

## Metodología ad hoc para la observación de superficies de desgaste y fractura

### Ad hoc methodology for observation wear and fracture surfaces

Maximiliano Zanin<sup>1,2,3</sup>, Nicolás Urbano Pintos<sup>2</sup>,  
Nelson Alvarez Villar<sup>2</sup>, Walter Tuckart<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa – CITEDEF. San Juan Bautista de la Salle 4397, Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina, e-mail: mzanin@citedef.gob.ar

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, Paris 532, Haedo, Buenos Aires, Argentina  
e-mail: urbano.nicolas@gmail.com - nalvarezvillar@citedef.gob.ar

<sup>3</sup> Laboratorio de ensayos de materiales, Universidad Nacional del sur, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.  
e-mail: wtuckart@uns.edu.ar

---

#### RESUMEN

En el presente trabajo, se presenta una metodología de análisis y medición microscópica de superficies de desgaste, a partir de imágenes confeccionadas con técnicas de procesamientos digitales tipo stitching y stacking. Las imágenes se obtienen a partir de un sistema de observación microscópica ad-hoc y de bajo costo, compuesto por módulos de posicionamiento de muestras y enfoque-elevación con resolución micrométrica.

El objetivo del trabajo es reunir la mayor cantidad de información en una única imagen. La creación de documentación fotográfica permanentes tiene la ventaja de analizar una superficie sin peligro de manipular una muestra.

Se observó que la metodología utilizada ha sido satisfactoria para la determinación de características superficiales y mediciones para cálculo de tasa de desgaste en ensayos block on ring, como también para algunos análisis de fractura.

**Palabras clave:** microscopía, stitching, stacking, superficies, desgaste.

---

#### ABSTRACT

In the present work, a methodology of microscopic analysis and measurement of wear surfaces is presented, based on images made using digital processing techniques such as stitching and stacking. The images are obtained from an ad-hoc and low-cost microscopic observation system, consisting of sample positioning and focus-elevation modules with micrometric resolution.

The objective of the work is to gather as much information in a single image. The creation of permanent photographic documentation has the advantage of analyzing a surface without danger of manipulating a sample.

It was observed that the methodology used was satisfactory for the determination of surface characteristics and measurements for calculation of wear rate in block on ring tests, as well as for some fracture analysis.

**Keywords:** Microscopy, stitching, stacking, surfaces, wear..

---

#### 1. INTRODUCCIÓN

En las investigaciones de fallas mecánicas donde el desgaste es la causa primaria, inevitablemente se requiere un análisis inicial de la superficie y en oportunidades preferentemente in situ.

Es de uso común asociar el término una falla como fractura o daño, y a su vez este último puede encontrarse como corrosión, fatiga, impacto, sobrecarga y/o desgaste. Todas las evidencias de daño pueden observarse en gran medida a escala macroscópica, salvo algunas características de las superficies de fractura por fatiga que es usualmente analizada a nivel microscópico.

Durante la inspección visual de una tribosuperficie y con el objetivo de identificar los algunos meca-

nismos de desgaste, es conveniente registrar las evidencias tribológicas, evaluando las características de una superficie de desgaste por medio de la rugosidad, topografía o fotografías. Los detalles característicos de una tribosuperficie no siempre pueden observarse en su totalidad en una sola imagen con análisis fotográficos.

Las técnicas específicas utilizadas para realizar un análisis superficial dependen en primer lugar de una inspección visual que determine el origen más probable de la falla, y la importancia principal radica en llevar a cabo un examen y registro detallado de la muestra, en muchas ocasiones, preferiblemente in situ [1-4]. Posteriormente se complementa con análisis químicos o físicos realizados en laboratorio, evaluando materiales y simulando las condiciones de uso. En oportunidades se realiza una inspección visual inicial que determine una aproximación de las causas del origen, y posteriormente un análisis microscópico en laboratorio, para lo cual es necesario manipular o transportar la pieza desgastada. Durante el transporte, se deben tomar recaudos para no dañar o contaminar la superficie de la muestra. Para evitar alterar características se debe registrar toda la información posible en el lugar del fallo, ya que durante su manipulación y su posterior evaluación brinden información fallida.

En microscopía de barrido ambiental, se requiere una limpieza de impurezas volátiles, partículas de desgaste o incluso el metalizado de la superficie. Estas operaciones involucran modificaciones superficiales que se realizan cuando los sistemas de observación son complejos y pueden generar una modificación o pérdida de información.

Por otra parte, existen criterios de evaluación de desgaste que requieren de mediciones sobre una sola imagen fotográfica de calidad. En muchas oportunidades, una huella de desgaste podría no entrar completa en el cuadro de la imagen, para lo cual resulta necesario contar con todos los detalles superficiales en una sola imagen.

En el presente trabajo se propone una metodología de evaluación de superficies de desgaste por medio del procesamiento de imágenes digitales, adquiridas con un dispositivo elaborado con tecnología de bajo costo, transportable para observaciones in situ. La adquisición de imágenes se realiza con cámaras comerciales con magnificación microscópica. La metodología depende del procesamiento posterior de las fotografías adquiridas, el cual consiste en un solapamiento y apilado de las mismas, con el fin de reunir la mayor información de una superficie en una única imagen de mayor resolución, sin modificación de la muestra. La creación de documentos microfotográficos permanentes tiene la ventaja de utilizar la información, libre del peligro implícito a la manipulación continua de una muestra [5].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Dispositivo de Microscopía Ad Hoc

Se ha construido un dispositivo de observación microscópica y adquisición de imágenes con el objetivo de establecer una metodología de bajo costo y versátil, para obtener imágenes de diferentes superficies de desgaste. El mismo está compuesto mecánicamente por un módulo de desplazamiento de enfoque vertical, al que se le acoplaron lupas comerciales de diferentes características, y un módulo de soporte de muestras con movimientos XY.

