







## Recubrimientos a base de pintura electrostática modificados con nanopartículas de TiO<sub>2</sub> Coatings based on electrostatic paint modified with TiO<sub>2</sub> nanoparticles

D. Reyes-Rodríguez <sup>a,\*</sup>, J. Reyes-Miranda <sup>a,\*</sup>, D. Melo-Máximo <sup>b</sup>, A. Garrido-Hernández <sup>a</sup>,  
M. Manríquez-Ramírez <sup>c</sup>, M. Trejo-Valdez <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Departamento de Materiales, 02128, Alcaldía Azcapotzalco, CDMX, México

<sup>b</sup> Universidad Politécnica del Valle de México, Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales, 54910, Estado de México, México.

<sup>c</sup> Departamento de Nanomateriales, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, 07738, CDMX, México.

### Resumen

Este estudio analiza recubrimientos electrostáticos con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) obtenidas por Sol-Gel y tratadas a 500 °C. La caracterización DRX reveló una mezcla de fases anatasa y rutilo. El método Sol-Gel transforma un precursor coloidal (sol) en una red (gel) mediante polimerización y condensación, seguido de un tratamiento térmico que fija la estructura cristalina. Las nanopartículas esféricas y de 23 nm en promedio, se incorporaron a pintura electrostática con el objetivo de mejorar sus propiedades tribológicas y ópticas. La pintura con nanopartículas se aplicó sobre acero AISI 1018. El espesor promedio fue 31.495 µm, dentro de los rangos automotrices para imprimación o capa transparente. Ópticamente, los recubrimientos con nanopartículas absorbieron más radiación UV que el recubrimiento de referencia, que presentó alta reflectancia en 300–400 nm, especialmente en UV-A (320–400 nm) y UV-B (280–320 nm). En tribología, mostraron menor desgaste y huellas menos profundas respecto a el recubrimiento de referencia.

**Palabras Clave:** Nanopartículas, Recubrimientos, TiO<sub>2</sub>, Electrostáticos, Tribología.

### Abstract

This study analyzes electrostatic coatings with titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanoparticles obtained by the Sol-Gel method and treated at 500 °C. XRD characterization revealed a mixture of anatase and rutile phases. The Sol-Gel method transforms a colloidal precursor (sol) into a network (gel) through polymerization and condensation, followed by a thermal treatment that sets the crystalline structure. Spherical nanoparticles with an average size of 23 nm were incorporated into electrostatic paint with the aim of improving its tribological and optical properties. The paint with nanoparticles was applied on AISI 1018 steel. The average thickness was 31.495 µm, within the automotive ranges for primer or clear coat. Optically, the coatings with nanoparticles absorbed more UV radiation than the reference coating, which presented high reflectance in the 300–400 nm range, especially in UV-A (320–400 nm) and UV-B (280–320 nm). In tribology, they exhibited lower wear and shallower grooves compared to the reference coating.

**Keywords:** Nanoparticles, Coatings, TiO<sub>2</sub>, Electrostatic, Tribology.

### 1. Introducción

La industria automotriz se encarga de fabricar automóviles que cumplan con todas las normas del sector y las expectativas del mercado. Las diferentes marcas compiten principalmente en diseño, seguridad, tecnología y precio; además, existen áreas de manufactura, “marketing”, ventas en concesionarias e innovación. El producto principal son los automóviles de

pasajeros, aunque también se comercializan camionetas, deportivos, camiones de reparto, de transporte y autopartes.

