

EROSIÓN POR LODOS EN RESINAS EPOXI PARA RECUBRIMIENTOS DE TUBERÍAS

Autor
CABRED, Lisandro

Director
Dr. MORAN, Juan Ignacio
Co-directora
Dra. PENOFF, Elisabeth

Trabajo Final para optar por el grado de Ingeniería en Materiales
UNMDP - Facultad de Ingeniería - Departamento de Materiales
Mar del Plata, octubre 2026

A la memoria de Marcelo, Reina y Alfredo

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia. A mi padre, Marcelo, y a mi madre, Analía, por el amor, el apoyo incondicional y los valores que me transmitieron, sin los cuales este logro no habría sido posible. A mi hermano, Santiago, por sus enseñanzas, su compañía, y su aliento constante a lo largo de toda la carrera.

A mi director, el Dr. Juan Ignacio Moran, y a mi codirectora, la Dra. Elisabeth Penoff, por la orientación, la dedicación y la disponibilidad que me brindaron durante el desarrollo de este trabajo final. Agradezco especialmente sus aportes, sus correcciones y la confianza depositada en mí.

Al grupo de Compuestos Estructurales Termorrígidos (CET) del Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA), por haberme brindado el espacio, el equipamiento y los recursos necesarios para la realización de los ensayos, así como por su colaboración y el buen ambiente de trabajo.

A mis amigos, por la compañía recibida a lo largo de estos años de formación.

Finalmente, a mi pareja, Almendra, por la motivación y el acompañamiento brindados durante la etapa final de mi formación, y por su paciencia y comprensión en los momentos de mayor exigencia.

Lisandro Cabred

Índice general

Agradecimientos I

1. Resumen 1

2. Introducción 2

3. Marco teórico 5
- 3.1. Polímeros . . . 5
  - 3.1.1. Recubrimientos poliméricos . . . 8
- 3.2. Erosión . . . 8
  - 3.2.1. Erosión por partículas en flujo multifásico . . . 8
  - 3.2.2. Mecanismos de daño . . . 9
  - 3.2.3. Parámetros que afectan la erosión . . . 12
- 3.3. Modelado numérico computacional . . . 13
  - 3.3.1. Modelo turbulento $k-\omega$ . . . 14
  - 3.3.2. Modelado lagrangiano de partículas . . . 16

4. Objetivos 20

5. Metodología experimental 21
- 5.1. Sistema piloto para ensayos de erosión por lodos . . . 21
  - 5.1.1. Diseño . . . 21
  - 5.1.2. Portamuestras . . . 22
- 5.2. Medición de diámetro de partículas . . . 24
- 5.3. Erosión del cupón . . . 24
  - 5.3.1. Perfilometría . . . 24
- 5.4. Modelado computacional . . . 25

6. Resultados 31
- 6.1. Caracterización de partículas . . . 31
- 6.2. Distribución de tamaño de partículas . . . 32
- 6.3. Pérdida de masa . . . 33
- 6.4. Análisis óptico . . . 35

6.4.1. Inspección visual 35
6.4.2. Microscopía óptica 37
6.4.2.1. Cupón ensayado a 20° 38
6.4.2.2. Cupón ensayado a 45° 40
6.4.2.3. Cupón ensayado a 60° 42
6.4.2.4. Cupón ensayado a 75° 44
6.5. Perfilometrías 46
6.6. Modelado numérico 53
6.6.1. Fluidodinámica 53
6.6.2. Erosión por seguimiento de partículas 55
6.6.2.1. Distribución espacial de las condiciones de impacto . 55
6.6.2.2. Independencia del resultado respecto del número de partículas 56
6.6.2.3. Resultados modelo de erosión 58
6.6.2.4. Componentes del modelo de erosión 60
6.6.2.5. Cupón a 20° 60
6.6.2.6. Cupón a 45° 61
6.6.2.7. Cupón a 60° 61
6.6.2.8. Cupón a 75° 61

7. Discusión **65**

8. Conclusiones **70**

9. Trabajo a futuro **71**

Bibliografía **72**

1 Resumen

El objetivo de este trabajo fue diseñar y evaluar una metodología experimental y numérica para estudiar la erosión por partículas sólidas transportadas por agua sobre resina epoxi, analizando la influencia del ángulo de incidencia bajo las condiciones hidráulicas ensayadas.

Los objetivos específicos se concentraron en construir un sistema piloto para ensayos de erosión por lodos; caracterizar la arena y la resina; realizar ensayos sobre cupones de resina epoxi a 20°, 45°, 60° y 75°; cuantificar el desgaste mediante pérdida de masa, microscopía óptica y perfilometría de contacto; implementar un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) con seguimiento de partículas; y comparar la distribución del daño obtenida experimental y numéricamente.

Se implementó un modelo computacional en un software de cálculo de elementos finitos, en el cual se resolvió el campo de velocidades del fluido mediante un modelo de turbulencia $k-\omega$ y las trayectorias de las partículas mediante un enfoque lagrangiano. A partir de las condiciones de impacto obtenidas, se calculó el desgaste con un modelo de erosión que separa las contribuciones por deformación y por corte.

La microscopía óptica y la perfilometría mostraron un aumento sistemático del daño superficial con el ángulo de incidencia. Según el modelo, el corte fue el mecanismo predominante en todos los ángulos analizados, aunque la participación de la deformación localizada aumentó desde un 6 % a 20° hasta un 43 % a 75°. Esta evolución resultó consistente con la transición observada en las micrografías, desde marcas alargadas y direccionales hacia improntas de contorno redondeado. En cambio, la pérdida de masa determinada por gravimetría no permitió aislar el efecto del ángulo, debido al desgaste de los cantos de los cupones. En consecuencia, se obtuvo una concordancia cualitativa entre los resultados experimentales y numéricos, mientras que la validación predictiva del modelo, la evaluación de distintas velocidades de flujo, el ajuste de sus parámetros con condiciones independientes y la comparación entre modelos de erosión se plantean como etapas futuras.

Palabras clave: erosión por partículas sólidas, resina epoxi, ángulo de impacto, dinámica de fluidos computacional, seguimiento lagrangiano de partículas.

2 Introducción

En la industria del petróleo y del gas, las tuberías cumplen un rol primordial. A grandes rasgos, el proceso productivo del petróleo se puede dividir en tres fases: la extracción desde los yacimientos mediante pozos (*Upstream*), su procesamiento en los complejos industriales de las refinerías petroquímicas (*Downstream*) y el nexo entre ambos procesos, que es la fase de transporte (*Midstream*). En todas estas etapas, las cañerías transportan el crudo junto con otros compuestos, que pueden formar soluciones corrosivas en algunos casos o suspensiones de partículas erosivas en regímenes de flujo multifásico en otros [1].

Para la manufactura de las tuberías usadas en el transporte de petróleo, comúnmente se utilizan aceros cuyas propiedades mecánicas son elevadas, pero su resistencia a la corrosión es baja. Una de las familias de materiales más comunes es la de los aceros al carbono, normados por API. Por este motivo, los caños se recubren interiormente con polímeros con propiedades de barrera ante los compuestos corrosivos, lo cual extiende la vida útil del conjunto entre 25 a 30 años [2].

La utilización de polímeros como recubrimiento se debe a su capacidad de actuar como barrera física frente al transporte de agua, oxígeno e iones disueltos hacia el sustrato, compuestos que actúan como agentes corrosivos del metal [3]. Dado que todo polímero presenta cierta permeabilidad, estos reactivos alcanzarán la superficie metálica pero con una limitación cinética tal que se reduce el flujo hasta valores que hacen despreciable la velocidad de corrosión. A ello se suma la elevada resistividad eléctrica del polímero, que restringe la conducción iónica a través de la película y dificulta el cierre del circuito entre las regiones anódicas y catódicas que puedan establecerse sobre el sustrato.

A pesar de la resistencia química de los recubrimientos poliméricos, su vida útil se ve drásticamente reducida en presencia de suspensiones con partículas, generalmente arena en el ámbito del *Upstream No Convencional*, ya que se usa en el *fracking* para mantener abiertas las grietas en la roca y permitir el flujo de petróleo hacia la superficie. Esto se debe a que los polímeros no poseen una elevada resistencia al impacto frente al choque constante de partículas, lo que genera un marcado desgaste, principalmente en flujos de alta velocidad y localizado mayormente en zonas donde ocurren cambios de dirección o cambios de diámetro [4].

Si bien la erosión por partículas ha sido ampliamente estudiada en materiales metálicos utilizados en sistemas de transporte de fluidos, el comportamiento de materiales poliméricos y compuestos de matriz polimérica continúa siendo un área de investigación activa. En particular, existe menor disponibilidad de información experimental y de modelos predictivos para materiales termorrígidos empleados como matrices o recubrimientos en aplicaciones de petróleo y gas, especialmente bajo condiciones de flujo líquido-sólido representativas del transporte de lodos abrasivos [4].

Entre estos materiales, las resinas epoxi ocupan un lugar destacado debido a su elevada resistencia química, buena adhesión a sustratos y amplia utilización en recubrimientos protectores y materiales compuestos. Sin embargo, su estructura altamente entrecruzada, responsable de muchas de sus ventajas frente a ambientes corrosivos, también condiciona su respuesta mecánica frente a impactos repetidos de partículas sólidas, pudiendo favorecer mecanismos de microfisuración y remoción localizada de material [5, 6]. Por este motivo, es sumamente importante conocer las condiciones de operación de los componentes y cómo estas afectan su integridad.

La simulación numérica mediante Fluidodinámica Computacional (CFD) permite resolver problemas complejos de transporte de fluidos mediante la resolución de ecuaciones de conservación en dominios discretizados [7]. Particularmente para estudiar la erosión, esta herramienta permite analizar la distribución de velocidades del fluido, las trayectorias de las partículas y las zonas de mayor concentración de impactos, lo cual proporciona información detallada sobre los mecanismos responsables del desgaste.

Además, la simulación permite estudiar condiciones que podrían resultar difíciles o costosas de reproducir experimentalmente, tales como variaciones extremas de velocidad, cambios en la granulometría o modificaciones geométricas del sistema. Esto facilita la optimización de diseños antes de su implementación industrial, reduciendo iteraciones físicas y minimizando riesgos asociados a fallas prematuras.

En este contexto, resulta necesario desarrollar metodologías que integren observaciones experimentales y modelado numérico para comprender los mecanismos de erosión presentes en materiales poliméricos utilizados en aplicaciones industriales. La combinación de ensayos controlados con simulaciones *CFD* permite relacionar variables operativas, tales como la velocidad del flujo y el ángulo de incidencia de las partículas, con la distribución espacial del daño y la pérdida de material observada.

Con este propósito, en el presente trabajo se desarrolló un sistema piloto para ensayos de erosión por lodos capaz de reproducir condiciones controladas de flujo líquido-sólido y se implementó un modelo computacional basado en Fluidodinámica Computacional y seguimiento lagrangiano de partículas. El estudio se centró en una resina epoxi representativa de las matrices utilizadas en materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio empleados en sistemas de conducción de fluidos. El objetivo final fue el desarrollo de herramientas predictivas que permitieran comprender y estimar el desgaste erosivo de este tipo de materiales bajo diferentes condiciones de operación.

3 Marco teórico

3.1. Polímeros

Los polímeros son arreglos de largas cadenas de moléculas donde sus átomos están enlazados covalentemente. Se caracterizan por tener una unidad repetitiva (monómero) que, por condensación o adición, conforma la cadena polimérica con una gran cantidad de unidades. Las fuerzas intermoleculares que mantienen unidas las cadenas son de tipo Van der Waals, normalmente fuerzas de London para las no polares y dipolo-dipolo para las polares. Ocasionalmente, pueden existir interacciones de tipo puente de Hidrógeno, dependiendo de si la o las unidades repetitivas tienen átomos que generen este tipo de interacciones [8].

Existen dos familias de polímeros según el orden de las macromoléculas: los amorfos y los semicristalinos (Fig. 3.1). Los polímeros amorfos son aquellos que no generan estructuras regulares, sino que las cadenas se disponen sin un orden específico en el espacio, permitiendo su movimiento si se encuentran por encima de su temperatura de transición vítrea, o permanecen inmóviles si están por debajo de su T_g. Por el contrario, los semicristalinos son aquellos en los que un porcentaje de cadenas se ordena, mientras que el resto debe permanecer amorfo para permitir la cristalización. La capacidad que tienen las cadenas de agruparse en estructuras regulares se conoce como el grado de cristalinidad [8].

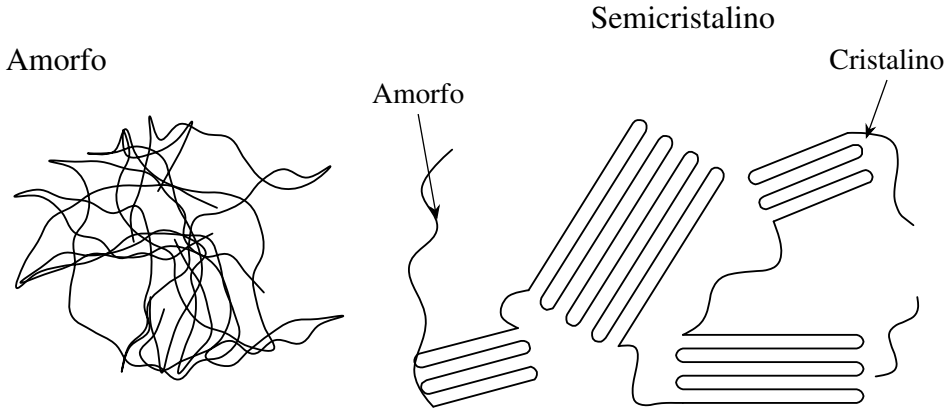


Figura 3.1. Estructuras amorfas y semicristalinas.

El porcentaje de cristalinidad afecta en gran medida las propiedades mecánicas de los polímeros. A mayor grado de cristalinidad, mayor es la temperatura a la cual se vuelve más dúctil y, además, mayores son las propiedades mecánicas. En cambio, cuando las cadenas no pueden agruparse de manera regular, ya sea por impedimento estérico o electrostático, su grado de cristalinidad disminuye [8].

Los polímeros pueden clasificarse, según su respuesta frente a la temperatura, en termoplásticos y termorrígidos. Los primeros están constituidos por cadenas lineales o levemente ramificadas, unidas predominantemente por interacciones intermoleculares secundarias. Por ello, al aumentar la temperatura, las cadenas adquieren movilidad suficiente para que el material se ablande y fluya, permitiendo su reprocesamiento mediante ciclos sucesivos de calentamiento y enfriamiento [5, 8].

Por el contrario, los polímeros termorrígidos se forman durante el proceso de curado mediante el desarrollo de una red tridimensional de enlaces covalentes entre cadenas o sitios reactivos multifuncionales (Fig. 3.2).

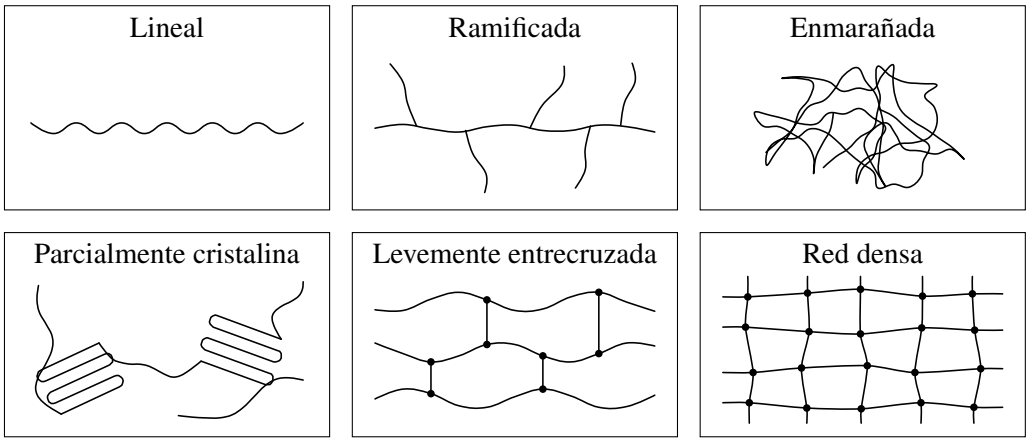


Figura 3.2. Microestructuras poliméricas.

Esta estructura restringe severamente la movilidad molecular, dificulta el empaquetamiento regular de las cadenas y reduce su capacidad de cristalización. A medida que aumenta la densidad de entrecruzamiento, se incrementan generalmente la rigidez, la estabilidad dimensional y la temperatura de transición vítrea del material. Una vez formada la red, el polímero no puede fundirse ni reprocesarse, ya que el calentamiento conduce a su degradación química antes que al flujo viscoso. Estas características favorecen su empleo en aplicaciones estructurales y como recubrimientos protectores, debido a su elevada resistencia química y resistencia al creep; sin embargo, suelen presentar menor capacidad de deformación plástica y menor tenacidad que los polímeros termoplásticos [5, 6, 9].

La densidad de entrecruzamiento constituye una de las variables estructurales más importantes en los polímeros termorrígidos. Un aumento en el número de enlaces covalentes entre cadenas restringe la movilidad molecular y favorece una respuesta más rígida frente a solicitaciones mecánicas. Como consecuencia, estos materiales suelen presentar una elevada resistencia a la deformación, aunque también una menor capacidad para absorber energía mediante deformación plástica antes de fracturarse [5].

La respuesta de un polímero frente al impacto de partículas sólidas depende directamente de su estructura molecular. Propiedades tales como la rigidez, la tenacidad, la resiliencia y la temperatura de transición vítrea determinan la manera en que la energía asociada al impacto es absorbida, disipada o concentrada localmente dentro del material. Por este motivo, polímeros con estructuras diferentes pueden exhibir mecanismos de desgaste considerablemente distintos bajo una misma condición erosiva [4].

Particularmente en materiales altamente entrecruzados, como las resinas epoxi utilizadas en numerosas aplicaciones industriales, la limitada movilidad de las cadenas favorece una respuesta predominantemente frágil frente a impactos repetitivos. En estas condiciones, parte de la energía transferida por las partículas puede dar lugar a la nucleación de microfisuras, la propagación de daño superficial y el desprendimiento progresivo de material, mecanismos frecuentemente asociados a procesos de erosión por partículas sólidas [5, 6].

Por otra parte, numerosos polímeros presentan una buena resistencia química frente a diversos medios, aunque esta depende de la naturaleza de cada polímero y del medio considerado. Dicha resistencia se asocia, en parte, a que sus átomos se encuentran enlazados en forma covalente, por lo que las sustancias deben romper uniones de alta energía para reaccionar con el material [3].

Las resinas epoxi representan una de las familias de termorrígidos más utilizadas para la fabricación de recubrimientos y materiales compuestos destinados a ambientes agresivos. Su combinación de resistencia química, adhesión, estabilidad dimensional y buenas propiedades mecánicas ha impulsado su empleo en la industria química, petroquímica y de petróleo y gas. Debido a estas características, constituyen materiales de interés para el estudio de fenómenos de erosión asociados al transporte de fluidos con partículas sólidas en suspensión [5, 6].

3.1.1. Recubrimientos poliméricos

Los recubrimientos constituyen una estrategia vital en la protección superficial de componentes en la industria, sin modificar sus propiedades mecánicas de manera significativa. En términos generales, un recubrimiento es una película o una fina capa de un material que se deposita sobre la superficie del componente para otorgarle características específicas que el material base no posee [10].

Las resinas epoxi constituyen una de las familias más importantes de polímeros termorrígidos utilizados en recubrimientos y materiales compuestos. Su estructura se origina a partir de la reacción entre oligómeros epoxídicos y agentes de curado, generando una red tridimensional de enlaces covalentes altamente entrecruzada. El grado de entrecruzamiento alcanzado durante el curado controla propiedades fundamentales, como la temperatura de transición vítrea, la rigidez, la resistencia mecánica y la reactividad química del material. Debido a esta estructura reticulada, las resinas epoxi presentan elevada adhesión a diferentes sustratos, baja contracción durante el curado, una excelente resistencia frente a ambientes corrosivos y una baja permeabilidad frente a reactivos corrosivos, razones por las cuales son ampliamente utilizadas como recubrimientos protectores en la industria química, petroquímica, y de petróleo y gas [5, 6, 11].