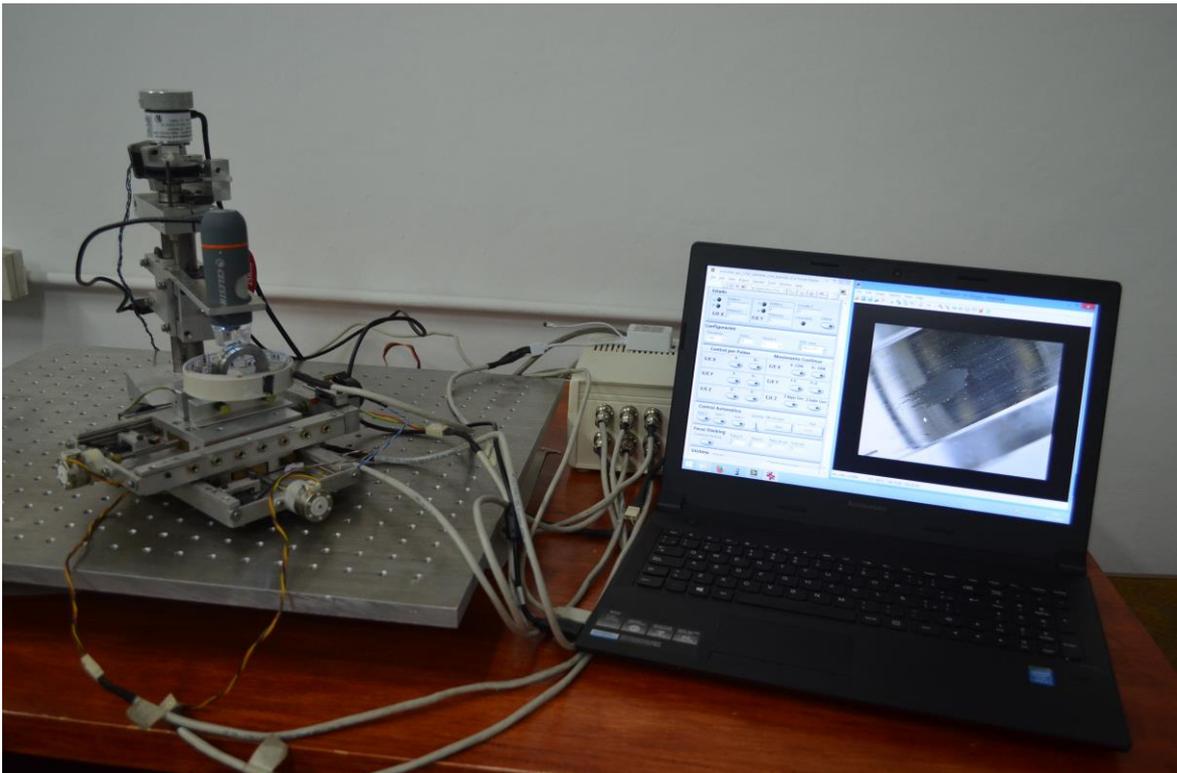
En la Figura 1 se puede observar una imagen del equipo completo con interfaz de control y notebook, para control de movimientos, adquisición y procesamiento de datos.

Los módulos de enfoque y soporte están independizados uno del otro para cualquier eventual ajuste o posicionamiento respecto de las muestras a analizar. Así se dispone de la posibilidad de utilizar el mecanismo de enfoque en superficies donde no es posible el transporte de la muestra para su análisis.

El módulo de soporte de muestras consta de un mecanismo de posicionamiento micrométrico planar XY, compuesto por dos plataformas individuales con movimientos lineales perpendiculares. El sistema posee además la posibilidad de intercambiar soportes para la utilización de microscopios o lupas digitales y un sistema de iluminación por medio de un array de leds regulable, de forma directa o indirecta.

Por otra parte, el módulo de desplazamiento vertical es utilizado principalmente para el enfoque de la cámara, y fue construido con una transmisión de movimientos semejante al movimiento de las plataformas XY. El mecanismo utiliza un motor paso a paso de  $1,8^\circ$  por paso, con mayor torque que los utilizados en el módulo de movimiento XY, para cualquier eventual esfuerzo por cambio de sistemas óptico de mayor volumen y peso. El motor se encuentra acoplado a una reducción corona-sin fin, con relación 90/1, para asegurar una resolución mayor a  $0,2 \mu\text{m}$  de desplazamiento vertical. El objetivo de obtener la mayor precisión posible entre imágenes adquiridas, es al fin de permitir aplicar técnicas de stacking (técnica explicada en la Sección 2.2), con el menor error posible en el desplazamiento en el eje Z, ya que máxima resolución es de  $0,2 \mu\text{m}$  en

las técnicas de microscopía óptica, limitadas por luz visible [1,2].



**Figura 1:** Vista general del equipo de observación microscópica, interfaz y PC.

## 2.2 Metodología y Técnicas de Procesamiento de imágenes.

La metodología elaborada para el procesamiento y evaluación de superficies de desgaste consta de dos etapas principales; adquisición y procesamiento digital de las imágenes, para las cuales se utilizaron software libre o versiones de prueba. Los mejores resultados se obtuvieron con el software MICAM 2.0 (Microscope Image Capture And Measurement) [6], aunque se han empleado otros. El software permite medir sobre la imagen, con una previa comparación con una cuadrícula patrón calibrada por medio de técnicas de Microscopía de Barrido Ambiental.

