

IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO DE UN MÉTODO HOLOGRÁFICO DIGITAL PARA LA DETERMINACIÓN DE SUPERFICIES DE NIVEL

Leandro Bertoluzzi¹, Mario Pablo Spector², Sonia P. Brühl³, Fabio Miguel Vincitorio¹

¹ GIF-Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional
Almafuerte 1033 - Paraná, Entre Ríos, Argentina.

² Lab. de Materiales, Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional
Almafuerte 1033 - Paraná, Entre Ríos, Argentina.

³ GIS-Facultad Regional Concepción del Uruguay Universidad Tecnológica Nacional
Ingeniero Pereira 676 - Concepción del Uruguay - Entre Ríos - Argentina.

¹ fisicaelectronica@frp.utn.edu.ar

² somitor@arnet.com.ar

³ sonia@frcu.utn.edu.ar

Abstract— Stainless steel is widely used in the chemical, medical, food, automotive, hydraulic, oil and gas industries. This metal presents good resistance to wear and corrosion. Their properties depend essentially on the surfaces, which are exposed to wear, friction, corrosion and combined phenomena.

To improve the surface properties without affecting the mass properties, plasma-assisted techniques such as ionic nitriding can be used. These techniques are constantly evolving, so in the research processes it is necessary to have characterization tools. Among the most used are confocal microscopy, electron microscopy, optical surface analysis, etc.

This paper presents the development of an alternative characterization technique based on the use of digital holography for the study of surfaces attacked by different methods. The developed technique consists of an adaptation of conventional techniques in which the optical scheme has been changed.

The results show the possibility of evaluating the state of the surfaces after it was attacked by different methods, even obtaining scale models printed with 3d technology. However, problems are reported with the quantification of the measurements due to the impossibility of determining all the parameters of the test.

Resumen— Los aceros inoxidables son usados ampliamente en la industria química, médica, alimenticia, automotriz hidráulica, de petróleo y gas, donde se requiere buena resistencia al desgaste y a la corrosión. Sus propiedades dependen esencialmente de las superficies, las cuales están expuestas a fenómenos de desgaste, fricción, corrosión y fenómenos combinados.

Para mejorar las propiedades superficiales, sin afectar las propiedades másicas se pueden utilizar técnicas asistidas por plasma de modificación superficial como la nitruración iónica. Estas técnicas se encuentran en permanente evolución por lo que en los procesos de investigación es necesario contar con herramientas de caracterización. Entre los más usados se encuentran la microcopia confocal, la microscopia electrónica, los análisis ópticos de superficie etc.

En este trabajo se presenta el desarrollo de una técnica alternativa de caracterización basada en la utilización de la holografía interferométrica digital para el estudio de

superficies atacadas por diferentes métodos. La técnica desarrollada consiste en una adaptación de técnicas convencionales en las que se ha cambiado tanto el esquema óptico como los algoritmos de procesamiento.

Los resultados muestran la capacidad de evaluar el estado de las superficies luego de haber sido atacada por diferentes métodos incluso obteniéndose modelos a escala impresos con tecnología 3d. Sin embargo se reportan problemas con la cuantificación de las mediciones ante la imposibilidad de determinar todos los parámetros del ensayo.

I. INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidables son hoy uno de los materiales de mayor utilización en las diferentes aplicaciones industriales. Desde la industria química hasta los implantes biomédicos estos materiales constituyen uno de los principales insumos. Sin embargo, como todos los materiales presentan limitaciones en su utilización cuando las condiciones de uso pueden dar origen a problemas sobre la superficie. En algunos casos con consecuencias directas sobre la salud de las personas [1].

Para mejorar las propiedades superficiales actualmente se aplican e investigan diferentes métodos de mejorar la resistencia al desgaste y a la corrosión, ya sea por métodos de difusión, recubrimientos o la combinación de ambos. Entre los procesos más versátiles y ambientalmente amigables se encuentran las técnicas asistidas por plasma, como la nitruración iónica, los recubrimientos PVD y CVD, entre otras [2-3]. Para caracterizar la topografía de la superficie tratada, rayada o ensayada en desgaste y/o

corrosión se utilizan diferentes métodos como la perfilometría mecánica, la microscopía óptica, electrónica y confocal, y métodos de perfilometría óptica como la Interferometría de Luz Blanca (WLI) [4].

Como método alternativo se presenta en este artículo la H.I.D. (holografía interferométrica digital) la que permite entre otras posibilidades el estudio de la presencia de tensiones superficiales, la detección de fracturas en los metales [5], la obtención de los coeficientes de dilatación o la determinación de las superficies de nivel debido al desgaste de los materiales.

