

Universidad de Guanajuato

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA, A. C.

**“MEDICIÓN DEL ESPARCIMIENTO DE LA LUZ DE
SUPERFICIES ÓPTICAS”.**

Tesis presentada por

Gilberto Gómez Rosas

Como requisito para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias (Óptica)

León, Guanajuato, Octubre 1999

A MIS QUERIDOS PADRES Y HERMANAS

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a aquellas personas que de una u otra forma me ayudaron en el desarrollo de mis estudios doctorales en el Centro de Investigaciones en Óptica.

Agradezco a mi asesor Dr. D. Malacara Hernández por su apoyo, supervisión y consejos en el desarrollo de mi tesis doctoral, al Dr. H. Wang por su confianza en el desarrollo de mi trabajo de investigación, a los miembros del comité y evaluadores de mi exámen Dra. C. Solano y el Dr. M. Servin, Dr. R. Espinoza y al Dr. N. Alcalá por sus consejos y comentarios de mi tesis. Hago extensivo mi agradecimiento a todos aquellos investigadores que me transmitieron sus conocimientos en las aulas de este centro.

Aprecio enormemente el apoyo recibido por parte de la Dirección Académica al Dr. R. Rodríguez Vera, al Lic. Antonio Martínez, a Claudia, Laura, Angeles y Elizabeth, J. Manuel y personal de cómputo.

Quisiera decir a todas aquellas personas, amigos todos, que su amistad, su apoyo y sus consejos fueron sumamente importantes para la culminación de mi trabajo, a Brenda Martínez, Alejandra Silva, Alma Camacho, Norberto Arzate, Jorge Mejía, Mario Pacheco, Eric Rosas, Francisco Ornelas, Guillermo García, Juan Hurtado, Ismael Torres, Efraín Hernández, Geminiano Martínez, Marcial Montoya y en general a todos mis compañeros estudiantes.

Agradezco a mis queridos padres que siempre me brindaron su apoyo incondicional a través de estos años, a mis hermanas que me extendieron su mano cada vez que lo necesite, y a Carolina por su amor y cariño incondicional.

Finalmente, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Centro de Investigaciones en Óptica por el apoyo recibido en el desarrollo de mis estudios doctorales.

Resumen de las publicaciones y ponencias generadas de la investigación de esta tesis.

Publicaciones

- 1) "A new method for measuring scattering of light from optical surfaces with random roughness". G. Gómez R., H. Wang, D. Malacara-Hernandez. Optical and Quantum Electronics. 1998, 30, 181-186.
- 2) "The dynamic angle-limited integrated scattering (DALIS) method for measuring scattering of light from optical surfaces with random roughness". G. Gómez-Rosas, D. Malacara-Hernandez, H. Wang. Optical and Quantum Electronics. Aceptado para su publicación. 1999.
- 3) "Method for measurement scattering of light from optical surfaces (DALIS)", G. Gómez-Rosas, Daniel Malacara-Hernandez, Haiming Wang. SPIE, 1999.

Trabajos presentados en Congresos

- "Nuevo método de medición de esparcimiento de la luz de superficies ópticas con rugosidad aleatoria". Congreso Nacional de Física, Monterrey (1997).
- "Medición del esparcimiento de la luz por el método DALIS utilizando un espejo esférico como elemento colector". Congreso Nacional de Física, San Luis Potosí (1998).
- "Medición del esparcimiento de la luz de superficies ópticas (DALIS), III Reunión Iberoamericana de Óptica, Colombia (1998).

Índice.

Página

Resumen de las publicaciones y ponencias generadas de la investigación de esta tesis.....	1
Lista de figuras.....	6
Resumen.....	8
Introducción.....	9
a) Motivación.	
b) Organización de la tesis.	
Capítulo 1. Conceptos básicos de la teoría del esparcimiento.....	11
1.1 Rugosidad.	
1.1.1 Rayaduras, cavidades, partículas.	
1.1.2 Observación de la luz de esparcimiento de una superficie.	
1.2 Media cuadrática. Rugosidad promedio. Pendiente media cuadrática.	
1.3 Funciones de distribución de altura y de pendiente. Skewness. Kurtosis”.	
1.4 Función de autocovarianza. Longitud de correlación. Longitud de onda espacial de superficie.	
1.5 Función de densidad de energía espectral. (PSD).	
1.6 Función de distribución de esparcimiento bidireccional. (BRDF)	
1.7 El factor de polarización Q.	

Capítulo 2. Sistemas de observación y medición de la rugosidad.....	29
2.1 Perfilómetros mecánicos.	
2.2 Perfilómetros ópticos.	
2.3 Microscopio de interferencia diferencial de contraste (Nomarski).	
2.4 Microscopios electrónicos: SEM y TEM y microscopios de barrido: STM y AFM.	
2.5 Esparcimiento de la luz.	
2.5.1. Esparcimiento total integrado,(TIS).	
2.5.2. Sistema de medición de esparcimiento de ángulo de resolución, (ARS).	
2.5.3 Sistema de medición de esparcimiento integral por ángulo dinámico limitado, (ALIS).	
Capítulo 3. Sistema de medición de esparcimiento integral por ángulo dinámico limitado, (DALIS), utilizando como medio colector un sistema de lentes.....	44
3.1 Principio.	
3.2 Arreglo experimental.	
3.3 Resultados.	
Capítulo 4. Sistema de medición de esparcimiento integral por ángulo dinámico limitado, (DALIS), utilizando como medio colector un espejo esférico.....	70
4.1 Principio.	
4.2 Arreglo experimental.	
4.3 Resultados.	
Capítulo 5. Conclusiones.....	82

5.1 Conclusiones.

5.2 Trabajo a futuro.

5.2.1 Nuevas configuraciones propuestas.

5.2.2 Cálculo estadístico del coeficiente de rugosidad.

Bibliografía.....92

Abreviaturas.

- Función de densidad de potencia espectral. “Power-spectral-density function”, (PSD).
- La función de distribución de reflectancia bidireccional. “Bidirectional scatter distribution functions”, (BRDF).
- Esparcimiento total integrado. “Total integrated scattering”,(TIS).
- Medición de esparcimiento diferencial. “Angle-resolved scattering”, (ARS).
- Esparcimiento integral por ángulo dinámico limitado. “Angle-limited integrated scattering”, (ALIS).
- Esparcimiento integral por ángulo dinámico limitado. “Dynamic angle-limited integrated scattering”, (DALIS).

Lista de figuras.

- Figura 1.1 Representación esquemática de la rugosidad de la superficie.
- Figura 1.2¹ Definición de superficie.
- Figura 1.3 Observación de la luz esparcida por una superficie rugosa a través del ojo..
- Figura 1.4 Representación esquemática de la rugosidad superficial.
- Figura 1.5 Esparcimiento ARS, relación entre los diferentes parámetros.
- Figura 2.1¹ Perfilómetro Mecánico.
- Figura 2.2¹ Sistema de medición TIS.
- Figura 2.3¹ Sistema de medición ARS.
- Figura 2.4¹ Sistema de medición ALIS.
- Figura 3.1 Arreglo experimental DALIS.
- Figura 3.2 Relación entre la distancia de observación d y el ángulo de observación θ_{so} en el ángulo sólido de colección $\Delta\Omega_s$ (vista general).
- Figura 3.3 Relación entre la distancia de observación d y el ángulo de observación θ_{so} en el ángulo sólido de colección $\Delta\Omega_s$ (plano x-z).
- Figura 3.4 Relación entre la distancia de observación d y el ángulo de observación θ_{so} en el ángulo sólido de colección $\Delta\Omega_s$ (plano x-y).
- Figura 3.5 Sistema de colección DALIS (ángulo de observación inicial de 45°).
- Figura 3.6 Sistema de colección DALIS (ángulo de observación inicial de 45°).
- Figura 3.7 Fotografía 1. Sistema de medición DALIS con un ángulo de colección de 45°
- Figura 3.8 Fotografía 2. Sistema de medición DALIS con un ángulo de colección de 45°
- Figura 3.9 Fotografía 3. Sistema de medición DALIS con un ángulo de colección de 45°
- Figura 3.10 Señal DALIS versus desplazamiento d para $\theta_i=45^\circ$. (muestra 1).
- Figura 3.11 Señal DALIS versus desplazamiento d para $\theta_i=45^\circ$. (muestra 2).
- Figura 3.12 Señal DALIS versus desplazamiento d para $\theta_i=45^\circ$. (muestra 3).
- Figura 3.13 Sistema DALIS (con un ángulo de observación inicial de 0°).
- Figura 3.14 Sistema DALIS (con un ángulo de observación inicial de 0°).
- Figura 3.15 Fotografía 4. Sistema de medición DALIS con un ángulo de colección de 0° .
- Figura 3.16 Fotografía 5. Sistema de medición DALIS con un ángulo de colección de 0° .

- Figura 3.17 Fotografía 6. Sistema de medición DALIS con un ángulo de colección de 0° .
- Figura 3.18 Señal DALIS versus desplazamiento d para $\theta_i=0^\circ$. (muestra 1).
- Figura 3.19 Señal DALIS versus desplazamiento d para $\theta_i=0^\circ$. (muestra 2).
- Figura 3.20 Señal DALIS versus desplazamiento d para $\theta_i=0^\circ$. (muestra 3).
- Figura 3.21 Tabla 1. Posición de las tres superficies ópticas de prueba.
- Figura 4.1 Sistema de colección DALIS (utilizando un espejo esférico).
- Figura 4.2 Sistema de colección DALIS, espejo esférico.
- Figura 4.3 Fotografía 7. Arreglo experimental DALIS utilizando un espejo esférico.
- Figura 4.4 Fotografía 8. Arreglo experimental DALIS utilizando un espejo esférico.
- Figura 4.5 Fotografía 9. Arreglo experimental DALIS utilizando un espejo esférico.
- Figura 4.6 Señal DALIS versus desplazamiento d (muestra 1).
- Figura 4.7 Señal DALIS versus desplazamiento d (muestra 2).
- Figura 4.8 Señal DALIS versus desplazamiento d (muestra 3).
- Figura 4.9 Tabla 2. Posición de las tres superficies ópticas de prueba.
- Figura 5.1 Arreglo experimental DALIS utilizando un espejo esférico como sistema colector.
- Figura 5.2 Arreglo experimental DALIS utilizando un espejo esférico como sistema colector.
- Figura 5.3 Arreglo experimental DALIS utilizando un espejo esférico como sistema colector.
- Figura 5.4 Tabla 3. Resultados experimentales.

¹ Figuras tomadas de los apuntes Photonics, III, Waveguides and optical circuits. H. Wang.

Resumen

En este trabajo se reporta un nuevo método para la medición del esparcimiento de la luz en superficies ópticas rugosas. Este método de colección de la luz de esparcimiento en un ángulo sólido nos elimina el requisito de una unidad de detección con un rango dinámico grande.

La medición del esparcimiento cercana a la reflexión especular también puede ser medida sin ninguna dificultad. A diferencia del sistema de medición de esparcimiento diferencial (ARS), en el que se utiliza un movimiento rotacional para el barrido de la luz del esparcimiento, se adopta un movimiento lineal por lo que puede ajustarse la resolución angular de la medición. Esta medición es independiente de la resolución de la mesa de traslación. Este principio se aplica en tres arreglos experimentales los cuales se muestran y se analizan en el presente trabajo.

De acuerdo a los resultados experimentales obtenidos de tres arreglos propuestos es posible demostrar que este nuevo sistema de medición podría presentar varias ventajas sobre el sistema convencional de medición de esparcimiento diferencial (ARS).

Introducción.

a) Motivación.

El principal interés de esta tesis es el de proponer un nuevo método de medición de luz esparcida en superficies ópticas. En este sistema la colección de la luz de esparcimiento se realiza en un ángulo sólido proyectado, que nos permite eliminar la unidad de detección con un rango dinámico grande.

b) Organización de la tesis.

Esta tesis esta organizada en 5 capítulos, el primer capítulo contiene una introducción breve de la teoría del esparcimiento de la luz, así como la definición de conceptos referentes a la rugosidad de una superficie.

El segundo capítulo consta de una revisión general de las diferentes técnicas referentes a la caracterización del perfil de una superficie, mencionando técnicas mecánicas, por medio de microscopios y al final se analizan las técnicas de medición de esparcimiento de la luz de superficies rugosas, estas ultimas técnicas nos permiten entender el principio de la técnica que se propone en este trabajo.

El tercer capítulo describe el principio de la técnica propuesta DALIS utilizando como medio colector de la luz de esparcimiento un sistema de lentes, se presentan el arreglo experimental, así como los resultados obtenidos.

El cuarto capítulo muestra la misma técnica descrita en el capítulo 3, presentando una modificación en el sistema de colección de la luz de esparcimiento, utilizando un espejo

esférico, se presentan el arreglo experimental propuesto, así como los resultados experimentales obtenidos.

En el quinto capítulo se incluyen las conclusiones que se obtienen de esta nueva técnica propuesta. Finalmente se incluyen tres apéndices, los cual mencionan los trabajos a realizar y el cálculo inicial del coeficiente de rugosidad en base a los resultados experimentales obtenidos, así como las ponencias presentadas como resultado del trabajo de investigación realizado.

Capítulo 1.

Conceptos básicos de la teoría del esparcimiento.

1.1 Rugosidad.

En la industria óptica la medición y caracterización de rugosidades en superficies pulidas (algunas veces llamadas microrugosidades) ha sido importante por muchos años para la ingeniería óptica. [1-10] En los años 1990s este interés se incrementa al aplicar esta medición a la industria del semiconductor, procesamiento de obleas de semiconductores, paneles planos de desplegado, discos ópticos, etc. En este capítulo se presenta una revisión de los métodos más comunes de medición de rugosidades y las definiciones de términos usados para la cuantificación de la topografía de superficies como son rugosidad cuadrática media (rms), densidad de potencia espectral, longitud de autocorrelación, etc.

La *rugosidad* es una medida del relieve topográfico de una superficie. Es importante notar que las variaciones de la altura de la superficie son medidas a partir de un nivel promedio de la superficie y se expresan como un valor de rugosidad; rms. La separación entre rasgos similares de la superficie a lo largo de la superficie (lateral) es generalmente referido como *longitud de onda espacial de la superficie* o como *longitud de correlación*. Figura 1.1. La rugosidad consiste en la microtopografía de una superficie distribuida en una dirección aleatoria después de un proceso de pulido. Un valor típico del coeficiente de rugosidad de componentes ópticos de vidrio pulido esta en el rango de 1.5 nm a 2 nm mientras que superficies superpulidas y obleas electrónicas pueden tener un rango de angstroms o subangstroms.

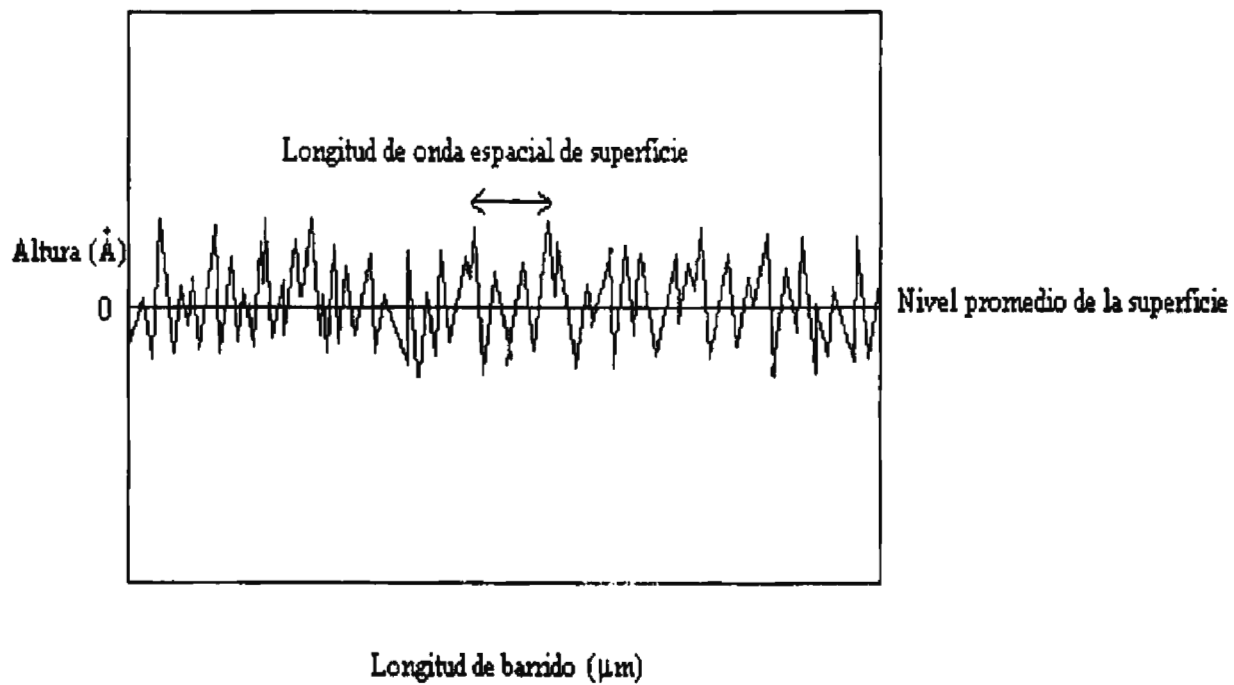


Figura 1.1 Representación esquemática de la rugosidad de la superficie.

1.1.1 Rayaduras, cavidades, partículas.

Las rayaduras es un defecto que está presente en la mayoría de las superficies, estas pueden deberse a un inapropiado tratamiento, o son producidas en la operación de acabado de las superficies. Puede tener un ancho de 10 μm o menos. En componentes ópticas estas pueden tener dimensiones de decenas de μm . Las rayaduras largas en superficies ópticas pueden observarse con el ojo humano sin ayuda, mientras que si estas son muy finas son visibles solo con la ayuda de un microscopio óptico o electrónico.

Las cavidades son hoyos remanentes en superficies ópticas que han sido esmeriladas y posteriormente pulidas. Además de las rayaduras, las microirregularidades están distribuidas sobre la superficie, estas pueden ser pequeñas rayaduras remanentes de un proceso de pulido óptico de alta calidad.

En general, cualquier estructura sobre una superficie que produce esparcimiento puede contribuir en la medición de la rugosidad de la superficie. Las superficies ópticas pueden fabricarse también por medio de un proceso mecánico de torneado con una punta de diamante, en este caso la superficie consiste de ranuras formadas por la herramienta de diamante.

Estrictamente hablando, las partículas de polvo no son parte intrínseca de la rugosidad de la superficie. El tamaño de las partículas de polvo pueden estar en el rango de varios micrómetros hasta pocos Angstroms. Otras formas de partículas incluyen salpicaduras de material evaporado como en las películas delgadas, pequeñas piezas de material cristalino producido por fractura, aerosol en el proceso de limpieza o aun saliva de la boca de personas al hablar cerca de la superficie limpia. Figura 1.2.

La rugosidad de la superficie es una de las características más importantes de las componentes ópticas y optoelectrónicas. La microtopografía de irregularidades de una superficie está distribuidas en direcciones aleatorias después del proceso de pulido. Por lo tanto, son necesarias las técnicas de caracterización de rugosidad superficial.

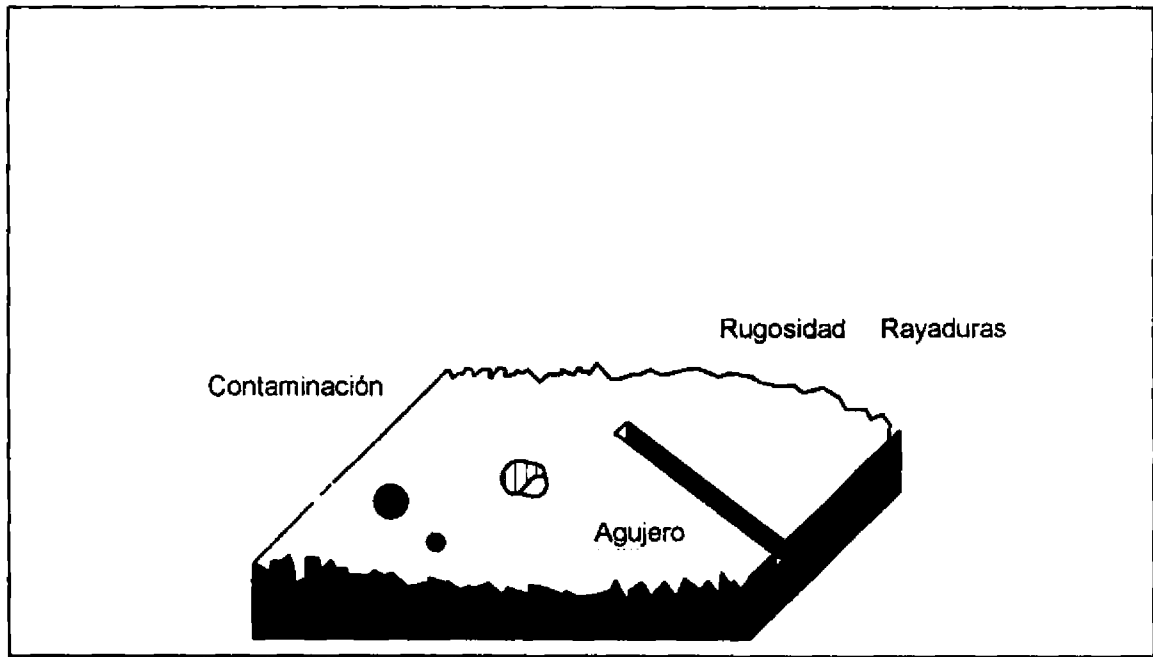


Figura 1.2 Definición de superficie.

1.1.2 Observación de la luz esparcida por una superficie.

Una manera fácil de observar una superficie, es colocándola bajo una iluminación brillante y uniforme, de esta manera se podrían resaltar fácilmente largas rayaduras con diferente orientación. El ojo humano tiene una gran capacidad para observar pequeñas cantidades de luz dispersada, la inspección puede ser realizada en un área limpia y oscura usando un laser He-Ne u otro laser visible, moviendo y rotando la muestra en diferentes direcciones. Figura 1.3. De esta manera es posible detectar pequeñas partículas de polvo y otros sitios de esparcimiento. Sin embargo, es difícil detectar una rugosidad menor a 1 \AA rms. Al realizar este procedimiento es necesario evitar en lo posible daños en la retina evitando mirar directamente el haz laser. En el caso de rayaduras pequeñas, partículas, microirregularidades, y marcas mecánicas es necesario el microscopio para su detección.

1.1 Rugosidad cuadrática media, rugosidad promedio, pendiente media cuadrática.

El más importante y mas usado de los parámetros estadísticos para definir la rugosidad es la rugosidad cuadrática media (rms) σ . En la Fig. 1.4, se muestra un corte de sección de la rugosidad de la superficie, el perfil se mide a lo largo de la línea de la longitud L . Esta línea define el nivel de superficie medio, donde las áreas de superficie que se encuentran por arriba y debajo de este nivel son iguales. Las variaciones de altura de la superficie se miden perpendicularmente a la línea L , en la dirección z . Matemáticamente el nivel de superficie medio se define como:

$$\sum_{i=1}^N Z_i = 0 \quad (1.1)$$

Considerando a N discreto, igualmente espaciado y medido en los puntos a lo largo de la línea L . El coeficiente de rugosidad rms, σ , se define como la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de la distancia z , de los puntos de nivel de superficie medio, esto es:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^2} \quad (1.2)$$

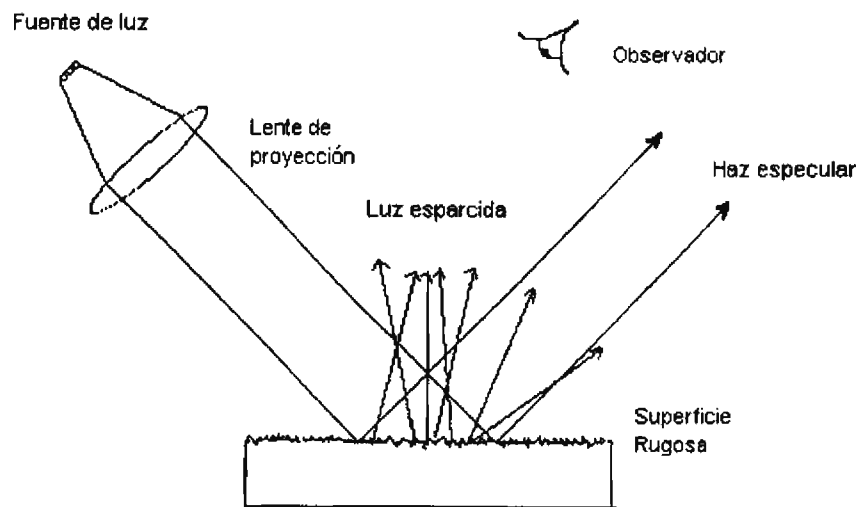


Figura 1.3. Observación de la luz esparcida por una superficie rugosa a través del ojo humano.

Además, si los puntos de datos representan promedios de las variaciones de altura, en una determinada área de la superficie, el valor rms, dependerá del tamaño de estas áreas. Por esta razón no existe un valor único de rugosidad rms de una superficie, y dependerá de lo siguiente:

- a) de la longitud L del perfil de la superficie.
- b) del área de la superficie a ser promediada sobre cada medición (resolución lateral).
- c) la distancia entre los puntos de datos (distancia de muestreo).

