-1 Obtención de picos de correlación para cada sección de las muestras.

Se trabajo con imágenes de intensidad porque de éstas es más factible obtener rasgos característicos, por lo que implica tener un reconocimiento de la iluminación con respecto a un detalle que para un dato de topografía llegaría a ser la planicidad de la muestra. Es un factor que se tuvo en cuenta al tratar los elementos, aunque la topografía tuviese información de textura podría ser un estocástico a la hora de concretar resultados.

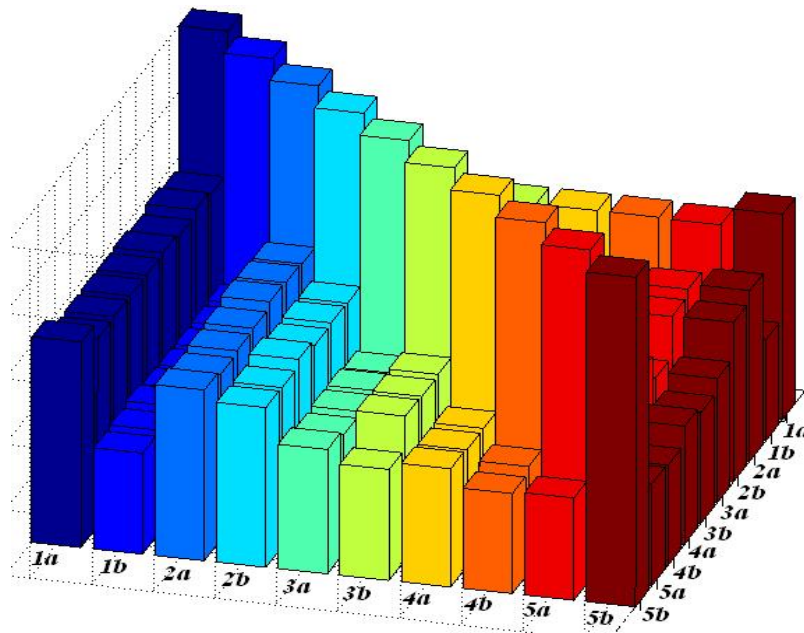


Figura 8.2a. Representación de correlación de las imágenes de intensidades dadas en la tabla anterior.

Se obtuvo una tabla de datos concerniente a la correlación de los lados de los objetos; para observar con más cuidado las relaciones que existen entre materiales, se exponen en una grafica (*fig. 8.2a*). Existen valores en los cuales algunos materiales como el aluminio y el material no definido tienen características, que tienden a valores constantes, ver tabla 8.2-2, 8.2-3.

Existe algún factor que hace cambiar la relación que existen para los objetos que contienen el mismo tipo de material. Ello posiblemente se deba a su preparación, y también a su estado de pureza. En consecuencia se observan variaciones en muestras que poseen el mismo material.

<i>aluminio</i>	<i>1b</i>	<i>3a</i>	<i>4a</i>	<i>5a</i>
<i>1b</i>	<i>1</i>	<i>0.3057</i>	<i>0.3109</i>	<i>0.3130</i>
<i>3a</i>	<i>0.3057</i>	<i>1</i>	<i>0.3664</i>	<i>0.3596</i>
<i>4a</i>	<i>0.3109</i>	<i>0.3664</i>	<i>1</i>	<i>0.3536</i>
<i>5a</i>	<i>0.3130</i>	<i>0.3596</i>	<i>0.3536</i>	<i>1</i>

Tabla 8.2-2 de la tabla 8.2-1, la correlación con respecto al Aluminio de todas las muestras

<i>No defin.</i>	<i>1a</i>	<i>2b</i>	<i>3b</i>
<i>1a</i>	<i>1</i>	<i>0.5660</i>	<i>0.5751</i>
<i>2b</i>	<i>0.5660</i>	<i>1</i>	<i>0.4896</i>
<i>3b</i>	<i>0.5751</i>	<i>0.4896</i>	<i>1</i>

Tabla 8.2-3 de la tabla 8.2-1, la correlación de un material no definido en los objetos estudiados

La correlación sobre el mismo lado es igual a uno, pero al realizarlo sobre otras muestras que poseen el mismo material, no es igual; por lo tanto se muestra una característica en el material que tiende a ser una constante de magnitud relacionada para los lados que contienen Aluminio, lo que haría pensar que existe una alteración en las muestras, pero que aun así se relacionan. Tablas 8.2-2,8.2-3.

También se hace evidente el estado en que se pueden presentar los materiales, este hecho se muestra también en la visualización de la textura, al analizar las figuras 8.11 lado izquierdo y 8.10 lado derecho, resaltan similitudes que se pueden complementar con la correlación.

Al tratar con imágenes de intensidades por medio de la correlación, son influyentes los materiales debido a su preparación y según el caso, si el material pertenece a una aleación. Su luminosidad, se verá involucrada así como su estructura al momento de caracterizar dicho material.

Observaciones

Las muestras estudiadas presentan un contenido poco favorable para las características identificables en los materiales. Aunque los materiales contengan variaciones de una muestra a otra por parte del mismo tipo de material, los resultados tienden a ser un valor constante.

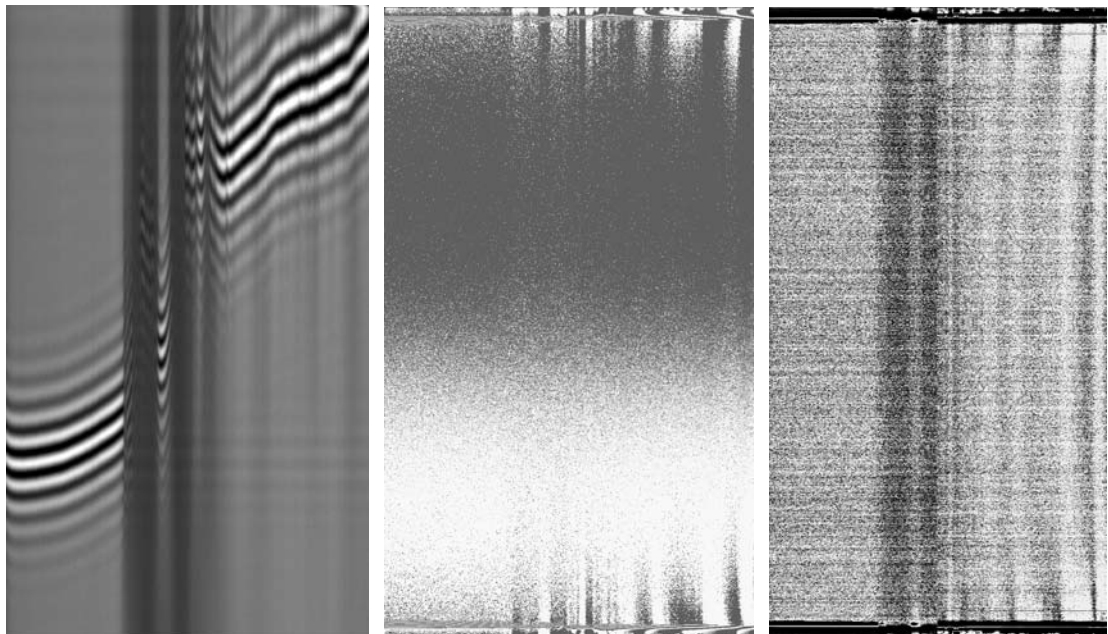
8.3 FASE DE LOS MATERIALES

Una vez obtenidos los interferogramas para cada muestra, se utiliza la transformada de Fourier para obtener la fase de cada material, esta es indicada en la sección 7.1.

