



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE MIGRACIÓN DE LUBRICANTE ANTE UN GRADIENTE DE
TEMPERATURA USANDO DIFERENTES RUGOSIDADES SUPERFICIALES
Y CAPAS DE ÓXIDO DE GRAFENO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MENCIÓN
ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN

NICOLÁS ALEJANDRO SCHIEFELBEIN VARGAS

PROFESOR GUÍA:
ANDREAS ROSENKRANZ

PROFESOR CO-GUÍA:
FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

COMISIÓN:
RODRIGO ESPINOZA GONZÁLEZ

Este trabajo ha sido principalmente financiado por Proyecto Fondecyt Iniciación 11180121

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO
DE: Ingeniero Civil mención Estructuras y Construcción.
POR: Nicolás Alejandro Schiefelbein Vargas.
FECHA: 2022
PROFESOR GUÍA: Andreas Rosenkranz

ESTUDIO DE MIGRACIÓN DE LUBRICANTE ANTE UN GRADIENTE DE TEMPERATURA USANDO DIFERENTES RUGOSIDADES SUPERFICIALES Y CAPAS DE ÓXIDO DE GRAFENO

La tribología es la ciencia que se dedica al estudio del roce, el desgaste y la lubricación en diferentes materiales. En el presente, la tribología tiene un enfoque dedicado a la disminución del desgaste de materiales usados en la industria y aumentar la eficiencia energética, lo que conlleva a disminuir el impacto ambiental. A partir de esto, esta memoria pretende realizar modificaciones a la química superficial usando recubrimientos de Óxido de Grafeno (GO), alteraciones a la topografía superficial mediante texturizaciones y el uso de ambas con el objetivo de evaluar posibles cambios ante la migración de lubricante.

Para la síntesis de Óxido de Grafeno, tanto de baja oxidación (LOGO) como alta oxidación (HIGO), se aplicó el método Hummers modificado en el laboratorio.

Se aplicó la metodología ya realizada previamente para la aplicación de recubrimientos sobre superficies haciendo spray coating con una mezcla de 60:40 [v/v%] de agua desmineralizada y etanol con las nano partículas, dispersando una cantidad de 2 ml de dicha mezcla a una presión de 1,5 [bar], en el cual el sustrato sólido se encuentra a 120 [°C]. todo esto para asegurar homogeneidad en los recubrimientos [5].

Se estudiaron los cambios en la humectabilidad de las superficies que fueron lavados, ya que estas previamente poseían recubrimientos de GO y una gota 1,5 [μL] de PAO 8, con el fin de poder reutilizar estas superficies una vez fueron evaluadas para la migración de lubricante. Esto debido a la cantidad limitada de texturas que fueron dispuestas para esta memoria, a causa de los problemas generados por la pandemia.

Usando un gradiente de temperatura de 20 [°C] se estudió la migración de lubricante. A partir de esto, se encontró que el uso de recubrimientos disminuye los efectos del flujo de Marangoni, aumenta la velocidad y homogeneidad en la distribución vertical y horizontal del lubricante sobre la superficie. Así mismo, el uso de texturas permite disminuir el efecto Marangoni, pero no permite la misma uniformidad e isotropía de la gota de aceite que los recubrimientos ya que solo hace una dirección preferente sobre la otra. El uso de texturas y recubrimientos hace que cambie la preferencia del flujo de la textura a una dispersión más homogénea y uniforme en ambas direcciones.

Se concluye que usar texturas y recubrimientos permite tener mayor flexibilidad en un material según las necesidades que se tenga en el momento, si se requiere un flujo preferencial o uno más isotrópico. Sin embargo, ambos métodos contrarrestan los efectos de la migración de lubricante.

Agradecimientos

Primero agradezco a mi profesor guía, Andreas Rosenkranz, por todo lo que me enseñó para realizar esta memoria. Por su paciencia cada vez que tenía que explicarme algo o realizar cualquier tipo de corrección a mi investigación. Por su forma de sobrellevar los pormenores asociados a la pandemia y motivarme a seguir adelante.

También quiero dar las gracias a mi familia, mis papás Alejandro y Elsa, y mi hermana Josefa, por estar siempre ahí cuando se le necesita, incluso cuando los momentos no siempre están a nuestro favor, por subirme el ánimo, el cariño y apoyo incondicional que significa el amor que nos tenemos, no hubiera podido hacer todo esto ni haber terminado la carrera si no fuera por ellos. A mi abuela Ester, por ser la que matrona que toda familia necesita, por ser el punto en común y de unión con los demás en mi familia, por recordar todas las historias nuestras una y otra vez con la alegría de quien las cuenta como si fuera la primera vez. A mi abuela Laura, porque a pesar de no tener lazos de sangre, me tiene un cariño igual que si fuéramos parientes. A mis tíos Andrés, Mariana, Erika del Carmen, Iván, Luis y Jessica por estar presente, por acompañarme y ayudarme en lo que necesitara y por todas las risas que se forman cada vez que nos vemos. A mis primos Cristian, Pablo, Carla, Benjamín, Sofía, Emilia, Magdalena y Mariano por entregarme lindos recuerdos a lo largo de los años, por ayudarme y darme la oportunidad de ayudarlos también; porque saben que estaré para ellos como ellos estarán para mí cuando los necesite.

A mi perrita Samanta, por acompañarme todos estos años y darme tantas alegrías con sus locuras, flojera y ganas de pelear con otros perros.

A todos mis amigos del colegio que hasta el día de hoy sigo viendo, a Nicolás, Diego, Diego, Guillermo, Tomás y Simón, porque ellos nunca faltaron cuando de juntarnos a pasar un buen rato se trataba. Por los inmemorables momentos que hemos pasado y para que sigamos cosechando grandes historias. A mis amigos que hice en la universidad, José, Diego, Benjamín, Camilo, Claudio, Carlos, Cristian, Eduardo, Boro, Emanuel, Erick, Francisco, Jordi, Lucas, Marco, Matías, Steffi, José, Matías, Simón, Jaime, Franco y Raimundo. A todos ellos, por hacer de mi estadía en la universidad mejor de lo que alguna vez esperé. Algunos ellos por ayudarme a seguir adelante y apoyarme hasta llegar donde estoy, otros por las risas y buenos momentos tanto dentro como fuera de la facultad, pero todos por alegrarme el día a día.

A Camila, por ser la mejor amiga que hay, por escucharme cada vez que lo necesitaba y por los momentos que la pasamos compartiendo nuestras historias y todo lo que nos gusta. Por reírnos de las cosas más tontas que puede haber y por siempre estar a disposición de ayudar a los demás.

A Rodrigo, por ser el mejor profesor de guitarra que hay, por sus consejos y su infinita experiencia que me ayudaron a desarrollarme en el instrumento y en la música. Por todas sus increíbles historias y disposición para guiarme en mi crecimiento como guitarrista.

A Tamara, por ser quien me devolvió la confianza y seguridad en mí mismo, y por ser la mejor compañera de vida que me pudo haber tocado.

Mención especial para José, Francisco y Darío por ayudarme con el desarrollo de este informe y por su guía en el laboratorio.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
2. Objetivos	3
3. Estado del Arte	4
3.1. Tribología.....	4
3.1.1. Fricción o Roce.....	4
3.1.2. Desgaste	5
3.1.3. Lubricación	5
3.2. Migración de lubricante	5
3.3. Nano láminas de Grafeno.....	7
3.4. Nano láminas de Óxido de Grafeno.....	8
3.5. Superficies texturizadas	8
3.6. Spray coating o recubrimiento por pulverización	9
4. Metodología	10
4.1. Síntesis de soluciones de Óxido de Grafeno	10
4.2. Limpieza de sustratos de acero inoxidable	10
4.3. Spray Coating.....	10
4.4. Migración de Lubricante.....	12
4.5. Lavado de Muestras	13
4.6. Ángulo de Contacto	13
4.7. Capturas de Imágenes con Microscopio Óptico	14
5. Resultados	15
5.1. Referencia (superficie sin textura).....	15
5.2. Ángulo de Contacto	20
5.3. Superficies Texturizadas.....	27
5.4. Comparación de resultados	43
6. Conclusiones	52
7. Bibliografía.....	53

Índice de Tablas

Tabla I: Propiedades del PAO 8 [5].....	5
Tabla II: Longitud de lubricante en el eje X para diferentes recubrimientos.	16
Tabla III: Longitud de lubricante en el eje Y para diferentes recubrimientos.....	16
Tabla IV: Velocidad instantánea para diferentes recubrimientos, eje X.	18
Tabla V: Velocidad instantánea para diferentes recubrimientos, eje Y.	18
Tabla VI: Ángulo de contacto de muestras lavadas que anteriormente poseían recubrimientos con diferentes concentraciones de LOGO y el delta porcentual que tiene con la referencia (muestra sin lavar).....	22
Tabla VII: Ángulo de contacto de muestras lavadas que poseen recubrimientos con diferentes concentraciones de LOGO al momento de obtener datos y el delta porcentual que tiene con la referencia (muestra con recubrimiento y sin lavar).....	25
Tabla VIII: Dimensiones de las texturas.	27
Tabla IX: Longitud gota de aceite en texturas sin recubrimiento, eje x.	32
Tabla X: Longitud gota de aceite en texturas sin recubrimiento, eje y.	32
Tabla XI: Longitud gota de aceite en texturas con recubrimiento, eje x.	33
Tabla XII: Longitud gota de aceite en texturas con recubrimiento, eje Y.....	33
Tabla XIII: Velocidad instantánea texturas sin recubrimiento, eje X.	34
Tabla XIV: Velocidad instantánea texturas sin recubrimiento, eje Y.	34
Tabla XV: Velocidad instantánea texturas con recubrimiento, eje X.	35
Tabla XVI: Velocidad instantánea texturas con recubrimiento, eje Y.	36

Índice de Figuras

Figura 1: Pérdidas de energía en la industria minera [1].	1
Figura 2: Migración de lubricante por gradiente de temperatura.	2
Figura 3: Texturas propuestas.	3
Figura 4: Síntesis de Óxido de Grafeno, método Hummers modificado.	3
Figura 5: Área real (a) y área aparente (b) de superficies en contacto.	4
Figura 6: Flujo impulsado de zonas calientes a zonas más frías [1].	6
Figura 7: Estructura bidimensional (2D) del grafeno [5].	7
Figura 8: Modelo propuesto por Lerf-Klinowski de la estructura del óxido de grafeno [5].	8
Figura 9: herramientas usadas para spray coating, mesa temperada, aerógrafo, transformador y compresor de aire.	11
Figura 10: Muestra con recubrimiento de 5 mg/ml de GO.	11
Figura 11: instrumentos usados en la migración de lubricante, mesa de cobre, terminal de temperatura, 2 cámaras conectadas a computador y termómetro digital.	12
Figura 12: microscopio óptico y software con captura de una textura en aumento x5.	14
Figura 13: Muestra de referencia (sin recubrimiento) para (a) t=0s y (b) t=60s. Recubrimiento con LOGO 1 mg/ml para (c) t=0s y (d) t=60s. Recubrimiento con LOGO 2 mg/ml para (e) t=0s y (f) t=60s. Recubrimiento con LOGO 5 mg/ml para (g) t=0s y (h) t=60s.	15
Figura 14: Gráfico comparativo de la longitud de lubricante en el tiempo para diferentes recubrimientos, (a) eje X y (b) eje Y.	17
Figura 15: Comparación de la velocidad instantánea en el eje (a) X y (b) en el eje Y.	19
Figura 16: Ángulo de contacto para (a) superficie sin lavar, (b) superficie con recubrimiento lavado de 1 mg/ml, (c) superficie con recubrimiento lavado de 2 mg/ml, y (d) superficie con recubrimiento lavado de 5 mg/ml.	21
Figura 17: Comparación de ángulo de contacto de muestras sin lavar (referencia) y muestras lavadas que tenían recubrimientos de 1, 2 y 5 mg/ml.	23
Figura 18: Comparación de ángulo de contacto para recubrimiento de 1 mg/ml LOGO, (a) sin lavar y (b) lavado. Comparación de ángulo de contacto para recubrimiento de 2 mg/ml LOGO, (c) sin lavar y (d) lavado. Comparación de ángulo de contacto para recubrimiento de 5 mg/ml LOGO, (e) sin lavar y (f) lavado.	24
Figura 19: Comparación de ángulo de contacto de muestras sin lavar (referencia) y muestras lavadas, ambas poseen recubrimientos de 1, 2 y 5 mg/ml al momento de obtener los datos.	26
Figura 20: Imágenes de texturas V1 a V8, sin recubrimiento.	28
Figura 21: Texturas V1 a V8, Con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO.	29
Figura 22: Texturas (a) V1, (b) V2, (c) V3 y (d) V4 donde se compara la migración de lubricante sin recubrimiento, para los momentos (x1) t=0s y (x2) t=1,8s; y con recubrimiento de HIGO 5 mg/ml, para los momentos (x3) t=0s y (x4) t=60s.	30
Figura 23: Texturas (a) V5, (b) V6, (c) V7 y (d) V8 donde se compara la migración de lubricante sin recubrimiento, para los momentos (x1) t=0s y (x2) t=1,8s; y con recubrimiento de HIGO 5 mg/ml, para los momentos (x3) t=0s y (x4) t=60s.	31
Figura 24: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V1 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).	37

Figura 25: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V2 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).	37
Figura 26: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V3 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).	38
Figura 27: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V4 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).	38
Figura 28: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V5 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).	39
Figura 29: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V6 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).	39
Figura 30: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V7 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).	40
Figura 31: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V8 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).	40
Figura 32: Comparación de texturas V1, V6, V7, V8 y la referencia (sin textura) en la longitud que tiene el aceite en el tiempo, en el (a) eje X y el (b) eje Y.....	41
Figura 33: Comparación de las texturas V1, V6, V7, V8 y referencia (sin textura) en la velocidad instantánea que tiene el aceite en el tiempo, en el (a) eje X y (b) eje Y.....	42
Figura 34: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V1 sin recubrimiento; y con textura V1 y recubrimiento.....	43
Figura 35: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V2 sin recubrimiento; y con textura V2 y recubrimiento.....	44
Figura 36: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V3 sin recubrimiento; y con textura V3 y recubrimiento.....	45
Figura 37: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V4 sin recubrimiento; y con textura V4 y recubrimiento.....	46
Figura 38: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V5 sin recubrimiento; y con textura V5 y recubrimiento.....	47
Figura 39: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V6 sin recubrimiento; y con textura V6 y recubrimiento.....	48

Figura 40: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V7 sin recubrimiento; y con textura V7 y recubrimiento. 49

Figura 41: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V8 sin recubrimiento; y con textura V8 y recubrimiento. 50

1. Introducción

La problemática principal es que, a nivel industrial, existen grandes pérdidas de energía asociadas al roce existente entre las superficies en contacto de distintas maquinarias (camiones, retroexcavadoras, puentes grúa, etc.). Estas pérdidas pueden alcanzar hasta un 32% de la energía total utilizada, lo que implica grandes costos a nivel de recursos, tiempo e impacto ambiental, todo esto debido a que los materiales se gastan y deben ser mantenidos, reparados e incluso desechados para ser reemplazados.

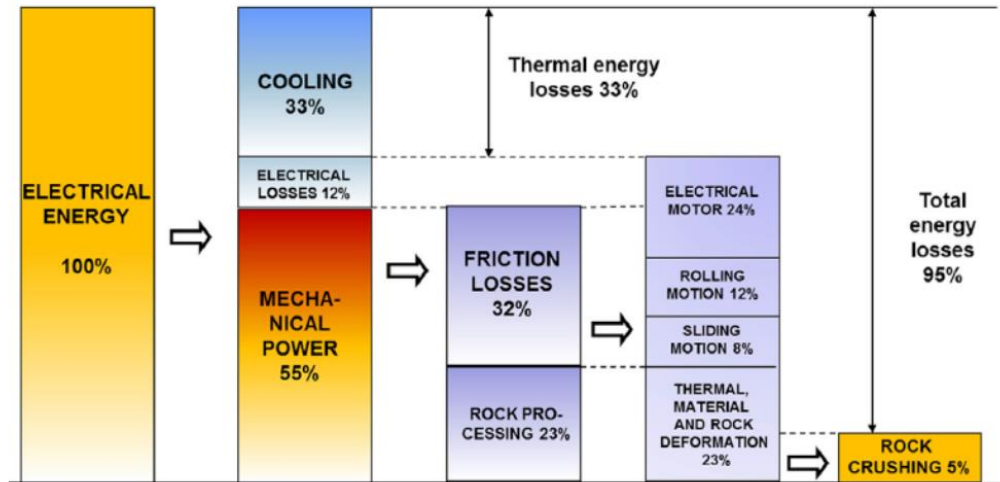


Figura 1: Pérdidas de energía en la industria minera [1].

La explicación de este fenómeno se entiende a través del análisis microscópico de una gota, que, al existir un gradiente de temperatura, la zona con mayor temperatura aumenta la energía cinética intermolecular de la gota, “por lo que fuerzas de Marangoni son resultantes de la inducción de este gradiente de tensión superficial” [1,3]. Mientras que en la zona con menor temperatura las tensiones superficiales son igualadas con la fuerza del flujo capilar, haciendo que esta zona sea más estable que su contraparte. Finalmente, “tanto las fuerzas de Marangoni como capilares llevan a la creación de complejos vértices dentro del lubricante que influyen y perturban el flujo de este” [1,3]. Sin ir más lejos “como se muestra en la siguiente figura, la forma de la gota es diferente tanto adelante como atrás debido a los ángulos de contacto de avance y retroceso, respectivamente, mejor conocido como ángulo de histéresis” [1].

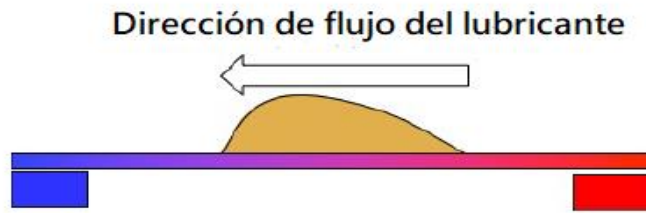


Figura 2: Migración de lubricante por gradiente de temperatura.

En resumidas cuentas, al existir una diferencia energética, en forma de calor, en el contacto del líquido con la superficie, el flujo tendrá un comportamiento de escapar de zonas de alta energía (mayor temperatura) hacia zonas con menor energía (menor temperatura). Este efecto es contraproducente para la industria ya que son justamente las zonas con elevadas temperaturas donde se necesita una mayor presencia del lubricante para disipar el calor y mitigar el desgaste de los materiales. Entonces *“para acabar con los problemas tribológicos asociados a la migración de lubricante consiste en reducir el movimiento del lubricante o guiar activamente el lubricante de vuelta a zona donde más se necesita”* [1].

2. Objetivos

Para solucionar la migración de lubricante, esta memoria propone el uso de diferentes texturas para poder estudiar sus efectos de dispersión en el contexto de migración de lubricante:

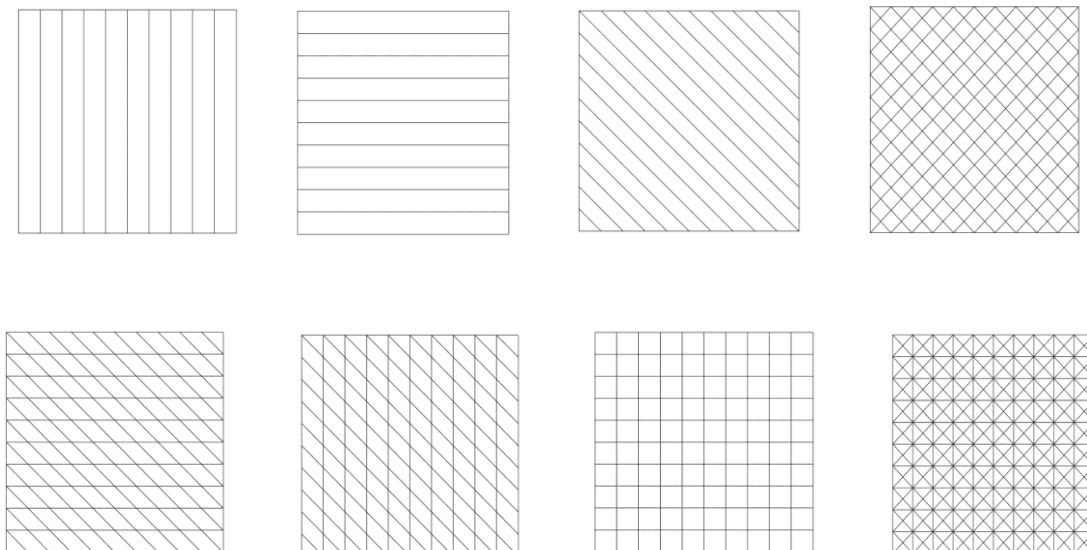


Figura 3: Texturas propuestas.

Además, se usará óxido de grafeno de altas y bajas razones de oxigenación para estudiar sus efectos sobre la migración de lubricante. Este material se encuentra disponible en el laboratorio de nanopartículas y se utilizó el método Hummers modificado [5].

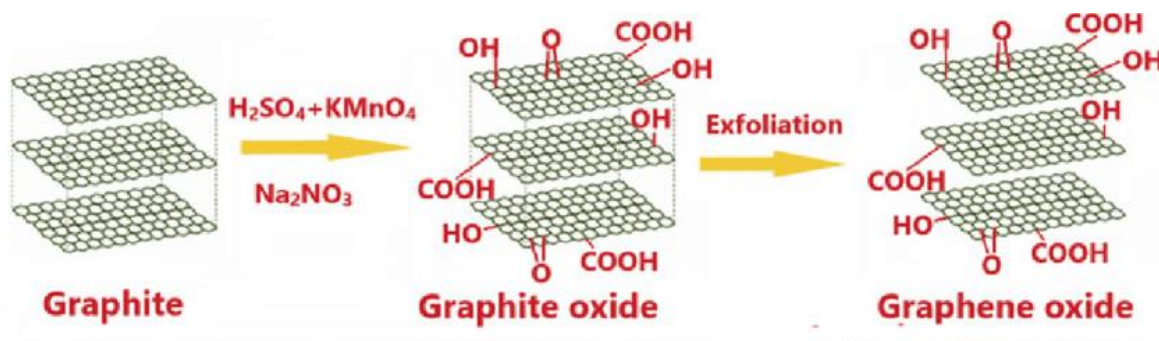


Figura 4: Síntesis de Óxido de Grafeno, método Hummers modificado.

Por lo que se pretende estudiar:

1. La migración de lubricante usando superficies texturizadas.
2. La migración de lubricante usando recubrimientos de óxido de grafeno.
3. La posible existencia de una sinergia entre ambos métodos.

3. Estado del Arte

3.1. Tribología

La problemática principal en tribología ocurre con la siguiente situación: se tienen 2 superficies en contacto, a nivel microscópico existen pequeñas zonas donde realmente interactúan ambas superficies, esta se llama área real de contacto y es más pequeña de la que se puede percibir a simple vista, siendo esta el área aparente de contacto [5].

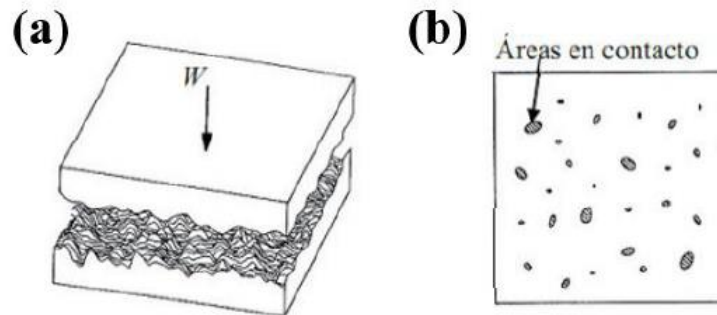


Figura 5: Área real (a) y área aparente (b) de superficies en contacto.

A partir de la figura anterior (a), se observa que las superficies tienen un grado de rugosidad, aunque no sea perceptible por los ojos humanos, entonces el área aparente viene a ser la superficie cuadrada. En la misma figura (b), se observa el área real de contacto, que vienen a ser las pequeñas manchas que aparecen en el cuadrado, este fenómeno se da siempre entre dos superficies en contacto deslizante, por lo que la rugosidad superficial juega un rol importante en la tribología [5].

3.1.1. Fricción o Roce

La fricción es la fuerza que se opone al movimiento, es decir, apunta en dirección opuesta y se genera en la intersección entre dos superficies y se representa matemáticamente como:

$$F = \mu \cdot W$$

Donde:

F : Fuerza de roce.

μ : Coeficiente de roce, puede ser estático (antes del movimiento) o cinético (durante el movimiento).

W : Fuerza normal sobre el área de contacto.

La segunda ley de roce establece que la fuerza de roce es independiente del área superficial de contacto, lo que implica que el coeficiente de roce no cambia según la superficie, este siempre es constante según el material. La tercera ley establece que el coeficiente de roce cinético no cambia según la velocidad del cuerpo que este en movimiento, este es constante [5].