Además, la misma superficie puede tener diferentes valores de rugosidad rms dependiendo del instrumento usado para hacer las mediciones.

Si la rugosidad rms se calcula por la medición del esparcimiento de la luz, el valor obtenido tendrá siempre un ancho de banda limitado. Este valor depende también de la longitud de onda de la luz utilizada para la medición y el rango de ángulos por el cual se colecta el esparcimiento.

Aun cuando el valor de rugosidad rms se utiliza generalmente para describir el acabado de superficies ópticas, el promedio de rugosidad R_a se utiliza normalmente para definir la rugosidad de superficies maquinadas. La cantidad R_a se define como el promedio de los valores absolutos de las variaciones de las alturas de la superficie z_i , medida a partir del nivel de superficie medio, esto es:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i| \quad (1.3)$$

Si el perfil de una superficie no contiene desviaciones grandes sobre el nivel de superficie medio, los valores de σ y R_a serán similares.

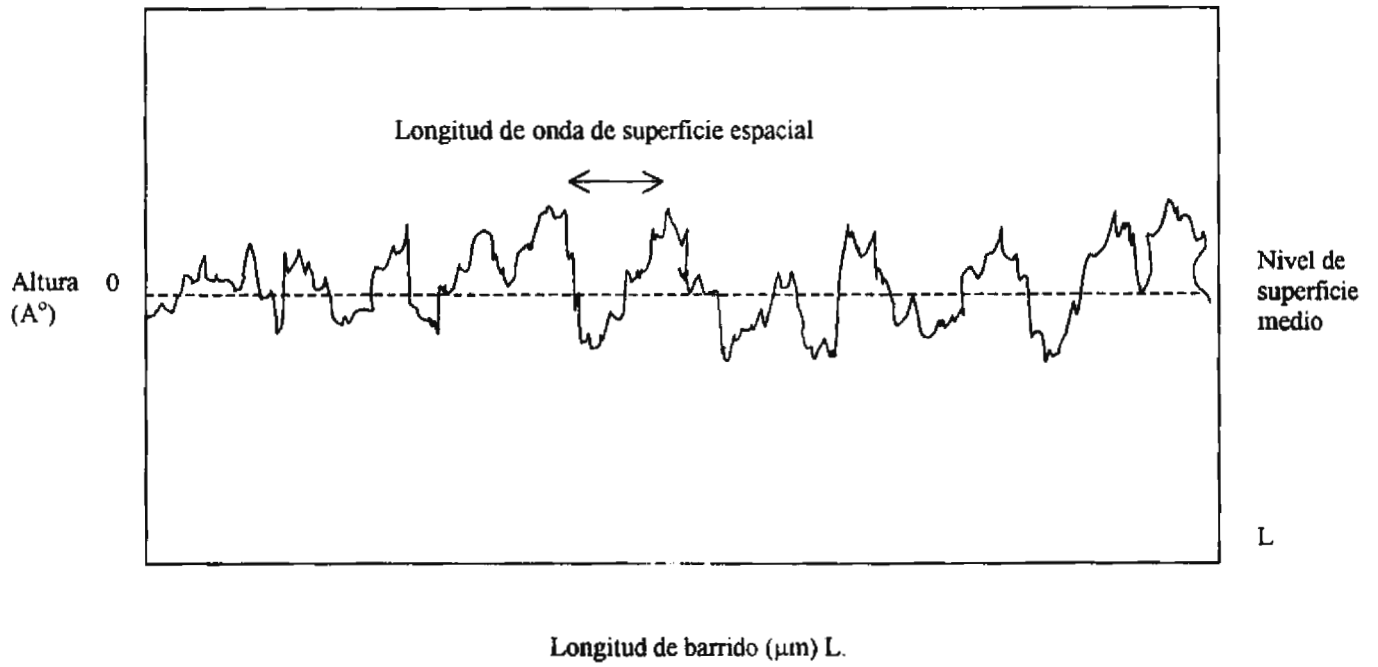


Figura 1.4. Representación esquemática de la rugosidad superficial.

1.2 Funciones de distribución de altura y pendiente. Oblicuidad y Agudeza.

La valor de la *pendiente rms* es más dependiente del instrumento de medición que del valor de rugosidad rms. Cada pendiente representa la diferencia entre las alturas de los puntos adyacentes divididos por el intervalo de los datos de muestreo, que expresado en forma matemática, es,

$$m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i^2} \quad (1.4)$$

donde,

$$m_i = \frac{(z_{i+1} - z_i)}{\tau_o} \quad (1.5)$$

y τ_o es la diferencia (constante) entre los puntos de datos medidos a lo largo del nivel de superficie medio.

El cálculo del valor de la pendiente depende generalmente de:

- la separación τ_o de los puntos de datos usados para el cálculo.
- la cantidad de áreas promedios de superficie relacionadas a cada punto medido.
- la cantidad de ruido del sistema de medición introducido en cada valor de altura z_i , para superficies suaves, donde el orden de rugosidad rms es de 1-2 A°. El cálculo del valor de la pendiente rms puede ser una función de la amplitud del ruido instrumental antes que de la topografía de la superficie.

Al obtener un promedio de los valores de σ ó R_a , de una muestra, es necesario saber el número de mediciones necesarias. Este número depende de la uniformidad de la muestra. Para una serie de N mediciones de σ_i , uno puede calcular, el promedio del valor de σ , expresado por σ_{AV} , entonces la *desviación promedio* es:

$$\text{Desviación promedio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\sigma_i - \sigma_{AV}| \quad (1.6)$$

Para medición de perfiles en superficies muy pulidas, se puede encontrar que el radio típico es de:

$$\frac{\text{Desviación promedio}}{\sigma_{AV}} \approx 0.10 \text{ a } 0.20. \quad (1.7)$$

Es también posible utilizar el valor de la *desviación estándar* en lugar de la desviación promedio, definida por:

$$\text{Desviación estándar} = \left[\frac{1}{N(N-1)} \left[N \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i \right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.8)$$

La ventaja de la desviación estándar es de que puede calcularse como una variable que varia de acuerdo a los datos experimentales. La desviación promedio solo puede calcularse ya que se ha terminado con la medición.

El parámetro conocido como *Skewness* representa una medición de la simetría de un perfil alrededor del nivel de superficie medio.

$$\text{Skewness} = \frac{1}{\sigma^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^3 \quad (1.9)$$

y el parámetro *Kurtosis* representa una medida de la agudeza de la función de distribución de alturas.

$$\text{Kurtosis} = \frac{1}{\sigma^4} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^4 \quad (1.10)$$

1.3 Función de autocovarianza, longitud de correlación y longitud de onda espacial de superficie.

La *función de autocovarianza* representa la medida de las propiedades de correlación de la rugosidad de la superficie. La descripción analítica de la función de autocovarianza de un perfil de la superficie de una longitud infinita compuesta de datos de puntos discretos se define como:

$$G(l) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-l} z_i z_{i+l} \quad l = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1.11)$$

La transformada de Fourier de la función de autocovarianza, la función de densidad espectral, es un parámetro muy importante en el cálculo del ARS.

La función de autocorrelación es una función adimensional que se utiliza en algunas ocasiones en lugar de la función de autocovarianza.

La longitud de onda espacial de superficie es un parámetro que tiene unidades de micrómetros. Si la rugosidad de la superficie esta en la forma de ondas senoidales o en una función periódica en general, la longitud de onda espacial representa el periodo espacial de la función. El recíproco de esta función, es la frecuencia espacial.

La topografía de una superficie normal pulida será isotrópica y aleatoria. Isotropía significa que la rugosidad puede ser la misma, si esta se mide en cualquier dirección de la superficie. El hecho que la rugosidad sea aleatoria significa que el perfil de la superficie puede representarse por una superposición de series periódicas que tienen diferente amplitud, periodo, y orientación.

Al utilizar diferentes perfilómetros se obtienen rangos diferentes de longitud de onda espacial de superficie. Por esta razón, los valores de la rugosidad rms que se obtienen con diferentes instrumentos son diferentes generalmente debido a que existen componentes de rugosidad de muchas longitudes espaciales de superficie presentes en la superficie.

Si un sistema de medición de esparcimiento integral total, (la cual se describe en el siguiente capítulo) es usado para obtener el valor de la rugosidad efectiva rms, el rango de la longitud de onda espacial de superficie incluida en la medición depende de la longitud de onda de la luz

incidente, el ángulo de incidencia y el ángulo mínimo y máximo de colección del instrumento. Este puede calcularse utilizando la ecuación de rejilla de difracción, considerando solamente el primer orden de difracción si la amplitud de rugosidad es mucho mas pequeña que la longitud de onda λ de la luz utilizada:

$$\lambda = e(\sin\theta_0 \pm \sin\theta_d) \quad (1.12)$$

donde e es el espacio de ranura (longitud de onda espacial), θ_0 , el ángulo de incidencia y θ_d , el ángulo de difracción.

1.4 Función de densidad de energía espectral, (PSD).

La *función de densidad de energía espectral* (PSD), representa el espectro de frecuencia de la rugosidad de la superficie y puede ser encontrada de los datos del perfil de la superficie con el uso del análisis de Fourier y la teoría de señal aleatoria.

Esta función proporciona información acerca de la frecuencia espacial de superficie en la luz esparcida y es el factor de superficie que se utiliza en la expresión del esparcimiento diferencial, (se describe en el siguiente capítulo), que determina la cantidad de luz esparcida por unidad de ángulo sólido en una superficie.

Si se ha realizado la medida del esparcimiento diferencial en una superficie, es posible utilizar la teoría vectorial de esparcimiento para obtener la densidad de energía espectral. De tal manera que la transformada de Fourier de esta función nos dará la función de autocovarianza. Mas

específicamente la función PSD es el cuadrado de la transformada de Fourier del perfil original o la transformada de Fourier de la función de autocovarianza, Fig. 1.5.

La función PSD se calcula a partir de la distribución de la superficie rugosa $z(x,y)$ como:

$$S(f_x, f_y) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L^2} \left| \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} z(x, y) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \right|^2, \quad (1.13)$$

evaluada en las frecuencias espaciales,

$$f_x = \frac{\text{sen } \theta_s \cos \phi_s - \text{sen } \theta_i}{\lambda}, \quad (1.14)$$

$$f_y = \frac{\text{sen } \theta_s \sin \phi_s}{\lambda} \quad (1.15)$$

donde la dirección de incidencia de la luz está dado por el ángulo θ_i y de la dirección del esparcimiento esta dado por los ángulos θ_s y ϕ_s .

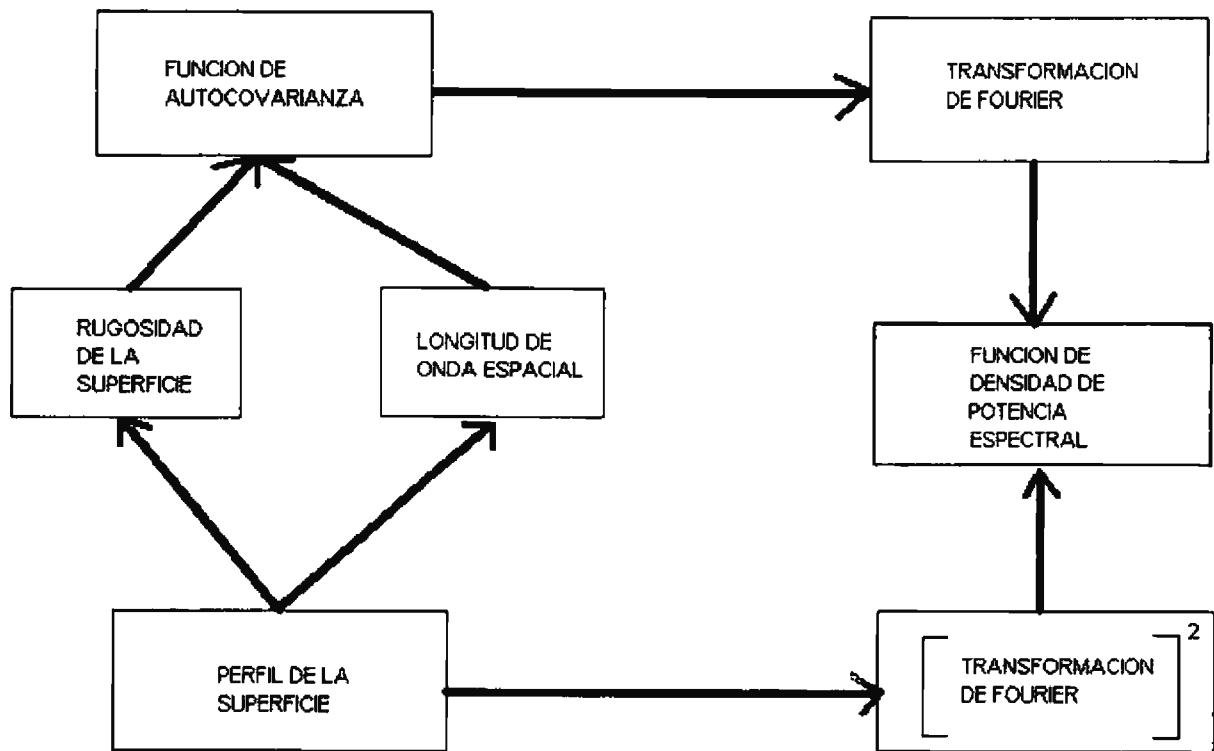


Figura 1.5. Esparcimiento ARS, relación entre los diferentes parámetros.

1.5 La función de distribución de esparcimiento bidireccional, (BRDF).

La derivación y notación de la función BRDF se acredita a F. E. Nicodemus [11] y representa en términos radiométricos la radiancia de una superficie dividida por la irradiancia incidente a la superficie. Acorde con esta definición del BRDF, encontramos una relación simple de la energía diferencial,

$$BRDF = \frac{1}{\cos \phi_s} \frac{dP_s}{P_i d\Omega_s} \quad (1.16)$$

En la definición de esta función los subíndices i y s se refieren a las cantidades de luz incidente y esparcida, respectivamente y $d\Omega_s$ es el diferencial del ángulo sólido. La dirección del haz especular está dado por $\theta_s = \theta_i$ y $\phi_s = 0$. Y la retrodirección estará dado por $\theta_s = \theta_i$ y $\phi_s = 180^\circ$. Esta función esta basada en la relación entre la rugosidad de la superficie y la luz esparcida. Experimentalmente, la distribución espacial de la luz esparcida esta dada por el BRDF. El valor numérico de la función BRDF depende de la dirección de incidencia de la luz $(\theta_i, 0)$ y de la dirección del esparcimiento (θ_s, ϕ_s) y puede interpretarse como la reflectancia direccional por unidad de ángulo sólido de la luz de esparcimiento colectada. En la interpretación de los datos experimentales, son necesarios los modelos teóricos que relacionan la función BRDF con la rugosidad de la superficie.

Por otra parte, la función BRDF de una superficie puede calcularse por la teoría de esparcimiento escalar [12] o vectorial [1, 13].

Church et al. [14, 15] presentaron una simple relación basada en la teoría del vector de la perturbación de Rayleigh-Rice. En este modelo la luz de esparcimiento se caracteriza por la densidad de energía diferencial dP_s , por unidad de ángulo sólido $d\Omega_s$.

La función PSD puede obtenerse también de la rugosidad de la superficie de la medición de BRDF, basado en varios modelos teóricos de esparcimiento [16-19].

Por lo tanto, podemos relacionar a la función BRDF con la función de densidad de energía espectral (PSD). Si $S(f_x, f_y)$ es la función de densidad de potencia espectral que depende de las frecuencias espaciales f_x and f_y :

$$\frac{\left(\frac{dP_s}{d\Omega_s} \right) d\Omega_s}{P_i} = 4 k^4 \cos\theta_i \cos^2\theta_s Q S(f_x, f_y) d\Omega_s \quad (1.17)$$

donde la cantidad k^4 es el factor Rayleigh, P_i es la energía incidente y la cantidad Q es el factor de polarización, $S(f_x, f_y)$ es la función PSD de una superficie bidimensional.

Este modelo es válido si la superficie es ópticamente suave, y el coeficiente de rugosidad rms, σ es mucho mas pequeño que la longitud de onda λ de la luz empleada.

1.6 El factor de polarización Q.

El *factor de polarización Q*, es un número real que relaciona los efectos de las propiedades del material de la superficie en la función BRDF. Este valor depende de una constante dieléctrica,

ε , y es la suma de cuatro posibles combinaciones de la polarización de incidencia y observación [16]:

$$Q_{ss} = \left| \frac{(\varepsilon - 1) \cos \phi_s}{\left(\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i} \right) \left(\cos \theta_s + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_s} \right)} \right|, \quad (1.18)$$

$$Q_{sp} = \left| \frac{(\varepsilon - 1) \left(\sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i} \right) \sin \phi_s}{\left(\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i} \right) \left(\varepsilon \cos \theta_s + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_s} \right)} \right|, \quad (1.19)$$

$$Q_{ps} = \left| \frac{(\varepsilon - 1) \left(\sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i} \right) \sin \phi_s}{\left(\varepsilon \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i} \right) \left(\cos \theta_s + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_s} \right)} \right|, \quad (1.20)$$

$$Q_{pp} = \left| \frac{(\varepsilon - 1) \left(\sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_s} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i} \cos \phi_s \right) - \varepsilon \sin \phi_i \sin \theta_s}{\left(\varepsilon \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i} \right) \left(\varepsilon \cos \theta_s + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_s} \right)} \right| \quad (1.21)$$

donde los subíndices ss, sp, ps y pp representan la polarización incidente y la polarización observada, respectivamente. El factor de polarización Q , describe la dependencia del esparcimiento de superficies reflectivas limpias y suaves (superficies pulidas, limpias y reflectivas) con la polarización.

Capítulo 2.

Sistemas de observación y medición de la rugosidad.

2.1 Perfilómetros mecánicos.

El Perfilómetro mecánico [19], es un instrumento de medición por contacto que utiliza una punta de diamante que toca la superficie de prueba, midiendo las variaciones de altura de la superficie a través de la variación de alturas de la punta de prueba al moverse sobre la superficie.

El movimiento mecánico de la punta (la cual tiene un radio de 0.00005 in a 0.0005in) es convertido en una señal eléctrica, la cual es amplificada obteniendo una señal de salida de corriente directa.

Este perfil puede desplegarse como una línea ondulada en el registro de un diagrama con las alturas relativas enormemente exageradas a lo largo de la superficie.

Este instrumento debe colocarse en una mesa de aislamiento de vibración. Un instrumento común puede tener una exactitud en el perfil de una superficie suave de aproximadamente $10 \text{ A}^\circ \text{ rms}$, (figura 2.1). La resolución lateral se determina por la muestra y el radio de la punta y será mayor a $0.2 \text{ }\mu\text{m}$. Como ejemplo de este tipo de perfilómetro esta el Dektak3st de Veeco.

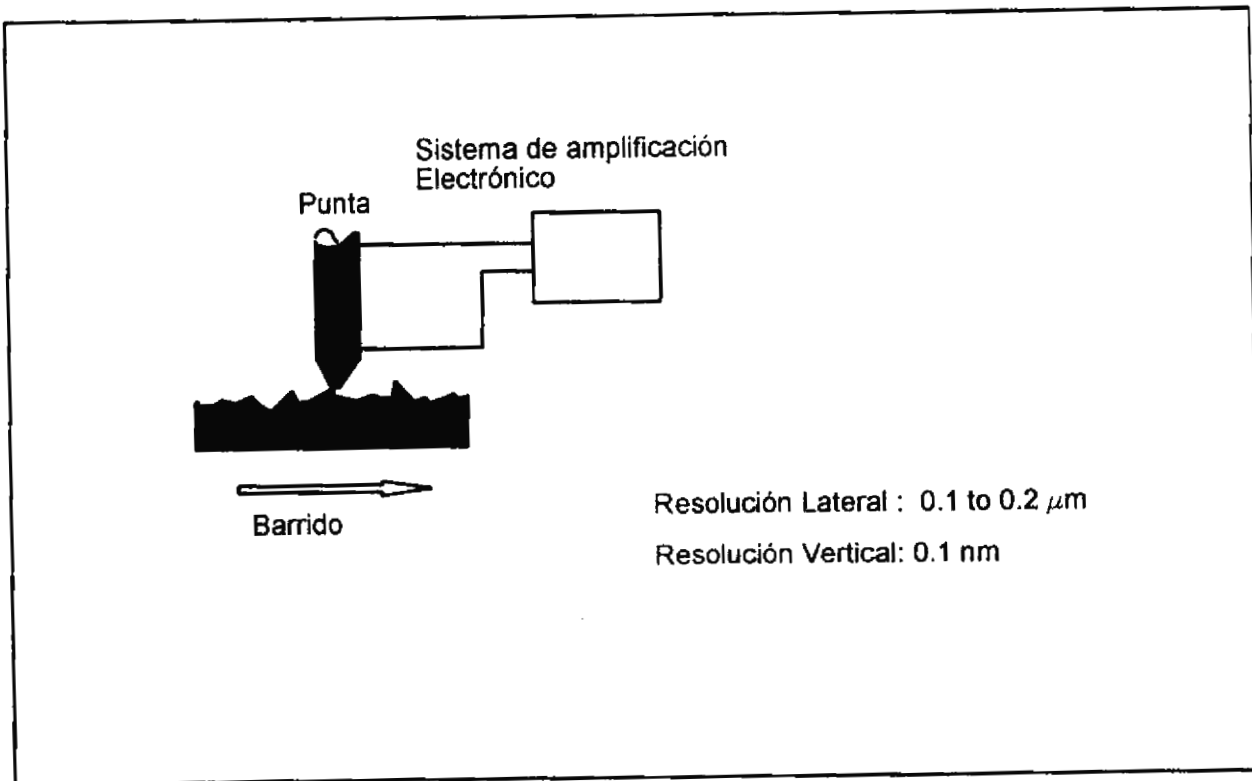


Figura 2.1 Perfilómetro mecánico.

2.2 Perfilómetros ópticos.

La característica común de los perfilómetros ópticos (sin contacto mecánico) [19], es que usan un haz de luz en alguna forma de microscopio para obtener un perfil de la superficie. La sensibilidad de la altura depende del instrumento en particular y puede variar de 10-20 Å° a menores que 1Å° . La calibración de la altura de la mayoría de los perfilómetros ópticos es absoluta debido a que la altura es medida en fracción de una longitud de onda conocida.

El perfil obtenido con un perfilómetro óptico representa un promedio sobre un área de la superficie. La resolución lateral se determina por la longitud de onda de la luz y de la resolución de las lentes del microscopio y otros elementos del instrumento. Como ejemplo tenemos el perfilómetro óptico Zigo, el perfilómetro óptico WYCO TOPO-2D, el perfilómetro óptico WYCO TOPO-3D, etc. [19].

2.3 Microscopio de interferencia diferencial de contraste (Nomarski).

El microscopio de interferencia diferencial de contraste (Nomarski), [19] es quizá, el instrumento más usual para la observación de rugosidad de superficies y otros defectos de la superficie.

Con este microscopio es fácil ver rayaduras, partículas de polvo, marcas de limpieza, huellas digitales, cavidades, pequeñas ondulaciones, microestructuras, estructuras granuladas, y todo tipo de marcas mecánicas.

La luz de iluminación pasa a través de un polarizador y a través de un prisma Wollaston, donde se divide en dos haces linealmente polarizados. Los lentes del microscopio focalizan

esta luz en dos puntos separados a una distancia dada (típicamente $1\ \mu\text{m}$), que depende de la amplificación del objetivo. Los pequeños defectos en la superficie, introducen diferencia de fase relativa entre los haces. El microscopio Nomarski es sensible a diferencias en la altura de la superficie en el orden de pocas decenas de Angstroms.

2.4 Microscopios Electrónicos: SEM y TEM y Microscopios de Barrido: STEM y STM.

Si las irregularidades de las superficies son muy pequeñas para ser observadas en un microscopio óptico, pueden utilizarse diferentes tipos de microscopios que usan un haz de electrones en lugar de luz para formar imágenes. Estos microscopios de electrones utilizan un tubo de rayos catódicos (CRT), pantallas fluorescentes u algún otro dispositivo que permita obtener una imagen visible.

El microscopio electrónico de transmisión (TEM), de barrido (SEM), y de barrido (STEM) están disponibles comercialmente. El microscopio de barrido túnel (STM), es el más sensible, de alta resolución que puede dar información acerca de la densidad de electrones de la superficie de un cristal.

Microscopio electrónico de transmisión (TEM) [19]. Este tipo de microscopio es similar al microscopio de luz exceptuando que este usa electrones para la iluminación y lentes especiales para enfocar los electrones transmitidos dentro de una pantalla fluorescente. La resolución lateral del microscopio es proporcional a la longitud de onda incidente. Este tipo de microscopio es excelente para observar detalles de superficies ópticas suaves, pulidas o superficies cubiertas con una película delgada. Las alturas de la topografía característica puede determinarse de las sombras producidas por el proceso de replicación de sombreado.