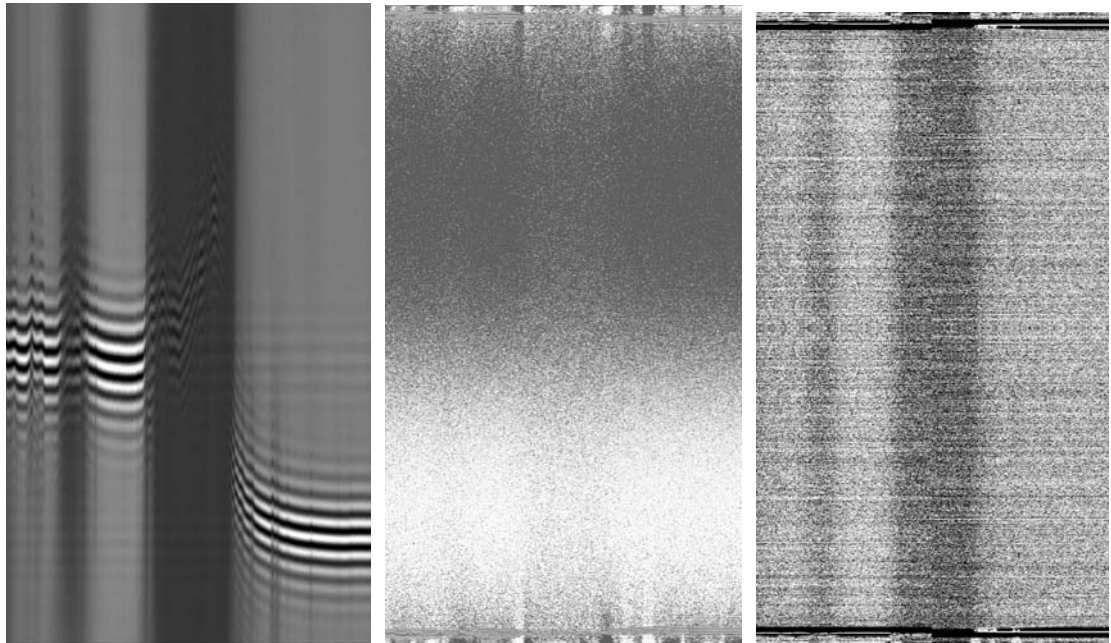
De este resultado se encuentra el valor para cada material. Se tomaron diez interferogramas, los cuales son analizados ofreciendo una condición favorable para sus características.

Se registran los datos de los interferogramas para cada objeto, luego estos se analizan y se halla la fase de reflexión del material y su reflectividad para todo el interferograma.

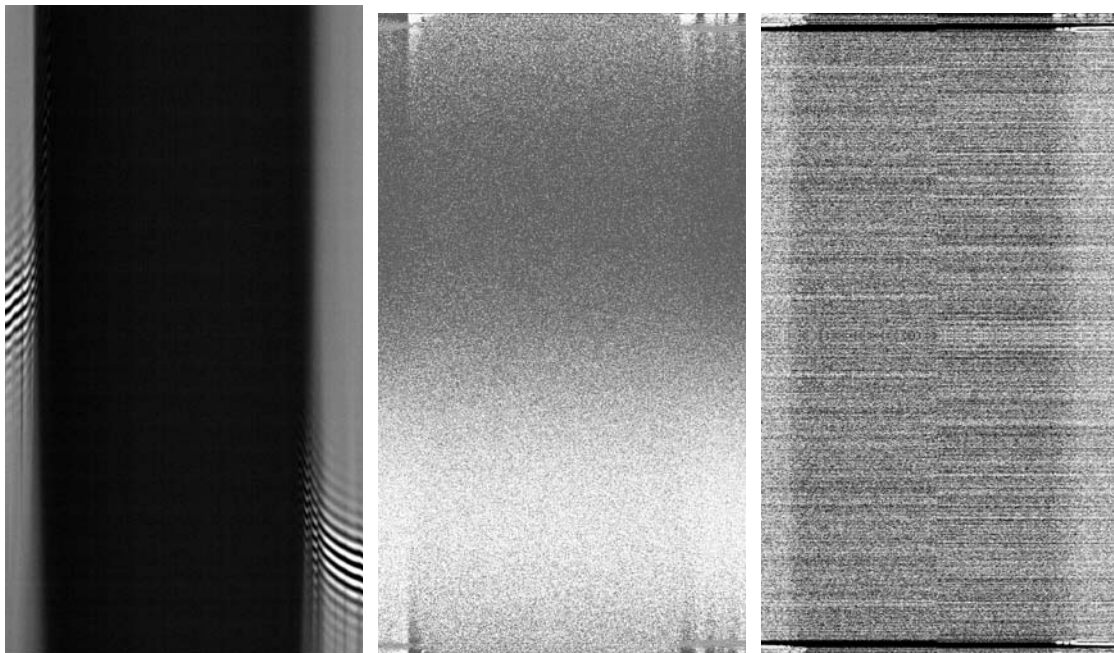
Teniendo el interferograma, y empleando el modelo de transformada de Fourier se extraen los parámetros, tales como ángulo, parte real e imaginaria (Pag. 28) y se utilizan para presentar los siguientes datos:



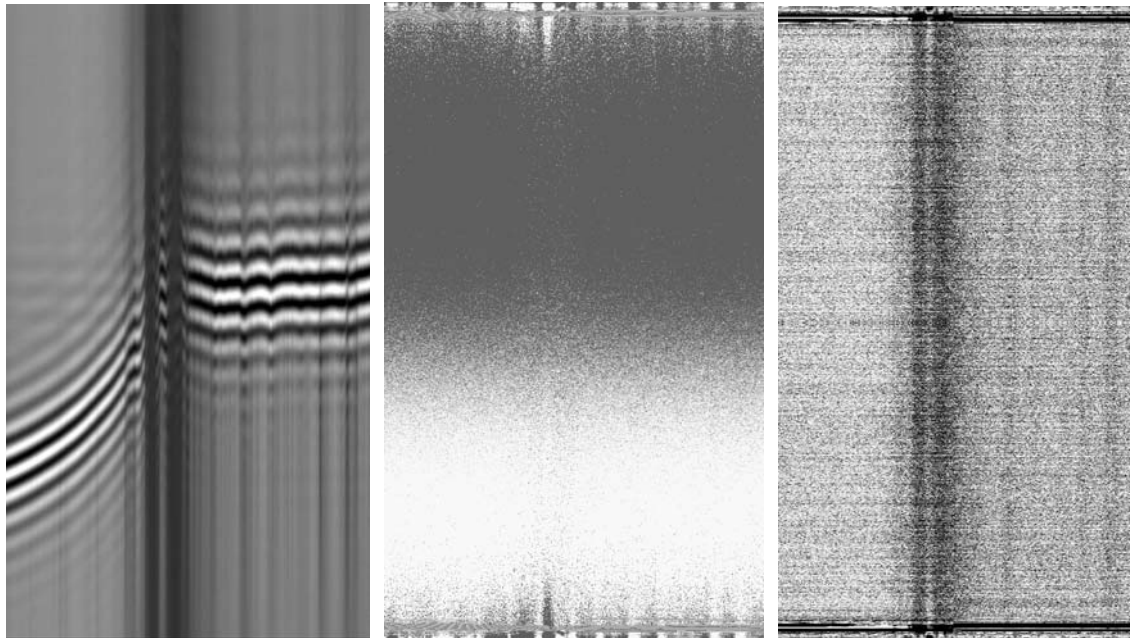
a – interferograma muestra 1, seguido de su fase y reflectividad respectivamente