En este artículo se presenta un breve resumen de los métodos holográficos tradicionales para la caracterización de las superficies, indicándose las limitaciones encontradas en la implementación de cada uno de estos y una alternativa de solución. Como objetos de estudio se usaron muestras de acero inoxidable cuyas superficies fueron atacadas mediante diferentes procedimientos.

Si bien existen diferentes métodos para la implementación de estos ensayos, en este trabajo se muestran los resultados derivados de la implementación de los métodos clásicos.

II. MÉTODOS DE HID

En la actualidad se reportan diferentes métodos para el estudio de superficies de nivel, sin embargo en general son evoluciones de los tres métodos fundamentales reportados en la bibliografía clásica ya sea mediante HI (Holografía Interferométrica) o por HID [6-7]. Cada uno de estos con características particulares desde el punto de vista del procedimiento de realización y del esquema óptico aplicado. La dificultad en la implementación de métodos más modernos surge en gran medida de la limitación en la disponibilidad de los equipamientos, tales como desplazadores nanométricos.

A. Determinación de superficies de nivel por doble longitud de onda

Este método fue desarrollado por Hains y Hildebrand en los años 1965 y 1966 para HI y aplicado con modificación para HID. Básicamente el método se basa en la utilización de dos fuentes de luz de alta coherencia con diferentes longitudes de onda. Además el sistema óptico de montaje debe contemplar un alineamiento de los componentes conocido como sistema óptico "telecéntrico" (Fig. 2) arreglo totalmente

compatible con el esquema óptico y el algoritmo de reconstrucción de Fourier sin lentes [7]. Este no solo contempla particularidades de procesamiento sino que también de montaje del sistema óptico, el que debe ser definido de manera que el frente de onda del haz de referencia, debe ser generado por una fuente puntual ubicada en el mismo plano que el haz del objeto. Así ambos frentes de onda presentan igual desarrollo esférico. De esta forma el frente de onda del haz de referencia queda definido por:

$$E_R = \frac{e^{-ki\sqrt{d^2+x^2+y^2}}}{\sqrt{d^2+x^2+y^2}} \approx \frac{1}{d} e^{ikd} e^{-\frac{i\pi}{\lambda d}(x^2+y^2)} \quad (1)$$

De esto, la formula de reconstrucción viene dada por:

$$I(\xi, \eta) = C e^{i\frac{\pi}{\lambda d}(\xi^2+\eta^2)} \mathcal{F}^{-1}\{h(x, y)\} \quad (2)$$

Donde c es una constante compleja. El factor de fase esférica;

$$e^{-\frac{i\pi}{\lambda d}(x^2+y^2)}$$

es eliminado a partir de considerar un frente de onda esférico de referencia con igual curvatura, tal como se muestra en la (Fig. 1).

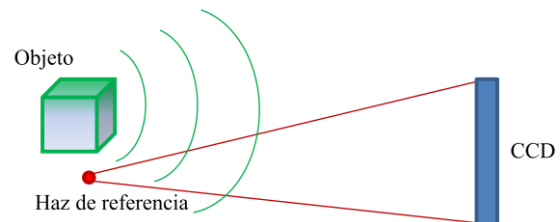


Fig.1. Esquema óptico fundamental para la obtención del holograma de Fourier sin lentes, con eliminación del factor de fase esférica.

El procedimiento contempla la obtención de dos diferentes hologramas, en HID dos matrices imágenes diferentes, cada una obtenida mediante la exposición del objeto a sendas longitudes de onda. En el procedimiento de reconstrucción digital de las imágenes, se separa la imagen de amplitud de la de fase luego de realizar la FFT de cada una de las matrices imagen [8].

La fase relativa, correspondiente a cada uno de los frentes de onda, provenientes del objeto en cada uno de sus estados, queda definida por el argumento de la imagen reconstruida;

$$\varphi_1(\xi, \eta) = \arctang \frac{\text{Im} I_1(\xi, \eta)}{\text{Re} I_1(\xi, \eta)}$$

$$\varphi_2(\xi, \eta) = \arctang \frac{\text{Im} I_2(\xi, \eta)}{\text{Re} I_2(\xi, \eta)} \quad (3)$$

Donde la función arco tangente, que define el argumento de una función de variable compleja, nos entrega un dominio acotado que van de $-\pi/2$ a $\pi/2$. Cada franja determina un salto a una indeterminación propia de la función en $\pi/2$.

Para poder obtener una definición en la diferencia de fase más allá de los límites de la función. La diferencia de fase resultante de la interferencia entre ambos frentes, puede ser calculada en forma directa mediante la resta de las fases relativas.