En los últimos 15 años, el crecimiento de la industria automotriz ha elevado proporcionalmente los estándares de calidad (Lambourne and Strivens, 1999). Actualmente, los clientes buscan vehículos seguros, duraderos, con buen diseño, excelente rendimiento de combustible y tecnología de punta. La evolución abarca todas las áreas, siendo la manufactura y

\*Autor para la correspondencia: [diegorere.r7@gmail.com](mailto:diegorere.r7@gmail.com)

**Correo electrónico:** [diegorere.r7@gmail.com](mailto:diegorere.r7@gmail.com) (Diego Reyes-Rodríguez), [joremi@azc.uam.mx](mailto:joremi@azc.uam.mx) (Joan Reyes-Miranda), [dulce.melom@outlook.com](mailto:dulce.melom@outlook.com) (Dulce Viridiana Melo-Máximo), [agh@azc.uam.mx](mailto:agh@azc.uam.mx) (Aristeo Garrido-Hernández), [marymanriquez@yahoo.com.mx](mailto:marymanriquez@yahoo.com.mx) (María Elena Manríquez-Ramírez), [mtrejo@ipn.mx](mailto:mtrejo@ipn.mx) (Martín Daniel Trejo-Valdez)

en particular la pintura automotriz de gran interés. Los métodos y materiales de aplicación han avanzado para mejorar propiedades, reducir impacto ambiental, aumentar eficiencia y optimizar costos.

La pintura automotriz se aplica por atomización, inmersión o electrodeposición (Akafuah et al., 2016). Este artículo se enfoca en la pintura electrostática o también llamada en polvo debido a sus múltiples ventajas frente a los métodos tradicionales. Este proceso, basado en la carga eléctrica de las partículas de polvo para lograr una adhesión uniforme sobre la superficie, permite obtener recubrimientos monocapa de alta calidad, con excelente resistencia mecánica y química. Además, favorece el reciclaje del material excedente, disminuye riesgos para la salud y reduce el impacto ambiental al eliminar el uso de disolventes, lo que lo convierte en una alternativa eficiente, sustentable y alineada con las necesidades actuales de la industria (Beuerle, 1992).

La pintura en polvo surgió en la década de 1960 con el método de lecho fluidizado, pero alcanzó su consolidación en los años 70 gracias al rociado electrostático, que permitió recubrimientos más delgados y uniformes. Desde entonces, su aplicación se ha extendido a sectores como la automotriz, la construcción, línea blanca y la industria médica, gracias a la evolución de resinas como poliésteres, poliuretanos y acrílicos. Hoy en día, esta tecnología ofrece una amplia gama de acabados, colores y texturas, consolidándose como una solución versátil y de gran proyección.

El entorno competitivo e internacional impulsa la búsqueda de innovaciones. En este trabajo, se emplearon nanopartículas para mejorar las propiedades de la pintura electrostática mediante  $\text{TiO}_2$ , con la finalidad de obtener mayor absorción de rayos UV, durabilidad, resistencia al desgaste por condiciones ambientales y a rayaduras.

Estudios previos han investigado las ventajas y desventajas de recubrimientos con nanomateriales; entre los más prometedores se encuentra el  $\text{TiO}_2$  a escala nanométrica. Los beneficios incluyen propiedades antibacterianas, retardantes de fuego, resistencia al desgaste (Song & Zhang, 2008), protección UV, hidrofobicidad (Eshaghi et al., 2011) y resistencia a la corrosión (Akakuru et al., 2020). Investigaciones anteriores demostraron que nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  en fase rutilo mejoran la resistencia al impacto, la adhesión y mitigan la degradación en recubrimientos poliméricos. Concluyeron que el  $\text{TiO}_2$  aumenta la resistencia a condiciones ambientales y proporciona protección significativa contra la radiación UV (Cole et al., 2016).

## 2. Metodología

### 2.1. Síntesis de nanopartículas de $\text{TiO}_2$ por el método Sol-Gel.

Para obtener 25 g de nanopartículas de dióxido de titanio se mezcló 92 ml de isopropóxido de titanio con 119.41 ml de ácido acético a temperatura ambiente, con agitación constante durante 10 min. A la solución obtenida se le agregó 29.37 ml de isopropanol manteniendo una agitación constante. Finalmente se agregó 314.15 ml de etanol y se mantuvo en agitación constante durante 30 minutos.