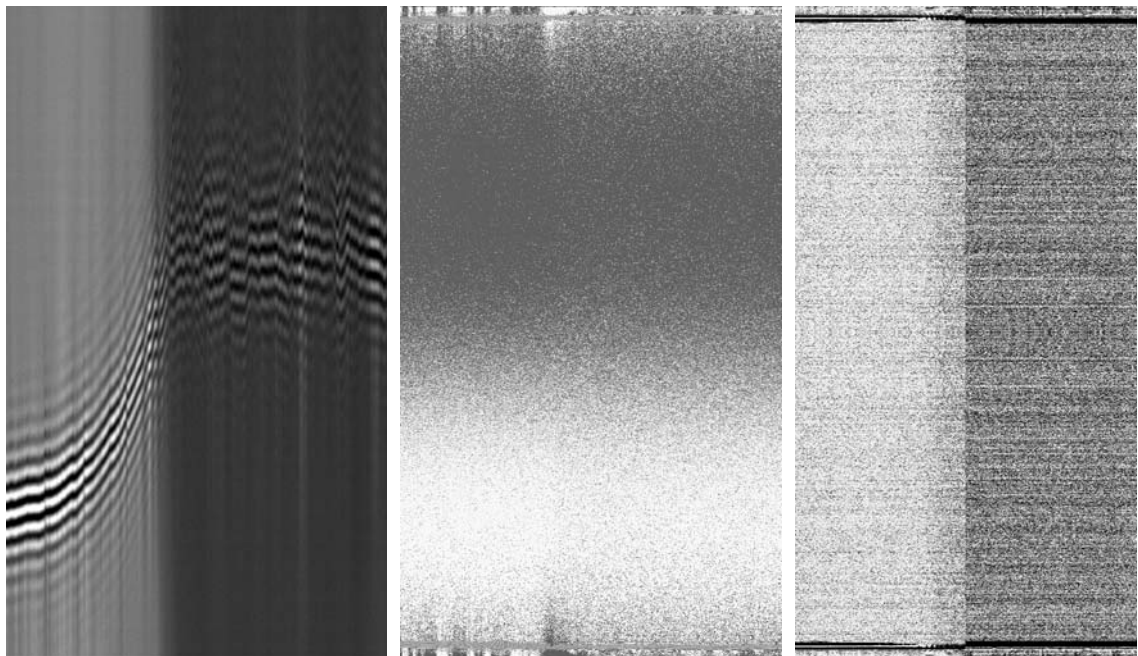
b – interferograma muestra 2, seguido de la fase y reflectividad respectivamente



c – interferograma muestra 3, seguido de la fase y reflectividad respectivamente



d – interferograma muestra 4, seguido de la fase y reflectividad respectivamente



e – interferograma muestra 5, seguido de la fase y reflectividad respectivamente

Figura 8.3a. Presentación cualitativa de los datos concernientes a la obtención de las fases y la reflectividad para cada par de materiales contenidos en cada muestra.

En base al interferograma de todas las muestras, se extrae la fase y se relaciona la reflectividad correspondiente a cada material. El contraste de la reflectividad para cada par de muestras se incrementa para la muestra cinco (*fig 8.3a-e*) y se ve disminuido en la muestra uno (*fig 8.3a-a*) hecho evidente en la sección 8.4.

Para cada interferograma de cada muestra se extrajo la fase, partiendo de su transformada de Fourier, se reorganizó este; en las figuras 8.3b, 8.3c se visualiza la fase de reflexión. La abcisa contiene la variación del piezo-eléctrico o pasos y la ordenada contiene la variación de fase en radianes (cero hasta π), que luego se presenta en grados.

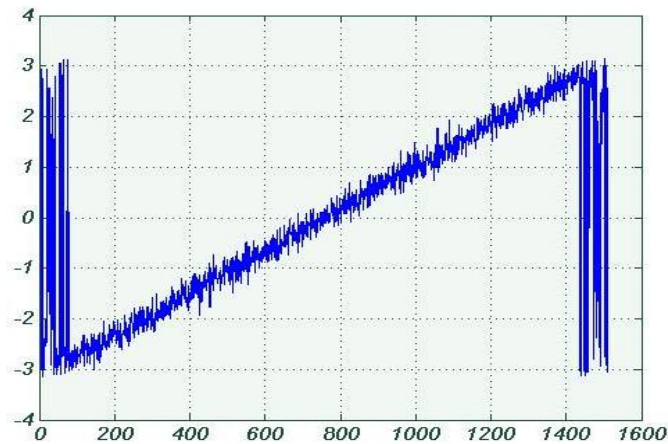


Figura 8.3b. Fase del objeto 1a, la información del cambio de fase con detalle de cada parte del material se encuentra a lo largo de la recta visualizada, pero con respecto a todo el material, se encuentra en la sección inicial y final del mismo.

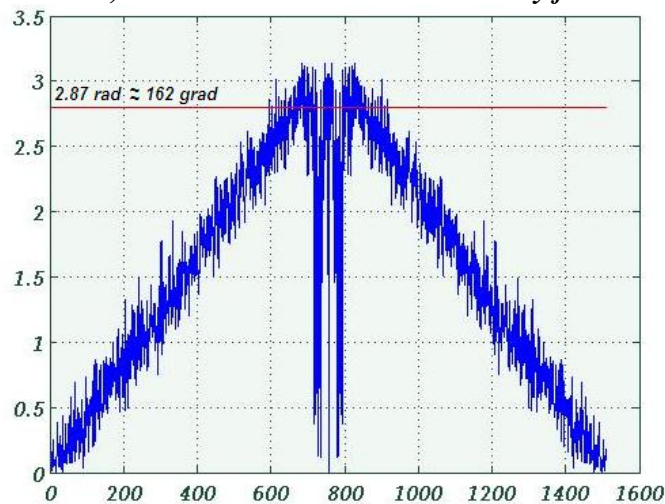


Figura 8.3c. Fase reorganizada, rad vs Δp ; se hace mas factible encontrar el ángulo implícito de la figura (línea punteada).