Microscopio electrónico de barrido (SEM) [19]. Este tipo de microscopio usa un haz de prueba de electrones que es electrónicamente barrido sobre una superficie de muestra en un patrón parecido al barrido de TV. El haz secundario emitido por la muestra se colecta por el

detector. El campo de electrones secundario es una función del ángulo de emisión de la superficie, que al sincronizarse la salida del detector con el haz de electrones de barrido, se forma una imagen de la topografía de la superficie. Las muestras no conductoras deben cubrirse con una película muy delgada de oro u oro- paladio para prevenir efectos de carga. Este instrumento muestra detalles de la topografía de la superficie con una resolución lateral de 35 \AA para un SEM estándar, 9 \AA para una SEM de emisión de campo y 150 \AA para un SEM de bajo voltaje [19].

Microscopio electrónico de barrido de transmisión (STEM) [19]. Un microscopio STEM produce micrografías de alta resolución (20 \AA) de superficies suaves, la misma porción de la muestra puede ser vista en el modo de operación de barrido o de imagen, esta combinación de capacidad es ideal para el estudio de películas delgadas de transmisión. El microscopio STEM es el único método por el cual las características de la topografía de la superficie pueden correlacionarse con la estructura del material de la superficie. Adicionalmente, es fácil de obtener la información de defectos de superficie.

Microscopio de tunelaje de barrido (STM) [19]. En este microscopio un voltaje es aplicado a una punta, colocada a una distancia de unos cuantos espacios atómicos por encima de la superficie de prueba y una pequeña corriente por tunelaje fluye entre la punta y la muestra, la corriente exponencial disminuye cuando una distancia entre la punta de prueba y la superficie se incrementa. Debido a que la superficie de la punta es muy delgada, la corriente que pasa por tunelaje esta limitada a una pequeña área de la superficie, del orden de $1 \text{ a } 2 \text{ \AA}$ de diámetro, así que la resolución es del orden de la distancia interatómica. Para estudiar la topografía superficial, la punta se mueve en un patrón de rastreo por encima de la superficie y la distancia entre la punta y la superficie se mantiene constante para que la corriente que pasa por tunelaje sea constante. Se puede generar una imagen tridimensional de la superficie monitoreando el movimiento vertical de la punta en función de su posición en el plano de la superficie.

Aunque el STM es excelente para el estudio de la topografía de materiales conductores, esta no puede ser usada para aislantes, ni en materiales como el silicio, aluminio y otros

semiconductores. Afortunadamente otros instrumentos como el microscopio de fuerza atómica puede ser usado para este propósito.

2.5 Esparcimiento de la luz.

La medición del esparcimiento de la luz es una útil técnica de inspección para muchas aplicaciones dentro de la industria óptica, que se aplica en la industria del semiconductor, en el estudio de superficies pulidas, en el disco óptico, en paneles planos, etc.

La mayor parte de la luz que nosotros observamos es luz esparcida, como ejemplo tenemos el arcoiris, la puesta del sol, el color azul del cielo, etc. Rayleigh estudió por primera vez el esparcimiento (1871), considerando el caso de partículas más pequeñas que la longitud de onda. Este trabajo incluye la determinación de la intensidad de esparcimiento, que es proporcional a $1/\lambda^4$. Un haz luminoso reflejado o transmitido es la suma de un gran número de componentes del esparcimiento con dirección, fase y frecuencia similares. En este sentido, el esparcimiento fuera del haz especular puede observarse como el resultado de fluctuaciones en un material. Si las fluctuaciones son periódicas, también así es el esparcimiento, mientras que si las fluctuaciones son aleatorias producen un modelo de esparcimiento aleatorio. Esta es la propiedad que hace valiosa la medición del esparcimiento, una herramienta para la caracterización de la calidad de componentes y la localización de defectos.

Cuando se calcula la rugosidad de la superficie de la medición del esparcimiento, es importante cumplir con la condición de que el esparcimiento es debido a las microirregularidades y no al polvo o alguna otra forma de partículas contaminantes, el esparcimiento producido por partículas contaminantes puede no estar correlacionado con la rugosidad.

2.5.1 Sistema de medición de esparcimiento integral total, (TIS).

El *esparcimiento total integrado* (TIS) [20-22], es un buen método para medir la rugosidad de la superficie debido a que el dispositivo experimental puede ser poco complicado y la rugosidad rms se obtiene de una manera sencilla. En los primeros sistemas de medición no era necesario medir la luz de esparcimiento como una función del ángulo. En lugar de esto, estos instrumentos integran una gran fracción de la luz de esparcimiento dentro de una hemiesfera colocada frente a la muestra reflectiva y enfocada a un detector. La medición de la energía de esparcimiento se normaliza por la energía de la reflexión especular y el radio definido como el esparcimiento total integrado (TIS). El resultado es un instrumento que provee resultados repetibles, simples y rápidos para caracterizar el esparcimiento de la muestra.

La instrumentación del TIS introduce el esparcimiento óptico como una fuente de reconocimiento de información metrológica, figura 2.2.

Durante la segunda guerra mundial, fue de considerable interés el estudio del esparcimiento aplicado a la medición de superficies rugosas por radar debido al problema del esparcimiento del mar asociado con la detección de blancos navales.

La siguiente relación de la energía fraccional del esparcimiento de una superficie plana, limpia y conductora es:

$$TIS = \frac{P_s}{RP_i} = \frac{P_s}{P_0} = \left(4\pi \frac{\sigma \cos\theta_i}{\lambda} \right)^2. \quad (2.1)$$

donde σ es el coeficiente de rugosidad , λ es la longitud de onda, P_s es la potencia esparcida, P_o es la potencia incidente, θ_i es el ángulo de incidencia.

La instrumentación del sistema de medición TIS consiste de una fuente de luz, usualmente un laser He-Ne, un filtraje espacial, un control del tamaño del diámetro del haz, un sistema de detección para la luz especular y la luz de esparcimiento, un equipo electrónico apropiado para la medición y el procesamiento de datos. La luz esparcida puede colectarse utilizando una esfera integradora o usando una hemiesfera aluminizada. La reflectancia en el aluminio es razonablemente alta en la región visible, infrarroja y ultravioleta. La medición de los coeficiente de rugosidad de superficies por la técnica TIS estará en un rango de $1A^\circ$ a $100A^\circ$.

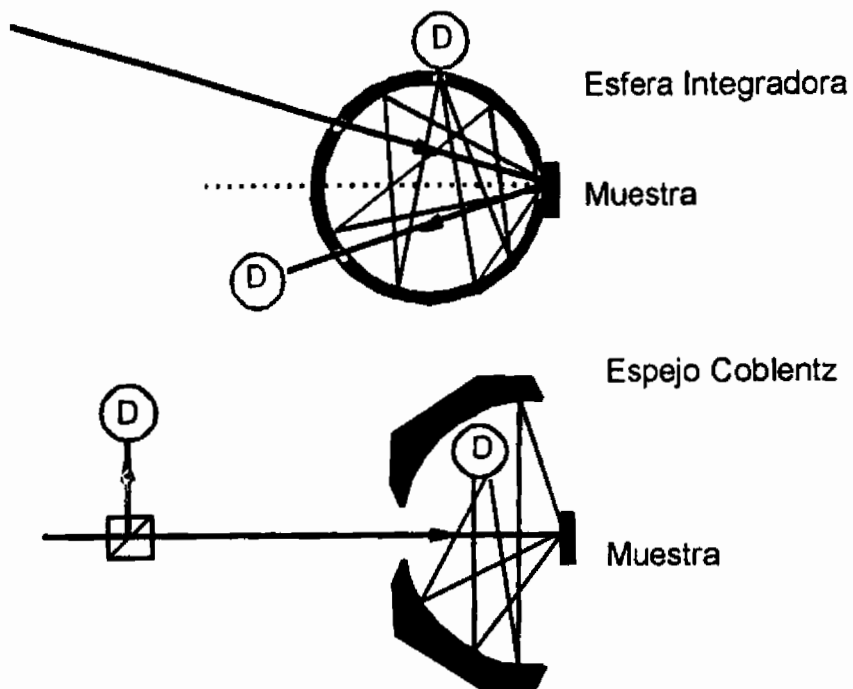


Figura 2.2. Sistemas de medición TIS,
donde D es el detector.

2.5.2 Sistema de medición del esparcimiento por resolución angular (ARS).

La medición de la luz de esparcimiento de superficies ópticas es de gran interés en la ingeniería óptica, la técnica más comúnmente utilizada para este propósito es la técnica de medición de esparcimiento por resolución angular, ARS, [3,10,15,18, 23-33].

En el sistema ARS, un laser es obturado para reducir el ruido electrónico y óptico, esto se acompaña además con el uso de un amplificador lock-in que suprime todas las señales exceptuando la señal de referencia, un filtraje espacial remueve el esparcimiento de la luz laser, el tamaño de punto de luz en la muestra se determina por los elementos del sistema geométrico y puede ajustarse cambiando la longitud focal y la posición de las lentes. La muestra se monta en una mesa de movimiento con 6 grados de libertad requeridos para un ajuste completo de la muestra (tres grados de traslación y tres grados de rotación). Un fotodetector hace un barrido de la luz de esparcimiento distribuida en el espacio y una mesa con movimiento rotacional se mueve por un motor controlado por una computadora. De esta manera la abertura de entrada puede localizarse en cualquier posición en el círculo de observación. El barrido de los datos puede iniciarse en cualquier ángulo (figura 2.3).

Esta distribución de intensidad se registra como una función de los ángulos de esparcimiento, es decir, como la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF). Se obtiene también la función de densidad de energía espectral, (PSD) de la rugosidad de la superficie por medio de la función BRDF.

Si la distribución angular de la luz de esparcimiento se mide, la función PSD puede determinarse fácilmente, así como una función de autocovariancia. Debido a que la información de fase acerca de las características de la superficie se pierden, no siempre es posible obtener el perfil de la superficie. Alternativamente, puede obtenerse la rugosidad rms integrando la medición de valores de ARS para todos los ángulos (para dar como resultado la TIS) y usando la ecuación (2.1) para calcular σ .

Entre las dificultades que se presentan en la medición de la luz esparcida, está el hecho de que el análisis de los datos es más difícil y la teoría que relaciona el esparcimiento con la rugosidad rms es mucho más complicada. Por otro parte, más información estadística de la superficie puede obtenerse por este método comparándolo con el TIS.

En el sistema ARS, la intensidad de la luz de esparcimiento puede estar en el orden de 10^{-6} a 10^{-8} de la intensidad de la luz reflectada. Este problema se soluciona utilizando sofisticados métodos mecánicos y electrónicos. La unidad de detección requiere un rango dinámico sobre 6 a 8 décadas y es necesario utilizar filtros de densidad neutra con diferentes densidades para atenuar la luz especular reflectada.

Otro problema que se puede presentar en este sistema es que el fotodetector puede colocarse al final de un brazo de rotación, el problema mecánico radica en que dependiendo la longitud del brazo (si es demasiado largo) y del peso del fotodetector, podrían causarse vibraciones no deseadas que afectan el proceso de recolección de la luz de esparcimiento.

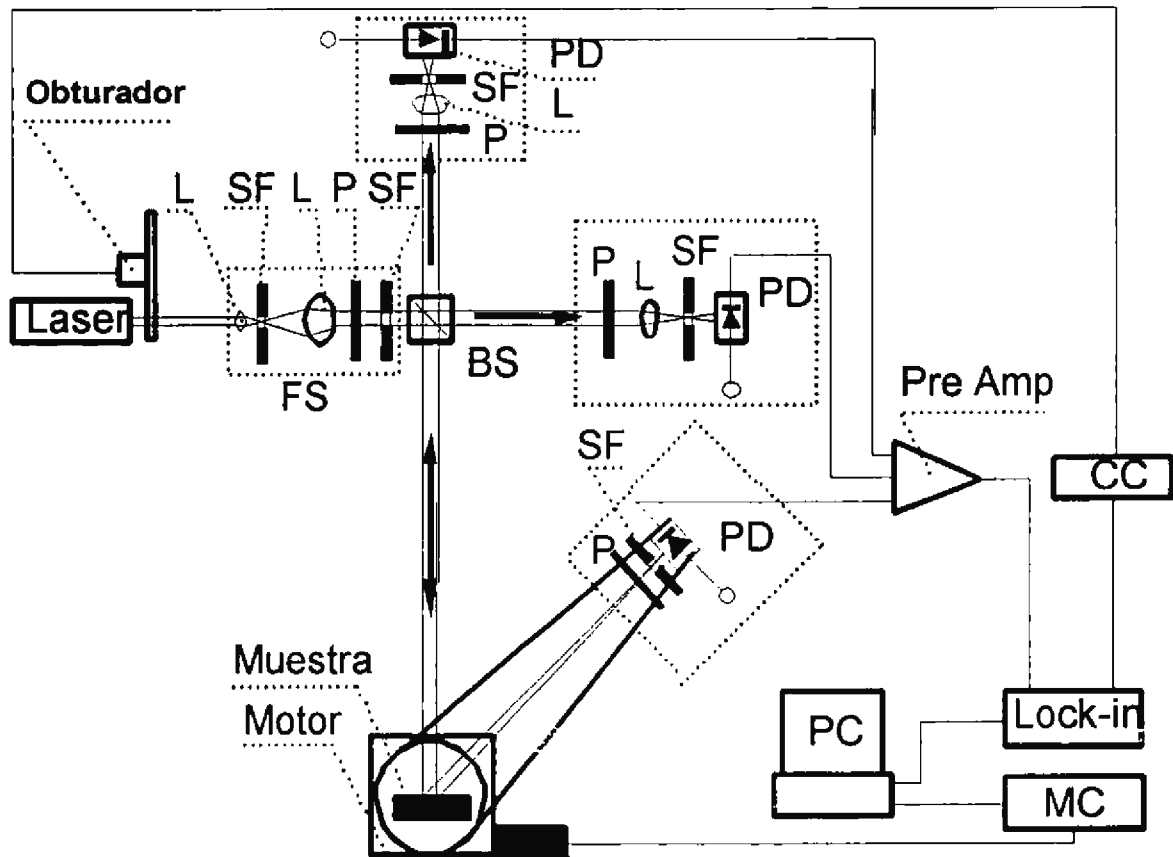


Figura 2.3. Sistema de medición ARS,

donde:

L son lentes, FS es el sistema filtro y colimador del haz,
 CC es el controlador del chopper, P son polarizadores,
 SF son filtros espaciales, BS es un divisor de haz,
 PD son fotodiodos, MC es un control de motor.

2.5.3 Sistema de medición del esparcimiento integral por ángulo limitado (ALIS).

En este método de medición [34-38], se colecta la luz de esparcimiento en un ángulo sólido limitado utilizando lentes convencionales. El sistema de medición ALIS se ha utilizado para la inspección de superficies ópticas pulidas [38]. Este método resulta simple, eficiente con respecto a su costo y los tiempos necesarios para obtener la medición son muy cortos y los resultados presentan una exactitud aceptable.

Algunos autores [34], han propuesto líneas de inspección de superficies ópticas pulidas utilizando esta técnica. En la medición del esparcimiento de la superficie el interés más importante está en caracterizar la rugosidad de la superficie de la medición de los datos de esparcimiento. En el sistema ARS esto se obtiene con la medición de PSD de BRDF. La PSD es proporcional al BRDF siempre que el valor de rugosidad rms sea mucho más pequeño en comparación con la longitud de onda del haz de prueba ($\sigma \ll \lambda$). En el sistema de medición ALIS, es necesario desarrollar un modelo teórico que nos permita interpretar los datos medidos. En el sistema de medición ALIS la relación proporcional entre PSD y BRDF se utiliza. La medición de la señal ALIS en este caso puede expresarse como:

$$ALIS = \frac{1}{P_O} \int_{\phi_s = -\phi_{sO}}^{\phi_{sO}} \int_{\theta_s = \theta_{smin}}^{\theta_{smax}} \frac{dPs}{dWs} dWs \quad (2.2)$$

En la ecuación (2.2) la luz esparcida se colecta sobre un ángulo sólido $\Delta\omega_s$. Este ángulo sólido de colección se describe por el rango del ángulo de esparcimiento azimutal $\phi_{sO} \leq \phi_s \leq \phi_{sO}$ y el ángulo de esparcimiento polar $\theta_{min} \leq \theta_s \leq \theta_{max}$, figura 2.4.

El arreglo experimental consta básicamente de un laser, el cual es modulado por un obturador mecánico que provee una señal de referencia al amplificador lock-in. Un filtraje espacial y una colimación nos permiten obtener una haz paralelo libre de ruido. Un divisor de haz divide al

haz en dos partes, una de ellas ilumina la muestra a incidencia normal, este haz se refleja pasando nuevamente por el divisor de haz, y la luz se colecta por un fotodetector. La luz esparcida se colecta a su vez por lentes con un ángulo de colección determinado, el rango de detección de la luz esparcida se determina por la apertura de la lente de colección y la distancia entre la superficie y esta lente.

Comparando esta técnica con TIS, la técnica ALIS es particularmente fácil de implementar en líneas de inspección, por otra parte, ambas técnicas son limitadas en ancho de banda, la rugosidad superficial se determina por la longitud de onda espacial y por el rango de los ángulos de colección de la luz de esparcimiento, el cual es siempre mayor en la técnica TIS, esto hace que la técnica TIS tenga un ancho de banda mayor.

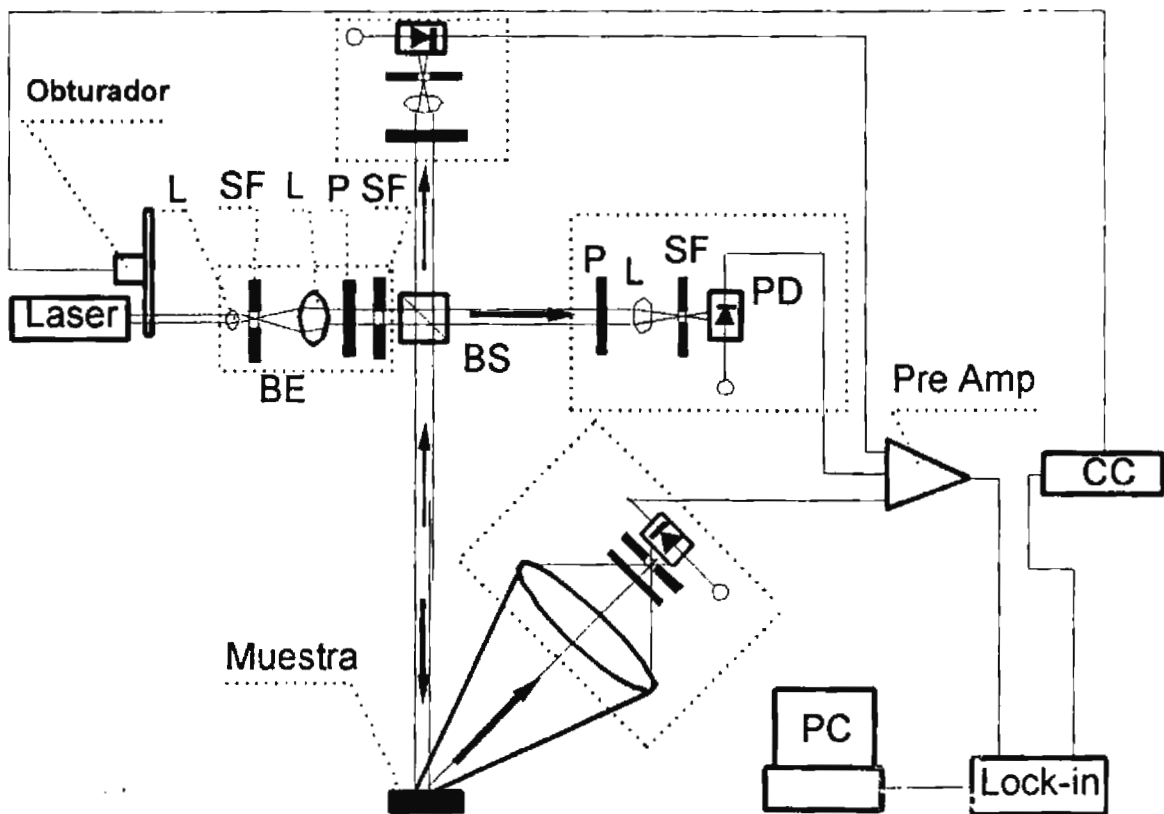


Figura 2.4. Sistema de medición ALIS.

donde:

L son lentes, BE es el expansor del haz,
 CC es el controlador del chopper, P son polarizadores,
 SF son filtros espaciales, BS es un divisor de haz,
 PD son fotodiodos.

Capítulo 3.

Sistema de medición del esparcimiento integral por ángulo dinámico limitado (DALIS), utilizando como medio colector un sistema de lentes.

3.1 Principio.

En este capítulo describimos un sistema novedoso que proponemos como una nueva opción en la medición del esparcimiento de la luz en superficies ópticas, a esta nueva técnica le hemos llamado medición del esparcimiento integral por ángulo dinámico limitado, DALIS, el cual es un nuevo método de medición de la luz de esparcimiento y presenta varias ventajas sobre el método convencional ARS (figura 3.1). La explicación de esta nueva propuesta se desarrolla en los capítulos 3 y 4, respectivamente.

El sistema de medición DALIS [39], colecta la luz de esparcimiento en un ángulo que cambia durante el proceso de medición. La unidad de detección no requiere un rango dinámico grande. En el sistema DALIS se adopta un movimiento lineal para el barrido de la luz de esparcimiento, a diferencia del sistema de medición ARS. Esto se obtiene al mover la mesa en la dirección del eje óptico, cambiando la distancia de observación d y el ángulo de observación θ_{so} , como consecuencia, cambia también el ángulo sólido $\Delta\Omega_s$. La señal ALIS es registrada entonces como una función de la distancia de barrido entre la muestra y el divisor de haz (BS). Cuando la muestra se mueve alejándose del detector, el ángulo de observación decrece y produce una disminución en la señal ALIS.

En el sistema de medición ALIS se aplica también la relación proporcional entre PSD y BRDF que puede expresarse como:

$$ALIS = \frac{P_S}{P_R} = \frac{\int_{\phi_s = -\phi_{s0}}^{\phi_{s0}} \int_{\theta_s = \theta_{min}}^{\theta_{max}} BRDF(\theta_i; \theta_s, \phi_s) \sin \theta_s d\theta_s d\phi_s}{\int_{\phi_s = -\pi}^{\pi} \int_{\theta_s = 0}^{\frac{\pi}{2}} BRDF(\theta_i; \theta_s, \phi_s) \sin \theta_s d\theta_s d\phi_s} \quad (3.1)$$

El ángulo sólido de colección es descrito por el rango del ángulo de esparcimiento azimutal $-\phi_{s0} \leq \phi_s \leq \phi_{s0}$ y el ángulo de esparcimiento polar $\theta_{min} \leq \theta_s \leq \theta_{max}$, como se muestra en la ecuación (3.1). Ambos rangos son relacionados por la apertura de las lentes de colección α , el ángulo de observación θ_{s0} y la distancia d , como se muestra en la figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

La señal ALIS se define como la potencia de la luz de esparcimiento P_S sobre un ángulo sólido $\Delta\omega_s$ en el cual la luz es colectada sobre la potencia de la reflexión especular P_R [39].