3.2. Erosión

La erosión es un mecanismo de degradación superficial en el cual el material es removido progresivamente debido al impacto repetido de partículas sólidas o de fluidos que se desplazan a alta velocidad. Se pueden destacar tres tipos de erosión: por partículas, por impacto del líquido y por cavitación. El daño puede presentarse como microcortes, fracturas o desprendimiento de pequeñas porciones de material, producto de la transferencia de energía desde el fluido o desde las partículas sólidas hacia la superficie, lo que, con el tiempo, genera una pérdida significativa de masa y deterioro de la superficie.

3.2.1. Erosión por partículas en flujo multifásico

En particular, este tipo de erosión se caracteriza por la remoción de material mediante el impacto repetido de partículas en flujos gaseosos o sistemas líquido-sólido (Fig. 3.3). En el primer caso, las partículas son propulsadas por el flujo de gas, que otorga una elevada energía cinética a las partículas, y éstas trazan una trayectoria de tipo balística hasta impactar contra la superficie.

Por el contrario, en el segundo caso, las partículas están suspendidas en líquidos. Las trayectorias que describen se ven afectadas por fuerzas hidrodinámicas propias del fluido, que también afectan la velocidad y la frecuencia de los impactos [12]. La presencia del líquido puede amortiguar parcialmente los impactos y modificar la distribución espacial de las partículas debido a interacciones entre ellas, generando fenómenos como sedimentación, suspensión o formación de regímenes bifásicos dentro de las tuberías [1].

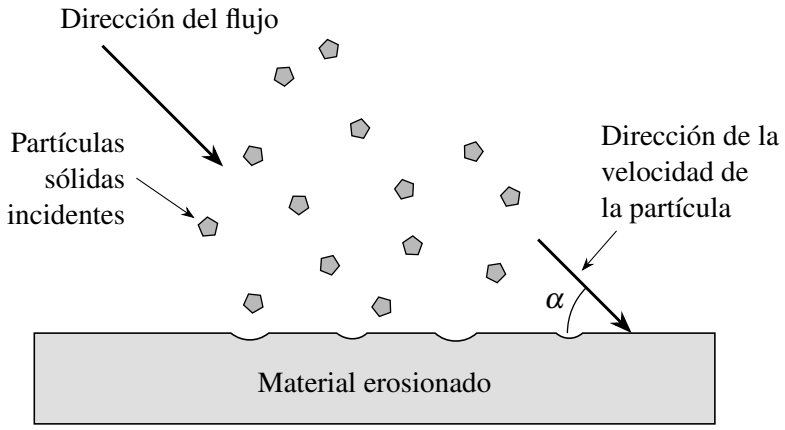


Figura 3.3. Esquema de la erosión por impacto de partículas sólidas.

Las características principales de los sistemas líquido-sólido son su viscosidad, densidad y la fracción volumétrica o másica de partículas en suspensión [4]. Además, las propiedades de las partículas, como la distribución de tamaños, dureza, peso y forma, definen en gran medida el poder erosionante del lodo [13]. Estos sistemas se pueden categorizar en flujos diluidos o densos. En el primer tipo, la concentración de partículas es baja y puede modelarse cada una en forma individual. El segundo tipo se caracteriza por una alta concentración de sólidos, donde las interacciones entre éstas comienzan a tener más relevancia.

A su vez, la severidad del daño por erosión está determinada por el tipo de material y el ángulo de incidencia de las partículas. Los parámetros que afectan el grado de erosión en el sustrato se abordarán más adelante en la Sec. 3.2.3.

3.2.2. Mecanismos de daño

Desde el punto de vista mecánico, los procesos que ocurren en la superficie cuando las partículas impactan son microcorte, microarado o *ploughing*, deformación plástica, fatiga superficial y fractura frágil. El ángulo de incidencia del flujo erosivo determina qué mecanismos predominan.

Para ángulos altos, el flujo choca de manera normal contra la superficie, lo que genera que gran parte de la energía se transfiera al material. Esto induce la nucleación y propagación de microfisuras superficiales que, eventualmente, por fatiga o fractura, pueden provocar la remoción del material.

En contrapartida, a ángulos medios y bajos de incidencia, predominan los mecanismos de corte, en conjunto con el arrastre de material [4]. El desgaste total por unidad de tiempo está dado por la Ec. 3.1.

$$W = W_D + W_C \tag{3.1}$$

donde W es la tasa de desgaste total, expresada como el volumen de material removido por unidad de tiempo, en m^3/s; W_D es la contribución a dicha tasa asociada a la deformación plástica y W_C, la asociada al corte, ambas con las mismas unidades que W. W_D puede expresarse como se muestra en la Ec. 3.2.

$$W_D = \frac{M(V\sin\alpha - K)^2}{2\varepsilon} \tag{3.2}$$

donde M es la masa de partículas que impactan sobre el material en una unidad de tiempo con velocidad V; $V\sin\alpha$ es el componente de la velocidad normal a la superficie; K es la velocidad mínima de las partículas, normal a la superficie, necesaria para la iniciación de la erosión y ε es la energía específica para la deformación en unidades de energía por unidad de volumen. El valor de ε depende del tipo de material, y K depende de las propiedades del material y su rugosidad superficial [14].

La deformación por corte W_C, que está dada por la Ec. 3.3, es causada por una combinación de las componentes de la velocidad tangencial a la superficie y la normal, que producen que la partícula penetre en el material y remueva parte de éste [14].

$$W_C = \frac{M(V\cos\alpha)^2 f}{2\varphi} \tag{3.3}$$

donde $V\cos\alpha$ es la componente tangencial de la velocidad de las partículas al momento de impactar con la superficie. φ es la energía específica para el mecanismo de corte en unidades de energía por unidad de volumen. f es un factor de ajuste en función del ángulo de impacto. Al combinar las Ecs. 3.1, 3.2, 3.3, el daño W en función del ángulo de impacto queda como se indica en la Ec. 3.4.

$$W = \frac{M}{2}\left[\frac{(V\sin\alpha - K)^2}{\varepsilon} + \frac{(V\cos\alpha)^2 f}{\varphi}\right] \tag{3.4}$$

Dado que W representa el volumen de material removido por unidad de tiempo, para expresar el desgaste como una pérdida de masa por unidad de área y de tiempo, en $\mathrm{kg}/(\mathrm{m}^2\,\mathrm{s})$, se utiliza la Ec. 3.5, que se obtiene a partir de la Ec. 3.4.

$$W = \frac{M\rho}{2A}\left[\frac{(V\sin\alpha - K)^2}{\varepsilon} + \frac{(V\cos\alpha)^2 f}{\varphi}\right] \tag{3.5}$$

donde A es el área expuesta al impacto de las partículas y ρ es la densidad del material.

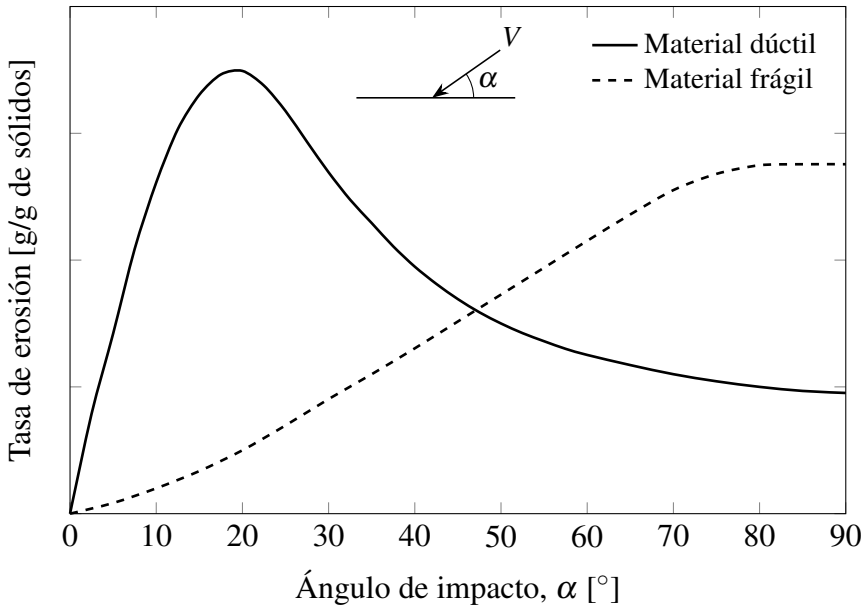


Figura 3.4. Efecto del tipo de material sobre la tasa de erosión en función del ángulo de impacto. Adaptado de [15].

Como se mencionó anteriormente, la componente del daño por deformación plástica (Ec. 3.2) tiene una mayor incidencia en los materiales del tipo frágil. En cambio, la erosión causada por corte (Ec. 3.3) predomina en materiales del tipo dúctil. Aun así, la combinación de estos dos fenómenos siempre está presente en la erosión, independientemente del material, lo que da lugar a distintas dependencias del daño en función del ángulo de impacto según la Fig. 3.4.

3.2.3. Parámetros que afectan la erosión

En la sección anterior, se abordó la dependencia de la erosión con el ángulo de incidencia de las partículas. En esta sección, se analizarán otros parámetros que tienen impacto sobre el nivel de daño por erosión.

Una de las variables que mayor incidencia tiene en la erosión es la energía cinética de las partículas incidentes. Esta energía depende linealmente de la masa y en forma cuadrática de la velocidad de las partículas que impactan. A mayor energía cinética, se incrementará la transmisión al material y por ende, la tasa de erosión [1]. En sistemas conformados por lodos, velocidades elevadas (entre 10 y $30 m/s$) pueden generar altos niveles de erosión, especialmente en presencia de partículas abrasivas, como la arena [14]. De la misma manera, se incrementará la erosión cuanto mayor sea la masa de sólido.

Por otro lado, la viscosidad del líquido tiene una gran importancia en el comportamiento de las partículas. El aumento de la viscosidad incrementa las fuerzas de arrastre sobre cada partícula, lo que tiende a alinear sus trayectorias con las líneas de corriente y reduce la probabilidad de impacto directo sobre la superficie [1]. En consecuencia, la eficiencia de colisión y la velocidad efectiva de impacto se ven disminuidas en fluidos más viscosos, actuando como un mecanismo amortiguador del proceso erosivo.

A su vez, la densidad del fluido influye en el comportamiento de las partículas a través de parámetros adimensionales, como el número de Reynolds y el de Stokes. En líquidos más densos se modifica el equilibrio entre fuerzas inerciales y viscosas, afectando la trayectoria de los sólidos y la localización de las zonas de impacto [1], lo que podría generar regiones de alta erosión alejadas del punto de impacto inicial.

En cuanto a las partículas, la fracción de sólidos en el sistema es determinante sobre la tasa de erosión, la cual aumenta con la concentración debido a un mayor número de impactos por unidad de tiempo. Sin embargo, ese efecto no es lineal, ya que en fracciones altas de sólidos las interacciones partícula-partícula comienzan a ser predominantes, lo que reduce la velocidad de impacto, un efecto conocido como *cushioning effect* [1].

La forma de los sólidos cumple un rol importante en el mecanismo de daño. Partículas con forma redondeada favorecen la deformación plástica, mientras que aquellas con bordes angulosos favorecen la deformación por corte [13].

Asimismo, uno de los parámetros más críticos es el tamaño de las partículas. Se

ha demostrado que variaciones en el tamaño pueden modificar no sólo la tasa de erosión, sino también los mecanismos dominantes de desgaste, en conjunto con su morfología [13]. Las partículas finas tienden a producir microcorte y un desgaste superficial homogéneo, mientras que sólidos más grandes generan surcos más profundos y mayores deformaciones plásticas.

La dureza y la densidad de los erodentes no pueden ser analizadas de manera aislada. El tipo de material que se está erosionando influye en gran medida, ya que en los frágiles, la dureza aumenta la capacidad de penetración y favorece mecanismos de corte y fractura. Por otra parte, si las partículas tienen una forma redondeada, el efecto de la dureza es despreciable [4]. Además, sólidos más densos poseen mayor inercia, lo que aumenta la energía de impacto para una misma velocidad.

Por último, las propiedades del material son determinantes en la respuesta observada frente a la erosión. La dureza superficial tiene una correlación inversa con la pérdida de material, particularmente en los metales [13]; materiales con mayor dureza tienden a presentar menor desgaste, debido a una menor deformación plástica y a una mayor resistencia al corte. En particular para los polímeros, no sólo la dureza influye en el desgaste que se presenta; la estructura y la capacidad de deformación también son importantes. A su vez, la respuesta depende de la viscoelasticidad y la resiliencia, e incluso pueden involucrarse mecanismos de fatiga, corte o desgarro [4].

3.3. Modelado numérico computacional

El modelado numérico constituye una herramienta fundamental para el análisis de fenómenos de transporte en sistemas complejos, que permite obtener información detallada sobre variables de difícil acceso experimental, tales como campos de velocidad, presión, trayectorias de partículas y distribución espacial del daño erosivo. La Dinámica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) se basa en la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales que describen la conservación de masa, cantidad de movimiento y energía dentro de un dominio discretizado [7].

Desde un punto de vista general, la metodología *CFD* requiere la definición de la geometría del sistema, la generación de un mallado computacional, la selección de las respectivas físicas a las que el flujo está sometido y la imposición de condiciones iniciales y de contorno. Posteriormente, las ecuaciones gobernantes son discretizadas y resueltas numéricamente para obtener la distribución espacial y temporal de las variables de interés [7].

Los fundamentos físicos del modelado de fluidos se encuentran en las leyes de conservación. Para un fluido newtoniano, el movimiento queda descrito por la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier–Stokes, las cuales representan la conservación de masa y de cantidad de movimiento respectivamente. Estas ecuaciones constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales parciales acopladas cuya resolución analítica solamente es posible en casos muy simplificados, por lo que resulta necesario recurrir a métodos numéricos para aplicaciones de ingeniería.

Entre los distintos métodos numéricos disponibles, el Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method*, FEM) es el empleado para la resolución de las ecuaciones de flujo. En este enfoque, el dominio de cálculo se discretiza en un conjunto de elementos sobre los cuales las variables se aproximan mediante funciones de forma definidas en sus nodos, y las ecuaciones de gobierno se reformulan en su forma débil o variacional, ponderando el residuo mediante funciones de prueba e integrando sobre cada elemento. Esta formulación resulta especialmente adecuada para geometrías complejas con mallas no estructuradas y para el acoplamiento entre distintas físicas sobre un mismo dominio. El resultado es un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales que se resuelve iterativamente hasta alcanzar la convergencia [7, 16].

La formulación general de las ecuaciones de transporte puede expresarse mediante la suma de términos de acumulación, convección, difusión y generación, según estos fenómenos estén presentes en el dominio. Su solución requiere la discretización espacial y temporal del dominio. En regímenes dominados por la convección, la discretización de Galerkin estándar puede volverse inestable, por lo que resulta necesario recurrir a formulaciones estabilizadas. La precisión de la solución depende fuertemente de la calidad de la malla empleada, siendo habitual realizar refinamientos locales en regiones donde existen elevados gradientes de velocidad, presión o turbulencia [16].

3.3.1. Modelo turbulento $k - \omega$

La resolución numérica de flujos turbulentos requiere la incorporación de modelos de turbulencia capaces de representar los efectos de las fluctuaciones turbulentas sobre el campo medio de velocidades. En aplicaciones de ingeniería, los modelos basados en las ecuaciones de Navier–Stokes promediadas por Reynolds (RANS, *Reynolds-Averaged Navier–Stokes*) constituyen una de las alternativas más utilizadas debido a su adecuado balance entre precisión y costo computacional. Estos modelos introducen ecuaciones de transporte adicionales para representar la energía cinética turbulenta y las escalas características de la turbulencia [16]. La conservación de cantidad de movimiento y de

masa, al considerar un régimen estacionario e incompresible, está dada por las Ecs. 3.6 y 3.7:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-P \cdot I + K] + F + \rho g \tag{3.6}$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0 \tag{3.7}$$

donde ρ es la densidad del fluido; u el campo de velocidades; $\nabla \cdot u$ es la divergencia del campo de velocidades, cuyo valor nulo expresa la conservación de masa para flujo incompresible; $u \cdot \nabla$ representa el operador convectivo (Ec. 3.8); P es la presión; I el tensor identidad; F representa fuerzas volumétricas externas; ρg corresponde al término gravitatorio, y el tensor K expresa los esfuerzos viscosos (Ec. 3.9).

$$u \cdot \nabla = u_x \frac{\partial}{\partial x} + u_y \frac{\partial}{\partial y} + u_z \frac{\partial}{\partial z} \tag{3.8}$$

$$K = (\mu + \mu_T)\left[\nabla u + (\nabla u)^T\right] \tag{3.9}$$

La ecuación 3.7 corresponde a la conservación de masa para un fluido incompresible. Esta expresión establece que la divergencia del campo de velocidades es nula, lo que implica que la masa se conserva localmente dentro del dominio de cálculo. En consecuencia, el caudal volumétrico que ingresa a un volumen diferencial es igual al que egresa, sin que exista acumulación de masa en su interior.

Entre los modelos RANS disponibles, el modelo $k-\omega$ desarrollado por Wilcox resuelve dos ecuaciones de transporte: una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para la tasa específica de disipación (ω). Esta formulación describe con elevada precisión la turbulencia en la región próxima a las paredes y representa adecuadamente el desarrollo de la capa límite bajo gradientes adversos de presión [17, 18]. Este modelo introduce dos expresiones para el transporte, una para la energía cinética turbulenta k (Ec. 3.10) y otra para la tasa específica de disipación ω (Ec. 3.11).

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_k^*)\nabla k] + P_k - \beta^* \rho \omega k \tag{3.10}$$

$$\rho(u \cdot \nabla)\omega = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_\omega)\nabla \omega] + \gamma \frac{\omega}{k} P_k - \rho \beta \omega^2 \tag{3.11}$$

donde μ es la viscosidad dinámica; μ_T es la viscosidad turbulenta (Ec. 3.12) y P_k representa la generación de energía cinética asociada a gradientes de velocidad (Ec. 3.13). Los coeficientes γ, β, β^*, σ_k^* y σ_ω son constantes adimensionales del modelo de turbulencia que no representan propiedades físicas medibles del fluido, sino parámetros empíricos ajustados para que el modelo reproduzca adecuadamente datos experimentales. [17] reporta los siguientes valores para las constantes del modelo (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Constantes empíricas del modelo de turbulencia $k-\omega$.

Constante	Valor
γ	$13/25$
β	$9/125$
β^*	$9/100$
σ_k^*	$1/2$
σ_ω	$1/2$

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega} \tag{3.12}$$

$$P_k = \mu_T \left[\nabla u : \left(\nabla u + (\nabla u)^T\right)\right] \tag{3.13}$$

3.3.2. Modelado lagrangiano de partículas

En aplicaciones relacionadas con partículas sólidas transportadas por fluidos, el problema puede abordarse mediante un esquema Euleriano–Lagrangiano, donde la fase continua, el fluido en movimiento, se resuelve utilizando *CFD* y se obtienen los campos de velocidad, presión y turbulencia del fluido. Posteriormente, a cada partícula se le realiza un seguimiento lagrangiano, calculando su trayectoria a partir de las fuerzas que actúan sobre ella durante su desplazamiento dentro del dominio. Este procedimiento permite determinar parámetros de gran relevancia, tales como vectores de velocidad con su dirección, sentido y magnitud. A su vez, otros factores relevantes para la erosión pueden obtenerse a partir del resultado de este modelo, como el ángulo de incidencia, la localización de los impactos y la frecuencia de colisión sobre las superficies de interés.