De la imagen de fase de un elemento figura 8.3c, se deduce que el ángulo de reflexión característico para todo el material se encuentra en la región central, donde se acentúan los cambios de fase y no hay variaciones de tipo lineal; es decir se muestra de manera constante un ángulo que referencia al interferograma adquirido.

Se encontró la fase de reflexión para cada tipo de material*, en total constituyen diez interferogramas y por lo tanto diez ángulos que son mostrados en la siguiente tabla.

<i>Objeto</i>	<i>Tipo de Material</i>	<i>Fase(grados)</i>
<i>1b</i>	<i>Aluminio</i>	<i>159</i>
<i>3a</i>	<i>Aluminio</i>	<i>161</i>
<i>4a</i>	<i>Aluminio</i>	<i>160</i>
<i>5a</i>	<i>Aluminio</i>	<i>155</i>
<i>1a</i>	<i>No Determinado</i>	<i>162</i>
<i>2b</i>	<i>No Determinado</i>	<i>168</i>
<i>3b</i>	<i>No Determinado</i>	<i>168</i>
<i>2a</i>	<i>Bronce</i>	<i>150</i>
<i>4b</i>	<i>Estaño</i>	<i>160</i>
<i>5b</i>	<i>Plomo</i>	<i>145</i>

Tabla 8.3-1 Ángulos de reflexión encontradas para cada una de las muestras.

De los materiales que tienden a estudiarse con frecuencia en el medio de la interferometría [25], se encontraron dos tipos de materiales, Aluminio y Estaño; se halló, que coinciden los resultados con el estudio aquí presentado, mostrando una similitud en su ángulo de reflexión.

Se da confiabilidad a lo desarrollado, con la búsqueda de fase para cada tipo de material de cada muestra.

En las figura 8.3a se da a conocer la fase de toda la región estudiada del material incluyendo la fase puntual y general para las cinco muestras.

**El tipo de material denominado No Determinado, es el mismo para las tres muestras en el que hace parte.*

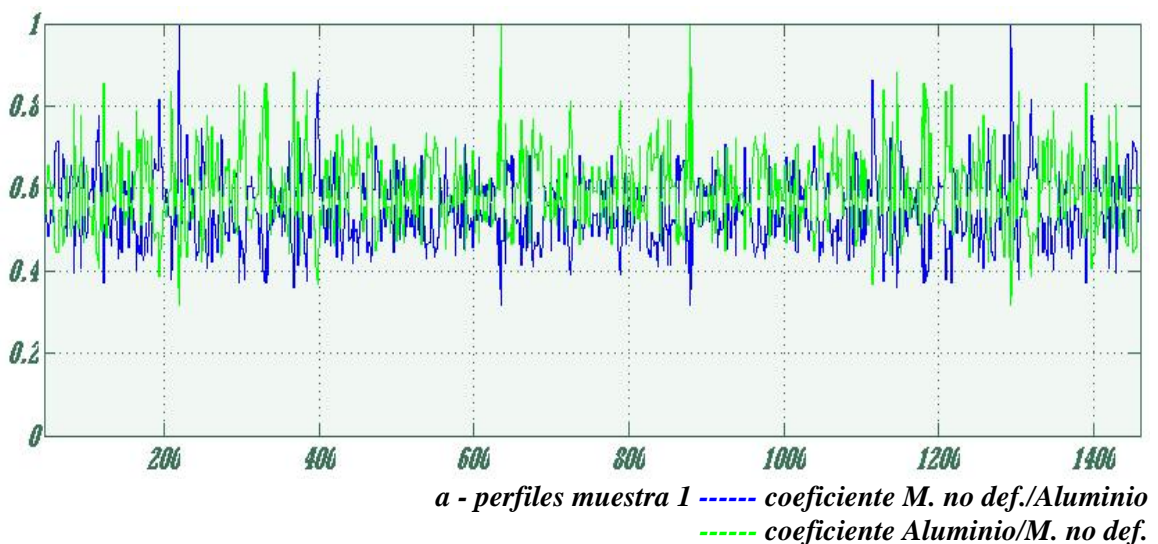
Observaciones

Se presentan la fase puntual y general de las muestras a lo largo de la recta usada para la extracción del interferograma en cada material, las fases puntuales son pertenecientes al mismo tipo de material por lo tanto se hace énfasis a todo el material y la fase general del mismo. Resultado corresponde a los objetivos planteados. Dando los resultados mostrados en la tabla 8.3-1.

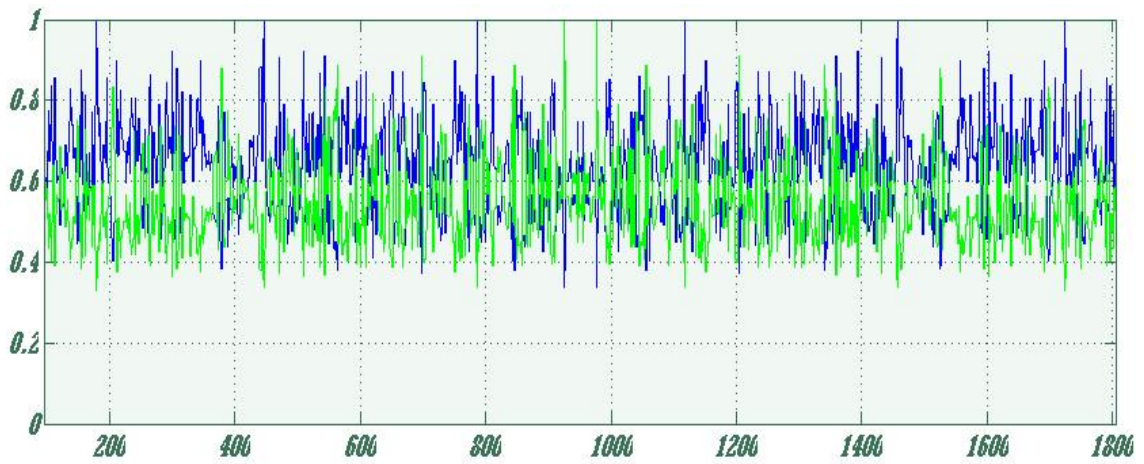
8.4 REFLECTIVIDAD DE LOS MATERIALES

Teniendo la reflectividad de cada material en base a sus interferogramas (figura 8.3a), se puede obtener un vector representativo para cada lado de la muestra, obteniendo perfiles y comparándolos en cada caso para cada muestra, este vector representa la reflectividad de un material con respecto a su adyacente para la línea formada del interferograma.