Por otra parte, es posible encontrar las variaciones en el esparcimiento contra las variaciones de el ángulo colector. En principio, en el proceso de medición, una muestra óptica montada sobre una mesa de traslación que se mueve en dirección del eje óptico, produce un cambio de la distancia d y el divisor de haz (BS) y un cambio en el ángulo de observación θ_{s0} que produce a su vez un cambio en los ángulos θ_{min} , θ_{max} y ϕ_{s0} . Esta relación de cambio se muestra en las ecuaciones (3.2), (3.3) y (3.4) y se ilustra en las figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

$$\theta_{min} = \arctan \frac{\tan \theta_{s0} - \frac{a}{d}}{1 + \frac{a}{d} \tan \theta_{s0}} \quad (3.2)$$

$$\theta_{max} = \arctan \frac{\tan \theta_{s0} + \frac{a}{d}}{1 - \frac{a}{d} \tan \theta_{s0}} \quad (3.3)$$

$$\phi_{s0} = \arcsen \frac{a}{d \sin \theta_{s0}} \quad (3.4)$$

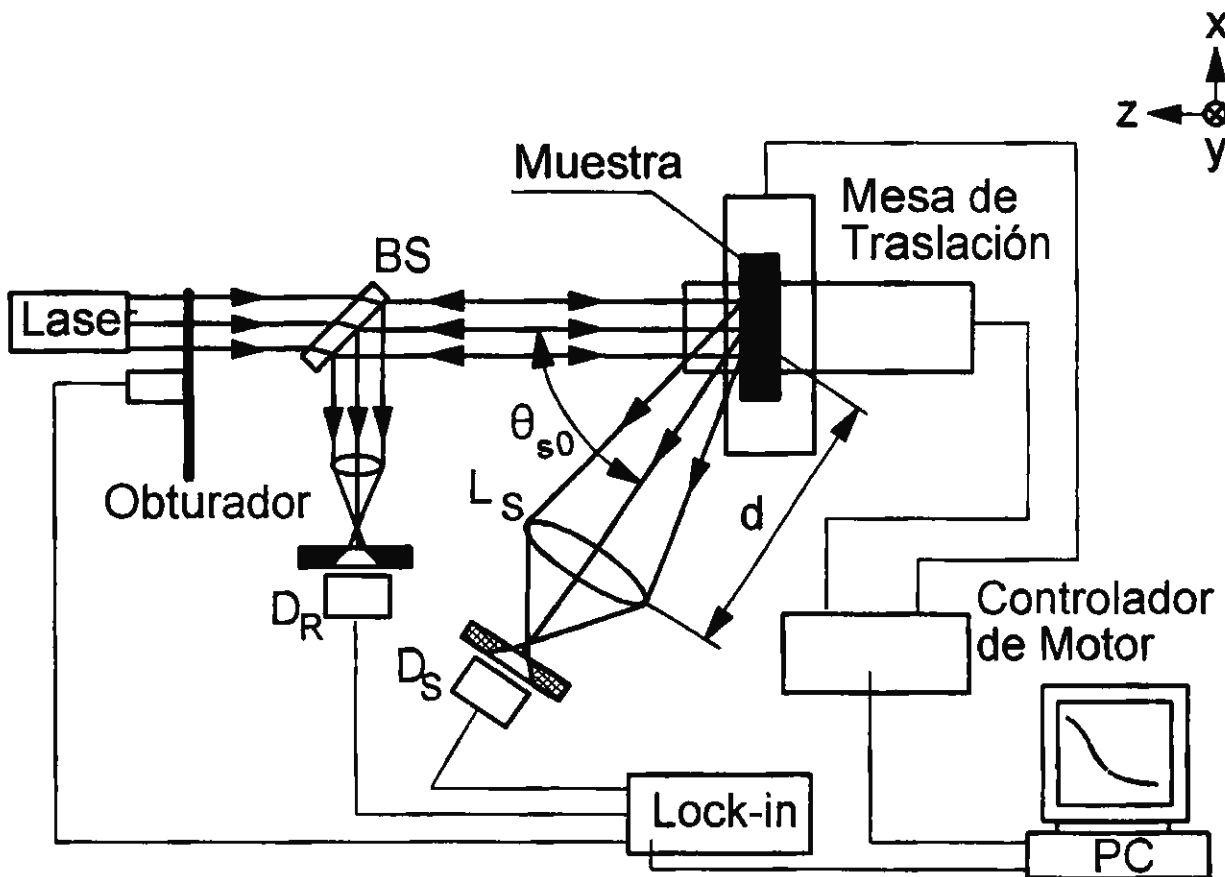


Figura 3.1.- Arreglo Experimental DALIS.

donde

BS es el divisor de haz, d es la distancia entre la muestra y la lente colectora, L_S es la lente de colección, D_S es el detector de la luz de de esparcimiento,

D_R es el detector de la luz de esparcimiento, θ_{s0} es el ángulo de observación.

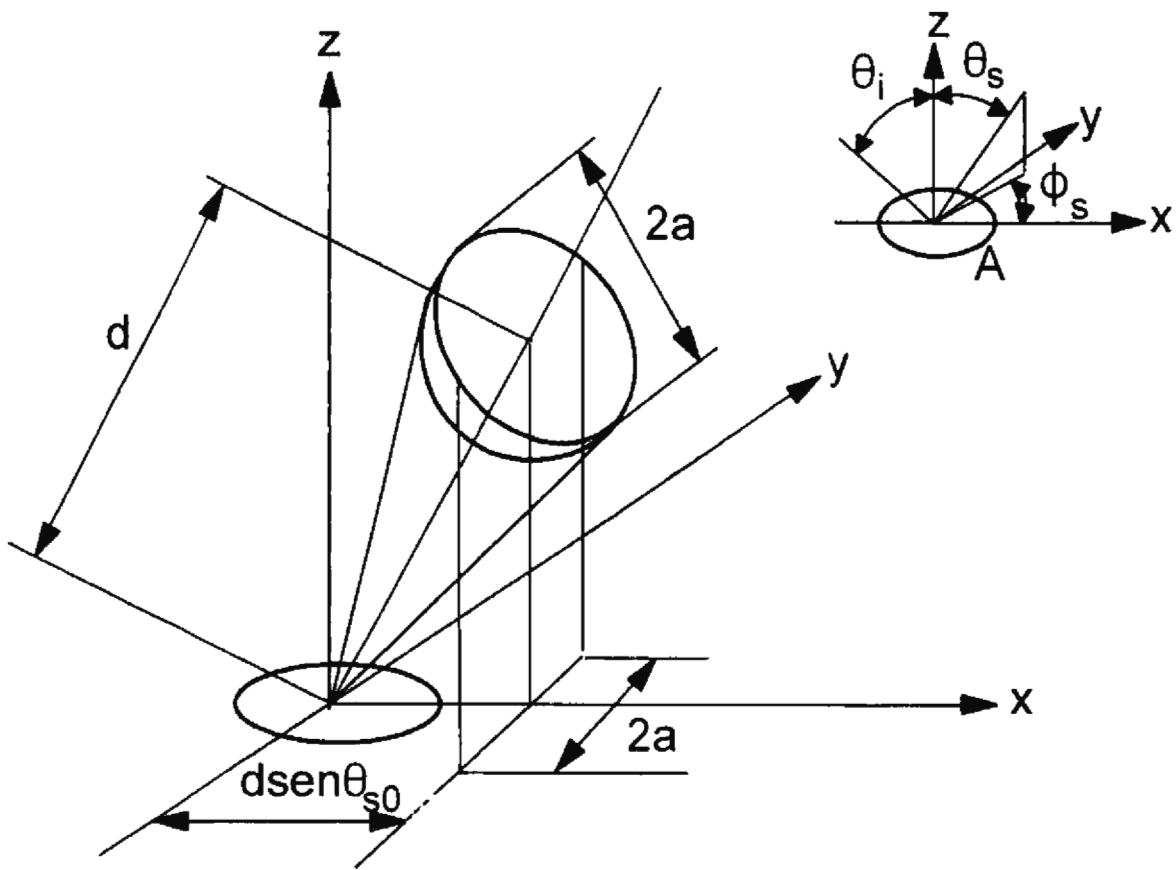


Figura 3.2 Relación entre la distancia de observación d y el ángulo de observación θ_0 en el ángulo sólido de colección $\Delta\omega_s$. (Vista general).

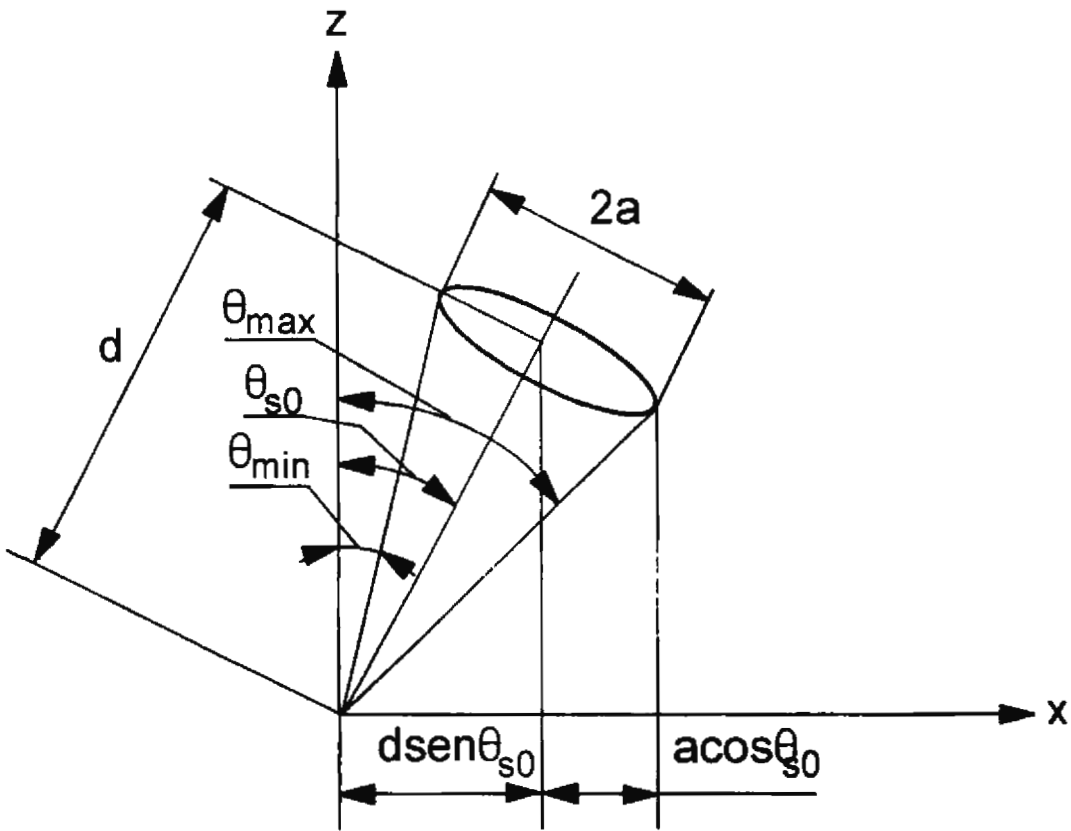


Figura 3.3. Relación entre la distancia de observación d y el ángulo de observación θ_{s0} en el ángulo sólido de colección $\Delta\omega_s$. (Plano x-z).

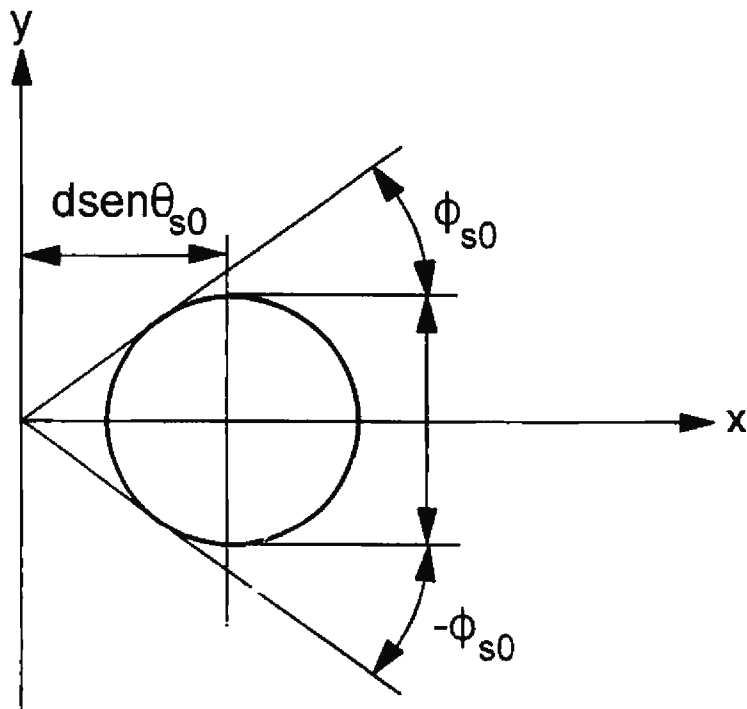


Figura 3.4. Relación entre la distancia de observación d y el ángulo de observación θ_{s0} en el ángulo sólido de colección $\Delta\omega_s$. (Plano x-y).

3.2 Arreglo Experimental.

El arreglo experimental del sistema de medición DALIS se muestran en las Figuras 3.5, 3.6, 3.13 y 3.14. Se utiliza un laser de He- Ne con una longitud de onda de 632.8 nm y una potencia de salida de 4 mW, el cual es usado como fuente de iluminación. Un filtro espacial remueve la luz de esparcimiento del haz laser, posteriormente, una lente colimadora genera un haz plano en el cual el diámetro se ajusta por el diafragma iris a un diámetro aproximado a 1mm. Posteriormente, el haz se modula por un obturador mecánico reduciendo el ruido óptico y electrónico y provee una señal de referencia al amplificador de amarre (lock-in). El haz se divide en dos por un divisor de haz (BS), en donde el haz transmitido ilumina la superficie de prueba con un diámetro aproximado a 1mm. La muestra se encuentra montada en el centro de una mesa de traslación lineal.

Un rango dinámico grande del amplificador lock-in se utiliza para detectar el esparcimiento, la ganancia se controla por un optómetro con rango automático. El uso del amplificador lock-in nos permite suprimir todas las señales, exceptuando aquellas a las de la frecuencia de referencia (dada por el obturador).

La muestra se monta sobre una mesa con dos ángulos de libertad rotacional, inclinación y rotación sobre la normal de la superficie. Este hecho nos permiten ajustar el ángulo de incidencia, y tres ángulos de libertad traslacional, uno sobre el eje óptico y dos desplazamientos traslacionales que nos permiten posicionar la muestra con una resolución de 0.05 in. Los desplazamientos axiales y horizontales se controla por dos motores, mientras que el desplazamiento vertical se controla en forma manual.

En la figuras 3.5 y 3.6 se muestra el arreglo experimental del sistema de medición DALIS con un ángulo de observación inicial de 45°, y la luz incide en dirección normal a la superficie de la muestra. La luz especular reflejada regresa de la muestra, pasa nuevamente por el divisor de haz (BS) no polarizado (50%) y se colecta por el detector D_2 . El detector tiene un área de aproximadamente 100 mm², el que se opera como medidor de potencia. La luz de esparcimiento de la muestra se colecta por las lentes (L_2 , L_3) las cuales concentran la

luz en el detector D_1 (fotodetector con características similares del detector D_2). El rango del ángulo de detección de la luz de esparcimiento se determina por la apertura de las lentes colectoras sobre un ángulo sólido el cual se define por la apertura de las lentes, la distancia de observación d entre la muestra y las lentes y el ángulo de observación θ_{s0} .

En la figuras 3.13 y 3.14 se muestra el sistema de medición DALIS con un ángulo de observación inicial de 0° . En este caso, la luz especular reflejada por la muestra incide sobre un espejo de 1.5 mm de diámetro, pasa nuevamente por el divisor de haz (BS) e incide sobre el detector D_2 . La luz de esparcimiento de la muestra se colecta por las lentes (L_2 , L_3) las cuales la conducen al detector D_1 .

En el proceso de medición, la mesa se mueve en la dirección axial, esto a su vez produce un cambio no solo en la distancia de observación d y en el ángulo de observación θ , sino también en el ángulo sólido en el cual se colecta la luz esparcida. La señal DALIS se registra como una función de la distancia de barrido entre la muestra y el divisor de haz (BS).

3.3 Resultados.

A continuación se muestra la señal DALIS obtenida en función del desplazamiento, como el resultado de la inspección de tres superficies pulidas de prueba con diferentes valores en el coeficiente de rugosidad. Las figuras 3.10, 3.11 y 3.12 muestran estos resultados para un ángulo de observación inicial de 45° y las figuras 3.18, 3.19 y 3.20 para 0° .

En las tres muestras, se realizaron cinco diferentes mediciones, estas fueron realizadas tomando como referencia el centro geométrico de la muestra en la coordenada (0,0), otras cuatro mediciones se realizan desplazando el punto de medición 5 mm hacia cada uno de

los ejes coordenados, $(0, 5\text{mm})$, $(0, -5\text{mm})$, $(5\text{mm}, 0)$ y $(-5\text{mm}, 0)$, las coordenadas de los puntos son ilustradas en la figura 3.21.

El esparcimiento se colecta como una función del desplazamiento que determina el ángulo sólido definido por las lentes colectoras. Esto puede observarse en las figuras previamente mencionadas, se observa además, que el nivel de la señal DALIS tiene magnitud diferente (proporcional al valor de rugosidad rms de cada muestra), esta magnitud disminuye sobre un rango de la distancia de barrido, d . Además, el valor de la señal DALIS de la muestra 1 es aproximadamente tres y dos veces mayor que en las muestras 3 y 2, respectivamente. Se puede observar adicionalmente que la magnitud de la señal DALIS a incidencia normal es mayor que a incidencia oblicua.

Es importante mencionar que cada curva presentada en los resultados experimentales determina una cierta región del área de la muestra (especificada anteriormente en la tabla de coordenadas), y que cada muestra presenta un valor de rugosidad aleatorio en cada uno de los puntos medidos, es por ello que se explica la diferencia encontrada en cada una de las curvas obtenidas, comparando el mismo conjunto de curvas y comparando los dos arreglos presentados en este capítulo (aún refiriéndonos a un mismo punto).

Aplicando el método de análisis teórico presentado en el capítulo 2, de la señal DALIS puede calcularse la rugosidad de la superficie la cual es obtenida por el análisis de Fourier.

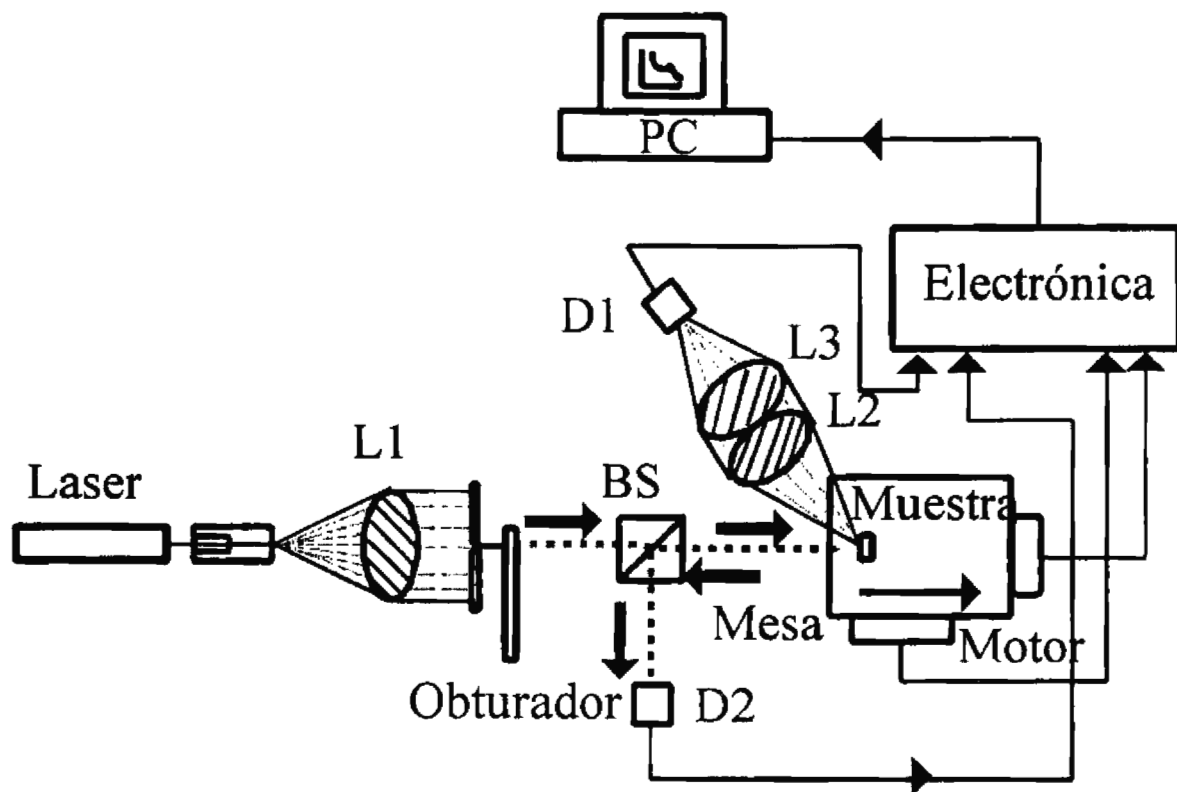


Figura 3.5. Sistema de Colección DALIS (ángulo de observación inicial de 45°),
donde

L1 es la lente colimadora, BS es un divisor de haz,
D1 y D2 son detectores, L2 y L3 son lentes colectoras.

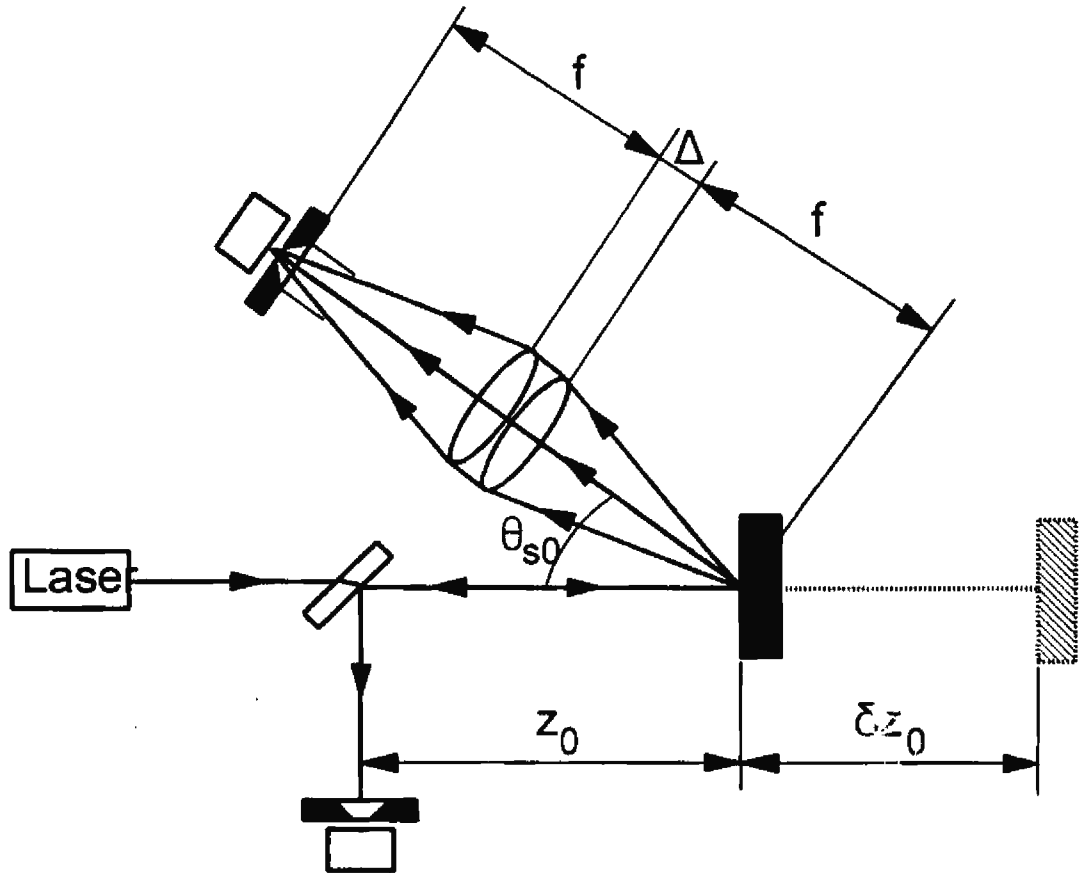


Figura 3.6. Sistema DALIS (con un ángulo de observación de 45°),

donde

θ_{s0} es el ángulo de observación, f es la distancia focal, Δ es la separación entre las lentes colectoras, z_0 es la distancia entre la muestra y el divisor de haz, δz_0 es la distancia de desplazamiento de la muestra.

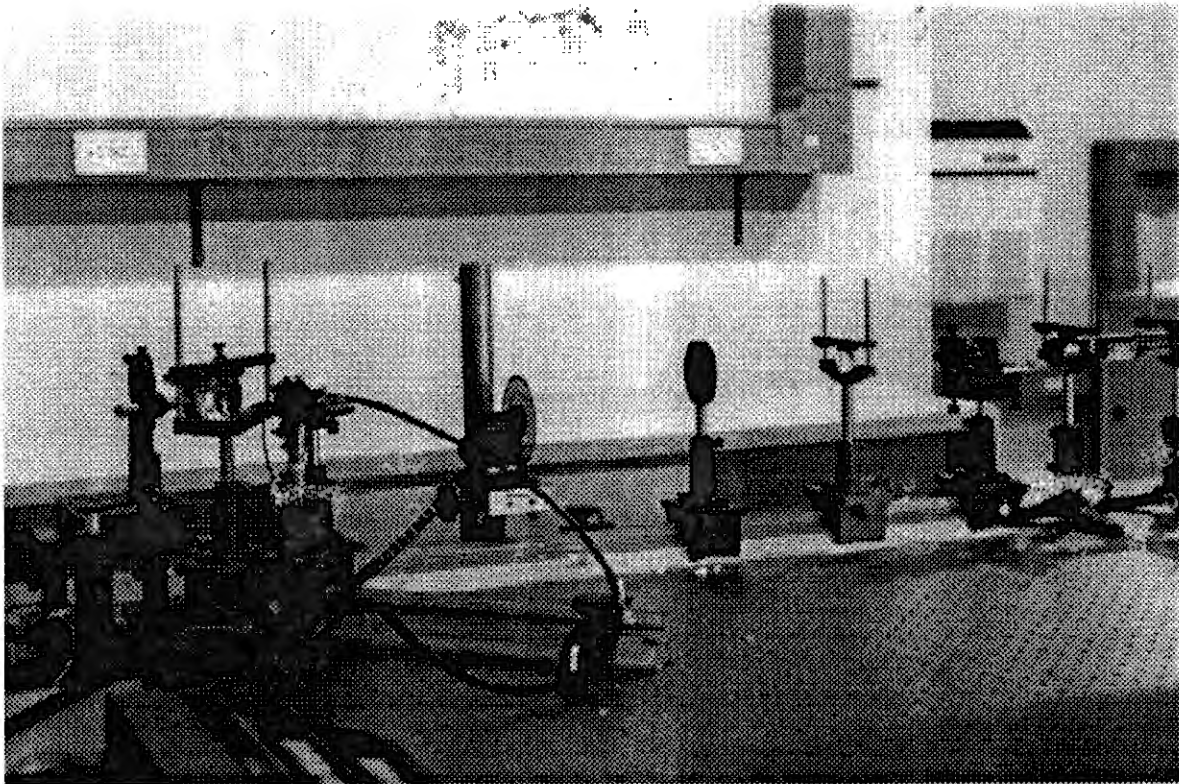


Figura 3.7. Fotografía 1.Sistema de medición DALIS con un ángulo de colección de 45°.