Un aspecto importante del modelado lagrangiano es la interpretación física de las partículas numéricas. En sistemas reales, la cantidad de partículas presentes puede alcanzar valores extremadamente elevados, tornando inviable la simulación individual de cada una de ellas. Por este motivo, cada partícula computacional representa un flujo de

partículas físicas con propiedades equivalentes. Desde el punto de vista matemático, cada trayectoria calculada puede asociarse a un determinado flujo de masa de partículas transportadas por el fluido. De esta forma, la masa total de sólido inyectada en el sistema se distribuye entre las partículas computacionales, permitiendo que cada una transporte una fracción representativa del caudal másico total. Esta aproximación reduce significativamente el costo computacional sin alterar la representación estadística del fenómeno de transporte y de los impactos sobre las superficies erosionadas. Según el modelo, la trayectoria de las partículas se obtiene a partir de la segunda ley de Newton (Ecs. 3.14 y 3.15).

$$m_p \frac{dv}{dt} = F_t \tag{3.14}$$

$$\frac{dx_p}{dt} = v \tag{3.15}$$

donde m_p es la masa de cada partícula; v su velocidad; x_p su posición y F_t la suma de fuerzas actuantes (Ec. 3.16).

$$F_t = F_D + F_g + F_{vm} + F_p \tag{3.16}$$

donde F_D es la fuerza de arrastre (Ec. 3.17); F_g es la fuerza gravitatoria (Ec. 3.23); F_{vm} es la fuerza asociada al fluido que debe desplazar cada partícula como masa agregada (Ec. 3.24) y F_p es la fuerza asociada al gradiente de presión (Ec. 3.26).

$$F_D = \frac{1}{2} C_\mathrm{D} \rho A |u - v| (u - v) \tag{3.17}$$

donde $u - v$ es la velocidad relativa entre el fluido y la partícula; ρ es la densidad del fluido; C_D es el coeficiente de arrastre y A es el área proyectada de la partícula. El producto $|u - v| (u - v)$ conserva el carácter vectorial de la fuerza, cuya dirección coincide con la de la velocidad relativa.

Las partículas pueden ser consideradas esferas rígidas de diámetro d_p, tomado igual al diámetro equivalente D_{eq}. Bajo esta hipótesis, el área proyectada está dada por la Ec. 3.18.

$$A = \frac{\pi d_p^2}{4} \tag{3.18}$$

Esta simplificación no reproduce la angulosidad real de los granos de arena, que, como se indicó en la Sec. 3.2.3, condiciona el mecanismo de daño; su efecto sobre la trayectoria se considera secundario frente al de la inercia de la partícula.

La expresión utilizada para calcular C_{D} depende del número de Reynolds de partícula Re_p, definido en la Ec. 3.19 a partir de la velocidad relativa y del diámetro de la partícula.

$$\mathrm{Re}_p = \frac{\rho\,|u - v|\,d_p}{\mu} \tag{3.19}$$

donde μ es la viscosidad dinámica del fluido. Para estimar C_{D} se empleó la correlación de Schiller y Naumann (Ec. 3.20), de uso extendido para partículas esféricas y aplicable, por sí sola, hasta $\mathrm{Re}_p \approx 800$ [19].

$$C_{\mathrm{D}} = \frac{24}{\mathrm{Re}_p}\left(1 + 0{,}15\,\mathrm{Re}_p^{0{,}687}\right) \tag{3.20}$$

Con las propiedades típicas del agua y un diámetro medio de partícula de $500\,\mu$m, la Ec. 3.19 conduce a $\mathrm{Re}_p \approx 400$ por cada m/s de velocidad relativa, de modo que la correlación resulta válida mientras el deslizamiento entre fases se mantenga por debajo de aproximadamente 2 m/s.

Cabe señalar que la Ec. 3.17 admite una formulación equivalente en términos del tiempo característico de respuesta de la partícula τ_p (Ecs. 3.21 y 3.22), que es la forma en que habitualmente se implementa el arrastre en los esquemas lagrangianos.

$$F_D = \frac{m_p}{\tau_p}\,(u - v) \tag{3.21}$$

$$\tau_p = \frac{4\,\rho_p\,d_p^2}{3\,\mu\,C_{\mathrm{D}}\,\mathrm{Re}_p} \tag{3.22}$$

donde m_p es la masa de la partícula y ρ_p su densidad. Al reemplazar C_{D} y Re_p en la Ec. 3.22 se recupera exactamente la Ec. 3.17. En el límite de bajos números de Reynolds, $\mathrm{Re}_p \ll 1$, la Ec. 3.20 tiende a $C_{\mathrm{D}} = 24/\mathrm{Re}_p$ y el tiempo de respuesta se reduce a $\tau_p = \rho_p d_p^2/(18\mu)$, es decir, la ley de Stokes. La correlación empleada constituye entonces una generalización de este caso límite, que incorpora los efectos inerciales propios de

los diámetros de partícula y las velocidades relativas presentes en el sistema estudiado.

$$F_g = m_p g \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \tag{3.23}$$

donde ρ es la densidad del fluido y g la aceleración gravitatoria. El factor $\frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ incorpora el efecto de flotación.

$$F_{vm} = \frac{1}{2} m_f \left[\frac{d(u-v)}{dt} \right] \tag{3.24}$$

donde m_f es la masa de fluido desplazada por la partícula (Ec. 3.25).

$$m_f = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho \tag{3.25}$$

$$F_p = m_f \frac{Du}{Dt} \tag{3.26}$$

donde Du/Dt es la derivada material del campo de velocidades del fluido (Ec. 3.27).

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \tag{3.27}$$

En esta formulación, la partícula no se considera fija al campo de velocidades del fluido, sino que su aceleración depende del balance entre las fuerzas actuantes. El término de arrastre tiende a reducir la diferencia entre la velocidad de la partícula y la velocidad local del fluido, mientras que la gravedad introduce una aceleración neta corregida por flotación. La fuerza de masa virtual representa la inercia adicional asociada a la aceleración del fluido desplazado por la partícula, y la fuerza de gradiente de presión incorpora el efecto de la aceleración local del fluido sobre la fase dispersa.

Una vez obtenidas las trayectorias de las partículas y las condiciones de impacto, es posible implementar modelos empíricos o semiempíricos de erosión para estimar la pérdida de material. Al realizar un mallado sobre la superficie en la cual las partículas impactan, se resuelven las ecuaciones correspondientes al modelo adecuado en cada uno de los elementos obtenidos durante el mallado.

4 Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal desarrollar e implementar un sistema piloto para ensayos de erosión por lodos que permita evaluar, a escala de laboratorio, el desgaste de materiales poliméricos, específicamente resina epoxi, en condiciones de servicio y validar modelos computacionales de erosión por partículas sólidas en un flujo líquido.

En particular, se busca analizar la influencia del ángulo de impacto de las partículas sobre la tasa de erosión y sentar las bases para estudiar otras variables operativas relevantes, como la velocidad del fluido, con el fin de avanzar hacia una herramienta que permita predecir el desgaste del material y contribuir al diseño y optimización de sistemas de transporte de fluidos con partículas en suspensión. Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Diseñar y construir un sistema piloto para ensayos de erosión por lodos, cuyo fin sea reproducir condiciones controladas de un flujo bifásico líquido-sólido, que permita modificar parámetros operativos relevantes.
- Caracterizar los materiales involucrados en el proceso de erosión, tanto el sustrato como las partículas abrasivas y sus propiedades, como tamaño, densidad y morfología.
- Evaluar experimentalmente la tasa de erosión mediante ensayos sistemáticos. Analizar la influencia del ángulo de incidencia de las partículas sobre la superficie.
- Implementar un modelo numérico basado en fluidodinámica computacional (CFD) que describa el comportamiento del flujo y la trayectoria de partículas suspendidas en el líquido.
- Ajustar los resultados a modelos de erosión descriptos en literatura y estimar la tasa de desgaste.
- Comparar los resultados experimentales con los resultados obtenidos mediante la simulación, validar los modelos utilizados y ajustar los parámetros correspondientes.

5 Metodología experimental

5.1. Sistema piloto para ensayos de erosión por lodos

5.1.1. Diseño

Se diseñó un sistema piloto (Fig. 5.1) compuesto por un tanque cilíndrico de 240 L y un tanque cónico de 100 L; una bomba desagotadora con un caudal de 18 000 L/h, ubicada en el primer tanque, y una bomba de recirculación de 10 000 L/h, ubicada en la descarga del segundo tanque; tubos de 1 y 2 pulgadas, codos a 90° y 45°, uniones dobles y válvulas esféricas y de tipo compuerta.

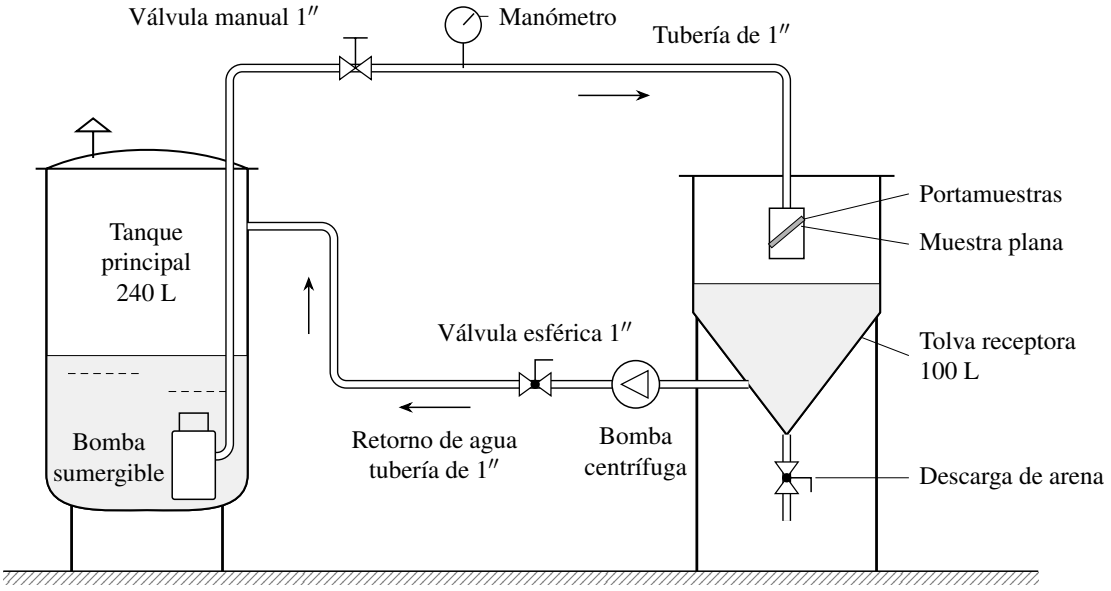


Figura 5.1. Esquema del sistema piloto para ensayos de erosión por lodos.

El tanque principal se llenó al 80 % de su capacidad con agua y 6 kg de arena de río. La bomba sumergida aspiró la suspensión de agua y arena y la impulsó a través de las tuberías hacia la zona de ensayo, donde se ubicó la pieza a erosionar, para luego descargarla en el tanque tipo tolva. En este tanque, la arena decantó y se acumuló en el fondo, mientras que el agua se bombeó nuevamente hacia el tanque principal.

El tanque tipo tolva se montó sobre una estructura elevada para facilitar su vaciado mediante la bomba de recirculación. Se optó por esta geometría porque permite recuperar y cuantificar la arena que circula por el sistema en cada ciclo. La arena acumulada se

retiró a través de una abertura en el fondo del tanque, mediante la apertura de una válvula esférica.

Para un flujo turbulento, habitualmente, se estima que $L_e/D \approx 4{,}4\,\mathrm{Re}^{1/6}$, que con $\mathrm{Re} \approx 250\,000$ da una relación $L/D \approx 35$ necesaria para que se desarrolle completamente [20]. Por ese motivo, la pieza se colocó en una abertura transversal al tubo a 1 000 mm respecto del último accesorio para el cual el cociente $L/D \approx 39$.

Mediante la bomba de recirculación se extrajo el agua libre de partículas, de modo que el tanque se vació y la arena utilizada para el desgaste quedó retenida en su interior.

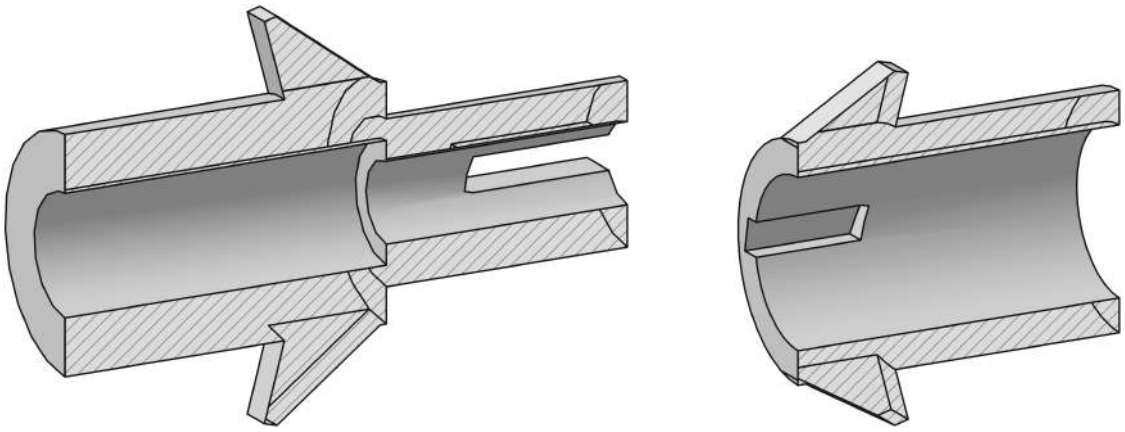
5.1.2. Portamuestras

El flujo del fluido tiene una gran importancia en el proceso de erosión, por lo que se diseñó y fabricó, por medio de manufactura aditiva, un portamuestras que garantizara el flujo de manera longitudinal con respecto al tubo.



Figura 5.2. Portamuestras a 20°, 45°, 60° y 75°.

Cada portamuestras consta de dos componentes, uno superior y otro inferior (Figs. 5.3.a. y 5.3.b.), y se fabricó uno para cada ángulo analizado (20°, 45°, 60° y 75°). La sección superior del componente superior tiene un diámetro interno levemente mayor



a. **b.**

Figura 5.3. Componentes superior **(a)** e inferior **(b)** del portamuestras a 60°, en corte por el plano medio.

que el diámetro externo del tubo, de modo que pueda ensamblarse con las cañerías del sistema. Su sección inferior, en cambio, tiene un diámetro interno igual al del tubo, lo que asegura la continuidad del flujo y, a su vez, funciona como tope al insertar el tubo. El espesor de la sección superior se definió de modo de asegurar la resistencia estructural de la pieza, mientras que el de la sección inferior permite que el componente inferior se encastre sobre ella hasta hacer tope con la sección superior.

El componente inferior consta de una única sección, cuyo diámetro interno es levemente mayor que el diámetro externo de la sección inferior del componente superior, de modo que ambas piezas encastran una dentro de la otra. Su diámetro externo es igual al de la sección superior del otro componente.

Ambos componentes cuentan, en su sección de mayor diámetro, con solapas que permiten mantenerlos unidos mediante precintos.

Por último, ambas piezas se diseñaron con ranuras que permiten colocar la muestra con la inclinación deseada en el componente inferior y fijarla en esa orientación al desplazar este componente hacia arriba. Para lograr un sellado completo, se recubrió la cara superior del componente inferior con formajuntas, de modo que, al ensamblar y ajustar ambas piezas, la presión generara un sello similar al de un *o-ring* y se evitara el flujo paralelo al cupón. Este producto también se aplicó en el alojamiento de la muestra con el mismo fin.

5.2. Medición de diámetro de partículas

Dado que el tamaño de partícula influye sobre el daño por desgaste, tal como se mencionó en la Sec. 3.2.3, este se determinó mediante análisis de imágenes. Para ello, se esparció arena sobre una superficie oscura, de forma tal que las partículas no se superpusieran y pudiera obtenerse correctamente su diámetro equivalente.

Se tomaron fotografías y se cargaron en el *software* de análisis de imágenes *ImageJ*. El análisis consistió, inicialmente, en establecer una escala para convertir las dimensiones medidas en píxeles a unidades de longitud. Luego, se seleccionó la región a analizar, se eligió el rango en la escala de grises que correspondía a las partículas y, por último, se ejecutó el conteo.

5.3. Erosión del cupón

Se cortaron cuatro cupones de dimensiones 60 mm x 10 mm, que se colocaron en cada portamuestras y se numeraron cada uno con el ángulo correspondiente. Para cada ensayo, se pasó arena y agua por el circuito de tuberías hasta el llenado completo del tanque tipo tolva. Se vació el tanque y se removió la arena depositada en la zona inferior, la cual se pesó. Posteriormente, se volcó la arena extraída nuevamente en el tanque inicial y se repitió el ciclo. Después de una serie de ciclos, se retiraron las probetas, se secaron en un horno para eliminar la humedad que pudiera alterar la medición y se pesaron.

5.3.1. Perfilometría

La caracterización topográfica de las superficies erosionadas se realizó mediante perfilometría de contacto. Esta técnica consiste en el desplazamiento de una punta de diamante de radio conocido sobre la superficie de la muestra, registrando las variaciones verticales del relieve en función de la posición recorrida. A partir de este barrido lineal, se obtuvo un perfil bidimensional de la topografía superficial, permitiendo cuantificar parámetros tales como la profundidad de desgaste, el ancho de la zona erosionada y cambios en la rugosidad superficial. A su vez, los tres perfiles correspondientes a cada cupón se interpolaron para obtener una superficie en tres dimensiones para calcular el volumen de material erosionado.

5.4. Modelado computacional

Se desarrolló un modelo computacional del proceso de erosión en un software de cálculo de elementos finitos. La simulación se planteó como una herramienta para estimar el daño erosivo sobre la superficie del cupón mediante el análisis del campo de velocidades del fluido, las trayectorias de las partículas sólidas, sus velocidades y sus ángulos de impacto.

En términos generales, un modelo CFD requiere definir una geometría, generar una malla, asignar materiales a las geometrías, establecer condiciones de borde y resolver las ecuaciones correspondientes al fenómeno físico considerado [7]. El modelo se implementó acoplando un módulo de dinámica de fluidos computacional y uno de seguimiento de partículas, de modo de resolver en primer lugar el flujo y posteriormente el movimiento de las partículas sólidas.

La geometría consistió en una sección recta de tubería de diámetro interno igual a 1", representada mediante un cilindro de radio $R = 12{,}7\,\text{mm}$ y longitud $L = 60\,\text{mm}$. En el interior del dominio se ubicó un cupón plano de resina epoxi, con dimensiones $10\,\text{mm} \times 40\,\text{mm} \times 2{,}54\,\text{mm}$, orientado en los cuatro ángulos analizados. Esta diferencia en la dimensión del largo de los cupones, se debe a que no hay necesidad de modelar un cupón de 60 mm debido a que los extremos no son afectados por el flujo, sino que el fin de los extremos es mantener el cupón firme dentro del portamuestras. La porción del cupón expuesta al flujo es aproximadamente de $10\,\text{mm} \times 25{,}4\,\text{mm}$, siendo estos 25,4 mm el diámetro interno de la tubería. En la Figura 5.4 se muestra, a modo de ejemplo, la geometría utilizada para el caso de impacto a 75°. Se observa la sección de tubería y el cupón polimérico inclinado en el interior del dominio fluido.

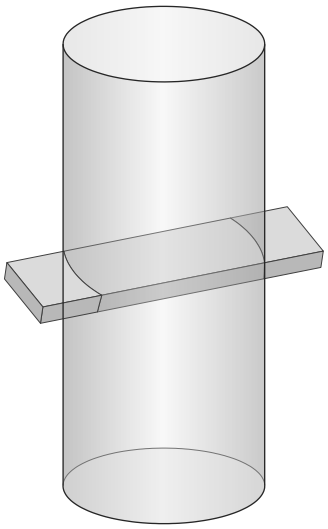


Figura 5.4. Geometría computacional utilizada para el modelo de erosión, correspondiente al cupón inclinado a 75°.

