



OBTENCIÓN Y ESTUDIO TRIBOLÓGICO DE UN RECUBRIMIENTO PMMA/SiO₂ REFORZADO CON GRAFITO APLICADO EN MATERIALES COMPUESTOS

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:
ING. LUIS ISSAI GOVEA PAZ

DIRECTOR:
DR. ARMANDO IRVIN MARTÍNEZ PÉREZ

CO-DIRECTOR DE TESIS:
DR. EDGAR ERNESTO VERA CÁRDENAS

SINODAL:
DRA. MARISA MORENO RÍOS

*PACHUCA DE SOTO, HGO. DICIEMBRE DEL 2023.
59 PÁGINAS*



Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica ACTA

Siendo las 13:00 horas del 17 de febrero de 2023, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: *Obtención y estudio tribológico de un recubrimiento PMMA/SiO₂ reforzado con grafito aplicado en materiales compuestos*, con el siguiente contenido:






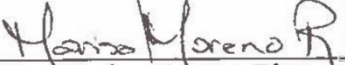



- 1 Introducción
- 2 Antecedentes
- 3 Marco teórico
- 4 Metodología
- 5 Resultados y discusión
- 6 Conclusiones

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Luis Issai Govea Paz obtenga el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Armando Irvin Martínez Pérez.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica*

"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"*

 Dr. Ignacio Ramírez Vargas	 Dr. Juan Serrano Arellano	 Dr. Luis Manuel Palacios Pineda
 Dra. Erika Osiris Alfaro Dávila	 Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas	 Dra. Marisa Moreno Ríos
 Dr. Armando Irvin Martínez Pérez	 Dr. Francisco Noe Demesa López	 Dr. Hugo Francisco Abundis Fong





Pachuca de Soto, Hidalgo, 11/enero/2024
Circular No. 007/2024

**C. ING. LUIS ISSAI GOVEA PAZ
PRESENTE**

La que suscribe, jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

Obtención y estudio tribológico de un recubrimiento
PMMA/SiO₂ reforzado con grafito aplicado en
materiales compuestos

se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y, en consecuencia, se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE

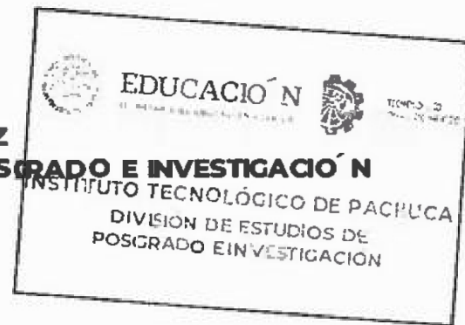
Excelencia en Educación Tecnológica

"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia" ®

**M. A. C. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

ccp. Archivo

ECGO/lmpp



Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada durante el periodo de estudios de posgrado.

Al Dr. Armando Irvin Martínez Pérez por las asesorías y la dedicación para el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas y a la Dra. Marisa Moreno Ríos por formar parte de la comisión revisora y por sus comentarios constructivos.

A la División de Estudios de Posgrado e Investigación por el apoyo académico e instalaciones.

A mis compañeros por la amistad que establecimos en este tiempo

A mi familia.

Contenido

<i>Agradecimientos</i>	<i>IV</i>
<i>Resumen</i>	<i>IX</i>
<i>Abstract</i>	<i>X</i>
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Justificación	2
1.3 Hipótesis	2
1.4 Objetivo general	2
1.4.1 Objetivos específicos	2
2. ANTECEDENTES	4
3. MARCO TEÓRICO	7
3.1 Tribología.....	7
3.1.1 Desgaste.....	8
3.1.1.1 Desgaste adhesivo	8
3.1.1.2 Desgaste abrasivo	9
3.1.1.3 Desgaste por fatiga.....	10
3.1.1.4 Desgaste corrosivo.....	10
3.1.1.5 Desgaste en polímeros.....	10
3.2 Recubrimientos híbridos	11
3.2.1 PMMA – SiO ₂	11
3.2.2 Método sol – gel	12
3.2.3 Grafeno	13
3.2.4 Grafito.....	14
3.3 Materiales compuestos	15
3.3.1 Materiales híbridos	17
3.3.1.1 Fibra de vidrio	17
3.3.1.2 Fibra de carbono	18
3.3.2 Aplicaciones.....	18
4. METODOLOGÍA	21
4.1 Síntesis de recubrimiento híbrido PMMA/SiO ₂ -G	22
4.1.1 Obtención de solución PMMA/Acetona.....	22
4.1.2 Obtención de la solución de SiO ₂ por la ruta sol-gel.....	22
4.1.3 Obtención de grafito reducido.....	23
4.1.4 Incorporación del grafito a la solución de SiO ₂	24
4.1.5 Incorporación de la solución SiO ₂ -G a la solución PMMA.....	24
4.1.6 Aplicación del recubrimiento PMMA/SiO ₂ -G	26
4.2 Caracterización del recubrimiento PMMA/SiO ₂ -G.....	27
4.2.1 Rugosidad.....	27
4.2.2 Dureza	28
4.2.3 Espesor del recubrimiento.....	28

4.2.4	Espectroscopía infrarroja	29
4.3	Caracterización tribológica	30
4.3.1	Pruebas de erosión	30
4.3.2	Pruebas por deslizamiento recíprocante	31
4.3.3	Perfilometría	32
4.3.4	Microscopía confocal	33
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
5.1	Caracterización de materiales	34
5.1.1	Propiedades superficiales.....	34
5.1.2	Espectroscopía infrarroja (FTIR)	35
5.2	Caracterización tribológica	38
5.2.1	Pruebas de erosión	38
5.2.1.1	Determinación del tamaño de la partícula	38
5.2.1.2	Pérdida de masa	39
5.2.1.3	Perfil de las huellas de desgaste	43
5.2.2	Mecanismos de desgaste	47
5.2.3	Pruebas por deslizamiento recíprocante	49
5.2.3.1	Pérdida de masa	49
5.2.3.2	Huellas de desgaste.....	50
6.	CONCLUSIONES	55
7.	REFERENCIAS	56
	ANEXOS	59

Lista de tablas

Tabla 1. Pares de compatibilidad, basados en la solubilidad mutua de elementos [16].	9
Tabla 2. Ventajas, desventajas y aplicaciones de la técnica de sol-gel [18].	13
Tabla 3. Propiedades de los materiales compuestos con base en los diferentes sectores de aplicación [3].	15
Tabla 4. Concentración en relación de volumen (v/v) de la solución PMMA/SiO ₂ .	24
Tabla 5. Recubrimientos híbridos con grafito.	25
Tabla 6. Condiciones de las pruebas por deslizamiento.	31
Tabla 7. Propiedades superficiales (soluciones PMMA/SiO ₂).	34
Tabla 8. Propiedades superficiales (SH-P/S-G).	35
Tabla 9. Mecanismos de desgaste presentes: incrustaciones (a), fisuras y grietas (b), fracturas (c), picaduras (d) y deformación plástica (e) y acción cortante (f).	47
Tabla 10. Mecanismos de desgaste presentes: picaduras (a), fisuras y grietas (b), fracturas (c), deformación plástica (d), acción cortante (e) y cráteres (f).	48
Tabla 11. Valores específicos del sustrato y los recubrimientos.	51
Tabla 12. Condiciones de las pruebas por deslizamiento recíprocante.	52

Lista de figuras

Figura 1. Características básicas de la estructura de la superficie [16].	8
Figura 2. a) Estructura de la capa de grafito, b) estructura reticular hexagonal del grafito [20].	14
Figura 3. Propiedades de los materiales compuestos con base en los diferentes sectores de aplicación. Componentes de los materiales compuestos [3].	17
Figura 4. Etapas de la metodología.	21
Figura 5. Solución PMMA/Acetona.	22
Figura 6. Solución SiO ₂ por ruta sol-gel.	23
Figura 7. Molino de alta energía.	23
Figura 8. Incorporación del grafito a la solución de SiO ₂ .	24
Figura 9. Solución híbrida 90PMMA/10SiO ₂ -G.	25
Figura 10. Limpieza de los sustratos.	26
Figura 11. Inmisor de velocidad variable.	27
Figura 12. Rugosímetro / perfilómetro modelo SJ-410, Mitutoyo.	27
Figura 13. Durómetro Shore D y Micro-Vickers Hardness 412 DAT, Bowers.	28
Figura 14. Obtención del escalón de la película.	28
Figura 15. Espectrofotómetro de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) modelo Spectrum GX, Perkin Elmer.	29
Figura 16. Esquema de la máquina de erosión. (1) Compresor, (2) Flujo de aire, (3) Recipiente de partícula erosiva, (4) Flujo de aire y partícula, (5) Cámara de erosión, (6) Eje y (7) Muestra.	30
Figura 17. Máquina de erosión horizontal.	31
Figura 18. Máquina de deslizamiento recíprocante.	32
Figura 19. Microscopio digital modelo DSX1000: High-Resolution, Olympus.	33
Figura 20. Espectros ATR/FTIR: a) FC, b) FC-100PMMA/0SiO ₂ , c) FC-95PMMA/5SiO ₂ , d) FC-90PMMA/10SiO ₂ , e) FC-SH-P/S-1G-1nm, f) FC-SH-P/S-1G-2nm, g) FC-SH-P/S-2G-1nm y h) FC-SH-P/S-2G-2nm.	37
Figura 21. Determinación de la distribución del tamaño de partícula y gráfica de la distribución de tamaño a), c) antes y b), d) después de las pruebas.	38
Figura 22. Pérdida de masa por minuto (soluciones PMMA/SiO ₂).	39
Figura 23. Incremento de la pérdida de masa por minuto (soluciones PMMA/SiO ₂).	40
Figura 24. Pérdida de masa total (soluciones PMMA/SiO ₂).	40
Figura 25. Pérdida de masa por minuto (SH-P/S-G).	41
Figura 26. Incremento de la pérdida de masa por minuto (SH-P/S-G).	42
Figura 27. Pérdida de masa total (SH-P/S-G).	42
Figura 28. Perfil de huellas por erosión (soluciones PMMA/SiO ₂).	43
Figura 29. Perfil de huellas por erosión (SH-P/S-G).	44
Figura 30. Volumen perdido en las pruebas de erosión (SH-P/S-G).	45
Figura 31. Huella por erosión: a) FC, b) FC-100PMMA/0SiO ₂ , c) FC-95PMMA/5SiO ₂ , d) FC-90PMMA/10SiO ₂ , e) FC-SH-P/S-1G-1nm, f) FC-SH-P/S-1G-2nm, g) FC-SH-P/S-2G-1nm y h) FC-SH-P/S-2G-2nm.	46
Figura 32. Pérdida de masa.	49
Figura 33. Huella de desgaste con "geometría perfecta" [44].	51
Figura 34. Tasa de desgaste.	52
Figura 35. Perfil de huella por deslizamiento recíprocante.	53
Figura 36. Coeficiente de fricción.	54

Resumen

Los materiales compuestos como lo es la fibra de carbono son de los más empleados, sin embargo, algunas de sus aplicaciones exponen a estos materiales a condiciones de desgaste por contacto de partículas sólidas y otros cuerpos. Esto puede provocar daños desde fisuras pasando por grietas hasta llegar a fracturas.

En este trabajo de tesis, se presenta una alternativa que permita proteger a los materiales compuestos y así reducir su desgaste e incrementar su tiempo de vida. Con base a lo anterior, se propuso la aplicación por el método de inmersión de recubrimientos híbridos de tipo polimetilmetacrilato/sílice (PMMA/SiO₂) reforzados con grafito (G) sobre sustratos de fibra de carbono (FC). Se reporta su caracterización de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), en donde se confirmó la obtención de una familia de recubrimientos PMMA/SiO₂ y PMMA/SiO₂-G. También se presentan sus propiedades superficiales de dureza y rugosidad, utilizando un durómetro Shore D y un perfilómetro/rugosímetro respectivamente. La caracterización tribológica se realizó a partir de pruebas de erosión, los resultados obtenidos de pérdida de masa y el perfil de la huella, corroboran el buen desempeño de los recubrimientos híbridos, destacando al que presenta grafito a un 1% en razón de volumen. Adicionalmente, se presentaron los resultados preliminares de desgaste por deslizamiento recíprocante, generando información que servirá de antecedente para trabajo a futuro.

Palabras clave: fibra de carbono, recubrimiento híbrido, PMMA, SiO₂, grafito.

Abstract

Composite materials, such as carbon fiber, are widely used. However, some applications expose these materials to wear conditions caused by contact with solid particles and other bodies. This can lead to damage ranging from cracks to fractures.

In this thesis work, an alternative is presented to protect composite materials and reduce their wear, thus increasing their lifespan. Based on this, the immersion method was proposed for applying hybrid coatings of polymethyl methacrylate/silica (PMMA/SiO₂) reinforced with graphite (G) on carbon fiber substrates (FC). The infrared characterization with Fourier transform (FTIR) confirmed the obtaining of a family of PMMA/SiO₂ and PMMA/SiO₂-G coatings. Surface properties such as hardness and roughness were also presented, using a Shore D durometer and a profilometer/roughness meter, respectively. The tribological characterization was performed through erosion tests, and the obtained results of mass loss and the profile of the track corroborate the good performance of the hybrid coatings, with emphasis on the one containing graphite at 1% by volume. Additionally, preliminary results of reciprocal sliding wear were presented, providing information that will serve as a precedent for future work.

Key words: carbon fiber, hybrid coating, PMMA, SiO₂, graphite.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los temas de investigación que ha tenido un impacto considerable en la ingeniería y tecnología moderna son los materiales compuestos, los cuales permiten la obtención de una combinación que satisfaga una necesidad. En este trabajo se propone la obtención de un recubrimiento híbrido, validando su comportamiento con pruebas tribológicas; con la finalidad de disminuir el deterioro por erosión o contacto; de manera inicial se muestra la relación de los materiales a utilizar; los fundamentos teóricos; los procedimientos empleados para la obtención de: las soluciones, el grafito, la caracterización de los recubrimientos y el comportamiento de éstos ante las pruebas de erosión y contacto; así como las observaciones y conclusiones del estudio.

1.1 Planteamiento del problema

En los últimos años ha predominado la necesidad de aplicar materiales con propiedades superiores y específicas en áreas como medicina, electrónica, deportes, construcción, mecánica, transporte, aeronáutica; donde los materiales convencionales no logran satisfacer estos objetivos. Los materiales compuestos son una alternativa que presentan mejores características respecto a otro tipo de materiales [1], algunas de sus aplicaciones son como barreras protectoras en el uso de rayos gamma para el tratamiento de cáncer, placas base de componentes electrónicos, artículos deportivos livianos, elementos lineales estructurales de alta resistencia, álabes, tuberías de alta presión, sistemas de protección balística, discos de sistema de frenado, satélites, componentes de propulsión y escudos térmicos de naves espaciales, etcétera [2].

Los materiales compuestos que recientemente son más utilizados son los conocidos como fibra de vidrio y la fibra de carbono (FC), debido a su relación resistencia peso y al comportamiento ante la fatiga, rigidez y temperatura [3]; por lo que, generalmente son expuestos bajo condiciones de alto desgaste por contacto entre la superficie y otros cuerpos tanto sólidos como líquidos, esto provoca una pérdida progresiva de material que puede ocasionar grietas y fracturas [4], [5]. Por este motivo es necesario reducir el deterioro en las regiones localizadas, a partir de un método práctico y sencillo, como lo es la aplicación de un recubrimiento que asegure la protección de la región de contacto [6].

1.2 Justificación

Las condiciones a las que están sometidos los materiales compuestos, debido principalmente a sus propiedades, incluyen contacto directo e indirecto, provocando desgaste localizado por deslizamiento, rodamiento, oscilación, impacto y/o erosión, lo que afecta significativamente su rendimiento. Por esta razón, en este trabajo de tesis se propone el desarrollo de una serie de recubrimientos híbridos PMMA/SiO₂ reforzados con grafito para ser aplicado sobre la región delimitada del daño de los materiales compuestos, principalmente en fibra de vidrio y carbono, que son de los materiales de este tipo más empleados. Este trabajo impactará en diferentes sectores debido a que se espera reducir el deterioro, proteger áreas específicas, menguar la probabilidad de que se presenten grietas y fracturas; de esta manera ampliar el tiempo de vida útil, por lo que, se disminuirían los gastos generados por mantenimiento.

1.3 Hipótesis

El presente trabajo propone el desarrollo y caracterización tribológica de un recubrimiento híbrido de PMMA/SiO₂ reforzado con grafito, el cual pueda ser aplicado en diversos materiales compuestos, principalmente fibra de vidrio y de carbono, para protegerlos del desgaste por contacto y así prolongar vida útil.

1.4 Objetivo general

Sintetizar un recubrimiento híbrido PMMA/SiO₂ reforzado con grafito y realizar el estudio de sus propiedades tribológicas, a partir de pruebas de desgaste por erosión y contacto deslizante.

1.4.1 Objetivos específicos

- Obtener la solución precursora de PMMA/Acetona.
- Obtener la solución precursora de SiO₂ a partir del método de sol-gel.
- Obtener el grafito reducido que actuará como material reforzante del recubrimiento híbrido, a partir de polvo de grafito aplicando deformación mecánica de alta energía.
- Obtener recubrimientos híbridos PMMA/SiO₂ en porcentaje de volumen 95/05 y 90/10.
- Incorporar el grafito a la solución de SiO₂, determinando la relación en porcentaje de masa/volumen más adecuado.

- Aplicar los recubrimientos híbridos sobre sustratos de fibra de carbono por el método de inmersión.
- Determinar propiedades superficiales como la rugosidad y la dureza de los sustratos y de los recubrimientos.
- Comprobar los grupos funcionales de los recubrimientos híbridos por espectroscopia FTIR.
- Realizar la caracterización tribológica a partir de la prueba de erosión horizontal por partícula sólida.
- Realizar la caracterización tribológica a partir de la prueba de contacto por deslizamiento.

2. ANTECEDENTES

El PMMA es un material termoplástico importante con excelente transparencia. Sin embargo, su escasa estabilidad térmica lo restringe de aplicaciones en regiones de temperaturas más altas. El estudio realizado por Hsu-Chiang en 2009 [7] consideró la adición de óxido de silicio y titanio en la matriz PMMA, mediante la técnica sol-gel no hidrolítico, lo que aumentó la estabilidad térmica de la resina pura, manteniendo una excelente transparencia óptica. Las resinas epoxi son polímeros termoendurecibles de alto rendimiento ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales y estudiados como nanocompuestos. En la investigación de Moraes de 2018 [8], se obtuvo la síntesis y funcionalización de CNT (por sus siglas en inglés Carbon Nanotubes) y óxido de grafeno. Los tratamientos con ácidos y aminos podrían inducir eficazmente grupos polares que contienen oxígeno en la superficie de los CNT. Estos materiales fueron estudiados como rellenos de refuerzo a la resina epoxi (diglicidil éter de bisfenol A, DGEBA) concluyendo que mejoran efectivamente las propiedades mecánicas observadas, sugiriendo un enlace químico entre ellos y la matriz epoxi.

Tras el amplio uso del reforzamiento de materiales con fibra de vidrio en aplicaciones de ingeniería, en el trabajo de Al-Tameemi de 2020 [4] se buscó obtener un ordenamiento del tejido que soslaye el deterioro del compuesto en condiciones de contacto, comparando cuatro tipos de compuestos de fibra de vidrio en las mismas condiciones. Lograron clasificar a los compuestos dependiendo del uso que se le dará, con la distribución aleatoria de fibras se presenta mayor estabilidad ante una velocidad de deslizamiento, mientras que las otras tres están acomodadas a 90° formando un tejido, variando su separación, misma de la que depende el desgaste. El estudio comparativo de Hao en 2016 [9] sobre el seguimiento del daño estructural en polímeros reforzados con fibra utilizando fibras de vidrio con nanotubos de carbono y revestimiento de grafeno. La incorporación de nanomateriales a base de carbono hizo que la fibra de vidrio mostrara mayor sensibilidad a la temperatura y la tensión mecánica que las muestras de CNT gracias a la estructura de capa compacta formada en la superficie de la fibra. Los CNT se distribuyeron aleatoriamente en la fibra de vidrio y se tocaron entre sí mediante un contacto de punto a punto, mientras que el grafeno formó un recubrimiento capa por capa con una cobertura total para la fibra de vidrio.

En la investigación de Mata-Padilla del 2021 [6] se mostró el efecto de la modificación de nanopartículas de SiO₂, con un copolímero PDMS-g-acrilato, sobre el comportamiento anticorrosivo de sustratos de acero inoxidable AISI 304 y 316 recubiertos con una pintura acrílica nanoestructurada, lo que permitió incrementar en al menos 1 orden de magnitud la resistencia a la corrosión de los aceros, debido al aumento de la hidrofobicidad de las nanopartículas, incluso a altos tiempos de inmersión. El estudio de Torres-Parga en 2014 [10] analizó el comportamiento de fricción y desgaste de un recubrimiento de PMMA-SiO₂ sobre acero templado concluyendo que el material híbrido podría aplicarse como revestimiento protector en la superficie del metal para mejorar la resistencia al desgaste, el coeficiente de fricción y como protección potencial contra la corrosión en varios medios y aplicaciones prácticas. La investigación de Rahimi en 2013 [11] examinó la corrosión y el desgaste en una aleación AA5083, de un recubrimiento nanocompósito híbrido orgánico e inorgánico respetuoso con el medio ambiente desarrollado por el método sol-gel. El cual fue sintetizado por Tetraetil ortosilicato (TEOS) y 3-Glicidoxipropiltrimetoxisilano (GPTMS), observando los efectos en diferentes capas, el revestimiento incrementa la resistencia a la corrosión electroquímica de la aleación, obteniendo mayores resultados en la tercera capa de aplicación, infiriendo que por este método se podrían conseguir un área libre de grietas en el material.