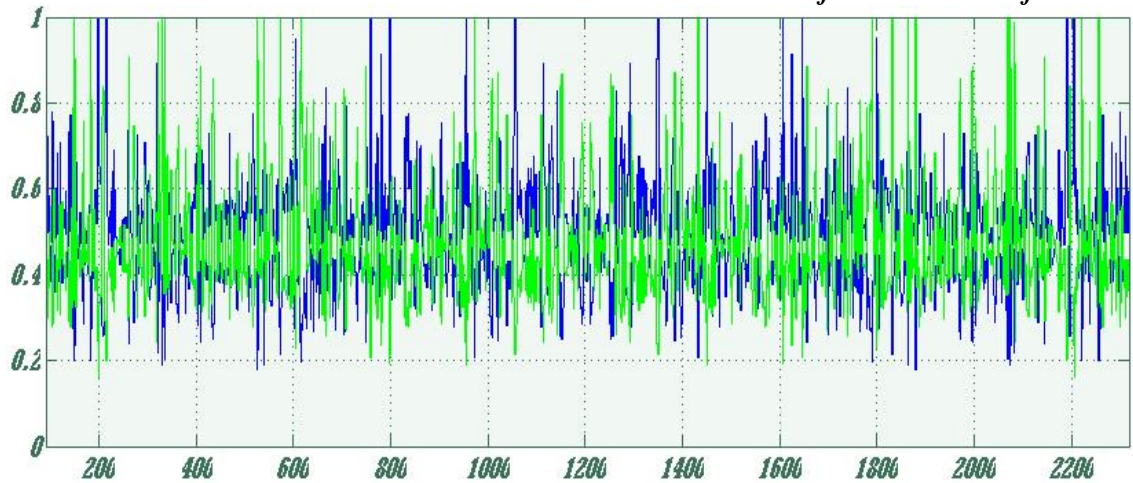
Se puede analizar el comportamiento de dicha reflectividad al observar la variación de las líneas a lo largo del desplazamiento del piezo-eléctrico, cuyo paso es de $3\eta\text{m}$ y se encuentra normalizado para su desplazamiento axial.



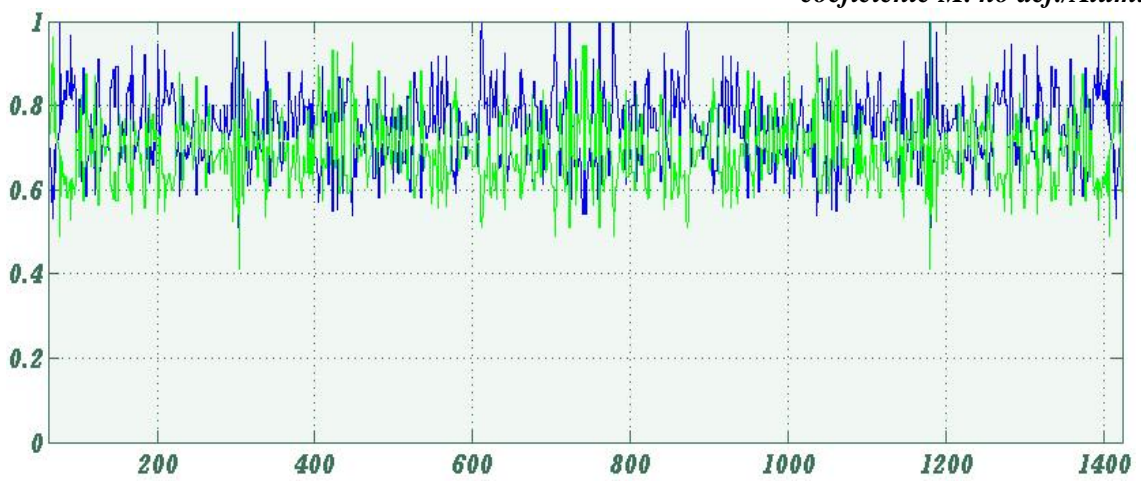
REFLECTIVIDAD DE LOS MATERIALES



b - perfiles muestra 2 ----- coeficiente Bronce/M. no def.
----- coeficiente M. no def./Bronce



c - perfiles muestra 3 ----- coeficiente Aluminio/M. no def.
----- coeficiente M. no def./Aluminio



d - perfiles muestra 4 ----- coeficiente Aluminio/Estaño
----- coeficiente Estaño/Aluminio

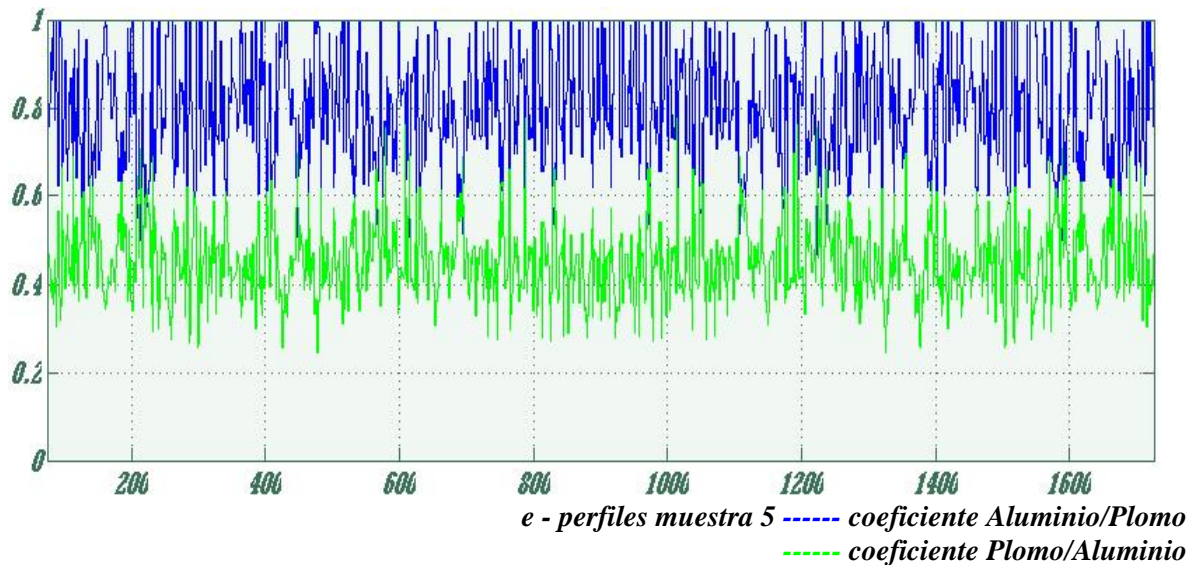


Figura 8.4a Representación de perfiles de coeficientes de Reflexión para cada par de materiales en cada muestra.

Observando la reflectividad de cada material, ya sea con las imágenes de toda la muestra (fig. 8.3a) ó sus perfiles como aquí se presentan; Puede darse el factor de amplitud característico que lo identifica, como se hace evidente para el aluminio con respecto al plomo y viceversa, viendo la figura 8.3a-e en la reflectividad, el Aluminio es mas influyente y sobresale con respecto al plomo; y como referente al Aluminio y estaño ver figura 8.4a-d, llegan a ser equivalentes. Datos que relacionan lo obtenido con respecto a la fase, tabla 8.3-1.