Después de la hidrólisis, el gel obtenido se colocó en un horno a 100 °C por 24 h. Posteriormente, el xerogel obtenido se trató térmicamente (calcinado) a una velocidad de 5 °C/min. hasta alcanzar la temperatura objetivo (500 °C), manteniéndolo a la temperatura objetivo durante 2 h.

### 2.2. Caracterización de las nanopartículas de $\text{TiO}_2$ .

Con el objetivo de determinar la estructura cristalina de la muestra de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , se realizó el análisis de Difracción de Rayos X (DRX) empleando un difractómetro SIEMENS Kristalloflex 805 con radiación  $\text{Cu-K}\alpha$ , registrando datos en el rango de  $20^\circ < 2\theta < 80^\circ$ . Asimismo, para caracterizar la morfología superficial, el tamaño y la homogeneidad de las partículas, se empleó la microscopía electrónica de barrido (MEB) en un equipo ZEISS SUPRA 55VP, permitiendo correlacionar las características morfológicas con la estructura cristalina de las nanopartículas.

### 2.3. Aplicación de pintura electrostática con nanopartículas de $\text{TiO}_2$ .

La aplicación de la pintura electrostática con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , se realizó siguiendo los principios de los procesos de recubrimiento automotriz convencionales:

**Pretratamiento:** Como sustrato para esta investigación, se seleccionó el acero AISI 1018 debido a su similitud en propiedades mecánicas con los aceros comúnmente empleados en la industria automotriz. Las probetas, de dimensiones 10 cm x 10 cm, fueron sometidas a un proceso de desbaste secuencial utilizando lijas abrasivas de grano 180, 240 y 320, con el objetivo de eliminar rebabas y obtener una superficie uniforme. Posteriormente, las superficies metálicas fueron sometidas a un tratamiento de fosfatado de hierro por inmersión para favorecer la adherencia de los recubrimientos. Previamente, se realizó un desengrase alcalino durante 10 minutos a 60 °C, empleando una solución a base de hidróxido de sodio y tensoactivos, seguido de un enjuague con agua destilada para eliminar residuos y asegurar una superficie limpia.

Finalmente, se efectuó el fosfatado utilizando una solución de fosfato de hierro en una proporción de 10:1 ( $\text{FePO}_4$ : agua destilada), mantenida a 50 °C y pH entre 4.0 y 5.0, con un tiempo de inmersión de 10 minutos. Este proceso permitió la formación de una capa de  $\text{FePO}_4$  sobre el sustrato. Finalmente, las muestras fueron enjuagadas nuevamente con agua destilada y secadas con aire caliente a 100 °C durante 10 minutos antes de aplicar el recubrimiento.

**Aplicación:** Con el objetivo de obtener recubrimientos con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , se preparó una mezcla homogénea de pintura en polvo Vitrocoat y nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  (3%, 6% y 9% en peso) sintetizadas anteriormente en una cámara de fluidización del equipo ITWGema. Posteriormente, esta mezcla se aplicó a los sustratos de acero mediante un proceso de atomización electrostática. Se empleó una pistola electrostática de carga por corona (polaridad negativa), operando a un voltaje de 80 kV y una corriente de 60  $\mu\text{A}$ . La

aplicación se realizó a una distancia de 20 cm durante un tiempo de exposición de 30 segundos. Se indujo una carga eléctrica negativa en las partículas de pintura, favoreciendo su adhesión a los sustratos conectados a tierra través de un alambre conductor. De esta manera, se obtuvieron un total de 4 recubrimientos, incluyendo un recubrimiento de referencia sin la adición de nanopartículas.

**Curado:** Una vez finalizada la aplicación del recubrimiento en polvo, las piezas se introdujeron en un horno para llevar a cabo el proceso de curado. Se sometieron a una temperatura de 180°C durante 20 minutos, siguiendo estrictamente las recomendaciones del fabricante de la pintura electrostática Vitrocoat. Este tratamiento térmico permitió la obtención de recubrimientos sólidos y listos para evaluar sus características ópticas y mecánicas.