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad \text{cuando } \varphi_1 > \varphi_2 \quad (4)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi \quad \text{cuando } \varphi_2 > \varphi_1$$

Las imágenes de fase resultantes son combinadas para obtener el interferograma digital y su posterior representación mediante un esquema de fase demodulada. Las franjas resultantes representan una diferencia de fase que se relaciona con las diferencias de nivel en la superficie del objeto bajo estudio.

La Ec. 5. define la relación en diferencia de longitud de onda y la diferencia de nivel.

$$\Delta z = \frac{z(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1} \quad (5)$$

En esta debe notarse que la apreciación del método depende directamente de la diferencia de longitudes de onda por lo que para registrar niveles micrométricos se deberá contar con dos láseres de longitudes de onda muy cercanas, o bien con un láser sintonizable de alta selectividad.

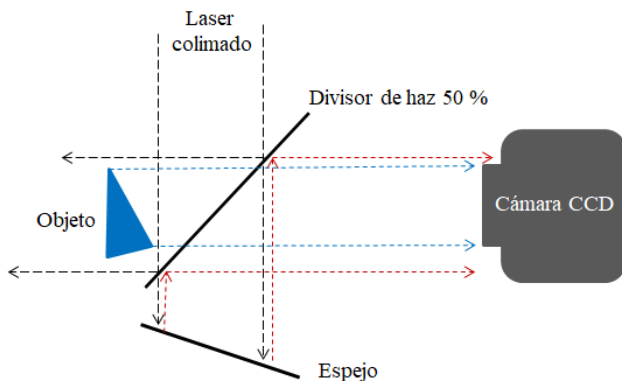


Fig.2. Esquema óptico telecéntrico para la captura de HID por el método de la doble longitud de onda.

B. *Determinación de superficies de nivel por el método del desplazamiento lateral.*

Un segundo método para la determinación de superficies de nivel se encuentra profusamente documentado [9]. Este consiste en montar un esquema óptico similar al mostrado en la Fig. 2, pero introduciendo libertad de movimiento lateral al haz del objeto. El interferograma se obtiene mediante la captura de dos imágenes diferentes, la primera con el haz del objeto en la posición S y la segunda con el haz del objeto en la posición S'. El desplazamiento lateral introducido cambia el camino óptico generando diferencias de fase dependientes de la superficie del objeto. Matemáticamente las diferencias de nivel quedan definidas por la Ec. 6.

$$\Delta z = \frac{\lambda}{\text{sen}(\theta)\text{sen}(\Delta\theta)} \quad (6)$$

donde θ es el ángulo entre el haz del objeto y la normal al plano del objeto. Mientras que $\Delta\theta$ es el cambio angular producido por el desplazamiento del haz del objeto.

C. *Determinación de superficies de nivel por el método del cambio en el índice de refracción*

Un tercer método, tal vez el menos documentado, consiste en introducir un cambio en el índice de refracción del medio [10-11]. Esto se logra cambiando los gases del ambiente en el que se encuentra el objeto o sumergiendo el objeto en una solución a la que se le pueda variar el índice de refracción. Mediante esta técnica se reportan mediciones entre $1 \mu\text{m}$ y $300 \mu\text{m}$, cuando se utilizan líquidos de índice de refracción muy cercanos. Nuevamente, el sistema óptico debe ser del tipo telecéntrico y matemáticamente las superficies de nivel quedan definidas por:

$$\Delta z = \frac{\lambda_0}{2|n_1 - n_2|} \quad (7)$$

Ecuación válida únicamente cuando los ángulos del objeto y de referencia, con la normal al plano del objeto, son cercanos a cero.

Esquemáticamente el montaje óptico puede observarse en la (Fig. 3), donde el objeto se encuentra sumergido en una solución líquida.

III. OBJETOS DE ESTUDIO

En este trabajo se presentan los resultados del estudio de superficies ensayadas al desgaste. Muestras de acero inoxidable AISI 316L fueron nitruradas por plasma en un equipo experimental, en las condiciones tales de obtener una capa de 6-7 micrones de auserita expandida por nitrógeno y

dureza de 700 HV. Estas probetas fueron ensayadas en desgaste abrasivo, siguiendo el método descrito por la norma ASTM G65 [S7].