En la etapa de adquisición es necesario un equipamiento estable, para el soporte de las cámaras/microscopios y movimientos de precisión de la muestra, tal como se describió anteriormente. La captura de imágenes de las superficies a analizar se realizó través de microscopios digitales comerciales, marca Celestron, de magnificaciones y aumentos variables con conexión USB. En la Tabla 1 se describen algunas de las características principales de los microscopios digitales empleados.

**Tabla 1:** Características de los microscopios digitales utilizados.

Magnificación	Resolución	Relación de aspecto	Medida píxel
1000×	2 MPx	4:3	0,68 $\mu\text{m}$
10× 60×	5 MPx (QXGA)	4:3	1,69 $\mu\text{m}$
10× 60× 200×	1.3 MPx	4:3	0,80 $\mu\text{m}$

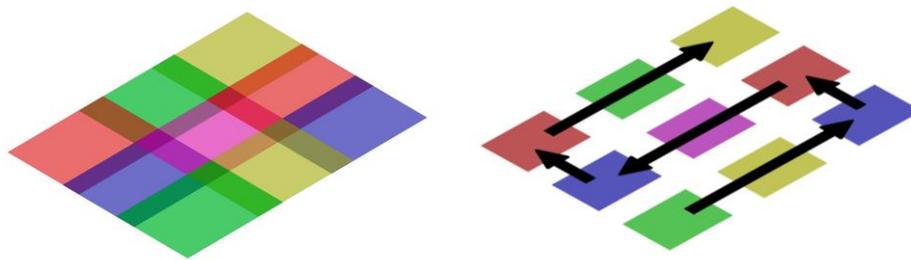
Las técnicas de procesamiento digital de imágenes empleadas utilizan la información dentro de las mismas, para hacer de ésta un elemento de análisis, tratando de compilar la información necesaria de la región a analizar.

Esta etapa, tanto para la caracterización de superficies de desgaste, y eventualmente análisis de superficies de fractura, consta de la aplicación y combinación de las técnicas de stitching y stacking. Estas técnicas permiten obtener una imagen final de calidad, sobre la cual se pueden realizar mediciones y evaluaciones

posteriores. El tipo de procesamiento a realizar depende exclusivamente de la secuencia de adquisición imágenes, por lo cual fue necesario prever un protocolo de capturas.

La técnica de stitching se trata de un proceso por el cual se combinan múltiples imágenes para producir una imagen de mayor resolución, normalmente mediante un programa computacional y consta de tres pasos principales: registro de imágenes, calibración y solapamiento o mezcla [7,8]. La composición de las imágenes con diferentes profundidades de campo se generará por medio de un procesamiento computacional posterior con diversos programas tales como: CombineZ, ZereneStacker, Picolay, entre otros.

Para la adquisición de imágenes necesarias para la aplicación de esta técnica, se programó un barrido, con una secuencia indicada en el esquema de la Figura 2. Las imágenes se capturan con la cámara, desplazándose en un eje por vez, logrando una secuencia de imágenes, que se irán superponiendo o solapando en cierto porcentaje, armando una cuadrilla de imágenes capturadas. La zona de superposición puede variar con la finalidad de lograr solapamientos confiables. Cada imagen adquirida debe estar superpuesta una sobre otra una porción de la misma, que asegure una mayor cantidad de puntos de referencia para facilitar el solapamiento y lograr una menor distorsión de la imagen.



**Figura 2:** Esquema del barrido propuesto para la adquisición de imágenes para la aplicación de la técnica de stitching.

Por otra parte, en microscopía óptica el problema común es el de obtener la mejor resolución posible en una sola imagen. Esto origina un problema al momento de observar superficies con diferencias de niveles importantes, donde sólo una parte de la misma está enfocada. Por este motivo se recurre a técnicas de stacking, la cual se trata de un procesamiento digital que combina varias imágenes tomadas en la misma posición, pero en diferentes distancias de enfoque, para dar una imagen resultante con una mayor profundidad de campo que cualquiera de las imágenes individuales. El stacking se puede utilizar en cualquier situación en la que las imágenes individuales tengan una profundidad de campo muy baja. Esta técnica permite la generación de imágenes, que con equipos normales sería físicamente imposible y es aplicable en regiones de enfoque no planas.

El punto de partida para el apilamiento de enfoque es una serie de imágenes capturadas en diferentes profundidades focales, tal como se muestra en el esquema de la Figura 3. Cada imagen individual se encontrará enfocada en diferentes planos y ninguna estará en su totalidad en foco. Colectivamente se tienen todos los datos necesarios para generar una imagen con todas las partes de la muestra en foco. Las regiones de enfoque de cada imagen se pueden detectar de forma automática, a través de la detección de bordes menos difusos, por análisis de Fourier, o por medio de una selección manual. Los parches de enfoque son luego mezclados juntos para generar la imagen final con la mayoría o en su totalidad en foco. Algunos autores [9] han empleado una variedad de enfoques algorítmicos para compaginar fotografías de microscopía óptica, y entre los más avanzados obtener un mapa de la topografía superficial.



**Figura 3:** Esquema de apilado de imágenes con diferentes profundidades de foco.

Cabe destacar que para realizar el stacking es necesario obtener imágenes con el menor salto posible en el eje Z, además de poder medir con exactitud el desplazamiento del microscopio. Cuanta mayor definición en este movimiento, menores zonas de interferencia fuera de foco se encontrarán en la composición de imagen final.