Finalmente, la aparición de roce entre dos superficies tiende a ser algo negativo para la industria ya que este generalmente libera energía en forma de calor, lo que causa alteraciones en las propiedades mecánicas en los materiales e incluso alteraciones en el roce de este [5].

3.1.2. Desgaste

Es el daño que se produce debido al deslizamiento entre dos superficies en contacto a través de pérdidas progresivas del material superficial en el tiempo. El material una vez desprendido puede quedar suspendido libremente en la intersección de contacto o salir de este [5].

3.1.3. Lubricación

Los lubricantes tienen por función la de reducir el roce y, por lo tanto, el desgaste (nuevamente hay que indicar que el roce y desgaste provocan grandes pérdidas en la industria tanto de materiales, energía y dinero). La forma en que actúan para lograr este cometido es que evitan el contacto entre dos superficies.

Más allá de las capacidades de disminuir la fricción, los lubricantes también reducen los aumentos de temperaturas asociados a esta fuerza. Por ello, los lubricantes deben tener una buena conductividad térmica con el fin de no elevar la temperatura de las superficies. A su vez, el aumento de temperatura en las zonas de contacto puede provocar una degradación del lubricante o incluso acelerarla, por lo que las capacidades termo oxidativas deben ser tomadas en cuenta para elegir un lubricante, sin mencionar que este mismo no puede corroer el material con el que está en contacto.

Otros ejes para considerar es el de la viscosidad de los lubricantes, es la viscosidad, ya que a mayor viscosidad tienen mayor capacidad de formar una pequeña capa sobre la superficie; y luego la untuosidad, que es la capacidad del lubricante para adherirse a la superficie en contacto [5].

El lubricante usado en esta memoria corresponde al poli-(alfa)-olefina sin aditivos, o mejor conocido como PAO 8. A continuación se muestran sus propiedades:

Tabla I: Propiedades del PAO 8 [5].

Propiedad	Valor
Viscosidad cinemática a 100 [°C]	7,8 [cSt]
Viscosidad cinemática a 40 [°C]	48 [cSt]
Índice de viscosidad	145 [-]
Gravedad específica	0,83 [-]

3.2. Migración de lubricante

En un estado donde las superficies no están completamente separadas por el lubricante, presentan pequeñas zonas de contacto real donde se producen aumentos de roce, lo que provoca aumentos de temperatura en dichas zonas.

Esto afecta directamente las tensiones en la interfaz de la gota de lubricante (es decir, la interfaz líquido-sólido-gas que hay entre el lubricante, la superficie y el aire) ya que provoca un desbalance

entre estas tensiones. En resumidas cuentas, el aumento de temperatura disminuye la tensión superficial.

Este desbalance es lo que provoca el movimiento de la gota, en particular de la zona con mayor temperatura a las de menor temperatura. Este movimiento, llamado migración de lubricante (o migración termocapilar en términos generales) desencadena un efecto “bola de nieve”, donde las zonas con mayor temperatura disponen de menos lubricante, lo que provoca que aumente el roce entre superficies, lo que provoca mayores aumentos de temperatura, emigrando el lubricante aún más, lo que por consecuencia genera problemas de lubricación y desgaste de los materiales.

Al analizar la ecuación de Young para la fase líquido-sólido-gas se denotan dos fuerzas, la primera siendo la fuerza impulsora derivada del desbalance entre las tensiones superficiales; y la fuerza viscosa que se opone a este. Es por esto, que la fuerza resultante sea directamente dependiente del ángulo de contacto de la superficie y la gota. A continuación, se muestra la ecuación de Young:

$$F_d = (\sigma_{SG} - \sigma_{SL})_{TH} - (\sigma_{SG} - \sigma_{SL})_{TL} \quad (1)$$

Donde:

F_d : Fuerza impulsora.

σ_{SG} : tensión superficial en la interfaz sólido-gas.

σ_{SL} : Tensión superficial en la interfaz sólido-líquido.

Si $F_d = 0$ entonces se tiene un caso estático y la gota se encontraría en balance. En cambio, si $F_d \neq 0$ se tiene el caso en que la gota está en movimiento, lo que quiere decir que se comporta como un flujo, en particular, como un flujo de Marangoni debido a que va desde zonas con mayor energía a menor energía. A continuación, se muestra la siguiente figura:

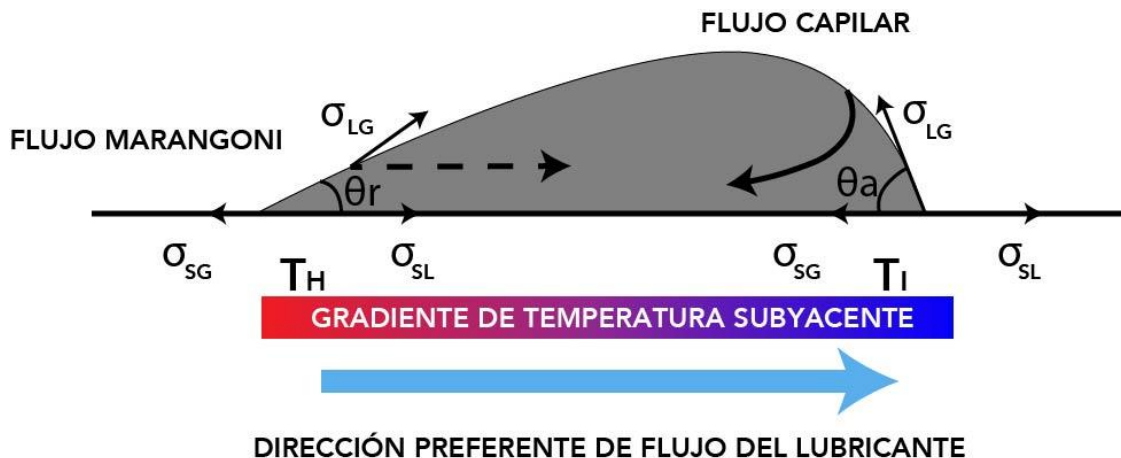


Figura 6: Flujo impulsado de zonas calientes a zonas más frías [1].

Fote et al. [6] sostiene que solo es necesario un gradiente de temperatura de 0,05 (°C/mm) para provocar que una transferencia completa de un aceite de espesor de 1 μm hacia el extremo más frío de una superficie en cosa de días. Además, gradientes más pequeños tendrán el mismo resultado,

pero en una mayor cantidad de días. Esto se debe al cambio de temperatura provoca cambios en la tensión superficial. [4-6].

3.3. Nano láminas de Grafeno

El grafeno es un material nano particulado que recién en el siglo 21 se ha podido aislar para poder determinar sus propiedades. Estas han superado muchas expectativas entre ellas tener mayor resistencia que el acero [5].

El grafeno se compone solo de átomos de carbono de estructura hexagonal, debido a esto se conglomeran formando láminas conectándose a otros tres carbonos en el nivel sp^2 , es por ello por lo que se dice que es un material bidimensional.

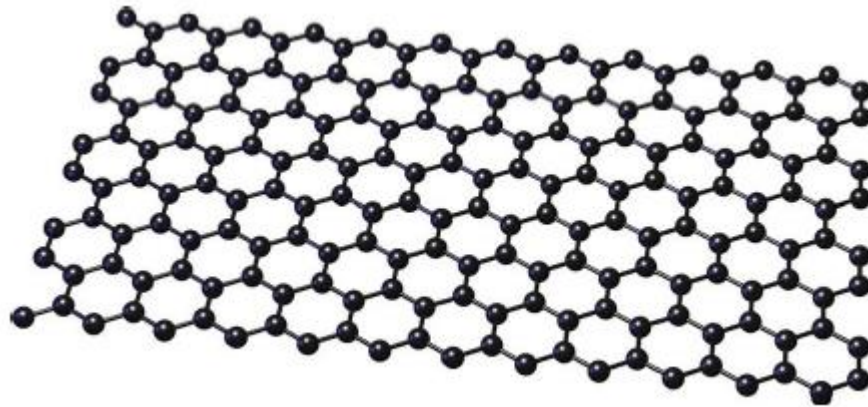


Figura 7: Estructura bidimensional (2D) del grafeno [5].

Entre las capacidades del grafeno están la buena conductividad térmica, gran resistencia a deformaciones y a fracturas, además de propiedades electrónicas como buen coeficiente de absorción de luces, brecha de energía de transporte y partículas de Dirac con dispersión lineal [2,5].

Es por esto, que el grafeno es un material de mucho interés en la actualidad, pero para efectos de esta memoria, la propiedad que motiva el estudio es que mejora la mojabilidad de la superficie, alterando la química superficial de los estratos, haciéndolo un buen candidato para solucionar la migración de lubricante.

Para la síntesis de Grafeno se puede utilizar la exfoliación mecánica de grafito o la deposición química en fase vapor (CVD). Ninguno de estos métodos está hecho para una fabricación a escalas industriales por su problema de homogeneidad de las partículas sintetizadas.

Debido a esto y los grandes costos asociados a la fabricación y síntesis de grafeno, que esta memoria utiliza su derivado llamado óxido de grafeno (GO), que posee propiedades similares al grafeno, pero es más sencillo de realizar, más barato y fácil de diluir [1,5].

3.4. Nano láminas de Óxido de Grafeno

Al igual que el grafeno, el óxido de grafeno también es un material bidimensional agrupado en láminas. La diferencia es que este posee grupos funcionales como hidroxilo (-OH), alcoxi (C-O-C), carbonilo (C=O) y ácido carboxílico (-COOH) principalmente (también puede presentar otros grupos funcionales con oxígeno, pero en menor cantidad). Gracias a la presencia de oxígeno, este material puede ser disuelto en agua desmineralizada, cosa que el grafeno no puede. Debido a esta capacidad flexible y de sintetizarse, es que tiene un alto interés en diferentes ramas de la ciencia [2].

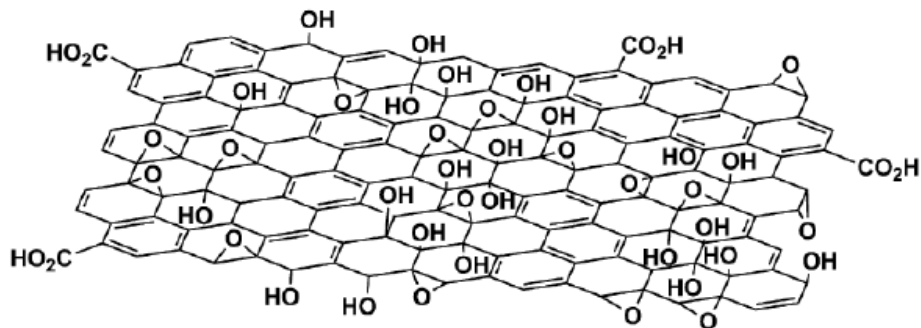


Figura 8: Modelo propuesto por Lerf-Klinowski de la estructura del óxido de grafeno [5].

El método de fabricación de óxido de grafeno es el método de Hummers modificado. Este trata de oxidar grafito puro con nitrato de sodio, permanganato de potasio y ácido sulfúrico, este proceso demora aproximadamente un día de principio a fin.

La cantidad de oxígeno presente en el óxido de grafeno altera las propiedades que este material pueda tener y está asociado a la forma que este se sintetiza con el método de Hummers modificado. Esto le da versatilidad al material a la hora de realizar investigaciones o para lograr lo que se desee con este [1,2 y 5].

En esta memoria, en particular se trabaja con baja oxigenación (LOGO) para superficies lisas sin textura, y alta oxigenación (HIGO) para superficies texturizadas.

3.5. Superficies texturizadas

En cuanto a superficies texturizadas, en la literatura se ha demostrado que alterar la topografía superficial permite una mayor reducción del roce en comparación a una superficie lisa, es decir, sin textura [3,4].

Incluso se ha comprobado que se pueden usar geometrías superficiales para interrumpir el flujo del aceite y que escape de zonas calientes a más frías. Esto funciona dependiendo de la geometría y también dentro de un rango de 1,7-5,0 (°C/cm) [7].

Grützmacher et al. [4] explica que el uso y aplicación de superficies texturizadas en conjunto con lubricantes permite un mejor desempeño de este último en cuanto a dispersión, comparándolo con su referencia sin textura. Además, el tipo de textura y dimensionamiento influye directamente en el resultado del desempeño del movimiento del lubricante [3,4].

Por otro lado, cuando se alinean las hendiduras de una textura de forma paralela con el gradiente de temperatura esta aumenta los efectos de la migración, es decir, el flujo adquiere mayor velocidad en la dirección paralela. Análogamente, cuando las hendiduras se alinean perpendicularmente, el flujo disminuye la velocidad en la dirección paralela al gradiente de temperatura [4, 9, 10].

Dai et al. [8] concluye que al realizar hendiduras en la superficie estas guían la dirección en la que fluye una gota, dependiendo de su orientación. Sin embargo, existe un gradiente de temperatura ($2^{\circ}\text{C}/\text{mm}$) que la gota puede superar la contraposición de las hendiduras y fluir a favor del gradiente. Entonces, se puede ajustar el ángulo que forman las hendiduras con el gradiente de temperatura para contrarrestar la migración de lubricante de manera efectiva [8,11].

En cuanto a las hendiduras, estas se pueden modificar para alterar los resultados de la migración de lubricante. Si estas están alineadas de forma paralela, su profundidad o disminuir el ancho del surco con tal de aumentar la velocidad del flujo en dicho eje. En cambio, si se alinea en forma perpendicular, al aumentar la profundidad del surco la velocidad del flujo paralelo al gradiente de temperatura disminuye [4, 11,12,14, 15].

Es por ello, que hay interés en observar y analizar el comportamiento de la migración de lubricante ante gradientes de temperatura cuando se altera la topografía superficial, ya que esta tiene la particular característica de modificar la forma de la gota de lubricante, haciéndola más anisotrópica [9-14,18]. Y aún más, hay interés por observar los efectos que tiene cambiar la química superficial en dichas texturas [1, 16, 17]. Entonces se prevé que las texturas liderarían una mejora importante en la fiabilidad de este y en la baja de contaminación por uso de sensores o materiales termo-resistentes [4].

3.6. Spray coating o recubrimiento por pulverización

El spray coating corresponde a una metodología en la que las partes metálicas y no metálicas son rociados en forma de partículas muy finas en estado fundido o semi fundido sobre una superficie sólida, asegurando homogeneidad y consistencia sobre esta.

El óxido de grafeno se dispone en una mezcla líquida homogénea para poder aplicar este método, donde se deposita sobre una cámara conectada a un compresor de aire, donde se mezcla con el gas (aire en este caso) y la mezcla emerge de la misma forma que un aerosol. De esta forma se depositan uniformemente sobre la superficie deseada [5].

Las variables para considerar en este método son la altura en que se coloca el aparato de dispersión, el radio de la boquilla de este y la presión de la bomba. Además, se debe considerar la concentración de óxido de grafeno en la solución líquida, la velocidad en que se deposita sobre la cámara y la limpieza interna del equipo utilizado [5].

Esta metodología además es barata, ya que el equipo se puede conseguir en varias partes y precios módicos, y es fácil de realizar, ya que solo se necesita de una persona y puede realizarse la cantidad de veces que sea necesario.

4. Metodología

4.1. Síntesis de soluciones de Óxido de Grafeno

Para la creación de soluciones de óxido de grafeno en concentraciones de 1, 2 y 5 mg/ml se deben depositar 20, 40 y 100 mg de GO en un frasco, luego se agregan 12 ml de agua desmineralizada y se mezclan usando una máquina de baño en ultrasonido por 30 minutos. Luego de esto, se agregan 8 ml de Etanol y se vuelven a mezclar por 30 minutos de baño en ultrasonido. Esto se debe a que el GO es muy insoluble y cada vez que se deba usar una solución creada previamente se deben volver a bañar en ultrasonido.

4.2. Limpieza de sustratos de acero inoxidable

Los sustratos de acero inoxidable tienen dimensiones de 20x20x0,3 mm y se fabrican usando el método de guillotina. Estos sustratos vienen cubiertos con una lámina plástica en su superficie, para evitar que esta se raye o se ensucie, por lo que para empezar se deben remover estas láminas y luego se sumergen en Etanol y se bañan en ultrasonido (al igual que las soluciones de GO) por 20-30 minutos, para así asegurar que la superficie tenga una limpieza óptima y no altere los resultados.

4.3. Spray Coating

Luego de lavar las muestras y mezclar las soluciones, para lograr su deposición se utiliza el método “Spray Coating” en el que se coloca el sustrato sobre una mesa a una temperatura de 120°C que tiene por objetivo que tenga un secado rápido una vez que la solución de GO se deposite [5].

Para realizar esta deposición se utiliza un aerógrafo común y corriente puesto 14 cm por encima de la mesa con temperatura (así asegura un foco de dispersión óptimo) y se conecta a un compresor de aire en el que se fija una presión de 1,5 kgf/cm^2 .

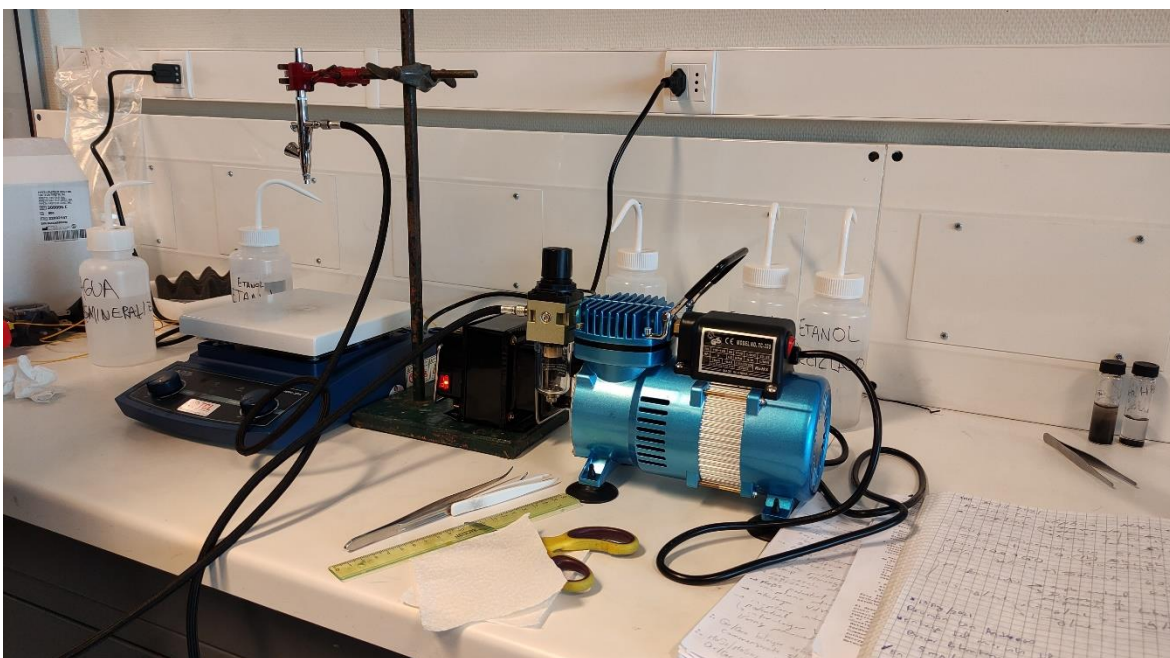


Figura 9: herramientas usadas para spray coating, mesa temperada, aerógrafo, transformador y compresor de aire.

Una vez todo puesto en orden, se depositan 2 ml de la solución GO continuamente sobre la cámara del aerógrafo y se activa esta para empezar la dispersión. Una vez terminados de depositar la cantidad señalada, se apaga el aerógrafo y la muestra está lista.

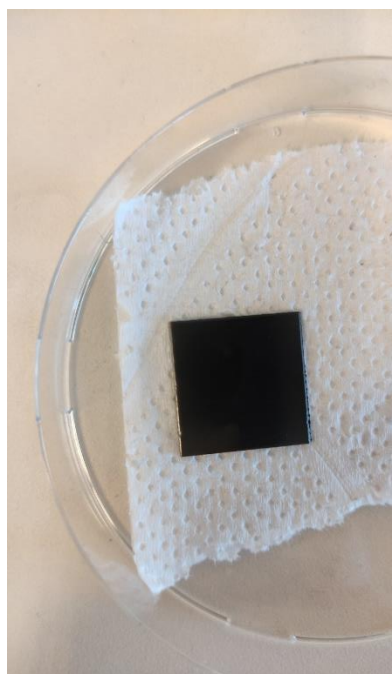


Figura 10: Muestra con recubrimiento de 5 mg/ml de GO.

4.4. Migración de Lubricante

Para estudiar la migración de lubricante se dispone una mesa nivelada, para evitar inclinaciones. Sobre esta se coloca una placa de cobre en el que en un extremo se conecta un terminal de calor controlado por voltaje, en el que se ajusta a aproximadamente 175-200V para lograr la temperatura deseada. En el otro extremo pasa una manguera por la cual fluye agua potable, esto genera un gradiente de temperatura de 20°C en esta placa de cobre, sobre la cual se deposita la muestra a probar [5].

Una vez cumplidos estos protocolos, se depositan 1,5 μL de PAO 8 sobre la muestra y a través de un lente de alta resolución conectado a un computador se graba el movimiento de esta gota de aceite durante 1 minuto. Luego con el software de grabación “*DinoCapture 2.0*”, se miden la longitud horizontal y vertical de la gota en los instantes de 0, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 45 y 60 segundos para medir los resultados. Más adelante, para el uso de texturas, se usan intervalos de tiempo de 0 - 0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 1,0 - 1,2 - 1,4 - 1,6 - 1,8 segundos.

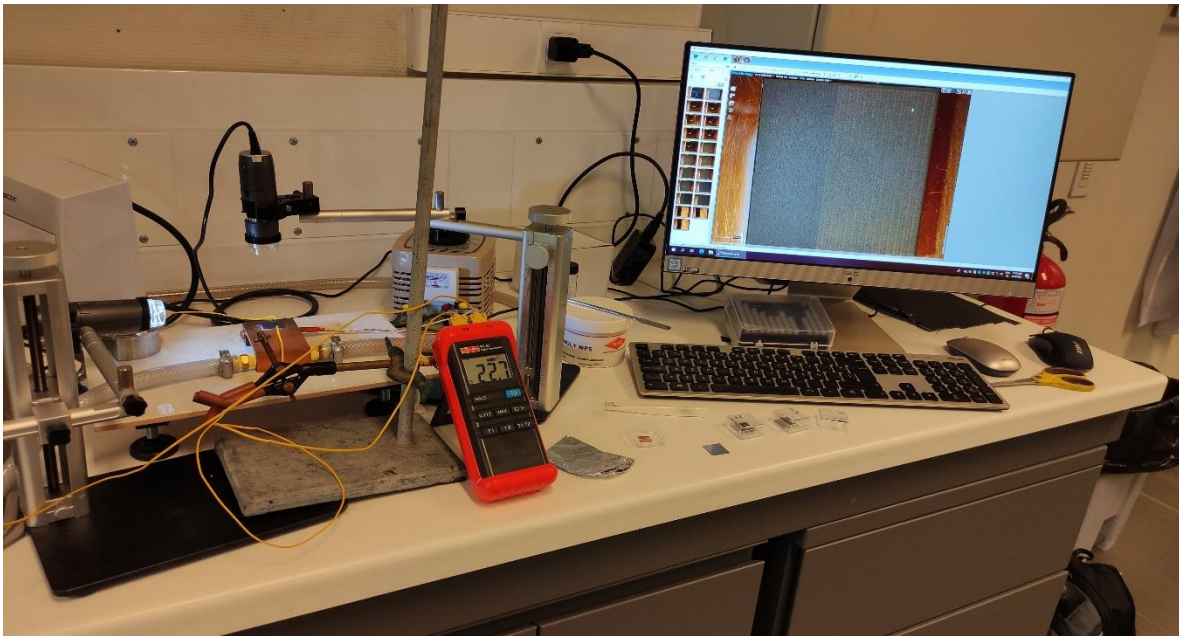


Figura 11: instrumentos usados en la migración de lubricante, mesa de cobre, terminal de temperatura, 2 cámaras conectadas a computador y termómetro digital.

4.5. Lavado de Muestras

Debido a la poca cantidad de muestras texturizadas (esto provocado por la pandemia) para ensayar en migración de lubricante, tanto en referencia como con recubrimiento, se propone el lavado de muestras y reutilizarlas con el fin de obtener la suficiente cantidad de datos para poder alcanzar conclusiones asociados a este tema.