Los parámetros geométricos, físicos y de operación, independientes del ángulo, cargados en el modelo se resumen en la Tabla 5.1. Aquellos que variaban para cada ángulo se detallan en la Tabla 5.2. La densidad del material del cupón se utilizó posteriormente para relacionar la pérdida de masa con el desgaste generado sobre la superficie erosionada.

Tabla 5.1. Parámetros principales utilizados en el modelo computacional.

Parámetro	**Valor**	**Descripción**
L	0,06 m	Longitud del dominio cilíndrico
R	0,0127 m	Radio interno de la tubería
w	0,01 m	Ancho del cupón
d	0,04 m	Largo del cupón
t	0,00254 m	Espesor del cupón
$\bar{U}$	10 m/s	Velocidad media del fluido en la entrada
ρ_m	1 673 kg/m^3	Densidad del material del cupón

Tabla 5.2. Parámetros empleados en el modelo dependientes del ángulo. Los valores de $\dot{m}_p$ corresponden a $N = 20\,000$ partículas.

Ángulo [°]	$\dot{m}_{\text{total}}$ [kg/s]	$\dot{m}_p$ [kg/s]
20	$6{,}3595 \times 10^{-2}$	$3{,}1798 \times 10^{-6}$
45	$6{,}6800 \times 10^{-2}$	$3{,}3400 \times 10^{-6}$
60	$6{,}7200 \times 10^{-2}$	$3{,}3600 \times 10^{-6}$
75	$6{,}6620 \times 10^{-2}$	$3{,}3310 \times 10^{-6}$

El dominio *fluido* se asignó como agua líquida, mientras que el cupón fue definido como una resina epoxi. La arena fue incorporada en el modelo de partículas como fase discreta. Este enfoque resulta adecuado para representar el movimiento de partículas sólidas suspendidas en un fluido cuando se busca obtener información localizada de velocidades, trayectorias e impactos. En sistemas de erosión por lodos, la velocidad y la dirección de impacto de las partículas no necesariamente coinciden con la velocidad local del fluido, por lo que resulta necesario resolver explícitamente la trayectoria de la fase sólida [21]. Además, la erosión en sistemas bifásicos líquido-sólido depende de variables acopladas, tales como la velocidad del fluido, el tamaño y la forma de las partículas, su concentración, ángulo de impacto y propiedades del material erosionado [1], tal como se describió en la Sec. 3.2.3.

El flujo de agua se resolvió inicialmente en estado estacionario mediante un modelo de turbulencia $k-\omega$. Se seleccionó un modelo turbulento de tipo RANS con viscosidad turbulenta efectiva, considerando flujo incompresible y gravedad activada. Esta formulación permite representar el efecto promedio de las fluctuaciones turbulentas sobre el campo medio de velocidades, sin resolver directamente todas las escalas temporales y espaciales de la turbulencia. Este método de cálculo permite reducir significativamente el requerimiento computacional del problema, sin sobre simplificar el sistema [16].

Como condición de entrada se impuso un flujo desarrollado con velocidad media de 10 m/s. Esta condición resuelve sobre la propia frontera de entrada el problema de flujo desarrollado para una sección de igual geometría y acopla su solución al dominio, de modo que tanto el perfil de velocidades como las variables de turbulencia ingresan de forma consistente con un tramo recto de longitud suficiente. Por este motivo no fue necesario prescribir la intensidad turbulenta ni la escala de longitud turbulenta. Las paredes del dominio, incluyendo la superficie del cupón, se definieron como paredes sólidas para el flujo.

Una vez obtenido el campo estacionario de velocidades del fluido, éste se utilizó como dato de entrada para la simulación transitoria del seguimiento de partículas. En esta etapa, las partículas se trataron en un marco lagrangiano, resolviendo su posición y velocidad en función del tiempo. Éstas fueron liberadas desde la entrada del dominio con una distribución inicial aleatoria sobre la sección de ingreso y con una velocidad inicial dada por el campo de velocidades del fluido previamente calculado.

El flujo másico total de arena, $\dot{m}_{\text{total}}$ (Tabla 5.2), se equiparó con el valor macroscópico registrado experimentalmente, obtenido como el cociente entre la masa total de arena recolectada en el tanque tipo tolva durante el ensayo de cada cupón (Fig. 6.4.a.) y el tiempo de ensayo, $t_{\text{ensayo}} = 2\,300\,\text{s}$. De este modo, se obtuvieron flujos másicos de entre 3,8 y 4,0 kg/min, que difieren levemente entre ángulos debido a la distinta cantidad de arena recolectada en cada ensayo. Este flujo másico se distribuyó en partes iguales entre las partículas computacionales, de modo que cada una representa un flujo másico $\dot{m}_p = \dot{m}_{\text{total}}/N$, siendo N el número de partículas liberadas. Para analizar la dependencia del modelo con la cantidad de partículas liberadas, se realizaron distintas corridas con distinto número de partículas, manteniendo constante $\dot{m}_{\text{total}}$. En la Tabla 5.3 se detalla, para cada ángulo, el flujo másico que representaba cada partícula computacional.

Tabla 5.3. Flujo másico representado por cada partícula computacional, $\dot{m}_p$, para distintas cantidades de partículas y ángulos.

Cantidad de partículas	Flujo másico [mg/s]			
	20°	45°	60°	75°
20.000	3,18	3,34	3,36	3,33
100.000	0,63	0,67	0,67	0,67
200.000	0,32	0,33	0,34	0,34
400.000	0,16	0,17	0,17	0,17

La ecuación de movimiento de cada partícula se resolvió considerando el arrastre hidrodinámico y la gravedad, como fuerzas principales. En el modelo implementado, la fuerza de arrastre se calculó empleando la correlación de Schiller-Naumann y el campo de velocidades obtenido en la simulación CFD. También se incluyeron correcciones de pared, así como los términos de masa virtual y gradiente de presión. Este tipo de formulación permite describir la desviación de las partículas respecto de las líneas de corriente, fenómeno especialmente relevante en lodos, donde la inercia de las partículas y el arrastre viscoso controlan la probabilidad y localización de los impactos sobre la superficie [1].

Para cuantificar las condiciones de impacto sobre el cupón, se definieron variables auxiliares asociadas a la velocidad de partícula. La magnitud de la velocidad de impacto se calculó según la Ec. 5.1.

$$v_p = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \tag{5.1}$$

donde v_x, v_y y v_z son las componentes de la velocidad en x, y y z, respectivamente, mientras que la componente normal a la superficie se obtuvo mediante la Ec. 5.2.

$$v_n = \left| v_p \cdot n \right| \tag{5.2}$$

donde v_p es el vector velocidad de la partícula y n es el vector normal local a la superficie del cupón. A partir de estas magnitudes, el ángulo de impacto se definió en la Ec. 5.3.

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{v_n}{v_p}\right) \tag{5.3}$$

Esta definición permite obtener un ángulo local para cada evento de impacto, considerando la orientación real de la superficie y la dirección instantánea de la partícula. La determinación del ángulo de impacto es fundamental, ya que la respuesta erosiva del material depende fuertemente de la orientación del impacto. En materiales con comportamiento dúctil, el máximo desgaste suele producirse a ángulos oblicuos, donde domina la componente tangencial asociada al corte o arado; en cambio, en materiales frágiles, el daño máximo tiende a desplazarse hacia impactos cercanos a la normal [4, 15].

El desgaste erosivo sobre la superficie del cupón se calculó mediante una expresión (Ec. 5.4) basada en la separación entre contribuciones por deformación y por corte, propuesta por *Bitter* y adaptada por Clark y Wong [14, 22, 23]. En el modelo implementado, la tasa local de pérdida de masa por cada elemento se calculó mediante la Ec. 5.4.

$$\dot{m}_e = \frac{\dot{m}_p \rho_m}{2A_e}\left[\frac{(v_p \sin\alpha - K)^2}{\varepsilon} + \frac{(v_p \cos\alpha)^2 \sin(2\alpha)}{\varphi}\right] \tag{5.4}$$

donde $\dot{m}_e$ es la tasa de masa erosionada por unidad de área en $[\mathrm{kg}/(\mathrm{m}^2\,\mathrm{s})]$; $\dot{m}_p$ es el flujo másico de partículas; ρ_m es la densidad del material del cupón; A_e es el área de cada elemento de la superficie; v_p es la velocidad de impacto (Ec. 5.1); α es el ángulo de impacto (Ec. 5.3); K es una velocidad umbral propuesta en $0\,\mathrm{m/s}$; $\sin(2\alpha)$ es un

factor de ajuste asociado al corte desarrollado por Neilson y Gilchrist [24] empleado por Clark y Wong para el ajuste de datos en materiales poliméricos [14]; ε y φ son parámetros empíricos asociados a la energía específica requerida para producir desgaste por deformación y por corte, respectivamente. Estos parámetros fueron ajustados utilizando un enfoque iterativo, donde se simuló inicialmente el fenómeno en los 4 ángulos con valores semillas. Una vez obtenidos los resultados de masa perdida, se compararon con aquellos obtenidos por la técnica de perfilometría, y se modificaron ε y φ hasta obtener valores tales que al volver a simular el fenómeno y se obtuviera el menor error para los 4 ángulos.

Por último, la pérdida de masa acumulada para el tiempo de ensayo se calculó mediante la Ec. 5.5 utilizando $t_{\text{ensayo}} = 2\,300\,\text{s}$.

$$\Delta m_T = \dot{m}_T \, t_{\text{ensayo}} \tag{5.5}$$

donde $\dot{m}_T$ es la integral de $\dot{m}_e$ sobre la superficie del cupón en $[\text{kg}/\text{s}]$.

6 Resultados

6.1. Caracterización de partículas

La caracterización de las partículas suspendidas en el flujo erosivo se realizó mediante el procesamiento digital de imágenes en la aplicación *ImageJ*. A partir de las fotografías capturadas de las partículas, esparcidas sobre una superficie oscura junto con una referencia (Fig. 6.1), se aplicó un procedimiento de segmentación basado en la detección de píxeles de la imagen más brillantes, correspondientes a las partículas, que a los del fondo, más opacos.

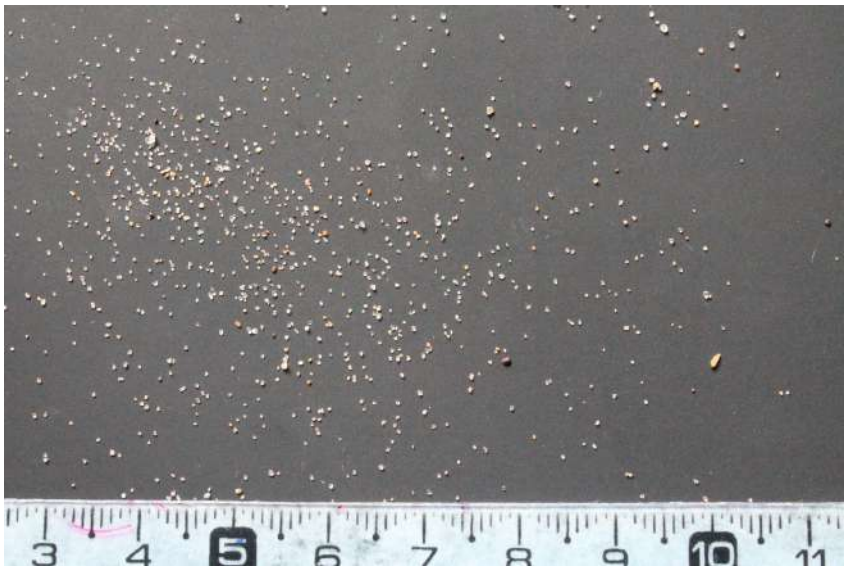


Figura 6.1. Fotografía sin analizar de la arena

El procesamiento consistió en las siguientes etapas: (i) conversión a escala de grises (Fig. 6.2.a.), (ii) ajuste del umbral mediante un histograma de intensidades (Fig. 6.2.b.), (iii) binarización de la imagen (Fig. 6.2.c.) y (iv) análisis de partículas mediante la herramienta *Particle Analyzer* (Fig. 6.2.d.), obteniéndose parámetros geométricos de cada partícula, tales como el área proyectada. Previamente, se estableció una referencia entre los píxeles de la imagen y la unidad de medida dada por la escala incluida en las fotografías.

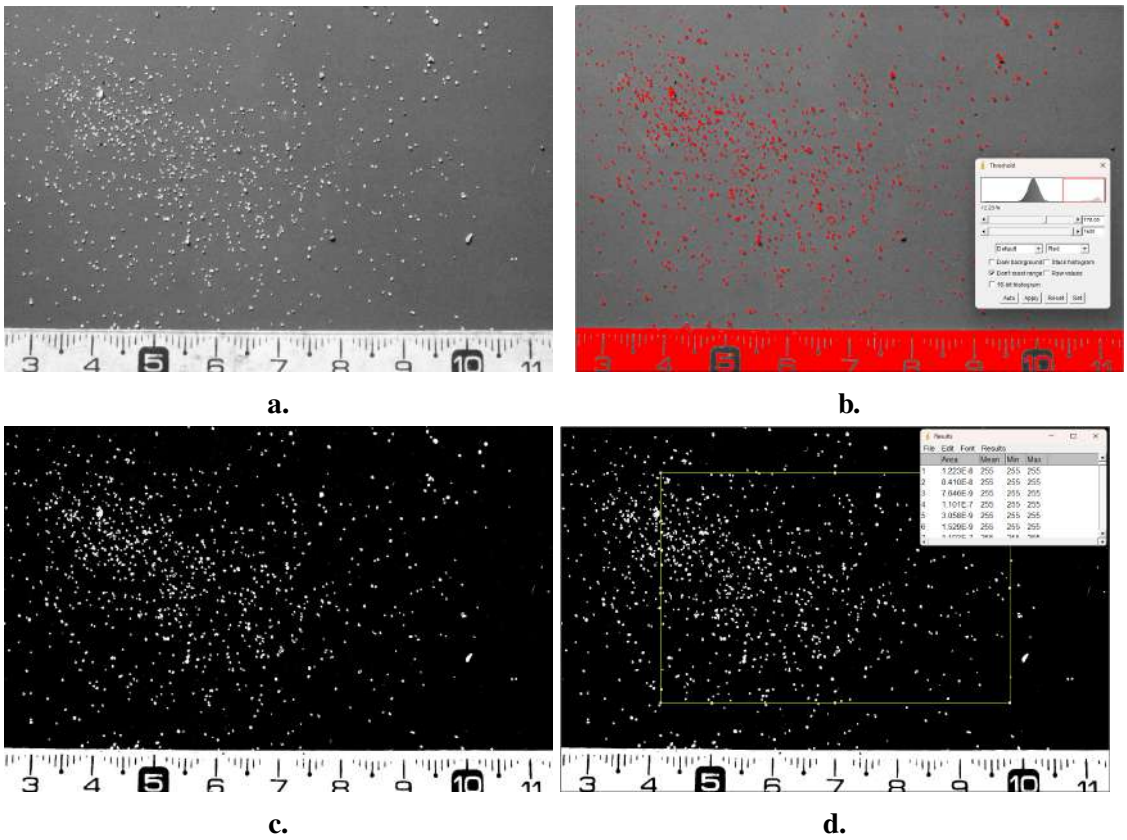


Figura 6.2. Procesamiento de imágenes.

El diámetro equivalente D_{eq} se definió como el diámetro de una circunferencia con la misma área que la de la partícula, según la Ec. 6.1.

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{6.1}$$

donde A es el área proyectada medida de la partícula.

6.2. Distribución de tamaño de partículas

A partir del análisis de las fotografías, se obtuvo una distribución de diámetros equivalentes correspondiente a aproximadamente 10^4 partículas, ajustando los datos a una distribución log-normal (Fig. 6.3). Numerosos estudios han demostrado que los tamaños de partículas generadas por procesos de fragmentación (como arenas naturales o abrasivos) siguen este tipo de distribución debido a la naturaleza multiplicativa de los mecanismos de fractura [4, 25].

La función de densidad de probabilidad log-normal está dada por la Ec. 6.2

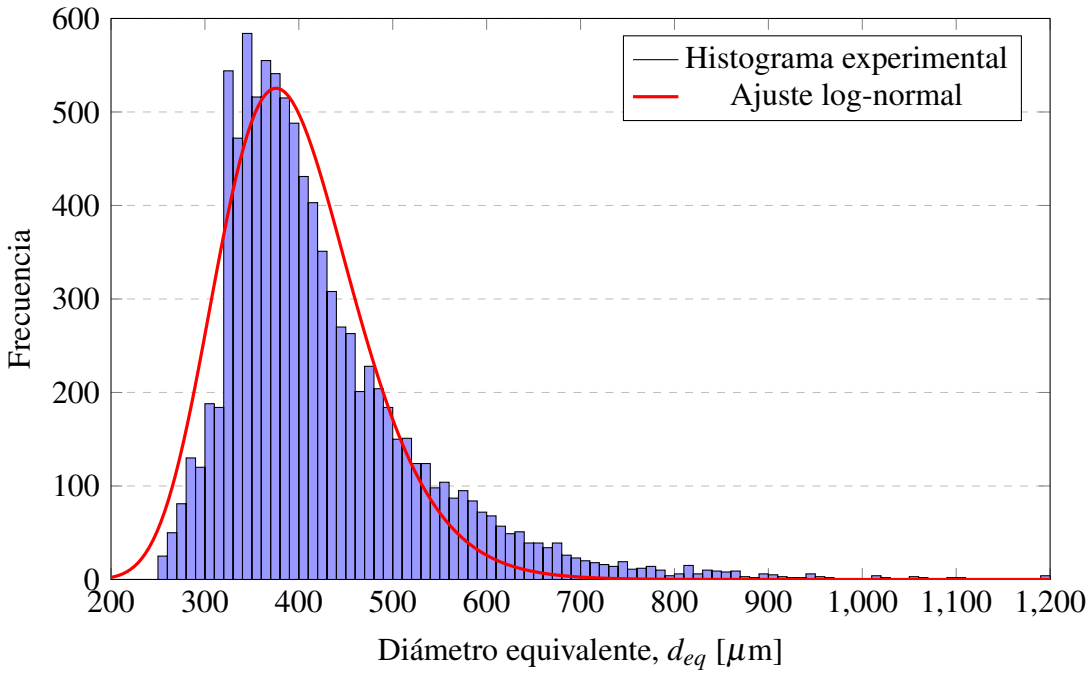


Figura 6.3. Distribución de frecuencias de diámetros equivalentes de partículas y ajuste mediante distribución log-normal.

$$f(d) = \frac{1}{d\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln d - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{6.2}$$

donde μ es la media logarítmica; σ es la desviación estándar logarítmica; d es el diámetro equivalente y $f(d)$ es la frecuencia a cierto d.

A partir del análisis realizado sobre las áreas y convirtiendo los valores adimensionales de μ y σ obtenidos ajustando los datos según la Ec. 6.2, se obtuvo un diámetro medio de partícula de 425 μm y una desviación estándar de 111 μm para la muestra.

6.3. Pérdida de masa

Para medir el daño erosivo causado por las partículas de arena, se registró la pérdida de masa de los cupones en función de la masa de partículas abrasivas que impactaron sobre la superficie. En la Figura 6.4.a., se observa que la tasa de erosión es similar para todos los ángulos. Resinas epoxi altamente entrecruzadas suelen exhibir un comportamiento frágil, con máximos de erosión a ángulos cercanos a la normal, mientras que a grados medios de entrecruzamiento, se puede observar una tendencia hacia un comportamiento semi-dúctil, con picos en ángulos medios [26].

Se calculó la tasa de erosión, dada por la Ec. 6.3, con unidades de mg/kg. En la Figura 6.4.b., se graficaron los puntos para cada ángulo, los cuales describen un tipo de erosión semi-dúctil. Esta desviación del comportamiento esperado según bibliografía, que indica una pérdida de masa mayor a ángulos altos que a ángulos bajos, se puede deber a que la pérdida de masa en los cupones no distingue en qué cara se está erosionando.