Los protocolos de adquisición de imágenes descritos precedentemente son para la utilización de las técnicas por separado. Una composición de una imagen con bajos aumentos se podrá realizar por medio de stitching con bajo error de solapamiento. Por otra parte, una composición de imagen por técnicas de stacking puede realizarse con mayor facilidad con observaciones de mayores aumentos, dependiendo de las alturas de los relieves a enfocar. Para relieves con 0,5 mm de altura se pueden adquirir 2500 imágenes de una misma región. La adquisición y posterior procesamiento de más de 1500 imágenes requieren de técnicas de mayores recursos informáticos.

Por otra parte, la combinación de ambas técnicas en simultáneo requiere primero una captura de una cantidad suficiente de imágenes en la misma región, que confiera por stacking, una imagen totalmente en foco. El paso siguiente consta en realizar la misma operación en una región vecina, asegurando un porcentaje de solapamiento. Este paso se repite tantas veces como imágenes se requiere para obtener el tamaño deseado de la superficie a analizar. Luego todas las imágenes vecinas procesadas por stacking, se compilan por la técnica de stitching, para obtener una imagen de toda la región a analizar con mayor resolución.

Cuando la superficie a analizar es de gran tamaño y las irregularidades en alturas son grandes, el inconveniente tecnológico se centra en la gran cantidad de imágenes a procesar por stacking. Se debe tener en cuenta que cada procesamiento para la aplicación de esta técnica con magnificaciones de 60× requiere alrededor de 600 imágenes dependiendo de los relieves a observar en las superficies de desgaste. Con mayores magnificaciones, la cantidad de imágenes a procesar será aun mayor.

Por otra parte realizar primero un stitching y luego un stacking puede llevar a errores en solapamientos debido a la poca definición en las zonas difusas o fuera de foco.

Para el análisis de superficie *in situ*, se utilizó el módulo de desplazamiento vertical, con el cual se pueden obtener imágenes de la misma región, pero en diferentes zonas de enfoque y poder realizar posteriormente un stacking.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Para la evaluación del sistema y los procedimientos desarrollados, se realizaron observaciones y adquisiciones de imágenes sobre diferentes superficies de desgaste, tanto en superficies sobre probetas de ensayo bloque-anillo, como en componentes *in situ*.

Las probetas analizadas provienen de ensayos de desgaste los cuales fueron realizados en un tribómetro basado en el método Timken según la norma ASTM D 2509.

La observación general sobre las probetas de recubrimientos de compuestos poliméricos se realizó con aumentos de 10×, 60× y 200×, permitiendo la observación de zonas características y la adquisición de imágenes de toda la superficie de desgaste. A mayores aumentos (1000×) se registraron imágenes con características como surcos de abrasión y material transferido al anillo.

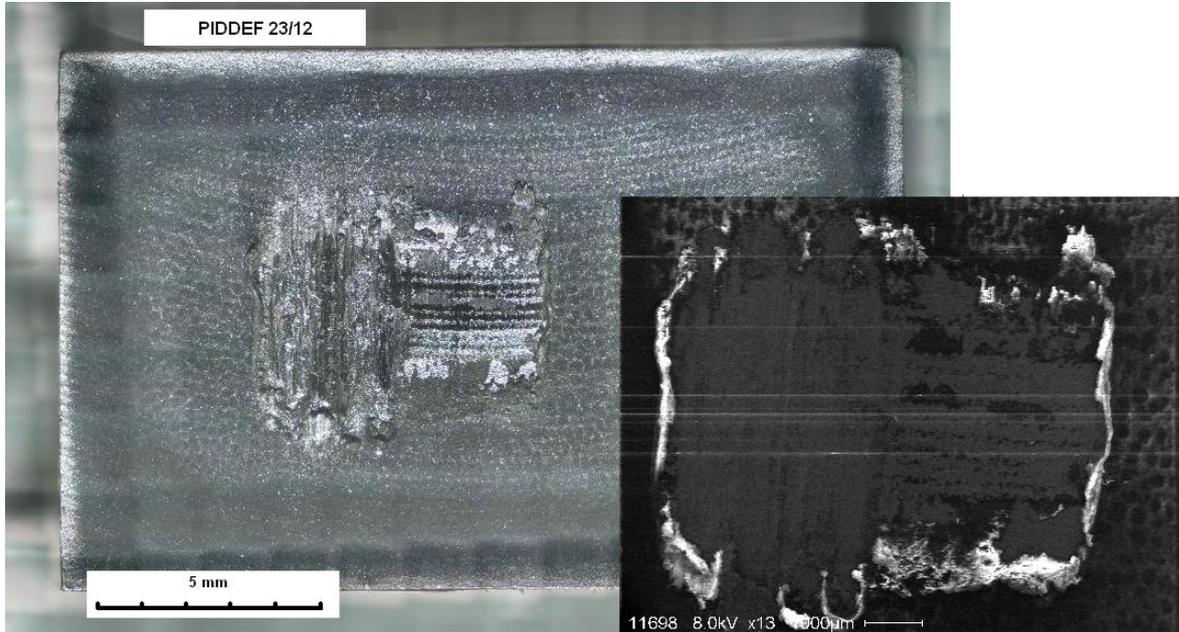
En la figura 4 se muestra una reconstrucción de la superficie de desgaste del bloque, a partir de 132 imágenes, adquiridas a 60× con la técnica de stitching. El procesamiento fue realizado con el protocolo propuesto para la aplicación de stitching, con un solapamiento 50%. La variación de las tonalidades de color en los bordes de la probeta indican las zonas de superposición, como resultado de la orientación de iluminación propia del dispositivo de captura [5].

