

IMPLEMENTACIÓN DE LA PRUEBA DE HARTMANN PARA EL ESTUDIO DE TEXTURA DE SUPERFICIES METÁLICAS

Aarón Muñoz^{1, 2*}, Luis Porras¹, Samuel Aquino¹, Hebert Molero¹.

1: Grupo de Instrumentación y Óptica, Departamento de Física, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología
Universidad de Carabobo, Valencia. Venezuela.

2. Laboratorio de Ultraestructura, Centro de Investigaciones Médica y Biotecnológica de la Universidad de Carabobo,
Valencia. Venezuela

* E-mail: aamunoz@uc.edu.ve

Recibido: 24-Nov-2009; Revisado: 15-Oct-2010; Aceptado: 22-Oct-2010

Publicado On-Line el 15-Nov-2010

Disponible en: www.rlmm.org

Resumen

La prueba de Hartmann es una prueba óptica utilizada para el estudio de aberraciones transversales en sistemas ópticos. Se presenta una modificación a esta herramienta óptica diseñada con el objetivo estudiar y servir como control en la calidad de preparación de superficies de acero inoxidable 316L por procedimientos metalográficos. Se utilizó una cámara digital para obtener el Hartmangrama correspondiente y posteriormente fueron analizadas utilizando un software desarrollado en MATLAB[®] el cual cuantificó la intensidad y grado de homogeneidad de toda la superficie en cada sustrato, calculando la media de la intensidad de los Hartmangramas y la desviación cuadrática media de la intensidad, respectivamente. La modificación de la prueba ha probado ser útil en la determinación de la calidad de preparación de superficies metálicas de forma cuantitativa y cualitativa.

Palabras Claves: Prueba de Hartmann, Preparación metalográfica, Metal.

Abstract

The test of Hartmann is an optical test that is used for the study of cross-sectional aberrations in optical systems. We present a modification of this optical test designed to serve as a quality assurance tool during the surface preparation of 316L stainless steel substrates to a mirror quality, when metallographic methods are employed. We used a digital camera to obtain the Hartmann's patterns which were later analyzed by means of a computer program, developed in MATLAB[®], which quantified the intensity and the homogeneity of the surface of each one of the substrates studied, by calculating the average and the average quadratic deviation of the intensity of the Hartmann's patterns, respectively. The modification of this optical test was found to be useful for the determination of the preparation quality of metallic surfaces in both, a quantitative and a qualitative manner.

Keywords: Test of Hartmann, Metallographic methods, Metals.

1. INTRODUCCIÓN

Hartmann propuso una prueba a principios del siglo XX [1], la cual se usa para el control óptico en un gran rango de aplicaciones. Como ejemplo de ello, hace 100 años atrás, Hartmann estudió los espejos primarios del gran telescopio Zelentchouk durante su construcción señalando con ello el nacimiento de la prueba y donde el rápido impacto de esta técnica reside en su fácil montaje debido a su simplicidad [2].

El objetivo de este trabajo es presentar un nuevo arreglo de la prueba de Hartmann clásica para ser utilizada en el control de calidad de pulido y estudio morfológico de sustratos de acero inoxidable 316L

para su aplicación en biomateriales, encontrando una configuración para lograr la mayor resolución, sin perder sensibilidad y no entrar en el límite de la difracción.

En las siguientes secciones se describirá la prueba clásica de Hartmann que será de gran ayuda para la compresión de los diferentes Hartmangramas (imágenes obtenidas por medio de esta prueba óptica) obtenidos en el estudio de sustratos de acero inoxidable pulidos a calidad espejo y se demostrará, de acuerdo a los resultados, la potencialidad de esta prueba como herramienta de certificación y control de superficies metálicas pulidas.