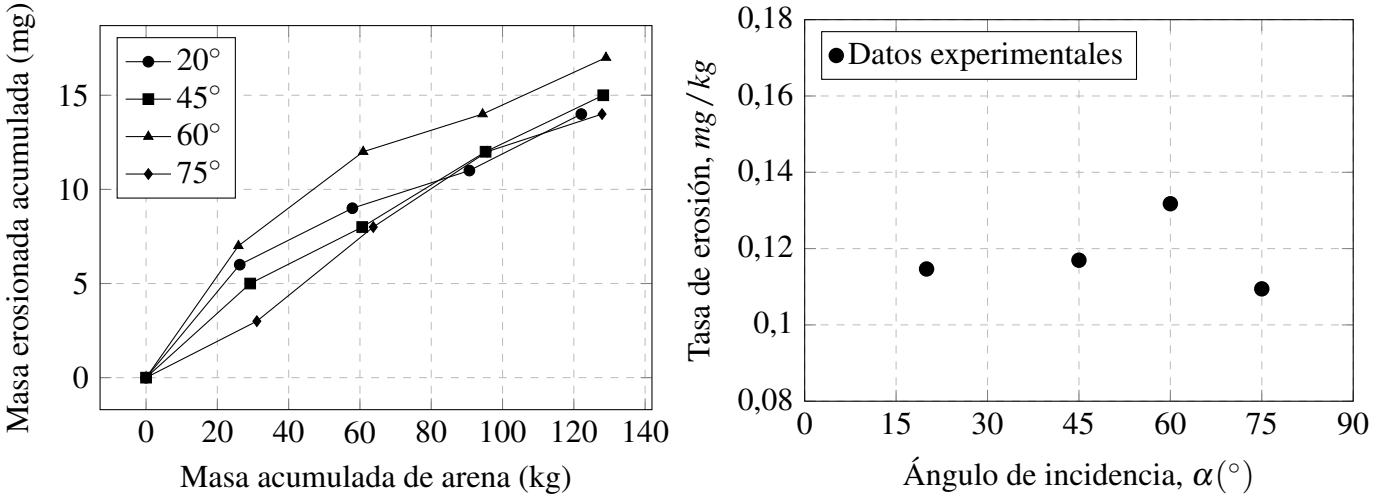


Figura 6.4. Resultados experimentales de erosión: (a) pérdida de masa acumulada en función de la masa de arena, (b) tasa de erosión en función del ángulo de incidencia.

$$E = \frac{M_{perdida}}{M_{erosionante}} \tag{6.3}$$

La razón principal por la cual no se puede apreciar una diferencia en las tasas de erosión es la influencia del efecto del canto de los cupones ensayados sobre la erosión. Al realizar el corte para darle la forma rectangular, se genera una gran cantidad de fisuras que favorecen el proceso de erosión. A su vez, la disposición de los cupones también afecta el grado de daño que se observará. Mientras que la cara a erosionar se encuentra en el ángulo deseado, el canto se ubica a 90° de esta, lo que, para ángulos bajos, genera que el canto se ubique en un ángulo preferencial para el proceso de erosión.

En la Figura 6.5 se puede ver que las áreas proyectadas para la cara a 20° y la complementaria a 70° de la dirección del flujo son similares, lo que puede generar que las cantidades de arena que impactan sobre cada una de las caras sean aproximadamente iguales, acentuando este efecto del canto que, si los cupones fueran de menor espesor, sería despreciable.

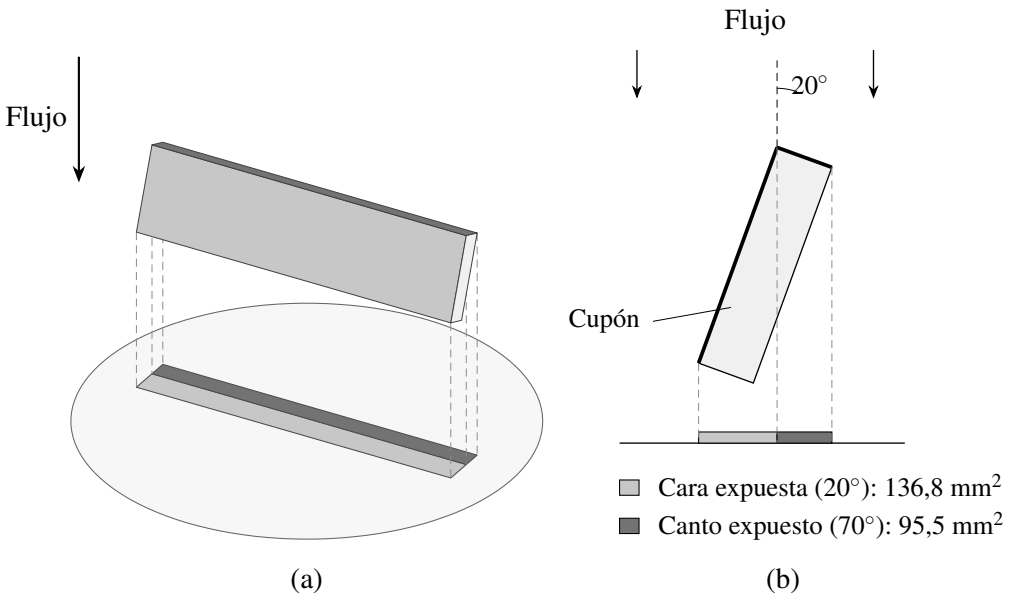


Figura 6.5. Proyección de las áreas transversales del cupón inclinado a 20° sobre un plano normal al flujo: (a) vista tridimensional y (b) sección transversal.

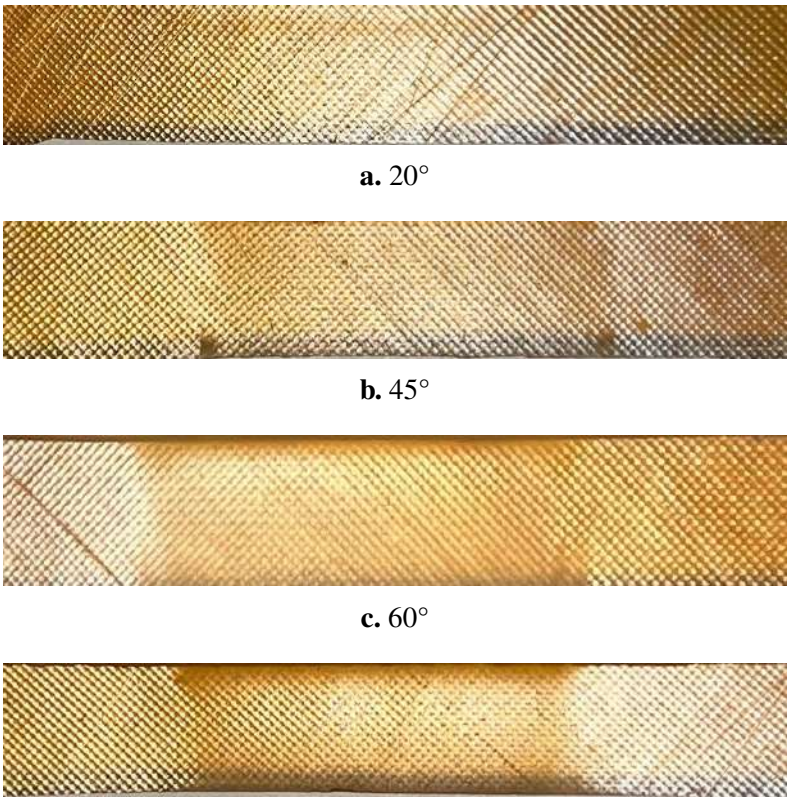
6.4. Análisis óptico

6.4.1. Inspección visual

Si bien la pérdida de masa constituye una medida cuantitativa directa del fenómeno, este parámetro no permite distinguir los mecanismos responsables del desgaste ni la forma en que este se distribuye sobre la superficie del material. En este sentido, la observación tanto macroscópica como microscópica resulta fundamental para complementar el análisis, permitiendo evaluar cualitativamente la morfología del daño, su localización y su evolución en función de las condiciones de ensayo.

La caracterización visual de la superficie posibilita detectar patrones de desgaste no uniformes, como zonas preferenciales de erosión o regiones con menor afectación, que pueden estar vinculadas a fenómenos hidrodinámicos del flujo, tales como aceleraciones locales o zonas de estancamiento. Este tipo de información no puede obtenerse únicamente a partir de mediciones globales y resulta clave para una correcta interpretación del comportamiento erosivo del material.

La superficie del cupón correspondiente a 20°, Fig. 6.6.a., conserva su textura original, siendo claramente distinguible el patrón geométrico en toda la extensión, incluyendo la zona central. El daño superficial es limitado y homogéneo, sin evidencias de localización preferencial. Este comportamiento es consistente con mecanismos dominados por



a. 20°

b. 45°

c. 60°

d. 75°

Figura 6.6. Evolución del daño superficial en función del ángulo de impacto.

microcorte a bajo ángulo, donde la componente tangencial del impacto predomina, pero con baja penetración efectiva.

En el caso de 45°, Fig. 6.6.b., si bien comienza a observarse un leve cambio en la refracción de la luz en el cupón, la región central aún no presenta modificaciones significativas respecto al estado inicial. El patrón del material sigue siendo identificable, indicando que el desgaste no se concentra en esa zona. Sin embargo, se evidencia una ligera intensificación del daño hacia los bordes, lo cual sugiere una redistribución del flujo de partículas.

Para 60°, Fig. 6.6.c., el comportamiento cambia de manera más marcada. Se observa un desgaste que se acentuó en la zona superior e inferior de la cara expuesta al flujo de partículas, mientras que en la región central comienza a perderse la nitidez del patrón original. Esto indica un incremento en la energía de impacto efectiva y una mayor participación de mecanismos de deformación plástica y remoción de material. La dificultad para distinguir el patrón en la zona central sugiere que las partículas están generando microfisuras que desprenden material, haciendo que la luz no tenga caras planas donde reflejarse y aumentando así la opacidad del cupón.

Finalmente, a 75°, Fig. 6.6.d., el fenómeno se intensifica. El desgaste en los bordes es claramente dominante, con una pérdida significativa de material en dichas regiones, mientras que la zona central también presenta un deterioro evidente, dificultando aún más la identificación del patrón. Esta distribución del daño puede asociarse a una aceleración local del flujo en las regiones periféricas, generando mayores velocidades de impacto y, por ende, mayores tasas de erosión en los bordes.

Este comportamiento es coherente con lo reportado en la literatura sobre erosión por lodos, donde la hidrodinámica del flujo puede generar zonas de estancamiento en la región central y regiones de mayor velocidad hacia los bordes, produciendo patrones de desgaste no uniformes [1]. En particular, la existencia de zonas centrales menos erosionadas a bajos ángulos y la migración del daño hacia regiones periféricas a mayores ángulos se relaciona con la trayectoria de las partículas y la distribución de velocidades en el flujo.

6.4.2. Microscopía óptica

Particularmente, en procesos de erosión por lodos, la interacción entre partículas sólidas y la superficie del material da lugar a una variedad de mecanismos, como deformación plástica, microcorte, incrustación de partículas y microfisuras, previamente enunciados en la Sec. 3.2.2, cuya identificación requiere el análisis de la topografía. Esta técnica permite observar qué tipo de mecanismo está presente según los parámetros a analizar, como el ángulo de impacto y la velocidad de flujo, entre otros.

A medida que se aumenta el ángulo de impacto de las partículas, se observa que las imágenes, con bajo aumento, incrementan en opacidad. Esto se debe a que el fenómeno erosivo produce un daño tal que la superficie pierde material y modifica la topografía de tal manera que, cuando los rayos de luz chocan contra esta, en vez de reflejarse de manera uniforme y volver al ojo del observador, como sucede en gran medida en las imágenes correspondientes a 20° (Fig. 6.7), se dispersan y llegan menos haces de luz al observador [27].

En términos generales, se observó que los cupones ensayados a bajos ángulos conservaron parcialmente el patrón superficial original asociado al proceso de fabricación mediante bolsa de vacío, mientras que a mayores ángulos, dicho patrón comenzó a borrarse debido al incremento del daño superficial.

Asimismo, se identificó una transición en la morfología del desgaste. Para bajos

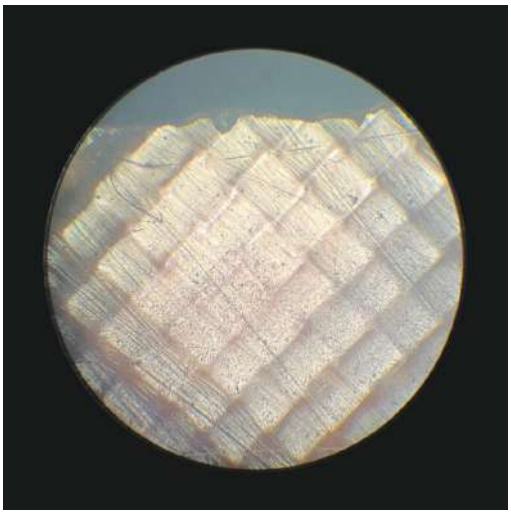
ángulos de impacto, predominaron marcas longitudinales y surcos orientados en la dirección del flujo, mientras que para ángulos elevados, el daño presentó una morfología más homogénea y con cavidades de aspecto aproximadamente circular o semicircular. Este comportamiento resulta consistente con los mecanismos de erosión descritos para diferentes ángulos de impacto de partículas sólidas.

6.4.2.1. Cupón ensayado a 20°

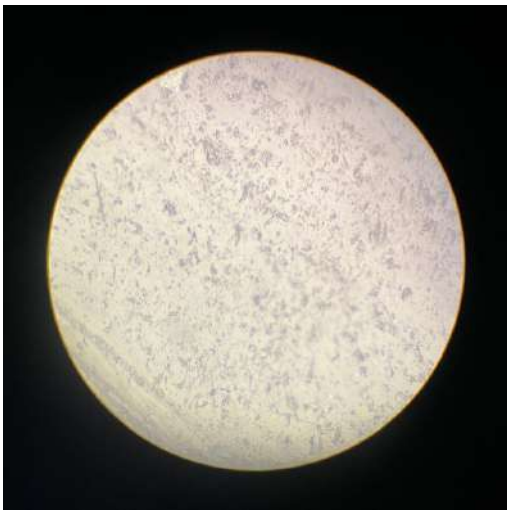
Las micrografías correspondientes al cupón ensayado a 20° (Figuras 6.7.a., 6.7.c. y 6.7.e.) evidencian el menor grado de alteración superficial entre las condiciones evaluadas. En términos generales, la superficie conserva una proporción significativa de su morfología original, mientras que las zonas afectadas se presentaron de manera localizada y con una remoción de material comparativamente reducida.

En las imágenes obtenidas con mayor aumento (Figuras 6.7.b., 6.7.d. y 6.7.f.) se distinguen diferencias morfológicas entre las distintas regiones del cupón. En la zona superior se observan discontinuidades de contorno predominantemente redondeado, compatibles con improntas generadas por impactos con una componente normal relativamente mayor y, en consecuencia, con una mayor contribución de deformación localizada. Por el contrario, en la zona inferior predominan marcas alargadas y direccionales, cuya morfología resulta compatible con mecanismos de corte o microarado producidos por impactos más rasantes.

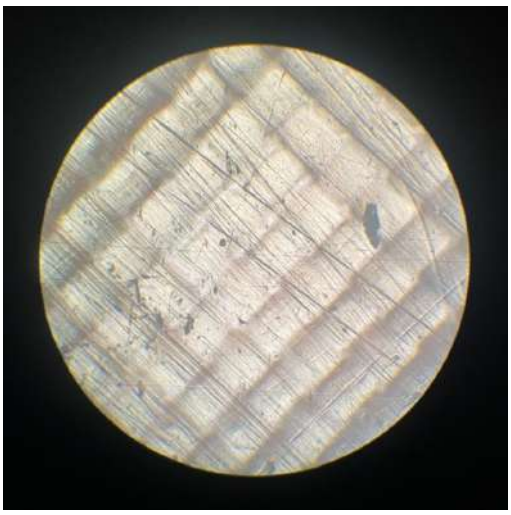
Por lo tanto, aun cuando el deterioro global es limitado, las micrografías permiten reconocer una transición espacial entre una morfología de daño más redondeada en la región superior y huellas de carácter más longitudinal en la región inferior.



a. Superior, menor aumento



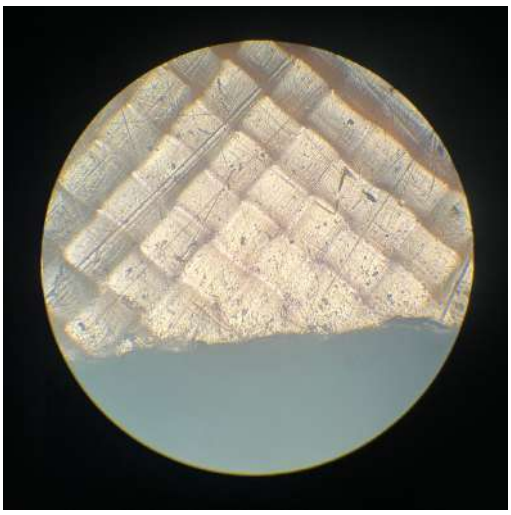
b. Superior, mayor aumento



c. Medio, menor aumento



d. Medio, mayor aumento



e. Inferior, menor aumento



f. Inferior, mayor aumento

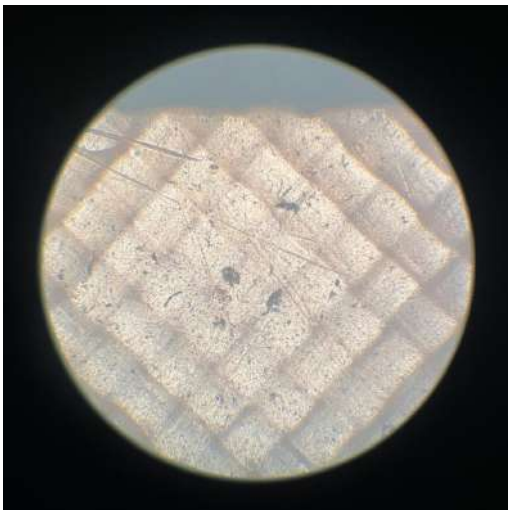
Figura 6.7. Micrografías ópticas del cupón erosionado a 20°.

6.4.2.2. Cupón ensayado a 45°

Las micrografías correspondientes al ensayo a 45° (Figuras 6.8.a., 6.8.c. y 6.8.e.) muestran un incremento del deterioro superficial respecto del registrado para el cupón ensayado a 20°. Si bien el patrón original de fabricación continúa siendo visible en determinadas regiones, su definición disminuye y la alteración de la superficie adquiere una distribución más extendida.

Las imágenes de mayor aumento (Figuras 6.8.b., 6.8.d. y 6.8.f.) evidencian una mayor densidad de irregularidades y una pérdida progresiva de continuidad de la textura inicial. En la zona superior se identifican regiones de daño con contornos aproximadamente circulares o redondeados, compatibles con impactos de mayor componente normal y con una participación más significativa de la deformación localizada. En cambio, hacia la zona inferior se reconocen huellas de mayor relación de aspecto y orientación preferencial, asociables a mecanismos de microcorte o microarado.