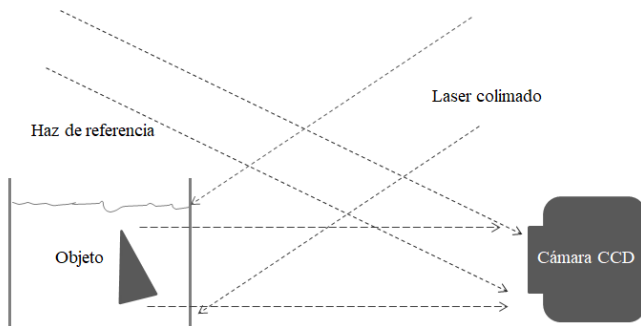


Fig.3. Esquema óptico aplicado en la determinación de superficies de nivel por el método de doble índice de refracción. El esquema es válido para ángulos muy pequeños (sistema telecéntrico).

El daño por desgaste se cuantifica a partir de la pérdida de masa, pero es importante también estudiar la topografía de la huella y su profundidad para calificar el resultado del ensayo y garantizar su trazabilidad. El tamaño y forma de la parte dañada hace que su análisis se escape de la perfilometría mecánica lineal por su complejidad y de la óptica por su tamaño, pues la huella de desgaste mide aproximadamente 25 mm x 12 mm. Por esta razón, el uso de las técnicas de HID resultó una alternativa viable.

IV. RESULTADOS

Para el estudio de las muestras definidas en el apartado anterior, se implementó como primer método de evaluación la técnica de doble longitud de onda. Para ello se montaron en un arreglo telecéntrico y colineal, dos láseres, uno de He-Ne de 632,8 nm de Melles Griot de 17,5 mW de polarización aleatoria y un segundo láser de semiconductor de 639 nm, Coherent StingRay, de 36 mW. El primer holograma se capturó con el láser de He-Ne con una cámara Moticam de 5 MPix, obteniéndose la imagen esperada. Sin embargo cuando se intentó la captura con el láser de semiconductor, el resultado fue una imagen de muy baja definición. Evidentemente la longitud de coherencia de este segundo láser resulta insuficiente con un medio de registro de baja resolución como lo es una cámara CMOS. De esta forma se hizo evidente la imposibilidad de aplicación del método de la doble longitud de onda.

El segundo tipo de ensayo aplicado se sustentó en el modelo del desplazamiento lateral o desplazamiento de fase [13]. Se montó el sistema

telecéntrico con la posibilidad de desplazamiento del filtro espacial usado para la iluminación del objeto. Este elemento se montó sobre una mesa de traslado micrométrica con capacidad de 15 mm de recorrido. De acuerdo con la Ec. (4) para poder visualizar diferencias de nivel comprendidas entre los 10 μm y los 200 μm , el desplazamiento lateral introducido debería haberse encontrado entre los 9 mm y los 15 mm. Se realizaron diferentes ensayos pero en general se encontró una pérdida total de correlación entre las imágenes de fase, por lo que el resultado de los interferogramas resultó nulo. Este resultado es coincidente con lo documentado por otros autores, los que asignan un rango de medición en el orden de los milímetros [12]. Existen métodos alternativos, más complejos desde el punto de vista de su implementación que permitirían alcanzar la precisión necesaria y sobre los que se está trabajando.

El tercer método, el de doble índice de refracción, se implementó mediante el esquema óptico sugerido en la bibliografía de referencia. De los tres métodos es el que sería el más apropiado debido al rango de medición deseado [6,11]. Para su implementación se sumergió el objeto en una solución de alcohol y agua con la posibilidad de variar los niveles de concentración. En el esquema óptico se usó un recipiente tipo "pecera" usando una de las caras planas paralelas a la superficie a estudiar. Esta cara se alineó con la cámara CMOS usando un arreglo similar al de la Fig. 2. Los ángulos de incidencia y de reflexión para el haz del objeto se fijaron 82° respecto al plano de la cara del recipiente expuesta al láser y que resultara paralela a la abertura de la cámara. La cámara se situó a 32 cm del recipiente, distancia necesaria para la obtención de una imagen bien definida en el arreglo de HID de Fourier sin lentes. En este esquema óptico los radios de curvatura de los frentes de onda provenientes del objeto y del haz de referencia deberían haber sido aproximadamente iguales [8].

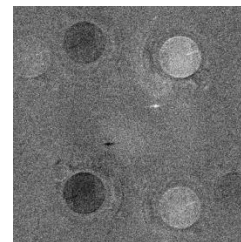


Fig.4 Imagen de fase resultante (sin filtrado espacial) de una de las muestras de referencia, en la que se observan las imágenes reales y virtuales y del primer armónico (objeto sumergido en el tanque).