### 3. Discusión de resultados

#### 3.1. Análisis estructural y morfológico de las nanopartículas de $\text{TiO}_2$ .

La caracterización mediante DRX (ver figura 1), de las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  calcinadas a 500 °C, reveló la coexistencia de las fases anatasa y rutilo, ambas con estructura tetragonal. En esta condición térmica, la fase rutilo se presenta como la predominante, lo que indica una transición parcial desde la fase anatasa hacia una configuración cristalina más estable. Este comportamiento sugiere que, a 500 °C se constituye un umbral crítico en el proceso de transformación de fase, con implicaciones relevantes en las propiedades fotocatalíticas, ópticas y térmicas del material (Wetchakun et al., 2012).

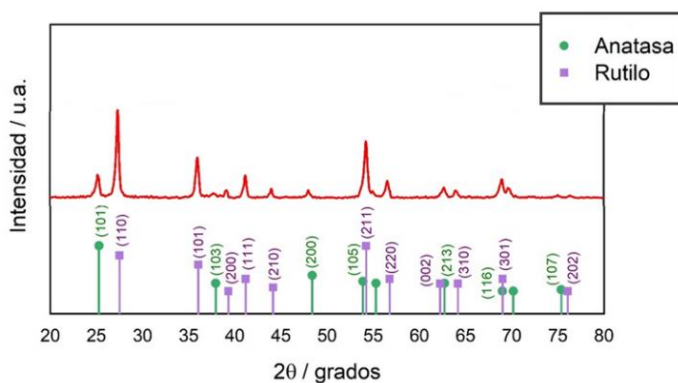


Figura 1. Difractograma DRX que revela las fases de la muestra de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  obtenidas por el método sol-gel.

Los valores del tamaño de cristalito se calcularon mediante la ecuación de Scherrer, derivada de la ley de Bragg. El análisis se basó en los picos de máxima intensidad del difractograma de rayos X, según lo indicado en la Tabla 1.

$$D_{(hkl)} = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

Donde  $D_{(hkl)}$  representa el tamaño promedio de cristalito medido perpendicularmente a la familia de planos (hkl), y K es la constante de Scherrer, la cual varía según la forma del cristalito;  $K = 0.9$  para partículas esféricas (Bokuniaeve & Vorokh, 2019). En esta fórmula,  $\lambda$  denota la longitud de onda de los rayos X utilizados,  $\beta$  es el ancho a la mitad de la altura máxima (Full Width Half Maximum, FWHM) y  $\theta$  es el ángulo de máxima intensidad del pico, expresado en radianes.

Tabla 1. Tamaño de cristalito y composición de fases de las muestras de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ .

Tamaño de cristalito (nm)		Composición de fases (% en peso)	
Anatasa en el plano (101)	Rutilo en el plano (110)	Anatasa	Rutilo
19.70	21.21	23.68	76.32

La composición de fases de la muestra se determinó cuantitativamente a partir del difractograma de rayos X. El área bajo cada pico de difracción es proporcional a la cantidad de la fase cristalina correspondiente presente en la muestra. Por lo tanto, se integró el área total del difractograma y se normalizó. Posteriormente, se integraron las áreas correspondientes a los picos característicos de cada fase, y mediante una relación porcentual se obtuvo la fracción en peso de cada fase en la muestra.

La muestra de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , obtenidas mediante el proceso Sol-Gel fueron caracterizadas morfológicamente mediante MEB utilizando electrones secundarios. Las imágenes se adquirieron con una distancia de trabajo de 3.4 mm, un voltaje de aceleración de 5.00 kV y una magnificación de 30 000x. Esta técnica permitió evaluar la forma y el tamaño de las nanopartículas.