Se ha observado que dependiendo de los programas utilizados y de los distintos protocolos en el procesamiento, pueden evidenciarse diferencias en el solapamiento. Las imágenes obtenidas tienen la resolución suficiente como para permitir la observación de toda la escara de desgaste.

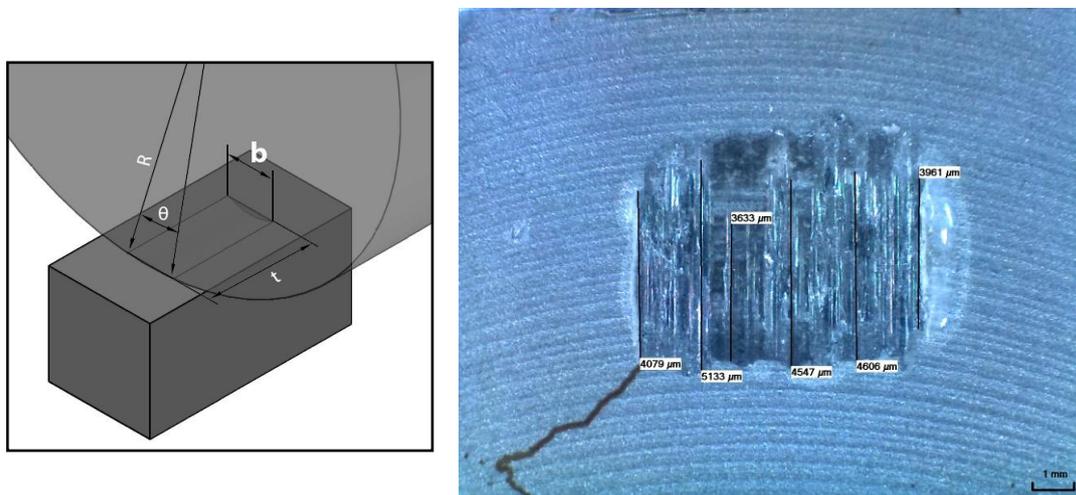
Según la norma ASTM G77, la medición del desgaste por volumen de material eliminado del bloque se realiza a partir de mediciones del ancho de la huella de desgaste. El volumen de la escara del bloque no puede calcularse a partir de la pérdida de masa porque la masa del bloque está sujeta a efectos de transferencia de materiales, generación de películas de óxido, o penetración del lubricante en el material.

Las mediciones se realizaron en términos de posiciones de los píxeles de las imágenes, de manera que estos deben escalarse para obtener medidas reales y útiles para su aplicación. En nuestro caso los programas utilizados se utilizaron escalas en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ). En la Figura 5 se muestra un esquema de la norma y la medición de la escara de desgaste.

En la figura 6 se observa una compilación en enfoque (o stacking) de una sección central, de la misma muestra de la figura 4, utilizada en las técnicas de stitching. Esta imagen está procesada a partir de 300 imágenes de la misma zona, que han sido seleccionadas a intervalos de un total de 2000 con una resolución 1280 x 1024, con una magnificación de 60x. Las 2000 imágenes fueron adquiridas en enfoques realizados cada 0,2 μm. Se aplicó la metodología de stacking en una cantidad menor de imágenes para garantizar un rápido procesamiento, sin cambios relevantes frente a una construcción con el total de las capturas.



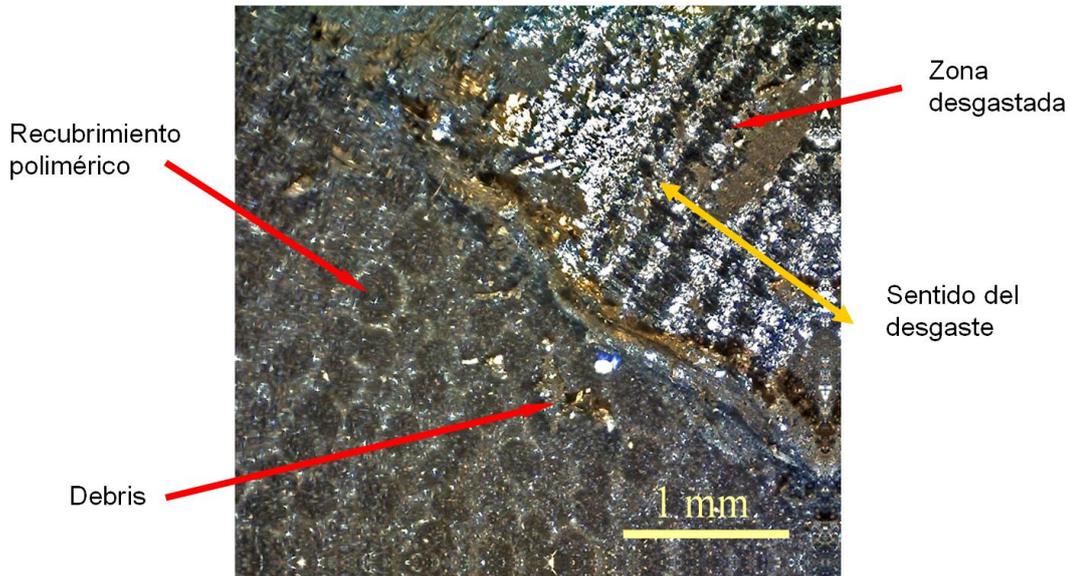
**Figura 4:** Imagen de una muestra de ensayo de desgaste compilada por medio de técnicas de stitching, contrastada con microscopía electrónica de barrido.



**Figura 5:** Representación esquemática de la huella de desgaste (escara) en el bloque y parámetros relacionados. En la figura de la derecha se observa la medición del ancho de la escara en el bloque con recubrimiento de epoxi puro.