2. FENOMENOLOGÍA DE LA PRUEBA DE HARTMANN

La prueba clásica de Hartmann [1] hace uso de una pantalla con múltiples agujeros pequeños con una incidencia de un haz colimado, para producir rayos de luz discretos que se utilizan para medir la aberración transversal de los rayos reflejados en las diferentes regiones de la superficie bajo prueba, para luego ser procesados a través de un algoritmo de integración numérica (o procedimiento equivalente), y con ello determinar las aberraciones de frente de onda y/o la forma de la superficie. Por lo general, el número de agujeros en la pantalla de Hartmann se limita a cerca de cien [2]; y para telescopio astronómico que constan de grandes espejos este número puede ser aumentado a varios cientos [1]. Una limitación importante para aumentar el número de los agujeros, es el hecho de que el diámetro de los agujeros no puede ser reducido indefinidamente, porque los efectos de difracción se tornan importantes para el agujero de pequeñas aberturas [2]. Además, incluso desde el punto de vista de la óptica geométrica los puntos de luz en la superficie se hacen tan grande que casi se solapan entre sí, de modo que imposibilitan las medidas.

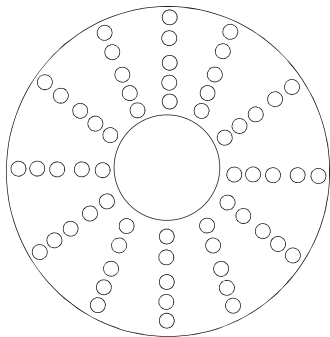


Figura 1. Pantalla típica de Hartmann para pruebas de espejos

Inicialmente para el registro de los datos, esta se realizaba a través de placas fotográficas pero, con el advenimiento de los CCD y computadoras de alta velocidad; la prueba se ha modernizado haciéndola un proceso mucho más rápido.

Las ventajas de la prueba de Hartmann son:

- Es simple y robusta - insensible a la atmósfera y la vibración.
- Se puede utilizar directamente sin óptica auxiliar (como interferómetros).

2.1 Pantalla de Hartmann Cuadriculada

En la descripción clásica de la prueba de Hartmann, se considera una distribución radial de los agujeros (ver figura 1) en una pantalla circular. En este punto se presentará una modificación a esta configuración (ver figura 2), debido principalmente al tamaño de las muestras las cuales se encuentran en el orden de unos cuantos centímetros, con ello se evitan los efectos de difracción.

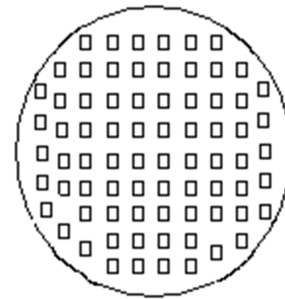


Figura 2. Pantalla de Hartmann modificada

Cualquier posible desplazamiento lateral de la estructura donde se encuentra colocada la pantalla de Hartmann, introduce una inclinación en el frente de onda, el cual puede ser recuperado de los datos. El centro de gravedad para las medidas se estableció en el origen del sistema de coordenadas, esto hace nulo el valor de X y Y de la medida que se encuentre localizada en el origen y de la resta de estos valores de cada medición. La razón de este paso es que la intersección del eje simétrico de la placa con el eje óptico de la muestra es desconocida y el método de centroide establece la intersección. Las deformaciones en la superficie que se producen en forma simétrica se traducirán en un conjunto de punto cuyo centro de gravedad corresponde la ubicación de la intersección del eje óptico y la placa.

Es importante señalar que el desenfoque en la prueba de Hartmann introduce un componente importante en las aberraciones, lo que equivale a una componente en el frente de onda y esta se puede estimar, calculando un mínimo cuadrado entre las aberraciones transversales y el desenfoque; así el corrimiento de los agujeros de la pantalla, puede ser escrito, según Geary [3] como:

$$\Delta x_m = A_x + Bx_m \quad (1)$$

$$\Delta y_m = A_y + By_m \quad (2)$$

Donde A_x , A_y y B son constante, “x” y “y” son las

medidas correspondiente a los agujeros de la pantalla.

El estudio de las aberraciones transversales según Born [4] se puede separar en dos etapas debido a la simetría del problema, el cual para determinar el centro de gravedad considerando todos los agujeros de la pantalla se puede obtener de la siguiente manera:

$$A_x = \frac{\sum_{m=1}^N \Delta x_m}{N} \quad (3)$$

$$A_y = \frac{\sum_{m=1}^N \Delta y_m}{N} \quad (4)$$

donde N corresponde al número de hoyos de la pantalla.