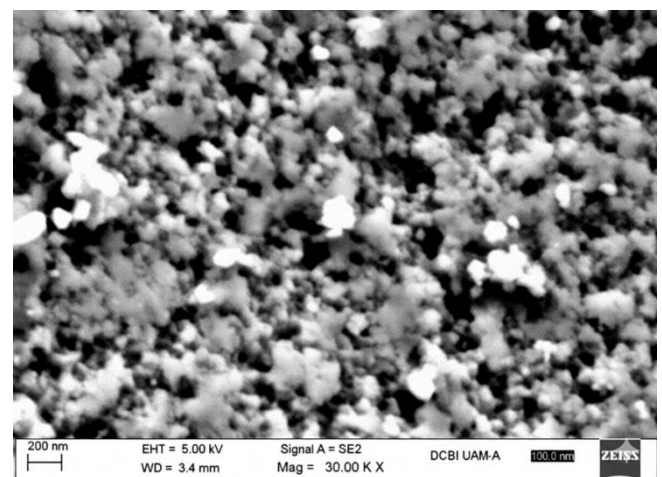


Figura 2. Imágenes MEB de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ .

Esta técnica de caracterización permitió observar el tamaño de partícula, dando como resultado, nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  con un tamaño promedio de 26 nm (ver figura 2). El cálculo

del tamaño de nanopartícula se realizó con el software ImageJ, utilizando las imágenes obtenidas por MEB.

### 3.2. Análisis óptico de los recubrimientos a base de pintura electrostática.

Las mediciones de reflectancia se realizaron utilizando un Spectrometer Perkin Elmer, modelo Lambda 365 UV-VIS, equipado con una esfera de integración en el modo de reflectancia. Este instrumento permitió analizar las propiedades ópticas de los recubrimientos de manera precisa.

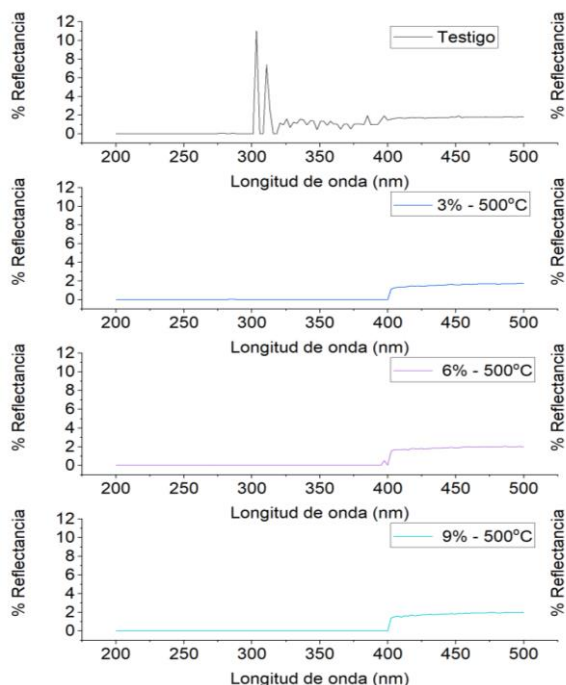


Figura 3. Reflectancia de los recubrimientos con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  con una concentración de 3%, 6% y 9% en peso.

Los recubrimientos con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  mostraron mejor respuesta en absorción UV en comparación con el recubrimiento testigo, que exhibió una reflectancia significativa en el rango de 300–400 nm y careció de capacidad para absorber radiación UV, especialmente en los rangos UV-A y UV-B.

La superioridad de los recubrimientos con  $\text{TiO}_2$  se atribuye a la composición mixta de fases cristalinas anatasa y rutilo. El rutilo, con un “band gap” más estrecho (3.0 eV), favorece la recombinación de pares electrón-hueco excitados, lo que reduce la actividad fotocatalítica, pero mejora su función como bloqueador UV. En contraste, la anatasa posee un “band gap” aproximadamente igual a 3.2 eV y mayor eficiencia como catalizador de luz. La combinación de ambas fases permite un equilibrio entre absorción UV y estabilidad estructural.