Con este formato se intentaron sucesivos ensayos que en todos los casos dieron imágenes de muy baja definición y sin la obtención de interferogramas. Se intentaron sucesivas mejoras en las condiciones de iluminación mediante el cambio de los niveles de intensidad de los haces del objeto y de referencia. Además, se intentó variar levemente los ángulos. Sin embargo, la luz dispersada por la primera cara del recipiente afectó en todos los casos la imagen resultante (como hipótesis fundamental ante la falta de resultados). Otras causas fueron consideradas, entre ellas la posibilidad de una mezcla no homogénea en la solución. Ante esto, diferentes intentos con diferentes esquemas y metodologías fueron ensayados. Sin embargo su explicación excede los alcances de este trabajo.

Dada la imposibilidad de obtener imágenes con una definición suficiente que permitiera la obtención los interferogramas de fase, se procedió a modificar el esquema óptico de manera de evitar la existencia de luz dispersada desde el recipiente (hipótesis fundamental).

Para esto se modificó el esquema óptico de manera que el ingreso de la luz se produjera desde la superficie del líquido de inmersión y no a través de la interfaz que representa el vidrio del contenedor.

Para este montaje óptico se utilizaron diferentes componentes, entre ellos un divisor de haz que permitiera el montaje telecéntrico de los haces del objeto y del de referencia. En la (Fig. 5) se muestra en una fotografía el montaje óptico aplicado.

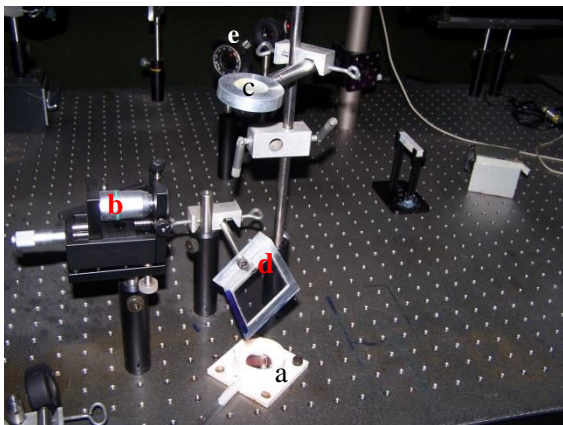


Fig. 5. Montaje alternativo donde se aprecian los componentes ópticos utilizados en un montaje telecéntrico horizontal con iluminación vertical del objeto. En la figura (a) objeto dentro de la cuba, (b) filtro espacial, (c) espejo esférico, (d) divisor de haz, (e) polarizadores para la regulación de la intensidad del haz de referencia.

Una vez montado el sistema se procedió a evaluar los valores de diferenciación del índice de refracción para poder obtener resultados en los niveles (10 μm a 50 μm). Se analizaron sucesivas combinaciones y se realizaron diferentes ensayos. Sin embargo los resultados no eran convincentes ya que si bien se presentaban franjas de interferencia estas no correspondían con lo esperado. Un análisis del esquema mediante una técnica indirecta de Speckle Dinámico [12] mostró un alto grado de movilidad en la superficie del líquido. De lo medido se estableció que la superficie del líquido se encontraba en permanente movimiento debido a pequeñas variaciones de presión y vibraciones.

Realizado un análisis de vibrometría holográfica, técnica implementada mediante tiempos de exposición prolongados que permitieran obtener sobre el holograma los modos de vibración [14], se dedujo que la frecuencia de oscilación era elevada respecto de la velocidad de captura de la cámara Moticam (2,1 fps) y que debería usarse una cámara con una velocidad de captura de al menos 50 fps.

Adquirida una cámara Point Grey Blackfly monocromática de 75 fps y 5 Mpix, se procedió a la repetición de los ensayos usando líquidos de alta viscosidad como el aceite vegetal y la vaselina. Además se determinó que la combinación de estos dos elementos debería generar un cambio de índice de refracción tal que permitiera determinar las diferencias de nivel en la muestra.

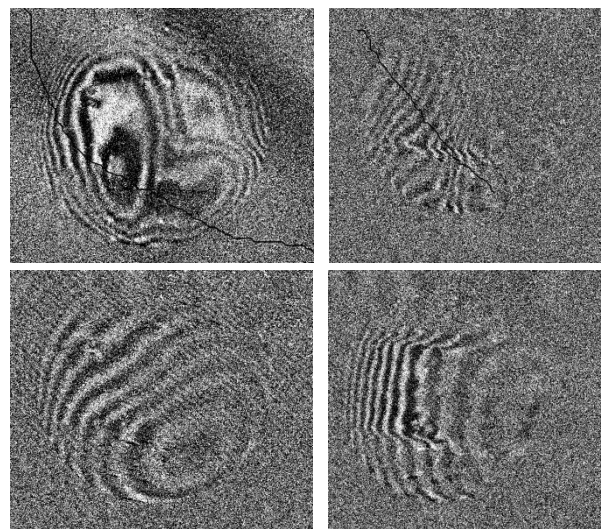
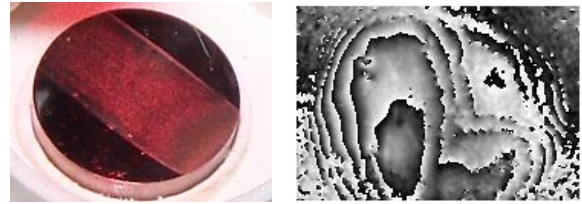