El centro de gravedad se ha establecido como el origen de las coordenadas del sistema y esta debe ser la posición ideal para el patrón de desenfoque. Mediante un doble ajuste lineal de los mínimos cuadrados se puede determinar que el mínimo de desenfoque B se puede escribir:

$$B = \frac{\sum_{m=1}^N x_m (\Delta x_m) + \sum_{m=1}^N y_m (\Delta y_m)}{\sum_{m=1}^N x_m^2 + \sum_{m=1}^N y_m^2} \quad (5)$$

Al final se puede determinar la aberración geométrica transversal en el mínimo desenfoque como:

$$TA_{xm} = TA_{xm_medido} - \Delta x_m \quad (6)$$

$$TA_{ym} = TA_{ym_medido} - \Delta y_m \quad (7)$$

Estos valores de la aberración transversal pueden ser usados para estimar la distribución de la luz devuelta por el espejo bajo prueba, de la siguiente manera:

$$r = \sqrt{TA_{xm}^2 + TA_{ym}^2} \quad (8)$$

Donde r indica una medida de que tanto se encuentra desviada la luz que regresa de la muestra con respecto al Hartmangrama obtenido de la muestra patrón.

3. METODOLOGÍA

3.1 Corte y pulido de las muestras

Se prepararon una serie de discos o arandelas ciegas de un diámetro de 1,5 cm y espesor de 3,0 mm de acero inoxidable 316L, cortadas de una barra de 6,0 m de longitud. Los discos fueron rectificadas para obtener una muestra con ambos planos paralelos, y durante el proceso de corte y rectificación se usó un

refrigerante para asegurar que las muestras no se calentaran.

Posteriormente las muestras fueron pulidas utilizando papel de carburo de silicio con “grit” de 120, 180, 240, 320, 400, 600, 1200, 1500 y 2000; asegurando la uniformidad del proceso de pulido con una lupa estereoscópica. Posteriormente se empleó una máquina pulidora Buehler modelo Dynamatic donde se utilizó alúmina de 1,0 μm y posteriormente de 0,05 μm realizando movimientos radiales hasta alcanzar un pulido a calidad espejo.

3.2 Montaje de la prueba de Hartmann

El sistema óptico (ver Figura 3) utilizado consta de un LASER de He-Ne de 633 nm de longitud de onda con una potencia 10 mW fabricado por JDS Uniphase. El haz de luz fue ampliado y colimado por un sistema auto-colimador obteniéndose un haz con un diámetro del orden del diámetro de la muestra. Fue utilizado un semi-espejo para separar la luz y de esta forma reducir la intensidad del haz que incide sobre la muestra potenciando el uso del LASER al dejar disponible parte de la luz para otros experimentos.

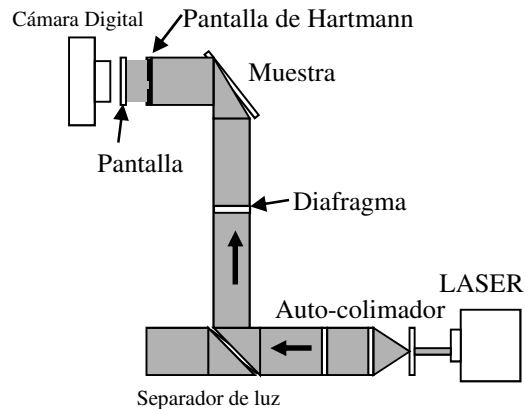


Figura 3. Sistema óptico para la prueba de Hartmann.

Entre el separador de luz y la muestra se colocó un diafragma para eliminar el exceso de iluminación que incide sobre la muestra, luego de la reflexión sobre la muestra la luz incide sobre una pantalla con cuadrados que permiten el paso de la luz (pantalla de Hartmann), el número y tamaño de los cuadrados depende de la resolución deseada en la prueba, posteriormente la luz que abandona la pantalla de Hartmann se proyecta sobre una pantalla de papel tensado donde se le toma una fotografía por la parte

posterior utilizando una cámara de video Handicam de Sony y la imagen es grabada en un computador para futuros análisis.