El estudio de Tsai en 2009 [12] concluyó que el comportamiento de absorción de humedad en materiales híbridos compósitos de fibra de vidrio y carbono, es más complejo que en los materiales compuestos de una sola fibra reforzados. Debido a la alta densidad por el acomodo de las fibras, que actúan, temporalmente, como una barrera de humedad. Algunos de los factores que influyen en el deterioro del material son la resistencia, la conductividad térmica, la distorsión por calor y la velocidad de presión, sin embargo, existe una importante relación con la aspereza del compuesto y la superficie de contacto. El análisis de Theberge en 1974 [13] concluyó que los materiales termoplásticos reforzados con fibra de carbono presentan una reducción al desgaste y el coeficiente de fricción a un nivel que parecería ser independiente de la matriz, soportando una porción significativa de la carga aplicada. En el trabajo de Singh en 2013 [14] se analizó la producción de un recubrimiento compuesto reforzado con grafito resistente a la corrosión sobre cobre mediante deposición electroforética catódica acuosa. Obteniendo una capa protectora ultrafina resistente a la oxidación y corrosión, por difusión de iones y ambiente oxidante, con excelente microestructura y espesor controlado (40 nm).

Este trabajo es una continuación del estudio de Reyes-Hernández del 2021 [15] para obtener una serie de recubrimientos híbridos a base Polimetilmetacrilato (PMMA) y Tetraetil ortosilicato (TEOS), con la finalidad de proponer una posible aplicación sobre el borde de ataque de los alabes de fibra de vidrio de los aerogeneradores para reducir su desgaste por erosión; dando pauta a la información de referencia de los recubrimientos que presentan menor pérdida de masa. Son limitadas las investigaciones donde se aplique un recubrimiento híbrido a polímeros.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Tribología

La tribología es la ciencia relacionada a la fricción, el desgaste y la lubricación involucrando contactos móviles. En su amplio alcance, comprende tecnología mecánica, química y de materiales. Los parámetros tribológicos que se emplean para medir la capacidad de una mezcla polimérica son: el coeficiente de fricción; que es la resistencia al movimiento de un cuerpo sobre una superficie, puede ser estático (fuerza necesaria para iniciar el movimiento) o dinámico (fuerza necesaria para mantener el movimiento); el límite presión \times velocidad, que señala el producto máximo de presión y velocidad más allá del cual aparece una inestabilidad térmica seguida de un fallo del componente; y el factor de desgaste, el cual es un coeficiente que indica la resistencia al desgaste del material en base a la pérdida de volumen de la pieza desgastada [16], [17].

Todas las superficies son rugosas hasta cierto punto. La textura de las superficies implica variaciones desde a gran escala hasta aquellas de tamaño microscópico. El tipo de interacción a escala molecular es de vital importancia para la selección de materiales de rodamientos, en relación con los aspectos mecánicos de fricción, en la química de los lubricantes y desgaste en aplicaciones de piezas. Las superficies producidas por mecanizado y otros procesos de conformación son generalmente complejas. Dado que la rugosidad es la consideración principal, los siguientes términos básicos, ilustrados en la Figura 1, se emplean comúnmente para caracterizar la textura de la superficie [16]:

- Rugosidad: irregularidades finas de longitud de onda corta como las producidas por los procesos de mecanizado.
- Ondulación: irregularidades de la superficie muy espaciadas (longitud de onda larga) que resultan de problemas en el proceso de fabricación, como desviación de la herramienta de corte, deflexiones, desgaste desigual de las herramientas y desalineación de la pieza de trabajo.
- Tendido: dirección del patrón de superficie predominante determinada por la dirección del proceso de mecanizado utilizado. Los procesos de torneado, fresado, taladrado, rectificado y otros, suelen producir una superficie que tiene estrías o picos y valles en la dirección en la que se dibujó la herramienta de corte a lo largo de la superficie. Otros procesos, como el

colado y el granallado, que no producen una dirección característica, tienen como finalidad tener una capa no direccional, particulada o protuberante.

- Defectos: interrupciones involuntarias, inesperadas y no deseadas en la topografía, como arañazos, hendiduras, hoyos y grietas.

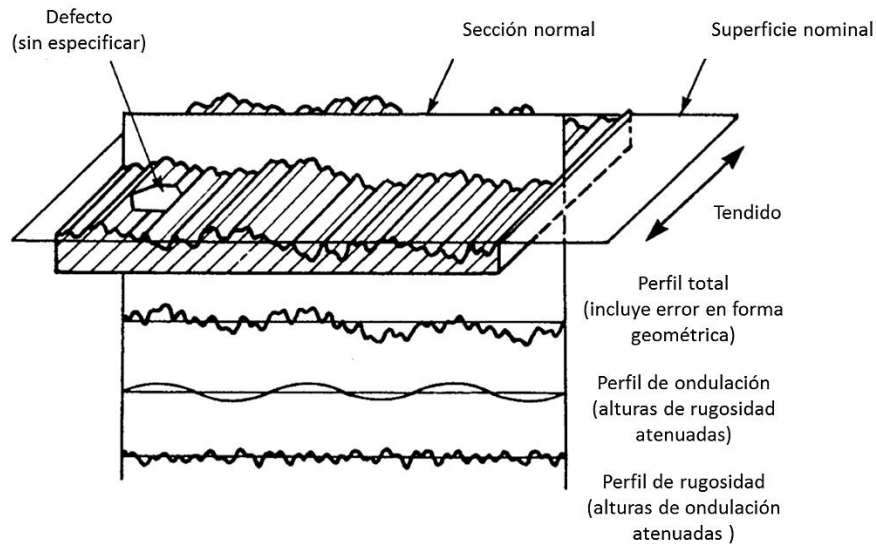


Figura 1. Características básicas de la estructura de la superficie [16].

3.1.1 Desgaste

Este efecto ocurre hasta cierto punto cuando las superficies están en contacto deslizante. El desgaste deslizante lubricado se presenta en la mayoría de las aplicaciones prácticas, las superficies deslizantes se lubrican de alguna manera. El desgaste por deslizamiento en seco es cuando las superficies interactúan en el aire sin lubricante, generalmente tiene lugar en aire ambiente de humedad apreciable, pero también se presenta en algunas aplicaciones de ingeniería y en muchas investigaciones de laboratorio.

Los mecanismos más comunes de desgaste son la adhesión, abrasión, fatiga superficial y corrosivo [16], [17].

3.1.1.1 Desgaste adhesivo

Este mecanismo de desgaste consiste en la formación de una unión adhesiva, su crecimiento y posterior fractura. Bajo ciertas condiciones, una película del material más blando se transfiere al material más duro. Si la película del material blando es eliminada de la superficie metálica y se

forman nuevas películas de transferencia que van siendo eliminadas, la tasa de desgaste aumenta, si, por el contrario, la película queda permanentemente adherida a la superficie metálica, la tasa de desgaste del polímero disminuye llegando a dar lugar a un aumento de la fricción, en ambos casos se provoca una variación de la rugosidad.

Existe cierta compatibilidad entre los elementos, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Pares de compatibilidad, basados en la solubilidad mutua de elementos [16].

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sn	Pb	In
Ln				◐	◑	●		◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Pb	◐	◐	●	●	●	●	●	◑	◑	◑	●	◐	◑	●	●	◑	◑	◑	◑	◑
Sn	◐		●	◐	◑	●	◐	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Cd			◐	◐	◐	◐		◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Mg		◐		◐	◐	◐	●		◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Zn		◐	◑	◑	◑	◑	◐	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Al	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Ag	●	◐	●	●	●	●	◐	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Au	◑	◐	◑	◐	◑	◑		◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Cu	◐	●	●	◑	◑	◐	◐	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Ti	◑	◑	◑	◐	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Zr	◐	◑	◐	◑	◑	◐	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Pt	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Nb	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Fe	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Ni	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Co	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Cr	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Mo	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
W	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑

●	Muy buena	Muy bajo
◐	Intermedia o buena	Intermedio o bajo
◑	Intermedia	Intermedio
◑	Mala	Alto
○	Muy mala	Muy alto

3.1.1.2 Desgaste abrasivo

Presenta un efecto de corte o arado de la superficie por parte de asperezas o partículas duras. En la abrasión de dos cuerpos, la aspereza dura arrastra el material deformado hacia adelante y a los lados de la misma, sin que haya arranque de material. La abrasión de tres cuerpos es cuando se produce eliminación de material en forma de virutas. La velocidad de arranque de material no es constante con el tiempo, después de un rápido incremento inicial, puede disminuir cuando las asperezas del elemento duro se cubren de una capa del blando o cuando su altura disminuye por desgaste.

3.1.1.3 Desgaste por fatiga

Cuando el material es sometido a un número considerable de ciclos de deslizamiento, teniendo alta relación la presión de contacto, así como, el tipo de cargas: normales y/o tangenciales, existe una amplia probabilidad que aparezca este tipo de desgaste, mediante la propagación de grietas sobre la superficie como bajo de esta. Las grietas crecerán bajo los repetidos ciclos de carga hasta que den lugar a partículas de desgaste que se desprendan de la superficie.

3.1.1.4 Desgaste corrosivo

Cuando el ambiente reacciona químicamente con las superficies, su contacto deslizante puede producir un desgaste corrosivo. Es un problema común en los rodamientos con película de aceite, donde posiblemente el aceite lubricante está oxidado y contaminado con agua. Los materiales más susceptibles a la corrosión son los que contienen plomo, cadmio, zinc, cobre y la plata especialmente está sujeta al ataque de azufre. Los principales culpables de su generación en metales ferrosos como engranajes, levas y rodamientos de bolas y rodillos son el agua y la humedad atmosférica.

3.1.1.5 Desgaste en polímeros

Los polímeros, en su mayoría, no se desarrollaron inicialmente para aplicaciones tribológicas, por lo que no se considera prioritario que presenten una elevada resistencia al desgaste. La superficie de los polímeros suele experimentar un daño severo y una tasa de desgaste elevada en su deslizamiento contra materiales más duros. Estos materiales se comportan mejor cuando deslizan contra metales que cuando lo hacen contra sí mismos, debido al mecanismo por el cual se forma una capa de transferencia del polímero al metal que puede tener un efecto autolubricante.

La superficie de los polímeros suele experimentar un daño severo y una tasa de desgaste elevada en su deslizamiento contra materiales más duros. Cuando dos superficies se aproximan, sus asperezas superficiales de mayor altura entran en contacto, al incrementar la carga, los nuevos pares de asperezas de menor altura presentan un empalme en determinados puntos, el área real de contacto (ARC), es la suma de las áreas de estos puntos. En el caso de los polímeros, deben tenerse en cuenta variables como la carga, la velocidad y la temperatura, los efectos de éstas últimas sobre la fricción de los polímeros se consideran similares. En general, el ARC disminuye con el aumento de la diferencia de temperatura entre dos cuerpos en contacto. Para materiales cuyo comportamiento mecánico depende del calor y de la atmosfera a la que son sometidos, se presentan

pérdidas no deseadas del material sólido debido a la interacción mecánica, o por medio de reacciones entre el material y su ambiente; como los polímeros, donde el módulo de elasticidad disminuye con estas condiciones, la reducción del ARC se puede ver compensada por el incremento debido a la pérdida de resistencia mecánica [17].

3.2 Recubrimientos híbridos

Un recubrimiento es el proceso y resultado de aplicar un material sobre la superficie de un sustrato para su protección, generalmente funge como defensa para mejorar la resistencia o durabilidad del elemento principal, ya sea como barrera al ambiente o protección de la superficie contra agresiones mecánicas; o para incrementar alguna de sus propiedades. Las técnicas de aplicación van desde deposición química de vapor, sistema de spray, brocha, técnicas electroquímicas, inmersión, hasta láser. Las dos propiedades requeridas para recubrimientos son principalmente buena adhesión y mejoramiento de la resistencia mecánica.

El proceso sol-gel, permite la fácil deposición de películas delgadas directamente de la solución por técnicas tales como inmersión, rotación o aspersion; es conocido por ser muy atractivo en el diseño de materiales híbridos orgánicos - inorgánicos. Los recubrimientos híbridos de éstos pueden combinar las calidades de ambos, estos materiales son utilizados para modificar el comportamiento funcional de componentes del vidrio o para proteger sustratos [18]. La implementación industrial de recubrimientos híbridos se debe a la gran variedad de precursores disponibles y un constante aumento del conocimiento de su reactividad durante el proceso sol-gel. Algunos ejemplos de éstos son los polímeros híbridos o nanocompuestos, en algunos casos incluso están disponibles comercialmente para la protección o modificación de plásticos transparentes, metales y vidrios por procedimientos de recubrimiento.

3.2.1 PMMA – SiO₂

El polimetilmetacrilato (PMMA) es un material termoplástico resistente y transparente en un rango de 400-2800nm absorbiendo el UV e infrarrojo con longitud de onda mayor a 2800nm y un índice de refracción de alrededor de 1.49 a 587.6nm [1]. Sin embargo, su escasa estabilidad térmica lo restringe de aplicaciones en regiones de temperaturas más altas [7].

El dióxido de silicio en forma cristalina forma lo que se conoce como cuarzo y es usado debido a su transparencia y dureza, sin embargo, una desventaja es su elevado costo ya que su fabricación requiere de muy alta temperatura. La sílice fabricada por método sol-gel es más económica pero el proceso hace que el material tienda a agrietarse y limita su aplicación principalmente a recubrimientos y películas delgadas.

De esta forma al sintetizar un material híbrido constituido por SiO₂ y PMMA se obtiene mayor flexibilidad y resistencia mecánica al compuesto, se facilita introducir otros componentes a la matriz híbrida como pigmentos orgánicos, iones, nanopartículas, entre otros, debido a la baja temperatura de síntesis. La versatilidad de los materiales híbridos radica en que sus propiedades pueden ser fácilmente ajustadas alterando la proporción de los constituyentes, como ajustar las ópticas, eléctricas y mecánicas; permitiendo así un gran control sobre las características del material [1].

3.2.2 Método sol – gel

El proceso sol-gel involucra una solución o sol que sufre una transición de sol a gel, usado para la síntesis de dispersiones coloidales de materiales inorgánicos o híbridos orgánico-inorgánico particularmente óxidos, se lleva a cabo mediante una reacción de hidrolización y una posterior polimerización, por medio de una serie de reacciones químicas. Este proceso involucra la evolución de redes inorgánicas a través de la formación de una suspensión coloidal (sol) y gelación del sol para formar una red en una fase líquida continua (gel). Es particularmente útil en la síntesis de óxidos metálicos complejos, híbridos orgánicos-inorgánicos sensibles a la temperatura y materiales metaestables. Brinda ciertas ventajas sobre otras formas de síntesis, el proceso se realiza a temperatura ambiente y permite alcanzar una gran homogeneidad a nivel molecular. Las aplicaciones y diversidad de materiales en los que se emplean la técnica comprende campos como, películas delgadas o recubrimientos, monolitos, fibras, compuestos, polvos, granos y esferas, geles porosos y membranas [1], [7], [18].

El agente de acople es el compuesto capaz de reaccionar químicamente tanto con el polímero como con el sustrato, en algunos casos se usan para reducir la separación de fases en la interfase entre la orgánica y la inorgánica para mejorar la adhesión entre ellas y aumentar la retención de propiedades bajo específicas circunstancias. En los sistemas compósitos convencionales, los agentes de acople pueden funcionar como un modificador del acabado, un sellador o como un adhesivo dependiendo del espesor del material enlazado en la interfase. Los agentes de acople del tipo silano tienen la

habilidad de formar un doble enlace entre materiales orgánicos e inorgánicos. Los agentes con tres grupos alcoxi son el punto de partida usualmente para la modificación de superficies. Estos materiales tienden a depositarse como una película polimérica, mostrando una cobertura total y maximizando la presencia de funcionalidad orgánica. Algunas características de este tipo de materiales se muestran en la Tabla 2; siendo utilizados principalmente en compósitos, adhesivos, sellos y recubrimientos [18].

Tabla 2. Ventajas, desventajas y aplicaciones de la técnica de sol-gel [18].

Ventajas de la Técnica Sol-Gel	Desventajas de la Técnica Sol-Gel	Aplicaciones de Películas y Recubrimientos
1. Mejor homogeneidad a partir de la materia prima.	1. Alto costo de las materias primas.	1. Recubrimientos ópticos. Coloreados Antireflectivos Optoelectrónicos Memorias ópticas
2. Mejor pureza a partir de la materia prima.	2. Gran encogimiento durante el proceso.	2. Recubrimientos electrónicos. Foto ánodos Superconductores de alta temperatura Conductividad Ferroeléctrico-Electro-óptico
3. Menor temperatura de preparación: a. Ahorro de energía; b. Minimización de las pérdidas por evaporación; c. Minimización de la contaminación del aire; d. No hay reacción con los contenedores, lo que implica pureza. e. El impedimento de la separación de fases. f. El impedimento de la cristalización.	3. Poros finos residuales.	3. Recubrimientos Protectores. Resistentes a la corrosión Mecánico Aplanamiento Rayado y vestidura resistente Tencionamiento Promoción de la adhesión Pasivación (electrónica)
4. Nuevos sólidos no-cristalinos fuera del rango normal de la formación de vidrio.	4. Hidroxi residual.	4. Recubrimientos porosos.
5. Nuevas fases cristalinas a partir de los sólidos no-cristalinos.	5. Carbón residual.	5. Recubrimientos diversos.
6. Mejores productos vítreos a partir propiedades especiales del gel.	6. Soluciones orgánicas peligrosas para la salud..	
7. Productos especiales como las películas.	7. Largos tiempos de procesado.	

3.2.3 Grafeno

El grafeno es una forma alotrópica del carbono conceptualmente visto como una lámina bidimensional compuesta de átomos de carbono unidos en una estructura hexagonal, puede clasificarse de acuerdo al número de capas que presenta; grafeno monocapa, grafeno de doble capa y grafeno de algunas pocas capas (<10). Posee excelentes propiedades debido a que está formado

por solo una capa atómica de átomos de carbono enlazados por una hibridación de tipo sp². Sus propiedades han impulsado su uso como material de refuerzo para la fabricación de compósitos laminados reforzados con fibras [19].

Los polvos de grafito se utilizan como aditivos para reducir el desgaste porque presentan una baja fricción, soportando altas temperaturas, por lo que, se emplean en el engrasado de partes metálicas en un régimen de lubricación límite. Su estructura en capas facilita el deslizamiento, dando lugar a una fricción muy baja, especialmente en ambientes acuosos, consiguiendo ser un excelente aditivo en aplicaciones que transcurren bajo el agua, como los contadores de agua, válvulas marinas, etc. Los coeficientes de fricción y desgaste disminuyen alcanzando valores intermedios entre el del material base y los obtenidos cuando se añade una mezcla polimérica [17].

3.2.4 Grafito

El carbono es un elemento muy ligero con una densidad igual a 2.268 g/cm³. El carbono en forma de grafito es altamente anisotrópico, con un módulo de Young teórico en el plano de la capa igual a unos 1000 GPa, mientras que a lo largo del eje *c* es igual a unos 35 GPa. La estructura de grafito (Figura 2) tiene un empaquetamiento muy denso en los planos de las capas. La estructura reticular se muestra más claramente en la Figura 2 b). La fuerza de unión determina el módulo de un material, por lo tanto, el enlace de alta resistencia entre los átomos de carbono en el plano de la capa da como resultado un módulo extremadamente alto, mientras que el enlace débil de tipo Van der Waals entre las capas vecinas da como resultado un módulo más bajo en esa dirección [20].

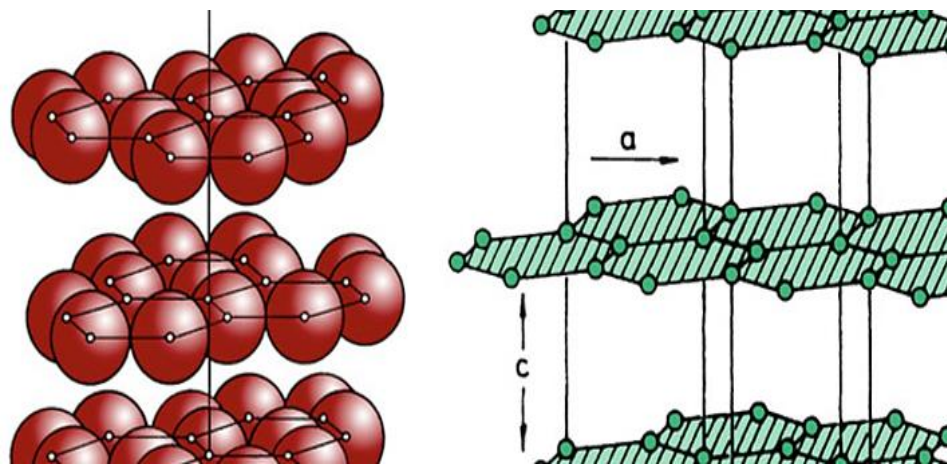


Figura 2. a) Estructura de la capa de grafito, b) estructura reticular hexagonal del grafito [20].