Fig. 6. Secuencia de imágenes interferométricas correspondientes a diferentes muestras obtenidas mediante superposición de hologramas obtenidos con aceite vegetal (primer holograma) y con una mezcla al 50% en volumen de aceite y vaselina ($n = 1.47$ y $n = 1.521$).

Aplicadas las compensaciones necesarias los resultados obtenidos pueden verse en la Fig. 6. en la que se muestra una secuencia de interferogramas obtenidos con cambios en el índice de refracción.



A. Resultados obtenidos del análisis de una muestra atacada mecánicamente

Tal como se describió anteriormente, uno de los tipos de muestra a ser analizadas luego del proceso de ataque corresponde a muestras atacadas mecánicamente. Aplicando el ensayo descrito precedentemente se procedió con el estudio variando las concentraciones de la solución de aceite y vaselina. En todos los casos se tomó como referencia aceite vegetal en la primera imagen. Luego de la obtención del interferograma se procedió al filtrado de las imágenes y su posterior demodulación de fase. Estos diagramas permiten observar cortes o vistas tridimensionales de la superficie de la muestra.

En la (Fig. 7) se puede observar el resultado del estudio sobre el total de la superficie.

El resultado muestra claramente como el proceso de abrasión mecánico introduce diferentes niveles de profundidad en la muestra. Para obtener un mejor detalle del proceso de ataque se puede configurar el diagrama de fase demodulada de manera de obtener un corte transversal de la muestra, tal como se ve en la (Fig. 8).

Tal como se puede observar en los resultados, diferentes concentraciones de vaselina en solución con aceite permitieron obtener diferentes grados de apreciación o detalle sobre la superficie. Cuanto más alto es el contenido de vaselina más grande será la diferencia en el índice de refracción y por lo tanto mayor es el “aumento” obtenido en la determinación de las superficies de nivel.

B. Resultados obtenidos del análisis de una muestra atacada químicamente.

A diferencia del ataque mecánico, el ataque químico deja sobre la superficie un acabado que a simple vista es totalmente uniforme. Sin embargo es de esperar que existan diferencias de nivel sobre la muestra. Aplicando el mismo método se procedió a estudiar las muestras correspondientes cuyos resultados pueden verse en la (Fig. 9).

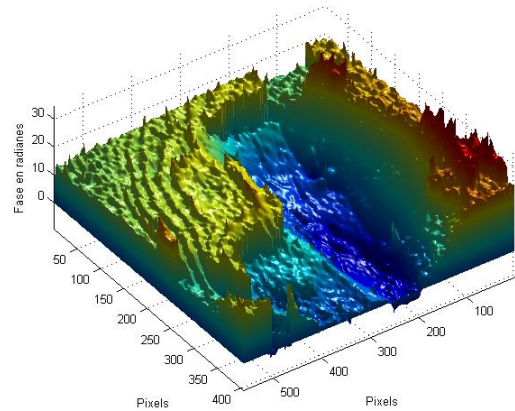


Fig. 7. Muestra analizada, interferograma resultante luego de la aplicación de un filtrado seno coseno con 13 iteraciones y diagrama de fase demodulada.

Como puede verse el ataque químico también introduce diferencias de nivel sobre las muestras. Es evidente que la superficie resultante presenta niveles cuya distribución es menos predecible respecto a los resultados obtenidos del surco introducido en el ataque mecánico.