Se usó el software AHsoftUC, desarrollado por nuestro grupo, para analizar la intensidad y cuan homogénea es la superficie de la muestra por medio del estudio de la media de la intensidad de los patrones obtenidos. Estos resultados se compararon con los de la muestra patrón (espejo plano). Adicionalmente se calcula la desviación cuadrática media (rms) de la intensidad de los Hartmangramas.

3.3 Programa Computacional AHsoftUC

El software se desarrolló en un ambiente MATLAB® 7.0 R14 utilizando un computador Pentium 4 3.06 GHz y las imágenes se obtuvieron directamente de la Handicam sin ningún tratamiento adicional para no producir ruidos experimentales en las imágenes que eventualmente nos llevarían a concluir erróneamente sobre los resultados.

El programa computacional AHsoftUC calcula la intensidad media de los Hartmangramas eliminando los puntos de baja intensidad u oscuros, de esta forma se asegura que dichos puntos no perturben el resultado final.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Análisis del diseño óptico de la prueba de Hartmann

Previo a la implementación de la prueba se realizó un análisis de trazado de rayos del diseño óptico utilizando el programa de diseño OSLO Premium Edition 6.2, empleando los parámetros Gaussianos de las componentes ópticas del sistema.

En el análisis del trazado de rayos del sistema (ver Figura 4), se obtuvieron las posiciones óptimas de las lentes así como se determinaron las aberraciones bajo el modelo de Seidel que se muestran en la Tabla 1.

Las aberraciones calculadas son tolerables para el presente estudio, siendo la de mayor magnitud la aberración esférica, lo cual es de esperarse por que se está dentro del límite paraxial. Esto ocasiona pocas distorsiones en las imágenes, lo cual es importante porque son precisamente estas distorsiones generadas por las muestras que se están estudiando con el presente diseño.

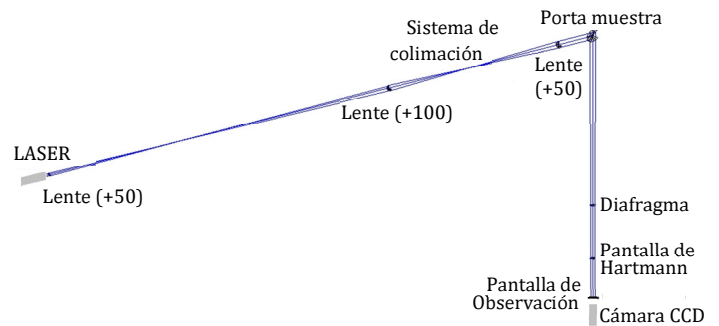


Figura 4. Análisis del trazado de rayos del sistema óptico para la prueba de Hartmann.

Tabla 1. Valores de los Coeficientes de las Aberraciones de Seidel del Sistema Óptico.

Aberración	Coefficiente de Seidel
Esférica	$4,8072 \times 10^{-2}$
Coma	$9,8599 \times 10^{-7}$
Astigmatismo	$3,1278 \times 10^{-11}$
Peztval	$2,6542 \times 10^{-12}$
Distorsión	$2,0293 \times 10^{-15}$

Hay una serie de variables que deben ser atendidas para obtener una prueba de Hartmann que sea confiable y cuyos resultados sean reproducibles. Las variables a estudiar son [5]: El número de cuadrados en la pantalla de Hartmann que determina la resolución de la prueba y la distancia *Pantalla de Hartmann-Pantalla de papel*, en donde según el análisis realizado en la sección anterior es muy importante asegurar que se esté la distancia apropiada para obtener una auto-imagen de la pantalla de Hartmann.

Con respecto al número de cuadrados intuitivamente aumentaríamos el número para que la resolución superficial sea la mas alta, pero según lo observado en la Figura 5 esto no es posible, porque al utilizar cuadrados por debajo de 1 mm de lado (período espacial de 2 mm) los problemas de difracción debido a los bordes es tal que la imagen comienza a distorsionarse. (Véase Figura 5C). Esta difracción imposibilita analizar el Hartmangrama de forma confiable, indicando que este es un valor límite para el arreglo experimental. Para tamaños de lado muy grandes a 1 mm la resolución disminuye apreciablemente reduciendo la capacidad de análisis de la prueba.