3.3 Materiales compuestos

La obtención de un material con propiedades únicas, se logra tras la combinación de dos o más materiales, que se diferencian en función, forma o composición, destacando ciertas características aportadas por las fases constituyentes, con el fin que el conjunto satisfaga una condición específica. Para que un material sea considerado compuesto tiene que cumplir con las siguientes características: constar de dos o más materiales químicamente distintos y separables mecánicamente. Ser fabricado al mezclar los materiales constituyentes, de tal forma que, para alcanzar unas características óptimas en la dispersión de un material, es necesario que sea controlada. Las propiedades del compuesto deben ser superiores a las de los componentes individuales, y posiblemente únicas en algún aspecto específico.

Los materiales compuestos son crecientemente utilizados debido a sus propiedades como la resistencia mecánica relacionada a la densidad y tenacidad, como se muestra en la Tabla 3, un material compuesto puede contener otros componentes como recubrimientos y rellenos [3].

Tabla 3. Propiedades de los materiales compuestos con base en los diferentes sectores de aplicación [3].

	Aeronáutica	Automotriz	Ferrocarriles	Construcción	Industria	I. naval	Medicina	Electricidad y electrónica	Deportes
Vida útil									
Rigidez				x		x	x	x	x
Resistencia mecánica				x	x	x	x		x
Resistencia a la fatiga	x					x			
Resistencia a la corrosión	x	x		x		x	x	x	
Impermeabilidad				x	x				
Seguridad									
Resistencia a los choques		x				x	x		x
Resistencia al fuego	x		x	x	x			x	
Aislamiento térmico				x	x			x	
Aislamiento eléctrico								x	
Amortiguamiento, vibraciones					x				x
Diseño									
Integración de funciones	x	x						x	
Formas complejas	x	x	x	x					x
Transparencia ondas electromagnéticas								x	
Disminución del peso de las estructuras	x	x							x

Los componentes de un material compuesto están constituidos por dos fases diferentes a nivel atómico o molecular, la matriz y el refuerzo; al área de conexión se le llama interfaz (Figura 3).

La matriz interviene en propiedades mecánicas, físicas, químicas y eléctricas del compuesto, proporciona continuidad y consistencia, sujetando los elementos de refuerzo, protegiéndolos de la abrasión, y transfiriéndoles las cargas. Existen tres tipos principales; metálica, cerámica y polimérica. Para una adecuada absorción sobre el refuerzo, la inspección del grado de impregnabilidad, capacidad de la matriz en estado líquido para extenderse en una superficie sólida, repercute de manera directa. Las resinas epoxi se hallan entre los compuestos más utilizados dentro del grupo de los materiales poliméricos, el gran interés radica en la variedad extremadamente amplia de reacciones químicas en las que pueden tomar parte, así como la amplia cantidad de materiales que pueden ser utilizados como agentes de curado, lo que, en relación con el epóxido y las condiciones del proceso, da lugar a las propiedades del polímero final [17].

El refuerzo soporta la carga, aporta propiedades al compósito mejorando sus características, estos llegan a ser de tres tipos [3]:

- **Partículas:** tamaño grande o consolidadas por dispersión con diámetros que van de los 10 a 100 nanómetros (nm), generalmente óxidos metálicos. La matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una fracción de la carga, dificultando el movimiento de dislocaciones. De la adhesión matriz-partículas depende el grado de refuerzo o mejoramiento del comportamiento mecánico. Las partículas no constituyen un refuerzo eficiente desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, es muy usado para mejorar otras propiedades o para incorporar características multifuncionales en un material.
- **Fibras:** de las más empleadas por proporcionar cualidades en relación a la fatiga, rigidez y resistencia peso, se agrupan en whiskers, monocristales delgados con una grande relación longitud diámetro, contando con alto grado de perfección cristalina; fibras, materiales policristalinos o amorfos, tienen diámetros pequeños y poseen gran longitud siendo polímeros, cerámicos y naturales; y alambres con diámetros grandes, típicamente de acero, molibdeno y wolframio. Las propiedades de estos compósitos dependen de la longitud, diámetro, orientación, cantidad y propiedades mecánicas de las fibras.
- **Laminados:** los elementos estructurales dependen tanto de las propiedades del material como de la geometría y dirección durante la consolidación del material. Las láminas son apiladas y afianzadas, dependiendo las propiedades deseadas es la orientación entre cada

capa. En algunas ocasiones se busca que haya un material ligero de relleno, como una espuma de polímero, obteniendo un compuesto con propiedades especiales.

La interfaz tiene que responder la unión entre los constituyentes del material, dependiendo de ésta, la carga aplicada al compósito se transmitirá de la matriz a los refuerzos. La unión puede ser mecánica, electrostática, química o mediante interdifusión. En el caso de una matriz polimérica reforzada con fibras, estas deben de estar sólidamente conectadas, por ejemplo, las fibras de vidrio son recubiertas con agentes de acople y tratamientos superficiales para mejorar su unión y resistencia. Cuando el refuerzo está estrechamente unido a la matriz; la interfaz es buena [2].

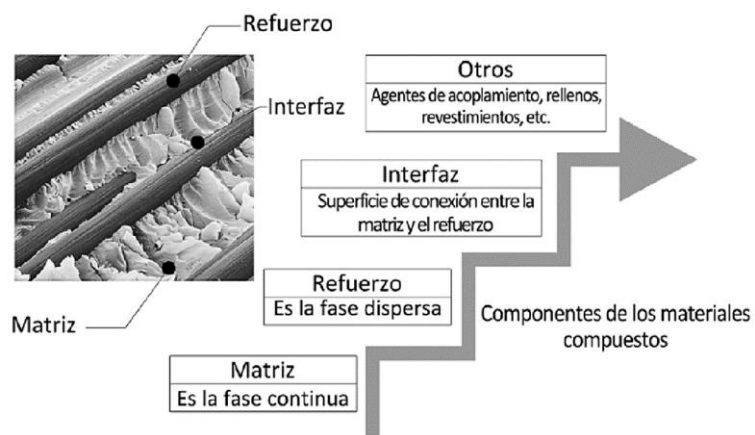


Figura 3. Propiedades de los materiales compuestos con base en los diferentes sectores de aplicación. Componentes de los materiales compuestos [3].

3.3.1 Materiales híbridos

La definición de estos materiales se ramifica en que un material compuesto se denomina híbrido cuando se utiliza más de un tipo de material de refuerzo, o que es la combinación de dos o más materiales ensamblados con una configuración y escala predeterminada, de tal forma que se generen propiedades o atributos que no son ofrecidos por ninguno de los componentes por sí solos.

3.3.1.1 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es un nombre genérico, se encuentran disponibles comercialmente en diferentes composiciones químicas. Las más comunes tienen una base de sílice (~50–60% SiO₂) y contienen una serie de otros óxidos de calcio, boro, sodio, aluminio y hierro, por ejemplo. Usualmente se

emplean para el refuerzo de resinas de poliéster, epoxi y fenólicas. La humedad disminuye su resistencia, de igual manera son susceptibles a la fatiga estática, cuando se someten a una carga constante durante un período de tiempo prolongado, las fibras de vidrio pueden sufrir un crecimiento subcrítico de grietas. Provocando fallas con el tiempo en cargas que podrían ser seguras al considerar la carga instantánea [20].

3.3.1.2 Fibra de carbono

La fibra precursora orgánica, la materia prima de la fibra de carbono, es generalmente una fibra polimérica textil especial que se puede carbonizar sin fundirse. La fibra precursora, como cualquier fibra polimérica, consta de moléculas de cadena larga (0.1–1 mm cuando está completamente estirado) ordenados de manera aleatoria. Tales fibras poliméricas generalmente tienen malas propiedades mecánicas y típicamente muestran deformaciones bastante grandes a bajas tensiones, principalmente porque las cadenas poliméricas no están ordenadas. La mayoría de las técnicas de procesamiento de fibra de carbono tienen como objetivo obtener un grado muy alto de orientación preferencial de los planos hexagonales a lo largo del eje de la fibra.

3.3.2 Aplicaciones

En la industria marina, al igual que en el resto de áreas de la ingeniería, lo que se busca en la arquitectura naval es una estructura lo más ligera posible, esta industria utiliza compósitos para ayudar a que los cascos sean más livianos y resistentes a los daños. Debido a su ligereza y resistencia a la corrosión, las aplicaciones marinas incluyen desde cascos de embarcaciones, mamparos, cubierta, mástil, hélice y otros componentes para embarcaciones comerciales, recreativas y militares; hasta molduras interiores y muebles en yates [21].

En el sector aeroespacial, empresas de aviación como Airbus y Boeing han demostrado que la utilización de materiales compuestos tiene un gran potencial en este sector, así como su amplia gama de variedades que se pueden lograr, ya que la NASA constantemente busca enfoques innovadores con los fabricantes. Se emplean materiales compuestos ablativos y de matriz de cerámica en sistemas de protección térmica de naves espaciales, satélites, superficies aerodinámicas, componentes de propulsión en la manufactura y/o revestimiento; como puertas de compartimentos de motores, estructuras de transmisión de helicópteros, motores a reacción, motores de cohetes, aspas de ventiladores, palas de compresores, palas de turbina, ejes de turbina

y ejes de rotor en helicópteros. Con matriz metálica destacan elementos estructurales como el armazón y las riostras en el compartimiento de la carga de transbordadores espaciales y satélites, así como, en el mástil de antenas de telescopios. De manera general hay varias otras aplicaciones, por ejemplo, radares, volantes, reflectores solares, alas, configuración de caja de ala, mamparos con termo endurecimiento, entre otras [2], [21].

Los materiales compuestos se encuentran cada vez más en aplicaciones electrónicas, debido a sus propiedades dieléctricas; incluida la resistencia a la pista, conductos y blindajes de arco, así como su conductividad eléctrica. Son empleados en soportes de barras y componentes de iluminación, disyuntores, conectores del sistema de control, dispositivos de medición, antenas de microondas, controles de motor, aisladores de separación, separadores y hardware de línea de postes y tableros de cableado impreso, equipo de subestación, bloques y tableros de terminales [21].

En el área de electrodomésticos o negocios, partiendo de la flexibilidad en el diseño y el procesamiento de los materiales compuestos, estos reflejan una excelente alternativa a las aleaciones metálicas y polímeros en los electrodomésticos. La función y el diseño dentro de esta área, están sujetos tanto a los avances tecnológicos como a los gustos cambiantes del consumidor. Los ejemplos representativos son lavavajillas, secadoras, congeladores, hornos, estufas, refrigeradores, lavadoras, paneles de equipos, marcos, manijas y accesorios, herramientas eléctricas, consolas, paneles de control, placas de protección, perillas, carcasas de motores, soportes para estantes, molduras laterales y de ventilación [21].

En deportes, los compósitos reforzados con fibra, como la fibra de carbono y de vidrio, tienen aplicaciones en la producción y la fabricación de equipos deportivos livianos, observándose en cuadros de bicicleta, trineos, bastones de pesca, cascos de fútbol, palos de hockey, barras horizontales, tablas de salto, kayaks, barras paralelas, raquetas de tenis, remo; proporcionando equipos duraderos y ligeros [21].

Siendo el sector automotriz uno de los mercados más grandes de materiales compuestos, partiendo de la reducción del peso para un vehículo más liviano y eficiente en el consumo de combustible. Los materiales compuestos se utilizan en interiores, cojinetes, carrocerías, bielas, cigüeñales, cilindros, motores, discos para el sistema de frenado, en la cabeza de pistones como revestimiento incrementando la eficiencia térmica y la dureza. En sistemas de protección contra munición explosiva de vehículos militares.

Las espumas metálicas reforzadas con materiales de cenizas, volantes; subproductos de la combustión de carbón en centrales térmicas, o metálicas; esferas huecas, son excelentes para absorber energía, debido a su alta capacidad de deformarse mientras sus esfuerzos mecánicos se mantienen relativamente estables. En la industria de los fabricantes de motores, la matriz cerámica reforzada con fibras es de las más usadas, porque proporciona ligereza y resistencia al choque térmico tras las altas temperaturas de operación [2], [21].

4. METODOLOGÍA

Los métodos que se usarán para el desarrollo del proyecto es el analítico y experimental, debido a que se integran elementos disipados para su estudio en totalidad, a partir de la observación, requerimientos, expectativas y experimentación; se sustenta la obtención de la familia de recubrimientos propuestos en este trabajo. A continuación, se presenta en la Figura 4 el diagrama de bloques las etapas de la metodología que se aplicarán en la presente propuesta.

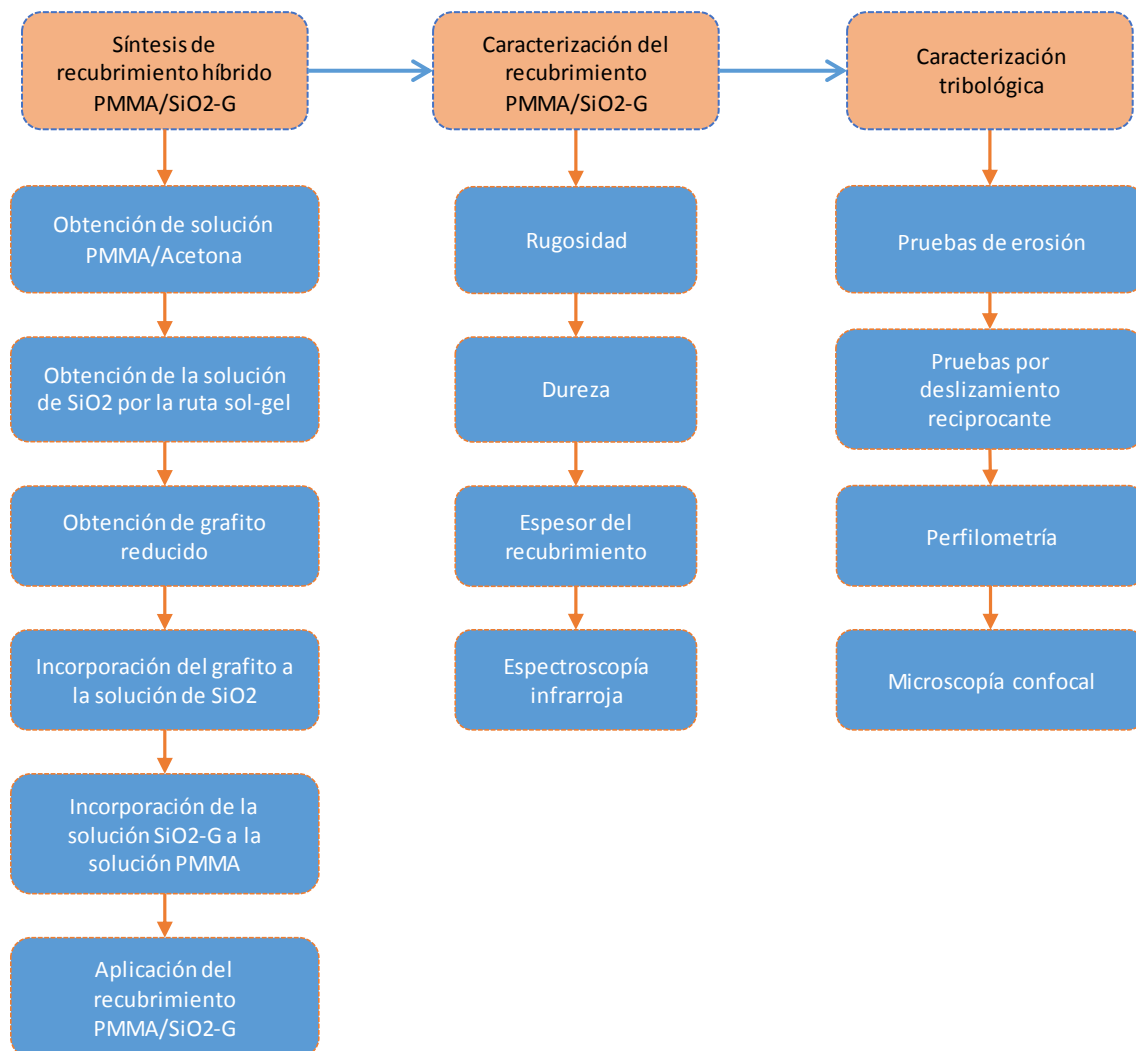


Figura 4. Etapas de la metodología.

4.1 Síntesis de recubrimiento híbrido PMMA/SiO₂-G

Se utilizó un material compuesto de matriz de resina epóxica reforzado con fibras de carbono con tejido bidireccional 0/90°, obtenido por el proceso de transferencia de resina moldeada (RTM) fabricado en el Centro Nacional de Tecnologías Aeronáuticas (CENTA); ortosilicato de tetraetilo y polimetilmetacrilato con peso molecular promedio (PM) = 350 000 g/mol marca *Sigma-Aldrich*; acetona, *High Purity*; etanol, *Hycel*; agua destilada; y grafito en polvo de alta pureza, malla 325 (45 µm). En el laboratorio de posgrado del Instituto Tecnológico de Pachuca (ITP) se realizaron todas las preparaciones de las soluciones precursoras.

4.1.1 Obtención de solución PMMA/Acetona

En 50 ml de acetona se agregaron 1.67 gramos de polimetilmetacrilato (PMMA), se dejó en agitación magnética y 50 °C (Figura 5) durante treinta minutos, obteniendo una solución fluida, homogénea y transparente.

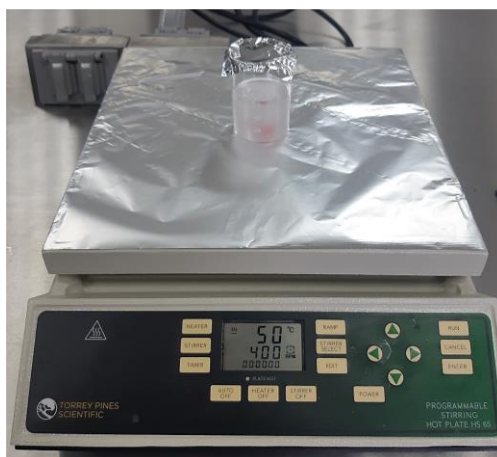


Figura 5. Solución PMMA/Acetona.

4.1.2 Obtención de la solución de SiO₂ por la ruta sol-gel

Para la obtención del SiO₂, a partir de la ruta de sol-gel se utilizó ortosilicato de tetraetilo (TEOS), agua destilada (H₂O), etanol (EtOH) y como catalizador ácido clorhídrico (HCl) a 0.5 moles. A temperatura ambiente se preparó en agitación magnética constante durante veinte minutos una solución de 10 ml de TEOS y 40 ml de EtOH, posteriormente se incorporó 33.3 ml de H₂O dejando en agitación durante cinco minutos y se finalizó agregando 1 ml de HCl (0.5 M), después de diez

minutos de agitación se logró una solución transparente de TEOS: EtOH: H₂O con una relación 10: 40: 33.3 (Figura 6).



Figura 6. Solución SiO₂ por ruta sol-gel.

4.1.3 Obtención de grafito reducido

En un molino de alta energía, en el laboratorio de mecánica aplicada de la Universidad Politécnica de Pachuca (UPP), se procesaron 5 gramos de grafito para su refinamiento (Figura 7), los cuales se incorporaron en el interior de un contenedor de acero 4140 junto con seis bolas de acero inoxidable de 12.7 mm, continuando con el proceso de molienda durante noventa minutos a 1200 RPM.

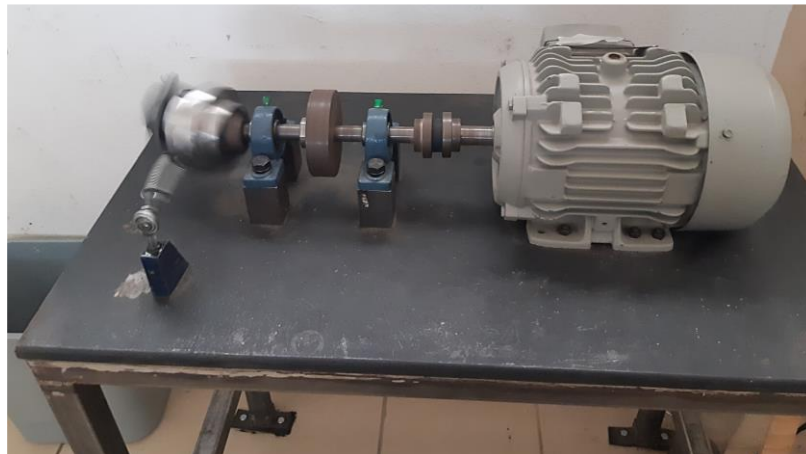


Figura 7. Molino de alta energía.