Observaciones

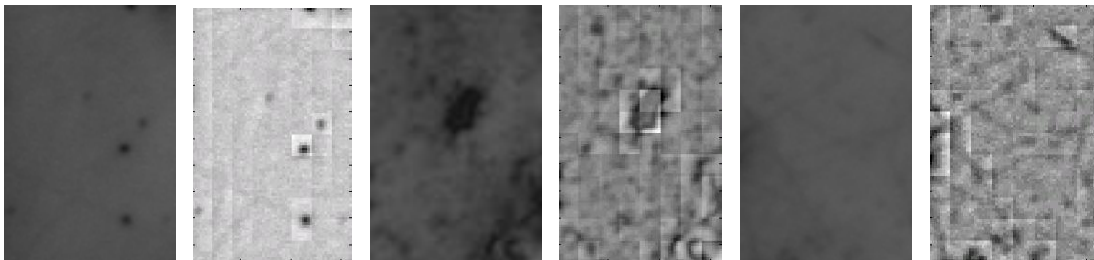
El hecho de presentar los coeficientes de reflexión de todas las muestras en un perfil de línea, destaca la relación implícita en la fase de reflexión presentada en la tabla 8.3-1, y la luminosidad para las imágenes de máximas intensidades; teniendo la reflectividad en cada punto a lo largo del vector se hace notar la complementariedad que existe para cada par de materiales y que corresponde a una característica de los mismos.

Este dato cuantitativo refuerza el método de caracterización de materiales.

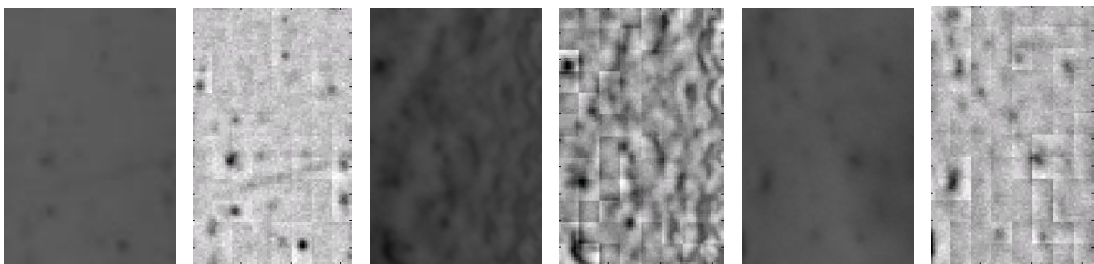
8.5 CARACTERISTICAS DE SUPERFICIE POR TRANSFORMADA DE FOURIER

El modelo de transformada de Fourier para la caracterización del estado de superficie de los materiales metálicos aquí presentados realiza un escaso aporte trabajándolo de manera directa en las imágenes de intensidades, por ello se requiere darle otro manejo al modelo, utilizando la transformada coseno en matrices de 8x8 píxeles; se aprovecha la ventaja de trabajarlo en subdivisiones de la imagen original extrayendo los fondos continuos de los mismos, resaltando de una manera mas contrastada los detalles que posee el material trabajado, de lo que se podría obtener con solo la transformada de Fourier general.

Partiendo de las imágenes de máximas intensidades para cada material con dimensiones de 79 * 53 micras, se procede a resaltar las características teniendo como resultado los siguientes datos:

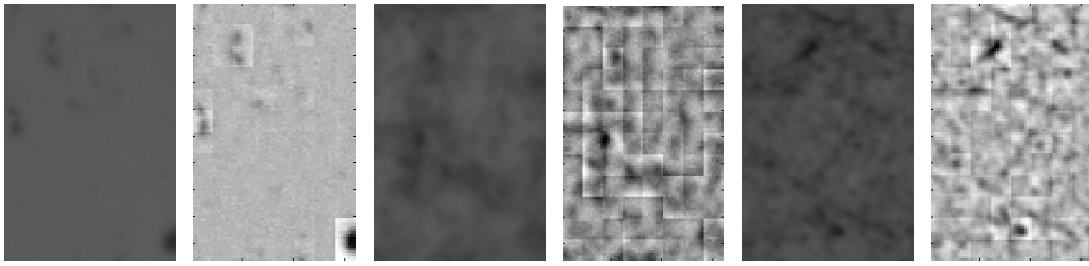


a -Imagen de máxima intensidad y exaltación de detalles para los lados 1a, 1b, 2a respectivamente.

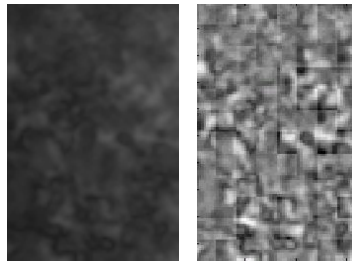


b -Imagen de máxima intensidad y exaltación de detalles para los lados 2b, 3a, 3b respectivamente.

CARACTERISTICAS DE SUPERFICIE POR TRANSFORMADA DE FOURIER



c – Imagen de máxima intensidad y exaltación de detalles para los lados 4a, 4b, 5a respectivamente.



d – Imagen de máxima intensidad y exaltación de detalles para el lado 5b.

Figura 8.5a. Comparación de las imágenes de máximas intensidades obtenidas en la adquisición de datos y reexaltación de los detalles para las mismas imágenes en cada material.

Con esta nueva forma de visualización de las imágenes, se analizan las rugosidades que estos presentan y se pueden comparar con los resultados obtenidos en los anteriores modelos; como el caso de correlación, el cual se hace para un material que esta en diferentes muestras, y presentan variaciones en los datos. Posiblemente los materiales se hicieron en condiciones que se daban como aleaciones, y luego se construyó la muestra, presentando los resultados vistos. Por este método se hace evidente los lados de las muestras 4a y 5a donde se habla del mismo material, poseen las mismas condiciones de preparación, pero en el proceso de pulimento se presento intercambio de material. Materiales como plomo y estaño tienen similitudes, ya que el estaño es una aleación y contiene plomo; se resalta además las características del material no definido.

Observaciones

Al realizar este proceso para cada material, se puede analizar de una manera cualitativa los detalles que incluso no se lograban observar al tener solo la imagen de máximas intensidades. Como es el caso del material no definido *1a, 2b, 3b, fig. 8.5a, 8.5b*. Sus características se distinguen de otras como el plomo *5b* ó el bronce *2a*.

9. CONCLUSIONES

El proyecto desarrollado concluye con el procesamiento óptimo de los datos adquiridos en el proceso de caracterización de materiales metálicos. Con esto, se cumplen los objetivos planteados, y se obtienen resultados concretos para cada tipo de material.

La resolución del espectro se logra, tomando rangos en el interferograma. De tal modo, obtenemos lo que realmente es importante en la reflexión de los materiales: información concreta de la frecuencia del interferograma, así como también, información de su fase, la cual no es dependiente de una situación condicional, sino de un registro concreto y semejante de todos los materiales.

Los métodos utilizados para la obtención de resultados en la identificación de cualidades del estado de superficie, son complementarios, así como también, útiles, para la comparación con otros materiales.

En la evaluación de los datos, se encontró una manera sencilla de obtener la información de fase aplicable a los materiales trabajados; método que es competente y eficaz.

Como posible fuente de error, en el proceso de evaluación de datos, es que se parte del hecho de tener una muestra ideal, pero la obtenida contiene material residual de su vecindad, como consecuencia, esta situación afecta la naturaleza del estudio.