Figura 3.8. Fotografía 2. Sistema de medición DALIS con un ángulo de colección de 45° .

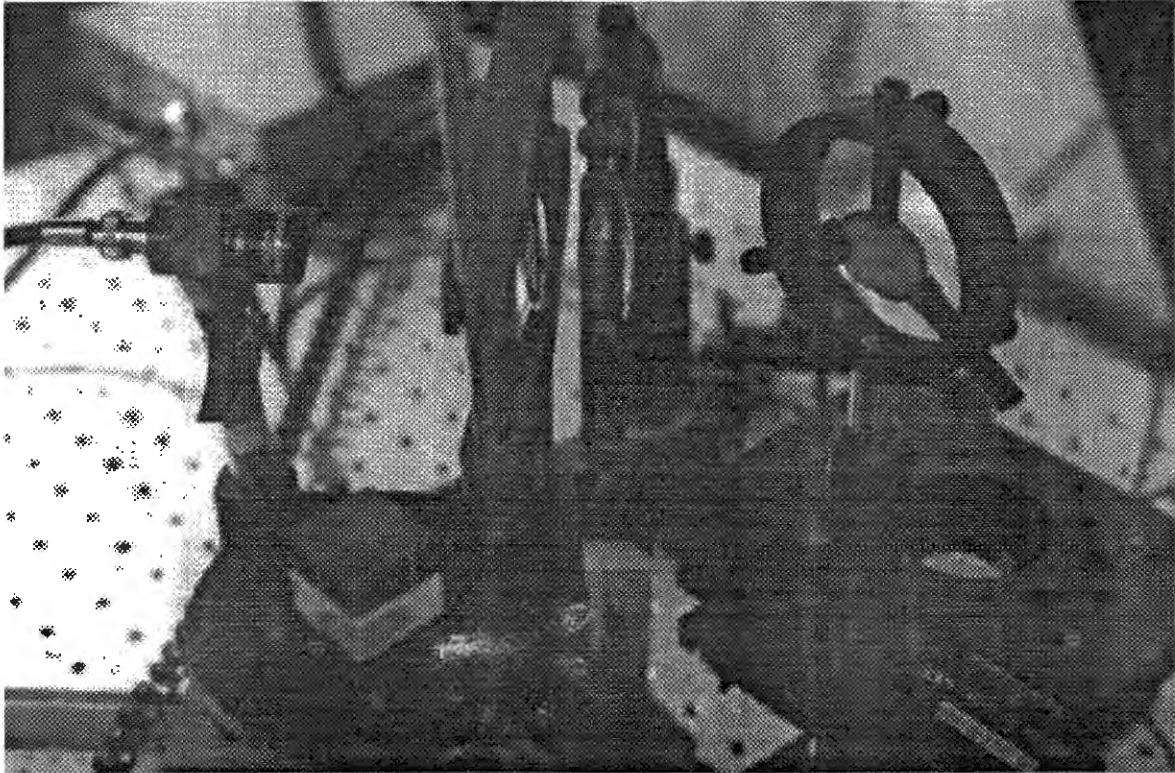


Figura 3.9 Fotografía 3. Sistema de medición DALIS con un ángulo de colección de 45° .

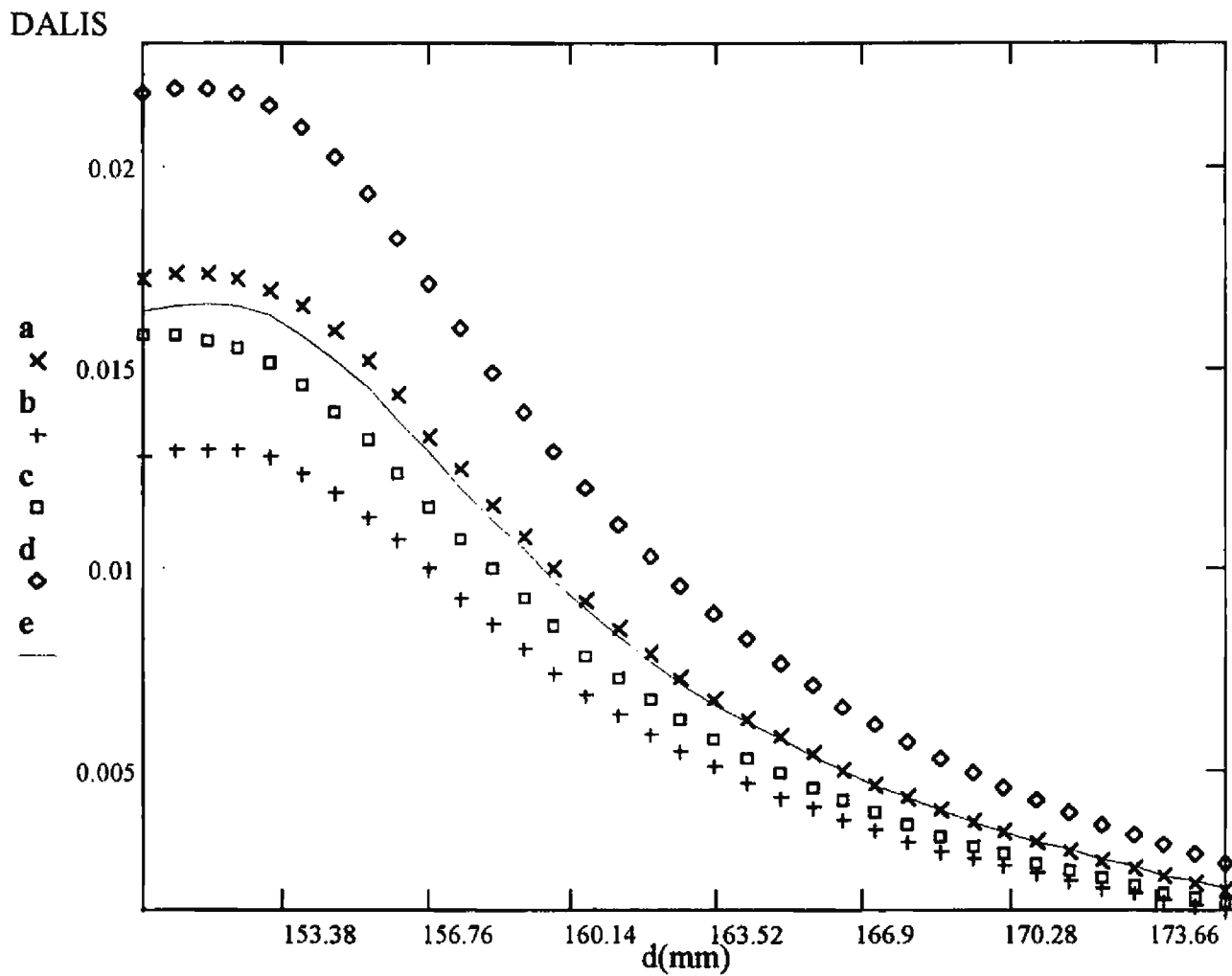


Figura 3.10. Señal DALIS versus desplazamiento d para $\theta_i=45^\circ$. Muestra 1.

donde a, b, c, d y e, son los puntos coordenados de medición.

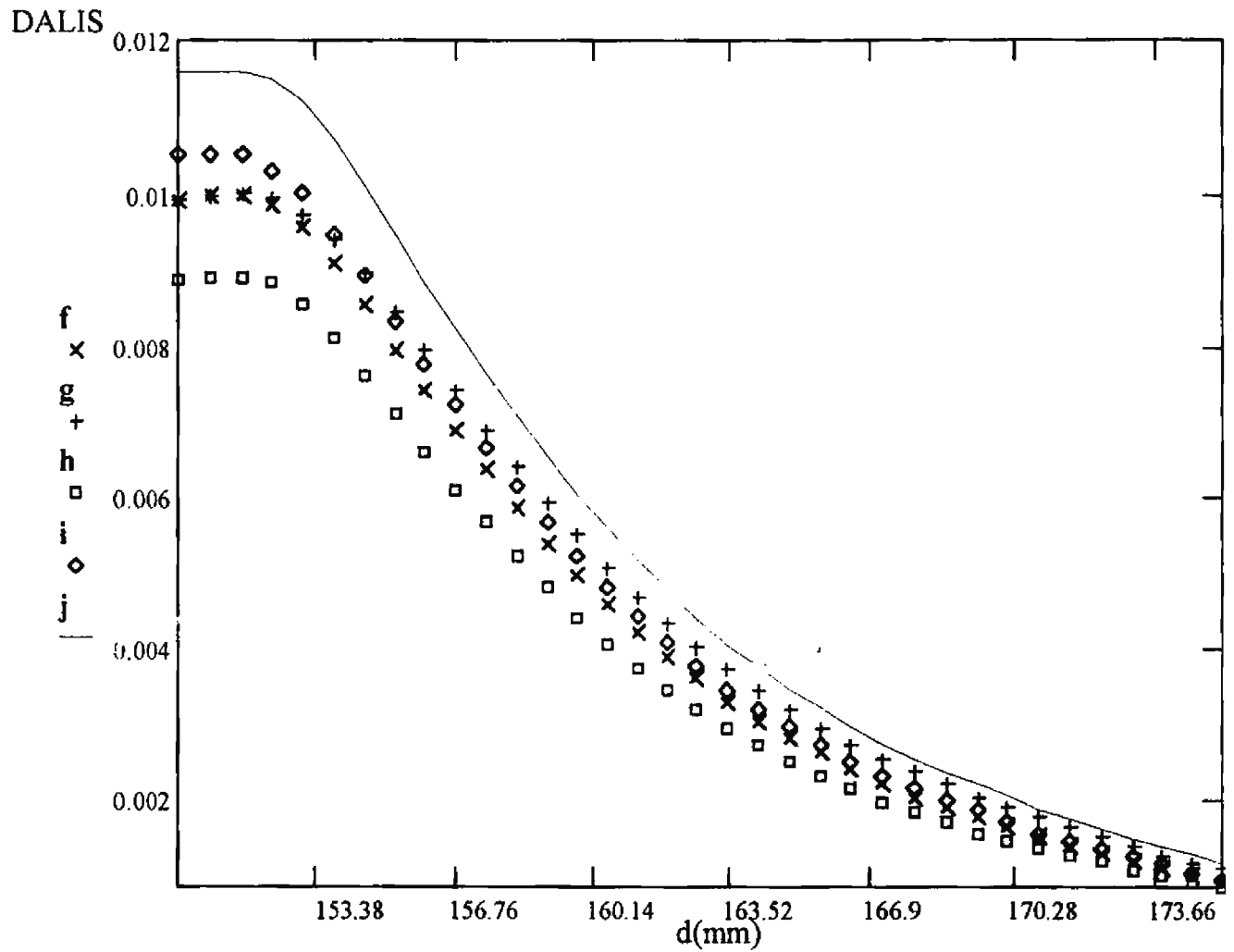


Figura 3.11. Señal DALIS versus desplazamiento d para $\theta_i=45^\circ$. Muestra 2.

donde f , g , h , i y j , son los puntos coordenados de medición.

DALIS

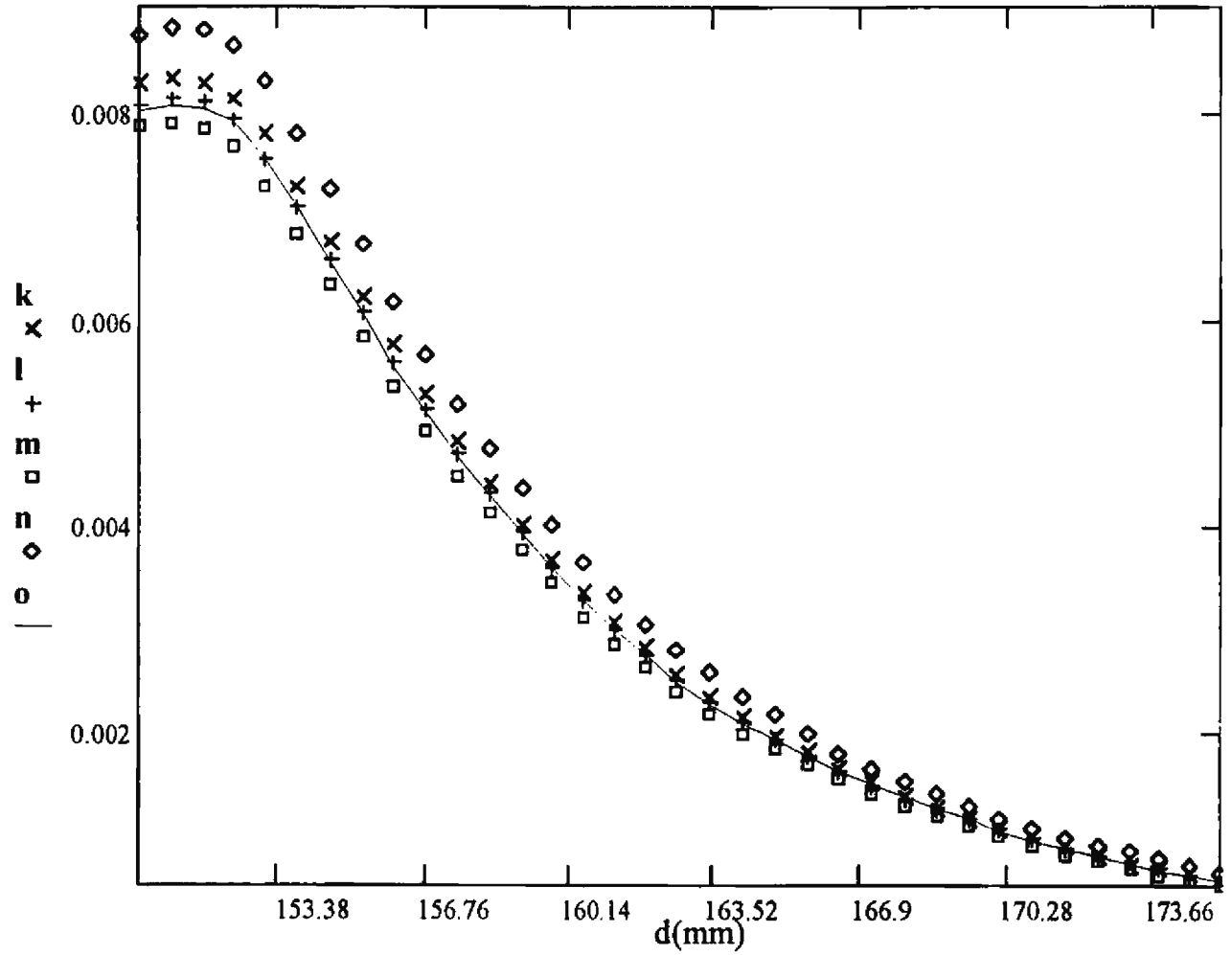


Figura 3.12. Señal DALIS versus desplazamiento d para $\theta_i=45^\circ$. Muestra 3.

donde k , l , m , n y o , son los puntos coordenados de medición.

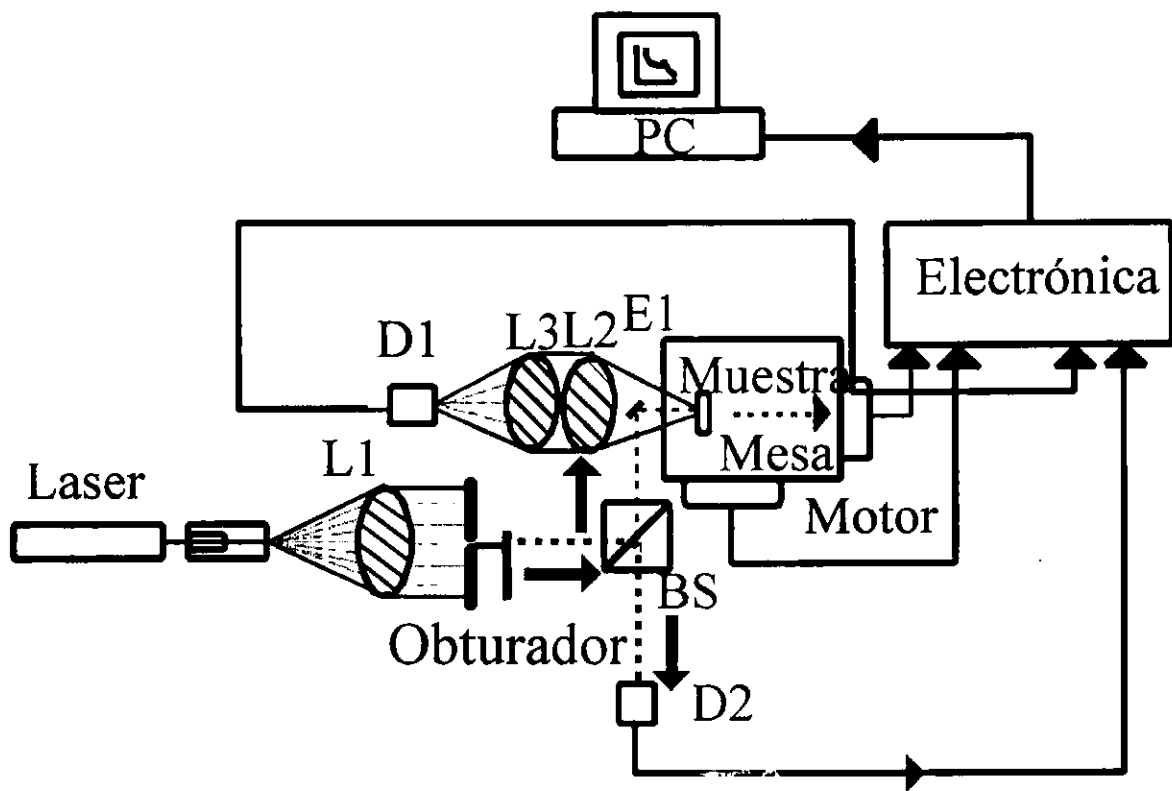


Figura 3.13. Sistema DALIS (con un ángulo de observación inicial de 0°).

L1 es la lente colimadora, BS es un divisor de haz,
D1 y D2 son detectores, L2 y L3 son lentes colectoras.

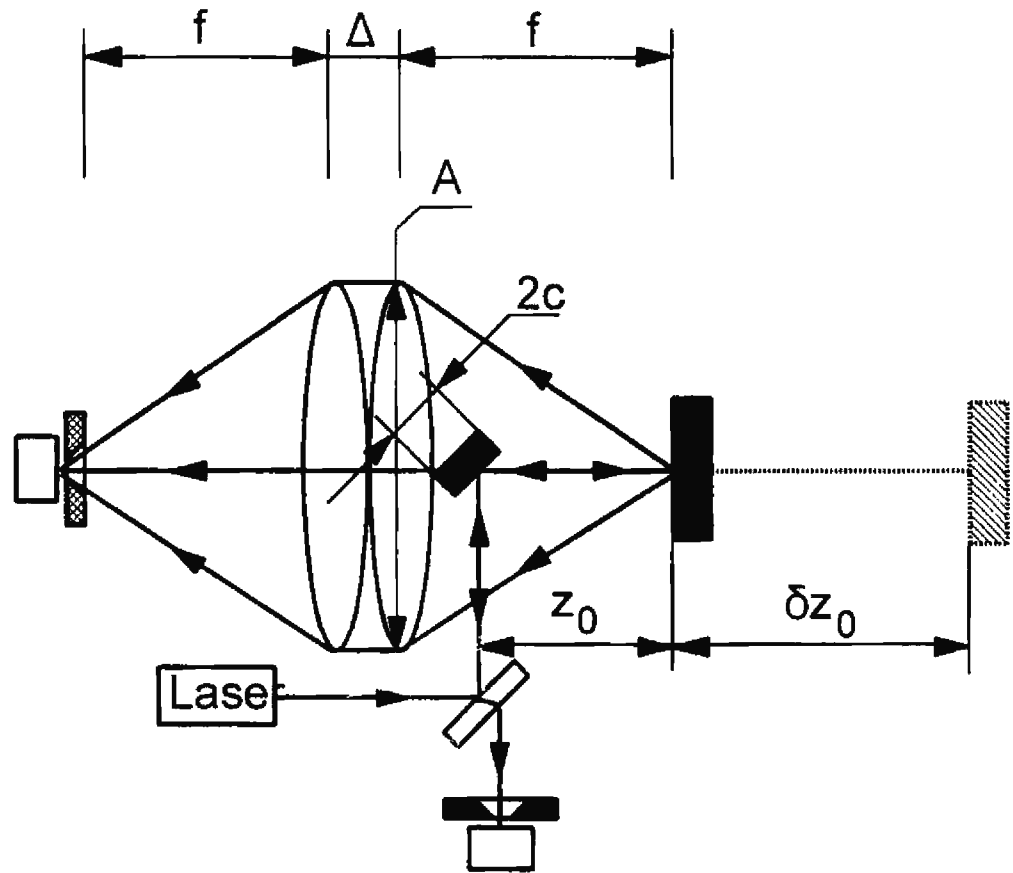


Figura 3.14. Sistema DALIS (con un ángulo de observación inicial de 0°),

donde

Δ es la separación entre las lentes colectoras, z_0 es la distancia entre la muestra y el divisor de haz, δz_0 es la distancia de desplazamiento de la muestra, A es el diámetro de la lente, $2c$ es el diámetro del espejo

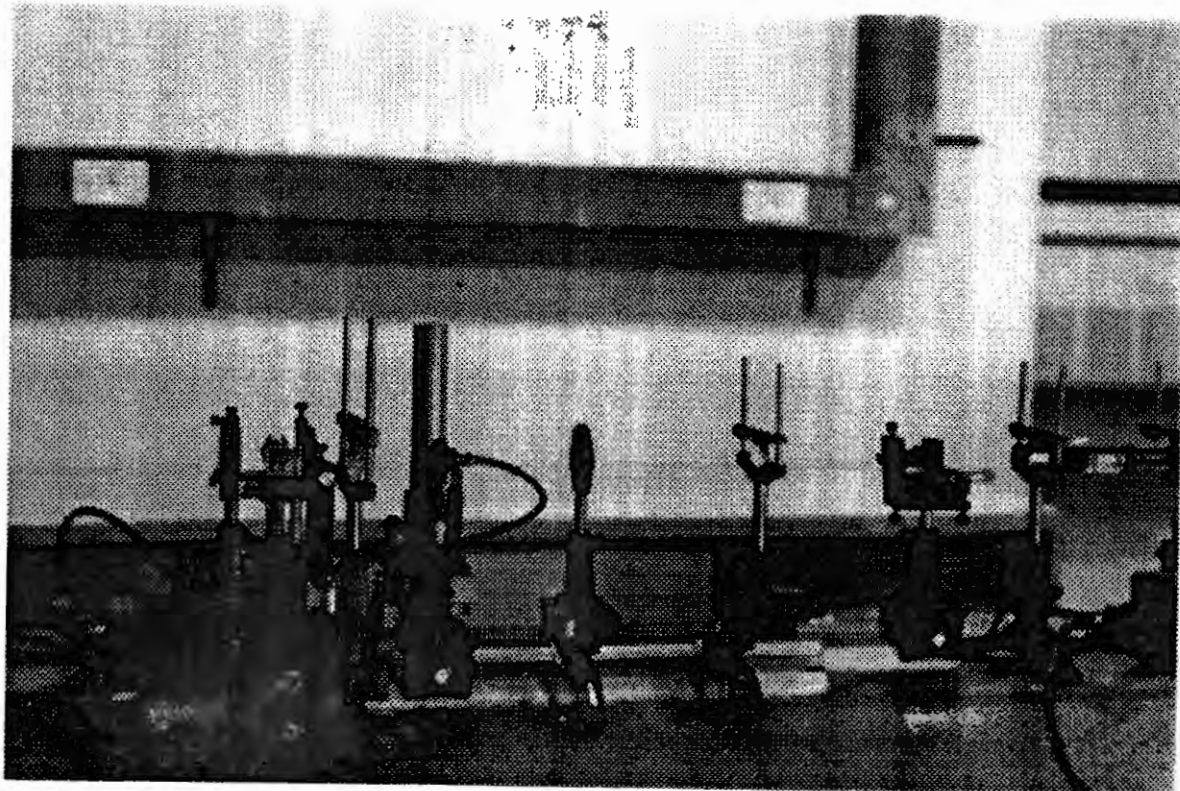


Figura 3.15. Fotografía 4. Sistema de medición DALIS con un ángulo de colección de 0° .