4.1.4 Incorporación del grafito a la solución de SiO₂

A lo largo de veinte minutos mediante agitación magnética, se llevó a cabo la incorporación del grafito refinado a la solución de SiO₂ por porcentaje de volumen, partiendo de un 10, 5 y 2.5% mostrando sobresaturación al incorporarlo a la solución PMMA; con 2%, aproximadamente 0.02g; se observó una dispersión homogénea en la solución híbrida, permitiendo determinar las relaciones de volumen a utilizar; uno y dos por ciento (Figura 8).

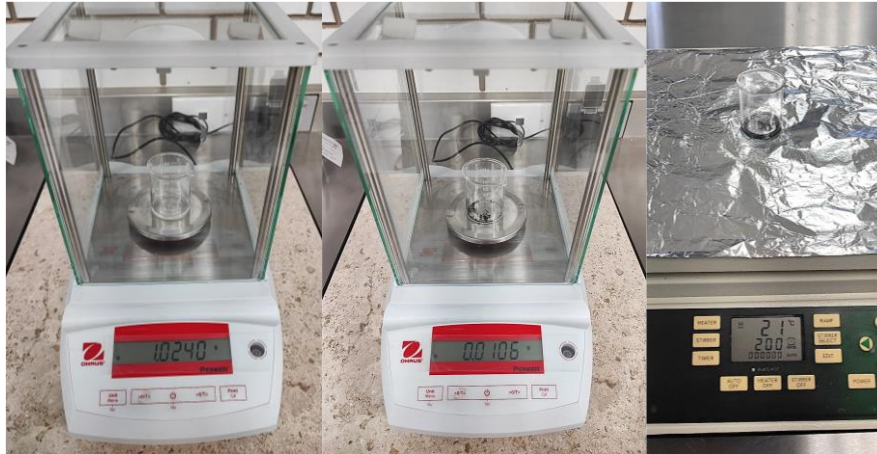


Figura 8. Incorporación del grafito a la solución de SiO₂.

4.1.5 Incorporación de la solución SiO₂-G a la solución PMMA

La incorporación de la solución precursora de SiO₂ en la de PMMA se realizó a temperatura ambiente, de manera pausada y en constante agitación durante treinta y cinco minutos, obteniendo una composición transparente. Se realizaron tres concentraciones distintas de PMMA/SiO₂ en relación de volumen como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentración en relación de volumen (v/v) de la solución PMMA/SiO₂.

Concentración	PMMA	SiO ₂
100PMMA/0SiO ₂	100	0
95PMMA/5SiO ₂	95	5
90PMMA/10SiO ₂	90	10

Partiendo de las tres soluciones se seleccionó la que presentó menor pérdida de masa durante las pruebas de erosión que se describen en la sección 4.3.1, siendo la que demostró mejor resistencia al desgaste y con la finalidad de optimizar el uso de los materiales de partida; en este caso, con base al criterio de selección, la solución 90PMMA/10SiO₂ será la utilizada para la incorporación de grafito. La adición de SiO₂-G en la solución PMMA se llevó a cabo a temperatura ambiente, de forma gradual y en agitación magnética durante quince minutos finalizando con cinco minutos en ultrasonido (Figura 9).

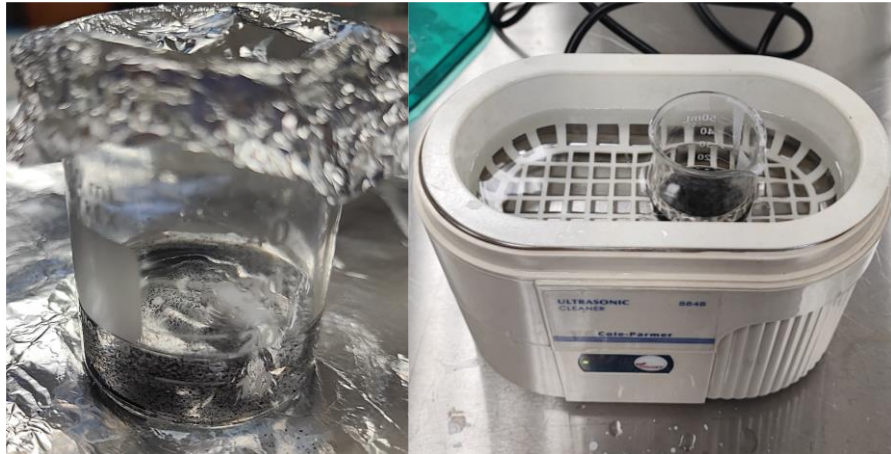


Figura 9. Solución híbrida 90PMMA/10SiO₂-G.

Se obtuvieron cuatro recubrimientos a los que se les asignó el nombre de acuerdo con el material compuesto, en este caso fibra de carbono; la solución híbrida 90PMMA/10SiO₂ a la cual se le dio el nombre SH-P/S; la masa de grafito que no presenta saturación en la solución SiO₂ (valores menores al 2% en relación de volumen); y al número de inmersiones. Como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Recubrimientos híbridos con grafito.

Recubrimiento	Sustrato	Solución híbrida	Grafito (G)	Número de inmersiones (inn)
FC-SH-P/S-1G-1inn	Fibra de carbono (FC)	90PMMA/10SiO ₂ (SH-P/S)	0.01	1
FC-SH-P/S-1G-2inn				2
FC-SH-P/S-2G-1inn			0.02	1
FC-SH-P/S-2G-2inn				2

4.1.6 Aplicación del recubrimiento PMMA/SiO₂-G

Se utilizó fibra de carbono de tipo petatillo con tejido bidireccional 0/90° como sustrato para depositar los recubrimientos. Se obtuvieron probetas de 2 x 5 x 0.5 cm para las primeras pruebas de erosión, las cuales permitieron determinar la solución a la que se le agregara el grafito; de 2 x 5 x 0.3 y 1.7 x 1.7 x 0.3 cm para las pruebas de erosión de la SH-P/S-G y las de deslizamiento recíprocante, respectivamente.

Para retirar grasa y suciedad superficial se limpiaron los sustratos dentro de un vaso de precipitado con agua destilada y jabón líquido utilizando una *tina ultrasónica Cole-Parmer 8848* con una frecuencia de 40 kHz (Figura 10).

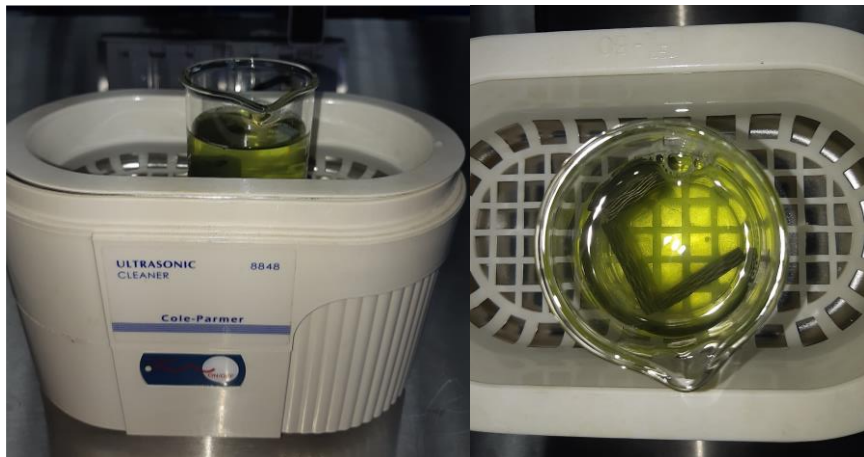


Figura 10. Limpieza de los sustratos.

La aplicación de los recubrimientos PMMA/SiO₂ en los sustratos de fibra de carbono previamente lavados, se llevó a cabo utilizando un *inmersor vertical con cámara de temperatura* del laboratorio de Posgrado del ITP (Figura 11). Se desplazaron las probetas a una velocidad de 2.5 mm/s dejándolas sumergidas en las soluciones durante un minuto, una vez aplicado el recubrimiento se secaron a 50 °C por quince minutos. En el caso de las soluciones de PMMA/SiO₂-G para evitar la precipitación de las partículas de grafito y por lo tanto para asegurar una buena dispersión durante el proceso de aplicación, se colocó la tina de baño ultrasónico en el inmersor.

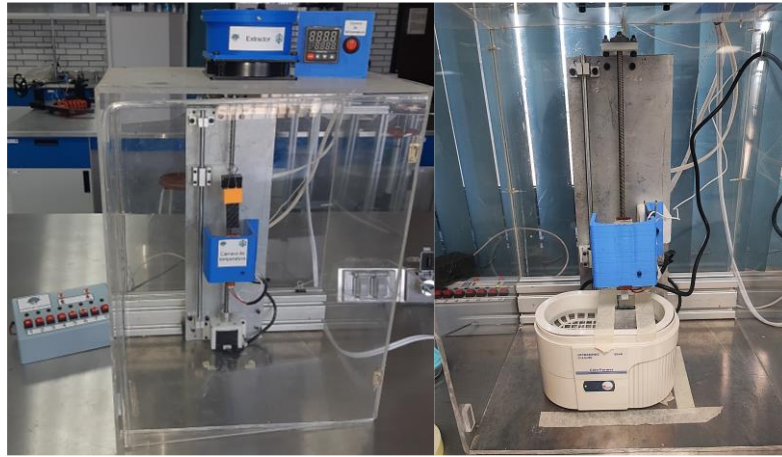


Figura 11. Inmersor de velocidad variable.

4.2 Caracterización del recubrimiento PMMA/SiO₂-G

4.2.1 Rugosidad

Se determinó la rugosidad media (μm) de la fibra de carbono y recubrimientos en un *rugosímetro / perfilómetro modelo SJ-410 marca Mitutoyo* (Figura 12), el cual se encuentra instalado en el laboratorio de Posgrado del ITP. Las mediciones se llevaron a cabo bajo las siguientes condiciones: Norma ISO 1997, una velocidad de 0.2 mm/s y un recorrido de 5 mm.

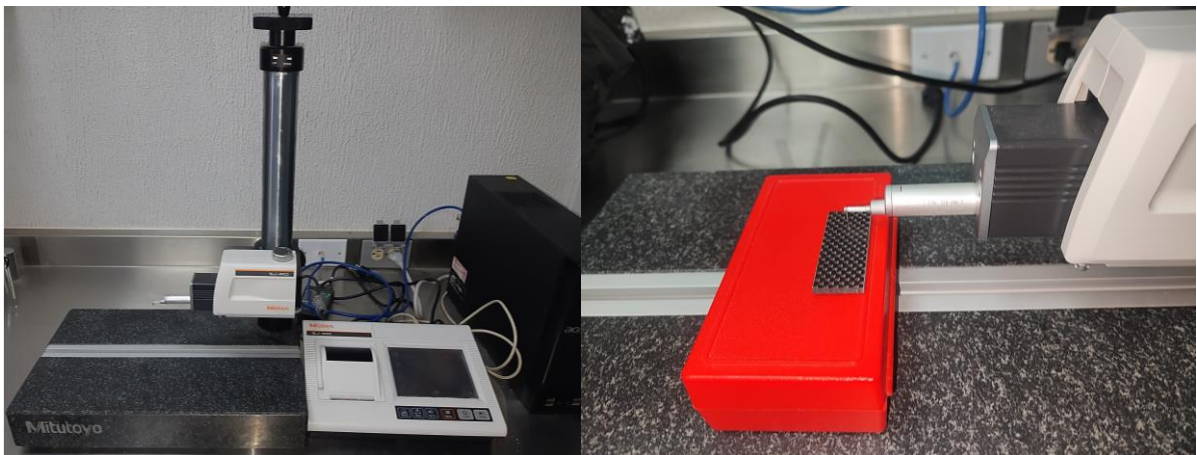


Figura 12. Rugosímetro / perfilómetro modelo SJ-410, Mitutoyo.

4.2.2 Dureza

La dureza de las muestras de fibra de carbono y los recubrimientos se determinó en un *durómetro Shore-D* del laboratorio de Posgrado del ITP y un *microdurómetro Vickers 412 DAT, Bowers* con carga de un gramo localizado en laboratorio de mecánica aplicada de la UPP (Figura 13).



Figura 13. Durómetro Shore D y Micro-Vickers Hardness 412 DAT, Bowers.

4.2.3 Espesor del recubrimiento

Para obtener el espesor de la película se generó un escalón con una cinta adhesiva (Figura 14) durante el proceso de aplicación en la parte superior del sustrato, con la finalidad de generar una diferencia de alturas en la superficie, posteriormente se analizó con el perfilómetro los cambios detectados.



Figura 14. Obtención del escalón de la película.

4.2.4 Espectroscopía infrarroja

El análisis por un *espectrofotómetro de infrarrojo*, más conocido como *FTIR* (acrónimo proveniente del inglés Fourier-transform infrared spectroscopy) es una herramienta versátil para analizar la naturaleza de los enlaces y los diferentes grupos funcionales presentes en una muestra mediante el seguimiento de los niveles de energía vibratoria. En el presente estudio, se ha utilizado para comprobar los grupos funcionales presentes los recubrimientos híbridos.

Se trabajó con el *modelo Spectrum GX de la marca Perkin Elmer* con reflectancia total atenuada, también denominado ATR (Attenuated Total Reflection) con punta de diamante y seleniuro de zinc (ZnSe); como se muestra en la Figura 15; se realizaron 24 barridos, 4 cm⁻¹ de resolución. Estas condiciones permiten realizar la medición directamente de la superficie del sustrato, así como del recubrimiento. Este equipo se encuentra disponible en el Laboratorio Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Recubrimientos Avanzados (LIDTRA) del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav) unidad Querétaro.



Figura 15. Espectrofotómetro de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) modelo Spectrum GX, Perkin Elmer.

4.3 Caracterización tribológica

4.3.1 Pruebas de erosión

Se utilizó la máquina de erosión horizontal del laboratorio de pruebas mecánicas del ITP (Figura 16); aplicando como partícula erosiva arena de mar a una velocidad promedio de 6 m/s, la cual está relacionada a las velocidades registradas en parques eólicos que varían de 6 a 12 m/s; una salida con boquilla de sección circular de diámetro interior de 7.99 mm separada 10 mm de la muestra; y un ángulo de impacto de 90°, porque es el que genera mayor desgaste [15].

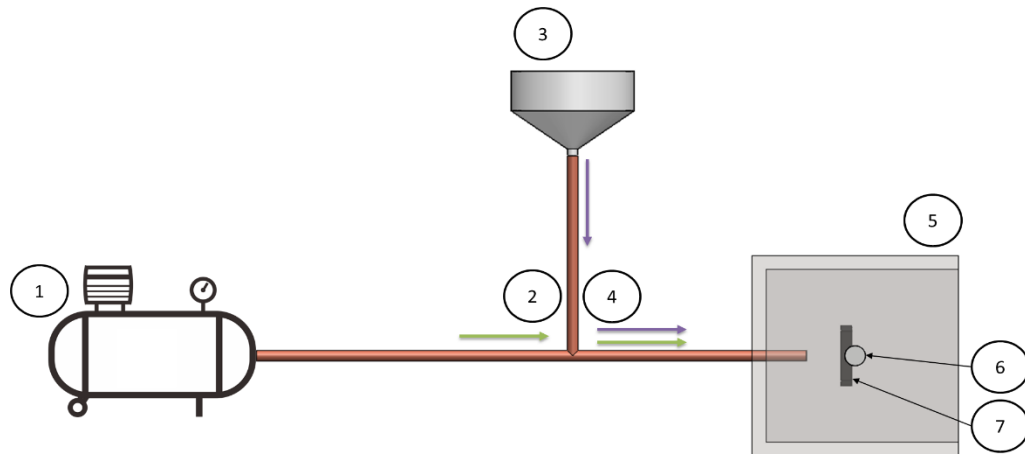


Figura 16. Esquema de la máquina de erosión. (1) Compresor, (2) Flujo de aire, (3) Recipiente de partícula erosiva, (4) Flujo de aire y partícula, (5) Cámara de erosión, (6) Eje y (7) Muestra.

Antes de iniciar con la prueba se obtuvo la masa inicial de las muestras en una *balanza analítica modelo PX124/E Pioneer, 120g x 0.0001g, marca OHAUS*. Posteriormente se colocó la probeta en la cámara de erosión para realizar el ensayo durante un minuto, se retira y limpia para la medición de su masa, este proceso se repitió hasta completar diez minutos en las pruebas con las soluciones PMMA/SiO₂ y en base a los resultados se redujo a seis minutos para las SH-P/S-G, determinando la pérdida de masa de los materiales evaluados. Se realizaron tres pruebas por muestra (Figura 17).



Figura 17. Máquina de erosión horizontal.

4.3.2 Pruebas por deslizamiento recíprocante

Las pruebas se realizaron en la máquina de movimiento recíprocante instalada en el laboratorio de pruebas mecánicas de posgrado del ITP (Figura 18), se utilizó un pin esférico de acero inoxidable 440C con un diámetro de 4.75 mm contra la superficie de la fibra de carbono y de los recubrimientos en condiciones secas. Para asegurar el desgaste de los materiales de interés se aplicaron las condiciones de prueba de la Tabla 6. Se realizaron tres pruebas por muestra determinando la masa antes y después de cada ensayo en la *balanza analítica modelo FA2204, 220g x 0.0001g, marca LHABO*.

Tabla 6. Condiciones de las pruebas por deslizamiento.

Atmosfera de la prueba	Presión Hertziana (GPa)	Carga (N)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (mm)	Ciclos
25-30 °C y 40-45% de humedad relativa	2	15.009	3.5	8	3150

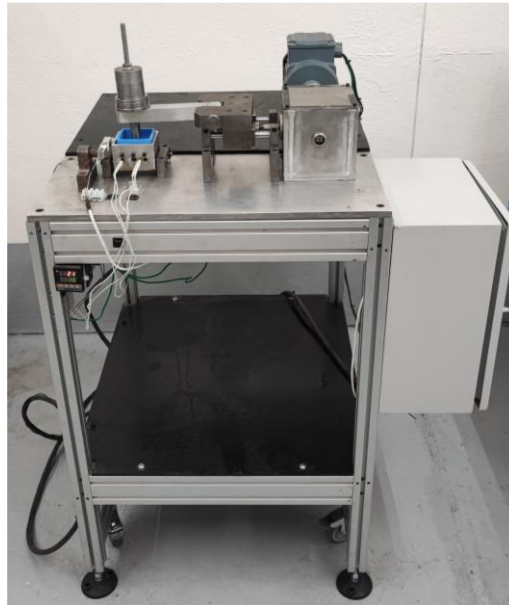


Figura 18. Máquina de deslizamiento recíprocante.

4.3.3 Perfilometría

Para determinar el perfil de huella de desgaste se utilizó el perfilómetro del laboratorio de Posgrado del ITP (Figura 12) aplicando la Norma ISO 1997 y una velocidad de 0.2 mm/s. Para las muestras sometidas a pruebas de erosión, se obtuvo el perfil identificando la huella con mayor profundidad en la parte central. En el caso de los resultados de las pruebas por deslizamiento recíprocante, se llevó a la determinación del perfil a lo largo y ancho de la huella.

4.3.4 Microscopía confocal

Para el cálculo de la pérdida de volumen y la determinación de los mecanismos de desgaste en las pruebas por erosión, se utilizó un *microscopio digital modelo DSX1000: High-Resolution, Olympus* (Figura 19). Este equipo se encuentra disponible en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) unidad Querétaro.



Figura 19. Microscopio digital modelo DSX1000: High-Resolution, Olympus.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Caracterización de materiales

5.1.1 Propiedades superficiales

A partir de la Tabla 7, se observó que la matriz de fibra de carbono muestra menor rugosidad y dureza que los recubrimientos debido a que se obtuvo por el proceso de fabricación de moldeo por transferencia de resina (Resin Transfer Moulding – RTM) [22], [23]. Con respecto a los resultados de los recubrimientos, se presentaron variaciones en los valores de rugosidad, dureza y espesor, debido a su composición. Para el caso de rugosidad, en FC-100PMMA/0SiO₂ se muestra la menor magnitud, mientras que en los recubrimientos con SiO₂ se incrementó, siendo el mayor en FC-95PMMA/5SiO₂. El efecto del SiO₂ de FC-95PMMA/5SiO₂ y FC-90PMMA/10SiO₂ también se apreció en el incremento de las magnitudes de la dureza Shore-D, Vickers y del espesor comparadas con las de FC-100PMMA/0SiO₂.

Tabla 7. Propiedades superficiales (soluciones PMMA/SiO₂).

Muestra	Rugosidad (μm)	Desviación estándar (σ)	Dureza				Espesor (μm)	(σ)
			Shore D	(σ)	Vickers	(σ)		
FC	0.077	0.025	91.185	1.272	32.771	0.844	–	–
FC-100PMMA/0SiO ₂	0.216	0.031	90.737	1.306	22.578	1.893	0.843	0.374
FC-95PMMA/5SiO ₂	0.244	0.041	90.765	1.048	23.288	2.281	1.055	0.398
FC-90PMMA/10SiO ₂	0.229	0.030	90.941	1.488	23.225	2.255	1.044	0.351

Como se mencionó en la sección de metodología 4.1.5, la solución 90PMMA/10SiO₂ fue seleccionada para la incorporación del grafito por sus propiedades.