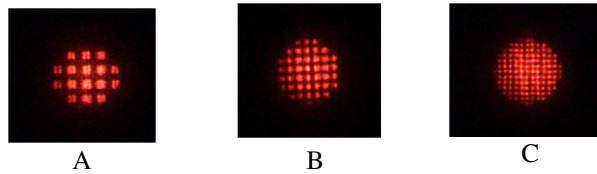


Figura 5. Hartmangramas del espejo de referencia para periodos espaciales de: A) 3,2 mm, B) 2,0 mm, C) 1,2 mm.

Utilizando la ecuación (5) se determina la posición donde se obtienen el mínimo desenfoque para pantallas con diferentes periodos espaciales y se muestran en la Tabla 2 hasta el orden 5. A partir de estos resultados se colocó la pantalla a una distancia de 50,55 cm correspondiente a la pantalla de Hartmann con periodo espacial de 2 mm, que como se discutió anteriormente presenta el tamaño de cuadro para el cual el compromiso entre la difracción y resolución fue óptimo.

Por otro lado es necesario señalar que la distancia es importante cuando las muestras a analizar presentan aberraciones ópticas de tal magnitud que la distorsión producida no permita obtener una imagen sobre la pantalla de análisis lo suficientemente nítida y completa para ser analizada.

Tabla 2. Posición de la imagen para pantallas de Hartmann con diferentes periodos espaciales.

Periodo Espacial	Posición de la Desenfoque (cm)				
	1,6 mm	2,0 mm	2,4 mm	2,8 mm	3,2 mm
1	8,09	12,64	18,20	24,77	32,35
2	16,18	25,28	36,40	49,54	64,71
3	24,27	37,91	54,60	74,31	97,06
4	32,35	50,55	72,80	99,08	129,42
5	40,44	63,19	91,00	123,85	161,77

Observaciones de la aplicación de la prueba a superficies sin mayores tratamientos mecánicos o metalográficos mostraron que no es posible obtener imágenes nítidas debido a la reflexión difusa que exhiben tales superficies. Esto define otra restricción de la prueba porque es necesario poseer una muestra que no presente un alto grado de reflexión difusa para poder ser analizada. La prueba pudo ser aplicada a muestras tratadas metalográficamente con papel de carburo de silicio con “grits” por encima de 1200.

Se obtuvo un Hartmangrama de referencia analizando

la imagen producida por un espejo plano comercial con pocas aberraciones ópticas y una planicidad muy alta y donde este es utilizado como referencia para establecer comparaciones en el momento de analizar las muestras desconocidas. Es importante señalar como una sana práctica metodológica, analizar un espejo de referencia justo antes de realizar nuevas medidas, para eliminar o disminuir las variables no sistemáticas como son la temperatura, densidad del aire, intensidad del LASER, etc.

Los Hartmangramas de varias muestras pulidas a calidad espejo se muestran en la Figura 6 junto al Hartmangrama de la muestra patrón o referencia, Figura 6A. Aquí se observa que si hay una diferencia apreciable en términos de la uniformidad de las imágenes, se puede inferir sin más análisis la presencia de aberraciones ópticas de magnitud apreciables entre las muestras preparadas y un proceso de pulido con sus inevitables deficiencias.

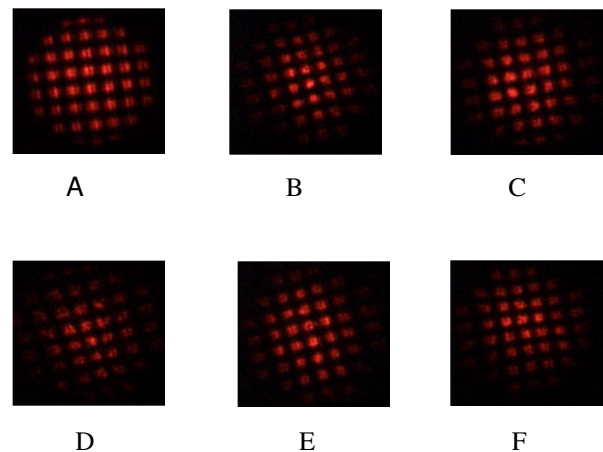


Figura 6. Hartmangramas del espejo de referencia y una serie de muestras pulidas a espejo.