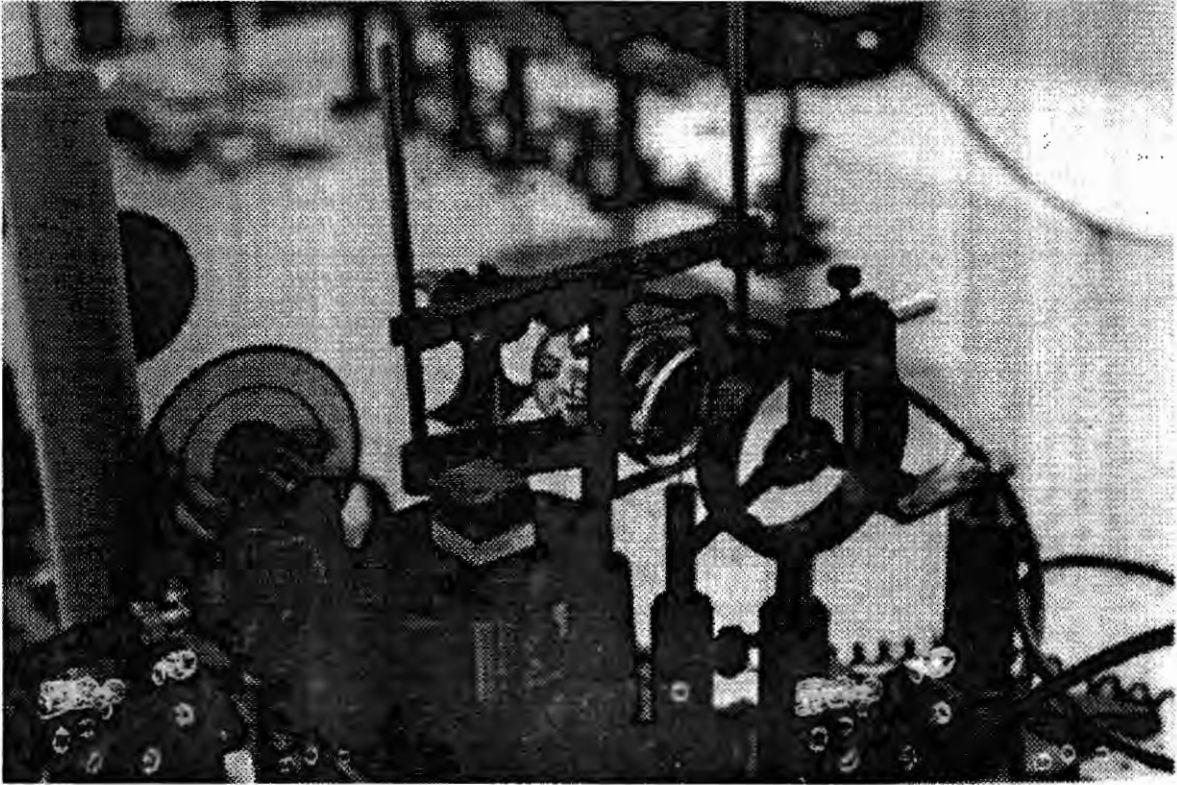


Figura 3.16. Fotografía 5. Sistema de medición DALIS con un ángulo de colección de 0° .

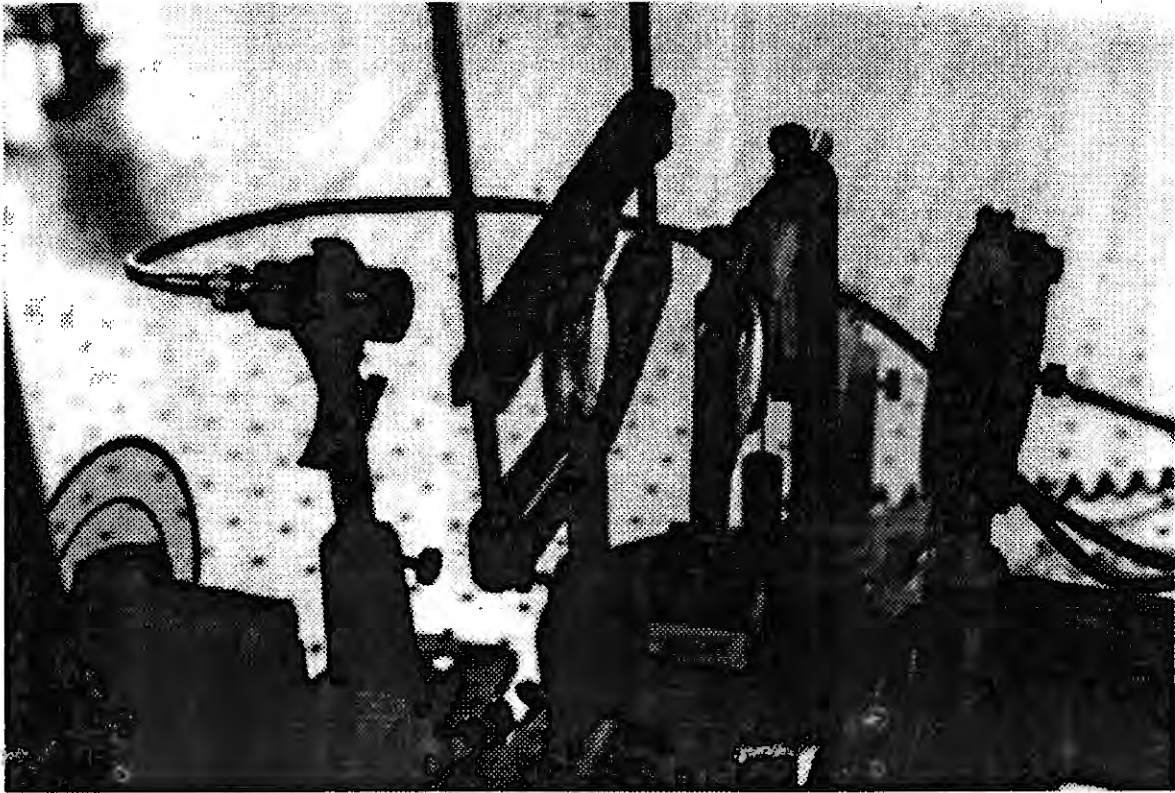


Figura 3.17. Fotografía 6. Sistema de medición DALIS con un ángulo de colección de 0° .

DALIS

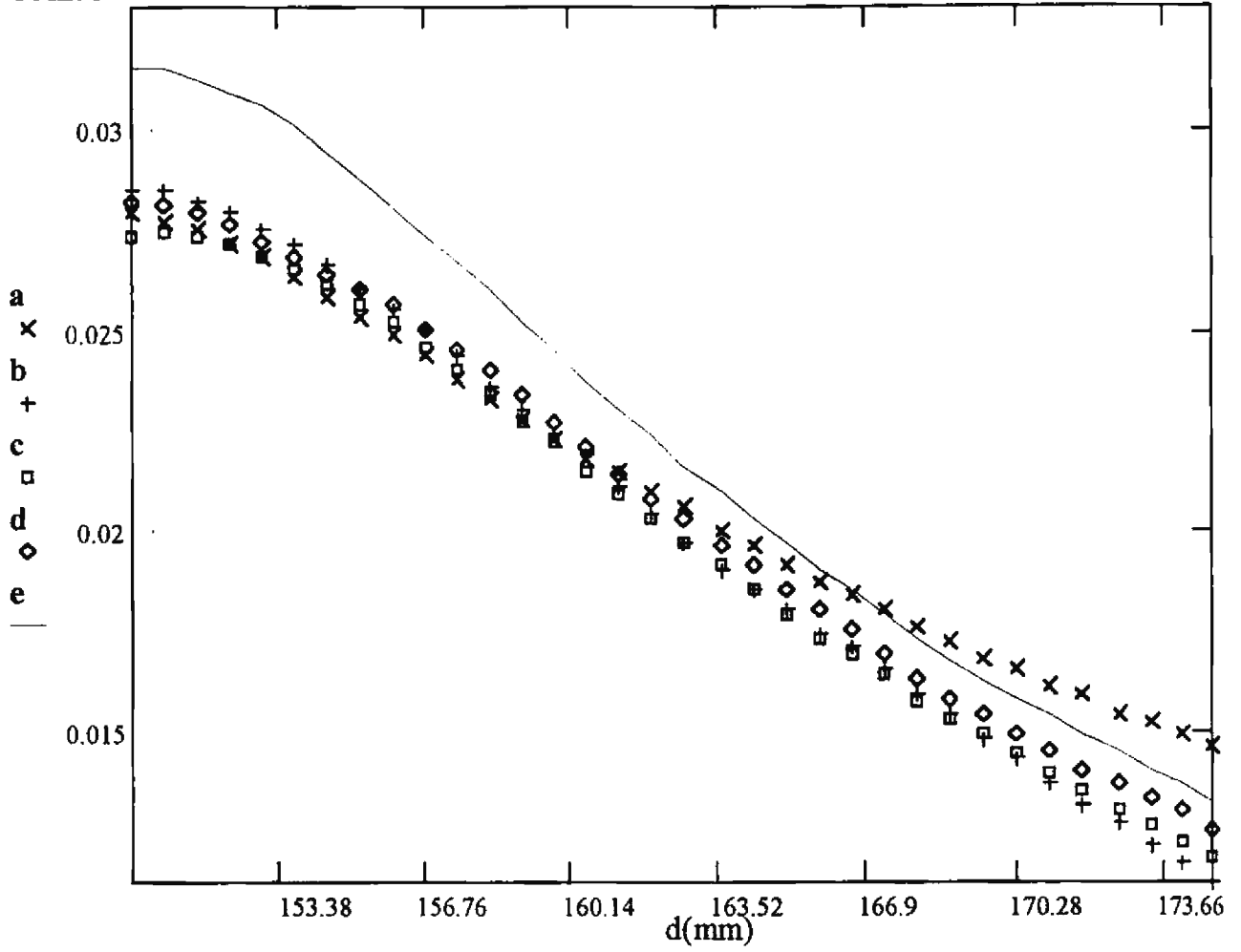


Figura 3.18. Señal DALIS versus desplazamiento d para $\theta_i=0^\circ$. Muestra 1.
donde a, b, c, d y e, son los puntos coordenados de medición.

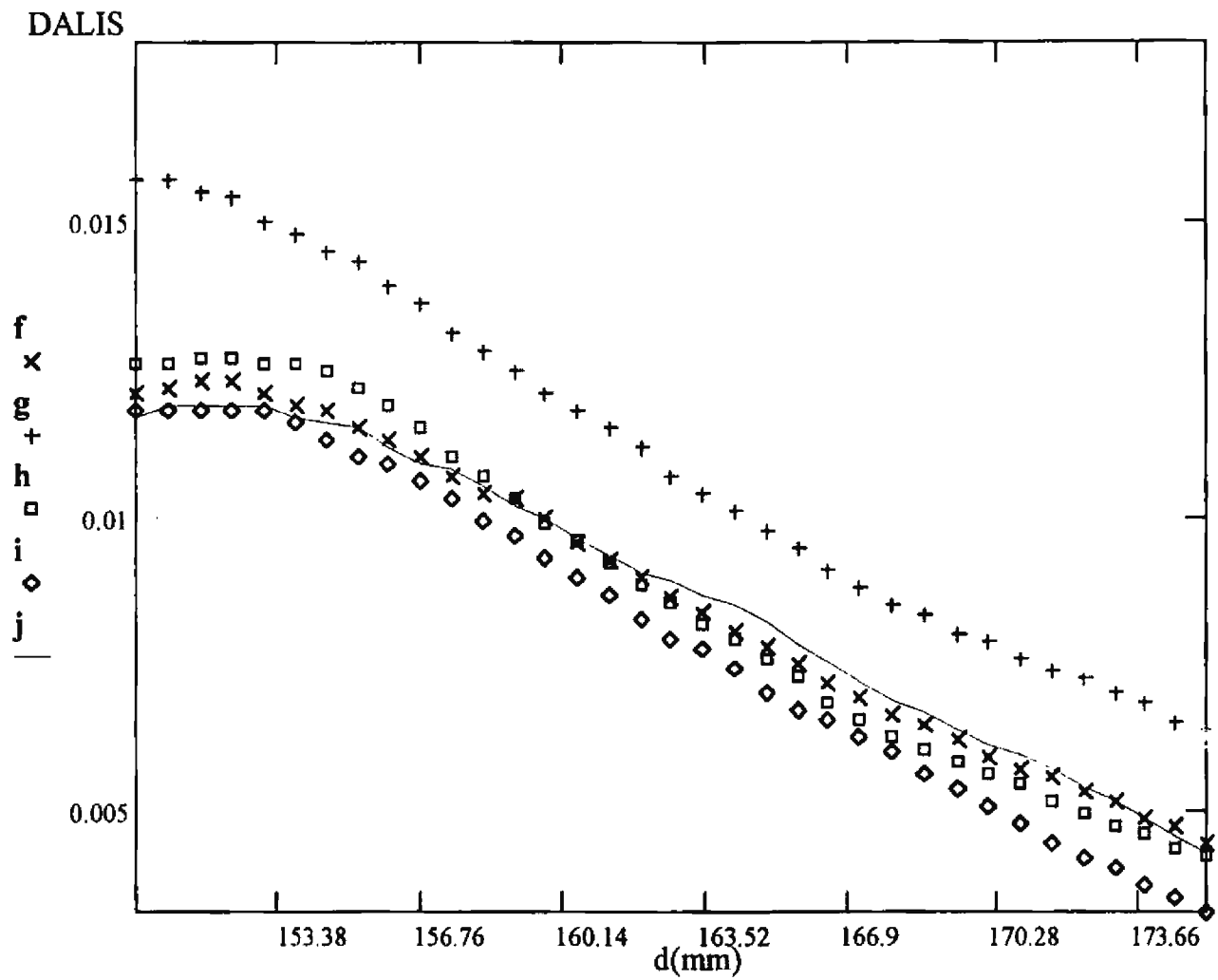


Figura 3.19. Señal DALIS versus desplazamiento d para $\theta_i=0^\circ$. Muestra 2.
 donde f, g, h, i y j , son los puntos coordenados de medición.

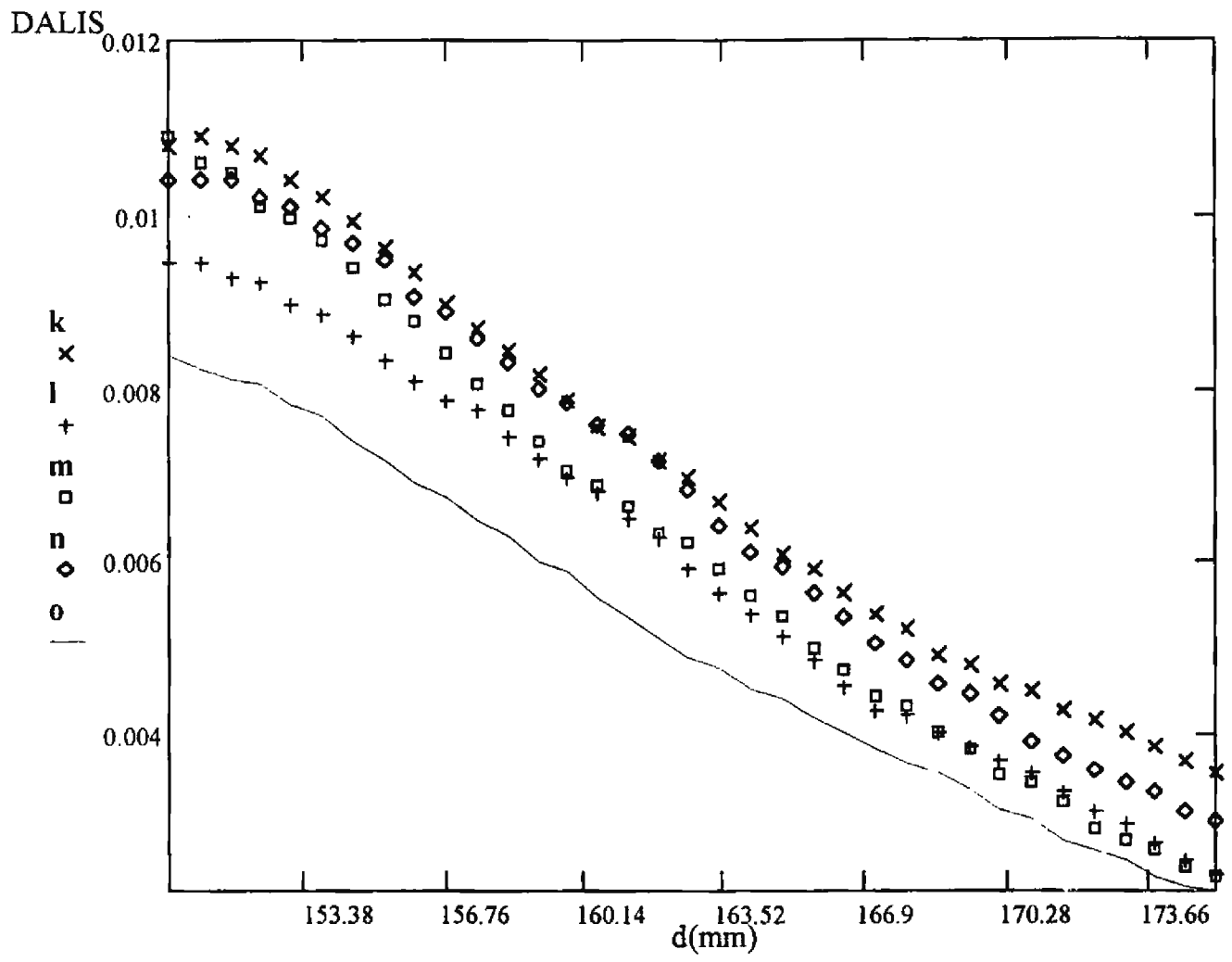


Figura 3.20. Señal DALIS versus desplazamiento d para $\theta_i=0^\circ$. Muestra 3.

donde k, l, m, n y o, son los puntos coordenados de medición.

Muestra No.	Coordenada	Coordenada	Coordenada	Coordenada	Coordenada
(n=1.51)	(0, 5 mm)	(-5 mm, 0)	(0,0)	(5 mm, 0)	(0,-5 mm)
1	a	b	c	d	e
2	f	g	h	i	j
3	m	n	o	p	q

Figura 3.21. Tabla 1. Posición de las tres superficies ópticas de prueba.

Capítulo 4.

Medición del esparcimiento integral por ángulo dinámico limitado (DALIS), utilizando como medio colector un espejo esférico.

4.1 Principio.

En el capítulo anterior se analizó el método DALIS [39], utilizado para la medición de la luz esparcida por superficies ópticas. En este capítulo, se muestran los resultados experimentales obtenidos de un nuevo arreglo experimental teniendo como variante un espejo esférico en el sistema de colección de la luz esparcida. Se obtienen también una serie de resultados experimentales.

4.2 Arreglo experimental.

El arreglo experimental del sistema se muestra en las figuras 4.1 y 4.2. Se utiliza como fuente de iluminación un laser He-Ne con una longitud de onda de 632.8 nm y una potencia de salida de 4 mW.

Un filtro espacial remueve el esparcimiento de la luz laser, la lente colimadora genera un haz plano de diámetro variable de aproximadamente 1 mm a través de un diafragma iris, el cual se modula por medio de obturador mecánico controlado. El laser se modula para reducir el ruido óptico y mecánico y proveer una señal de referencia al amplificador lock-in.

El haz láser se divide por un divisor de haz (BS) no polarizado (50%). El haz transmitido ilumina la superficie de prueba con un diámetro de aproximadamente 1 mm. El haz que regresa de la muestra de prueba al divisor de haz es conducido nuevamente a un fotodetector de silicio de área aproximada de 100 mm^2 . La luz esparcida de la muestra se colecta a través de un espejo esférico de 15 cm de diámetro. La luz esparcida colectada se hace incidir sobre un fotodetector de silicio de área aproximada 100 mm^2 . Tanto la muestra óptica como el fotodetector colector de la luz esparcida se colocan en dos mesas de traslación lineal con movimiento en dirección del eje óptico. Esto cambia la distancia de observación d , el ángulo de observación y el ángulo sólido de colección. La señal DALIS es entonces registrada como una función de la distancia, d , entre la muestra y el divisor (BS).

En el arreglo experimental, se puede observar que al ir aumentando el valor de la distancia objeto, se produce una disminución en el valor de la distancia imagen, es por ello que tanto la muestra de prueba como el detector se colocaron en dos mesas de traslación lineal para asegurar que la mancha del haz laser (luz esparcida) sea concentrada en todo momento sobre la superficie del detector. Estas mesas de traslación se mueven con una velocidad de traslación diferente. Esta variación en la velocidad de movimiento se logra a través de un control independiente de velocidad en cada uno de los motores. Este principio se muestra en la figura 4.2.

4.3 Resultados.

Los resultados de la inspección de las tres superficies ópticas de prueba son mostrados en las figuras 4.6, 4.7 y 4.8. Las figuras muestran 5 gráficas que corresponden cada una a un punto diferente de inspección localizado sobre el área de la muestra con las coordenadas que se presentan en la figura 4.9.

Los resultados observados en las figuras, muestran que el conjunto de gráficas presentan un comportamiento de decrecimiento en la señal medida DALIS a consecuencia de la variación en el ángulo sólido proyectado por el espejo esférico al variar la distancia, d , entre la muestra y el divisor de haz.

Los resultados obtenidos de cada una de las muestras de prueba nos permiten identificar diferentes valores de DALIS presentes sobre la misma superficie de prueba, es posible suponer que dichas variaciones en los valores obtenidos en cada una de las gráficas, corresponde a una variación en el valor de rugosidad presente en cada una de las superficies de prueba.

Haciendo una comparación entre cada una de las muestras de prueba, nos es posible establecer una diferencia en el valor promedio del coeficiente de rugosidad correspondiente a cada muestra ya que el valor de DALIS obtenido en la muestra 1 corresponde aproximadamente al doble del valor DALIS obtenido de la muestra 2 y aproximadamente cinco veces el valor DALIS obtenido de la muestra 3.

Los resultados obtenidos en las curvas experimentales del arreglo propuesto en este capítulo presentan diferencias con las curvas obtenidas en los arreglos experimentales presentados en el capítulo 3, esto se atribuye a las siguientes razones: El sistema colector de la luz de esparcimiento en ambos casos es diferente (uno emplea lentes y el otro un espejo colector), la distancia de barrido de la luz esparcida es diferente, los ángulos de observación también son diferentes. La comparación de los resultados iniciales obtenidas en el valor de rugosidad utilizando cada uno de los arreglos experimentales propuestos se presentan en el capítulo 5

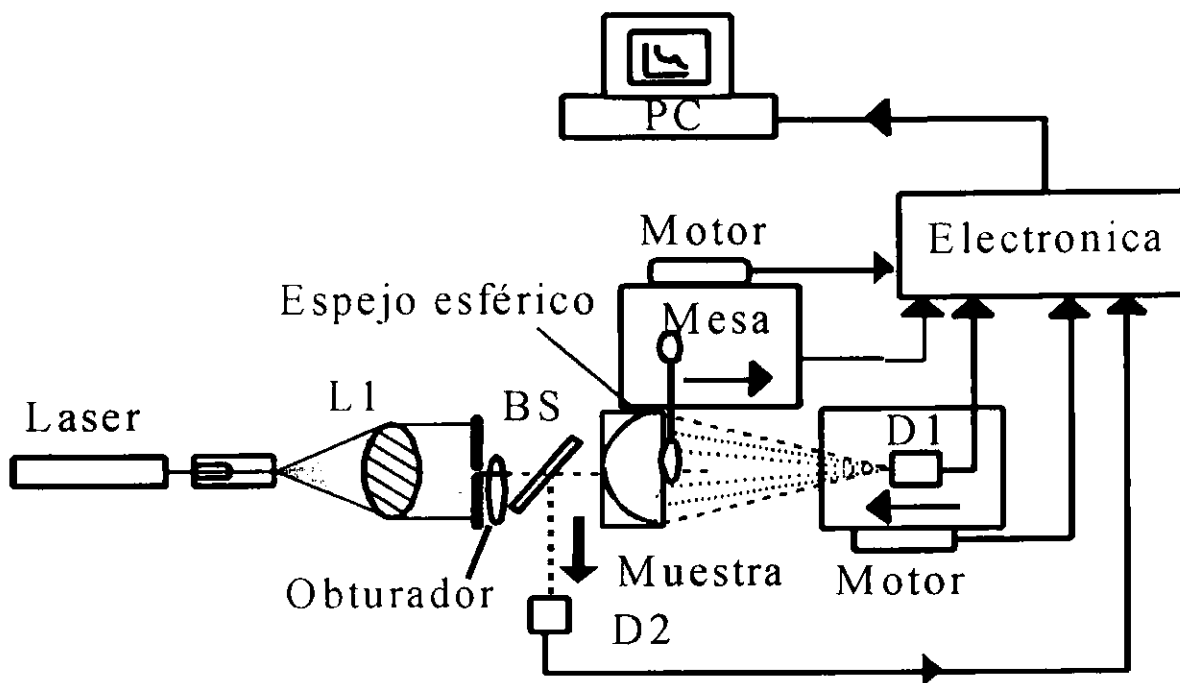


Figura 4.1. Sistema de colección DALIS (utilizando un espejo esférico),

donde

L1 es una lente colimadora, BS es un divisor de haz,

D1 y D2 son detectores.