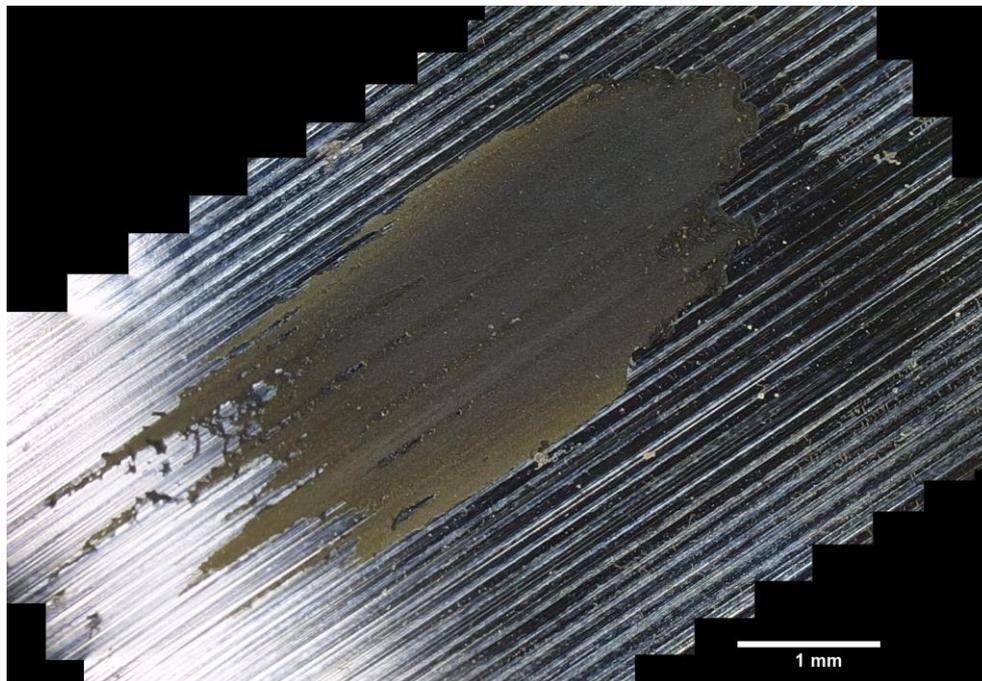
Por otra parte, se puede observar una pérdida de contraste en la imagen, debido a que, en los dispositivos de adquisición utilizados, todo el objeto se ilumina a la vez, y algunos puntos por encima y por abajo de la zona enfocada presentan un aspecto difuso. En las imágenes confeccionadas por stacking pueden observarse zonas difusas en los extremos, probablemente por aberraciones cromáticas superpuestas, características a mayores aumentos. De acuerdo con STACHOWIAK *et al.* [10] la compilación se realizó con corrección de iluminación previa al procesamiento de stacking.

También se realizaron adquisiciones de imágenes de material transferido al anillo, correspondiente al mismo ensayo, sobre la cual se realizó un stitching y stacking. En la figura 7 se observa una imagen de material transferido al anillo, obtenida por técnicas de stitching a partir de 90 fotografías con aumentos 20×. Se observa mayores definiciones al compararse esta imagen con una única imagen por microscopía óptica convencional (figura 8). Las metodologías aplicadas dependen de los alcances de cada análisis y a su vez de las calidades de las fotografías.

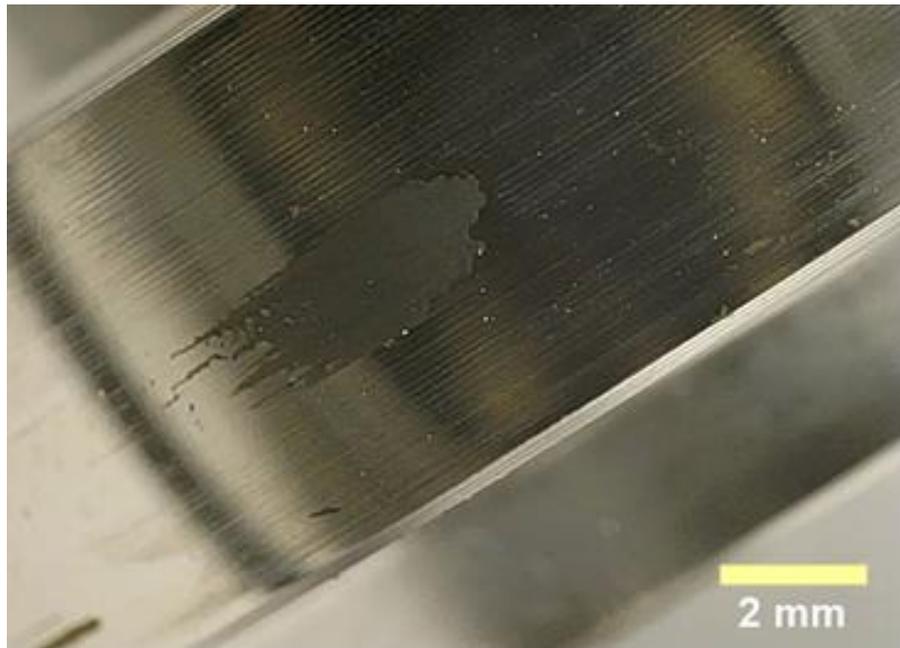


**Figura 6:** Imagen construida a partir de la técnica de stacking, a partir de 300 fotos adquiridas, a 60×, con corrección de iluminación.