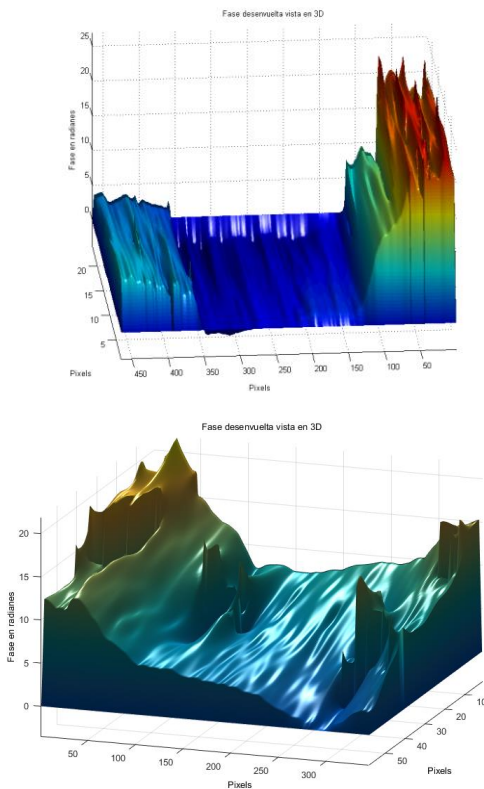


Fig. 8. Diagramas de fase demodulada correspondientes a cortes transversales de la superficie, obtenidos para una mezcla al 25 % y al 50 % en volumen para el segundo holograma (referencia en aceite vegetal).

V. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Es evidente que de los diagramas de fase demodulada es posible obtener información e incluso una visualización detallada respecto del estado final de las superficies luego de los procedimientos de ataque.

Claramente son observables los niveles con un alto grado de magnificación. Todos estos resultados fueron comparados con los resultados

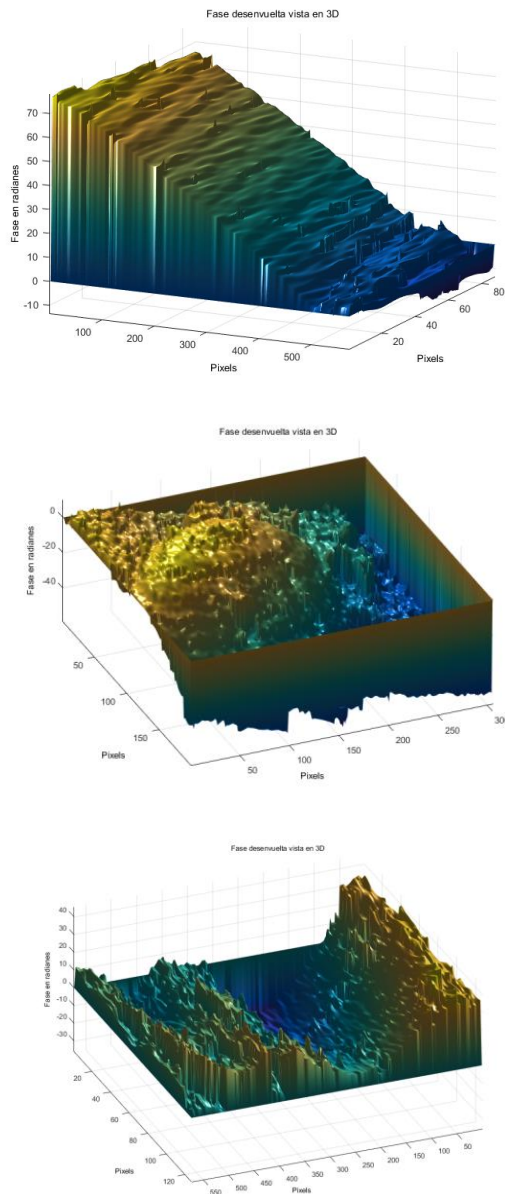


Fig. 9. Diagramas de fase demodulada correspondientes a diferentes cortes transversales de la superficie, obtenidos para una mezcla al 25 % (primera) y al 50 % en volumen (gráficos subsiguientes), correspondientes a tres muestras diferentes.

obtenidos mediante un perfilómetro de superficies y microscopía electrónica, encontrándose coincidencias en cada una de las muestras analizadas. Sin embargo, no es posible la

cuantificación exacta de los niveles dado que se desconoce el valor del índice de refracción para las diferentes concentraciones de vaselina y aceite vegetal. Así, la única medida cuantificable es la relación de los componentes en volumen y la suposición que el índice de refracción resultante se encontraría dentro de una banda de valores acotada por los extremos de cada uno de estos. Para poder avanzar en la medición sería necesario contar con un refractómetro de 4 cifras significativas, instrumento con el que no se cuenta al momento de la elaboración de este trabajo. Sin embargo, es posible saber que la relación entre los valores obtenidos de diferencia de nivel en radianes y lo estimado según los valores de los índices de refracción conocidos, permitiría definir coincidencias por lo menos en el rango de valores a los que han sido realizados los experimentos.

VI. CONCLUSIONES

Si bien no se ha logrado realizar mediciones de las diferencias de nivel, se han podido definir diferencias de fase entre puntos de las muestras. Estas diferencias de fase claramente permitieron obtener perfiles coincidentes en su topología con los obtenidos por otros métodos de medición.