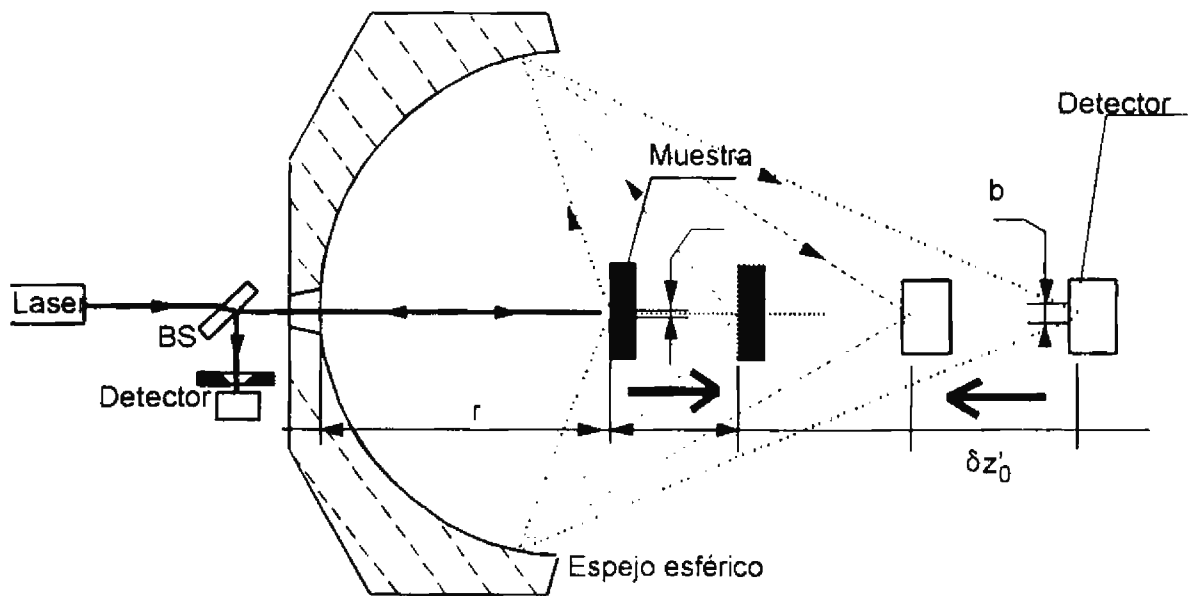


Figura 4.2. Sistema de colección DALIS, espejo esférico,
donde

BS es el divisor de haz, a es el diámetro del haz de prueba,
 r es la distancia entre el espejo esférico y la muestra, δz_0 es la distancia del desplazamiento
de la muestra, $\delta z'_0$ es la distancia de desplazamiento del detector.

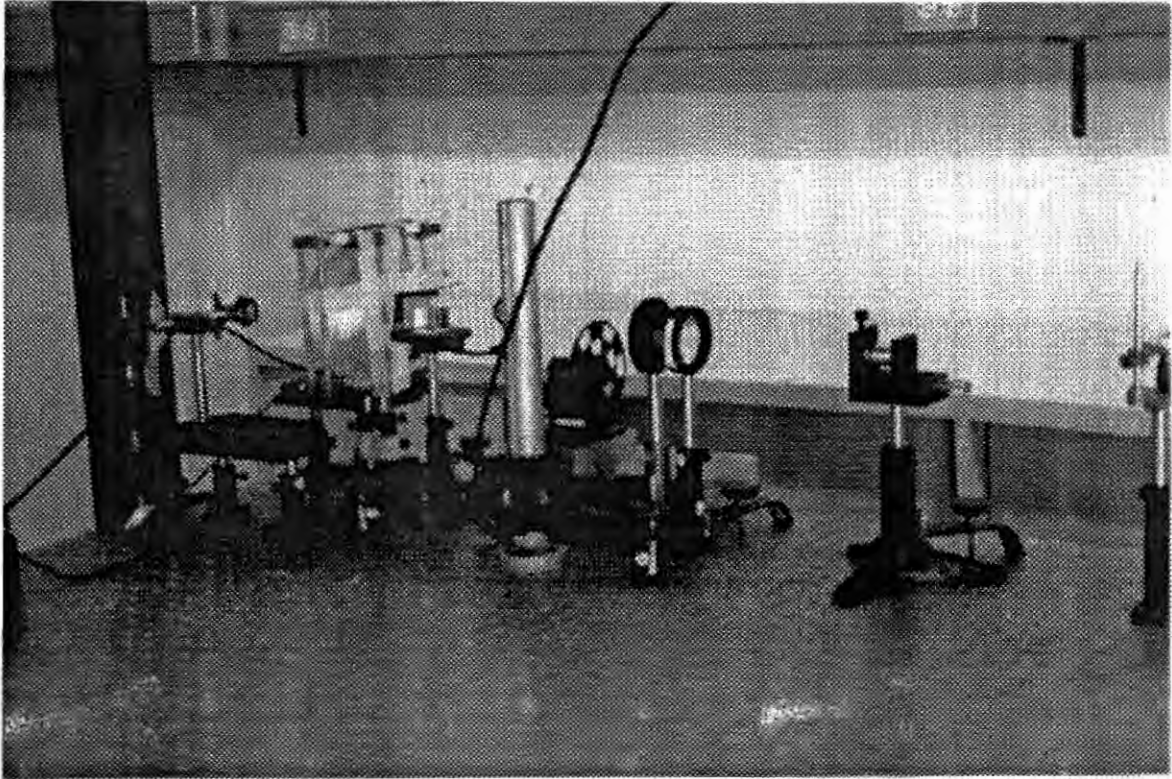


Figura 4.3. Fotografía 7. Arreglo experimental DALIS utilizando un espejo esférico.

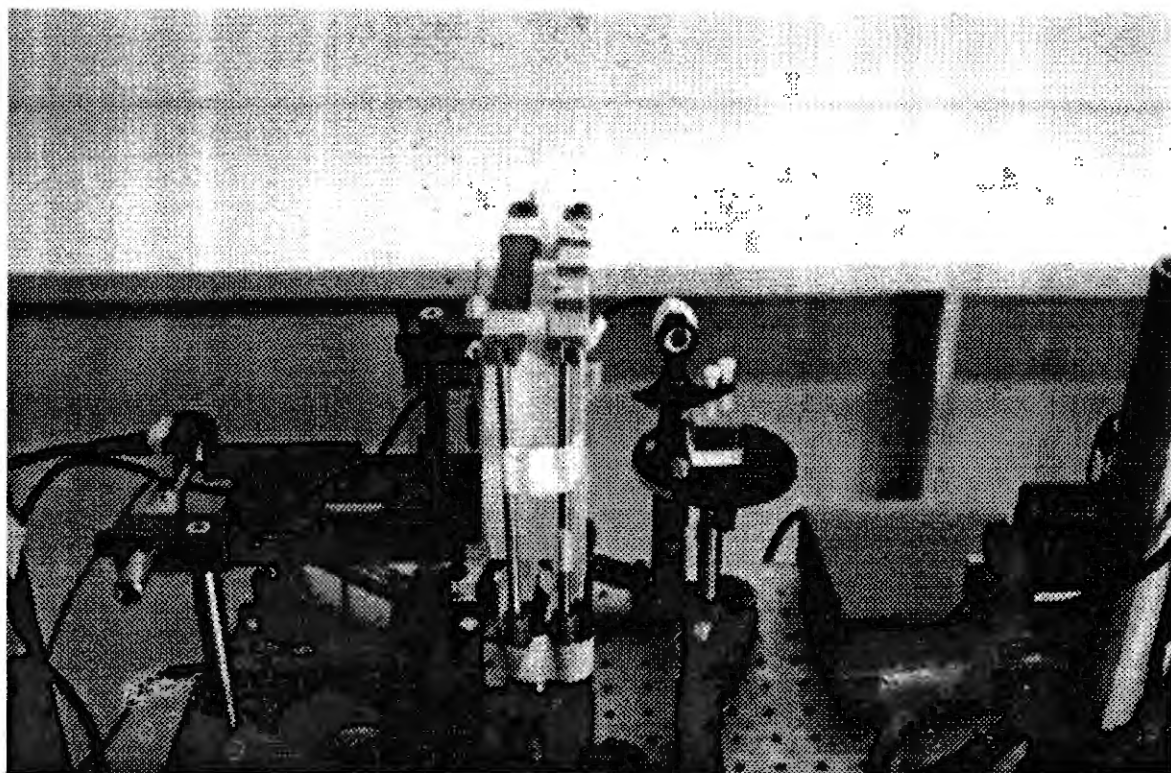


Figura 4.4. Fotografía 8. Arreglo experimental DALIS utilizando un espejo esférico.

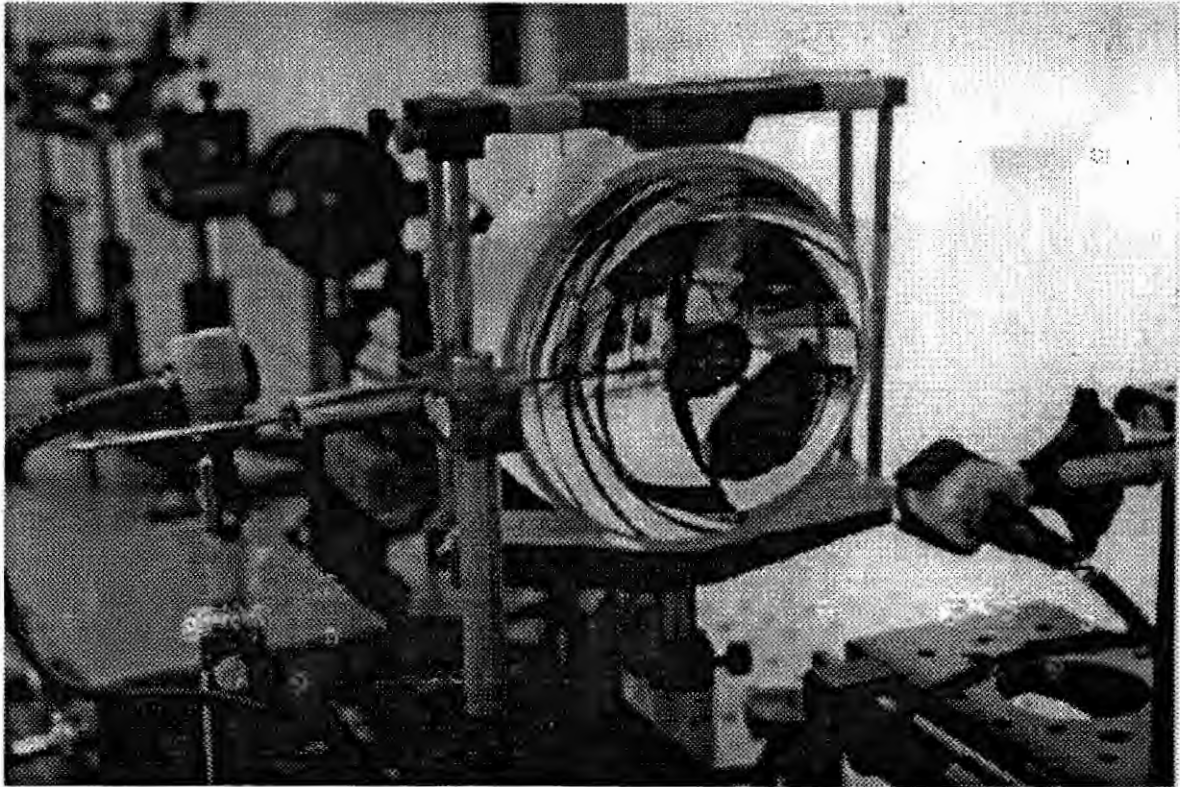


Figura 4.5. Fotografía 9. Arreglo experimental DALIS utilizando un espejo esférico.

DALIS

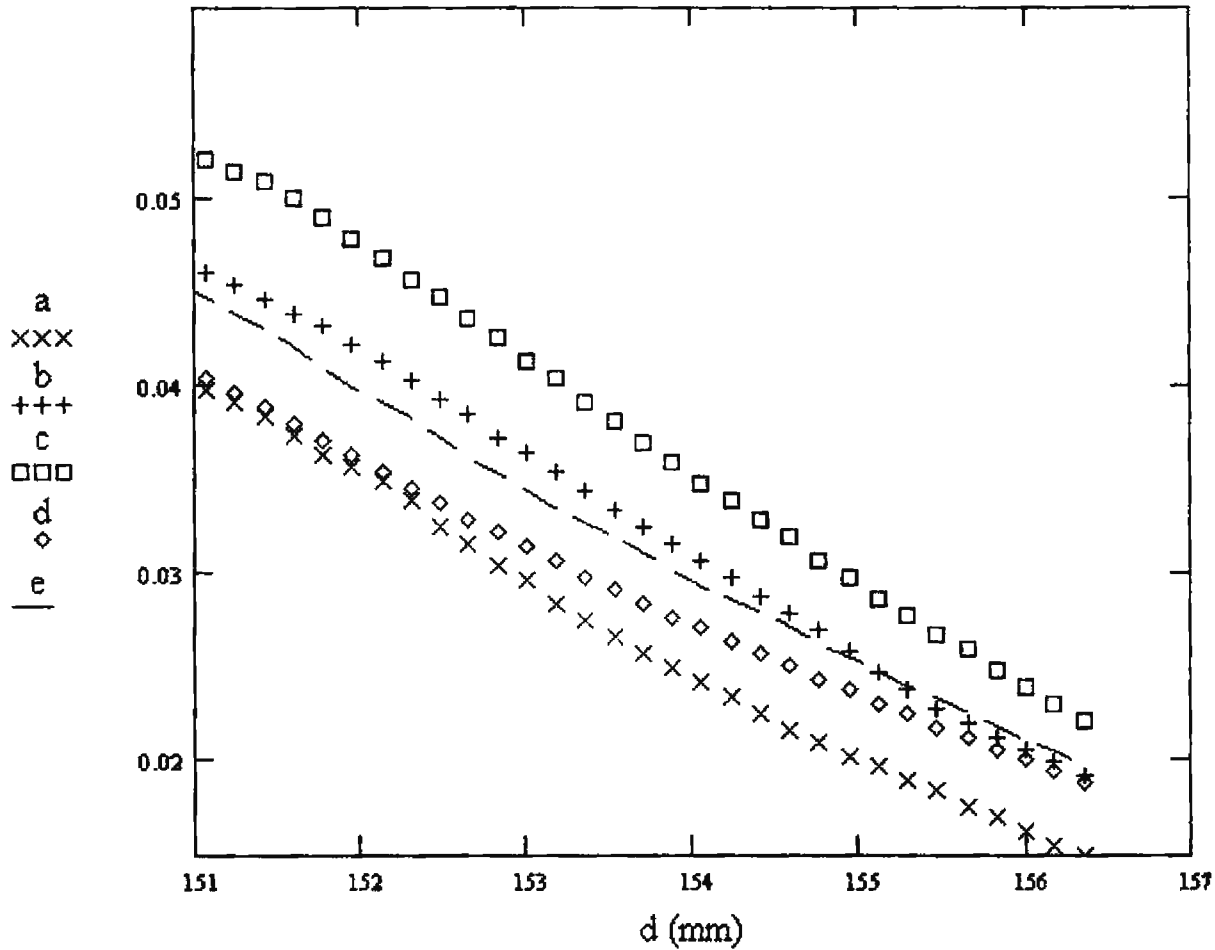


Figura 4.6. Señal DALIS versus desplazamiento d. Muestra 1.
donde a, b, c, d y e, son los puntos coordenados de medición.

DALIS

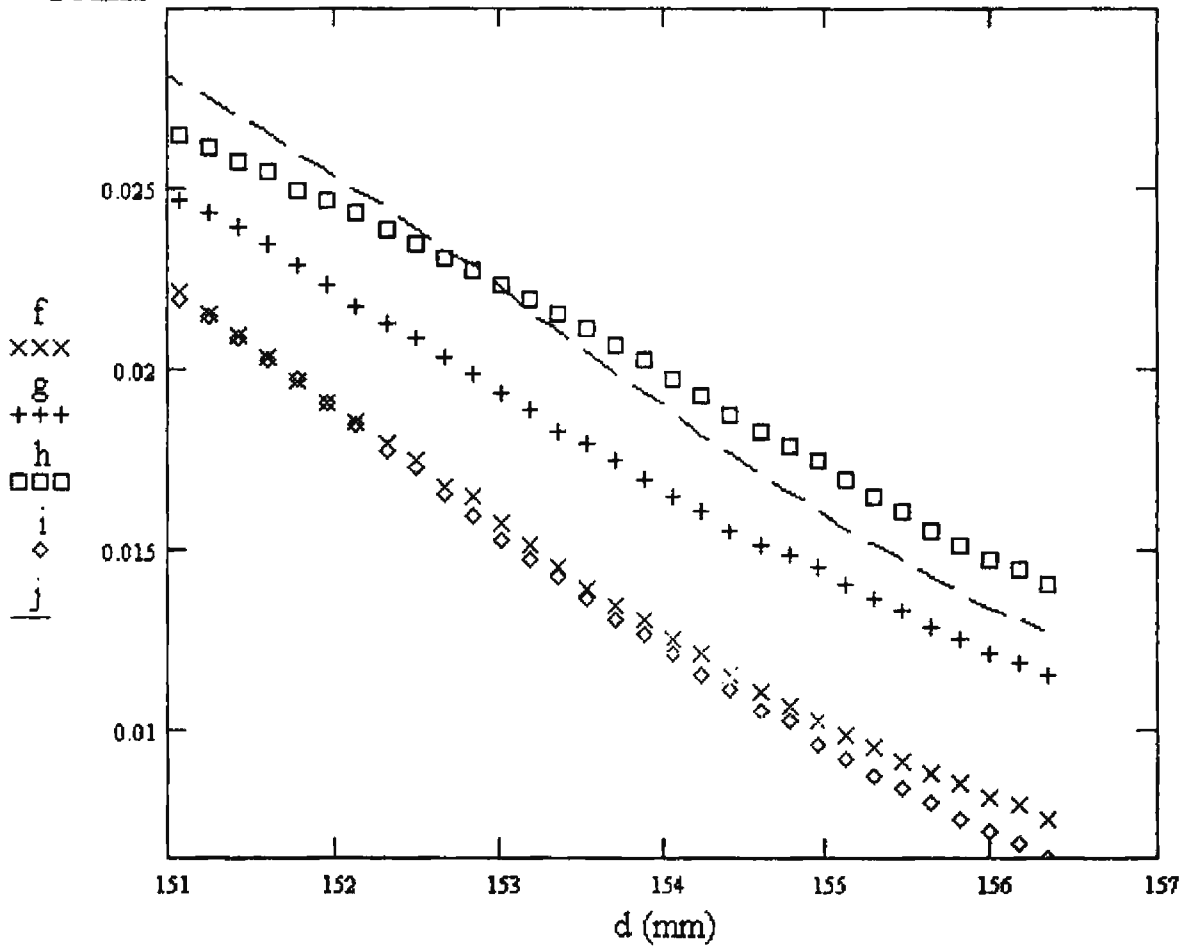


Figura 4.7. Señal DALIS versus desplazamiento d. Muestra 2.
donde f, g, h, i y j, son los puntos coordenados de medición.

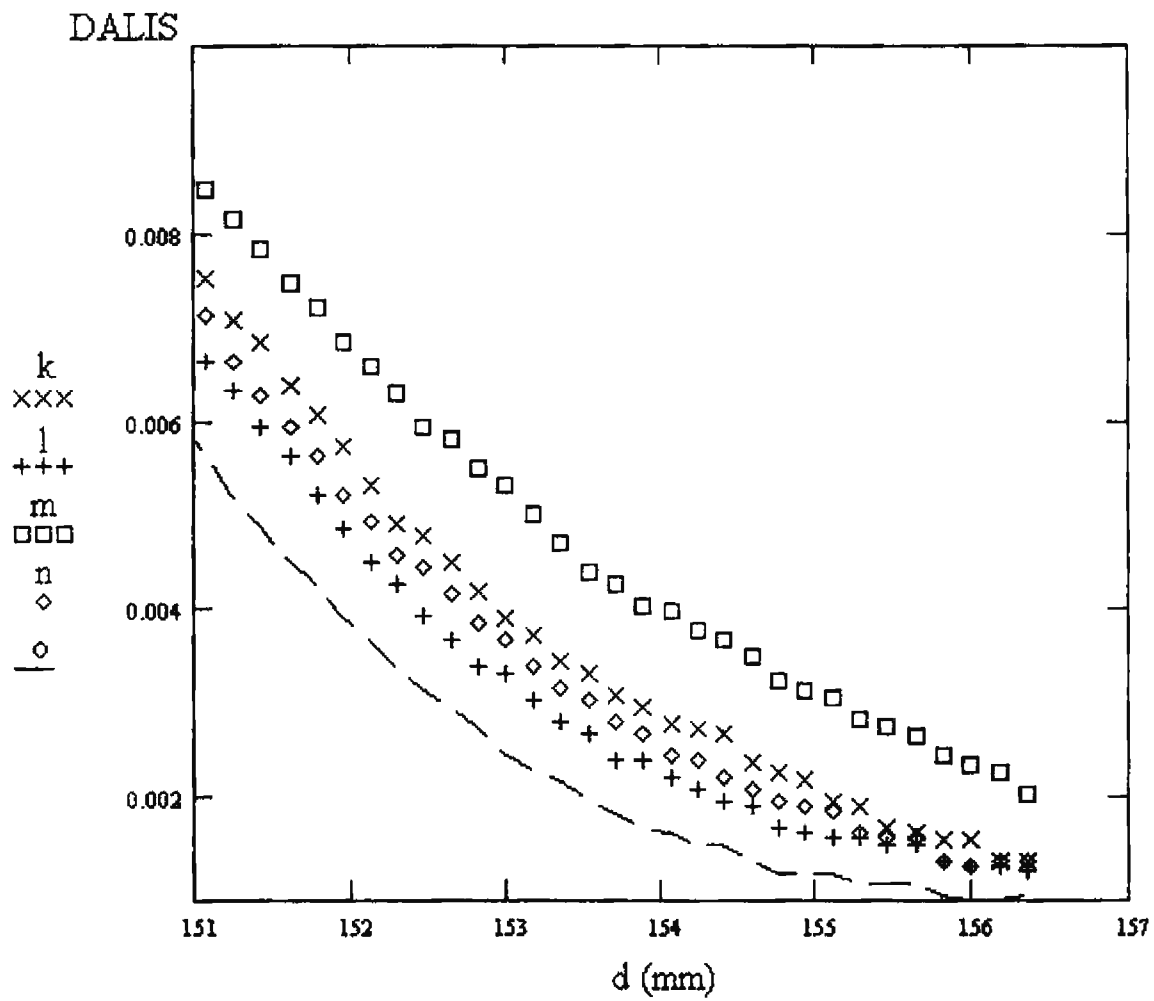


Figura 4.8. Señal DALIS versus desplazamiento d. Muestra 3.
donde k, l, m, n y o, son los puntos coordenados de medición.

muestra No. (n=1.51)	coordenada (0,5mm)	coordenada (-5mm,0)	coordenada (0,0)	coordenada (5mm,0)	coordenada (0,-5mm)
1	b	c	a	d	e
2	g	h	f	i	j
3	l	m	k	n	o

Figura 4.9. Tabla 2. Posición de las tres superficies ópticas de prueba.

Capítulo 5.

5.1 Conclusiones.

En este trabajo, se presentan los resultados experimentales de un nuevo método propuesto para la medición de esparcimientos de la luz y la caracterización de superficies ópticas, haciendo una medición del esparcimiento dinámico integrado en ángulo limitado, DALIS.

Se desarrollaron tres nuevos sistemas para examinar la luz esparcida por superficies ópticas pulidas, presentando como un sistema de colección de la luz esparcida a través de dos lentes y a través de un espejo esférico.

En comparación con el método convencional (ARS) de medición de esparcimientos de la luz, DALIS ofrece varias ventajas, primero, En el sistema ARS la intensidad de la luz de esparcimiento puede ser del orden de 10^{-6} a 10^{-8} comparada con la luz especular reflejada. Sin embargo, en el sistema de medición DALIS este problema se resuelve automáticamente debido a que se adopta un ángulo dinámico de detección (ángulo sólido de colección). El nivel de la señal en el sistema DALIS es mayor que en el sistema ARS, lo que permite mejorar la relación señal- ruido (SNR), además de que nos permite no utilizar diferentes filtros de densidad neutra, que en el sistema tradicional ARS, hacen que se dificulte la medición automática de los datos ya que el proceso se tiene que interrumpir al hacer los cambios de estos filtros, esto permite simplificar la configuración del sistema.

El uso de un sistema de lentes como elementos colectores de la luz de esparcimiento permite que la resolución angular sea ajustada modificando la distancia de observación inicial y el ángulo de observación inicial.

En el sistema DALIS es necesario realizar un movimiento de traslación lineal en lugar de un movimiento de rotación que realiza el sistema de medición ARS. Mecánicamente un movimiento lineal es más fácil de controlar que un movimiento de rotación, esto podría ser una ventaja ya que si se presenta una vibración, en el movimiento de rotación, afecta la estabilidad de la medición, así mismo, el movimiento traslacional la vibración podría ser menor y ofrecer un control más fácil.

Un movimiento de traslación lineal permite que la resolución angular de la medición de la luz esparcida pueda ser ajustada y además sea independiente de la resolución angular de las mesas de traslación, en este sistema propuesto la resolución angular puede ser ajustada modificando la distancia de observación inicial y el ángulo de observación inicial.

La medición de la luz esparcida cercana a la reflexión especular puede ser medida sin ninguna dificultad (esto es posible por la configuración experimental propuesta).

Basado en los resultados de estos dos sistemas, podremos concluir que el sistema DALIS es simple, fácil de operar, estable, sensible, lineal, de bajo ruido y de un gran ángulo dinámico.