La técnica desarrollada permite plantear nuevas ideas basadas en conceptos de textura; tales características dan la posibilidad de convertirlo en un clasificador de materiales.

Los resultados del método de extracción de textura usado, pueden ser agregados a otros modelos más dinámicos, que permitan una salida a otras aplicaciones que den resultados más reales.

La investigación realizada, permitirá ampliar el estudio de muestras que contengan elementos comunes e identificables, para materiales con aleaciones; ubicando características específicas para cada elemento.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] **P. HARIHARAN** “Optical Interferometry” Second Edition; University of Sydney – Sydney, Australia; Elsevier Science (USA); 2003.
- [2] **BORN and WOLF** “Principles of Optics”; Sixth Edition. Pergamon Press; 1980.
- [3] **M. A. SUAREZ** “Implementación Y Aplicación de un perfilometro Óptico Basado En Microcopia interferencial”; Tesis de grado; Universidad industrial de Santander; 2000.
- [4] **W. K. PRATT** “Digital Image Processing” Third Edition; John Wiley and Sons, Inc. 2001.
- [5] **B. CROWELL** “Optics”, Light and matter-Fullerton, California; 1999.
- [6] **V. CASTELLI AND L. D. BERGMAN** - Edited “Image Databases Search & Retrieval Of Digital Imagery “; John Wiley & Sons, Inc.; 2002
- [7] **K. J.GASVIK** “Optical Metrology”; Third Edition; John Wiley and Sons, Dtd. 2002
- [8] **M.F. de CAMPOS, L.C. ROLIM LOPES** “Texture and microtexture Studies in Different types of cast irons”; Materials Science and Engineering A 398 (2005) 164–170.
- [9] **MARVIN J. WEBER** “Handbook of Optical Materials”; CRC Press LLC; 2003
- [10] **D. B. MURPHY** “Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging”; Wiley-Liss, inc. 2001.

- [11] **E. CODDING and G. HORLICK** "Apodization and phase Information in Fourier Transform Spectroscopy"; Department of Chemistry, University of Alberta, Canada; July 1972.
- [12] **G. HORLICK** "Introduction to Fourier Spectroscopy"; Department of Chemistry, University of Illinois, Usa; July 1968.
- [13] **H. C. ABRIL** "Evaluación Del Grado De Pilling En Tejidos Textiles Mediante Análisis De imagenes"; tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999
- [14] **L. J. CARDENAS, L. E. CIFUENTES** "Caracterización De Tejidos Textiles Por Medio de la Representación Parametrica de la Transformada de Fourier", tesis de grado, universidad Industrial de Santander, 1998.
- [15] **S. F. JOHNSTON** "In Search of Space: Fourier-Spectroscopy", 1950-1970"; Cap. 7; University of Glasgow, Scotland; 2000.
- [16] **P. LORRAIN, D. CORSON** "Campos y Ondas Electromagnéticas"; Selecciones Gráficas, Madrid 1972.
- [17] **P E J FLEWITT** "Physical Methods for Materials Characterisation" Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, London 1994.
- [18] **R. J. BELL** "Introductory Fourier transform Spectroscopy", Academic Press 1972.
- [19] **D. K. CHENG** "Fundamentos de Electromagnetismo para Ingenieria", Addison Wesley, 1998.
- [20] **S. PILEVAR, W. ATIA** "Reflection near-field scanning optical Microscopy: an interferometric approach"; the university of Maryland, July 1995.

- [21] **F. HASSELBACH, A. SCHAFFER** “Interferometric Measurement of Charge Particle Spectra (Fourier Spectroscopy)”; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1995.
- [22] **HECH- SAJAC** “OPTICA”, editorial Pearson Addison Wesley, 2003
- [23] **A. PLATA, J. MENESES** “Reconstrucción Topográfica Combinando Simultáneamente Métodos de Luz Monocromática con Luz Blanca”, Universidad Industrial de Santander.
- [24] **EDDY L. LEON** “La Transformada de Fourier: Aplicación a la Microscopia interferometrica en luz monocromática”, Octubre 2004.
- [25] **B. SCHEY, R. DANZ, C. ZEISS** “Pulsed Laser Deposition and TIC microscopy – two methods for effective and intelligent coating development”, Photonik 36, No. 3, 2004.
- [26] **A. PLATA, M. A. SUAREZ** “Determinación de Formas de Películas Delgadas Semiconductoras (SiO_2) por Métodos Interferométricos en Luz Policromática.”, GOTS - Universidad Industrial de Santander
- [27] **ROBERT D. GUENTER** “Modern Optics”, John Wiley 1990.

10.1 REFERENCIAS

10.1.1 MICROSCOPIO:

- * Microscopio interferométrico marca Nikon Eclipse ME600P
Nikon Y-IDP japan.
- * Piezo-eléctrico piezosystem jena 0693
Excitation Translateur Holo Laser Besacon.
- * Objetivos interferometricos tipo Mirau de aumentos:
50x / 0.55 DI , $\infty/0$; 10x / 0.30 DI, $\infty/0$.
- * Lámpara de Halógeno 12 Voltios, 100 watts.

10.1.2 CAMARA:

Camara de video monocromatica CCD, marca Sony
Modelo XC-75.

10.1.3 MUESTRAS:

Objeto uno: Elemento no definido, lado 1a y Aluminio, lado 1b.
Objeto dos: Bronce, lado 2a y Elemento no definido, lado 2b.
Objeto tres: Aluminio, lado 3a y Elemento no definido, lado 3b.
Objeto cuatro: Aluminio, lado 4a y Estaño-Plomo, lado 4b.
Objeto cinco: Aluminio, lado 5a y Plomo, lado 5b

11. ANEXOS

Para comprender a fondo el proceso que se realiza para obtener imágenes a un nivel aceptable, se recurren a herramientas como computadoras que hacen más satisfactorio el trabajo; y los algoritmos o procesos obtenidos harán la diferencia en la presentación de resultados.

Es importante dar a conocer esos pasos, que no se definen con claridad, ya que hace parte de un proceso computacional que al dedicarle su espacio, podría desviarnos de nuestro objetivo principal.

La idea de estos anexos es llenar esos vacíos de una forma clara y sencilla, vacíos que llegarían a infundarse en el proceso de comprensión de toda esta línea que trae el desarrollo del trabajo, y de una manera concreta dar claridad a cada paso del procedimiento seguido.