En todo proceso de ensayo no destructivo por HID lo primero que se obtiene es información cualitativa, la cuantificación es un paso posterior que no en todos los casos es posible obtener. Sin embargo, a partir de los resultados documentados en este trabajo se puede concluir que hay una posibilidad cierta de avanzar sobre la caracterización de la topografía superficial con una apreciación que podría llegar a ser sub-micrométrica. Falta, por lo tanto, el desarrollo o la obtención de un instrumento de precisión que permita cuantificar el índice de refracción.

Respecto del esquema óptico alternativo presentado en este artículo y la técnica holográfica utilizada, se puede confirmar la viabilidad de su aplicación, y que su única limitación es la necesidad de utilizar cámaras de alta velocidad de captura.

Por último, ya están en curso ensayos para convertir los diagramas de fase obtenidos a objetos físicamente reproducibles mediante la impresión tridimensional.

AGRADECIMIENTOS

A los estudiantes Emanuel Gómez Arn y Flurina Suri.

REFERENCES

- [1] Spector, Mario Peretti, Leandro Salas, Francisco Romero, Gustavo Iglesias, Luciano. Bacterial Conduction in Prosthesis. *Procedia Materials Science*. 8. 10.1016/j.mspro.2015.04.084. (2015).
- [2] Eric J. Mittemeijer, Marcel A. J. Somers, Eds., “*Thermochemical Surface Engineering of Steels: Improving Materials Performance*”, Woodhead.
- [3] P. K. Chu, "Plasma surface engineering of biomaterials," *2014 IEEE 41st International Conference on Plasma Sciences (ICOPS) held with 2014 IEEE International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS)*, Washington, DC, 2014, pp. 1-1.
- [4] Eugenia L. Dalibón, Daniel Heim, Christian Forsich, Andreas Rosenkranz, M. Agustina Guitar, Sonia P. Brühl, “Characterization of thick and soft DLC coatings deposited on plasma nitrided austenitic stainless steel”, *Diamond and Related Materials*, vol. 59 pp. 73-79, 2015.
- [5] F. M. Vincitorio, N. Budini, C. Mulone, C. Freyre, M. Spector, A. J. Lopez Diaz, A. Ramil Rego, A. Yañez Casal. Holographic interferometry as a method to detect welding failures on ribbed iron structures.
- [6] Optical Holography principles, techniques, and applications. P Hariharan. Cambridge University Press. Second Edition 1996.
- [7] Digital Holography. Ulf Schnars, Werner Jueptner . Springer, first edition, 2005.
- [8] F.M. Vincitorio, Desarrollo de la reconstrucción digital de imágenes holográficas para su aplicación a ensayos no destructivos, in: Tesis, Universidade da Coruña, 2014 <http://hdl.handle.net/2183/13884>.
- [9] Ubaldo Uribe López, María del Socorro Hernández-Montes, Silvino Muñoz Solís, Digital Holographic Interferometry as a tool to obtain shapes. SPECKLE 2015: VI International Conference on Speckle Metrology, edited by Fernando Mendoza Santoyo, Eugenio R. Proc. of SPIE Vol. 9660, 96600G · © 2015 SPIE · CCC code: 0277-786X/15/\$18 · doi: 10.1117/12.2195736.
- [10] Xiao-ou Cai, Feng-jun Hu, Hui Wang. Three-dimensional shape measurement based on dual refractive index digital holography. *Optics Communications* 350 (2015) 252–256.
- [11] Jose Luis Valin Rivera, J. M. Monteiro, H. M. Lopes, M. A. P. Vaz, Francisco Palaciase, Edison Goç Alves, Gilberto Garcia del Pino, Jorge Ricardo Pérez. Proposal for underwater structural analysis using the techniques of ESPI and digital holography. *Optics and Lasers in Engineering*. 47 (2009) 1139 – 1144.
- [12] Ubaldo Uribe López, María del Socorro Hernández Montes, Silvio Muñoz Solís. Digital holographic interferometry as a tool to obtain shapes. *Speckle 2015*. Proc. Of SPIE Vol. 9660.
- [13] Ichirou Yamaguchi, Jun-Ichi Kato, Hirokazu Matsuzaki. Measurement of surface shape and deformation by phase-shifting image digital holography. *Optical engineering* 42(5) 1267-1271 Mayo de 2003.
- [14] Aarnisalo, Antti A; Cheng, Jeffrey T; Ravicz, Michael E; Furlong, Cosme; Merchant, Saamil N; Rosowski, John J. Motion of the tympanic membrane after cartilage tympanoplasty determined by stroboscopic holography. *Hearing Research*. Volume 263, Issues 1–2, May 2010, Pages 78-84.