Para ello, la muestra a lavar puede estar en dos condiciones: sin recubrimiento y con aceite; y con recubrimiento de GO y aceite. De ambas formas la muestra se sumerge en aproximadamente 300 ml de mezcla de agua potable con suficiente desengrasante común “Quix” (no se usa agua destilada porque el desengrasante no reacciona con esta). Una vez sumergida se dispone en baño de ultrasonido por 30 minutos, una vez transcurridos, se retiran y se secan con secador de pelo y luego se repite el proceso, pero se sumerge en etanol (alcohol 95%) por 30 minutos más. Después de esto la muestra está lista para ensayar.

4.6. Ángulo de Contacto

Con tal de demostrar que el lavado de muestras no altera la química superficial de estas para la migración de lubricante, se realiza la caracterización de ángulo de contacto. Esta consiste en depositar 3,0 μL de agua desmineralizada sobre la muestra y con una cámara de alta resolución y software se mide el ángulo que tiene la gota en la interfaz sólido-líquido-gas en estado estático sobre la superficie.

Para la obtención de datos, se usa una jeringa que deposita una gota con el volumen mencionado y en tiempo real se mide el ángulo promedio que tiene el contacto de esta gota sobre la superficie. Esto se hace 4-5 veces por muestra, moviéndola para que la siguiente gota no caiga en la misma zona que cayó la anterior y usando un papel absorbente para retirar los residuos.

Lo que se espera es que la muestra en estado referencial (sin recubrimiento y sin haber sido lavada) y las muestras lavadas (es decir, que hayan pasado por spray coating y lavado posterior) tengan resultados similares, con tal de demostrar que no hay cambios superficiales al estado referencial.

4.7. Capturas de Imágenes con Microscopio Óptico

Para tener una referencia visual de las superficies texturizadas se utilizó el microscopio óptico, este equipo pertenece a la marca “Carl Zeiss” y utiliza el programa “ZenCore 3.0” para la toma de imágenes. El microscopio cuenta con aumentos de “x5”, “x10” y “x20” que fueron utilizados para esta memoria.

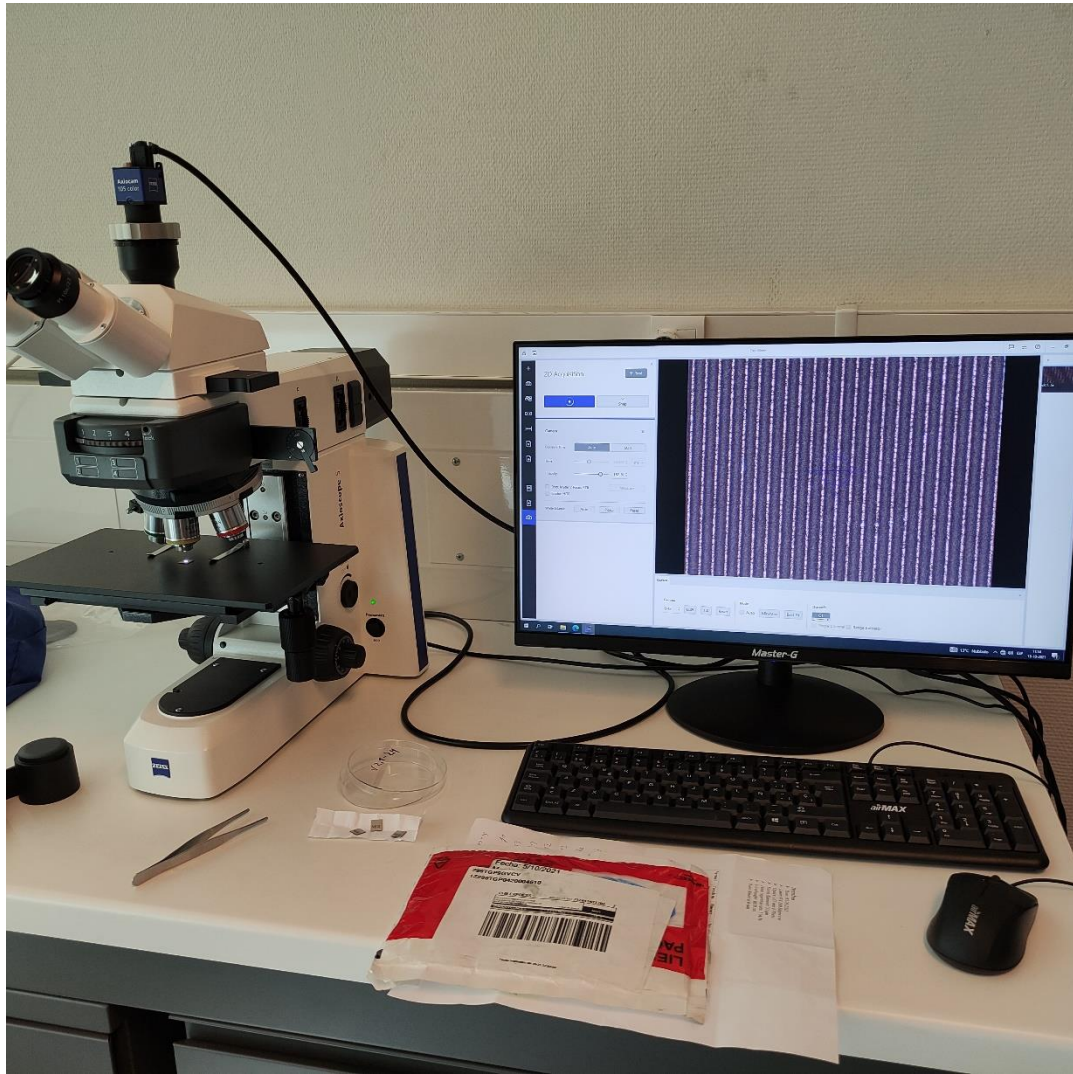


Figura 12: microscopio óptico y software con captura de una textura en aumento x5.

Para esto, se requiere colocar la muestra sobre la bandeja ubicada debajo del lente, en particular, debajo del haz de luz que este emite sobre la bandeja, se calibra manualmente con las perillas ubicadas en la parte inferior del microscopio para realizar un enfoque óptimo y luego en el programa se hace click sobre la opción “snap”. De esta forma se obtiene lo que se muestra en la figura anterior.

Para esto, se realizaron varias capturas por cada textura en distintos aumentos y se replicó esto mismo para las texturas con recubrimiento. Para esta memoria, se muestran las imágenes del aumento “x10” de ambos casos para cada textura en el capítulo posterior correspondiente.

5. Resultados

5.1. Referencia (superficie sin textura)

En la siguiente figura se muestran los resultados de la migración de lubricante para superficies sin textura:

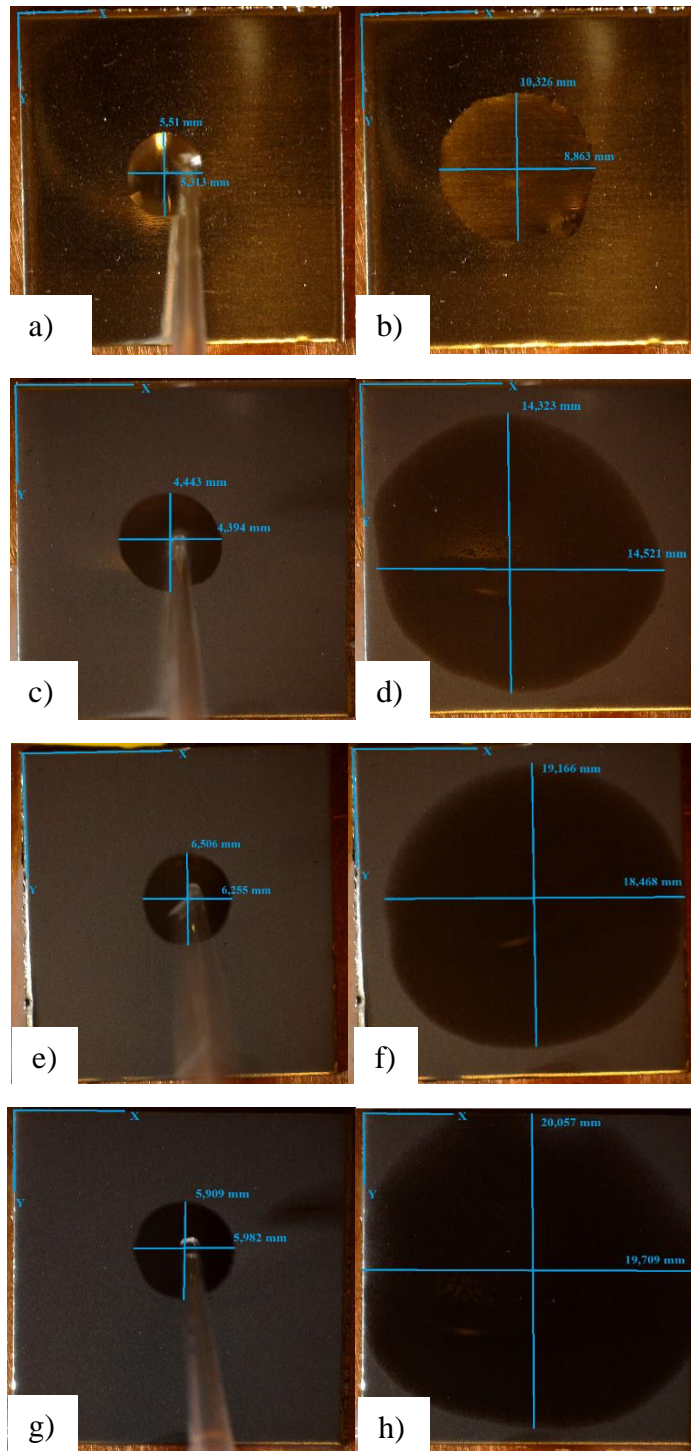


Figura 13: Muestra de referencia (sin recubrimiento) para (a) $t=0s$ y (b) $t=60s$. Recubrimiento con LOGO 1 mg/ml para (c) $t=0s$ y (d) $t=60s$. Recubrimiento con LOGO 2 mg/ml para (e) $t=0s$ y (f) $t=60s$. Recubrimiento con LOGO 5 mg/ml para (g) $t=0s$ y (h) $t=60s$.

Los datos de la longitud de la gota de lubricante en los ejes X e Y se muestran en las siguientes tablas:

Tabla II: Longitud de lubricante en el eje X para diferentes recubrimientos.

Tiempo [s]	Referencia [mm]	1 mg/ml LOGO [mm]	2 mg/ml LOGO [mm]	5 mg/ml LOGO [mm]
0	5,263	5,474	5,751	5,875
1	6,330	7,391	7,993	8,481
2	6,901	8,420	9,417	9,640
3	7,191	9,103	10,228	10,484
5	7,514	9,959	11,245	11,526
10	7,985	11,310	13,015	13,446
20	8,357	12,998	15,043	15,631
30	8,539	14,232	16,301	17,012
45	8,721	15,608	17,492	18,387
60	8,837	16,653	18,435	19,023

Tabla III: Longitud de lubricante en el eje Y para diferentes recubrimientos.

Tiempo [s]	Referencia [mm]	1 mg/ml LOGO [mm]	2 mg/ml LOGO [mm]	5 mg/ml LOGO [mm]
0	5,470	5,408	5,991	5,966
1	6,570	7,464	8,060	8,432
2	7,133	8,452	9,243	9,449
3	7,506	9,110	9,881	10,260
5	7,986	9,925	10,800	11,253
10	8,615	11,209	12,215	13,024
20	9,235	12,914	14,250	15,167
30	9,591	14,124	15,806	16,814
45	9,822	15,523	17,320	18,477
60	10,029	16,619	18,246	19,486

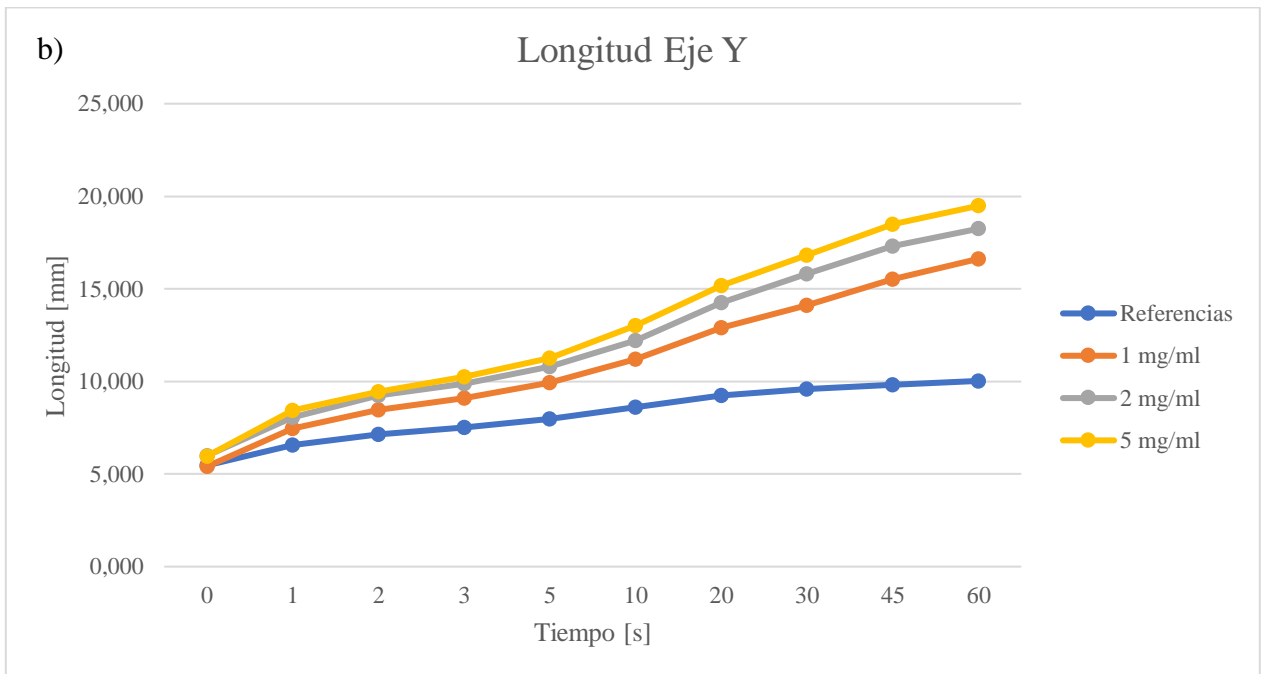
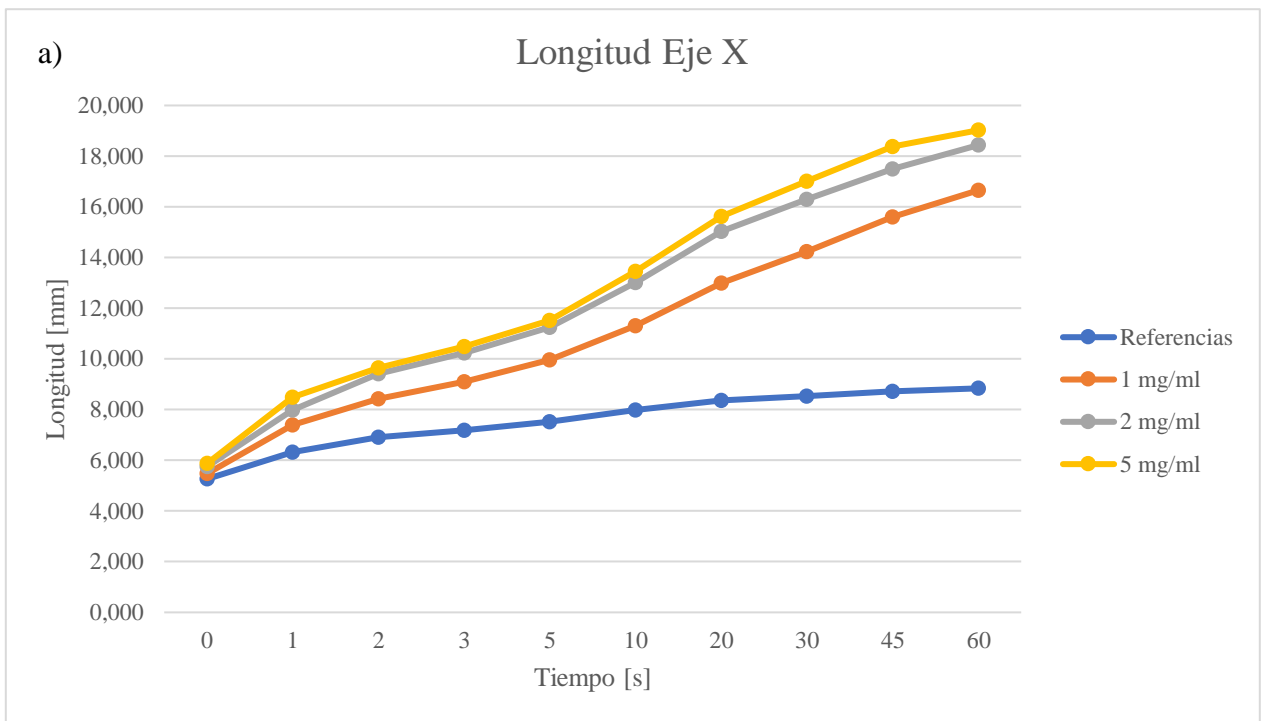


Figura 14: Gráfico comparativo de la longitud de lubricante en el tiempo para diferentes recubrimientos, (a) eje X y (b) eje Y.

En cuanto a longitud, es claro notar que los recubrimientos presentan una mejora en comparación a la referencia, incluso esta mejora es directamente proporcional a la concentración de óxido de grafeno usado para los recubrimientos, siendo el mejor desempeño en cuanto a dispersión la concentración de 5 mg/ml.

Por lo que a partir de las mediciones hechas en el software “*DinoCapture 2.0*” se calculan las velocidades instantáneas de cada muestra a lo largo de 1 minuto en los intervalos de tiempo 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 45 y 60 segundos usando la siguiente fórmula:

$$V_i = \frac{L_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

Donde:

V_i [mm/s]: Velocidad en el instante “i”

L_i [mm]: Largo de la gota en el instante “i”

t_i [s]: Tiempo transcurrido en el instante “i”

Los resultados se muestran en las siguientes tablas:

Tabla IV: Velocidad instantánea para diferentes recubrimientos, eje X.

Tiempo [s]	Referencia [mm/s]	1 mg/ml LOGO [mm/s]	2 mg/ml LOGO [mm/s]	5 mg/ml LOGO [mm/s]
0	-	-	-	-
1	1,067	1,918	2,242	2,607
2	0,571	1,029	1,424	1,158
3	0,289	0,683	0,811	0,844
5	0,161	0,428	0,509	0,521
10	0,094	0,270	0,354	0,384
20	0,037	0,169	0,203	0,219
30	0,018	0,123	0,126	0,138
45	0,012	0,092	0,079	0,092
60	0,008	0,070	0,063	0,042

Tabla V: Velocidad instantánea para diferentes recubrimientos, eje Y.

Tiempo [s]	Referencia [mm/s]	1 mg/ml LOGO [mm/s]	2 mg/ml LOGO [mm/s]	5 mg/ml LOGO [mm/s]
0	-	-	-	-
1	1,101	2,057	2,069	2,466
2	0,563	0,988	1,183	1,017
3	0,372	0,658	0,637	0,811
5	0,240	0,407	0,460	0,496
10	0,126	0,257	0,283	0,354
20	0,062	0,170	0,204	0,214
30	0,036	0,121	0,156	0,165
45	0,015	0,093	0,101	0,111
60	0,014	0,073	0,062	0,067

Por lo que se grafica la velocidad que tiene inicialmente la gota al ser depositada sobre una superficie (ya sea si tiene recubrimiento o no), tanto en el eje horizontal como vertical.

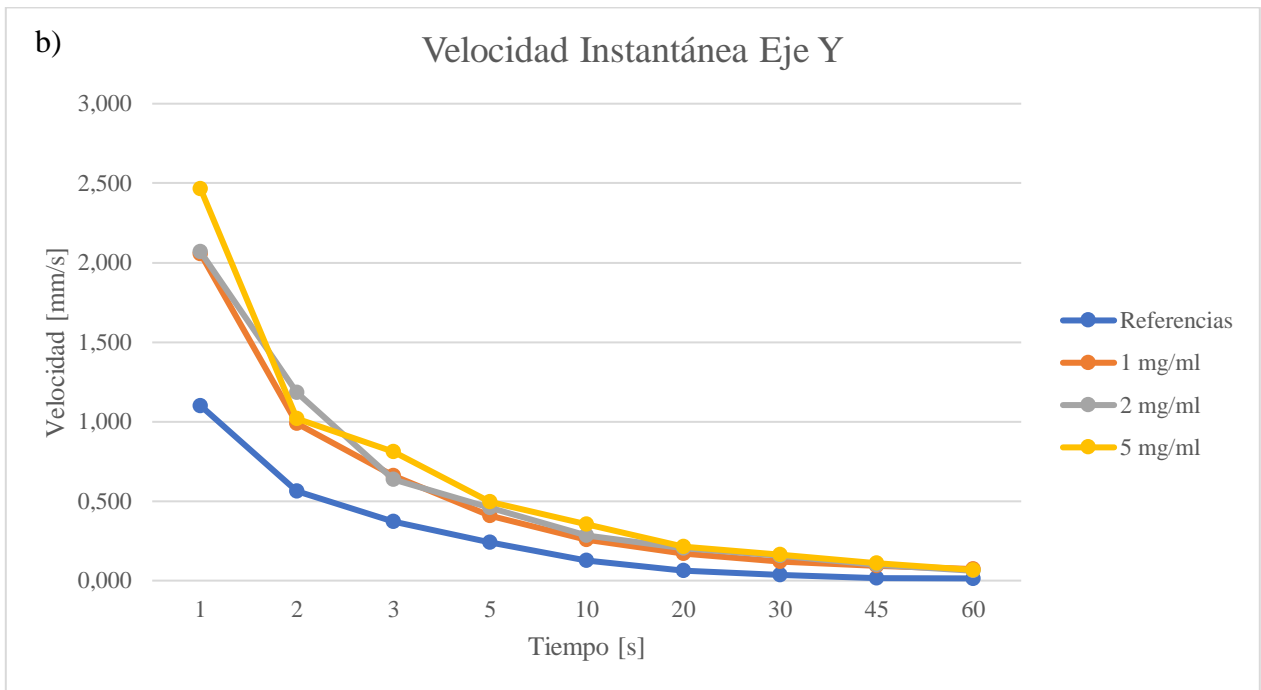
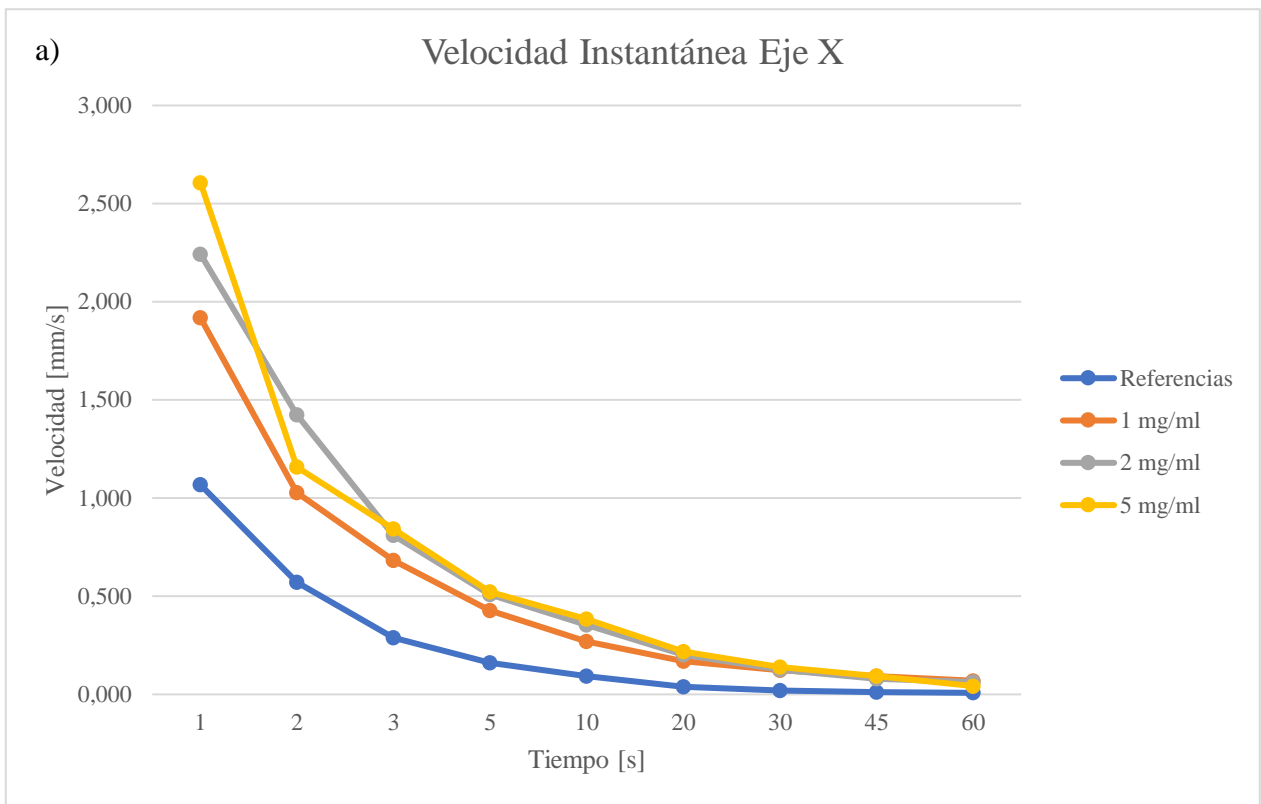


Figura 15: Comparación de la velocidad instantánea en el eje (a) X y (b) en el eje Y.