Existe una variación en la FC con la tabla anterior debido al espesor de las probetas, mencionado en la sección 4.1.6. En la Tabla 8 se observó que los recubrimientos presentan rugosidades inferiores a la FC, siendo el FC-SH-P/S-2G-1mm el de menor valor; para el caso de dureza la FC es la que cuenta con las mayores magnitudes en ambas mediciones, sin embargo la diferencia con los recubrimientos no es muy amplia.

El incremento en el espesor de película en FC-SH-P/S-1G-1mm respecto a FC-90PMMA/10SiO₂ se debe a causa de la presencia de las partículas de grafito, en cuanto a las otras películas el aumento es gradual correspondiente por el porcentaje y las inmersiones realizadas; un factor que se

considera que puede afectar el cambio en la rugosidad y del espesor de los recubrimientos es el baño ultrasónico incorporado al inmersor.

Tabla 8. Propiedades superficiales (SH-P/S-G).

Muestra	Rugosidad (μm)	(σ)	Dureza				Espesor (μm)	(σ)
			Shore D	(σ)	Vickers	(σ)		
FC	0.274	0.067	90.875	1.448	22.108	2.422	–	–
FC-SH-P/S-1G-1inn	0.260	0.069	90.083	0.996	15.283	1.307	1.528	0.360
FC-SH-P/S-1G-2inn	0.274	0.051	90.083	0.875	14.933	0.799	1.546	0.150
FC-SH-P/S-2G-1inn	0.231	0.045	91.000	0.875	13.417	0.870	1.578	0.428
FC-SH-P/S-2G-2inn	0.246	0.060	90.542	0.988	13.575	0.747	1.948	0.478

5.1.2 Espectroscopia infrarroja (FTIR)

Los espectros FTIR de la FC, FC con un recubrimiento de PMMA, PMMA-SiO₂ y las SH-P/S-G se muestran en la Figura 20. En el caso de *a*) material compuesto de matriz de resina epóxica reforzada con fibras de carbono, entre las diversas bandas de absorción que se pueden observar en sus espectros, destaca la banda a 826 cm⁻¹ que se refiere al anillo epoxi, así como las que se encuentran en ~3000 cm⁻¹ atribuidas al estiramiento de CH en el anillo aromático. La banda a 1034 cm⁻¹ describe la vibración del grupo –OH₂–; la de 1239 cm⁻¹, asignada principalmente al estiramiento del enlace aromático anillo-éter de oxígeno; y la de 1508 cm⁻¹ atribuida al estiramiento de los enlaces C=C de los anillos de benceno [24].

En *b*) las bandas de absorción correspondientes a la presencia de enlaces éter y desplazamiento de oxígeno unido a CH₃ (grupo éter O-CH₃) del PMMA son; 1181 cm⁻¹ como la representativa, a pesar de no ser tan intensas se pueden observar otras bandas en 1458 y ~2990 cm⁻¹, esta última tuvo un ligero incremento debido a que se interpone con las bandas de la resina; la de 1729 cm⁻¹ que se asocia al estiramiento del grupo carbonilo (C=O) [25], [26]; y las bandas en el rango de 1000 a 1300 cm⁻¹ podrían deberse a una deformación simétrica y al balanceo de C-H [27].

La intensidad es diferente debido a la estructura y contenido en cada muestra, como se puede notar en *c*) y *d*), sin embargo, en ambas se puede comprobar la presencia de SiO₂. Los enlaces de vibración observados cerca de 750 cm⁻¹; alrededor de 1100 (1035 y 1147 cm⁻¹); así como el cercano a 800 cm⁻¹, están relacionadas con las vibraciones de la resina epóxica preexistentes; a pesar de ser

débiles, pertenecen a los grupos de Si-O-Si a los que se les asigna vibración de estiramiento asimétrico y simétrico [28], [29], [30], [31]; estos resultados confirman la composición de los recubrimientos.

La cantidad del grafito agregado a las soluciones y el número de inmersiones que tuvo la probeta, en comparación con los recubrimientos híbridos, puede indicar una mejor dispersión de las partículas en la matriz, puesto que si se incorpora una cantidad muy pequeña del compuesto no es posible observar las absorciones características.

La superficie del grafito por sí solo es químicamente inerte, sin embargo, cuando está en otras presentaciones como en el caso de óxido de grafeno, se pueden observar algunas bandas características ~ 1760 y 1650 cm^{-1} (funcionadas con la del PMMA) de vibración de estiramiento C=O del grupo carboxilo y a la vibración de estiramiento C=C, respectivamente [32]; la banda cercana a 1570 cm^{-1} puede atribuirse a la vibración esquelética de las láminas de grafeno [33], [34]; así como en el caso de nanopulvos de sílice-carbono (SiO₂:C) se pueden observar bandas entre el intervalo de 1590 y $1610\text{-}1640\text{ cm}^{-1}$ asignables a la vibración de estiramiento de enlaces C=C [35], [36].

El grafito en escamas no muestra ninguna banda característica en el espectro, sin embargo, las bandas de absorción cercanas a 1600 cm^{-1} se asignan a -OH de vibración flexible, las cuales aumentan con la cantidad de TEOS [37], como se puede observar en *d)* respecto a *c)* que tiene mayor concentración de volumen de SiO₂. Los enlaces químicos característicos en nanopartículas de carbono con sílice (C-SiO₂), se observan en la banda cercana a 1050 cm^{-1} asignada a vibraciones de estiramiento de Si-O-Si o Si-O-X, donde X representa grupos etoxi unidos al silicio; el hombro a aproximadamente 1200 cm^{-1} se asigna al modo óptico transversal del modo desfasado de la vibración asimétrica o al modo óptico longitudinal de la vibración de alta frecuencia de SiO₂ [38]. La presencia de partículas de grafito no cambia la ubicación de las bandas características de la FC y las películas delgadas compuestas de PMMA, PMMA-SiO₂; lo que indica que las partículas de grafito se han dispersado con éxito en la solución híbrida, sin embargo, la intensidad de las bandas se ve reducida con un aumento en la concentración de éstas [39], [40], como se puede observar en *g)* y *h)* con dos por ciento de volumen del grafito en relación al SiO₂.

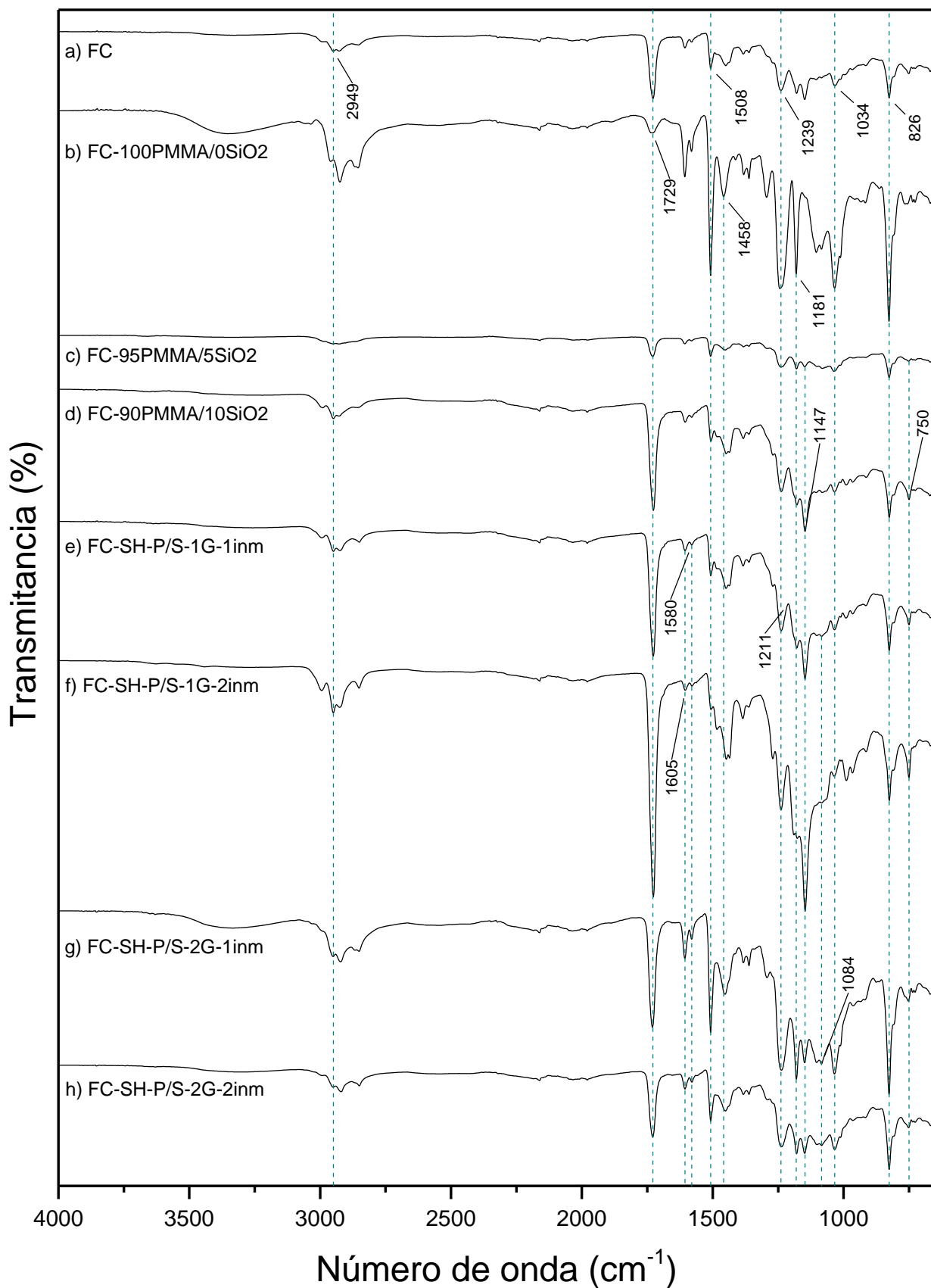


Figura 20. Espectros ATR/FTIR: a) FC, b) FC-100PMMA/0SiO₂, c) FC-95PMMA/5SiO₂, d) FC-90PMMA/10SiO₂, e) FC-SH-P/S-1G-1inm, f) FC-SH-P/S-1G-2inm, g) FC-SH-P/S-2G-1inm y h) FC-SH-P/S-2G-2inm.

5.2 Caracterización tribológica

5.2.1 Pruebas de erosión

5.2.1.1 Determinación del tamaño de la partícula

En un *estereomicroscopio modelo SZ61 marca Olympus* se tomaron fotografías de la arena antes y después de su uso en las pruebas de erosión. Se consideró una geometría circular para obtener un promedio del diámetro y desarrollar un histograma y polígono de frecuencias como se muestra en la Figura 21, siendo notorio el desgaste que tiene la partícula erosiva al impactar contra la probeta.

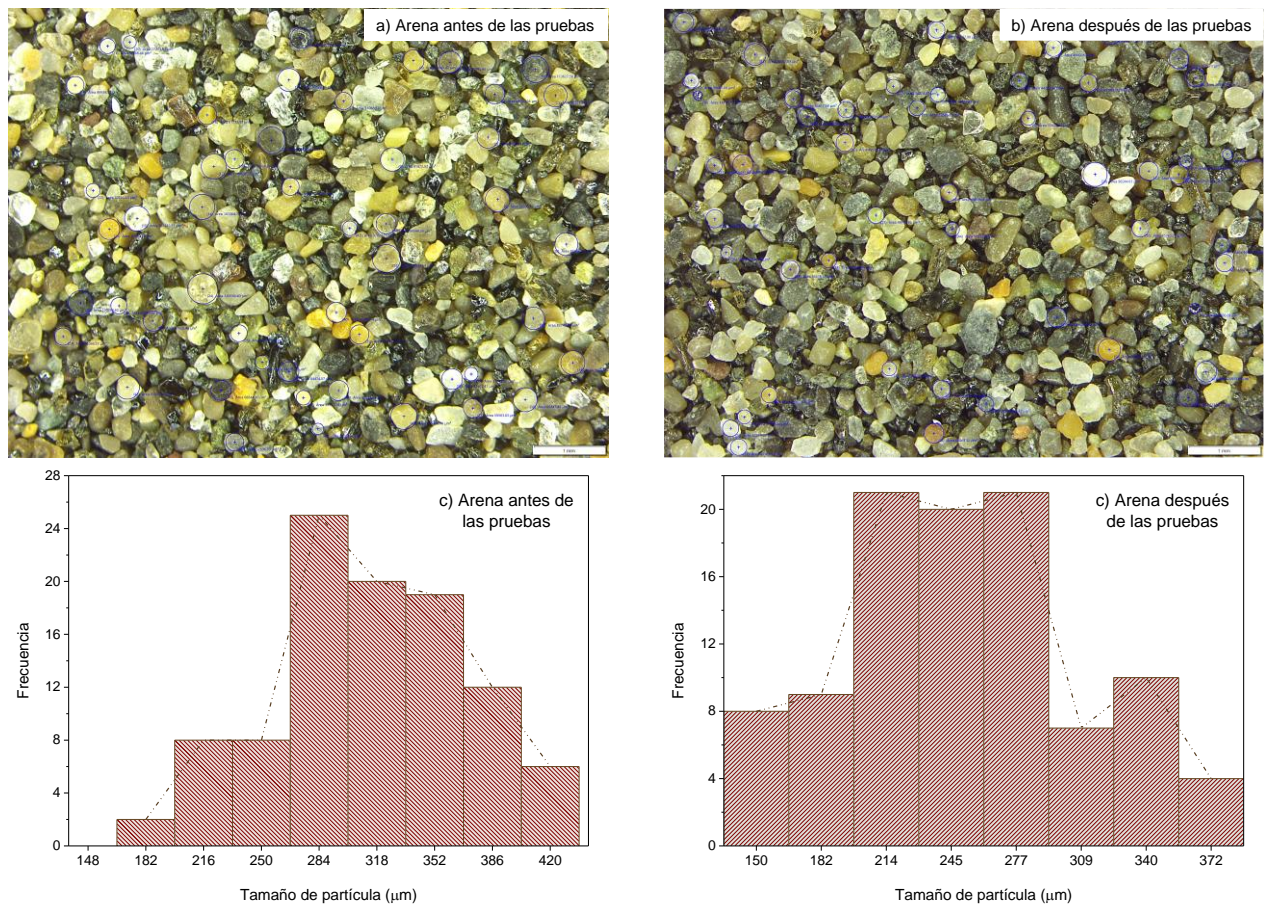


Figura 21. Determinación de la distribución del tamaño de partícula y gráfica de la distribución de tamaño a), c) antes y b), d) después de las pruebas.

5.2.1.2 Pérdida de masa

Para analizar el comportamiento de las películas los primeros minutos son esenciales, en el caso de las soluciones de PMMA/SiO₂ se realizaron pruebas de diez minutos como se observa en la Figura 22. El efecto de la matriz con el recubrimiento es notorio en todas las muestras hasta el minuto tres, donde la pérdida de masa es progresiva; en el minuto cuatro hay un decremento en la FC-100PMMA/0SiO₂ y FC-95PMMA/5SiO₂ indicando que empieza a trabajar el refuerzo, en este caso las fibras de carbono; respecto a la FC, en el minuto cinco cede la matriz manteniendo una tendencia de pérdida de masa inferior a las películas, acentuando que el refuerzo ya es el que está sometido a la erosión.

La solución FC-90PMMA/10SiO₂ demuestra un mejor rendimiento ante el desgaste por partícula erosiva, ya que mantiene la protección hasta el minuto cinco y en el sexto no hay una variación significativa; con base a la masa total perdida como se muestra en la Figura 23 y Figura 24 es la que presenta mejor resistencia, por lo tanto se seleccionó esta composición para la incorporación de grafito.

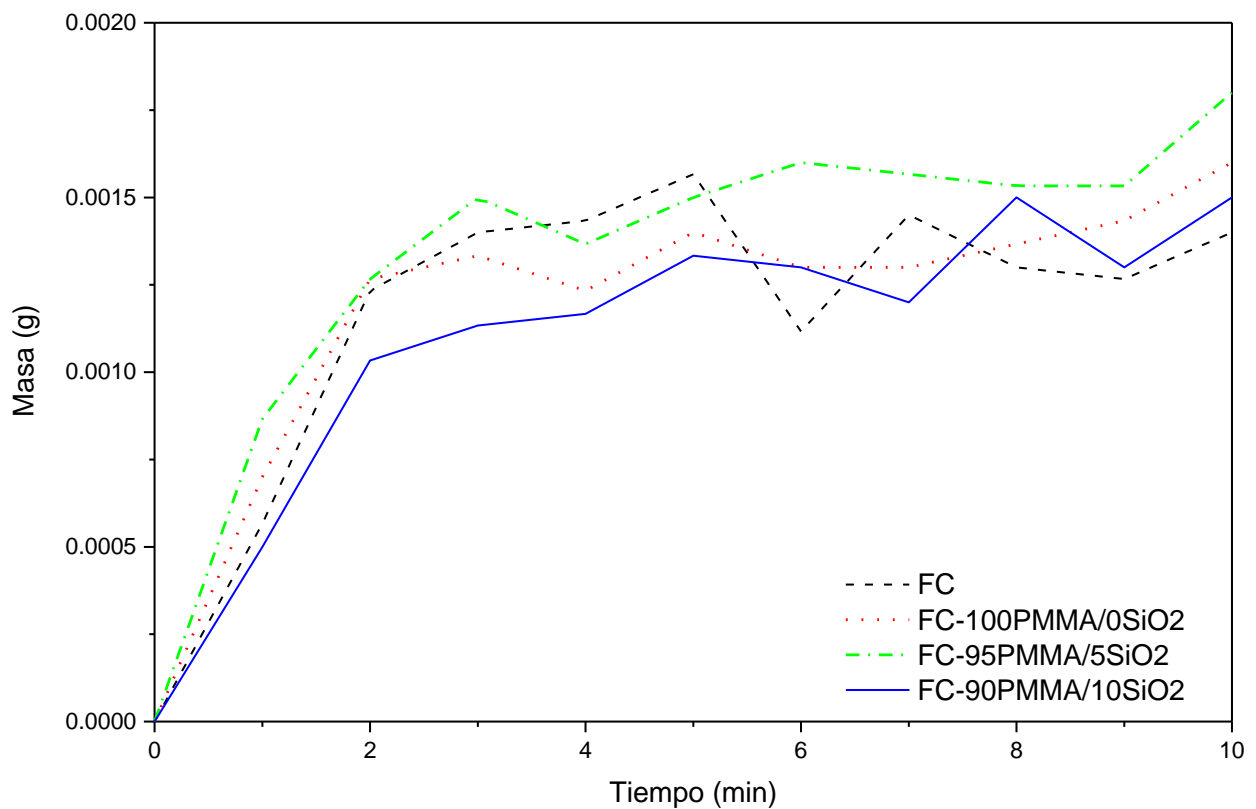


Figura 22. Pérdida de masa por minuto (soluciones PMMA/SiO₂).

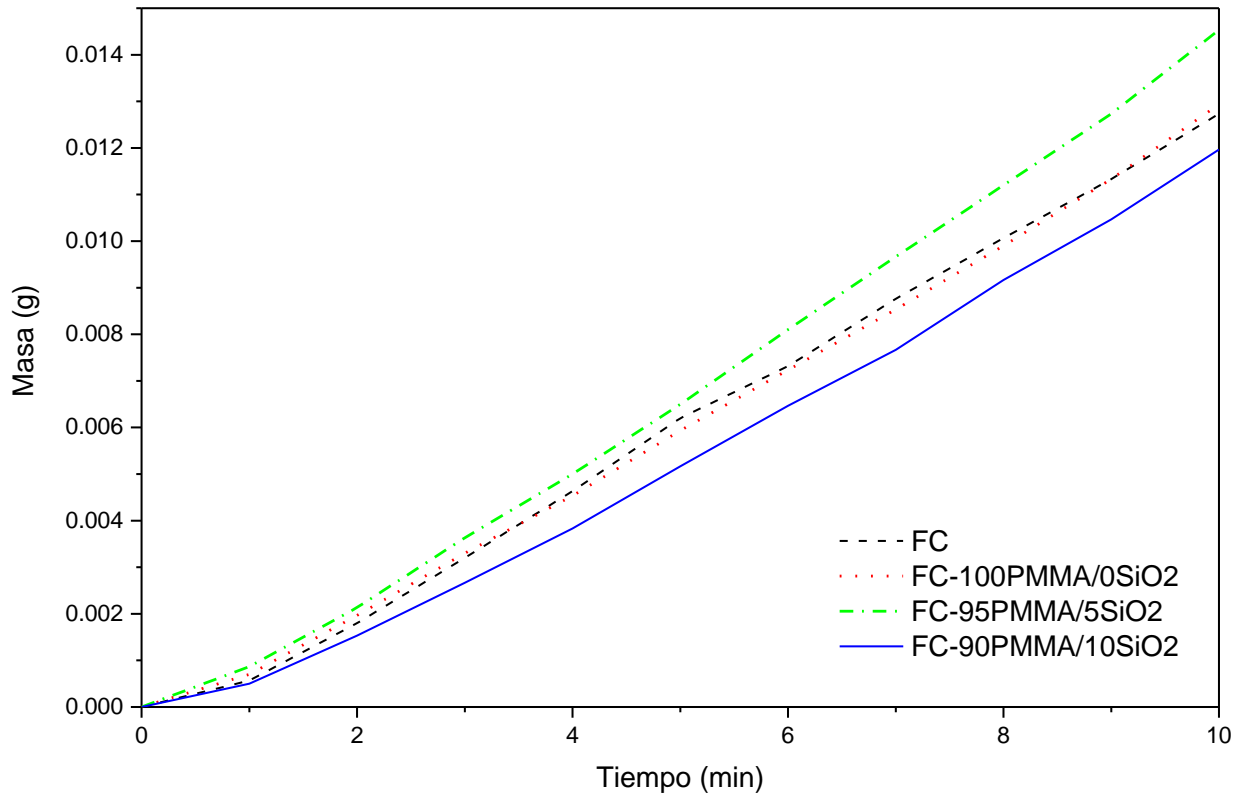


Figura 23. Incremento de la pérdida de masa por minuto (soluciones PMMA/SiO₂).