La literatura indica que solo el 10 % de la protección UV proviene de la reflectancia, mientras que el 90 % depende de la capacidad de absorción. Las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  absorben radiación UV gracias a su “band gap”, que permite la excitación de electrones desde la banda de valencia a la de conducción. La rápida recombinación de los pares electrón-hueco genera energía en forma de calor, lo que convierte a

estas nanopartículas en materiales altamente eficaces para la protección contra radiación UV (Koziej et al., 2009).

### 3.3. Espesor de los recubrimientos a base de pintura electrostática.

En la presente investigación, se utilizó el dispositivo PosiTector modelo 6000 para medir el espesor de cada recubrimiento. Se realizaron diez mediciones para cada uno de los recubrimientos, incluido el recubrimiento referencia (sin nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ ).

Los resultados obtenidos en cuanto al espesor de los recubrimientos a base de pintura electrostática con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  se encuentran en conformidad con los estándares establecidos en la industria automotriz. El espesor promedio de los recubrimientos evaluados fue de 31.495 micrómetros, valor que se sitúa dentro del rango reportado para capas de imprimación o primer en vehículos, el cual oscila entre 25 y 40 micrómetros. Es importante destacar que, en la industria automotriz, la capa de color base o “basecoat” suele presentar un espesor promedio de 15 micrómetros, mientras que la capa transparente o “clearcoat” varía entre 30 y 40 micrómetros (Lipowsky and Arpaci, 2007). Estos valores de referencia permiten corroborar la viabilidad de utilizar nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  en sistemas de recubrimiento automotriz, al menos en términos de espesor de película seca.

### 3.4. Análisis tribológico de los recubrimientos.

El comportamiento de fricción y desgaste por deslizamiento sin lubricación de los recubrimientos con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  se ha analizado con la técnica “pin on disc” bajo condiciones específicas, empleando una superficie de contacto del tipo esférica de carburo de tungsteno (WC), una carga de 5 N, temperatura ambiente y una distancia de deslizamiento de 100 metros.

En la figura 4, se compara la huella de desgaste obtenidas por microscopía óptica después del ensayo “pin on disc” donde se observa el comportamiento de los recubrimientos con diferentes concentraciones de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  (3%, 6% y 9% en peso).

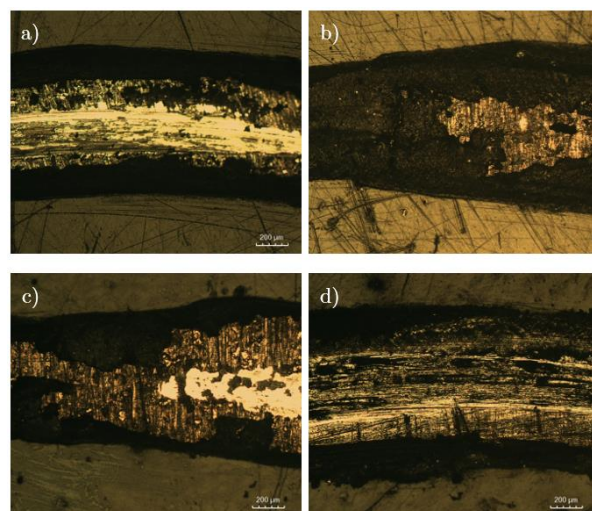


Figura 4. Micrografías ópticas de las huellas de desgaste obtenidas tras el ensayo “pin on disc” para recubrimientos con diferentes concentraciones de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ : a) Testigo, b) 3%, c) 6%, d) 9% en peso.