Observando ambos gráficos, la muestra sin recubrimiento (línea azul) es la que menor velocidad posee a lo largo del tiempo, mientras que al aumentar la concentración de GO esta velocidad de dispersión aumenta. Esto se condice con lo mostrado anteriormente con la longitud, donde las que tienen una mayor longitud de aceite tienen una mayor velocidad. Esto se debe a que una de las propiedades del óxido de grafeno es que es hidrofílico y lipofílico, es decir, tiene mayor afinidad con el agua y aceites, por lo que se usarán 5 mg/ml para realizar mejores comparaciones con las texturas y así condensar mejor los resultados.

5.2. Ángulo de Contacto

Este paso en la investigación surgió como una necesidad de reutilizar las texturas que llegaron al laboratorio, que desafortunadamente eran una cantidad muy pequeña (de 8 texturas se tienen 4 de cada una), ya que para realizar el experimento de migración de lubricante se necesitan al menos 6, que corresponden 3 para el caso sin recubrimiento y otras 3 para hacerlo con recubrimiento.

Por ende, los resultados esperados de esta experiencia, y para poder tener resultados confiables a la hora de evaluar las texturas, es que no exista una variación significativa de la gota, tanto en la forma como en el ángulo de contacto que tiene con superficie, cuando se compara con una muestra lavada y otra sin haber sido lavada. De no tener los resultados que se esperan, es posible que esta investigación haya tardado más tiempo en esperar tener una mayor cantidad de muestras para así obtener resultados más precisos y confiables.

Para evaluar la superficie, primero se miden 30 datos para 6 muestras que no han sido manipuladas, luego estas mismas se les realiza un spray coating de 1, 2 y 5 mg/ml de LOGO y se les coloca aceite PAO 8 en la mesa de migración de lubricante, simulando las condiciones en las que son testeadas estas muestras. Luego son lavadas, obteniendo a simple vista una superficie limpia de recubrimiento de GO y aceite, y se miden nuevamente en la máquina de ángulo de contacto. A continuación, se muestran los resultados:

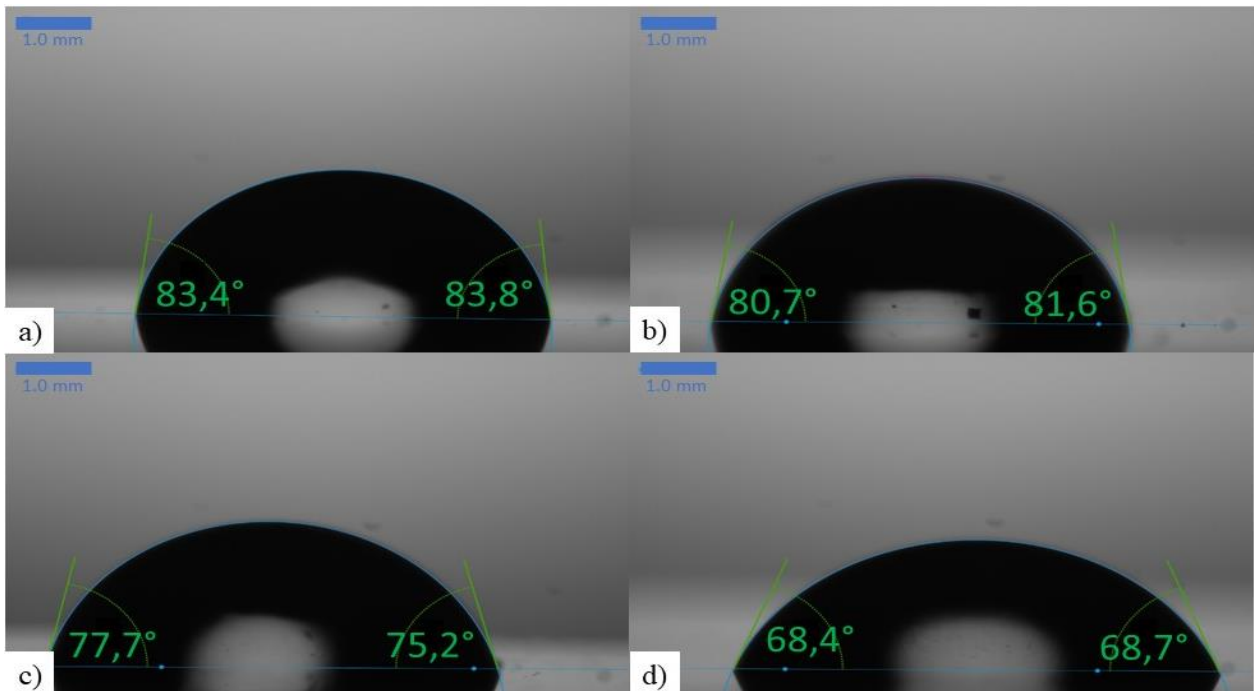


Figura 16: Ángulo de contacto para (a) superficie sin lavar, (b) superficie con recubrimiento lavado de 1 mg/ml, (c) superficie con recubrimiento lavado de 2 mg/ml, y (d) superficie con recubrimiento lavado de 5 mg/ml.

A simple vista, se observa que hay cambios en la superficie ya que la forma de la gota va cambiando el ángulo que tiene según la concentración de óxido de grafeno que tenía al ser lavada. Esto se contradice con lo que se desea, que es que no existan cambios de forma de la gota al lavar las superficies.

También se calcula el delta porcentual de variación del ángulo de contacto con respecto a la referencia (figura 16a) como el valor absoluto de la resta entre el ángulo de contacto de la superficie lavada y el ángulo de contacto de referencia, dividido por el ángulo de contacto de referencia, se muestra a continuación:

$$\text{Delta} [\%] = \frac{|\text{Ángulo de contacto de referencia} [^\circ] - \text{Ángulo de contacto} [^\circ]|}{\text{Ángulo de contacto de referencia} [^\circ]} \times 100 \quad (3)$$

De estas imágenes, se obtienen alrededor de 10 resultados por recubrimiento para tener una mejor noción del comportamiento de la gota en contacto con la superficie para el caso estático y se aplica la fórmula (3) para comparar con la referencia:

Tabla VI: Ángulo de contacto de muestras lavadas que anteriormente poseían recubrimientos con diferentes concentraciones de LOGO y el delta porcentual que tiene con la referencia (muestra sin lavar).

	Medición	CA(m) [°] referencia	CA(m) [°] lavados	Delta [%]
1 mg/ml	1	83,60	77,98	6,72
	2	83,63	81,17	2,94
	3	85,01	81,47	4,16
	4	83,88	78,23	6,74
	5	83,50	80,50	3,59
	6	79,43	81,48	2,58
	7	80,38	80,90	0,65
	8	80,01	80,04	0,04
	9	79,58	78,95	0,79
	10	80,93	82,68	2,16
2 mg /ml	11	85,77	79,55	7,25
	12	85,46	78,45	8,20
	13	82,37	73,85	10,34
	14	82,40	76,47	7,20
	15	83,27	78,93	5,21
	16	85,14	76,29	10,39
	17	84,59	75,27	11,02
	18	86,12	79,57	7,61
	19	82,29	81,44	1,03
	20	83,12	78,81	5,19
5 mg/ml	21	84,18	65,60	22,07
	22	83,29	62,78	24,62
	23	81,33	63,50	21,92
	24	82,41	65,31	20,75
	25	84,19	66,53	20,98
	26	85,41	71,44	16,36
	27	83,22	71,48	14,11
	28	77,84	71,25	8,47
	29	79,58	71,90	9,65
	30	79,48	71,22	10,39

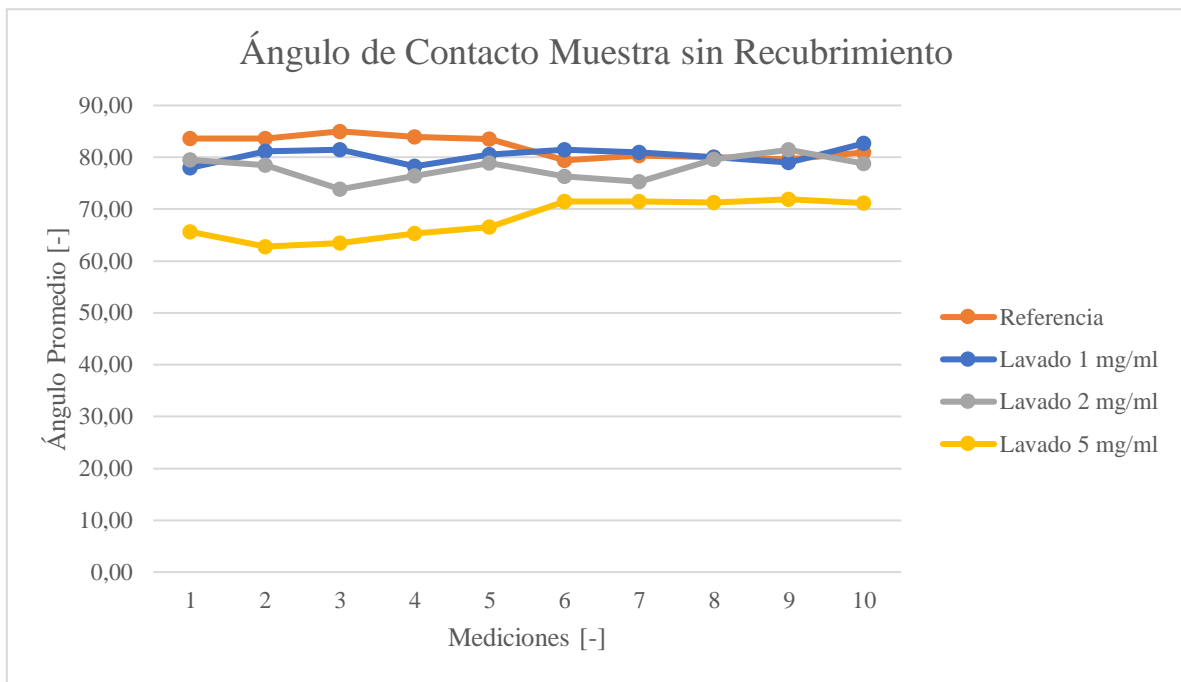


Figura 17: Comparación de ángulo de contacto de muestras sin lavar (referencia) y muestras lavadas que tenían recubrimientos de 1, 2 y 5 mg/ml.

Como se puede notar, a partir de la concentración de 5 mg/ml, la variación del ángulo estático es muy grande (hasta un 20% de variación entre la muestra referencial y después de ser lavada), por lo que se verían afectados los resultados de un ensayo de migración de lubricante si se lavaran las muestras. A partir de esto, se replica la experiencia, pero esta vez las muestras de referencia son superficies con recubrimiento de 1, 2 y 5 mg/ml de LOGO; y las muestras lavadas corresponden a estas muestras una vez lavadas y con un nuevo recubrimiento LOGO en las concentraciones ya mencionadas.

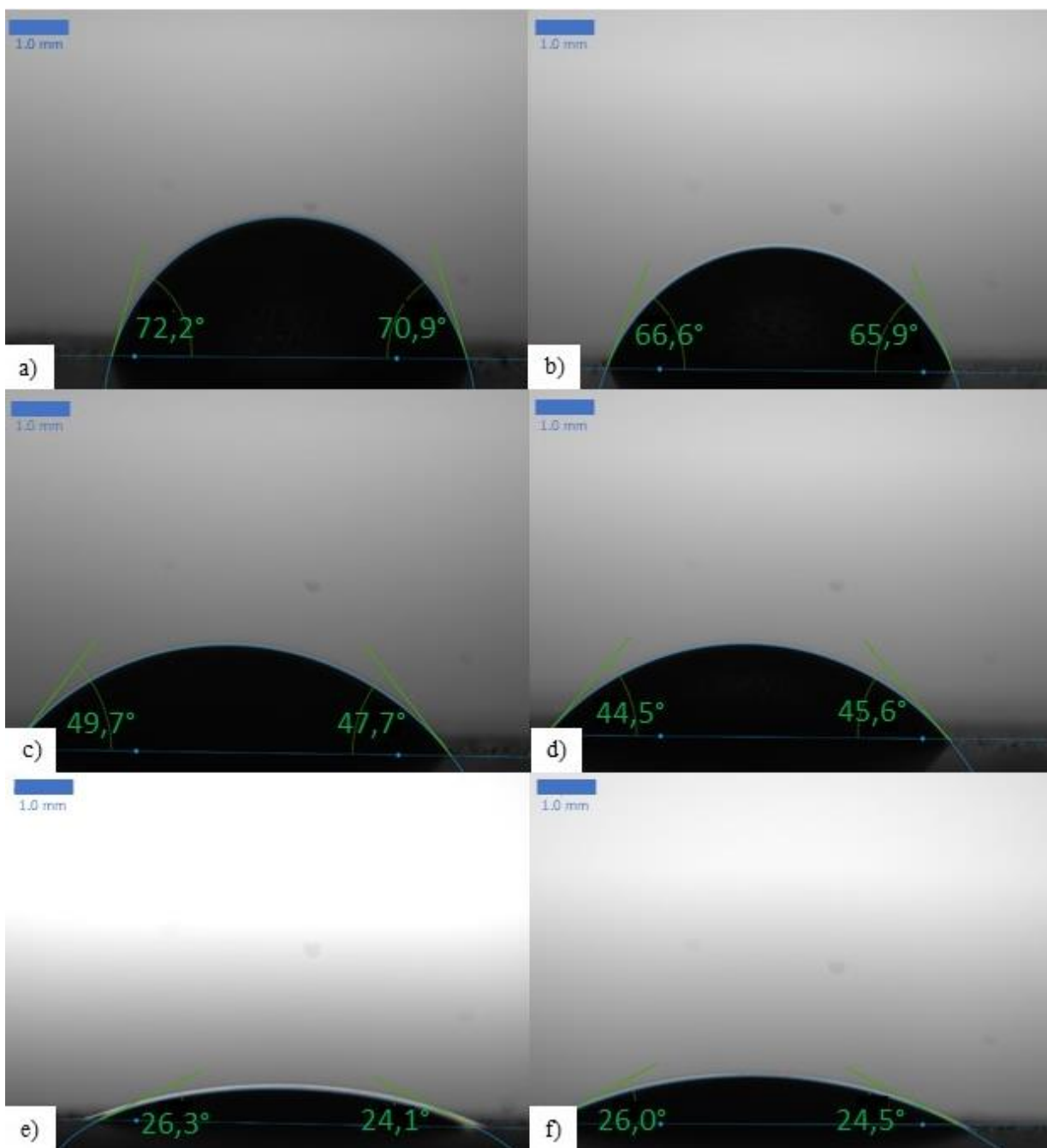


Figura 18: Comparación de ángulo de contacto para recubrimiento de 1 mg/ml LOGO, (a) sin lavar y (b) lavado. Comparación de ángulo de contacto para recubrimiento de 2 mg/ml LOGO, (c) sin lavar y (d) lavado. Comparación de ángulo de contacto para recubrimiento de 5 mg/ml LOGO, (e) sin lavar y (f) lavado.

Así mismo, se vuelven a obtener 10 resultados por muestra para poder comparar con mayor exactitud el comportamiento de la gota tanto en superficies con recubrimiento que fueron lavadas y que no han sido lavadas:

Tabla VII: Ángulo de contacto de muestras lavadas que poseen recubrimientos con diferentes concentraciones de LOGO al momento de obtener datos y el delta porcentual que tiene con la referencia (muestra con recubrimiento y sin lavar).

	Medición	CA(m) [°] referencia	CA(m) [°] lavados	Delta [%]
1 mg/ml	1	68,66	66,22	3,55
	2	73,36	65,22	11,10
	3	71,55	61,67	13,81
	4	68,90	60,90	11,61
	5	67,28	63,59	5,48
	6	69,03	60,30	12,65
	7	70,98	57,72	18,68
	8	68,55	56,94	16,94
	9	65,97	60,80	7,84
	10	72,52	58,37	19,51
2 mg /ml	11	48,96	43,68	10,78
	12	45,37	36,97	18,51
	13	47,98	46,01	4,11
	14	47,04	43,82	6,85
	15	46,00	38,45	16,41
	16	50,86	43,34	14,79
	17	48,72	40,96	15,93
	18	47,17	38,31	18,78
	19	45,86	42,32	7,72
	20	47,45	40,49	14,67
5 mg/ml	21	23,93	19,78	17,34
	22	18,65	19,43	4,18
	23	18,36	17,86	2,72
	24	21,78	20,86	4,22
	25	25,82	23,28	9,84
	26	26,31	22,61	14,06
	27	25,24	25,25	0,04
	28	22,37	27,65	23,60
	29	25,85	29,54	14,27
	30	27,95	26,50	5,19

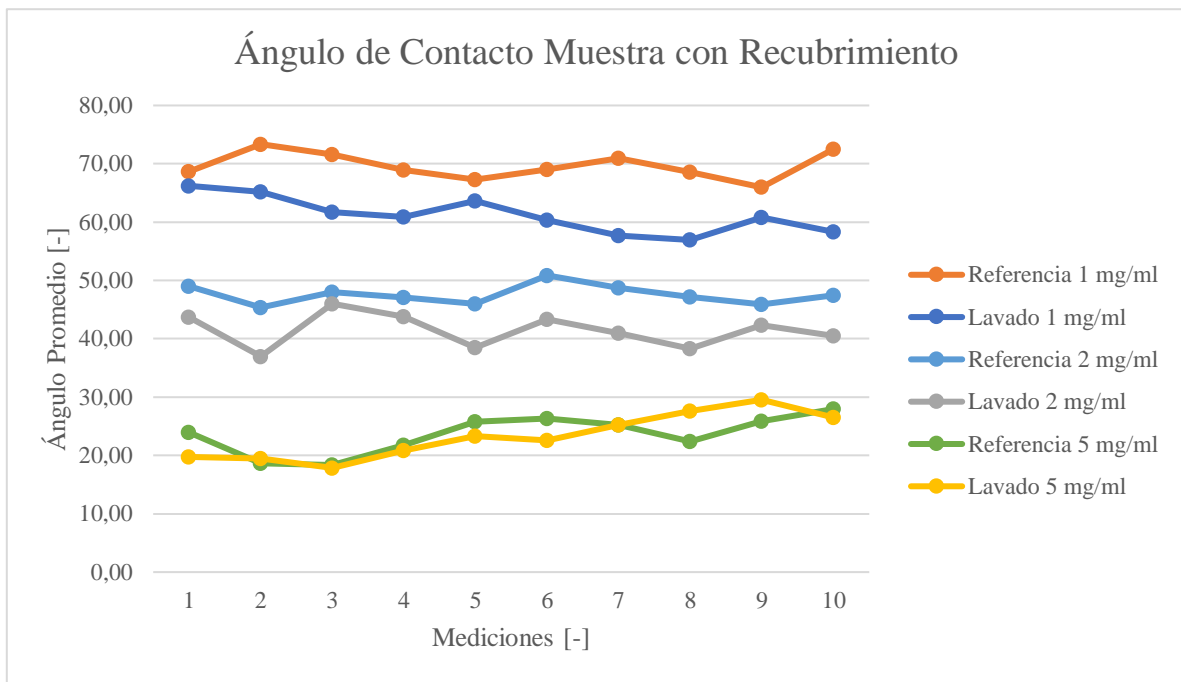


Figura 19: Comparación de ángulo de contacto de muestras sin lavar (referencia) y muestras lavadas, ambas poseen recubrimientos de 1, 2 y 5 mg/ml al momento de obtener los datos.

A partir de esto, se puede observar que los valores son mucho más estables cuando se tiene un recubrimiento, es por ello, que es más conveniente realizar primero la migración de lubricante sin recubrimiento y después lavarlas para hacerles spray coating y hacer nuevamente la migración de lubricante (esta entrega mejores resultados y además tiene un comportamiento más regular en el ángulo de contacto) para la migración.

Por lo tanto, al usar las texturas se realizan los siguientes pasos:

- 1) Se evalúa la migración de lubricante de cada textura sin usar recubrimientos.
- 2) Se lavan las muestras como aparece en la sección 4.6 de este informe.
- 3) Se realizan recubrimientos de 5 mg/ml de HIGO a todas las texturas lavadas.
- 4) Se realiza la migración de lubricante de las texturas con recubrimiento

5.3. Superficies Texturizadas

Para el estudio de migración en superficies texturizadas, se utilizaron muestras de acero inoxidable de 10x10 mm con patrones correspondientes a la primera que aparece en la sección “2. Objetivos”, es decir, canales paralelos al gradiente de temperatura. Afortunadamente, se cuenta con este mismo patrón, pero con diferentes dimensiones en cuanto a espaciado, profundidad y distancia. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla VIII: Dimensiones de las texturas.

Versión	Distancia entre hendiduras [μm]	Fluencia [J/cm^2]	Número de escaneos	Profundidad de hendidura [μm]	Ancho de hendidura [μm]
1	50	0,8	50	4,025	36,1
2	50	0,8	75	7,36	39,5
3	50	0,4	150	5,54	28,2
4	75	0,4	150	5,07	37,3
5	100	0,4	150	5,17	36,7
6	50	0,4	300	10,51	37,7
7	75	0,4	300	10,69	34,3
8	100	0,4	300	10,80	36,7

Además, se hicieron capturas con un microscopio para denostar que la diferencia entre texturas es visible y que a nivel superficial poder observar cómo los recubrimientos se dispersan sobre esta. También, el propósito de evidenciar las diferencias entre todas las texturas es debido a que, más adelante, se puede hacer una relación entre los resultados obtenidos con las dimensiones de las mismas texturas, esto se debe a que en la bibliografía está demostrado que la forma en que está diseñado el surco tiene efectos directos con la migración de lubricante, tanto para el eje paralelo como para el eje perpendicular [8]. Las imágenes se muestran a continuación:

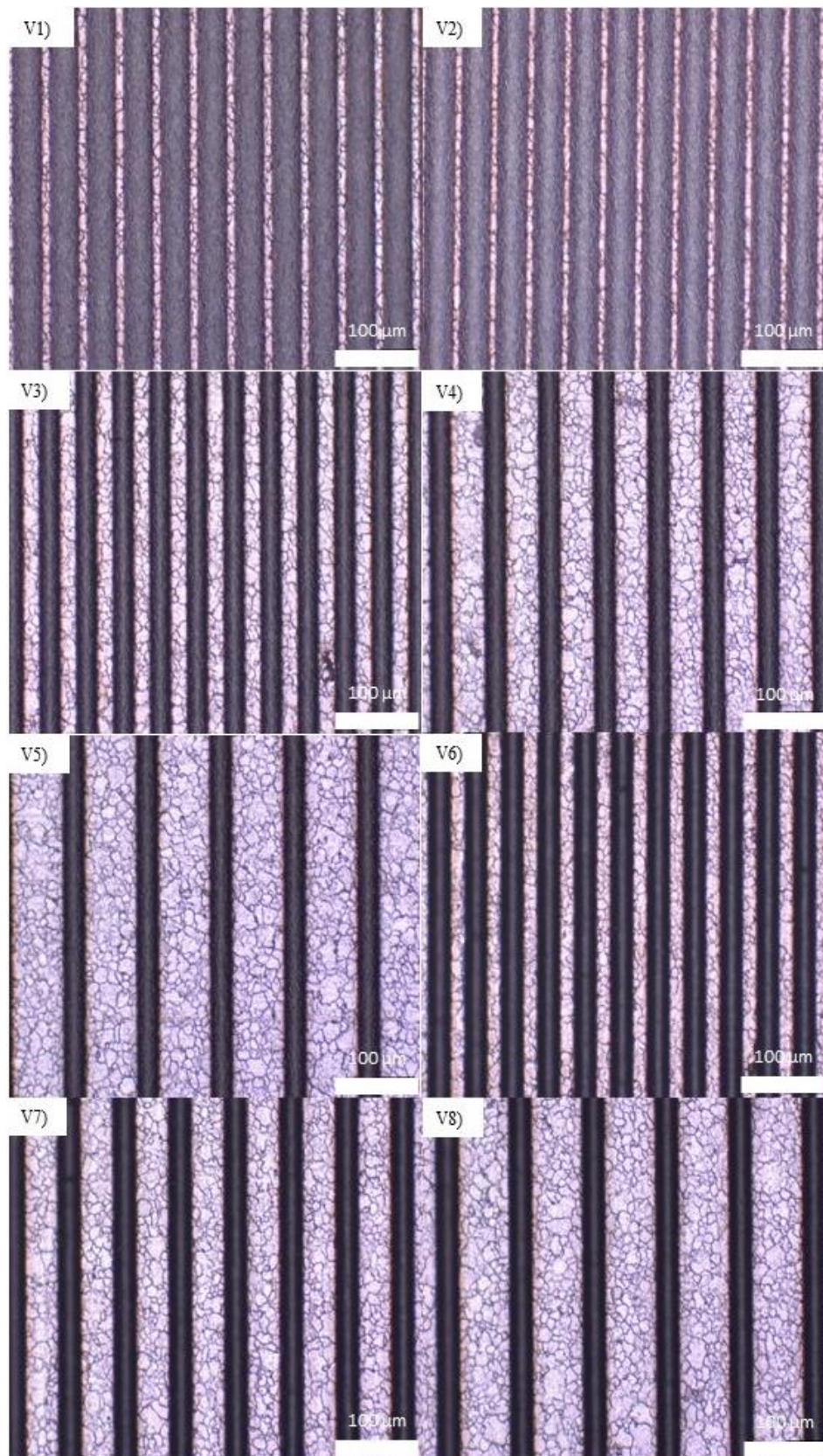


Figura 20: Imágenes de texturas VI a V8, sin recubrimiento.