11.1 OBTENCION DE DATOS DE MAXIMA INTENSIDAD EN EL TRABAJO

Una representación de la obtención de la imagen de máxima intensidad es mostrada a continuación, la cual se dan como ejemplo tres imágenes de una interfase de dos materiales, tomadas cuando el interferograma recorre la superficie.*

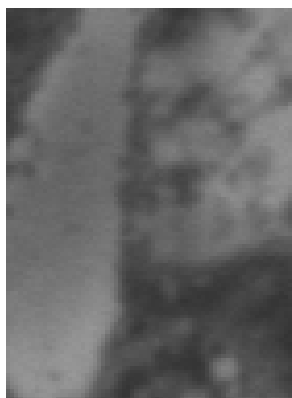


Imagen A1

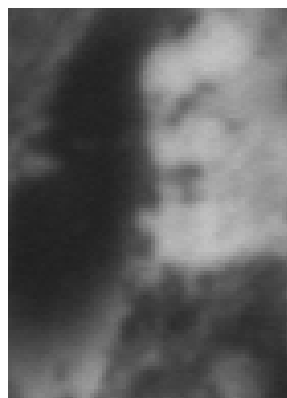


Imagen A2

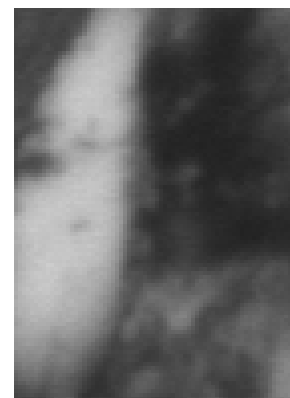


Imagen A3

** Estas imágenes fueron adquiridas con el fin de ilustrar el concepto de Detección de máximos
Y no pertenecen a las imágenes tratadas en el trabajo.*

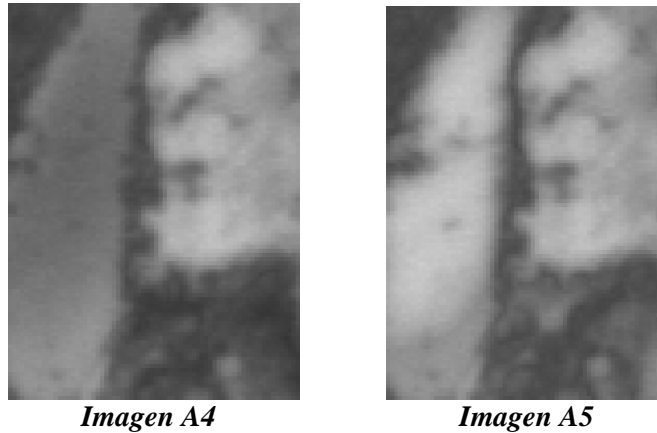


Figura 11.1 Representación del recorrido de franjas en la superficie. En la imagen A1 las franjas están por cruzar, en la imagen A2 la franja de máxima oscuridad llega al primer material, en la imagen A3 la franja de máxima oscuridad llega al segundo material, la imagen A4 es la máxima intensidad entre A1 y A2, la imagen A5 es la máxima intensidad entre A3 y A4.

El movimiento del interferómetro se encuentra dado por el piezo-eléctrico, y un movimiento de franjas implica un paso del piezo, el cual es registrado y guardado como una variación de 3 nanómetros, en cuyo caso da la altura en que se encuentra la superficie y que hará parte de su factor de escala.

Se parte del hecho que se tienen N imágenes, que presentan el paso de franjas. En este caso $N=3$; se guardan las imágenes cuando el interferograma esta atravesando la superficie, luego se evalúan las dos primeras imágenes extrayendo la máxima intensidad para cada píxel guardándose temporalmente en una matriz con las mismas dimensiones de las imágenes.

Al final de este proceso se conserva dicha matriz para ser luego comparada con la tercera imagen, obteniendo una matriz en los cuales cada píxel conserva la máxima iluminación de todas las imágenes.

Código en Matlab® [versión 7.0] para obtener a partir de varias imágenes una definitiva, que contiene la máxima intensidad de las ilustraciones estudiadas.

% lectura y visualización de las imágenes a trabajar.

```
A=imread('alumestaprueba02.BMP');  
figure(1);imshow(A);pixval;  
B=imread('alumestaprueba05.BMP');  
figure(2);imshow(B);pixval;  
C=imread('aulmestaprueba06.BMP');  
figure(3);imshow(C);pixval;
```

%creación de las Matrices temporales

```
Z=uint8(zeros(size(A)));  
Y=uint8(zeros(size(A)));
```

%bucles para las coordenadas

```
for k=1:3  
for i=1:100  
for j=1:70  
if A(i,j,k)>B(i,j,k)  
Z(i,j,k)=A(i,j,k);  
else Z(i,j,k)=B(i,j,k);  
end  
if C(i,j,k)>Z(i,j,k)  
Y(i,j,k)=C(i,j,k);  
else Y(i,j,k)=Z(i,j,k);  
end  
end  
end  
end
```

%visualizacion de la imagen final

```
figure(4);imshow(Y);pixval;
```

11.2 OBTENCION DE DATOS DEL INTERFEROGRAMA EN EL TRABAJO

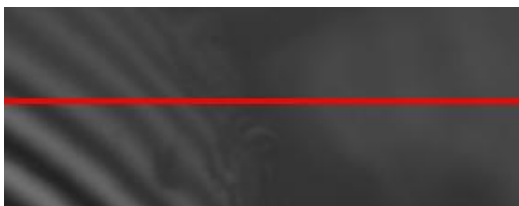
El uso del interferograma es de gran importancia para el desarrollo del trabajo, se debe hacer mención del proceso realizado y su resultado a partir de un buen contraste de franjas y del movimiento del piezo-eléctrico.

El proceso de reconstrucción del interferograma depende básicamente del espejo reflector a lo largo de su eje axial, recordando el interferómetro de Michelson, en este caso la superficie metálica con ayuda del piezo-eléctrico realiza el movimiento en el eje **z**, partiendo del hecho que los ejes **x** y **y** representan el plano en que se encuentra la superficie de los materiales.

Lo primero que se hace es tomar una línea de píxeles que pasen por las dos superficies, esta línea es la que registrará el paso de las franjas al tomar esa variación de intensidad, y registrar la distancia que fue tomada. Esta distancia esta dada por el movimiento del piezo-eléctrico.

Al comenzar a mover el piezo, las franjas harán su recorrido a través de la línea marcada; la primera variación del piezo Δz , se almacena en una matriz creada, guardando la posición desplazada del piezo y la intensidad registrada, de la misma manera para cada variación.

La nueva matriz se organiza en función de la cantidad total de pasos del piezo-eléctrico, generando el interferograma.



La línea registra las intensidades cuando pasan las franjas, y comienza a convertirlo en una nueva imagen del tamaño del ancho de la línea por la cantidad de pasos que tenga

Figura B1

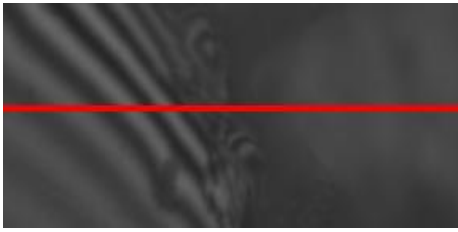


Figura B2



Figura B3



Figura B4



Figura B5



Figura B6



Figura B7

Las figuras de B2 hasta B7 recogen el interferograma de una manera visual; B2-B3 construye el interferograma del lado izquierdo del material.

B4-B5 construye el interferograma del lado derecho del material.

B6-B7 esta terminando el paso de franjas y se puede ver el interferograma para los dos materiales en la misma imagen.