El análisis tribológico de las huellas (ver figura 4) en los recubrimientos revela la presencia de tres mecanismos principales de desgaste: abrasivo, adhesivo y por fatiga (Dasari et al., 2009). La incorporación de nanopartículas reduce significativamente la pérdida de material en comparación con recubrimientos sin refuerzo (ver Tabla 2). El desgaste adhesivo resulta mínimo, atribuible a la capacidad de las nanopartículas para disipar el calor, lo que evita el ablandamiento o deformación plástica del recubrimiento.

Tabla 2. Pérdida de masa de los recubrimientos después del ensayo “pin on disc” de los recubrimientos.

Pérdida de masa [g]			
Recubrimiento	Antes [g]	después [g]	Masa perdida [g]
Testigo	12.3242	12.3201	0.0041
3-500	11.4959	11.4933	0.0026
6-500	10.5782	10.5761	0.0021
9-500	11.5984	11.5961	0.0023

El desgaste abrasivo persiste, pero con menor severidad. Los surcos generados por el contacto con la esfera de carburo de tungsteno presentan mayor homogeneidad, menor profundidad y una textura más suave, debido al efecto de rodamiento de las nanopartículas. Este comportamiento corresponde a un desgaste de tres cuerpos, donde las nanopartículas reducen la fricción y limitan el desprendimiento de material. No obstante, concentraciones elevadas pueden provocar bloqueo de partículas, actuando como puntos de anclaje que intensifican el desgaste.

Respecto al desgaste por fatiga, los recubrimientos muestran una resistencia notable. Las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  mantienen su integridad estructural bajo condiciones de tensión térmica y mecánica, lo que minimiza la formación de grietas y fracturas por fatiga.

Se observa mayor acumulación en el centro y menor en los extremos, lo que indica una deformación plástica reducida y una mayor resistencia al desgaste.

La fase cristalina mixta anatasa-rutilo presente en las nanopartículas contribuye a mejorar las propiedades tribológicas del recubrimiento. Esta mejora se refleja en una mayor dureza, observada en la reducción del ancho de la huella de desgaste y la menor penetración observada, lo que incrementa la resistencia al desgaste en comparación con el recubrimiento testigo.

Tabla 3. Profundidad máxima de penetración en el ensayo “pin on disc” de los recubrimientos.

Profundidad de penetración [ $\mu\text{m}$ ]	
Recubrimiento	Máxima
Testigo	14.2772
3-500	10.7284
6-500	13.9669
9-500	11.6688

El ensayo “pin on disc” permitió registrar la evolución de la profundidad de penetración a lo largo del recorrido de 100 m, lo que permitió determinar con exactitud la profundidad máxima alcanzada durante la prueba. Los datos obtenidos (ver Tabla 3) muestran una clara correspondencia con las imágenes de microscopía óptica de las huellas de desgaste, lo que confirma la elevada resistencia al desgaste de los

recubrimientos con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ . Las mediciones revelan una profundidad máxima de penetración reducida, indicando una deformación plástica limitada y una menor pérdida de material, lo que refleja un comportamiento tribológico favorable frente a los mecanismos de desgaste evaluados. La variación observada en la profundidad de penetración entre los diferentes recubrimientos se atribuye a la interacción entre la matriz del recubrimiento y la dispersión de las nanopartículas. En el recubrimiento con 3 % de  $\text{TiO}_2$ , las partículas refuerzan la superficie de manera uniforme, reduciendo la penetración y mejorando la resistencia al desgaste. Al aumentar el contenido de nanopartículas al 6 %, se registra un ligero incremento en la profundidad de penetración, posiblemente asociado con micro desplazamientos por acumulación de partículas, aunque la pérdida de masa permanece baja debido a la cohesión del recubrimiento. Finalmente, en el recubrimiento con 9 % de nanopartículas, la profundidad disminuye nuevamente, lo que sugiere que un exceso de partículas puede contribuir a la estabilización parcial de la superficie sin incrementar significativamente la resistencia al desgaste respecto al recubrimiento con 3 % de  $\text{TiO}_2$ .