De la figura 20, es necesario destacar que los surcos (o hendiduras) corresponden a las líneas más oscuras de cada imagen, mientras que la superficie es la parte más clara. También se observa que las texturas V1 y V2 tienen mayor periodicidad de los surcos, mientras que V3, V6 y V7 tienen una mayor periodicidad que los anteriores, y V4, V5 y V8 son lo que tienen menor periodicidad del resto. Aunque no se puede observar, hay que destacar que V6, V7 y V8 tienen mayor profundidad en los surcos mientras que V1 tiene la menor profundidad. De todas las texturas se observa que V1, V2, V3 y V6 poseen mayor periodicidad de surcos del resto de las texturas. En la siguiente figura se muestran las mismas texturas con recubrimiento:

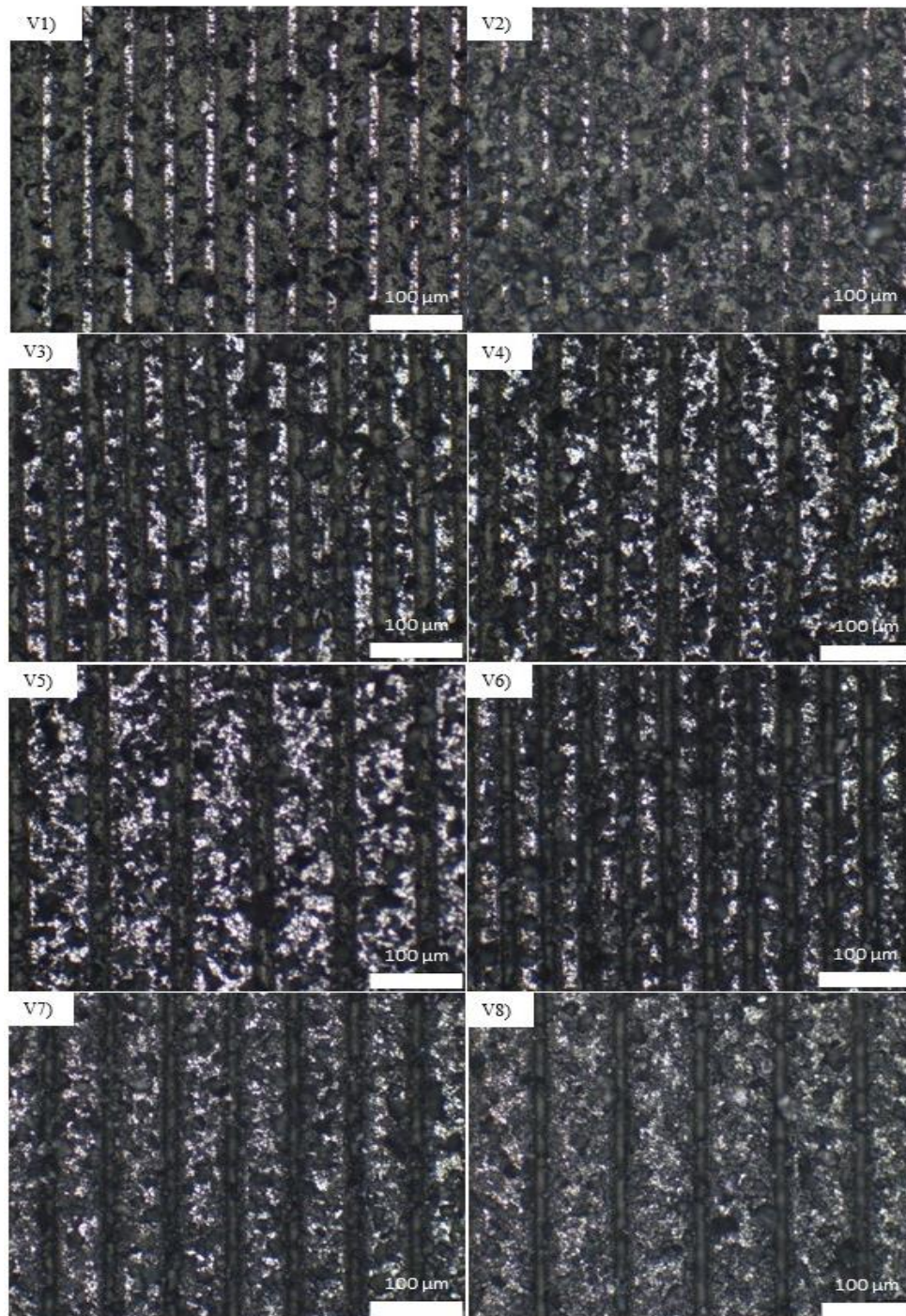


Figura 21: Texturas V1 a V8, Con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO.

Es claro notar que el recubrimiento sobre todas las texturas no es del todo homogéneo, ya que hay varias zonas dentro de las imágenes que poseen mayores concentraciones de óxido de grafeno, que se observan como pequeñas manchas o grumos sobre la superficie. Esto implica que, a pesar de que el método de spray coating utilizado es un método bastante eficiente a la hora de hacer una dispersión homogénea (o por lo menos, a simple vista), aún se puede mejorar la homogeneidad de los recubrimientos sobre esta. Esto se explica por la propia naturaleza del óxido de grafeno ya que es difícil de disolver y porque se está usando una concentración muy alta de este (5 mg/ml).

Por cada textura, se testaron solo las primeras tres, dejando la cuarta como un respaldo en caso de necesitar más datos o realizar otro tipo de experimento. Estas, fueron ensayadas de la misma forma que las muestras sin textura y después usando un recubrimiento de 5 mg/ml de HIGO ya que esta concentración es la que entrega mejores resultados y por lo tanto se pueden contrastar mejor con la referencia. A continuación, se muestran los resultados:

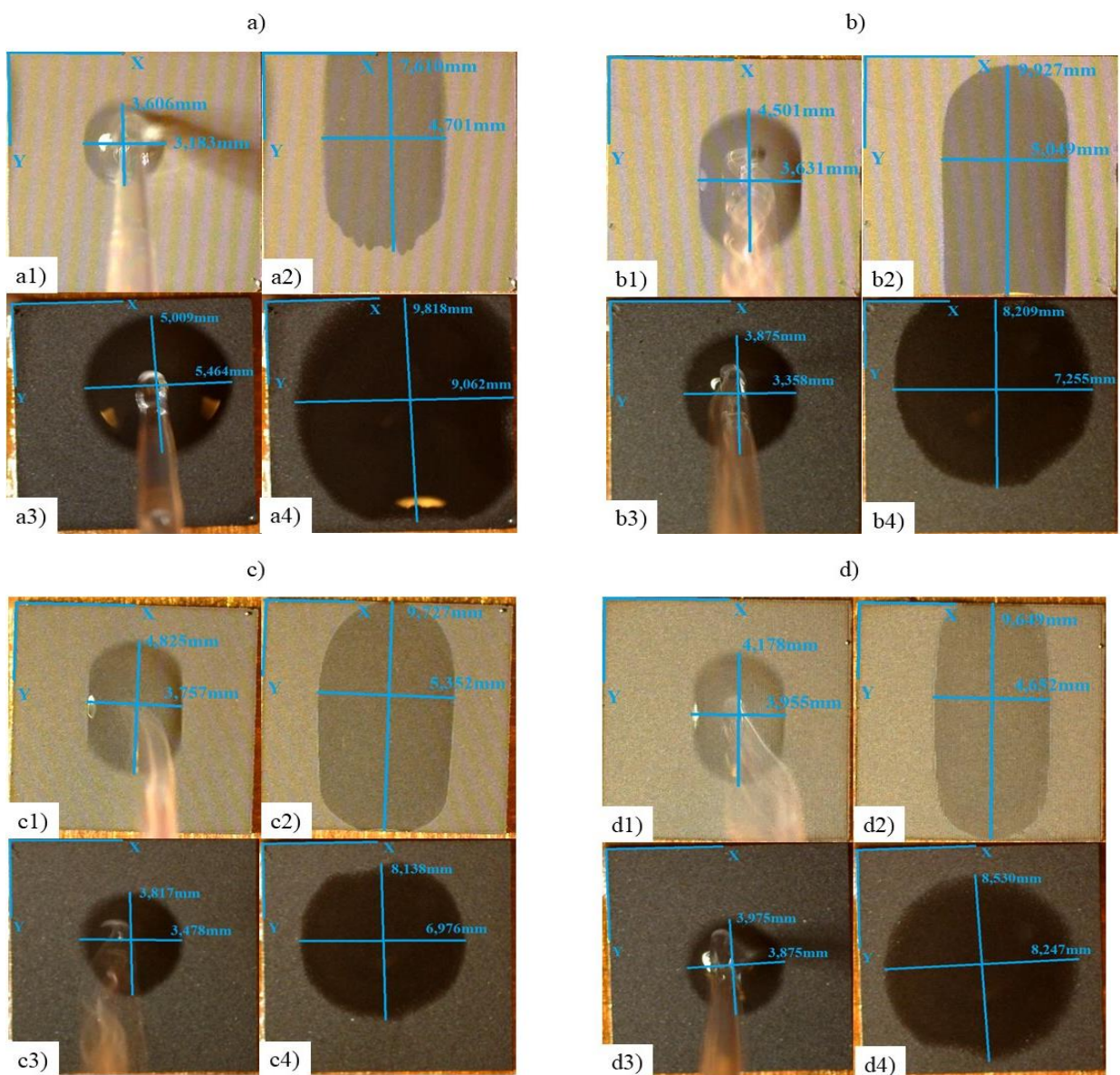


Figura 22: Texturas (a) V1, (b) V2, (c) V3 y (d) V4 donde se compara la migración de lubricante sin recubrimiento, para los momentos (x1) $t=0s$ y (x2) $t=1,8s$; y con recubrimiento de HIGO 5 mg/ml, para los momentos (x3) $t=0s$ y (x4) $t=60s$.

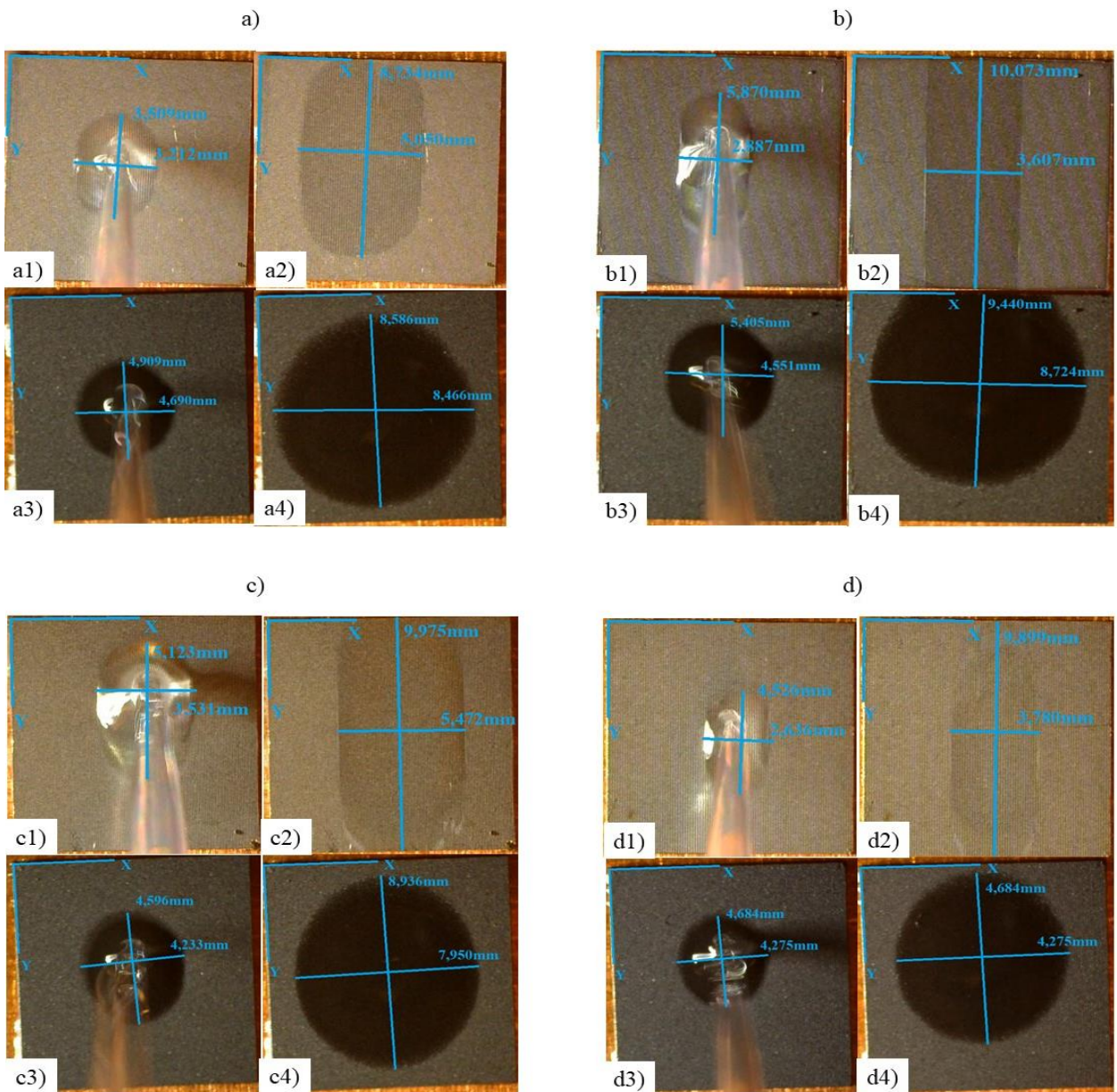


Figura 23: Texturas (a) V5, (b) V6, (c) V7 y (d) V8 donde se compara la migración de lubricante sin recubrimiento, para los momentos (x1) $t=0s$ y (x2) $t=1,8s$; y con recubrimiento de HIGO 5 mg/ml, para los momentos (x3) $t=0s$ y (x4) $t=60s$.

En las siguientes tablas, se muestran los valores obtenidos para la longitud de lubricante tanto para las texturas con recubrimiento y sin, para los ejes X e Y:

Tabla IX: Longitud gota de aceite en texturas sin recubrimiento, eje x.

Tiempo [s]	V1 [mm]	V2 [mm]	V3 [mm]	V4 [mm]	V5 [mm]	V6 [mm]	V7 [mm]	V8 [mm]
0	5,263	3,731	3,988	3,540	3,245	2,555	2,769	2,628
0,2	6,330	4,079	4,188	3,905	3,860	2,803	3,192	2,827
0,4	6,901	4,378	4,495	4,262	4,300	2,971	3,292	3,001
0,6	7,191	4,486	4,704	4,485	4,590	3,054	3,383	3,134
0,8	7,514	4,677	4,862	4,635	4,840	3,112	3,500	3,242
1	7,985	4,751	4,960	4,767	5,049	3,171	3,599	3,341
1,2	8,357	4,817	5,070	4,834	5,183	3,212	3,673	3,457
1,4	8,539	4,900	5,210	4,942	5,283	3,253	3,756	3,582
1,6	8,721	4,975	5,308	5,001	5,384	3,261	3,856	3,689
1,8	8,837	5,016	5,392	5,083	5,454	3,269	3,931	3,764

Tabla X: Longitud gota de aceite en texturas sin recubrimiento, eje y.

Tiempo [s]	V1 [mm]	V2 [mm]	V3 [mm]	V4 [mm]	V5 [mm]	V6 [mm]	V7 [mm]	V8 [mm]
0	5,470	4,535	5,049	4,319	3,926	4,793	3,996	3,930
0,2	6,570	5,488	5,978	5,115	5,147	6,409	6,019	5,340
0,4	7,133	6,475	7,122	6,234	6,020	8,059	7,006	6,641
0,6	7,506	6,939	7,752	6,939	6,812	8,739	8,257	8,141
0,8	7,986	7,735	8,250	7,429	7,344	9,444	8,838	8,805
1	8,615	8,059	8,507	7,984	7,806	9,792	9,336	9,385
1,2	9,235	8,416	8,847	8,274	8,262	9,974	9,717	9,808
1,4	9,591	8,797	9,212	8,614	8,527	10,007	9,916	9,916
1,6	9,822	8,946	9,501	8,871	8,876	10,041	9,966	9,941
1,8	10,029	9,079	9,750	9,086	9,141	10,057	9,966	9,942

Tabla XI: Longitud gota de aceite en texturas con recubrimiento, eje x.

Tiempo [s]	V1 [mm]	V2 [mm]	V3 [mm]	V4 [mm]	V5 [mm]	V6 [mm]	V7 [mm]	V8 [mm]
0	4,426	3,743	4,035	4,147	4,538	4,339	4,313	4,347
0,2	5,274	4,499	4,830	4,717	5,294	5,194	5,162	4,883
0,4	6,082	5,293	5,558	5,699	5,876	5,896	5,864	5,760
0,6	6,817	5,870	5,970	6,149	6,340	6,288	6,454	6,190
0,8	7,433	6,334	6,466	6,665	6,745	6,665	6,798	6,574
1	7,917	6,705	6,632	7,023	7,083	7,169	7,163	6,806
1,2	8,235	6,983	6,917	7,275	7,454	7,442	7,448	7,145
1,4	8,506	7,400	7,308	7,652	7,705	7,739	7,726	7,437
1,6	8,718	7,559	7,499	7,917	8,030	8,005	8,024	7,695
1,8	8,977	7,792	7,904	8,129	8,189	8,235	8,223	7,908

Tabla XII: Longitud gota de aceite en texturas con recubrimiento, eje Y.

Tiempo [s]	V1 [mm]	V2 [mm]	V3 [mm]	V4 [mm]	V5 [mm]	V6 [mm]	V7 [mm]	V8 [mm]
0	4,134	3,770	4,373	4,327	4,771	5,155	4,898	4,815
0,2	5,419	4,757	5,169	5,096	5,422	5,949	5,760	5,406
0,4	6,360	5,857	5,925	6,011	5,971	6,705	6,543	6,180
0,6	7,003	6,401	6,329	6,455	6,469	7,175	7,185	6,671
0,8	7,699	6,825	6,813	7,031	6,846	7,619	7,649	7,074
1	8,129	7,190	7,051	7,317	7,157	8,109	7,994	7,379
1,2	8,500	7,382	7,351	7,615	7,588	8,387	8,331	7,723
1,4	8,732	7,654	7,735	7,926	7,846	8,725	8,649	8,041
1,6	8,871	7,792	7,912	8,125	8,204	8,963	8,980	8,306
1,8	9,077	7,938	8,358	8,377	8,395	9,195	9,200	8,506

Se observa a partir de las figuras 22 y 23, y de las tablas IX a XII que, a diferencia de las muestras sin texturas de la sección 5.1, hay un eje (Y) que tiene mayor dispersión de lubricante en la superficie que el otro (X), en este caso y para todas las texturas, fue el eje Y el que tuvo una considerablemente mayor longitud de la gota de PAO 8 que la del eje X. Al contrario, cuando las texturas poseen recubrimientos estas parecen tener un comportamiento similar entre el eje X e Y, es decir una forma más homogénea y parecida a los resultados de la sección 5.1.

Luego, usando la fórmula (2) para la velocidad instantánea, se muestran los resultados de esta para las texturas con recubrimiento y sin recubrimiento, para los ejes X e Y:

Tabla XIII: Velocidad instantánea texturas sin recubrimiento, eje X.

Tiempo [s]	V1 [mm/s]	V2 [mm/s]	V3 [mm/s]	V4 [mm/s]	V5 [mm/s]	V6 [mm/s]	V7 [mm/s]	V8 [mm/s]
0	-	-	-	-	-	-	-	-
0,2	3,070	0,994	0,998	1,825	3,076	1,240	2,116	0,994
0,4	2,240	1,680	1,537	1,781	2,197	0,841	0,498	0,872
0,6	0,704	0,372	1,042	1,119	1,448	0,414	0,458	0,663
0,8	0,791	0,995	0,792	0,747	1,252	0,290	0,584	0,539
1	0,578	0,312	0,490	0,664	1,043	0,295	0,495	0,496
1,2	0,374	0,372	0,547	0,333	0,671	0,206	0,371	0,582
1,4	0,539	0,374	0,701	0,538	0,502	0,205	0,412	0,621
1,6	0,415	0,372	0,491	0,295	0,506	0,039	0,500	0,539
1,8	0,418	0,188	0,421	0,411	0,350	0,040	0,378	0,373

Tabla XIV: Velocidad instantánea texturas sin recubrimiento, eje Y.

Tiempo [s]	V1 [mm/s]	V2 [mm/s]	V3 [mm/s]	V4 [mm/s]	V5 [mm/s]	V6 [mm/s]	V7 [mm/s]	V8 [mm/s]
0	-	-	-	-	-	-	-	-
0,2	5,719	3,982	4,643	3,981	6,105	8,079	10,116	7,048
0,4	4,809	6,219	5,722	5,595	4,363	8,250	4,935	6,507
0,6	2,487	2,423	3,152	3,525	3,960	3,399	6,256	7,502
0,8	2,984	4,230	2,489	2,446	2,661	3,525	2,904	3,318
1	1,783	1,806	1,284	2,776	2,312	1,739	2,488	2,900
1,2	1,326	1,806	1,699	1,452	2,279	0,913	1,907	2,115
1,4	1,700	2,113	1,824	1,697	1,326	0,165	0,995	0,539
1,6	0,995	0,685	1,448	1,285	1,741	0,166	0,249	0,126
1,8	0,788	0,746	1,245	1,078	1,328	0,083	0,002	0,008

En cuanto a la velocidad, el mismo fenómeno se repite, existe un eje (Y) que tiene una mayor velocidad que el otro (X). Esto da a entender que las texturas entregan un comportamiento preferencial a la gota y su rendimiento en ambos ejes depende de la geometría y dimensiones de la textura. Al comparar, la textura con mayor longitud y velocidad en el eje Y (y a la vez menor en el eje X) fueron las texturas V6, V7 y V8. Análogamente, V1 tuvo resultados opuestos (mayor velocidad y longitud en el eje X y menor en el eje Y). Esto se explica en lo visto por la literatura, ya que la textura V1 es la que tiene una menor profundidad en sus surcos (o hendiduras), mientras que las texturas V6, V7 y V8 son las que poseen una mayor profundidad en estos (aproximadamente 11 μm), lo que justifica que estas tres últimas posean un flujo de aceite más rápido en la dirección paralela a la dirección del gradiente de temperatura [4].

A continuación, se muestran los resultados de la velocidad usando recubrimientos:

Tabla XV: Velocidad instantánea texturas con recubrimiento, eje X.

Tiempo [s]	V1 [mm/s]	V2 [mm/s]	V3 [mm/s]	V4 [mm/s]	V5 [mm/s]	V6 [mm/s]	V7 [mm/s]	V8 [mm/s]
0	-	-	-	-	-	-	-	-
0,2	4,241	3,777	4,472	2,849	3,778	4,522	4,244	2,680
0,4	4,041	3,973	3,625	4,910	2,914	3,181	3,511	4,383
0,6	3,675	2,883	2,335	2,253	2,319	1,492	2,952	2,150
0,8	3,080	2,320	2,335	2,580	2,024	2,084	1,720	1,923
1	2,419	1,855	0,697	1,788	1,689	2,486	1,823	1,159
1,2	1,590	1,392	1,640	1,262	1,854	1,441	1,425	1,694
1,4	1,358	2,085	2,086	1,886	1,258	1,342	1,391	1,460
1,6	1,060	0,795	1,043	1,323	1,624	0,797	1,490	1,290
1,8	1,292	1,164	0,945	1,061	0,794	1,345	0,996	1,065

Tabla XVI: Velocidad instantánea texturas con recubrimiento, eje Y.