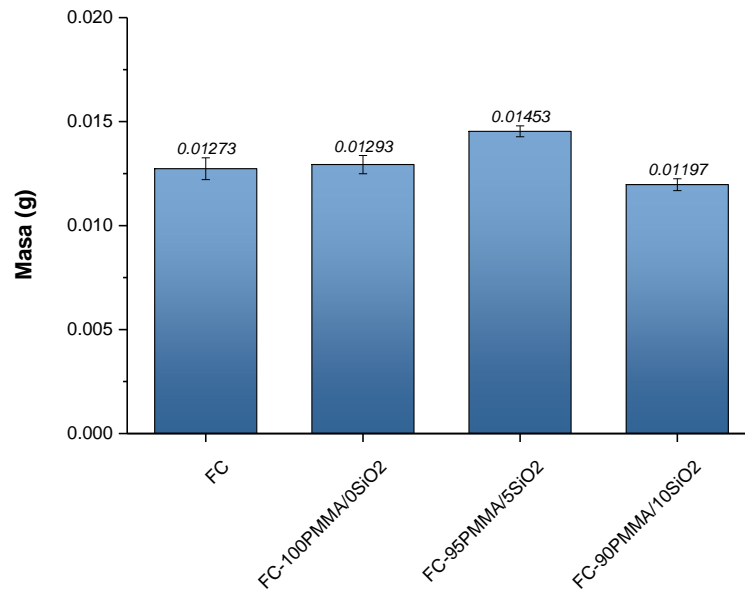


Figura 24. Pérdida de masa total (soluciones PMMA/SiO₂).

El tiempo de duración de la probeta para las soluciones híbridas 90PMMA/10SiO₂-G se redujo a seis minutos, como se explica en 4.3.1. En la Figura 25 se puede apreciar que los recubrimientos presentan una disminución en la tendencia de pérdida de masa del minuto cuatro al cinco, en el cual empiezan a quedar expuestas las fibras. Las películas con dos por ciento de grafito mantienen una predisposición similar en su comportamiento hasta el minuto cuatro, donde la de una inmersión muestra un mayor distanciamiento y daño en el último minuto de la prueba; la de FC-SH-P/S-1G-1inm conserva un decremento casi lineal hasta el segundo minuto, en cambio, para el tercero es más significativo, siendo de los cuatro el que mayor diferencia presenta en este minuto; en relación al FC-SH-P/S-1G-2inm no hay variación en la pérdida de masa entre el primer y segundo minuto, en los próximos dos la diferencia es ligera, haciendo este recubrimiento el que mejor desempeño presenta para este tipo de prueba.

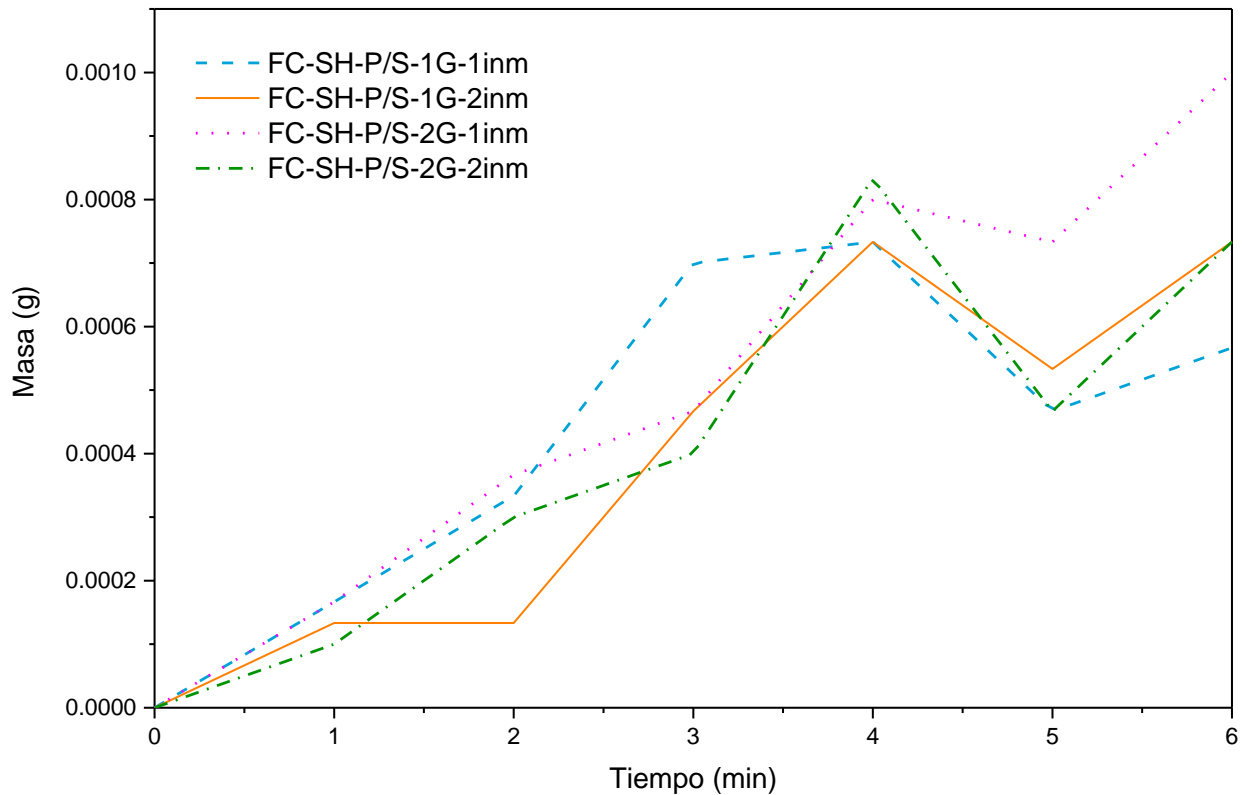


Figura 25. Pérdida de masa por minuto (SH-P/S-G).

En la Figura 26 y Figura 27 se expone la pérdida de masa acumulada y total, respectivamente, el recubrimiento FC-SH-P/S-1G-2inm exhibe una superior protección al desgaste erosivo.

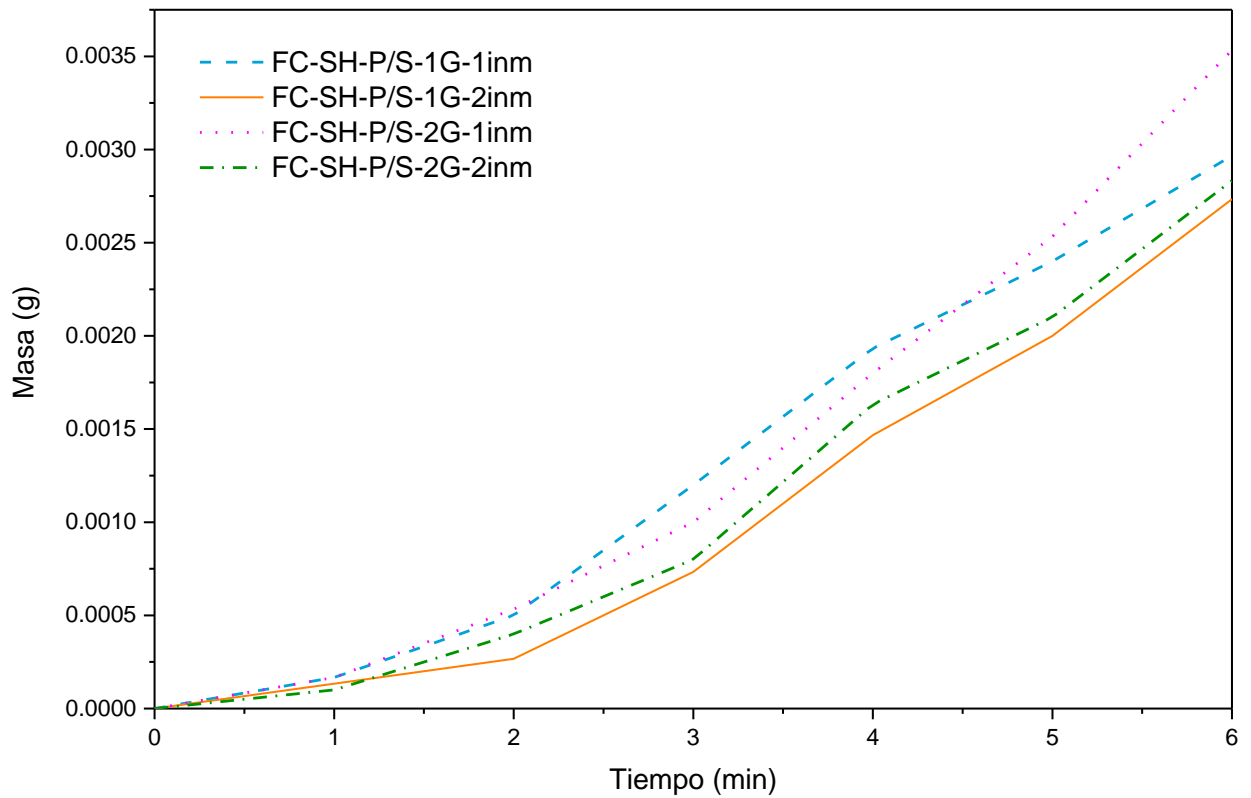


Figura 26. Incremento de la pérdida de masa por minuto (SH-P/S-G).

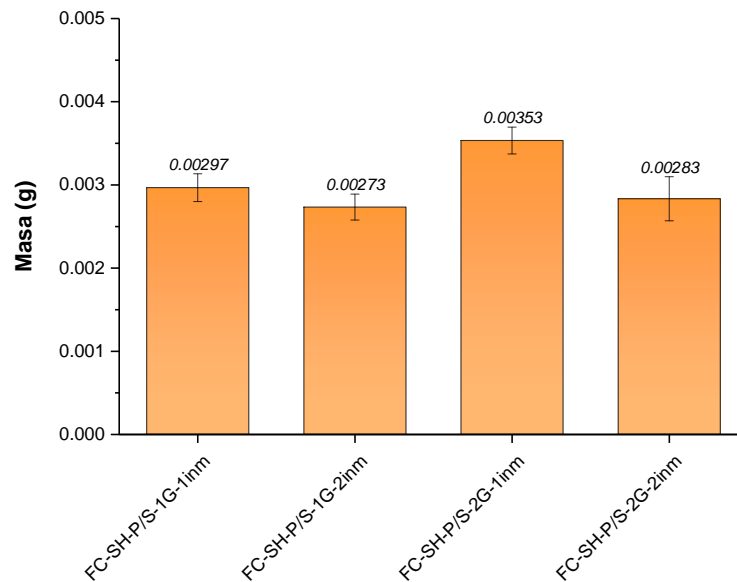


Figura 27. Pérdida de masa total (SH-P/S-G).

5.2.1.3 Perfil de las huellas de desgaste

En la evaluación del desempeño ante la erosión del sustrato y los recubrimientos, se obtuvo el perfil de huella representativo de cada uno, las cuales presentan regiones irregulares debido al tejido de 90° del refuerzo [41], [42]; se observó que el daño generado en algunas zonas remueve un porcentaje importante de la matriz exponiendo a las fibras.

Como se muestra en la Figura 28 la FC, FC-100PMMA/0SiO₂ y FC-90PMMA/10SiO₂ presentaron una misma tendencia, pero existe un ligero desfase entre ellas, siendo la segunda la que tiene la huella con mayor profundidad de 317.75 μm . La masa pérdida y la profundidad de la huella no están directamente relacionados porque se debe de considerar la extensión en el desplazamiento horizontal; como en el caso de FC-95PMMA/5SiO₂ que presentó otra tendencia y profundidades más anchas que las demás, esto se confirma, en conjunto con los datos presentados de pérdida de masa total de la Figura 24, que tuvo la magnitud de desgaste más alta.

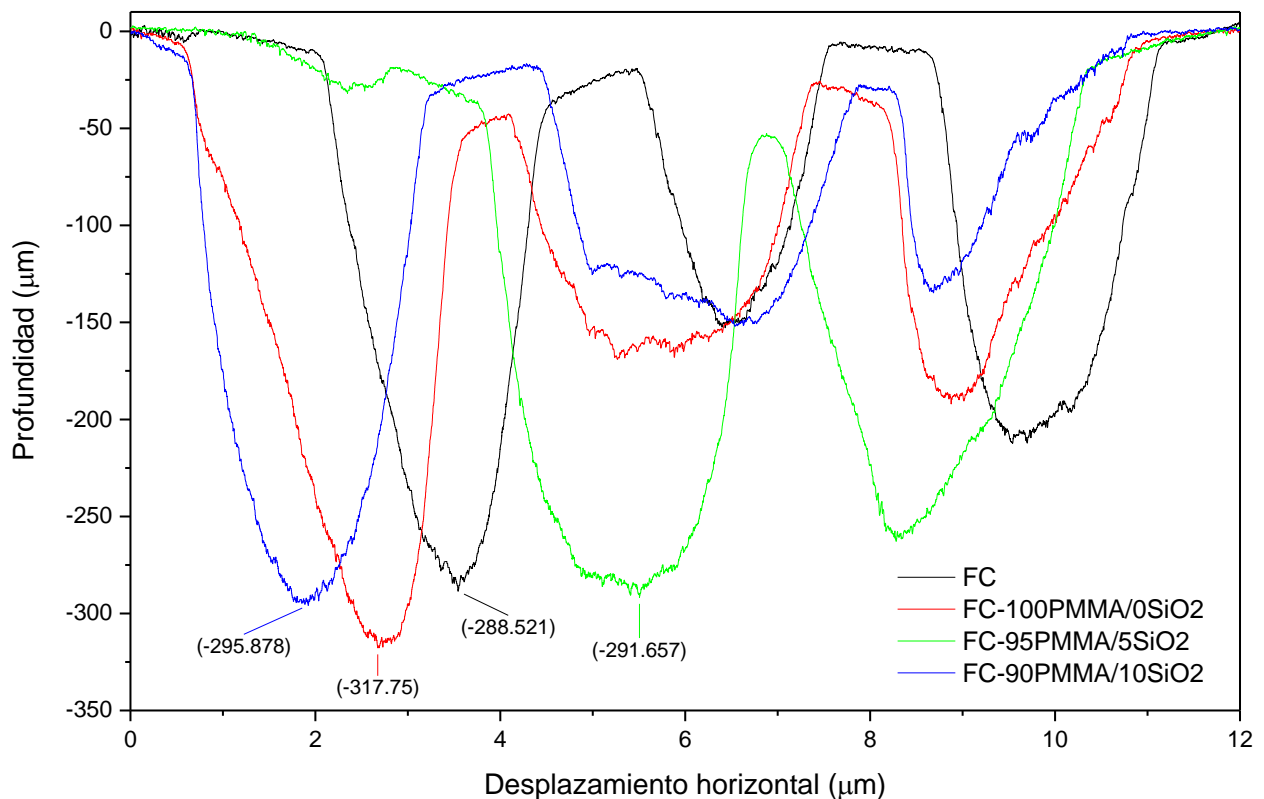


Figura 28. Perfil de huellas por erosión (soluciones PMMA/SiO₂).

Todos los recubrimientos con grafito mostraron la misma tendencia en la distribución de las zonas de desgaste como se indica en la Figura 29. El FC-SH-P/S-2G-1inm es la película que presentó la huella más profunda con 118.996 μm , coincidiendo con la que mostró mayor pérdida de masa total (Figura 27); la diferencia entre FC-SH-P/S-2G-2inm y FC-SH-P/S-1G-2inm en los parámetros evaluados, a pesar de ser mínima demuestra que éste último es el que tuvo mejores cualidades ante el desgaste erosivo.

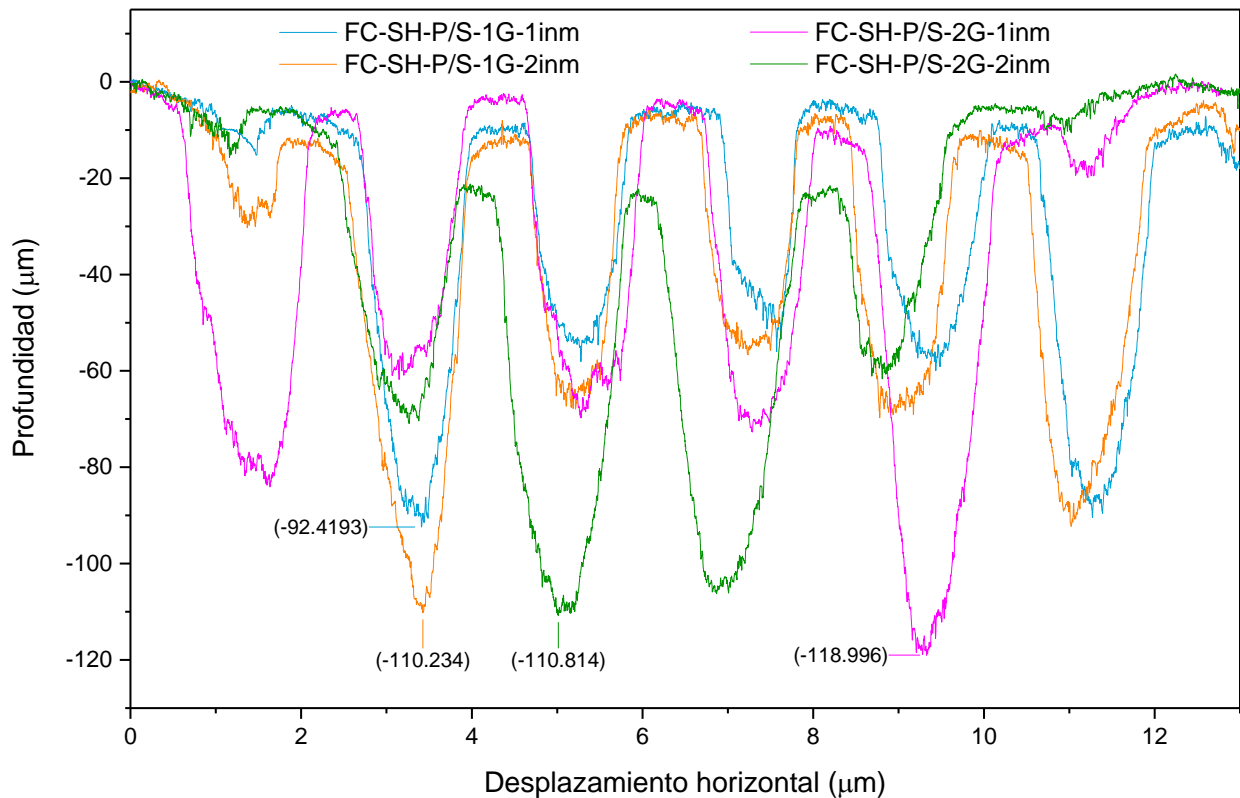


Figura 29. Perfil de huellas por erosión (SH-P/S-G).

Existen factores por los que algunas huellas presentan mayor profundidad: la adición e interacción de los recubrimientos a la matriz es mejor; o debido a que pequeñas partículas del material de erosión se incrustan en la resina, durante el tiempo de la prueba éstas se van adentrando poco a poco, afectando su extensión o amplitud.

La pérdida de volumen de las soluciones híbridas con grafito presentada en la Figura 30 demuestra un mismo comportamiento con la masa perdida de la Figura 27, a pesar que los recubrimientos de una sola inmersión difieren; en ambos casos la FC-SH-P/S-1G-2inm posee los menores valores, confirmando el buen desempeño de este recubrimiento híbrido base 90PMMA/10SiO₂.