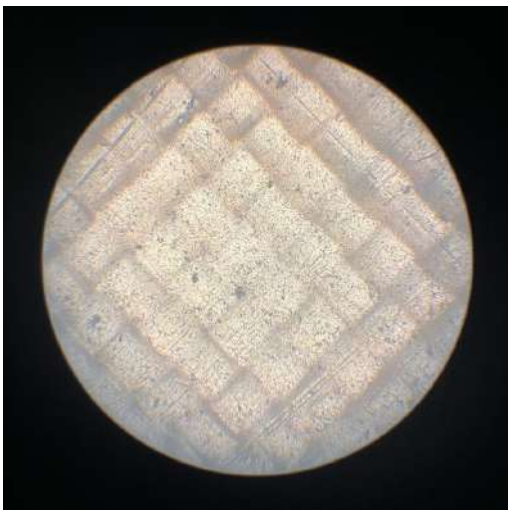
En comparación con la condición de 20°, el daño presenta una mayor intensidad y extensión. No obstante, se mantiene la diferenciación morfológica entre la región superior, caracterizada por improntas más redondeadas, y la región inferior, en la que predominan marcas alargadas y direccionales.



a. Superior, menor aumento



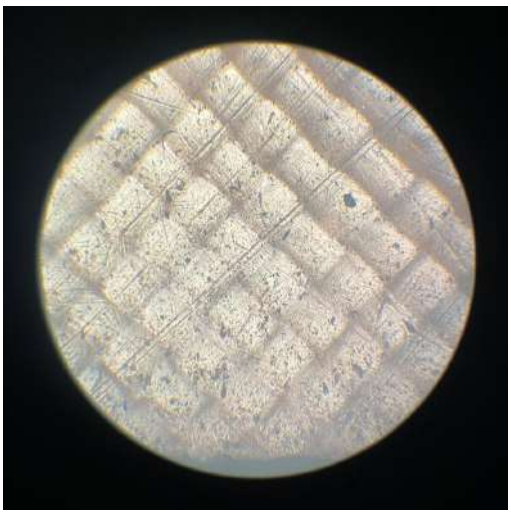
b. Superior, mayor aumento



c. Medio, menor aumento



d. Medio, mayor aumento



e. Inferior, menor aumento



f. Inferior, mayor aumento

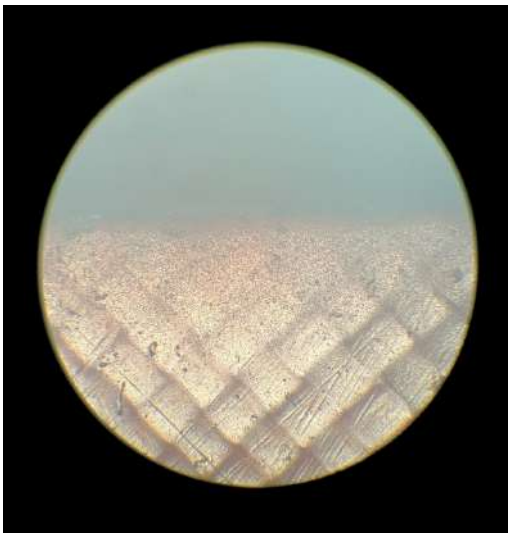
Figura 6.8. Micrografías ópticas del cupón erosionado a 45°.

6.4.2.3. Cupón ensayado a 60°

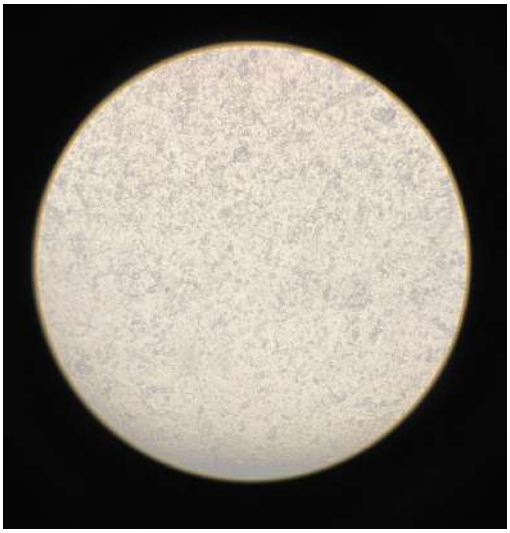
En el cupón ensayado a 60° (Figuras 6.9.a., 6.9.c. y 6.9.e.) se observa una alteración superficial más pronunciada que en las condiciones de menor inclinación. El patrón asociado al proceso de fabricación pierde definición en una mayor proporción de la superficie, lo que indica una intensificación progresiva del deterioro.

Las micrografías de mayor aumento (Figuras 6.9.b., 6.9.d. y 6.9.f.) muestran una superficie más rugosa y homogéneamente afectada. En la región superior predominan rasgos de morfología aproximadamente redondeada, compatibles con una mayor contribución de impactos con elevada componente normal y con procesos de deformación localizada. En la región inferior, por su parte, continúan observándose marcas alargadas y orientadas, atribuibles desde el punto de vista morfológico a mecanismos de corte o microarado.

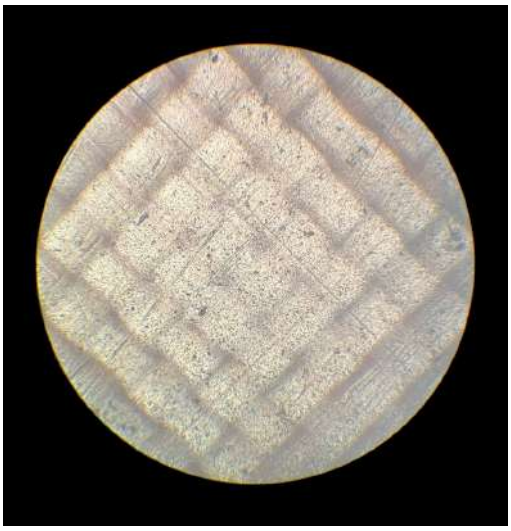
A este ángulo, ambas morfologías aparecen sobre una superficie globalmente más degradada. En consecuencia, si bien persiste la diferenciación entre las zonas superior e inferior, ésta se manifiesta dentro de un nivel de daño mayor que el registrado para los cupones ensayados a 20° y 45°.



a. Superior, menor aumento



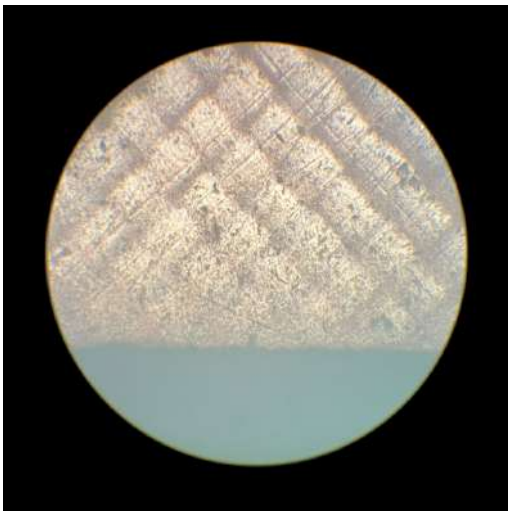
b. Superior, mayor aumento



c. Medio, menor aumento



d. Medio, mayor aumento



e. Inferior, menor aumento



f. Inferior, mayor aumento

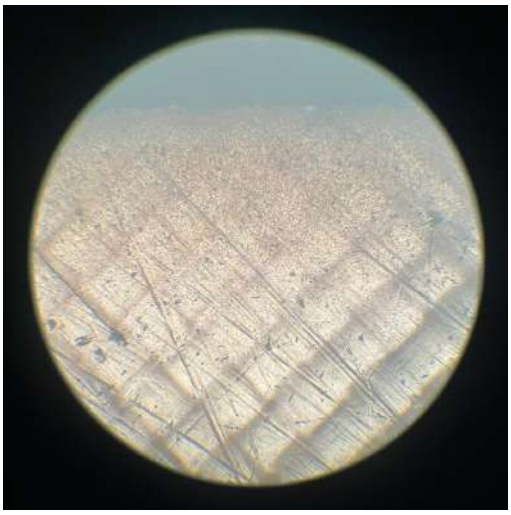
Figura 6.9. Micrografías ópticas del cupón erosionado a 60°.

6.4.2.4. Cupón ensayado a 75°

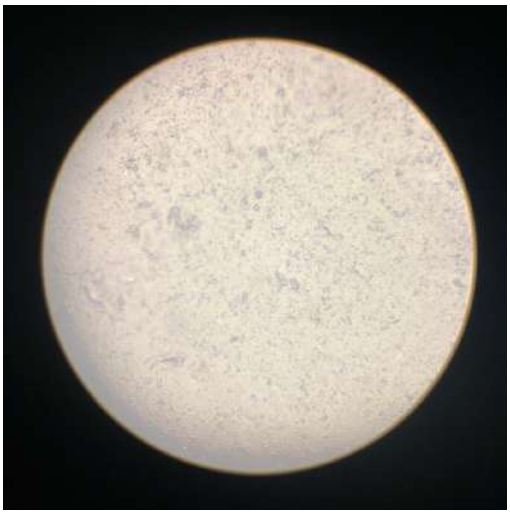
Las superficies correspondientes al ensayo a 75° (Figuras 6.10.a., 6.10.c. y 6.10.e.) presentan el mayor grado de deterioro entre las condiciones analizadas. El patrón superficial original se encuentra considerablemente atenuado y, en determinadas regiones, prácticamente ha desaparecido, lo que evidencia una remoción de material más generalizada.

En las micrografías de mayor aumento (Figuras 6.10.b., 6.10.d. y 6.10.f.) se distinguen, principalmente en la zona superior, improntas de contorno aproximadamente circular o redondeado. Esta morfología resulta compatible con impactos próximos a la dirección normal y con una contribución predominante de deformación localizada. En la zona inferior aún pueden reconocerse trazas alargadas y orientadas, compatibles con mecanismos de corte o microarado; sin embargo, dichas huellas se encuentran superpuestas a una alteración superficial más intensa y extendida.

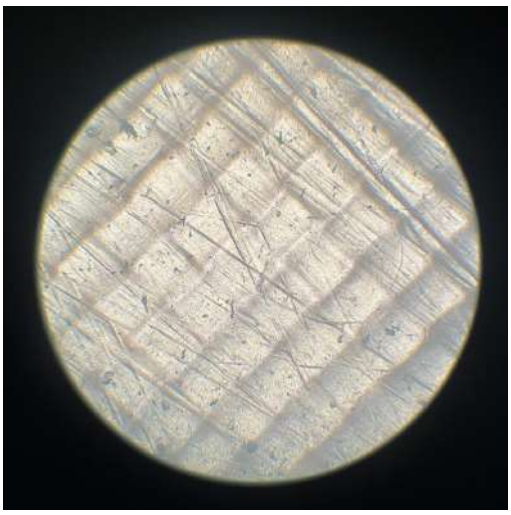
El análisis comparativo de las micrografías indica, por consiguiente, un aumento progresivo de la severidad del desgaste al incrementarse el ángulo del cupón. El menor deterioro corresponde a la condición de 20°, seguido por los ensayos a 45° y 60°, mientras que el cupón ensayado a 75° presenta la mayor modificación superficial. De manera simultánea, en las diferentes condiciones se reconoce una variación espacial de la morfología del daño: la región superior se caracteriza por improntas predominantemente redondeadas, mientras que en la región inferior prevalecen huellas alargadas y direccionales asociables a mecanismos de corte o microarado.



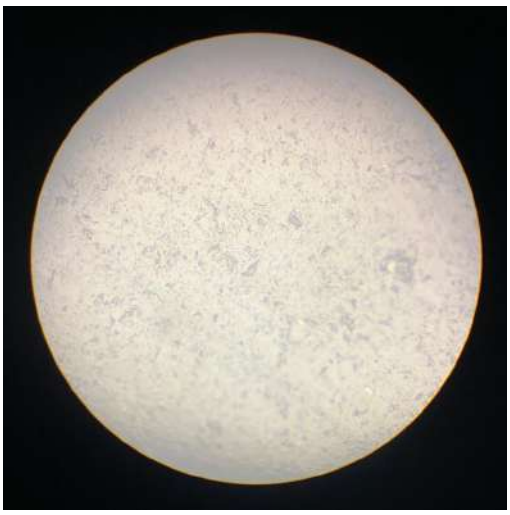
a. Superior, menor aumento



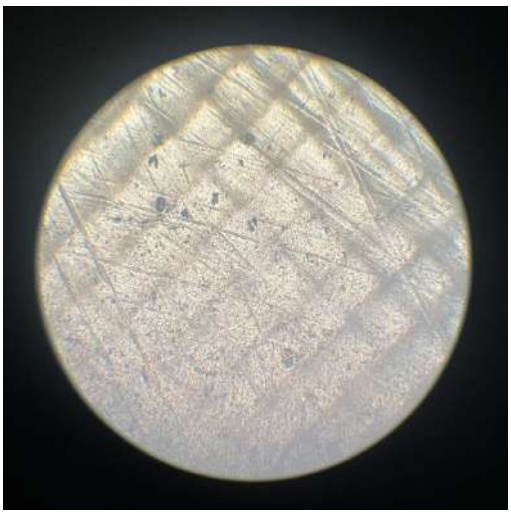
b. Superior, mayor aumento



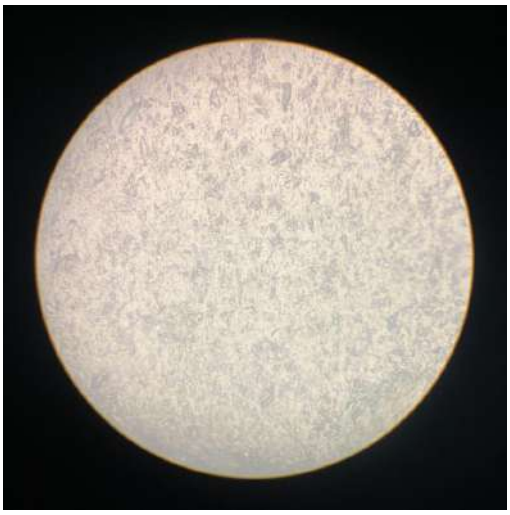
c. Medio, menor aumento



d. Medio, mayor aumento



e. Inferior, menor aumento



f. Inferior, mayor aumento

Figura 6.10. Micrografías ópticas del cupón erosionado a 75°.

6.5. Perfilometrías

La caracterización topográfica de las superficies erosionadas se realizó mediante perfilometría de contacto. Las mediciones se realizaron sobre tres regiones características para cada cupón ensayado: zona superior, zona media y zona inferior. Esta metodología permitió evaluar la distribución espacial del desgaste sobre la superficie y determinar posibles variaciones locales asociadas a la dinámica del flujo y a la interacción partícula-superficie. Para cada condición de impacto, se obtuvo un perfil longitudinal representativo de cada una de estas regiones, cuyos resultados se presentan en las Figuras 6.11 a 6.14.

En la Figura 6.11, correspondiente al ensayo a 20°, los perfiles obtenidos presentan oscilaciones relativamente homogéneas a lo largo de toda la longitud analizada, sin evidenciarse una depresión claramente definida que se pueda atribuir al desgaste erosivo de manera localizada. Las tres curvas conservan un relieve superficial comparable al original, indicando que la remoción de material fue limitada bajo esta condición de impacto. Este comportamiento resulta consistente con lo observado visualmente mediante microscopía, donde el patrón superficial de fabricación aún permanece visible en gran parte del cupón. A bajos ángulos de impacto, las partículas tienden a interactuar con la superficie mediante mecanismos predominantemente tangenciales, generando microcortes superficiales de baja penetración y reducida remoción volumétrica de material.

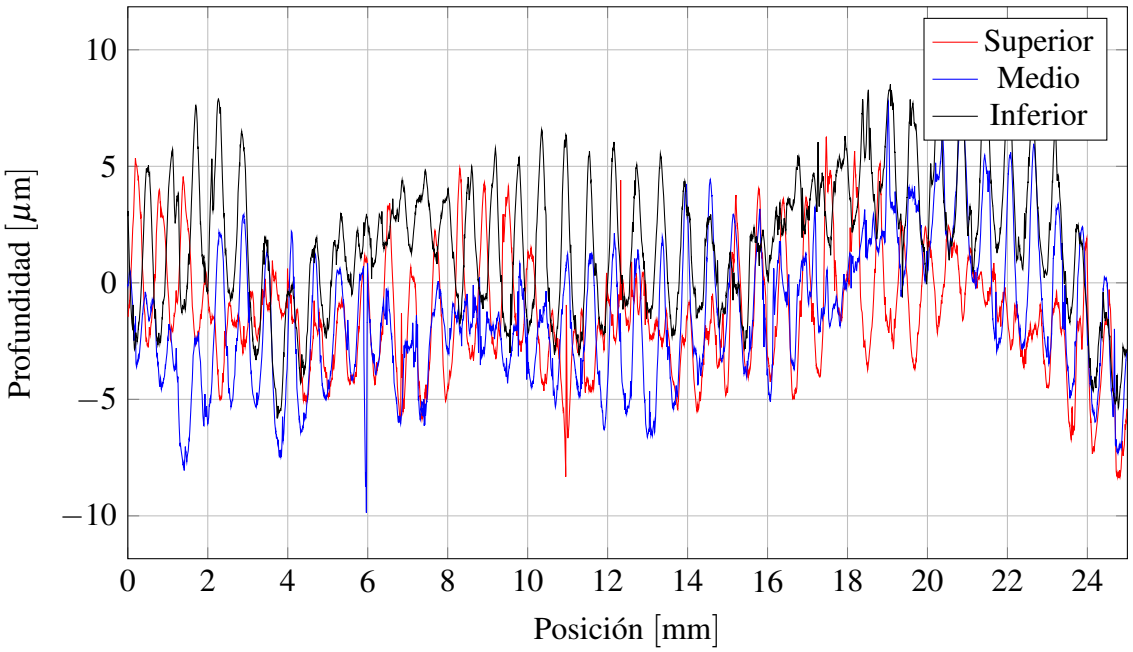


Figura 6.11. Perfiles obtenidos por perfilometría del cupón a 20°.

Para el caso de 45° (Figura 6.12), comienza a observarse claramente una región central relativamente plana y deprimida respecto de los bordes. Las tres líneas analizadas —superior, media e inferior— presentan evidencia de desgaste, indicando que el daño ya no se encuentra localizado únicamente en regiones puntuales, sino distribuido sobre una zona considerable de la superficie. El aumento del ancho de la región erosionada evidencia un incremento significativo de la interacción partícula-superficie. A este ángulo, las partículas poseen simultáneamente componentes normales y tangenciales de velocidad suficientemente importantes como para producir tanto deformación local como remoción de material por mecanismos de corte y fatiga superficial. Diversos trabajos sobre erosión por lodos indican que ángulos intermedios favorecen una combinación de mecanismos erosivos, aumentando la eficiencia de remoción de material.

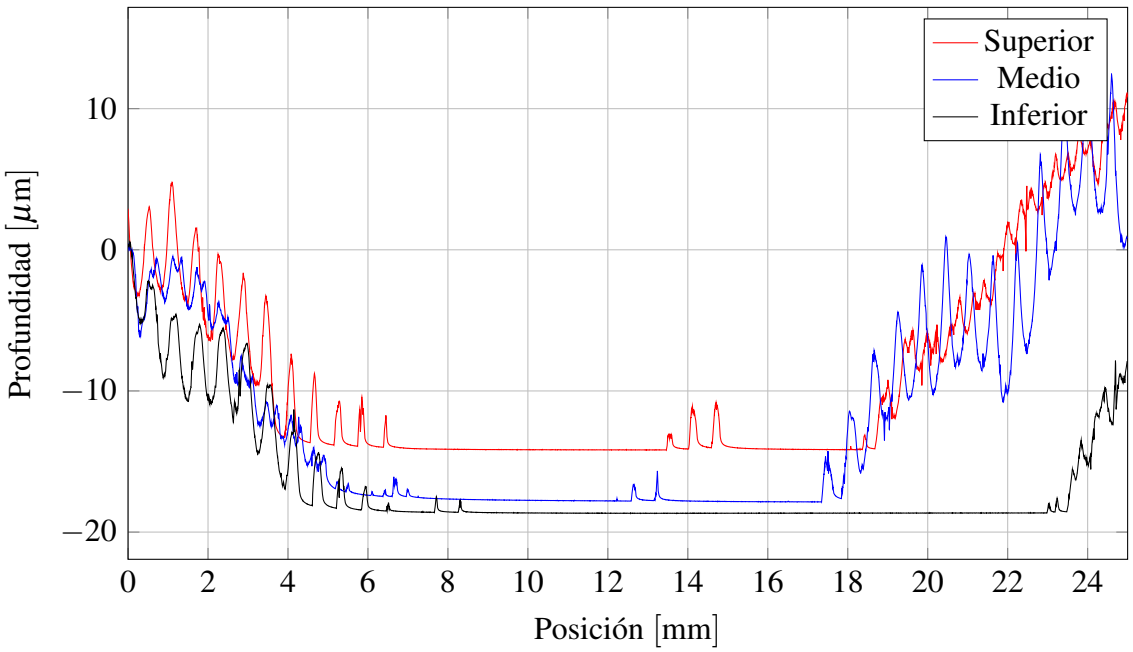


Figura 6.12. Perfiles obtenidos por perfilometría del cupón a 45°.