Tiempo [s]	V1 [mm/s]	V2 [mm/s]	V3 [mm/s]	V4 [mm/s]	V5 [mm/s]	V6 [mm/s]	V7 [mm/s]	V8 [mm/s]
0	-	-	-	-	-	-	-	-
0,2	6,426	4,935	4,722	3,845	3,254	4,172	4,312	2,956
0,4	4,705	5,502	3,434	4,575	2,747	3,283	3,913	3,872
0,6	3,215	2,718	2,236	2,220	2,487	2,434	3,212	2,452
0,8	3,479	2,120	2,784	2,882	1,887	2,435	2,320	2,018
1	2,152	1,825	1,292	1,427	1,555	2,980	1,722	1,524
1,2	1,855	0,960	1,849	1,490	2,153	1,639	1,689	1,722
1,4	1,159	1,360	2,090	1,558	1,292	1,738	1,588	1,590
1,6	0,695	0,694	0,880	0,992	1,788	0,944	1,657	1,324
1,8	1,028	0,728	1,254	1,259	0,958	1,491	1,097	0,998

Con recubrimiento se observa lo mismo que se observó en cuanto a la longitud, al parecer las texturas con recubrimiento tienen una distribución de velocidad entre los ejes X e Y más uniforme, por lo que el comportamiento de la gota es más “isotrópico” cuando la superficie texturizada cuenta con un recubrimiento de óxido de grafeno. En ese sentido, la influencia de las texturas en cuanto a una preferencia del flujo por ir más rápido en una dirección que otra parece haber desaparecido.

Esto lleva a pensar que los recubrimientos estarían alterando significativamente la rugosidad base asociada a la topografía superficial característica de cada una de las superficies, independiente de las dimensiones que posean en su ancho y profundidad.

Luego, se grafican las velocidades en cada eje según la textura para realizar una comparación entre la textura con y sin recubrimiento:

V1:

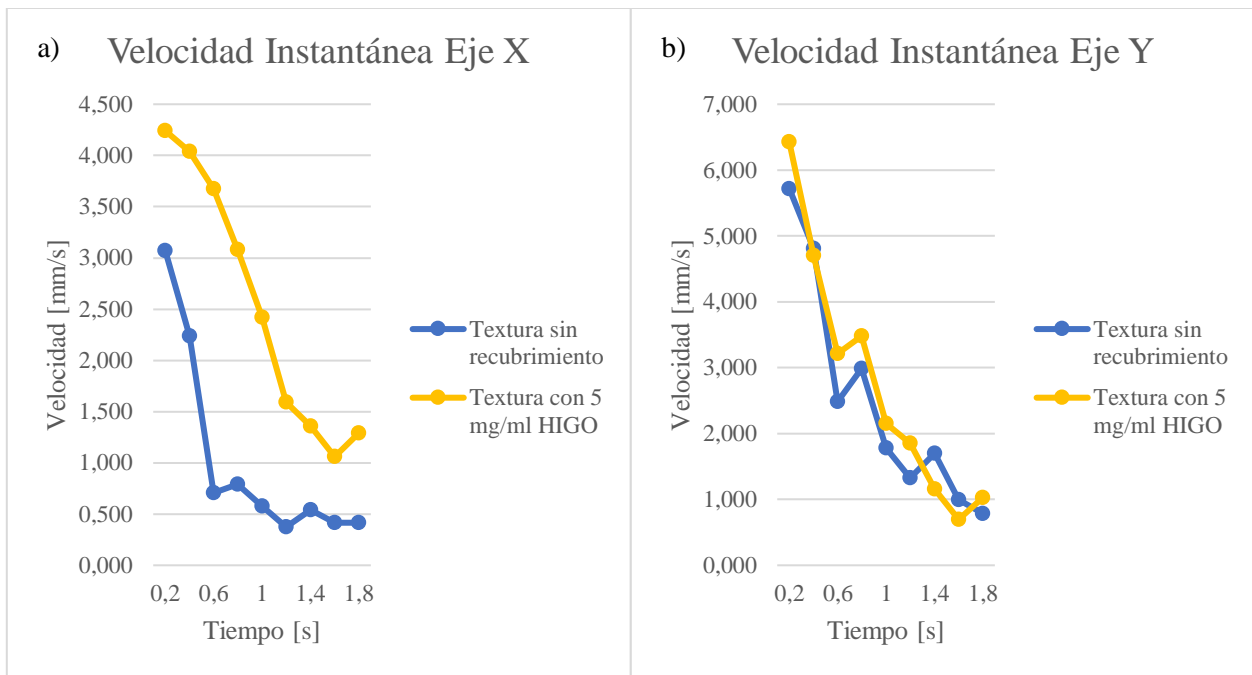


Figura 24: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V1 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).

V2:

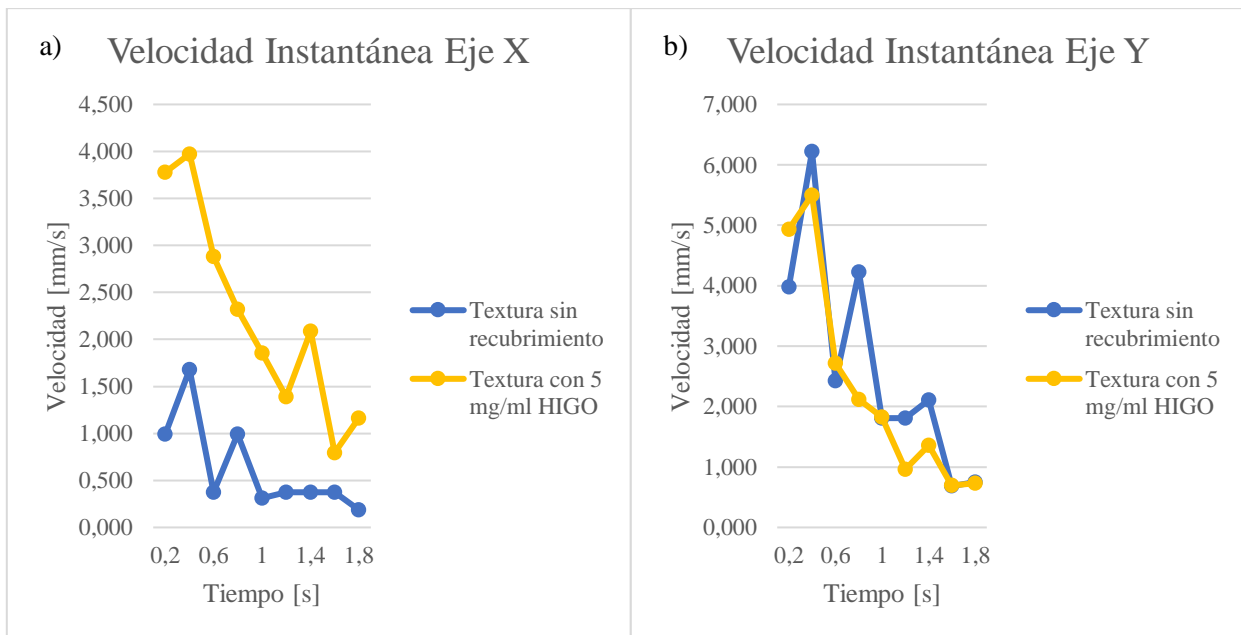


Figura 25: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V2 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).

V3:

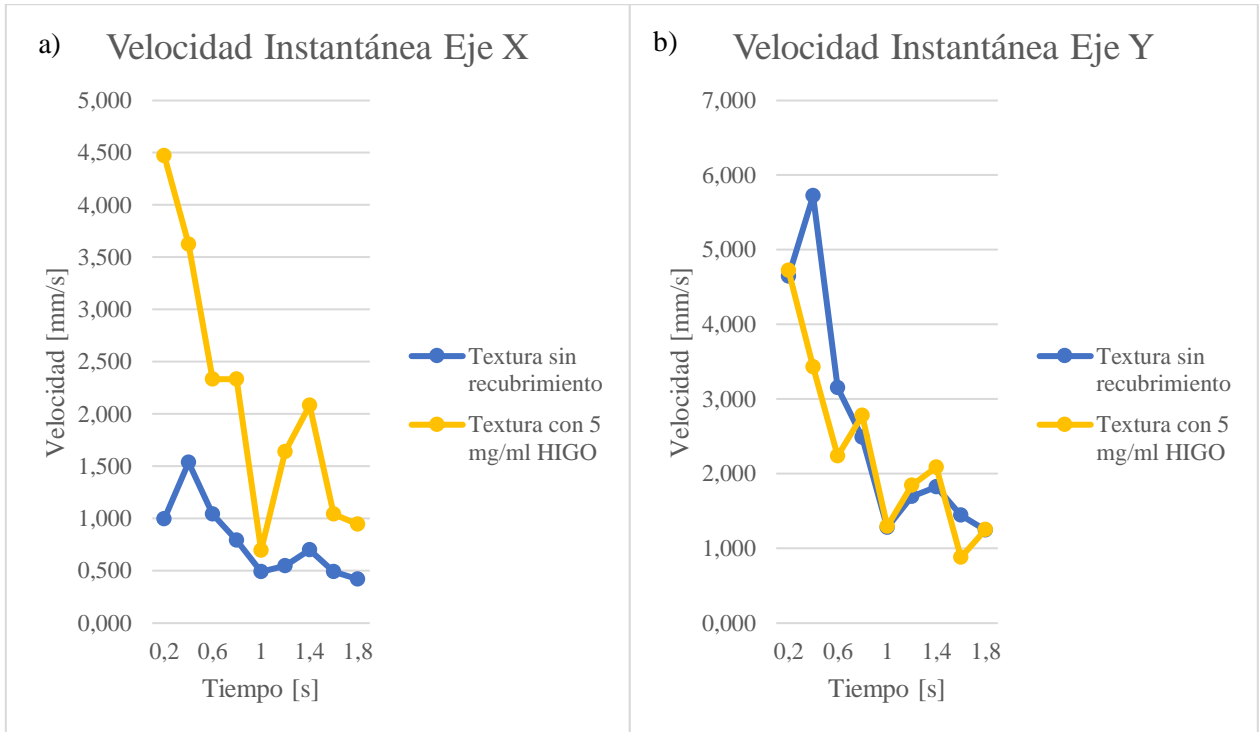


Figura 26: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V3 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).

V4:

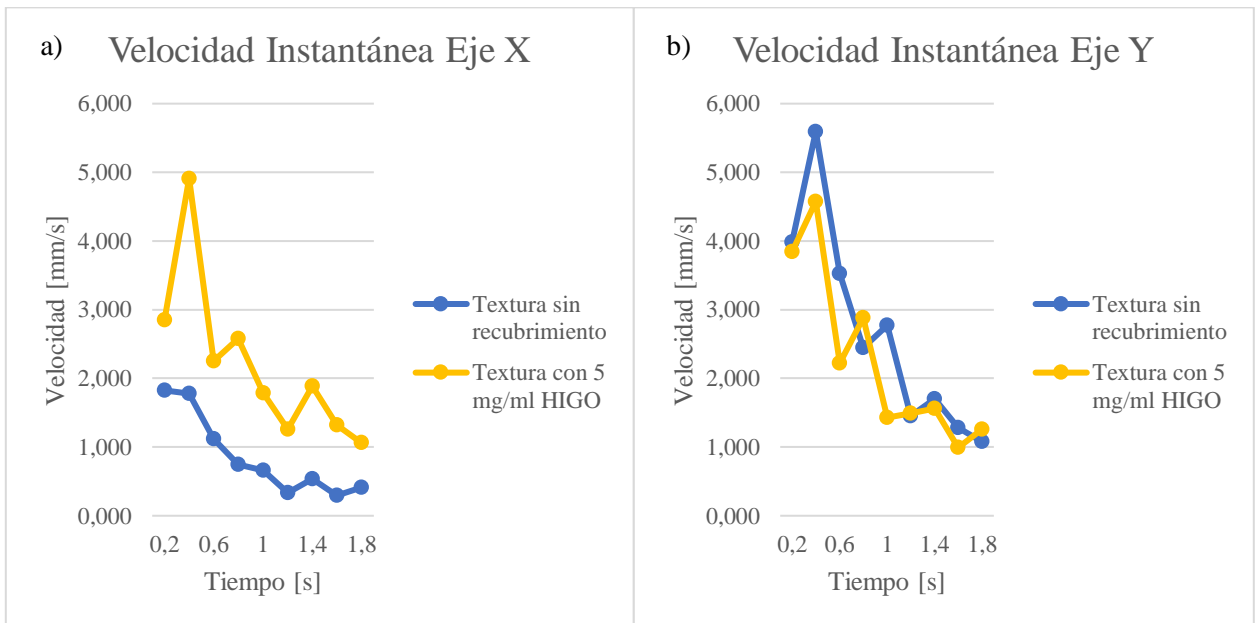


Figura 27: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V4 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).

V5:

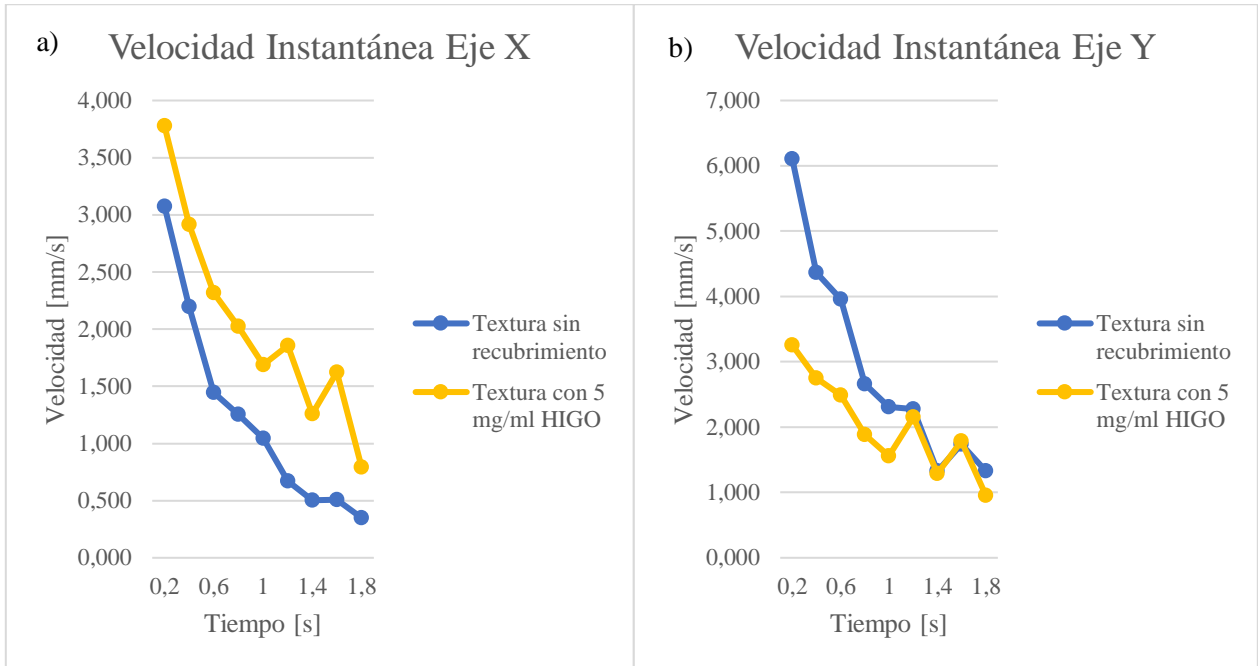


Figura 28: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V5 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).

V6:

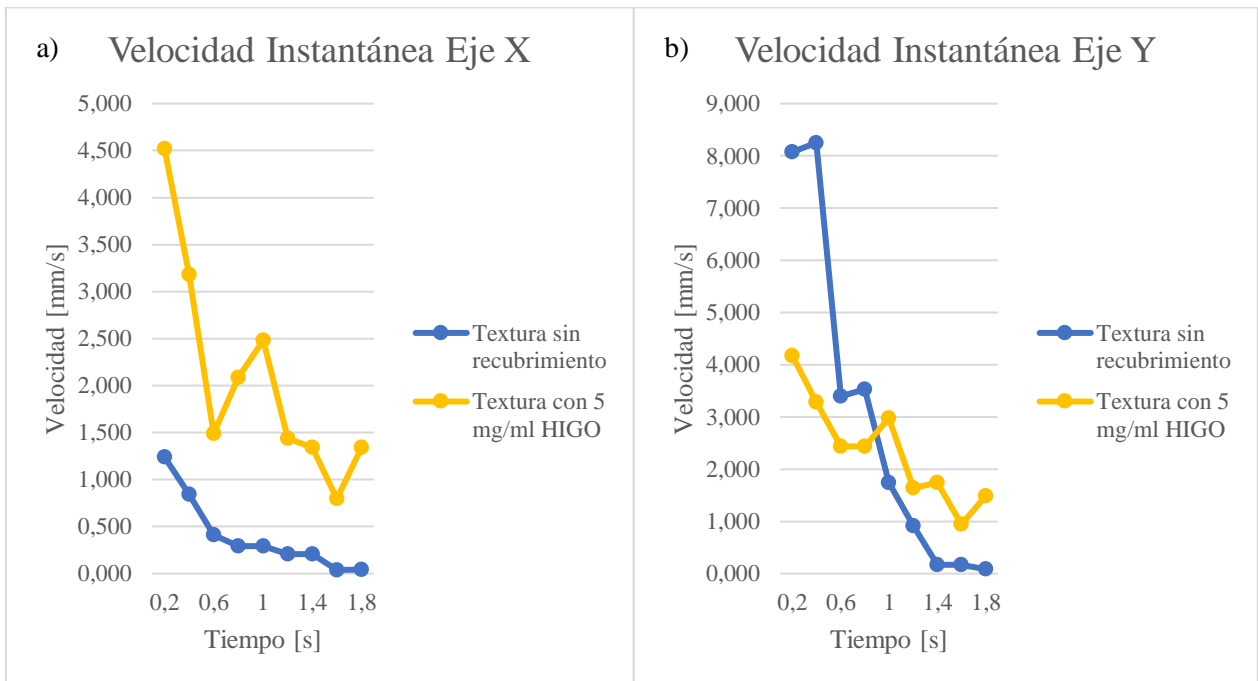


Figura 29: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V6 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).

V7:

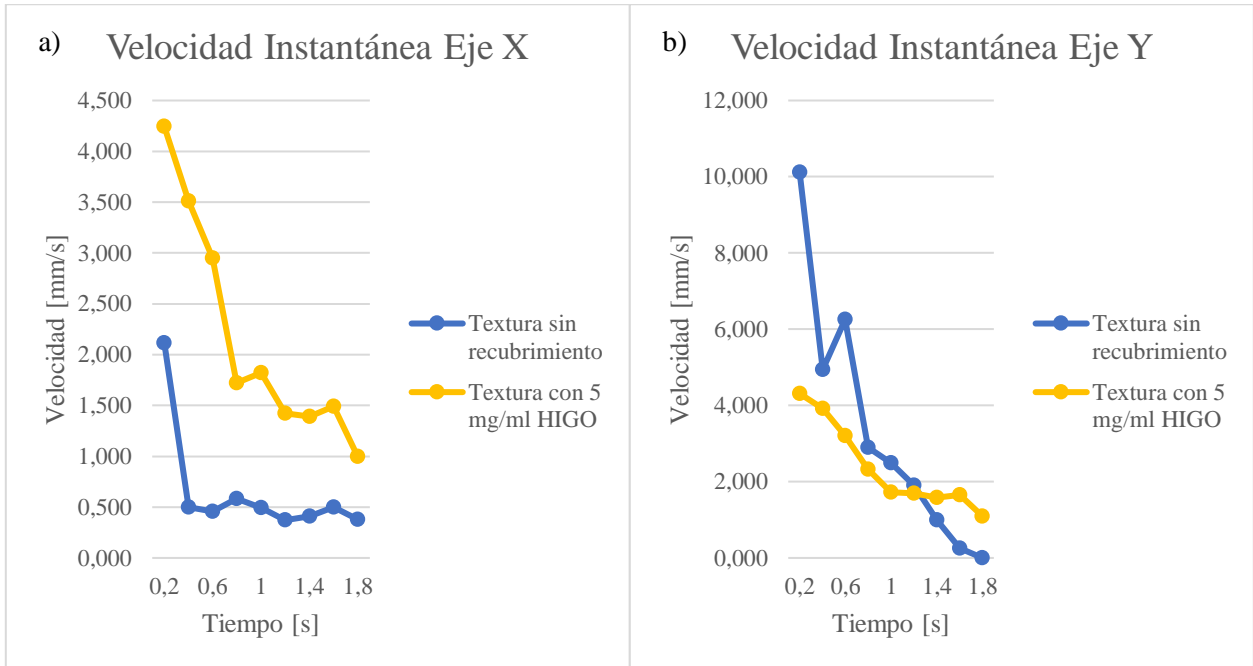


Figura 30: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V7 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).

V8:

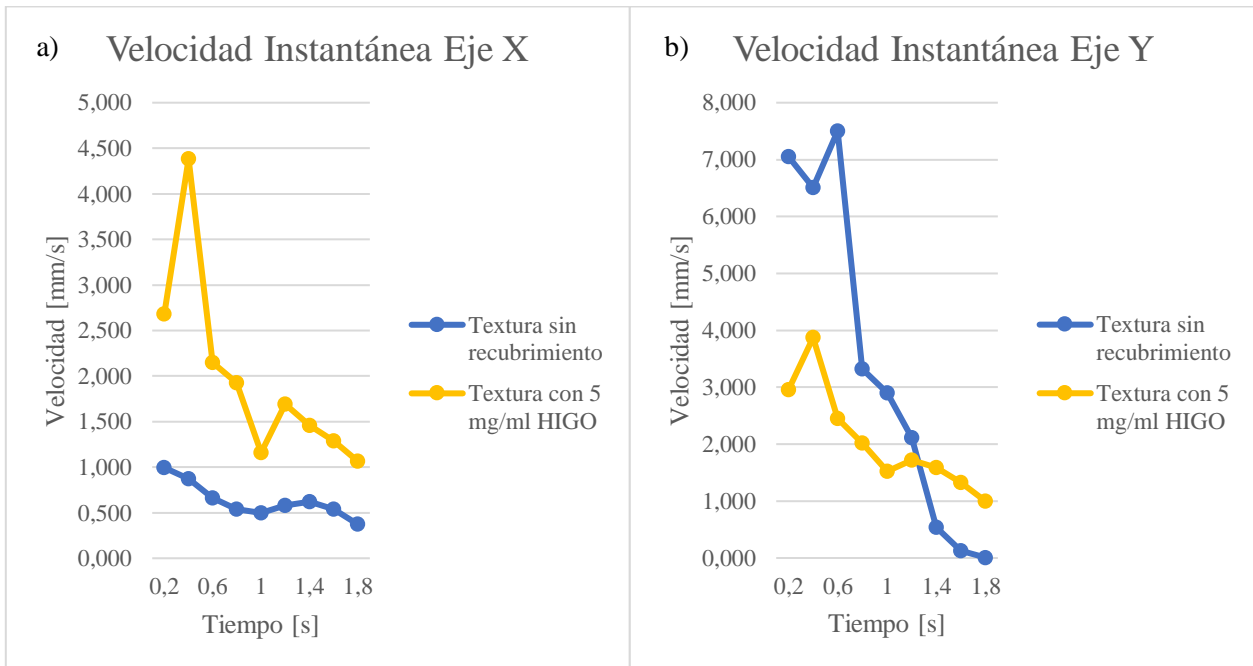


Figura 31: Comparación de velocidad instantánea en eje perpendicular (a) y paralelo (b) entre la textura V8 sin recubrimiento (línea azul) y con recubrimiento de 5 mg/ml HIGO (línea amarilla).

De los gráficos anteriores, es claro notar que, en todas las texturas, el recubrimiento es mejor para la dispersión de la gota en el eje X, mientras que solo la textura V1 estuvo igual en rendimiento para el eje Y cuando no tenía recubrimiento y cuando sí lo tenía, debido a que esta textura tiene la menor profundidad de surco en comparación al resto. Como se tiene que la textura entrega un flujo preferente, la dirección perpendicular a esta baja enormemente su rendimiento, pero este caso, la dirección preferente es paralela al gradiente de temperatura, por lo que el uso de esta para la migración de lubricante es conveniente en el caso que solo exista una única zona de calor y que esta esté alineada con la dirección preferente de la textura.

Esto se condice con lo visto en literatura, ya que se tiene los surcos paralelos a la dirección de la migración de lubricante mejoran la velocidad y desempeño del flujo que va paralelo a este [4, 8].