En la Tabla 3 se presentan los valores de la intensidad media del Hartmangrama de referencia (espejo) y de las muestras pulidas a calidad espejo, donde claramente la intensidad promedio del espejo de referencia es mayor que la de las muestras, encontrándose que la diferencia varía entre un 8 % y un 24 %. Inmediatamente es posible concluir con certeza que la muestra C es la que presenta el mejor proceso de pulido en términos de su capacidad para reflejar la luz.

Si se observa con detenimiento la Figura 6 es sencillo concluir que la imagen de la muestra C (Figura 6C) es más nítida que la presentada por la muestra D (Figura 6D), pero establecer una

diferencia entre la muestra C y E se hace más difícil al hacerlo intuitivamente (a simple ojo). Para ello se observa que los resultados arrojados por el software AHsoftUC muestran una clara diferencia entre los resultados de ambas muestras, por lo tanto la prueba de Hartmann modificada permite llegar a conclusiones rápidas y precisas sobre la calidad en el acabado de superficies pulidas.

Tabla 3. Cálculos de la intensidad promedio para el espejo de referencia y una serie de muestras de Acero Inoxidable 316L.

Muestra	Intensidad Promedio (UA)	Desviación Cuadrática Media de la Intensidad	Desviación Porcentual (%)
Espejo	58,81	15,72	0
B	50,19	20,55	14,66
C	53,96	17,30	8,24
D	44,85	22,94	23,73
E	51,40	18,35	12,61
F	49,97	22,83	15,03

Adicionalmente en la Tabla 3 se muestran los valores de la desviación cuadrática media que puede ser interpretada como la homogeneidad de la reflexión sobre la superficie, revelándose información directa y valiosa sobre cuan uniforme fue el proceso de pulido de cada una de las muestras. El valor de 15,719 en la desviación cuadrática media de la referencia es mucho menor que el valor de la desviación cuadrática media de las muestras, las cuales variaron entre 17, 295 y 22,934.

Como era de esperarse, las muestras mejor pulidas (con mayor intensidad promedio) también presentan una superficie reflectora más homogénea a aquellas que presentaron una intensidad promedio menor.

Como se ha discutido anteriormente, esta prueba óptica ha mostrado ser sensible a la calidad de pulido y a las aberraciones en el proceso de obtención de superficies planas y pulidas, proporcionándonos una potencial aplicación de la prueba en procesos industriales en donde es necesario obtener una certificación de planicidad y textura de las superficies a preparar.

Por medio de la observación directa de los Hartmagramas mostrados en la figura 6 es posible inferir inmediatamente sobre la calidad de la preparación de la superficie, de esta manera se venía

realizando la prueba de Hartmann clásica a sistemas ópticos. En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología y un software que permite la eliminación de la subjetividad de la prueba al obtener valores cuantificables y reproducibles de la calidad de preparación de superficies.

5. CONCLUSIONES

La modificación de la prueba de Hartmann presentada permite ampliar las aplicaciones de la misma en otros procesos industriales distintos al de la óptica. Fue posible establecer parámetros cuantitativos para hacer el análisis de los Hartmagramas utilizando el software AHsoftUC eliminando con ello, el componente subjetivo de la prueba. Las muestras de acero inoxidable 316L se pueden pulir a valores por debajo del 10 % al comparar su proceso de pulido final al de un espejo comercial.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Malacara D, Ghozeil I. “*Hartmann and Other Screen Test*” En: Malacara D (ed), *Optical Shop Testing* 2nd Ed. New York (EE.UU): Wiley-Interscience., 1991, p.67.
- [2] Zverev V, Rodionov S, Sokol'skii M, Usoskin V, Sov. J. Opt. Technol 1977; **44**:127-129.
- [3] Geary JM, *Introduction To Wavefront Sensors*, 1st Ed, Londres (Inglaterra), Spie Press., 1995, Cap1.
- [4] Born M, Wolf E, *Principles of Optics*. 7ma Ed, New York (EE.UU), Pergamon Press., 1980, Cap 7.
- [5] Yang H, Lee Y, Song J, Lee I, *Optics Express* 2005; **13**(6): 1839-1847.