En la Figura 6.13, correspondiente a 60°, puede observarse que el ancho de la región erosionada aumenta aún más respecto del caso anterior. Sin embargo, la profundidad máxima del daño no presenta un incremento proporcionalmente significativo. Esto sugiere que el material removido se distribuye sobre un área mayor, reduciendo la intensidad local de desgaste. Una posible explicación de este comportamiento radica en la modificación de la dinámica de impacto de las partículas. A mayores ángulos, la componente normal de velocidad aumenta, favoreciendo una interacción más extensa sobre la superficie; sin embargo, simultáneamente puede producirse una disminución relativa de la componente tangencial responsable de los mecanismos de microcorte más severos.

Adicionalmente, fenómenos hidrodinámicos asociados al flujo pueden provocar redistribuciones espaciales de las trayectorias de las partículas, ampliando la zona afectada pero disminuyendo la concentración energética local. Los estudios de erosión por lodos muestran que la distribución del daño puede verse fuertemente influenciada por zonas de estancamiento y desviaciones del flujo cercanas a la superficie impactada. También es posible que parte de la energía de impacto se disipe mediante deformaciones locales de la matriz polimérica y mecanismos de redistribución de tensiones, reduciendo la profundidad efectiva del desgaste.

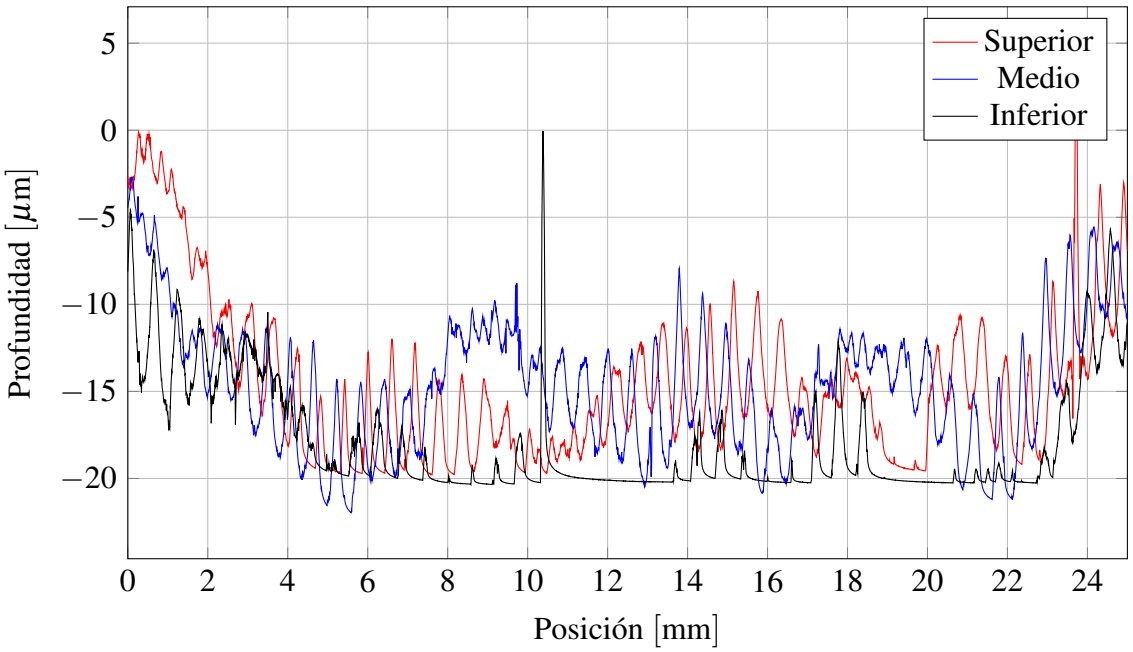


Figura 6.13. Perfiles obtenidos por perfilometría del cupón a 60°.

Finalmente, para el ensayo a 75° (Figura 6.14), tanto la profundidad como el ancho de la región erosionada aumentan notablemente. Los perfiles muestran una depresión extensa y pronunciada, especialmente en las zonas media e inferior del cupón. Bajo estas condiciones, el impacto de las partículas ocurre con una componente normal dominante, que incrementa significativamente las tensiones locales generadas sobre la superficie. Este comportamiento coincide con lo reportado en la literatura para erosión bajo impactos cercanos a la normal, donde predominan mecanismos asociados a deformación severa, fatiga superficial y fractura localizada. En materiales poliméricos y compuestos, este tipo de impacto favorece la nucleación y propagación de microfisuras, así como la remoción localizada de matriz, incrementando considerablemente la tasa de deterioro.

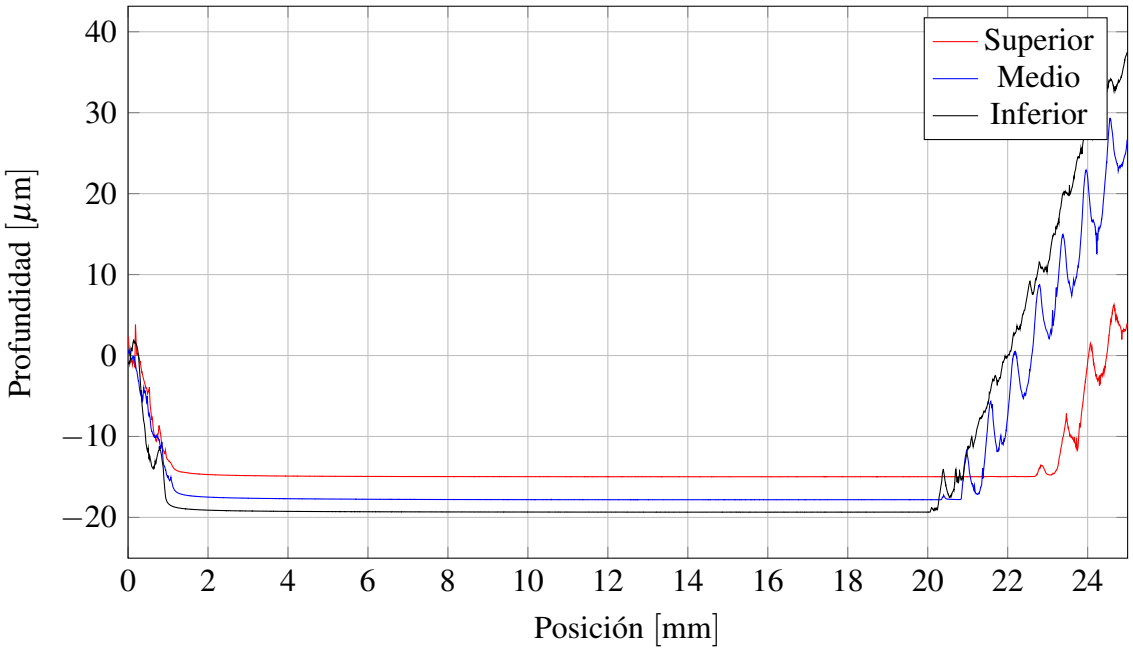


Figura 6.14. Perfiles obtenidos por perfilometría del cupón a 75°.

Un aspecto particularmente relevante de los resultados obtenidos es que, aun cuando macroscópicamente continúa observándose el patrón superficial original del cupón, la perfilometría evidencia regiones prácticamente planas dentro de la zona erosionada. Esto puede explicarse considerando la escala de resolución de cada técnica de observación. El patrón visible a simple vista o mediante microscopía de bajo aumento corresponde a irregularidades superficiales de gran longitud de onda asociadas al proceso de fabricación de la placa —en este caso, marcas derivadas de la bolsa de vacío utilizada durante el conformado—. Sin embargo, la perfilometría registra variaciones verticales locales con resolución micrométrica, siendo altamente sensible a la eliminación de rugosidad fina y a pequeñas pérdidas de material acumuladas. Como consecuencia, aunque el relieve macroscópico general permanezca parcialmente visible, la erosión puede haber eliminado gran parte de las irregularidades de menor escala, generando perfiles relativamente planos desde el punto de vista topográfico. Además, la presencia de una zona plana no implica necesariamente la ausencia total de textura superficial, sino una reducción significativa de la amplitud de las variaciones de altura registradas por el palpador.

Este comportamiento también puede relacionarse con fenómenos de deformación plástica localizada y redistribución superficial del material. En procesos de erosión por partículas, especialmente bajo impactos repetitivos, parte del material puede deformarse

lateralmente y rellenar parcialmente depresiones locales, produciendo superficies aparentemente niveladas, aun cuando exista daño acumulado. Asimismo, en materiales poliméricos y compuestos reforzados, la erosión no siempre produce cavidades abruptas, sino zonas gradualmente suavizadas por remoción progresiva de matriz y desgaste superficial distribuido.

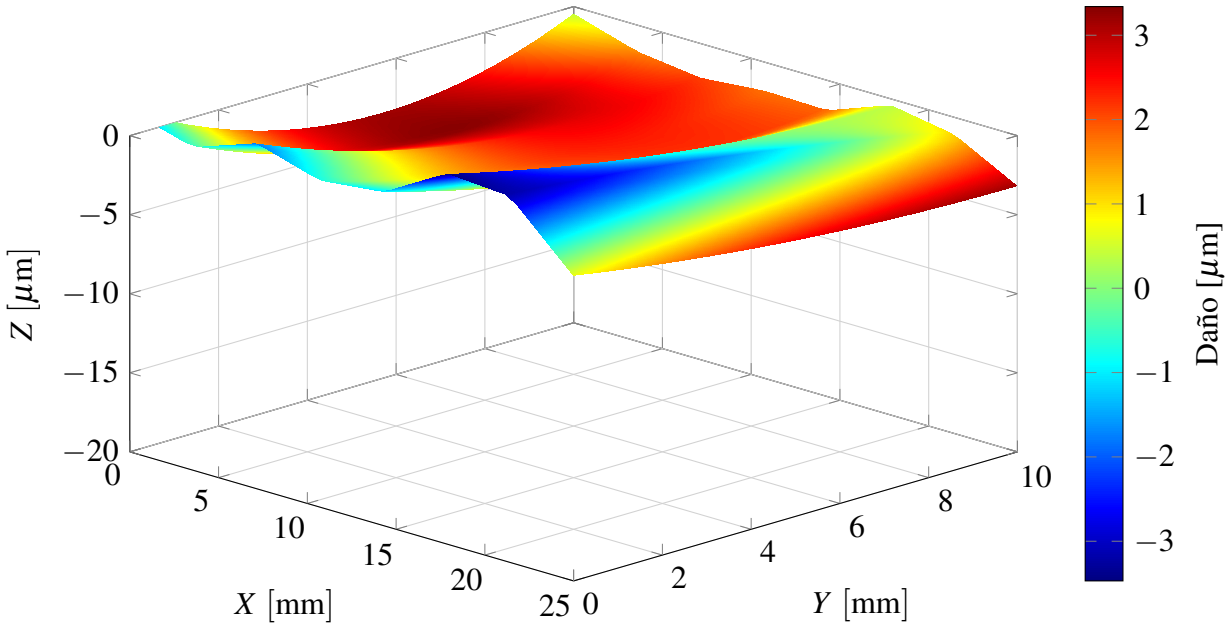


Figura 6.15. Superficie interpolada isométrica para el ángulo 20°.

A partir de las tres perfilometrías experimentales correspondientes a las secciones inferior, central y superior, se reconstruyó la geometría de la superficie mediante interpolación espacial para cada cupón. En primer lugar, cada perfil fue depurado y restringido al intervalo donde las mediciones mostraban la región erosionada central, con el fin de asegurar la consistencia geométrica entre secciones. Luego, para cada abscisa x, se consideraron las alturas z_0, z_1 y z_2 correspondientes a las posiciones transversales $y_0 = 0\,\text{mm}$, $y_1 = 5\,\text{mm}$ y $y_2 = 10\,\text{mm}$. El valor de la coordenada vertical z en una posición intermedia y se obtuvo al evaluar el polinomio cuadrático de interpolación en y que pasa por los tres puntos $(y_0,\, z_0)$, $(y_1,\, z_1)$ y $(y_2,\, z_2)$. En forma de bases de Lagrange se definió en la Ec. 6.4.

$$z(y) = z_0 \frac{(y-y_1)(y-y_2)}{(y_0-y_1)(y_0-y_2)} + z_1 \frac{(y-y_0)(y-y_2)}{(y_1-y_0)(y_1-y_2)} + z_2 \frac{(y-y_0)(y-y_1)}{(y_2-y_0)(y_2-y_1)} \tag{6.4}$$

Al repetir esta interpolación para cada x, se obtuvo una malla continua $(x,\, y,\, z)$

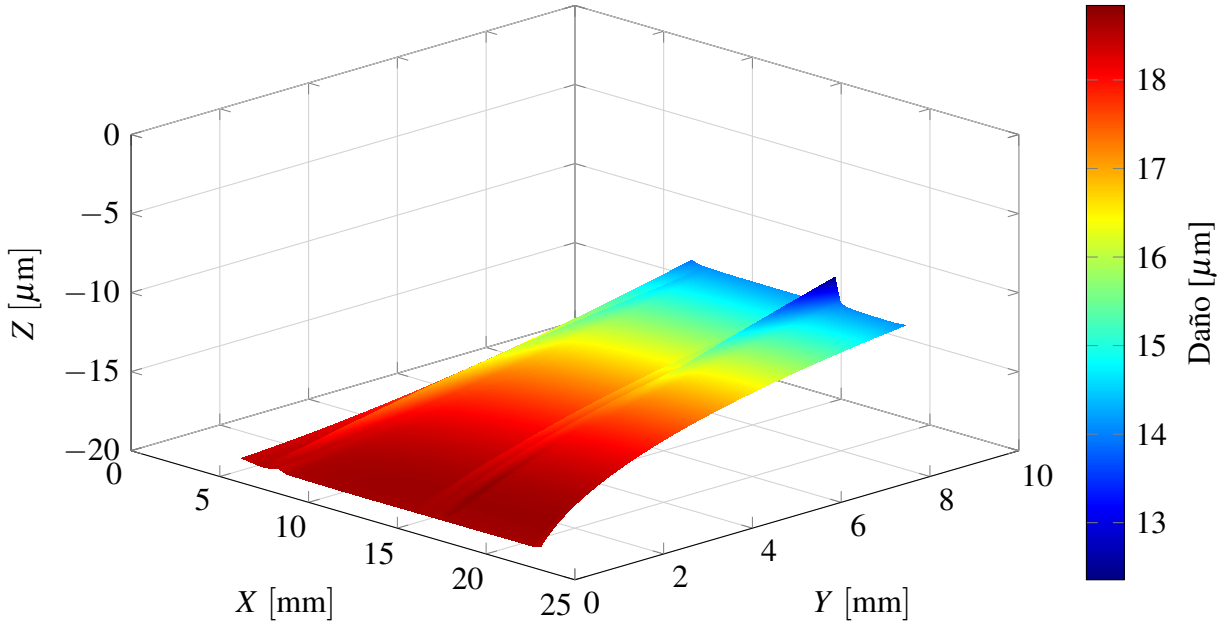


Figura 6.16. Superficie interpolada isométrica para el ángulo 45°.

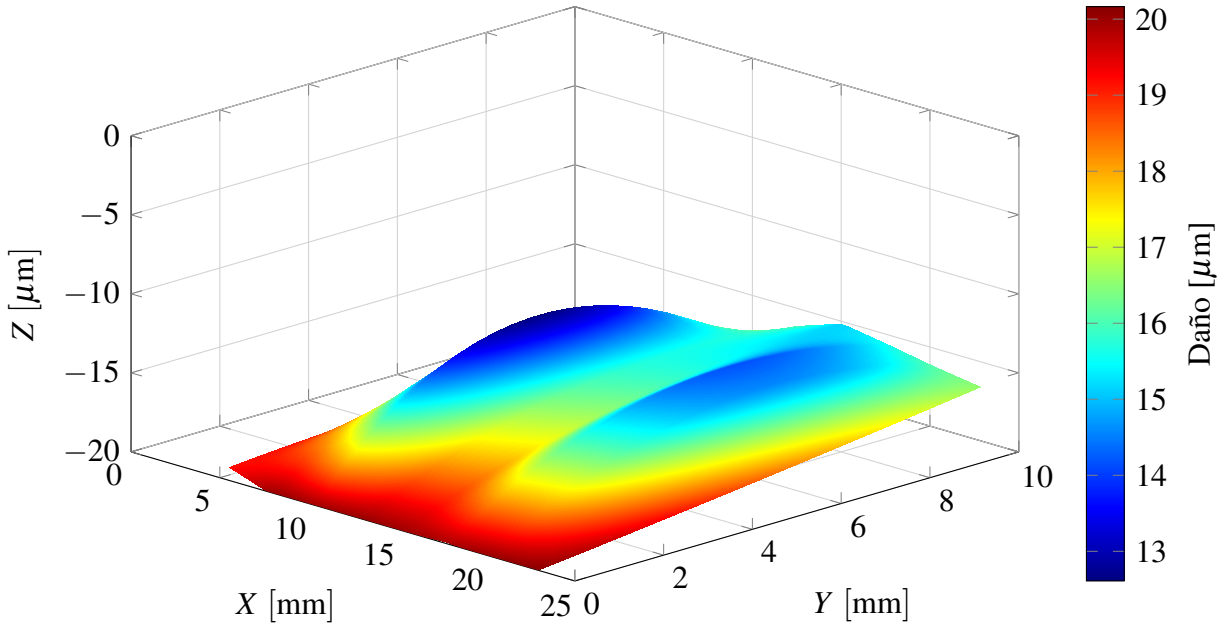


Figura 6.17. Superficie interpolada isométrica para el ángulo 60°.

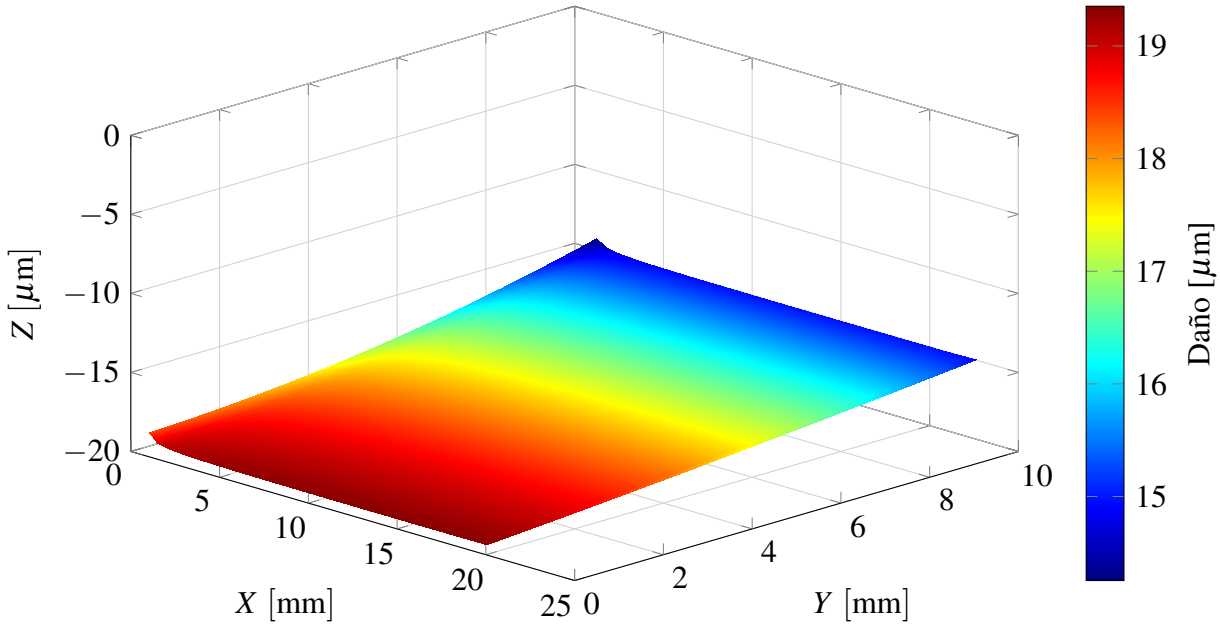


Figura 6.18. Superficie interpolada isométrica para el ángulo 75°.

que define la superficie interpolada. Las superficies resultantes se muestran en las Figuras 6.15, 6.16, 6.17 y 6.18.