Es por ello por lo que se realiza una comparación con las mejores texturas:

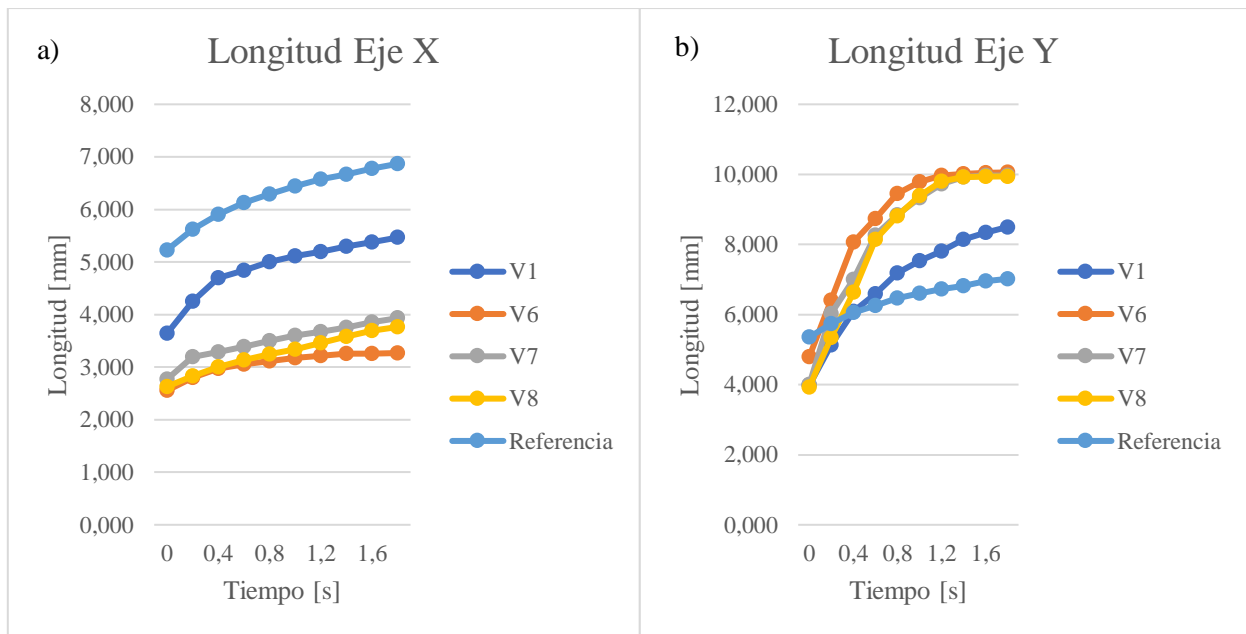


Figura 32: Comparación de texturas V1, V6, V7, V8 y la referencia (sin textura) en la longitud que tiene el aceite en el tiempo, en el (a) eje X y el (b) eje Y.

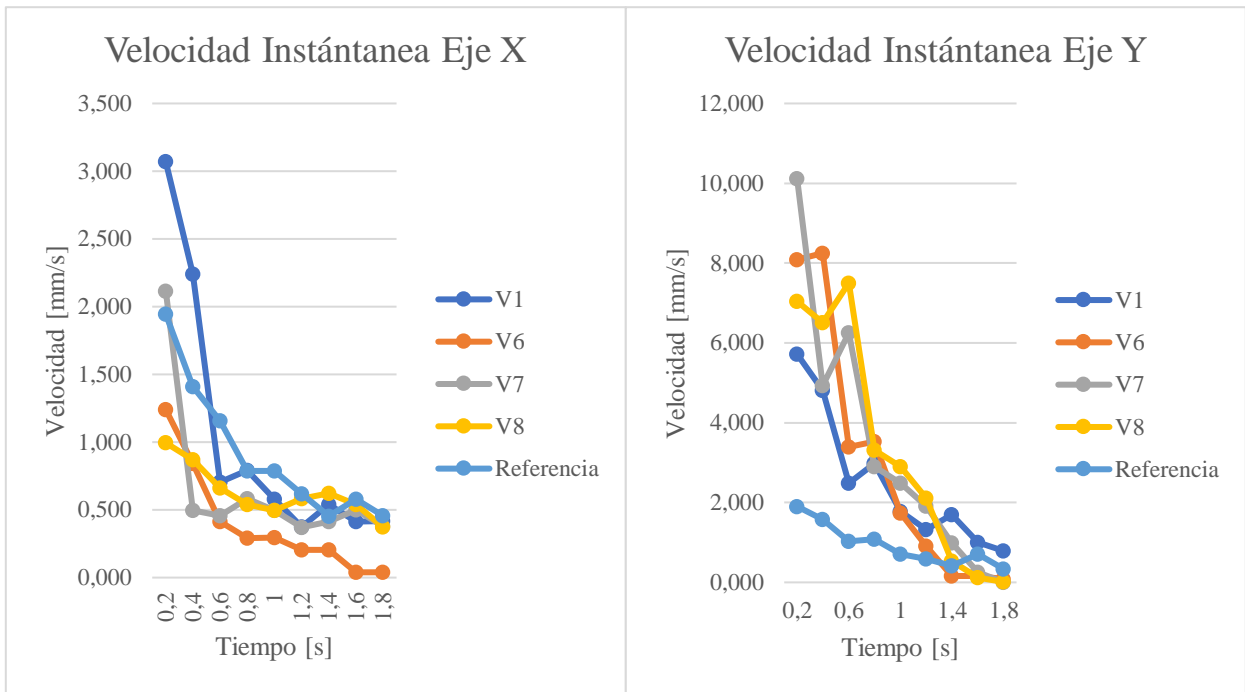


Figura 33: Comparación de las texturas V1, V6, V7, V8 y referencia (sin textura) en la velocidad instantánea que tiene el aceite en el tiempo, en el (a) eje X y (b) eje Y.

Tal como aparece en literatura [4] una mayor profundidad en los surcos tiene un mayor efecto en la migración de lubricante, aumentando la velocidad en el eje paralelo de los surcos y disminuyendo en el eje perpendicular, y como se dijo anteriormente en esta misma sección, la textura V1 tuvo una mayor velocidad en el eje perpendicular al gradiente de temperatura y menor velocidad en el eje paralelo a este debido a que es la textura con menor profundidad de surco, de aproximadamente 4 μm . A diferencia de V6, V7 y V8 estos poseen una profundidad de 11 μm , estas tienen resultados opuestos a V1, tanto en longitud como en velocidad, lo cual coincide con lo visto previamente en el estado del arte [4]. Las últimas tres texturas mencionadas pueden variar en el ancho del surco, pero aun así y debido a la similitud de la profundidad del surco es que poseen comportamientos similares, siendo V6 la que posee mayor velocidad en el eje Y (paralelo al gradiente) y peor en el eje X (perpendicular a este).

Según Dai et al [8], la forma en que se alineen las hendiduras de las texturas con el gradiente de temperatura influirá en los resultados de la migración de lubricante. En esta investigación se optó por evaluar la migración alineando las hendiduras de forma paralela porque de esa forma se sabía que se obtendrían velocidades mayores en el eje Y (que es el eje del gradiente de temperatura), y para comparar el mismo efecto en el eje perpendicular y en el eje paralelo al gradiente de temperatura usando óxido de grafeno. En la próxima sección, se realiza un cuadro comparativo con las texturas usando recubrimiento.

En resumidas cuentas, el uso de texturas aumenta la velocidad y dispersión del lubricante en un eje, cuando mismo tiempo disminuye estos mismos parámetros en el otro eje. Todas las texturas mostradas en las figuras 32 y 33 tienen mayor longitud y velocidad que la referencia en el eje Y, mientras que tienen una menor longitud y velocidad en el eje X.

5.4. Comparación de resultados

En esta sección, se ha de comparar la longitud y velocidad instantánea, tanto en el eje X como el eje Y todas las texturas evaluadas (con recubrimiento y sin recubrimiento) con la referencia (superficie sin textura y sin recubrimiento) y la superficie sin textura, pero con recubrimiento. Todo esto se hace en el margen de tiempo 0 - 1,8 segundos, que fue el intervalo usado para las texturas.

Esta comparación tiene la finalidad de establecer y determinar cuál método para la migración de lubricante conviene más, ya sea “solo recubrimiento”, “solo textura” o “textura y recubrimiento”. Con esto se podrá observar si existe alguna diferencia y saber, además, si hay alguna textura que destaque sobre el resto de las texturas en comparación con los recubrimientos.

A continuación, se muestran los resultados:

V1:

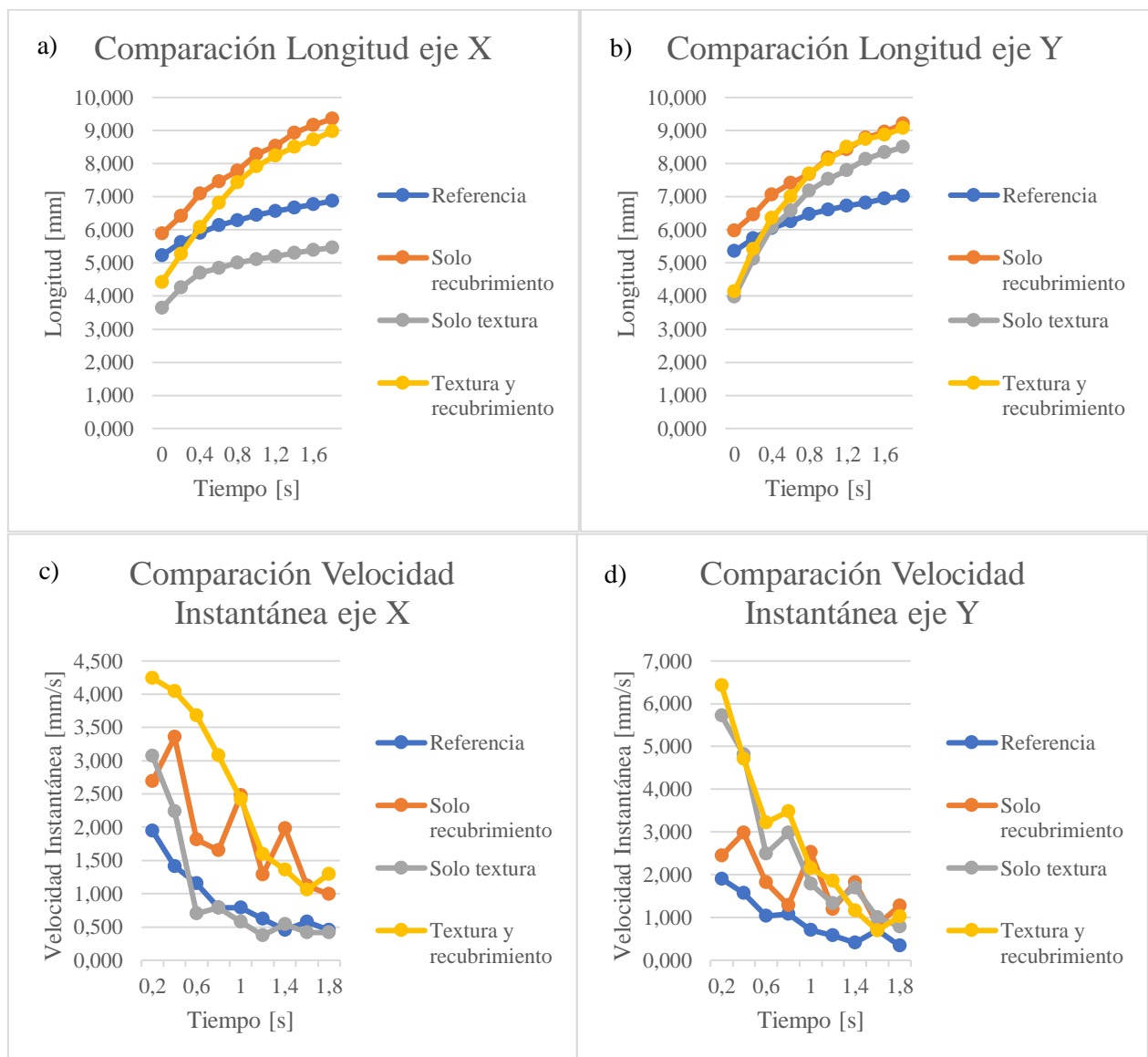


Figura 34: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V1 sin recubrimiento; y con textura V1 y recubrimiento.

V2:

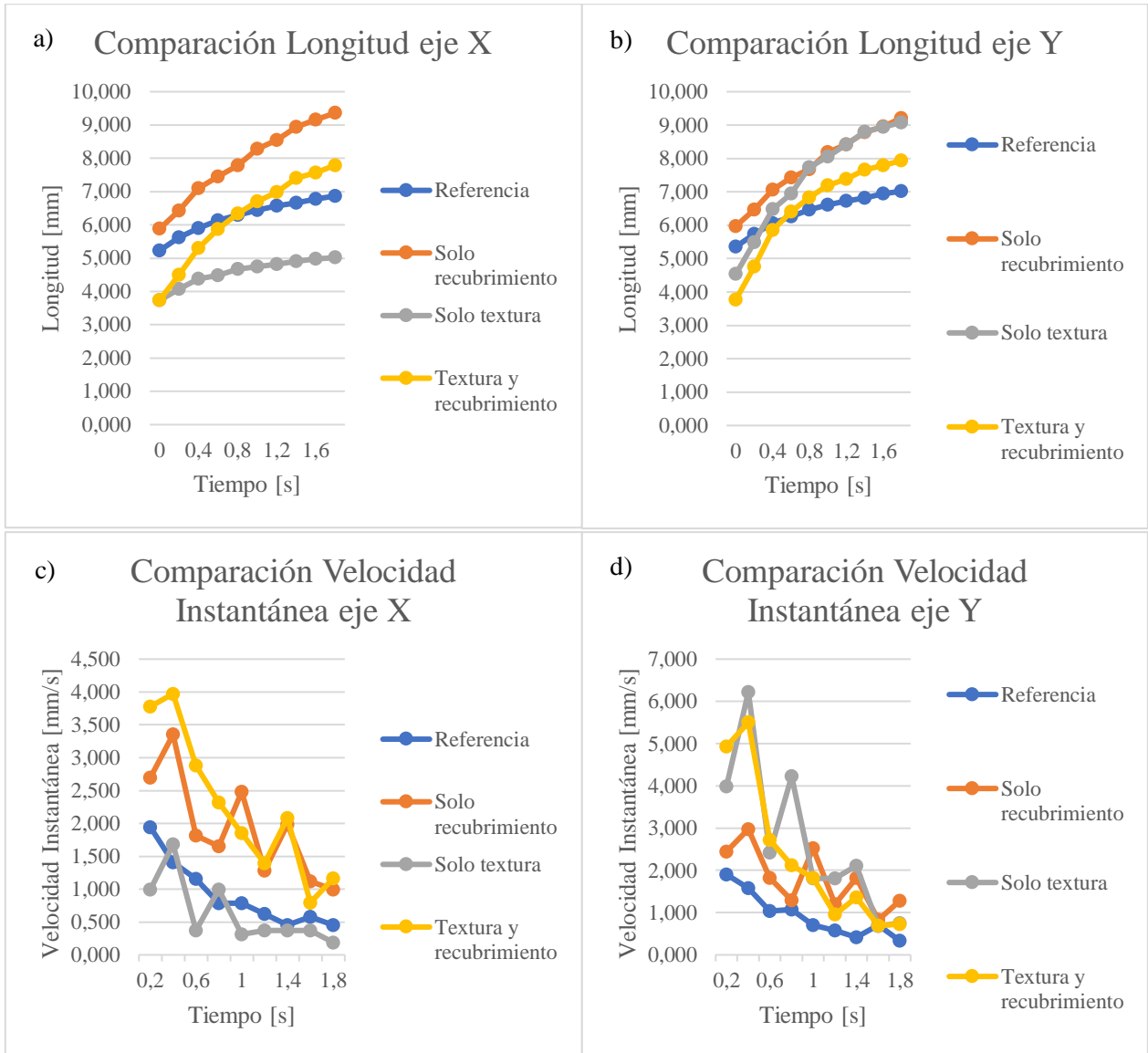


Figura 35: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V2 sin recubrimiento; y con textura V2 y recubrimiento.

V3:

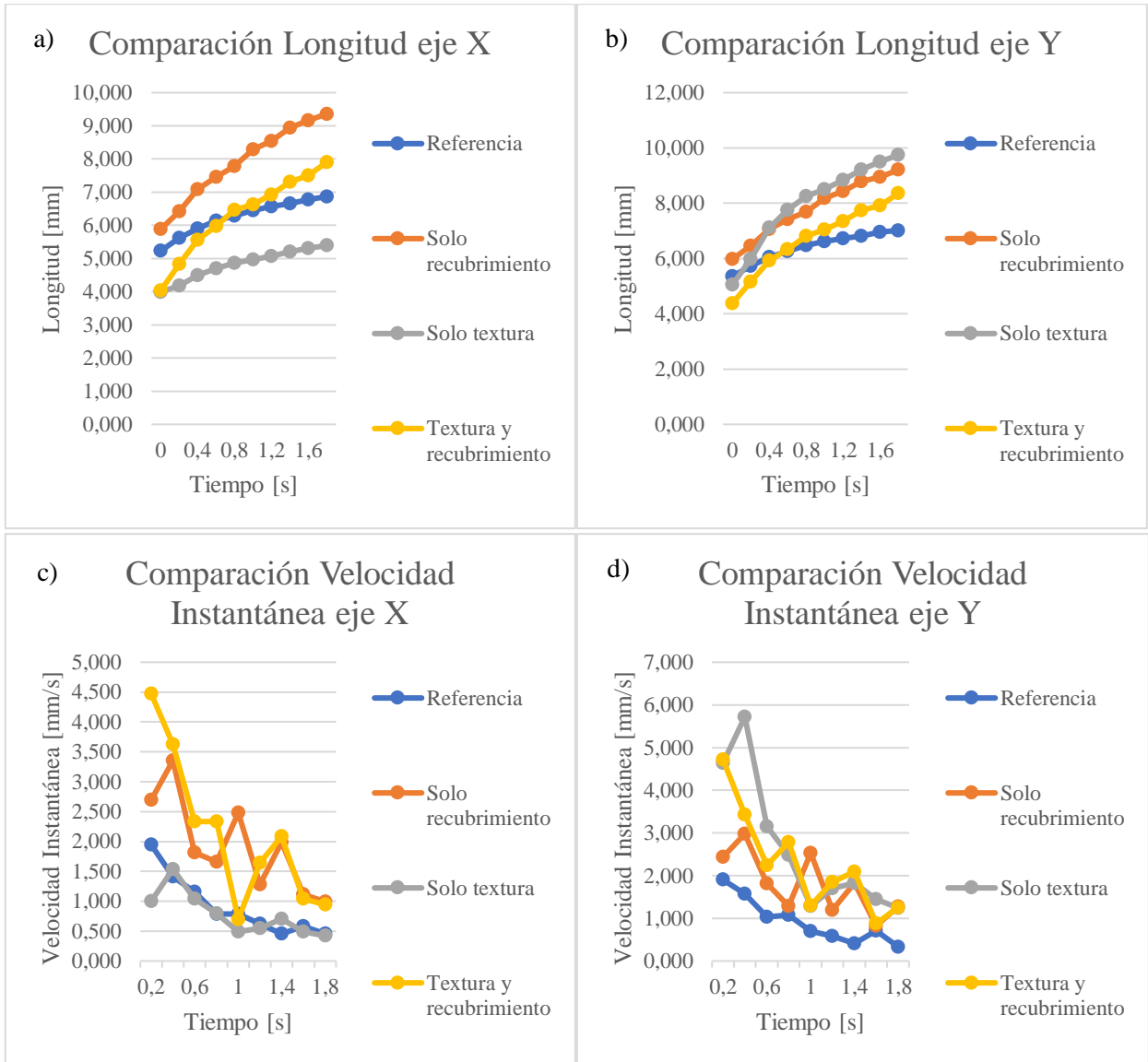


Figura 36: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V3 sin recubrimiento; y con textura V3 y recubrimiento.

V4:

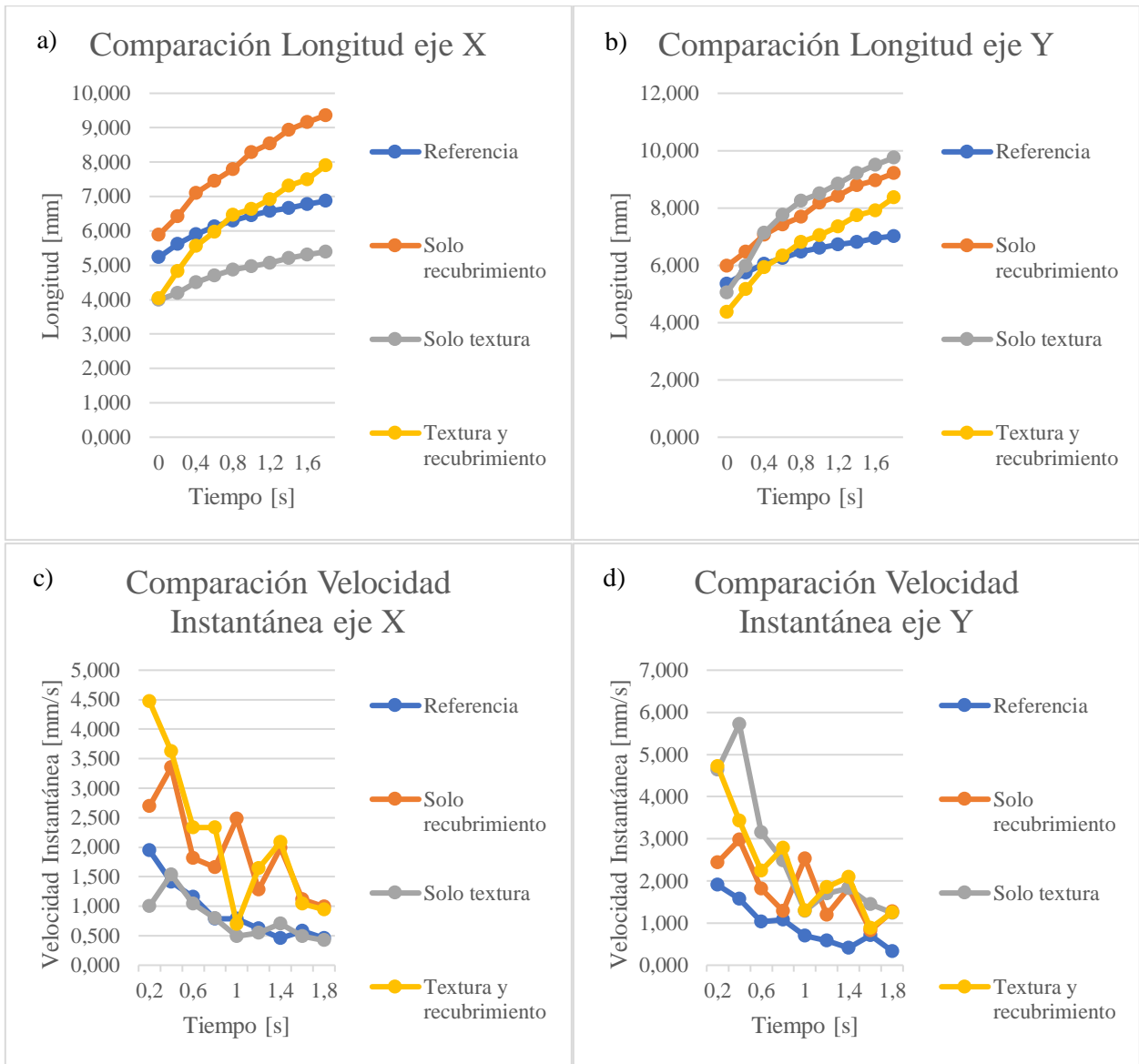


Figura 37: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V4 sin recubrimiento; y con textura V4 y recubrimiento.