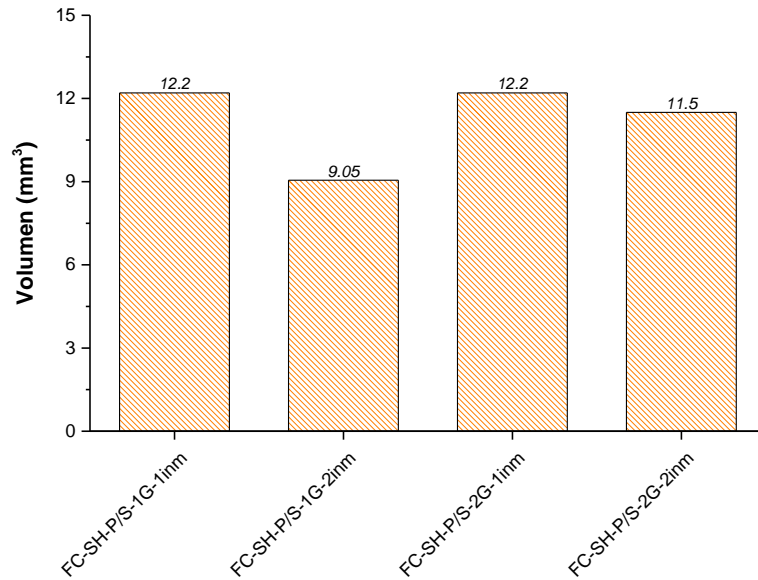


Figura 30. Volumen perdido en las pruebas de erosión (SH-P/S-G).

En las fotos de la Figura 31 se puede apreciar que las muestras comparten las características de que se genera una circunferencia referente a la forma de la boquilla, en la parte central del impacto es donde el desgaste es mayor; de igual manera en la sección media del material de refuerzo, independientemente de la dirección que presente la fibra de carbono. Es notorio que en las huellas *a*), *b*), *c*) y *d*) el desgaste es más profundo puesto que el tiempo de exposición fue mayor, y para las de *e*), *f*), *g*) y *h*) el daño es más tenue.

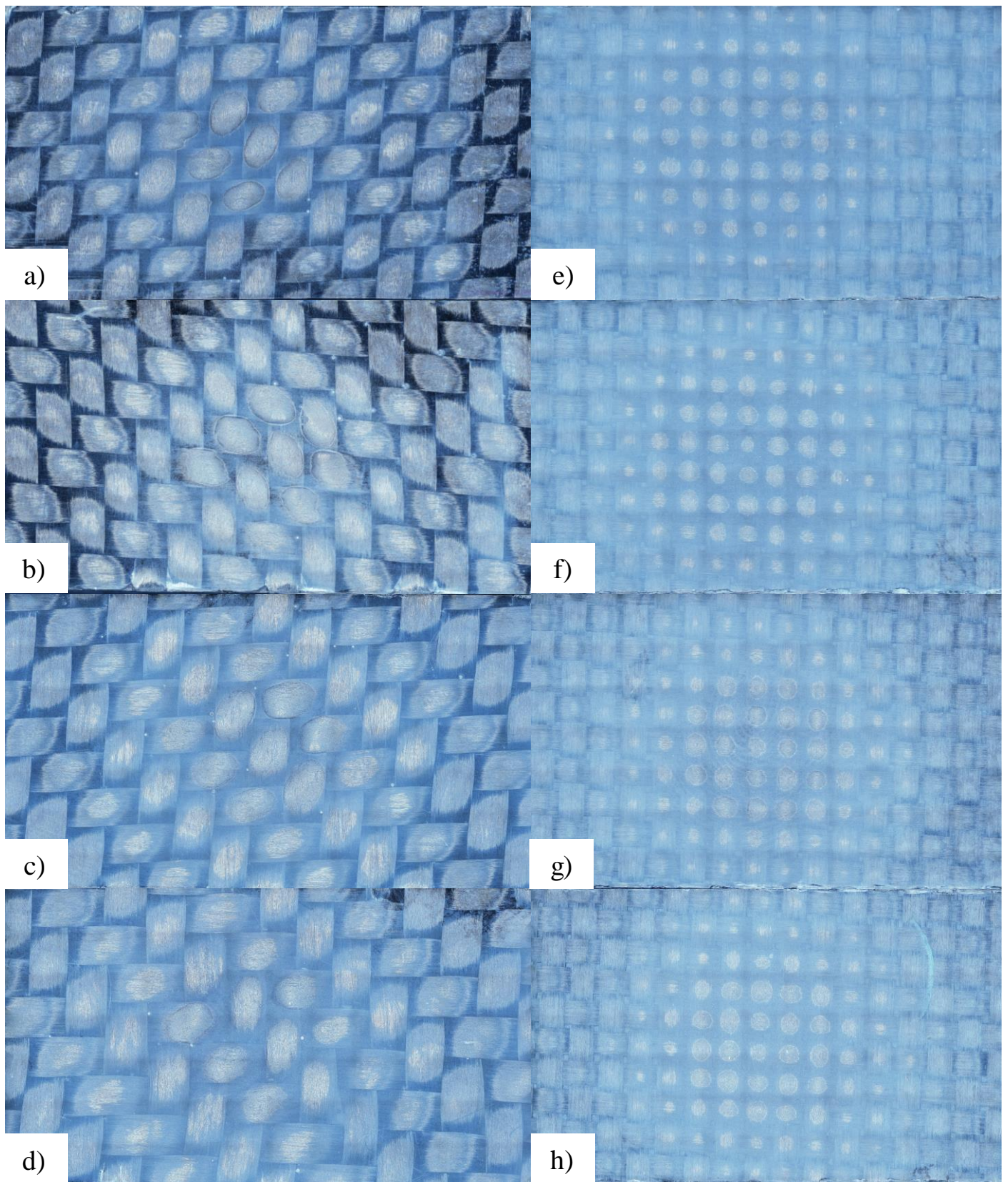


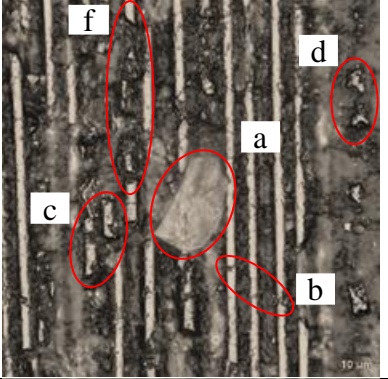
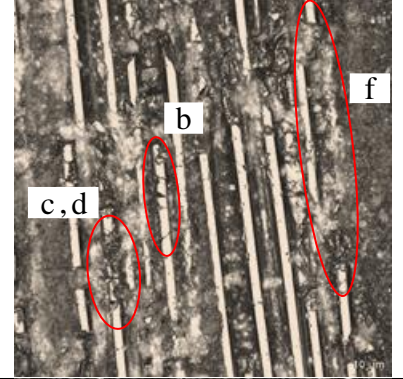
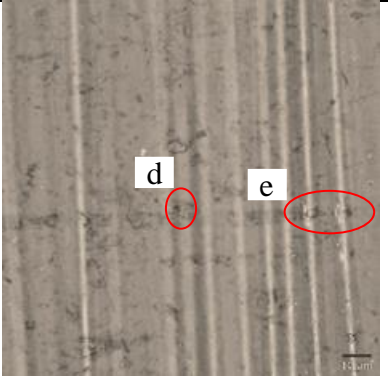
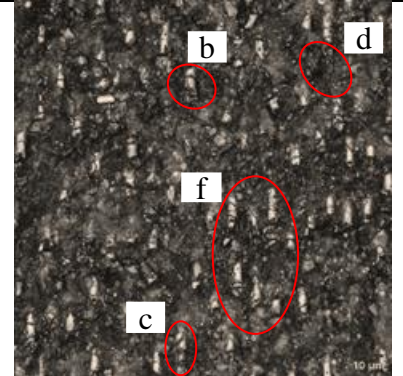
Figura 31. Huella por erosión: a) FC, b) FC-100PMMA/0SiO₂, c) FC-95PMMA/5SiO₂, d) FC-90PMMA/10SiO₂, e) FC-SH-P/S-1G-1nm, f) FC-SH-P/S-1G-2nm, g) FC-SH-P/S-2G-1nm y h) FC-SH-P/S-2G-2nm.

5.2.2 Mecanismos de desgaste

El comportamiento del sustrato y recubrimientos FC, FC-100PMMA/0SiO₂, FC-95PMMA/5SiO₂ y FC-90PMMA/10SiO₂ ante la prueba de erosión se observa en la Tabla 9, en donde se indican los mecanismos de desgaste. Para FC se observaron incrustaciones, grietas y fracturas de las fibras de carbono, así como algunas picaduras. En FC-100PMMA/0SiO₂ se presentó deformación plástica debido a la adhesión y picaduras, esto representa un comportamiento dúctil de la matriz. Los mecanismos que se observaron en FC-95PMMA/5SiO₂ son grietas y fracturas de las fibras. Para FC-90PMMA/10SiO₂ hay fisuras, grietas y fracturas de las fibras.

Los mecanismos de los recubrimientos que contienen SiO₂, corresponden a un comportamiento con menor ductilidad del material. En FC, FC-95PMMA/5SiO₂ y FC-90PMMA/10SiO₂ se observó acción cortante sobre las fibras, por lo que se presentó pérdida significativa de masa por el desprendimiento de secciones de las fibras, confirmando la información de la Figura 23.

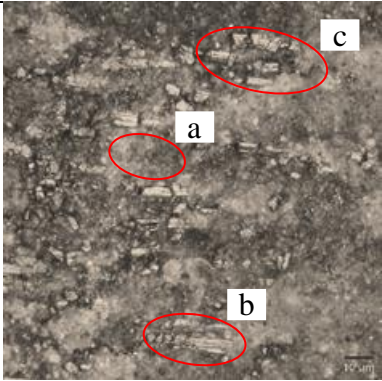
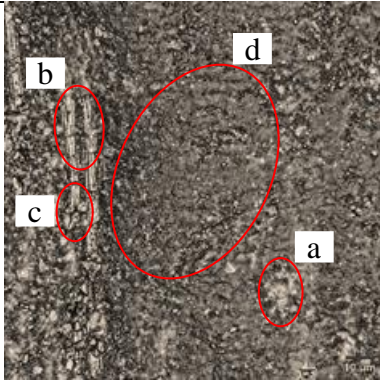
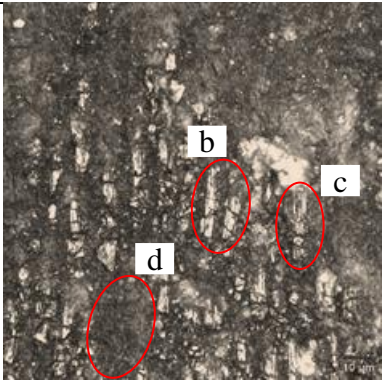
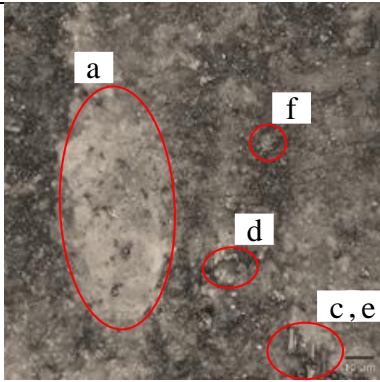
Tabla 9. Mecanismos de desgaste presentes: incrustaciones (a), fisuras y grietas (b), fracturas (c), picaduras (d) y deformación plástica (e) y acción cortante (f).

FC		FC-95PMMA/5SiO ₂	
FC-100PMMA/0SiO ₂		FC-90PMMA/10SiO ₂	

Los mecanismos de desgaste de los recubrimientos con grafito FC-SH-P/S-1G-1inm, FC-SH-P/S-1G-2inm, FC-SH-P/S-2G-1inm y FC-SH-P/S-2G-2inm, se presentan en la Tabla 10. En FC-SH-P/S-1G-1inm se observaron fisuras, grietas, fracturas y picaduras. FC-SH-P/S-1G-2inm presentó fisuras, grietas, fracturas y deformación plástica debido a la adhesión del material con las partículas de arena. En FC-SH-P/S-2G-1inm se observaron en las fibras fisuras, grietas y fracturas, así como deformación plástica y picaduras en la matriz. Para el recubrimiento FC-SH-P/S-2G-2inm los mecanismos presentes fueron picaduras, fracturas, acción cortante de fibras, deformación plástica y cráteres.

En todos estos recubrimientos, los mecanismos identificados corresponden a un comportamiento del material con poca ductilidad, además solo se observó el desgaste erosivo hasta la primera capa de fibras, por lo que se presentó una mínima cantidad de acción cortante de fibras en FC-SH-P/S-2G-1inm.

Tabla 10. Mecanismos de desgaste presentes: picaduras (a), fisuras y grietas (b), fracturas (c), deformación plástica (d), acción cortante (e) y cráteres (f).

<p>FC-SH-P/S-1G-1inm</p>		<p>FC-SH-P/S-2G-1inm</p>	
<p>FC-SH-P/S-1G-2inm</p>		<p>FC-SH-P/S-2G-2inm</p>	

5.2.3 Pruebas por deslizamiento recíprocante

5.2.3.1 Pérdida de masa

El estudio del material compuesto y los recubrimientos para condiciones secas de deslizamiento, se realizó de manera idéntica a todas las probetas.

En relación a las soluciones PMMA/SiO₂, la que presentó mejores resultados en las pruebas realizadas fue la de FC-100PMMA/0SiO₂; respecto a las de las SH-P/S-G se esperaría que estas películas demuestren los menores valores debido la propiedad de lubricante sólido del grafito [43], sin embargo, el que tiene mayor desgaste de todos es el FC-SH-P/S-1G-1mm; de manera contraria, el que cuenta con la misma cantidad de grafito en la solución pero posee dos inmersiones, es el que tuvo un rendimiento superior. En el caso de los de 2% de grafito, el de una inmersión muestra el segundo valor más bajo, mientras que el de dos inmersiones no se comporta mejor, ya que está por debajo del que perdió mayor masa, como se puede observar en la Figura 32.

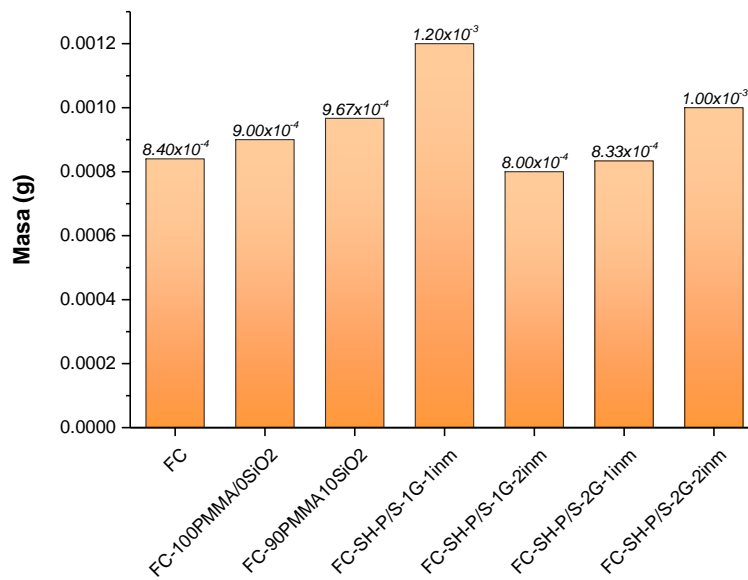


Figura 32. Pérdida de masa.

5.2.3.2 Huellas de desgaste

Para completar el análisis de las probetas es necesario calcular la tasa de desgaste [44], expresada en la ecuación (3); ésta nos proporciona la información sobre cuanto material fue retirado y nos permite seleccionar el recubrimiento que bajo estas condiciones revela un superior comportamiento; para ello es preciso hacer una suma de los volúmenes de desgaste considerando un segmento cilíndrico y uno esférico (Figura 33), como se muestra en las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

$$V_c = \left(R^2 \cos^{-1} \left(\frac{R-d}{R} \right) - (R-d) \sqrt{2Rd - d^2} \right) (l - 2r) \quad (1)$$

$$V_e = \frac{1}{3} \pi d^2 (3R - d) \quad (2)$$

Donde:

V_c = volumen de desgaste en segmento cilíndrico (mm^3)

V_e = volumen de desgaste en segmento esférico (mm^3)

R = radio del pin (mm)

r = mitad del ancho de la huella (mm)

d = profundidad promedio de la huella (mm)

l = longitud de la huella (mm)

$$k = \frac{V_t}{F_n \cdot 2 \cdot \Delta_x \cdot n} = \frac{V_t}{F_n \cdot s} \quad (3)$$

Donde:

k = tasa de desgaste ($\frac{mm^3}{Nm}$)

V_t = volumen total de desgaste [$V_c + V_e$] (mm^3)

F_n = fuerza normal (N)

Δ_x = amplitud de deslizamiento (mm)

t = tiempo (s)

f = frecuencia ($Hz, \frac{1}{s}$)

n = número de ciclos [$t \cdot f$]

s = distancia de deslizamiento [$2 \cdot \Delta_x \cdot n, l \cdot n$] (m)

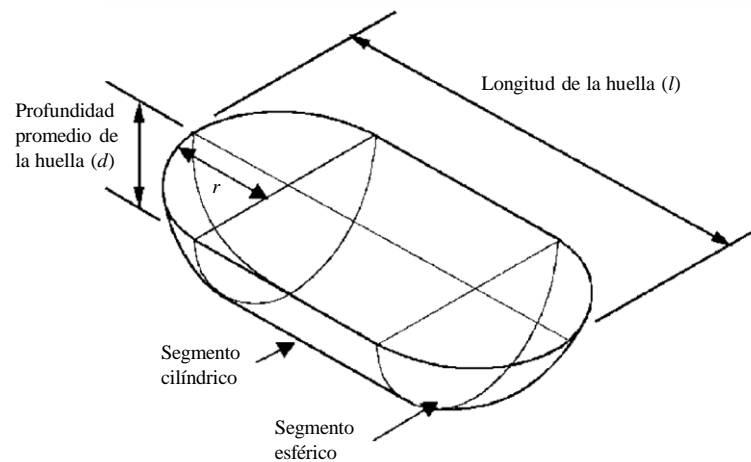


Figura 33. Huella de desgaste con "geometría perfecta" [44].

En la Tabla 11 se presentan los datos de manera específica tanto del sustrato como de los recubrimientos, los cuales se consiguieron mediante un promedio de mediciones en el perfilómetro, se complementó la información del largo de la huella con el estereomicroscopio. Los parámetros a los que se realizó la prueba se expresan en la Tabla 12, las magnitudes físicas como r , d y l se muestran promediadas respecto a los valores de la tabla anterior.

Tabla 11. Valores específicos del sustrato y los recubrimientos.

Probeta	Profundidad de la huella (mm)	Ancho de la huella (mm)	Largo de la huella (mm)
FC	59.765	1.118	8.127
FC-100PMMA/0SiO ₂	70.982	1.234	8.673
FC-90PMMA10SiO ₂	68.503	1.203	8.825
FC-SH-P/S-1G-1inm	67.840	1.227	9.268
FC-SH-P/S-1G-2inm	62.293	1.175	9.146
FC-SH-P/S-2G-1inm	67.718	1.185	9.378
FC-SH-P/S-2G-2inm	82.727	1.299	9.386

Tabla 12. Condiciones de las pruebas por deslizamiento recíprocante.

R (mm) =	2.375
r (mm) =	0.603
d (mm) =	0.069
l (mm) =	8.972
F_n (N) =	15.009
t (s) =	900
f (Hz) =	3.5

En los recubrimientos de PMMA y PMMA/SiO₂, el FC-90PMMA/10SiO₂ fue el que presentó menor pérdida, ambos están por encima que la mayoría de las soluciones con grafito, excepto por la FC-SH-P/S-2G-2inm que tiene la mayor tasa de desgaste; la FC-SH-P/S-1G-2inm muestra el valor mínimo entre las películas, como se expresa en la Figura 34. Lo anterior coincide con el recubrimiento que tuvo mejor rendimiento en los resultados de pérdida de masa (Figura 32).

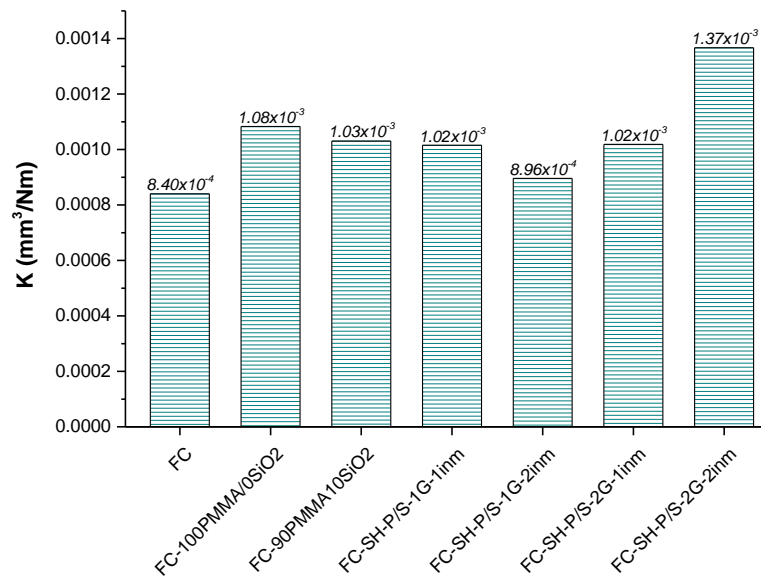


Figura 34. Tasa de desgaste.