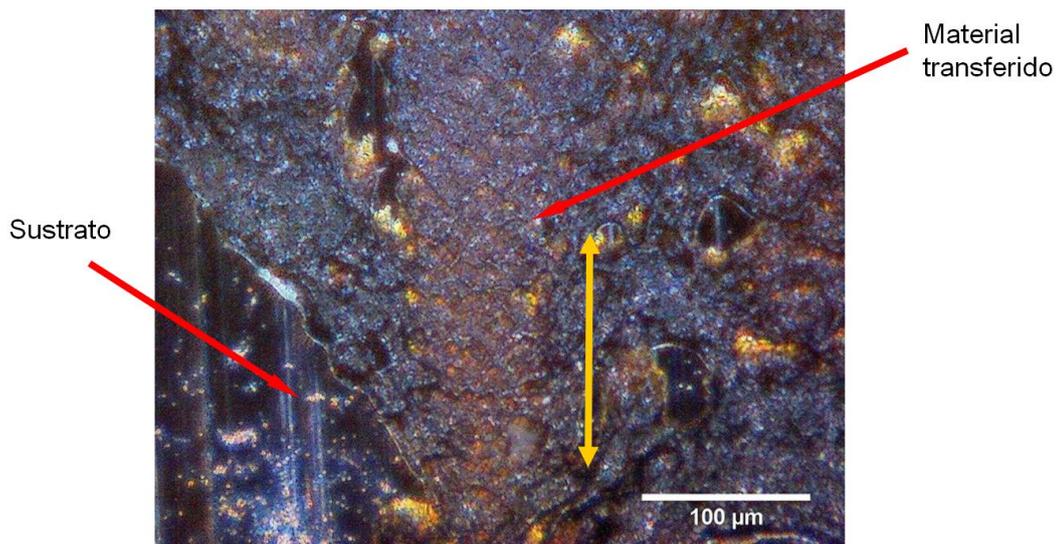
En la figura 9 se observa una imagen obtenida por stacking de una sección de material transferido al anillo. El procesamiento se realizó con 6 imágenes capturadas cada 10  $\mu\text{m}$  a 1000×. Se indica el sentido de deslizamiento del ensayo y las zonas de material transferido y superficie del sustrato. También se observan líneas paralelas que indican los surcos de mecanizado del disco.



**Figura 7:** Imagen construida por técnica de stitching para identificar toda la zona de material transferido al disco.



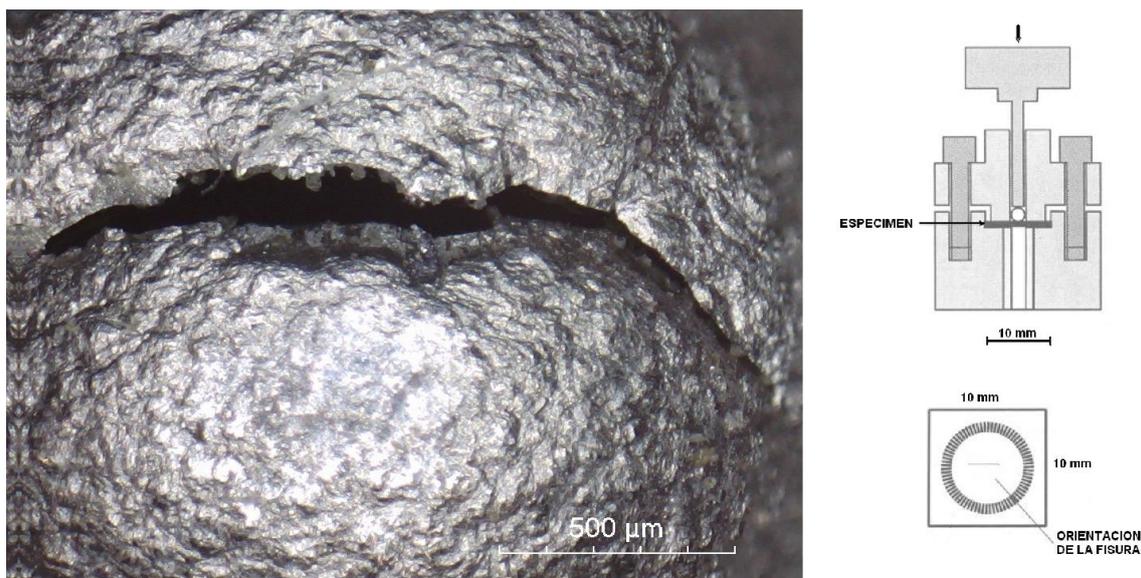
**Figura 8:** Imagen obtenida de una captura con microscopía óptica convencional para identificar toda la zona de material transferido al disco.



**Figura 9:** Imagen obtenida por stacking donde se muestra la morfología del material transferido al anillo

La utilización de estas técnicas no solo es aplicable a superficies de desgaste, sino también a análisis de falla, y observaciones en fractura [4,11]. En la figura 10 se observa una imagen construida a partir de 35 capturas por stacking, de una muestra de un ensayo Small Punch Test (o punzonado de miniprobeta) [12]. En la figura se observa microscópicamente el patrón típico de fractura dúctil, correspondiente a probetas de acero inoxidable AISI 304L [13,14]. Este ensayo de punzonado consiste en perforar hasta la fractura pequeñas muestras de sección 10×10 mm y 0,5 mm de espesor, usando un punzón hemisférico de 2,5 mm de diámetro.

Se han realizado técnicas de stitching y stacking en conjunto, pero para el procesamiento para los aumentos indicados se observaron resultados similares a la aplicación selectiva de las técnicas individuales. En todos los casos y por una razón de facilidad de procesamiento, se mostraron los resultados de aplicación individual de cada una de las técnicas propuestas. Se estima la aplicación de este conjunto de técnicas sobre componentes in situ, específicamente en componentes ferroviarios, como en superficies de rieles de ferrocarril, la cual permitiría una evaluación de la delaminación y deformación plástica [15, 16].