Estos resultados son importantes por muchos aspectos, pero uno de los más importantes es que es posible aplicarse en la línea de trabajo de inspección de superficies ópticas.

Por otra parte, el método DALIS puede presentar algunas inconvenientes, como es el hecho de que en aplicaciones en IR, el manejo de lentes resulta complicado, a diferencia del sistema ARS, el cual no presenta un gran problema, además de que en el sistema DALIS que se propone presenta una teoría que se encuentra en desarrollo a diferencia del sistema ARS que cuenta con una teoría bien establecida.

La técnica DALIS que se describe en este trabajo, pudiera presentar una serie de aplicaciones en el campo de la ingeniería óptica, en el campo de la ingeniería electrónica o semiconductora, en el campo del proceso metal- mecánico, etc, algunas de las aplicaciones que se pudieran tener se describen a continuación:

- a) En las línea de trabajo de inspección de superficies ópticas:
 - en la medición de la topografía de la superficie.
 - en la detección de rayaduras, cavidades y partículas contaminantes, fracturas, etc.
 - Medición de relieves producidas en superficies maquinadas.

- b) En la industria del semiconductor:
 - procesamiento de obleas de semiconductores.
 - en la inspección discos ópticos.
 - medición de ondulaciones en obleas de silicio.

- c) En el área del deposito de películas delgadas:
 - en la medición de irregularidades en el deposito de películas delgadas, como podrían ser salpicaduras del material, pequeñas piezas cristalinas producidas por fracturas del material, etc.
 - en la medición de gránulos característicos del material depositado.

- d) Como sistema de medición no destructiva, ya que no utiliza ningún tipo de dispositivo que pudiera dañar el material a medir.

5.2 Trabajo a Futuro.

5.2.1 Nuevas configuraciones propuestas.

A continuación se describe brevemente 3 nuevos arreglos experimentales propuestos que podrían complementar la técnica propuesta y aportar nuevos resultados en la obtención de los datos estadísticos de la superficie.

El primero de ellos se describe en la figura 5.1, que presenta un sistema de colección de la luz de esparcimiento por medio de lentes colectoras, en forma normal a la superficie, obteniendo una gran colección de esta luz. Otra variación en este sistema es que modifica el ángulo de incidencia de la luz laser, así como la medición de la luz especular que se hace en forma oblicua a la superficie estudiada. Se desea registrar la luz especular y la luz de esparcimiento en tiempo real y obtener las curvas características en función de la señal DALIS contra la distancia de desplazamiento d , descritas para el arreglo DALIS, es importante observar que el ángulo de incidencia y el ángulo de medición de la luz especular es el mismo, y que el ángulo sólido de colección se proyecta por medio de las dos lentes descritas en el diagrama, el principio experimental es muy similar al arreglo presentado en el capítulo 3 de este trabajo presentando las modificaciones descritas con anterioridad. Se espera que estos arreglos experimentales propuestos nos permitan obtener resultados similares a los resultados presentados en el presente trabajo, ya que están basados el sistema DALIS.

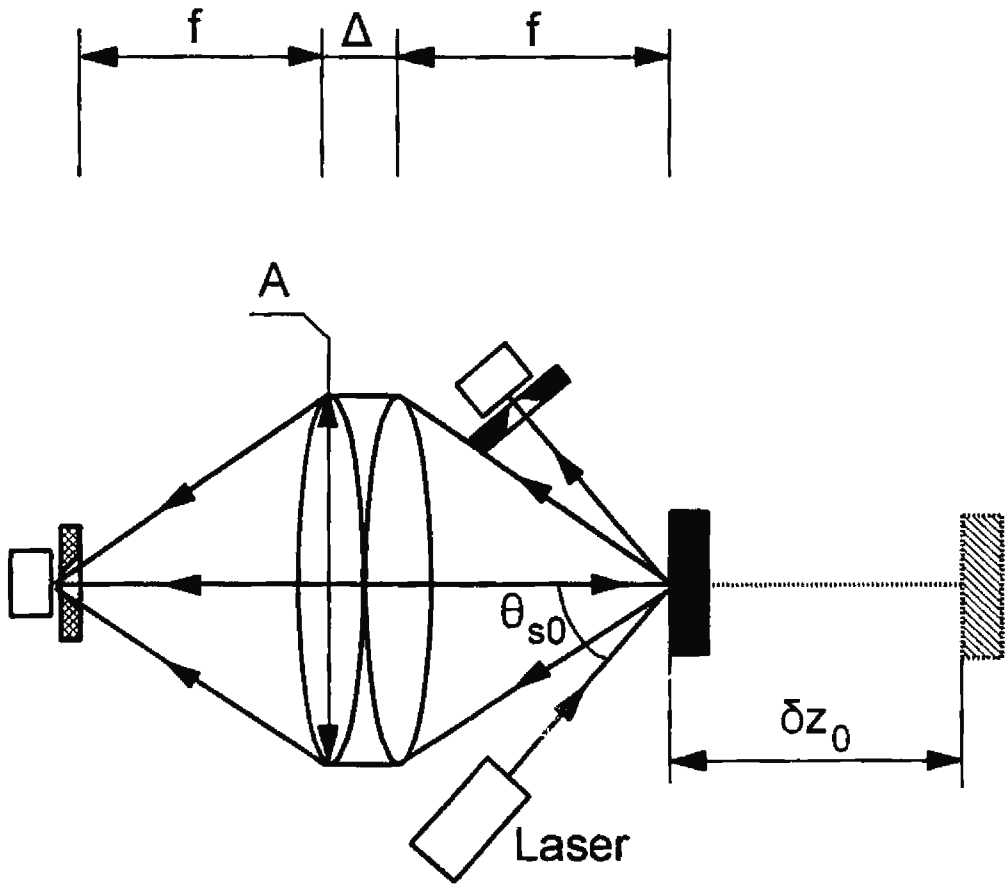


Figura 5.1. Arreglo experimental propuesto a)

donde

θ_{s0} es el ángulo de observación, Δ es la separación entre las lentes colectoras, δz_0 es la distancia de desplazamiento de la muestra, f es la distancia focal, A es el diámetro de la lente.

El arreglo experimental descrito en las figuras 5.2 y 5.3 es semejante al descrito en el capítulo 4. Un espejo esférico colecta la luz esparcida en función de un ángulo sólido proyectado, haciendo un barrido de la luz esparcida colectada en función del desplazamiento d que realiza la muestra: La principal diferencia en este sistema es la forma de registrar la luz esparcida, es decir, la manera de hacer incidir esta luz en el fotodetector. En el primero, un espejo hace incidir la luz colectora a un fotodetector. En el segundo arreglo, no se requerirá un espejo, si no únicamente se colocará el fotodetector en el punto donde se concentra la luz esparcida, esto se hace en una posición diferente a la presentada en el arreglo experimental del capítulo 4.

Se considera que estos dos arreglos que se proponen podrían presentar mejoras significativas al arreglo propuesto en el capítulo 4, esto es debido a que la luz de esparcimiento colectada en el arreglo del capítulo 4, tiene la inconveniencia que parte de la energía colectada se pierde al hacerse incidir sobre la muestra (figura 25), esto se debe a que la muestra está en la trayectoria de la concentración de la luz de esparcimiento. Otra ventaja es que permite la eliminación del movimiento que realiza el fotodetector al producirse el desplazamiento de la muestra lo que podría producir errores al momento de coleccionar la luz de esparcimiento. Este movimiento se eliminaría debido a que en ambos casos propuestos, el fotodetector esta siempre fijo al realizar dicho movimiento.

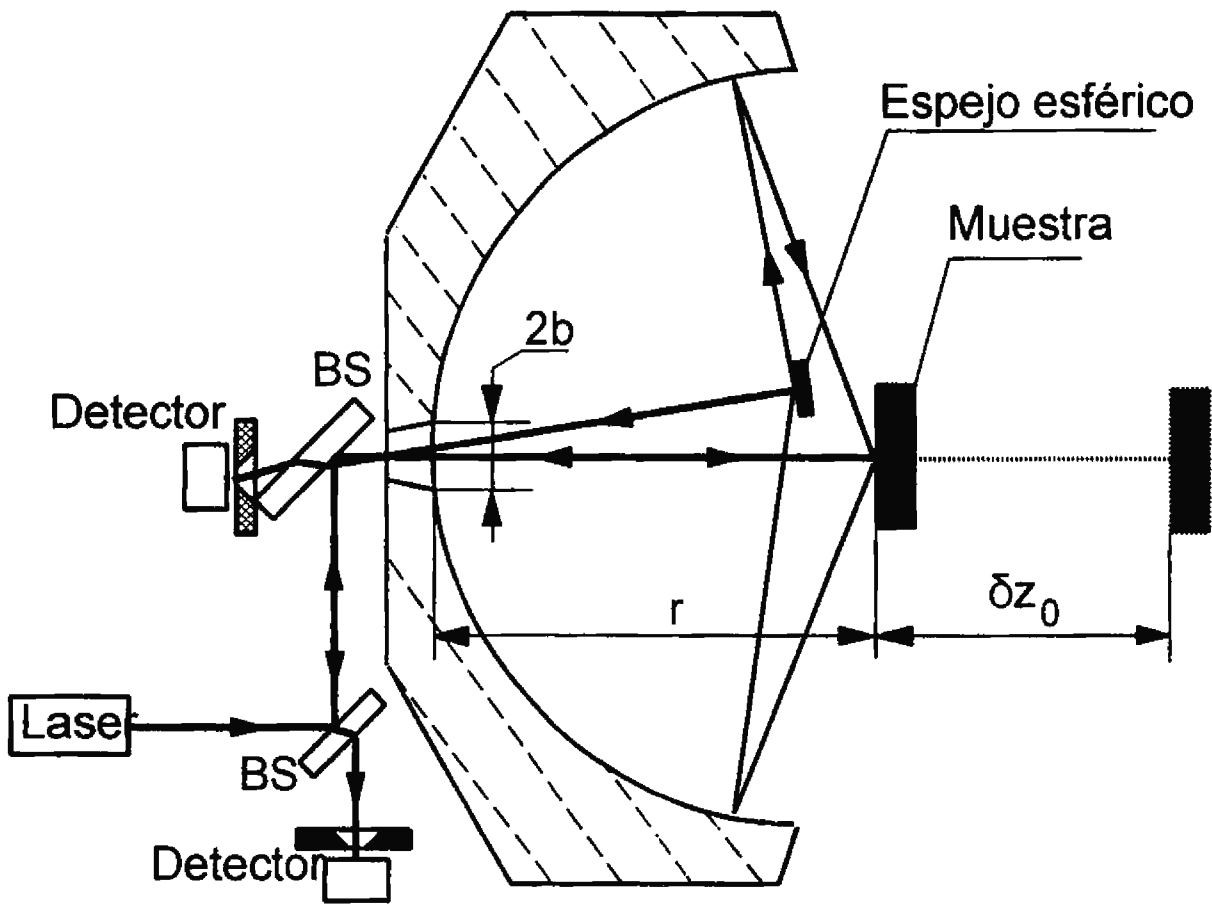


Figura 5.2. Arreglo experimental propuesto b)

donde

r es la distancia entre el espejo esférico y la muestra, δz_0 es la distancia de desplazamiento de la muestra, BS es el divisor de haz, $2b$ es el diámetro del orificio en el espejo.

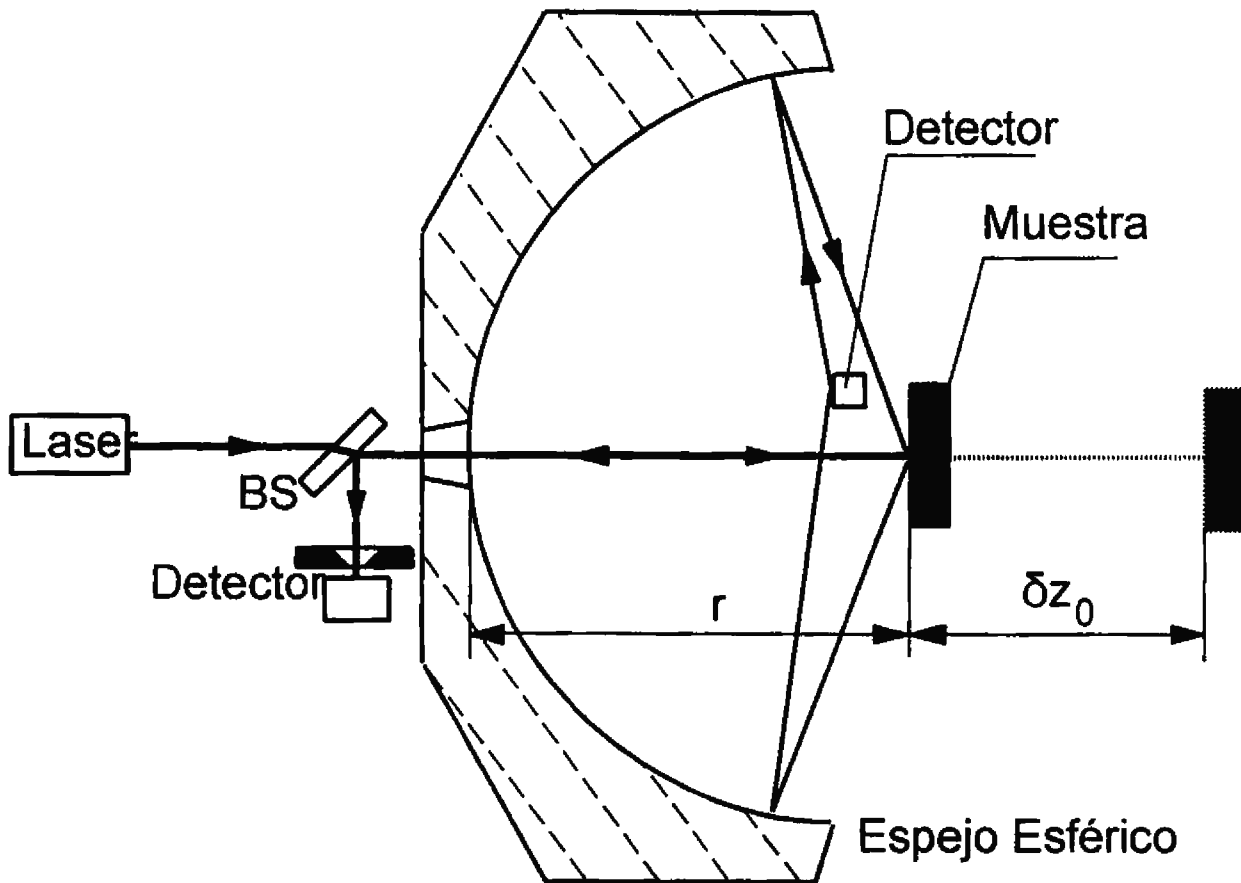


Figura 5.3. Arreglo experimental propuesto c)

donde

r es la distancia entre el espejo esférico y la muestra, δz_0 es la distancia de desplazamiento de la muestra, BS es el divisor de haz.

5.2.2 Cálculo del coeficiente de rugosidad .

En base a los resultados experimentales reportados en los capítulos 3 y 4, se observan un conjunto de gráficas obtenidas de los tres arreglos experimentales propuestos. Como ya se había mencionado previamente, las muestras de prueba presentan cada una un valor de rugosidad distinto.

Estos tres arreglos experimentales, presentan una diferencia en el ángulo sólido de colección el cual es distinto para cada uno de ellos, y como anteriormente se mencionó, este ángulo sólido esta en función de la distancia d de observación. Esta distancia modifica los ángulos de esparcimiento azimutal y polar (ecuaciones 3.2, 3.3, 3.4), realizando un cálculo inicial [39].

Conociendo el valor de la señal DALIS, es posible obtener el valor del coeficiente de rugosidad en cada punto por medio de la expresión siguiente:

$$\sigma_i = \frac{\lambda \sqrt{DALIS}}{4\pi \cos\theta_i} \quad (A.1)$$

Este proceso se realiza punto a punto (en total el experimento captura 340 puntos en cada corrida), realizando posteriormente un promedio de los valores obtenidos:

$$\sigma = \frac{1}{340} \sum_1^{340} \sigma_i \quad (A.2)$$

Los resultados del análisis de las curvas anteriormente descritas se concentran en la figura 5.4. Es importante mencionar que los resultados mostrados requerirán de un análisis y estudio más amplio a desarrollarse como un trabajo a futuro, por lo anterior estos resultados no podrán ser considerados como resultados concluyentes.

De acuerdo a los resultados observados en la tabla 3, en donde se obtienen los cálculos iniciales del coeficiente de rugosidad, se observa que el resultado obtenido con la técnica TIS, es la que mayor difiere con respecto a la técnica DALIS propuesta, (con las lentes, DALIS 1 y 2 y con el espejo esférico, DALIS 3), es necesario mencionar que el espejo utilizado en TIS presenta problemas de diseño, y se esperaría que al mejorar esta relación entre la luz esparcida y la luz especular sea más precisa y por consiguiente nos proporcione un valor en el coeficiente de rugosidad más correcto, se presupone que este problema de diseño nos da un valor menor del que en realidad es el correcto. Por otra parte, al ver los resultados que surgen de utilizar la técnica DALIS (1, 2 y 3), hay una mayor correspondencia en los resultados obtenidos, pero será necesario el desarrollar un análisis y estudio más amplio como un trabajo a futuro y poder ser considerado como un resultado concluyente.

Tabla de resultados obtenidos por la técnica por el sistema TIS y DALIS (arreglos I, II y III)

(coeficiente de rugosidad, σ)

TIS Método de medición de integración total de esparcimiento.
 DALIS 1 Método de medición DALIS (ángulo de observación inicial de 45°).
 DALIS 2. Método de medición DALIS (ángulo de observación inicial de 0°).
 DALIS 3. Método de medición DALIS (sistema de colección de espejo esférico).

	TIS	DALIS 1	DALIS 2	DALIS 3
Muestra 1	2.354nm	4.655nm	4.332nm	3.286nm
Muestra 2	1.369nm	3.451nm	2.853nm	2.431nm
Muestra 3	0.441nm	2.902nm	2.367nm	1.056nm

Tabla 3. Resultados experimentales.

Bibliografia

- [1] J. M. Elson, H. E. Bennett, and J. M. Bennett, "Scattering from optical surfaces," in: *Applied Optics and Optical Engineering VII*, R. R. Shannon and J. C. Wyant (eds.), Academic, New York, 191-244, (1979).
- [2] J. C. Stover, S. A. Serati, and C. H. Gillespie, "Calculation of surface statistics from light scattering," *Opt. Eng.* **23**(4), 406-412, (1984).
- [3] J. C. Stover, F. M. Cady, and E. Sklar, "Measurement of low angle scatter," *Opt. Eng.* **24**(3), 404-407, (1985).
- [4] S. J. Wein and W. L. Wolfe, "A small-angle scatterometer," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **967**, *Stray Light and Contamination in Optical Systems*, 272-285, (1988).
- [5] C. Amra, C. Grezes-Besset, P. Roche, and E. Pelletier, "Description of a scattering apparatus: application to the problems of characterization of opaque surfaces," *Appl. Opt.* **28**(14), 2723-2730, (1989).
- [6] C. Amra, D. Torricini, and P. Roche, "Multiwavelength (0.45 - 10.6 μm) angle-resolved scatterometer or how to extend the optical window," *Appl. Opt.* **32**(28), 5462-5474, (1993).

- [7] H. Wang, "Light-scattering method for characterizing optical surfaces," *Opt. Eng.* **32**(11), 2904-2910, (1993).
- [8] H. Wang and G. Gomez-Rosas, "Scattering measurements on curved rough surfaces," *J. Modern Optics* **43**(2), 355-363, (1996).
- [9] H. Wang and O. N. Stavroudis, "Design of a light scatterometer for the measurement of small angle scattering," *Optical Engineering* **35**(4), 1165-1169, (1996).
- [10] R. E. Luna, "Scattering by one-dimensional random rough metallic surfaces in a conical configuration: several polarizations," *Opt. Lett.* **21**(18), 1418-1420, (1996).
- [11] Nicodemus, F. E., et al. *Geometric Considerations and Nomenclature for reflectance*, U.S. Dept. of commerce, NBS Monograph 160.
- [12] P. Beckmann and A. Spizzichino, *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Pergamon/Mcmillan, London, (1963).
- [13] S. Silver, *Microwave Antenna Theory and Design*, 161-170, McGraw-Hill, New York, (1947).
- [14] E. L. Church and J. M. Zavala, "Residual surface roughness of diamond-turned optics," *Appl. Opt.* **14**(8), 1788-1795, (1975).

- [15] E. L. Church, H. A. Jenkinson, and J. M. Zavala, "Measurement of the finish of diamond-turned metal surfaces by differential light scattering," *Optical Engineering* **16(4)**, 360-374, (1977).
- [16] J. M. Stover, "*Optical Scattering, measurement and analysis*," SPIE, USA (1995).
- [17] J.M.Elson, "Light scattering from surfaces with a single dielectric overlayer," *J. Opt. Soc. Am.* **66(7)**, 682-694, (1976).
- [18] J. C. Stover, K. A. Klicker, D. R. Cheever, and F. M. Cady, "Reduction of instrument signature in near angle scatter measurements," *Metrology: Figure and Finish, Proc. SPIE 749*, 46-53 (1987).
- [19] J. M. Bennett, L. Mattsson, ed., OSA. "*Introduction to Surface Roughness and Scattering*" (1989).
- [20] Davies H. , "The reflection of electromagnetic waves from a rough surface", *Proc. Inst. Elec. Engrs.* **101**, 209, (1954).
- [21] Bennett, H. E, Porteus, J. O., "Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence", *J. Opt. Soc. Am.* , **51**, 123, (1961).
- [22] Guerra, J. M., "A practical total integrated scatterometer," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1009 "Surface Measurement and Characterization,"** 146-154, (1988).

- [23] W. William Lee, L. M. Scherr, and M. K. Barsh, "Stray light analysis and suppression in small angle BRDF/BTDF measurement," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **675** "Stray Radiation V," 207-216, (1986).
- [24] K. A. Klicker, J. C. Stover, and D. J. Wilson, "Near specular scatter measurement techniques for curved samples," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **967** "Stray Light and Contamination in Optical Systems," 255-263, (1988).
- [25] F. M. Cady, J. C. Stover, T. F. Schiff, K. A. Klicker, and D. R. Bjork, "Measurement of very near specular scatter," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **967** "Stray Light and Contamination in Optical Systems," 264-271, (1988).
- [26] S. J. Wein and W. L. Wolfe, "A small-angle scatterometer," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **967** "Stray Light and Contamination in Optical Systems," 272-285, (1988).
- [27] C. L. Vernold, "Application and verification of wavelength scaling for near specular scatter predictions," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1165** "Scattering from Optical Components," 18-30, (1989).
- [28] M. J. Schroeder, D. J. Musinski, C. G. Hull-Allen, and F. J. Van Milligen, "Bidirectional reflectance distribution function (BRDF) measurements on multilayer dielectric coatings as a function of polarization state," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1165** "Scattering from Optical Components," 270-282, (1989).
- [29] D. K. Zhao, X. Lu, P. F. Gu, and J. F. Tang, "BRDF measurements on WSS," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **2260** "Stray Radiation in Optical Systems III," 168-177, (1994).
- [30] R. I. Young and P. M. Hallett, "Two portable devices for the measurement of scatter of a laser beam and evaluation of the scattering materials' Vos function," *Proc. Soc.*

Photo-Opt. Instrum. Eng. 2541 "Optical Scattering in the Optics, Semiconductor, and Computer Disk Industrials," J. C. Stover, ed., 154-160, (1995).

- [31] P. Roche and E. Pelletier, "Characterization of optical surfaces by measurement of scattering distribution," *Appl. Opt.* 23(20), 3561-3566, (1984).
- [32] K. A. O'Donnell and E. R. Mendez, "Experimental study of scattering from characterized random surfaces," *J. Opt. Soc. Am.* A4(7), 1194-1205, (1987).
- [33] L.-X. Cao, T. U. Vorburger, A. G. Liebermann, and T. R. Lettieri, "Light-scattering measurement of the rms slope of rough surfaces," *Appl. Opt.* 30(22), 3221-3227, (1991).
- [34] H. Wang, "The angle-limited integrated scattering (ALIS) measurement system for in-workshop inspection of the optical polishing process," *Optics and Laser Technology.* 26(5), 333-340, (1994).
- [35] R. Latzari and R. G. Knollenberg, "Surface analysis for the characterization of defects in thin film processes," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 1164 "Surface Characterization and Testing II," 222-235, (1989).
- [36] S. Kalafatis, J. F. O'Hanlon, and K. P. Gross, "Design and development of a rotating wafer scanner," *Opt. Eng.* 32(2), 420-424, (1993).
- [37] C. D. Allemand and J. J. Danko, "Heuristic approach to particle detection on virgin and patterned silicon wafers," *Opt. Eng.* 34(2), 548-563, (1995).
- [38] Van Wingerden J., Frankena, H. J., Van der Zwan B. H. "Production and measurement of superpolished surfaces". *Opt. Eng.* 31(5), 1086-1092, (1992).

- [39] G. Gomez-Rosas, H.Wang, "A new method for measuring scattering of light from optical surfaces with random roughness," *Opt. Quantum Electron.* **30**, 181-186 (1998).