Para obtener el perfil representativo de cada muestra, expuesto en la Figura 35, se realizó la medición de la huella a lo largo, aproximadamente en el centro de la misma.

Las huellas que presentan la mayor y menor profundidad coinciden con las películas que tuvieron una tasa de desgaste superior e inferior, la FC-SH-P/S-2G-2inm y FC-SH-P/S-1G-2inm respectivamente.

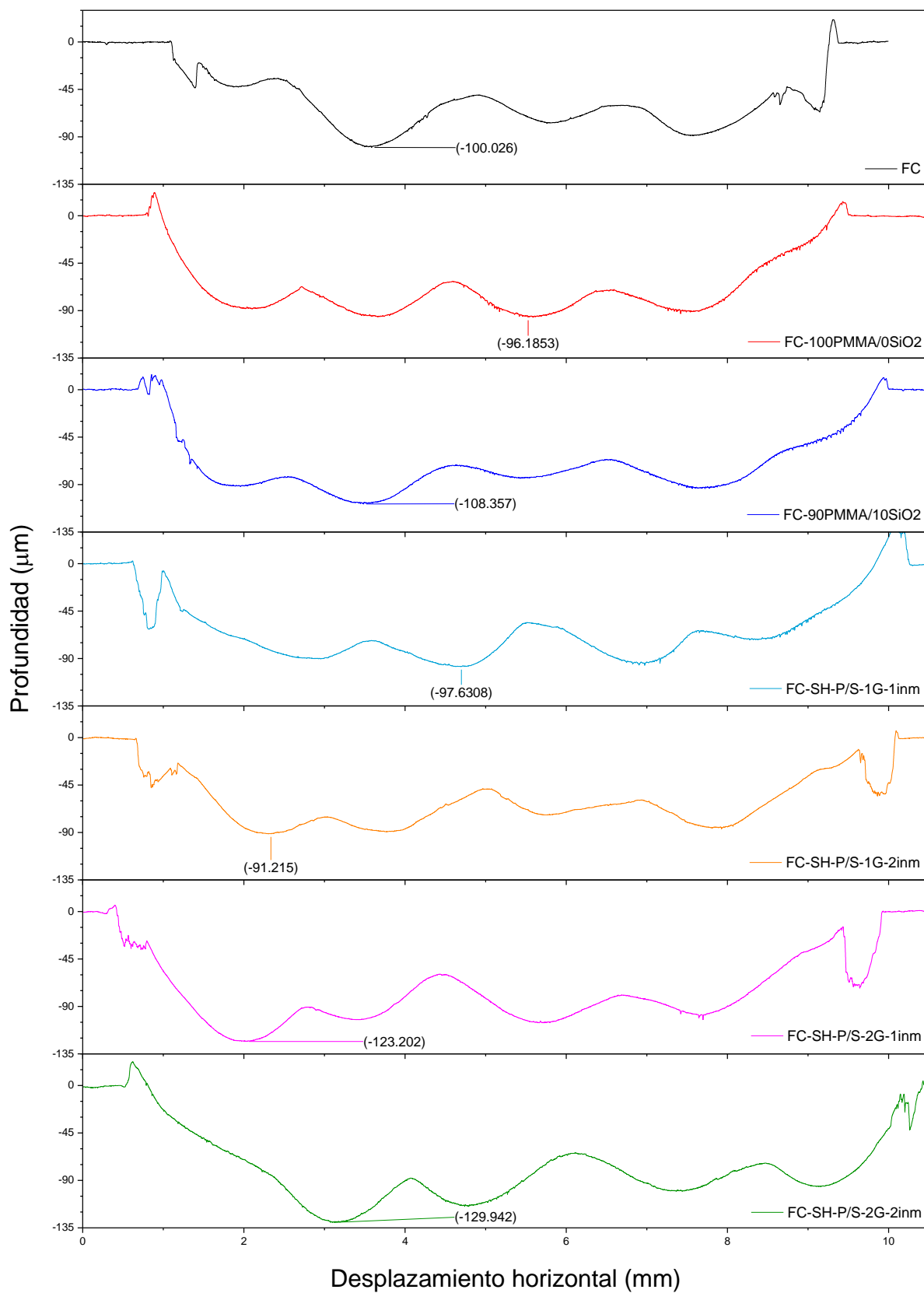


Figura 35. Perfil de huella por deslizamiento recíprocante.

El coeficiente de fricción (μ) es uno de los parámetros importantes a evaluar en los ensayos de deslizamiento recíproco [45]. En este caso la FC presenta el μ mínimo, probablemente por el proceso de manufactura RTM, que permite un control en la rugosidad y la cantidad de partículas externas; contrario a ésta, el FC-SH-P/S-1G-1mm muestra el valor más alto, siendo este casi el doble del que tiene el mismo porcentaje de grafito, pero con dos inmersiones; mientras que en FC-100PMMA/0SiO₂ y FC-SH-P/S-2G-1mm comparten un valor semejante, el cual es la magnitud más pequeña del coeficiente de fricción que se presentó en las películas (Figura 36).

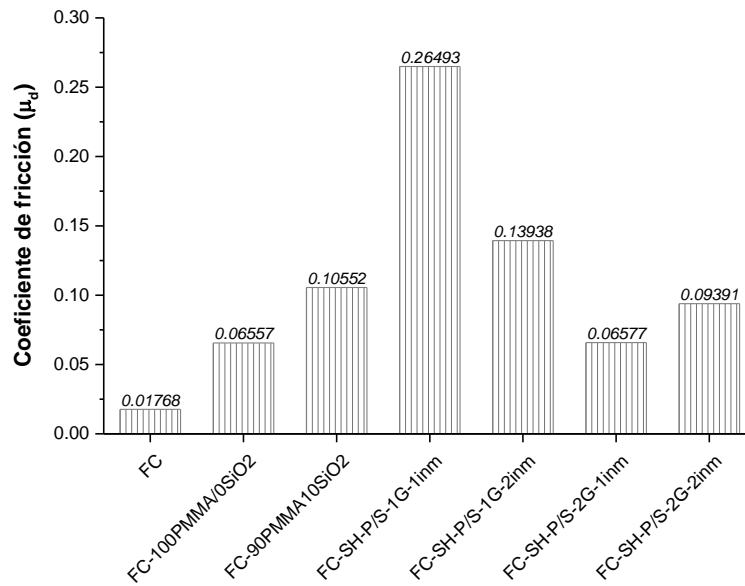


Figura 36. Coeficiente de fricción.

6. CONCLUSIONES

A partir de la discusión de los resultados obtenidos, se presentan las siguientes conclusiones:

- Por su rendimiento en las pruebas de erosión, la composición 90PMMA/10SiO₂ fue la seleccionada para la incorporación de grafito.
- Se establecieron las condiciones para la incorporación del grafito a la solución híbrida y la aplicación del recubrimiento sobre la FC.
- Se comprobó la obtención de los recubrimientos de la familia de PMMA/SiO₂ por espectroscopia FTIR. Por la misma técnica espectroscópica se validó la presencia del grafito en los recubrimientos.
- La incorporación del grafito incrementó el espesor de los recubrimientos, pero no presentó cambios significativos en la rugosidad.
- Se corrobora la efectiva aplicación de varias capas de los recubrimientos híbridos sobre la FC.
- El recubrimiento FC-SH-P/S-1G-2inm presentó el mejor rendimiento en las pruebas de erosión por partícula sólida.
- El recubrimiento FC-SH-P/S-1G-2inm presentó el mejor rendimiento en las pruebas de deslizamiento recíprocante.
- Los resultados de las pruebas de deslizamiento recíprocante son preliminares, porque condiciones como la carga aplicada (F_n) y la frecuencia (f), que está relacionada directamente con el tiempo del ensayo; se deben ajustar para analizar únicamente el recubrimiento.
- La incorporación de un porcentaje mayor de grafito no asegura mejores propiedades superficiales del sustrato de FC.

7. REFERENCIAS

- [1] J. De La Cruz Quiroga, *Síntesis y caracterización de una matriz híbrida de SiO₂-PMMA dopada con iones de terbio*, Puebla, 2020.
- [2] R. A. Robayo Salazar, F. Delgado Gómez, J. Portocarrero Hermann, J. L. Tristancho Reyes, D. Pérez Muñoz y M. P. Holguín Patiño, «Aplicaciones,» de *Materiales compuestos. Clasificación, procesamiento y aplicaciones*, Cali, Universidad Tecnológica de Pereira, 2021.
- [3] H. Guerrero, J. L. Dávila, S. Galeas, P. Pontón, N. M. Rosas, V. Sotomayor y C. Valdivieso, «Materiales compuestos,» de *Nuevos materiales: Aplicaciones estructurales e industriales*, Quito, Imprefepp, 2011.
- [4] H. A. Al-Tameemi, A. A. Hussain Ali y B. Hussein, «Investigation of wear resistance for variable configurations of woven glass-fiber reinforced composite materials,» *IOP Publishing*, 2020.
- [5] J. C. Mendoza Mendoza, *Estudio experimental del desgaste erosivo en materiales compuestos de fibra de carbono y fibra de vidrio*, Pachuca de Soto, 2019.
- [6] J. M. Mata Padilla, G. Cadenas Pliego y P. Uribe Jiménez, «Desarrollo de recubrimientos acrílicos anticorrosivos nanoestructurados con dióxido de silicio modificado,» de *Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano*, 2021.
- [7] K. Hsu-Chiang, C. Shao-Lung, C. Chia-Hsun, K. Chen-Feng y C. Chin-Lung, «Synthesis, characterization, and thermal stability of PMMA/SiO₂/TiO₂ tertiary nanocomposites via non-hydrolytic sol-gel method,» *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 113, n° 3, pp. 1959-1965, 2009.
- [8] M. B. Moraes, L. Cividanes y G. Thim, «Synthesis of graphene oxide and functionalized CNT nanocomposites based on epoxy resin,» *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 10, 2018.
- [9] B. Hao, Q. Ma, S. Yang, E. Mäder y P.-C. Ma, «Comparative study on monitoring structural damage in fiber-reinforced polymers using glass fibers with carbon nanotubes and graphene coating,» *Composites Science and Technology*, vol. 129, pp. 38-45, 2016.
- [10] L. E. Torres-Parga, C. Hernández-Navarro, K. J. Moreno-Bello, J. García-Miranda, L. D. Aguilera-Camacho, R. Lesso-Arroyo, B. Arroyo-Ramírez y S.-. R. Álvaro, «Friction and wear behavior of a PMMA-SiO₂ coating on hardened steel,» *Materials Research Society*, vol. 1613, 2014.
- [11] H. Rahimi, R. Mozaffarinia y A. H. Najafabadi, «Corrosion and wear resistance characterization of environment friendly sol-gel hybrid nanocomposite coating on AA5083,» *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 29, n° 7, pp. 603-608, 2013.
- [12] Y. Tsai, E. Bosze, E. Barjasteh y S. Nutt, «Influence of hygrothermal environment on thermal and mechanical properties of carbon fiber/fiberglass hybrid composites,» *Composites Science and Technology*, vol. 69, pp. 432-437, 2009.
- [13] J. Theberge y B. Arkles, «Wear characteristic of carbon fiber reinforced thermoplastics,» *Lubrication Engineering*, vol. 30, n° 12, pp. 585-589, 1974.
- [14] B. P. Singh, S. Nayak, K. K. Nanda, B. K. Jena, S. Bhattacharjee y L. Besra, «The production of a corrosion resistant graphene reinforced composite coating on copper by electrophoretic deposition,» *Carbon*, vol. 61, pp. 47-56, 2013.
- [15] J. L. Reyes Hernández, *Síntesis y aplicación de un recubrimiento híbrido para reducir desgaste en palas de generadores eólicos*, Pachuca de Soto, 2021.
- [16] M. M. Khonsari y E. Richard Booser, *Applied tribology: bearing design and lubrication*, 3ra ed., Wiley, 2017.
- [17] G. Ojados Sánchez, *Resistencia al desgaste y a la abrasión de polímeros técnicos y nanocomposites*, 2013.
- [18] D. Morales Acosta, *Síntesis y caracterización de materiales híbridos versátiles PMMA - SiO₂ para el desarrollo de recubrimientos*, 2007.

- [19] J. A. Rodríguez González, *Investigación de las propiedades de fractura interlaminar de materiales compuestos laminados a base de prepregs modificados con nanotubos de carbono y grafeno*, 2019.
- [20] K. K. Chawla, *Composite Materials*, 3ra ed., New York: Springer, 2013.
- [21] N. Tri-Dung, «Introduction to composite materials,» de *Composite and Nanocomposite Materials*, 2020.
- [22] E. Poodts, G. Minak, L. Mazzocchetti y L. Giorgini, «Fabrication, process simulation and testing of a thick CFRP component,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 56, pp. 673-680, 2014.
- [23] A. Vita, V. Castorani, M. Germani y M. Marconi, «Comparative life cycle assessment of low-pressure RTM, compression RTM and high-pressure RTM manufacturing processes to produce CFRP car hoods,» *Procedia CIRP*, vol. 80, pp. 352-357, 2019.
- [24] R. Jachura Rocha, J. A. F. Fidel Rocco, M. A. Silva de Oliveira y K. Iha, «Revestimentos de alta camada obtidos com a modificação de resinas epóxi novolaca pela reação com organo-siloxano e catálise ácida,» *Química Nova*, n° 00, pp. 1-8, 2016.
- [25] F. J. Tommasini, L. da Cunha Ferreira, L. G. Pimenta-Tienne, V. de Oliveira Aguiar, M. H. Prado da Silva, L. F. da Mota Rocha y M. de Fátima Vieira Marques, «Poly (Methyl Methacrylate)-SiC Nanocomposites Prepared Through in Situ Polymerization,» *Materials Research*, vol. 21, n° 6, 2018.
- [26] J. K. Max Alves do Rêgo, J. H. Oliveira do Nascimento, P. Agrawal, T. J. Alves Mélo, M. C. Burgos Costa y E. Noriyuki Ito, «Influence of amine groups in the chemical structure of photochromic dyes on the rheological and mechanical properties of poly(methyl methacrylate) (PMMA),» *Dyes and Pigments*, vol. 142, pp. 350-357, Marzo 2017.
- [27] S. Singh, N. Arora, K. Paul, R. Kumar y R. Kumar, «FTIR and rheological studies of PMMA-based nano-dispersed gel polymer electrolytes incorporated with LiBF₄ and SiO₂,» *Ionics*, vol. 25, p. 1495–1503, 01 Abril 2019.
- [28] S. Saravanan y R. S. Dubey, «Synthesis of SiO₂ Nanoparticles by Sol-Gel Method and Their Optical and Structural Properties,» *Romanian Journal of Information Science and Technology*, vol. 23, n° 1, pp. 105-112, 2020.
- [29] T. N. Tran, T. V. Anh-Pham, M. L. Phung-Le, T. P. Thoa-Nguyen y V. M. Tran, «Synthesis of amorphous silica and sulfonic acid functionalized silica used as reinforced phase for polymer electrolyte membrane,» *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 4, n° 4, 2013.
- [30] J. Zhang , Y. Fan, Z. Chen , S. Yan, J. Wang, P. Zhao, B. Hao y M. Gai, «Enhancing the water-resistance stability of CaS:Eu²⁺,Sm²⁺ phosphor with SiO₂-PMMA composite coating,» *Journal of Rare Earths*, vol. 33, n° 9, pp. 922-926, 2015.
- [31] Y. Liang, J. Ouyang, H. Wang, W. Wang, P. Chui y K. Sun, «Synthesis and characterization of core-shell structured SiO₂@YVO₄:Yb³⁺,Er³⁺ microspheres,» *Applied Surface Science*, vol. 258, n° 8, pp. 3689-3694, 2012.
- [32] N. Gu, H. Zhang, H. Ge, F. Wang y B. Liu, «In-situ polymerization of graphene/SiO₂ hybrids modified phenolic resin for improved thermal stability at an ultralow filler loading,» *Polymer Bulletin*, vol. 78, p. 5963–5976, Octubre 2021.
- [33] C. Nethravathi y M. Rajamathi, «Chemically modified graphene sheets produced by the solvothermal reduction of colloidal dispersions of graphite oxide,» *Carbon*, vol. 46, n° 14, pp. 1994-1998, Noviembre 2008.
- [34] Y. R. Lee, S. C. Kim, H.-i. Lee, H. M. Jeong, A. V. Raghu, K. R. Reddy y B. K. Kim, «Graphite oxides as effective fire retardants of epoxy resin,» *Macromolecular Research*, vol. 19, n° 1, pp. 66-71, 2011.
- [35] D. Savchenko, V. Vorliček, E. Kalabukhova, A. Sitnikov, A. Vasin, D. Kysil, S. Sevostianov, V. Tertykh y A. Nazarov, «Infrared, Raman and Magnetic Resonance Spectroscopic Study of SiO₂:C Nanopowders,» *Nanoscale Research Letters*, vol. 12, n° 292, 2017.

- [36] G. Bharath, S. B. Latha, E. H. Alsharaeh, P. Prakashd y N. Ponpandiana, «Enhanced hydroxyapatite nanorods formation on graphene oxide nanocomposite as a potential candidate for protein adsorption, pH controlled release and an effective drug delivery platform for cancer therapy,» *Analytical Methods*, vol. 9, pp. 240-252, 2017.
- [37] W. Li, W. Feng y H. Huang, «High-performance epoxy resin/silica coated flake graphite composites for thermal conductivity and electrical insulation,» *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 27, pp. 6364-6370, 2016.
- [38] G. Katumba, B. W. Mwakikunga y T. R. Mothibinyane, «FTIR and Raman Spectroscopy of Carbon Nanoparticles in SiO₂, ZnO and NiO Matrices,» *Nanoscale Research Letters*, vol. 3, pp. 421-426, 2008.
- [39] G. Soni, P. Soni, P. Jangra y Y. K. Vijay, «Optical, mechanical and thermal properties of PMMA/graphite nanocomposite thin films,» *Materials Research Express*, vol. 6, n° 7, 2019.
- [40] S. N. Tripathi, P. Saini, D. Gupta y V. Choudhary, «Electrical and mechanical properties of PMMA/reduced graphene oxide nanocomposites prepared via in situ polymerization,» *Journal of Materials Science*, vol. 48, pp. 6223-6232, 2013.
- [41] J. C. Mendoza Mendoza, E. E. Vera Cardenas, R. Lewis, W. Mai, E. O. Avila Davila , A. I. Martínez Pérez, S. Ledesma Ledesma y M. Moreno Rios, «Water Jet Erosion Performance of Carbon Fiber and Glass Fiber Reinforced Polymers,» *Polymers*, vol. 13, n° 17, p. 2933, 2021.
- [42] E. E. Vera-Cardenas, J. C. Mendoza-Mendoza, A. I. Martinez-Perez, S. Ledesma-Ledesma, C. Rubio-González y M. Vite-Torres, «Solid particle erosive wear study of polymer composite materials for wind turbine applications,» *Polymer Composites*, vol. 42, n° 4, pp. 1988-1999, 2021.
- [43] W. Huai, C. Zhang y S. Wen, «Graphite-based solid lubricant for high-temperature lubrication,» *Friction*, vol. 9, pp. 1660-1672, 2021.
- [44] D. A. Green, R. Lewis y R. S. Dwyer-Joyce, «Wear effects and mechanisms of soot-contaminated automotive lubricants,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 220, n° 3, pp. 159-169, 2006.
- [45] F. G. Mejía Hernández, M. Ramírez Cardona, G. Luis Raya, E. E. Vera Cárdenas, A. I. Martínez Pérez, E. Cardoso Legorreta y M. Reyes Pérez, «Estudio tribológico de una aleación para aplicación automotriz,» *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, vol. 6, n° 6, pp. 16-23, 2019.

ANEXOS

Anexo 1. Constancia de participación en el *VIII Simposio Nacional y 1era Reunión Latinoamericana de Ingeniería de Superficies y Tribología* presentado el 09 de noviembre del 2022.

VIII Simposio Nacional y 1^{era} Reunión Latinoamericana de Ingeniería de Superficies y Tribología



Estimado: **Luis Issai Govea Paz**

Número de Resumen: **TRIB-53**

En nombre de la Red Temática de Ingeniería de Superficies y Tribología (REDISYT), Tribobr y la Asociación Argentina de Tribología nos complace de confirmar que su trabajo titulado: *“Caracterización tribológica de un recubrimiento PMMA/SiO₂ aplicado en fibra de carbono”*.

De: **L. I. Govea Paz***, **A. I. Martínez Pérez**, **E. E. Vera Cárdenas**, **M. Moreno Ríos**, **E. O. Ávila Dávila**

Fue presentado en modalidad **Póster** en el VIII Simposio Nacional y 1^{era} Reunión Latinoamericana de Ingeniería de Superficies y Tribología 2022, el cual se llevó a cabo de manera virtual del 6 al 11 de noviembre de 2022.

Atentamente,

Dr. Joaquín Oseguera Peña
Presidente REDISYT

Dr. Giuseppe Pintaude
Secretario Tribobr

Dr. Germán Prieto
Secretario AAT