**Figura 10:** Imagen construida por stacking de una muestra de ensayo de small punch test y esquema del dispositivo de punzonado y espécimen.

#### 4. CONCLUSIONES.

La metodología empleada alcanza el objetivo propuesto, la cual fue elaborada mediante un conjunto de procedimientos y es aplicable para el estudio de superficies de desgaste. La selección de las técnicas concretas, permite realizar análisis cualitativos o cuantitativos de las superficies.

Las imágenes de los bloques fueron contrastadas con microscopía electrónica de barrido (figura 4) y las imágenes del anillo con microscopía óptica convencional, comparando las dimensiones de las huellas de desgaste, en donde se observó una satisfactoria correlación de las mediciones.

A partir de las imágenes de probetas bloque, como también en los anillos, se pudo observar características superficiales, partículas de desgaste, material adherido e incluso medición de huella de desgaste. Cabe aclarar que este tipo de muestras no se pueden observar en microscopía de barrido ambiental, ya que se debería adecuar la superficie, por lo que la metodología propuesta resulta un camino favorable para el análisis.

Frente a las necesidades de dispositivos ópticos de bajo costo para el análisis de superficies, con este equipo de observación descrito es posible componer imágenes con suficiente profundidad de campo y de mayor resolución.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la desinteresada participación del Sr. Matías Molina por su colaboración para la realización de este trabajo. También se agradece al Ministerio de Defensa que financió la realización del proyecto mediante el subsidio PIDDEF 23/12.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] GLAESSER W., "Light Microscopy", In: *Friction, Lubrication and Wear Technology*, v.18, *ASM Metal Handbook*, ASM International, pp 703-709, 1992.
- [2] ROYLANCE B.J., "Machine Failure and Its Avoidance – Tribology's Contribution to Effective Maintenance of Critical Machinery", In: Gwidon W. Stachowiak (ed.), *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*, chapter 16, West Sussex, England, Wiley & Sons, 2005.
- [3] BUDINSKI K.G, *Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing*. 1 ed., West Conshohocken, USA, ASTM International, 2007.
- [4] VANDER VOORT G., "Visual Examination and Light Microscopy", In: *Fractography*; v.12, *ASM Metal Handbook*, ASM International, pp 176-179, 1992.
- [5] MCSWAIN R.H., "Photography in Failure analysis", In: *Failure Analysis and Prevention*, Vol. 11, *ASM Metal Handbook*, ASM International, pp 868-885, 1992.

- [6] VAN WESTEN, M. SCIENCE 4 ALL, [http://science4all.nl/?Microscopy\\_and\\_Photography](http://science4all.nl/?Microscopy_and_Photography), Accedido en febrero de 2015.
- [7] BROWN M., LOWE D.G., “Recognising Panoramas”, In: *International Conference on Computer Vision*, pp. 1218-25, Nice – France, Oct. 2003.
- [8] BROWN M., LOWE D.G., “Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features”, *International Journal of Computer Vision*, v. 74, n. 1, pp 59-74, August 2007.
- [9] HOVDEN R., XIN H. L., MULLER D, “Extended depth of field for High-Resolution Scanning Transmission Electron Microscopy”, *Microscopy and Microanalysis*, v. 17, n. 1, pp 75–80, Feb. 2011.
- [10] STACHOWIAK G. W., BATCHELOR A. W., STACHOWIAK G. B., “Characterization of Test Specimens”, In: D Dowson (ed) *Experimental Methods in Tribology*, 1 ed, chapter 6, Amsterdam, Netherlands, Elsevier Science, 2004.
- [11] CACCAVELLI J., CATIVA TOLOSA S., GOMMÉS C., *Procesamiento Digital de Imágenes: Desarrollo Plano de Superficie Cilíndrica para Pastillas Combustibles CAREM*, In: Report Lumber INIS-AR-C-1705 v.46 n.43, IAEA - International Atomic Energy Agency, Vienna, 2012.
- [12] FIERRO V., ALVAREZ VILLAR, N., ANSALDI, A., *et al.*, “Modelado y aplicación del ensayo de punzonado en miniprobetas de acero AISI 304L”; In: *15º Congreso binacional de Metalurgia y Materiales - Jornadas SAM/CONAMET*, Concepción - Chile, 17 - 20 Noviembre 2015.
- [13] ABENDROTH, M., SOLTYSIAK, S. “Assessment of Material Properties by Means of the Small Punch Test”, In: Geralf Hütter, Lutz Zymbell (eds), *Recent Trends in Fracture and Damage Mechanics*, 1 ed, chapter 6, Switzerland, Springer International Publishing, 2016.
- [14] CONTRERAS, M. A., RODRIGUEZ, C., BELZUNCE, F. J., *et al.*, “Use of the small punch test to determine the ductile-to-brittle transition temperature of structural steels”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. v. 31, n. 9, pp. 727–737, Sept. 2008.
- [15] KAPOOR, A., FLETCHER, D.I., SCHIMD, F., *et al.*, “Tribology of Rail Transport”, In: Bharat Bhushan (ed), *Modern Tribology Handbook – Materials coatings and Industrial Applications*, 1 ed, chapter 34, Boca Raton, CRC Press, 2001.
- [16] BUDINSKI, K.G, *Friction, Wear, and Erosion Atlas*, 1 ed, Boca Raton, CRC Press – Taylor & Francis Group, 2014.