V5:

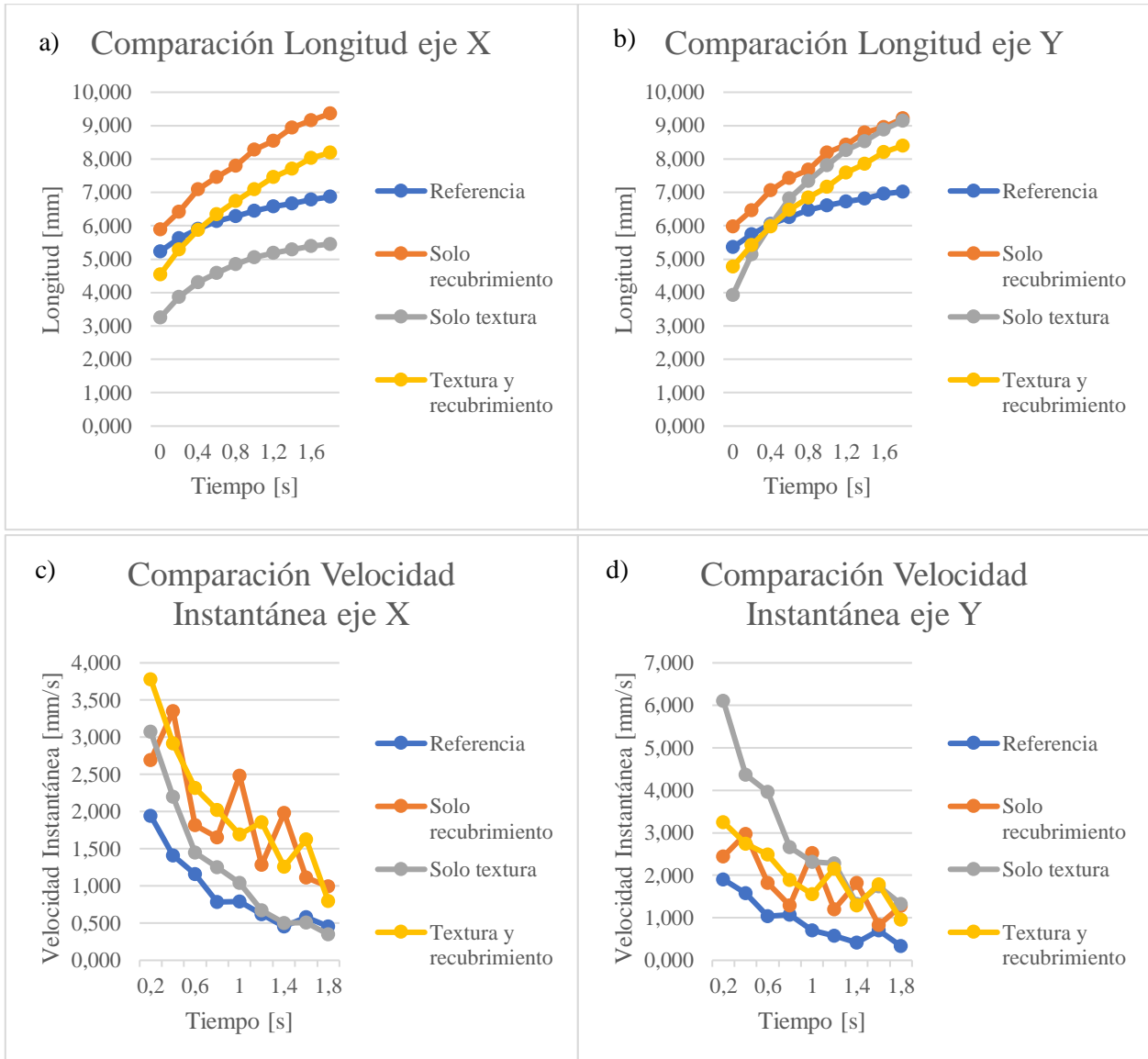


Figura 38: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V5 sin recubrimiento; y con textura V5 y recubrimiento.

V6:

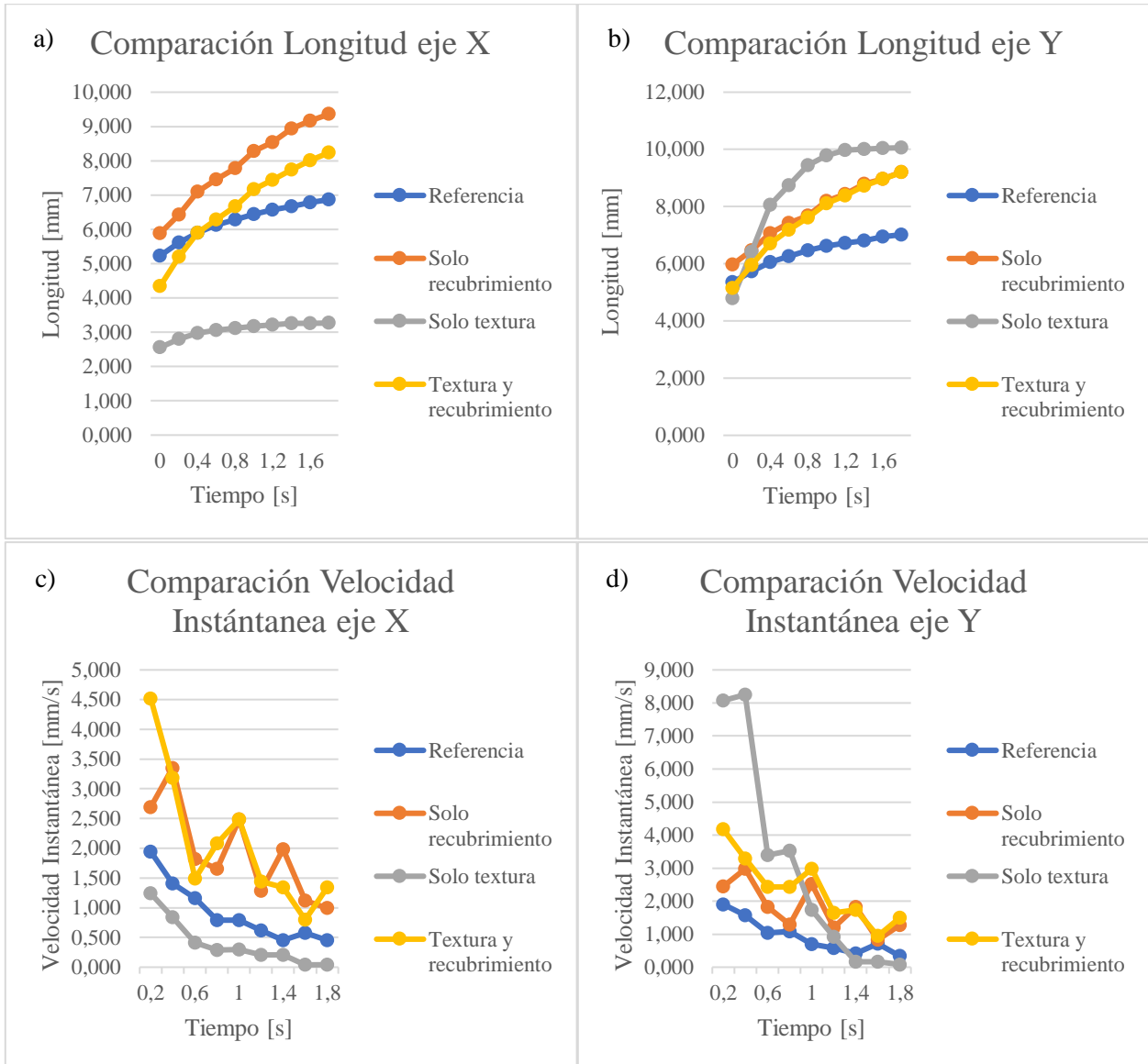


Figura 39: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V6 sin recubrimiento; y con textura V6 y recubrimiento.

V7:

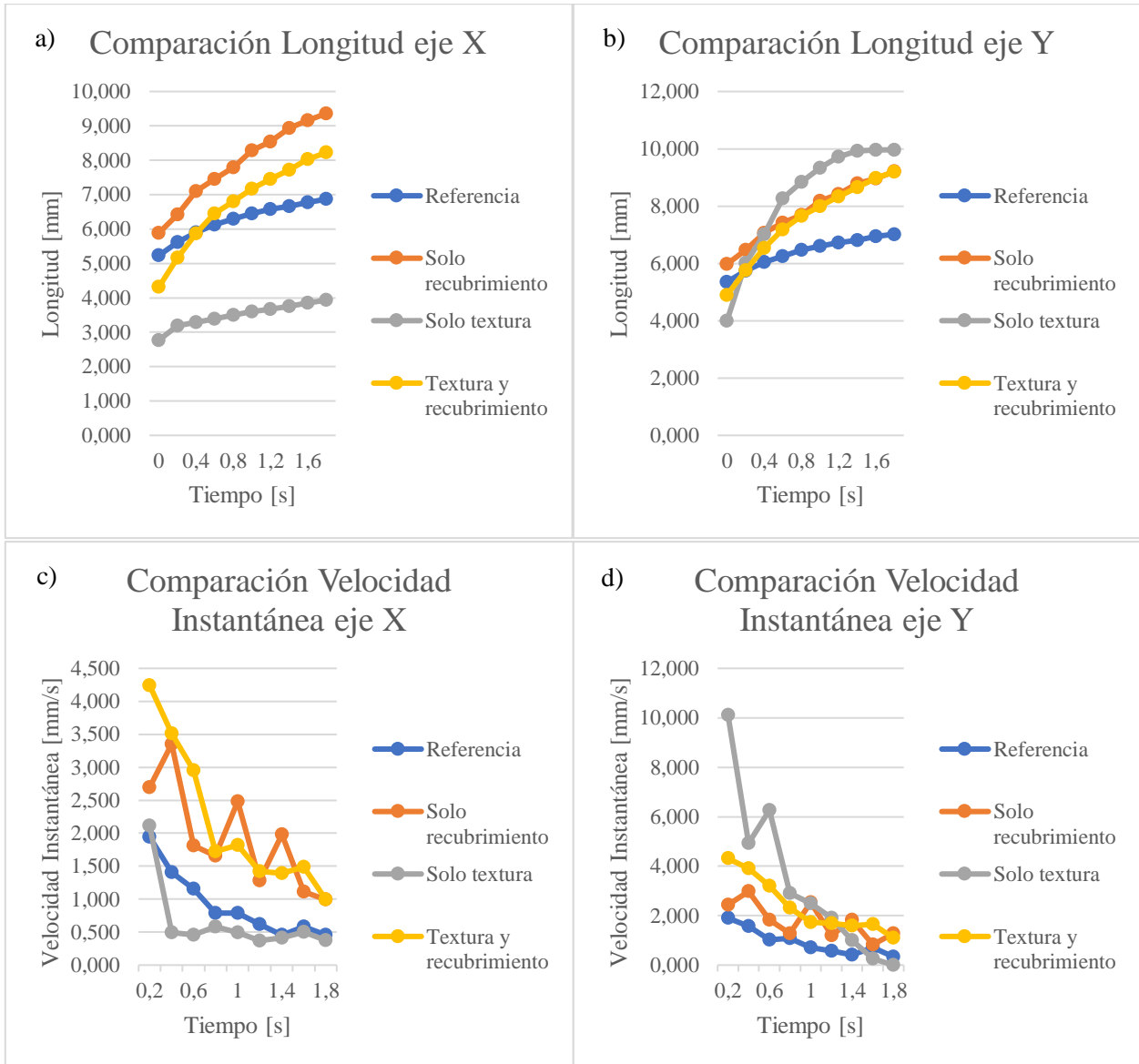


Figura 40: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V7 sin recubrimiento; y con textura V7 y recubrimiento.

V8:

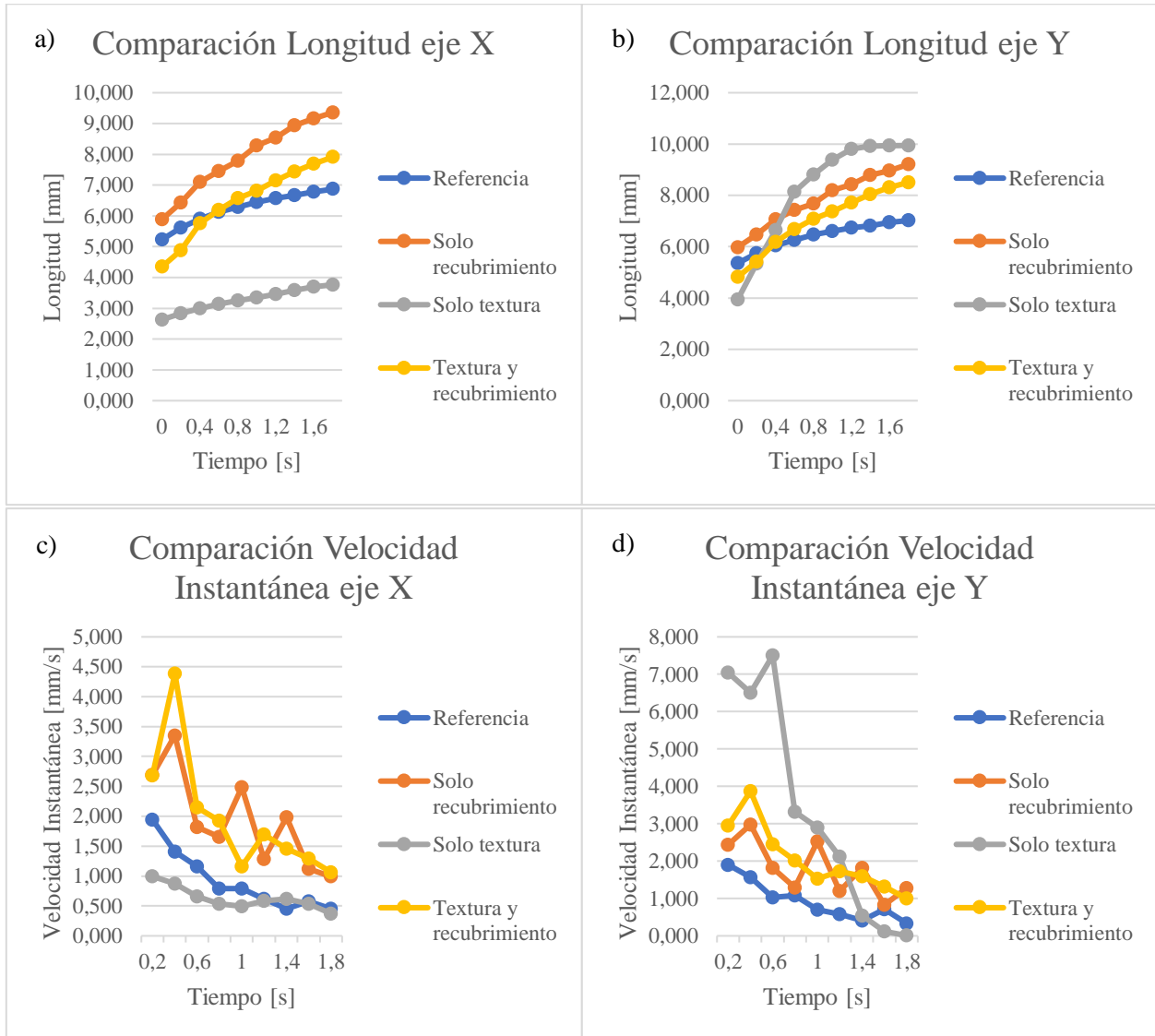


Figura 41: Comparación de longitud en los ejes (a) X e (b) Y, y comparación de la velocidad instantánea de los ejes (c) X e (d) Y de la superficie de referencia, con recubrimiento, con textura V8 sin recubrimiento; y con textura V8 y recubrimiento.

Analizando las figuras 34 a 41, es claro notar que en el eje X, hay una mayor dispersión de lubricante con respecto a la referencia cuando se usa recubrimiento o recubrimiento y textura, al usar solo textura, la velocidad y longitud del aceite es menor a la referencia.

Otra similitud que se desprende es que el uso de solo recubrimiento parece ser más rápido y con mayor longitud de aceite que cuando se usa “textura y recubrimiento” para el eje X. Ya se había mencionado que el uso de recubrimiento parece disminuir la rugosidad superficial, pero teniendo una textura el recubrimiento no basta para tener resultados similares a la condición “solo recubrimiento”, esto se puede explicar analizando nuevamente la figura 21 de la sección 5.3 donde se observa que el recubrimiento, a nivel microscópico, no es homogéneo a pesar de que las mezclas se realizaron justo antes de ser aplicadas en las muestras mediante spray coating.

V1 (figura 34) es la única textura que en el eje Y tiene mayor velocidad en el caso “textura y recubrimiento”, mientras que las demás texturas tienen mayor velocidad en el caso “solo textura”. V1 y V5 fueron las únicas texturas que tuvieron menor dispersión en el eje Y en su estado “solo textura” que al usarse “solo recubrimientos”. Esta explicación se debe a la periodicidad y profundidad en los surcos de estos, donde V1 tiene surcos poco profundos, mientras que V5 a pesar de tener mayor profundidad, es la textura con menor periodicidad. El caso opuesto es con V6 que, teniendo la mayor profundidad y periodicidad de surcos, es la que tiene mayor velocidad y longitud en el eje Y, siendo mayor incluso que V7 y V8 aun teniendo la misma profundidad, lo que cambia con estas texturas es que sus surcos tienen menor periodicidad que V6 y eso explicaría por qué la velocidad es menor.

Por lo tanto, la periodicidad y profundidad de los surcos juega un rol fundamental para controlar el flujo de lubricante que viaja a través de la textura, es decir, mientras más profundo y a mayor cantidad de surcos allá en la superficie, mayor será la velocidad de dispersión en el eje paralelo a estos. Así mismo, en el eje perpendicular se obtendrán los resultados opuestos.

Como se mencionó en la sección 5.3, las texturas tienen una mayor velocidad y longitud en la dirección paralela a la que se realizaron sus hendiduras (eje Y) y en cuanto a la migración de lubricante parece tener resultados bastante óptimos, siempre y cuando el gradiente de temperatura esté alineado en forma paralela con las hendiduras [4,8]. Sin embargo, cuando se tiene un recubrimiento esta entrega un resultado óptimo en ambos ejes, lo que lo hace más versátil en comparación a usar sólo texturas en el caso que el gradiente de temperatura tuviera una dirección desconocida o incluso variable. Aun así, si se quisiera detener el flujo provocado por un gradiente de temperatura convendría más el uso de texturas como las vistas en esta investigación y alinearlas en forma perpendicular al gradiente, esto se respalda según lo visto en la literatura [8-14].

6. Conclusiones

De los resultados obtenidos, se concluye que la presencia de óxido de grafeno, en cualquier concentración entre 1 y 5 mg/ml, permite una mejor dispersión del aceite en la superficie en comparación a la referencia sin recubrimiento. Además, se debe agregar que la concentración de óxido de grafeno en la solución es directamente proporcional con la mejora de resultados, siendo la concentración de 5 mg/ml la que mejor desempeño tuvo en cuanto a dispersión a los 60 segundos como velocidad instantánea. Por lo que se puede concluir que los efectos que produce la migración de lubricante se pueden contrarrestar con el uso de recubrimientos de Óxido de Grafeno.

En cuanto a las texturas, estas a partir de los resultados, indican que el flujo adquiere una preferencia que va a favor de las hendiduras cuando están en paralelo al gradiente de temperatura y en contra cuando están perpendicular. Se dice entonces que el comportamiento del flujo sometido a un gradiente de temperatura superficial es anisotrópico, es decir, no es uniforme en las direcciones X e Y. Una consecuencia de esto es que la velocidad en el eje paralelo (Y) es muy alta, pero en la dirección perpendicular (X) es muy baja y no se cubre el área completa de la superficie con aceite.

Cuando estas mismas texturas son sometidas a la misma experiencia, pero con un recubrimiento de HIGO de 5 mg/ml, los resultados obtenidos son que el comportamiento del flujo es totalmente distinto, adquiere una forma isotrópica, aumenta su velocidad en el eje perpendicular (X), pero disminuye en el eje paralelo (Y), esto se debe a que el recubrimiento de óxido de grafeno parece estar disminuyendo la rugosidad superficial, lo que provoca que haya una menor resistencia de la superficie al flujo de aceite, que tiene por consecuencia que el aceite tenga una mayor longitud y velocidad en el tiempo en comparación con la referencia. También se podría agregar que el recubrimiento, al disminuir la rugosidad, disminuye el roce estático y dinámico asociado al movimiento de la gota aceite cuando se deposita sobre dicha superficie, por lo que el lubricante tiene una mayor dispersión antes de encontrar el equilibrio estático. Los resultados de ángulo de contacto parecen también afirmar esto, ya que en los casos con muestras con recubrimiento el ángulo de equilibrio es bastante menor a la referencia.

A partir de los datos del ángulo de contacto, se concluye que existe un cambio en la química superficial de las muestras cuando se usa una concentración de GO mayor a 1 mg/ml. Pero no existe un cambio significativo cuando estas poseen un recubrimiento (en especial de 5 mg/ml), lo que apoya más la conclusión de que el recubrimiento disminuye la rugosidad superficial y además esta no se altera si las superficies están lavadas o no. Esto permite reutilizar muestras cuando se requiera ensayarlas varias veces con un recubrimiento.

En cuanto a la existencia de efectos sinérgicos entre la topografía superficial y los recubrimientos de GO, no existen en el sentido de que usar ambos no mejora los resultados de dispersión de aceite ante un gradiente de temperatura en todas las direcciones. La ventaja de usar ambos es que permite cambiar el flujo preferencial anisotrópico a uno más isotrópico y viceversa según la necesidad que se tenga en el momento con la superficie texturizada. Finalmente, para continuar con el estudio de la migración ante gradientes de temperatura y superficies texturizadas se sugiere usar muestras más grandes para analizar estos efectos por más tiempo y también, el uso de otro tipo de texturas.

7. Bibliografía

1. Dr. Ing. Andreas Rosenkranz. 2018. Effect of Surface Chemistry and Lubricant's Properties Modified by Graphene Oxide and its Derivatives on Lubricant Migration
2. Andreas Rosenkranz, Yangqin Liu, Lin Yang and Lei Chen. 2020. 2D Nano-Materials Beyond Graphene: From Synthesis to Tribological Studies.
3. Andreas Rosenkranz, Henara L. Costa, Francisco Profito, Carsten Gachot, Simon Medina, Daniele Dini. 2019. Influence of Surface Texturing on Hydrodynamic Friction in Plane Converging Bearings - An Experimental and Numerical Approach.
4. Philipp G. Grützmacher, Shreyas V. Jalikop, Carsten Gachot and Andreas Rosenkranz, 2020. Thermocapillary Lubricant Migration on Textured Surfaces – a Review of Theoretical and Experimental Insights.
5. Francisco González. 2021. Efectos de la Humectabilidad y Migración de Lubricante de una Superficie Modificada con Nanopartículas Mediante Spray Coating.
6. Alfred A. Fote, Leon M. Dormant and Seymour Feuerstein. 1976. Migration of Hydrocarbon Oil on Metal Substrates under the Influence of Temperature Gradients. *Lubrication Engineering*, El Segundo, California, 32, 10, 542-545.
7. Alfred A. Fote, R. A. Slade, S. Feuerstein. 1978. The Prevention of Lubricant Migration in Spacecraft.
8. Qingwen Dai, Wei Huang, Xiaolei Wang. 2014. Surface Roughness and Orientation Effects on the Thermo-capillary Migration of a Droplet of Paraffin Oil. *Experimental Thermal and Fluid Science*.
9. O. Bliznyuk, E. Vereshchagina, E. Stefan Kooij and Bene Poelsema. 2009. Scaling of Anisotropic Droplet Shapes on Chemically Stripepatterned Surfaces. *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Physics*, 79, 1–6.
10. Ron Wang and Shaoxian Bai. 2019. Modeling and Experimental Analysis of Thermocapillary Effect on Laser Grooved Surfaces at High Temperatures. *Applied Surface Science*. 465, 41–47.
11. Philipp G. Grützmacher, Andreas Rosenkranz and Carsten Gachot. 2016. How to guide lubricants—tailored laser surface patterns on stainless steel. *Applied Surface Science*. 370, 59–66.
12. Florian König, Andreas Rosenkranz, Philipp G. Grützmacher, Frank Mücklich and Georg Jacobs. 2020. Effect of single- and multi-scale surface patterns on the frictional performance of journal bearings – A numerical study. *Tribology International*, 143.

13. R. G. Cox. 1986. The dynamics of the spreading of liquids on a solid surface. Part 1. Viscous Flow. *Journal Fluid Mechanics*. 168-169.
14. Masamichi Morita, Tomoyuki Koga, Hideyuki Otsuka and Atsushi Takahara. 2005. Macroscopic-Wetting Anisotropy on the Line-Patterned Surface of Fluoroalkylsilane monolayers. *Langmuir*, 21, 911–918.
15. Dawn E. Kataoka and Sandra M. Troian. 1999. Patterning liquid flow on the microscopic scale. *Nature*, 402, 794–797.
16. Daniel Wyn Müller, Tobias Fox, Philip G. Grützmacher, Sebastián Suarez and Frank Mücklich. 2020. Applying Ultrashort Pulsed Direct Laser Interference Patterning for Functional Surfaces. *Scientific Report*, 10, 3647.
17. Zhejun Chong, Qingwen Dai, Wei Huang and Xiaolei Wang. 2020. Investigations on the Thermocapillary Migration of Liquid Lubricants at Different Interfaces. *Tribology Letters*, 68, 1–12.
18. H. Patrick Jansen, Olesya Bliznyuk, E. Stefan Kooij, Bene Poelsema and Harold J. W. Zandvliet. (2012). Simulating Anisotropic Droplet Shapes on Chemically Striped Patterned Surfaces. *Langmuir*, 28(1), 499–505.