#### 4. Conclusiones

Los recubrimientos que incorporan nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  presentan un comportamiento tribológico notablemente mejorado en comparación con el recubrimiento testigo.

Las nanopartículas actúan como un tercer cuerpo en el sistema de contacto, generando un efecto de rodadura que disminuye el área de contacto real, reduce la fricción y contribuye a la disipación térmica. Esta capacidad para disipar calor evita el ablandamiento del recubrimiento, lo que se traduce en una disminución del desgaste adhesivo.

Las mediciones de huella de desgaste muestran una menor acumulación de material en los extremos y una profundidad de penetración reducida, lo que indica una deformación plástica limitada y una mayor dureza del recubrimiento. Esta relación inversa entre el ancho de huella y la dureza confirma la eficacia de la incorporación de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ .

Estos resultados evidencian el potencial de las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  para aplicaciones en recubrimientos.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen los recursos e instalaciones proporcionados por la Universidad Autónoma Metropolitana para llevar a cabo la experimentación y caracterización realizadas en este trabajo.

#### Referencias

- Akafuah, N. K., Poozesh, S., Salaimh, A., Patrick, G., Lawler, K., Saito, K., (2016). Evolution of the automotive body coating process – A review. *Coatings* 6(2), 24.  
DOI: 10.3390/coatings6020024
- Akakuru, O. U., Iqbal, Z. M., Wu, A., (2020).  $\text{TiO}_2$  Nanoparticles: Properties and Applications.
- Beuerle, J. E., (1992). A Study of Electrostatically Applied Powder Paint in the Automotive Industry.

- Bokuniaeva, A. O., Vorokh, A. S., (2019). Estimation of particle size using the Debye equation and the Scherrer formula for polyphasic TiO<sub>2</sub> powder. *Journal of Physics: Conference Series* 1410, 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1410/1/012057
- Cole, C., Shyr, T., Ou-Yang, H., (2016). Metal oxide sunscreens protect skin by absorption, not by reflection or scattering. *Photodermatology, Photoimmunology and Photomedicine* 32(1), 5–10. DOI: 10.1111/phpp.12214
- Dasari, A., Yu, Z. Z., Mai, Y. W., (2009). Fundamental aspects and recent progress on wear/scratch damage in polymer nanocomposites. *Materials Science and Engineering R* 63, 31–80. DOI: 10.1016/j.mser.2008.10.001
- Eshaghi, A., Dashti, A., Eshaghi, A., Mozaffarinia, R., (2011). Photo-induced superhydrophilicity of nanocomposite TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> thin film. *Materials Science-Poland* 29(1), 22–28. DOI: 10.2478/s13536-011-0005-9
- Koziej, D., Fischer, F., Kränzlin, N., Caseri, W. R., Niederberger, M., (2009). Nonaqueous TiO<sub>2</sub> nanoparticle synthesis: A versatile basis for the fabrication of self-supporting, transparent, and UV-absorbing composite films. *ACS Applied Materials and Interfaces* 1(5), 1097–1104. DOI: 10.1021/am9000584
- Lambourne, R., Strivens, T. A., (1999). *Paint and Surface Coatings: Theory and Practice*. Woodhead Publishing Ltd.
- Lipowsky, H., Arpacı, E., (2007). *Copper in the Automotive Industry*. Wiley-VCH; In cooperation with ECI – European Copper Institute.
- Song, H. J., Zhang, Z. Z., (2008). Study on the tribological behaviors of the phenolic composite coating filled with modified nano-TiO<sub>2</sub>. *Tribology International* 41(5), 396–403. DOI: 10.1016/j.triboint.2007.09.004
- Wetchakun, N., Incessungvorn, B., Wetchakun, K., Phanichphant, S., (2012). Influence of calcination temperature on anatase to rutile phase transformation in TiO<sub>2</sub> nanoparticles synthesized by the modified sol-gel method. *Materials Letters* 82, 195–198. DOI: 10.1016/j.matlet.2012.05.092