El volumen erosionado se estimó a partir de la superficie reconstruida en tres dimensiones mediante la integral de la profundidad erosionada respecto de un plano de referencia. Si se toma el valor $z = 0$ como superficie inicial no erosionada determinado por las perfilometrías, el volumen se expresa en la Ec. 6.5.

$$V_e\,[\mathrm{mm}^3] = 10^{-3} \iint_{\Omega_{\mathrm{mm}^2}} -z(x,y)\,dA \tag{6.5}$$

donde Ω_{mm^2} representa el área proyectada de la superficie medida en mm^2 y $z(x,y)$ es la cota de la superficie reconstruida en μm. El factor 10^{-3} convierte el resultado final a mm^3, ya que $1\,\mu\mathrm{m} = 10^{-3}\,\mathrm{mm}$, por lo que $1\,\mu\mathrm{m}\cdot\mathrm{mm}^2 = 10^{-3}\,\mathrm{mm}^3$. En la implementación numérica, esta integral se evalúa mediante la regla del trapecio sobre la grilla de puntos medidos por las perfilometrías.

En la Tabla 6.1 se presenta la pérdida volumétrica determinada para cada cupón luego de 2 300 s de funcionamiento del sistema piloto. A partir de dichos valores, y considerando una densidad de la resina de $\rho = 1{,}673\,\mathrm{mg/mm}^3$, se estimó la masa perdida mediante la relación $m = \rho V$. En el caso del cupón ensayado a 20°, se registró una leve pérdida volumétrica consistente con el bajo nivel de daño observado en las microscopías.

Tabla 6.1. Pérdida volumétrica por cupón

Ángulo [°]	Pérdida volumétrica, V_e [mm^3]	Pérdida de masa, P_e [mg]
20	0,32 ± 0,01	0,535 ± 0,017
45	2,18 ± 0,01	3,645 ± 0,017
60	2,99 ± 0,01	5,005 ± 0,017
75	3,46 ± 0,01	5,790 ± 0,017

6.6. Modelado numérico

6.6.1. Fluidodinámica

Inicialmente, se resolvió el modelo computacional fluidodinámico que posteriormente fue utilizado como perfil tridimensional para modelar la velocidad de las partículas. En la Figura 6.19 se presenta el perfil velocidades del fluido alrededor del cupón para los cuatro ángulos estudiados. En todos los casos, la presencia de la muestra modificó el campo de flujo, generando una desviación de las líneas de corriente, zonas de aceleración alrededor de sus extremos y una región de menor velocidad en la zona central del cupón a mayores ángulos. No obstante, la intensidad y la extensión de estas perturbaciones dependen directamente de la orientación del cupón respecto de la dirección principal del flujo.

Para la configuración de 20° (Fig. 6.19.a.) el cupón presenta una orientación relativamente alineada con la dirección del movimiento del fluido. En consecuencia, la obstrucción efectiva del conducto es reducida y el flujo puede progresar alrededor de la muestra con una desviación relativamente suave. En esta condición, las zonas de aceleración localizadas en los bordes del cupón son menos intensas y la región de baja velocidad formada aguas abajo se mantiene relativamente estrecha. Esto indica que, para este ángulo, la perturbación introducida por el cupón sobre el campo de velocidades es comparativamente menor.

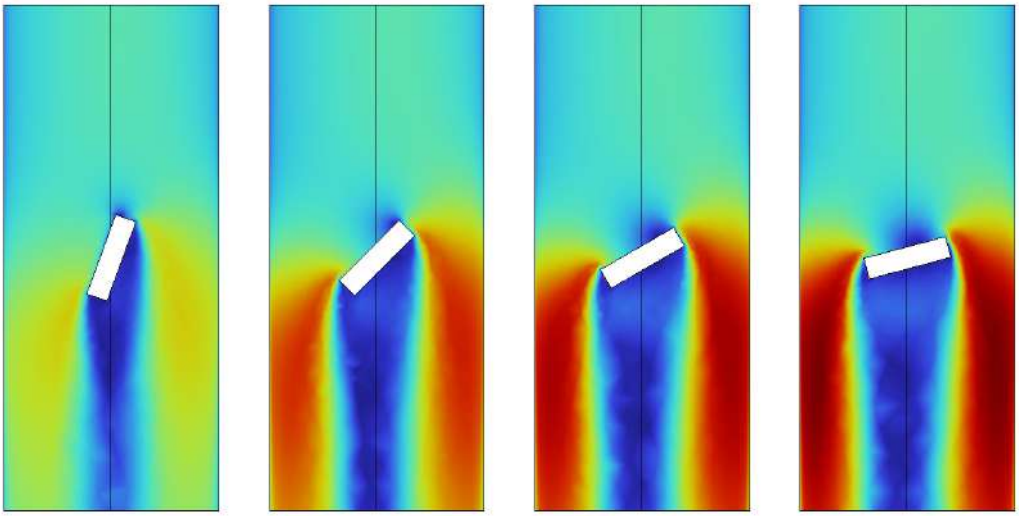
Al aumentar el ángulo hasta 45° (Fig. 6.19.b.) la superficie del cupón se opone en mayor medida al avance del fluido. La mayor obstrucción geométrica obliga al flujo a desviarse de forma más pronunciada alrededor de los extremos de la muestra. Como resultado, se desarrollan regiones de mayor velocidad en los pasos laterales disponibles, mientras que inmediatamente aguas abajo del cupón aparece una zona de baja velocidad asociada con la separación del flujo y la formación de una estela.

Para el ángulo de 60° (Fig. 6.19.c.) la proyección transversal del cupón respecto de la dirección del flujo aumenta nuevamente. Esta configuración reduce el área efectiva disponible para el pasaje del fluido y produce una aceleración local más marcada alrededor de sus extremos. Al mismo tiempo, la región de baja velocidad ubicada detrás de la muestra se vuelve más evidente y se extiende una mayor distancia aguas abajo. La combinación entre la aceleración lateral del flujo y la desaceleración en la estela genera elevados gradientes espaciales de velocidad en las proximidades del cupón.

Finalmente, para la configuración de 75° (Fig. 6.19.d.) el cupón presenta la mayor oposición al avance del flujo entre los casos estudiados. Su orientación aproximadamente transversal incrementó considerablemente el bloqueo efectivo del conducto. Por este motivo, el fluido debió atravesar regiones laterales más restringidas, generándose zonas de alta velocidad alrededor de los extremos de la muestra. Simultáneamente, se formó una región de estancamiento local sobre la cara enfrentada al flujo, donde el movimiento del fluido se encuentra fuertemente desacelerado.

En términos generales, a medida que aumenta el ángulo de inclinación del cupón, también aumenta la dificultad del fluido para progresar a través de la sección del conducto. Esta mayor obstrucción no implica necesariamente un aumento uniforme de la velocidad en todo el dominio, sino una redistribución más intensa del campo de flujo. El fluido se acelera en las regiones de paso restringido, principalmente alrededor de los extremos del cupón, mientras que se desarrollan zonas de estancamiento o baja velocidad en la cara de incidencia y en la región de estela.

Estas variaciones locales del campo de velocidades resultan relevantes para el movimiento de los sólidos suspendidos. Las partículas que atraviesan las regiones aceleradas pueden incrementar su velocidad antes de alcanzar el cupón, mientras que aquellas que ingresan en zonas de estancamiento pueden desacelerarse y modificar su trayectoria. En consecuencia, tanto la velocidad como el ángulo con el que impactan sobre la superficie pueden diferir de las condiciones existentes aguas arriba del cupón. La influencia de estas modificaciones sobre la velocidad y el ángulo de impacto de las partículas se analizará en la Sec. 6.6.2.



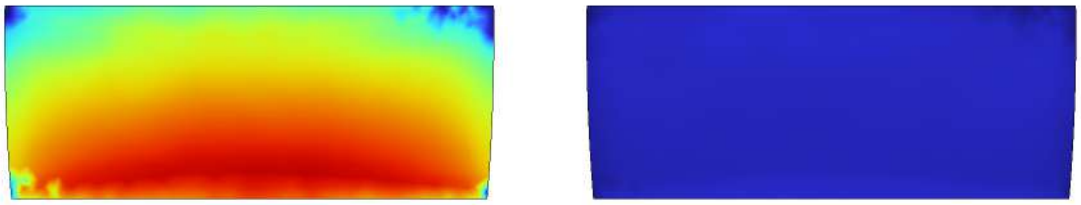
a. 20°. **b.** 45°. **c.** 60°. **d.** 75°.

Figura 6.19. Corte transversal del perfil de velocidades en la línea media de los cupones.

6.6.2. Erosión por seguimiento de partículas

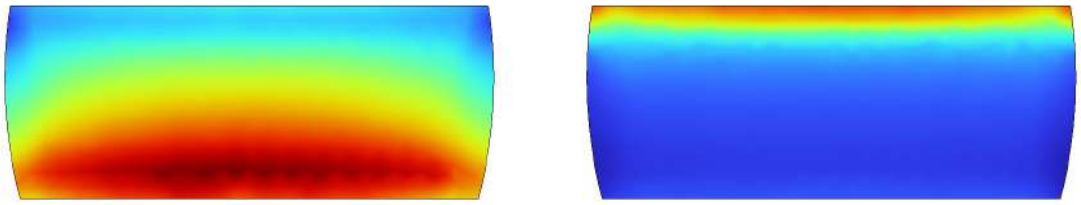
6.6.2.1. Distribución espacial de las condiciones de impacto

Las Figs. 6.20, 6.21, 6.22 y 6.23 permiten analizar el origen espacial del daño calculado. Los mapas de velocidad de impacto (Figs. 6.20.a., 6.21.a., 6.22.a. y 6.23.a.) muestran las regiones en las cuales las partículas conservaron una mayor energía cinética al alcanzar el cupón. Por su parte, los mapas del ángulo de impacto, α, (Figs. 6.20.b., 6.21.b., 6.22.b. y 6.23.b.) permiten identificar la orientación con la que esa energía se transfirió a la superficie. A 20° predominan impactos rasantes. Al aumentar la inclinación del cupón se desarrolla un intervalo más amplio de ángulos de impacto y las zonas de choque cuasi normal modifican su posición sobre la superficie. La distribución final de erosión depende de la superposición espacial de ambos campos y no del máximo de cada variable considerada por separado.



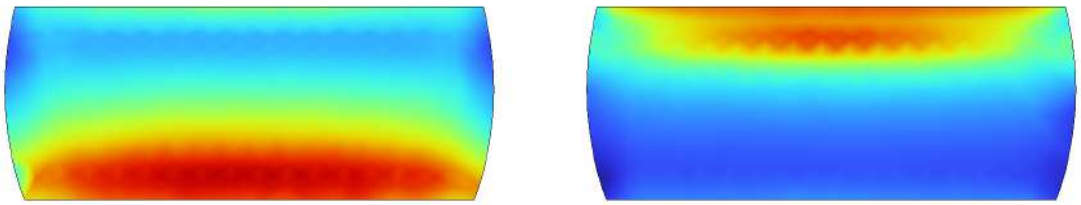
a. Velocidad de impacto. **b.** Ángulo de impacto.

Figura 6.20. Distribución de velocidad y ángulo de impacto de las partículas incidentes sobre el cupón a 20°.



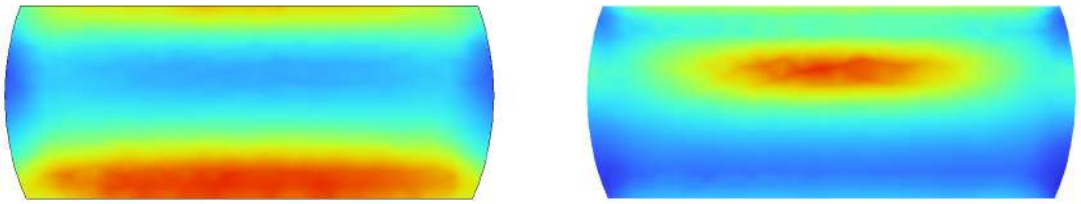
a. Velocidad de impacto. **b.** Ángulo de impacto.

Figura 6.21. Distribución de velocidad y ángulo de impacto de las partículas incidentes sobre el cupón a 45°.



a. Velocidad de impacto. **b.** Ángulo de impacto.

Figura 6.22. Distribución de velocidad y ángulo de impacto de las partículas incidentes sobre el cupón a 60°.



a. Velocidad de impacto. **b.** Ángulo de impacto.

Figura 6.23. Distribución de velocidad y ángulo de impacto de las partículas incidentes sobre el cupón a 75°.

6.6.2.2. Independencia del resultado respecto del número de partículas

Dado que el enfoque lagrangiano estima la erosión a partir de una muestra finita de trayectorias liberadas con posiciones iniciales aleatorias, el resultado presenta una componente de dispersión estadística que decrece al aumentar el número de partículas N. Para verificar que dicha dispersión no condicionara las conclusiones, se resolvió cada configuración angular con $N = 20\,000$, $100\,000$, $200\,000$ y $400\,000$ partículas, manteniendo invariantes la malla, el campo de flujo y los parámetros del modelo de erosión.

En todos los casos el caudal másico total de sólidos se mantuvo constante, redistribuyéndose entre las partículas computacionales, de modo que el aumento de N incrementó la resolución estadística del muestreo sin alterar la carga de sólidos representada.

La Tabla 6.2 presenta la tasa global de remoción $\dot{m}_T$ en unidades de $[10^{-10}\,\mathrm{kg/s}]$ obtenida para cada combinación de ángulo y número de partículas, junto con su desviación relativa δ respecto de la corrida más refinada, tomada como referencia con $(N = 400\,000)$.

Tabla 6.2. Tasa global de remoción y su desviación relativa respecto de la corrida de referencia.

Cantidad	20°		45°		60°		75°	
de partículas	$\dot{m}_T$	δ	$\dot{m}_T$	δ	$\dot{m}_T$	δ	$\dot{m}_T$	δ
20 000	2,502	+3,72 %	15,39	+6,31 %	21,06	+0,46 %	26,16	−2,25 %
100 000	2,398	−0,60 %	14,73	+1,76 %	20,77	−0,93 %	26,49	−1,03 %
200 000	2,396	−0,68 %	14,52	+0,29 %	20,95	−0,10 %	26,78	+0,06 %
400 000	2,413	—-	14,48	—-	20,97	—-	26,76	—-

Se observó que la corrida más gruesa, con 20 000 partículas, se apartó hasta un 6,3 % del valor de referencia, desviación que se concentró en las configuraciones de 20° y 45°. Estos fueron precisamente los ángulos en los que el cupón presentó una menor área proyectada frente al flujo y, por lo tanto, en los que una menor fracción de las partículas liberadas alcanza la superficie, además el tamaño efectivo de la muestra es menor y la dispersión estadística resulta mayor. Al incrementar N la desviación se redujo de forma consistente con el escalamiento $\delta \propto N^{-1/2}$ propio de un muestreo aleatorio: por encima de 200 000 partículas ninguna configuración se apartó más de un 0,7 % de la referencia, y el refinamiento final, de 200 000 a 400 000, modificó el resultado en menos de 0,7 % en los cuatro ángulos.

Cabe señalar que la convergencia no es estrictamente monótona. En las configuraciones de 20° y 60° la desviación cambió de signo entre refinamientos sucesivos, lo cual es esperable en un método de naturaleza estadística: el residuo no constituye un error de discretización sistemático sino dispersión de muestreo en torno al valor asintótico.

La partición entre mecanismos resultó aún más estable que la magnitud global. La contribución relativa de la componente de deformación varió, entre la corrida más gruesa y la de referencia, 0,04 puntos porcentuales a 20°, 0,29 a 45°, 0,59 a 60° y 0,15 a 75°. Este comportamiento es coherente con el hecho de que ambas componentes se evalúan

sobre la misma población de impactos, de modo que las fluctuaciones estadísticas afectan de manera proporcional al numerador y al denominador del cociente y se cancelan parcialmente.

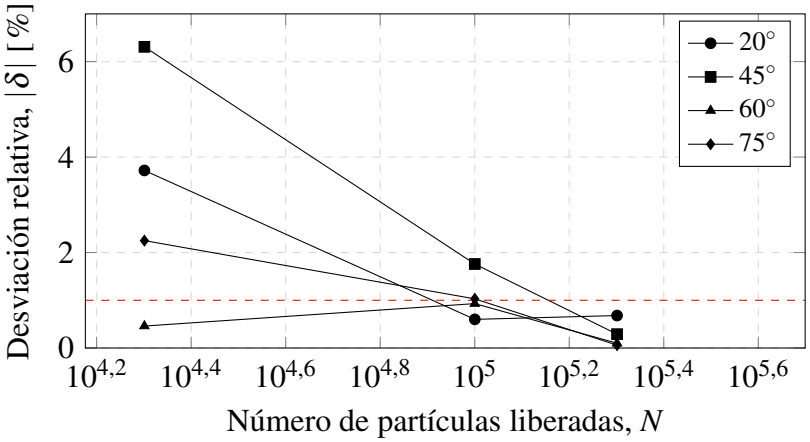


Figura 6.24. Desviación relativa de $\dot{m}_T$ en función del número de partículas liberadas.

Se adoptó como criterio de aceptación una desviación inferior al 1 % en la tasa global de remoción, dicho criterio se satisface a partir de 200 000 partículas en las cuatro configuraciones. No obstante, y dado que el costo computacional asociado resultó admisible, los resultados presentados en las Secs. 6.6.2.3 y 6.6.2.4 corresponden a las corridas de 400 000 partículas, que constituyen la estimación más refinada disponible.

6.6.2.3. Resultados modelo de erosión

La Tabla 6.3 presenta las tasas integradas de pérdida de masa para cada componente del modelo y la pérdida de masa acumulada durante 2 300 s de funcionamiento. Los valores de deformación y corte corresponden a tasas integradas sobre la superficie del cupón; por lo tanto, su suma representa la tasa global de remoción predicha por el modelo. La desviación del ajuste, δ se obtuvo como $(\Delta m_T - P_e)/P_e$, siendo P_e la pérdida de masa calculada mediante perfilometrías.

Tabla 6.3. Resultados globales del modelo numérico de erosión.

Ángulo [°]	$\dot{m}_D$ [kg/s]	$\dot{m}_C$ [kg/s]	$\dot{m}_T$ [kg/s]	Δm_T [mg]	P_e [mg]	δ
20	$1{,}49 \times 10^{-11}$	$2{,}26 \times 10^{-10}$	$2{,}41 \times 10^{-10}$	0,556	0,535	3,9 %
45	$3{,}82 \times 10^{-10}$	$1{,}07 \times 10^{-9}$	$1{,}45 \times 10^{-9}$	3,336	3,645	-8,5 %
60	$8{,}48 \times 10^{-10}$	$1{,}25 \times 10^{-9}$	$2{,}10 \times 10^{-9}$	4,831	5,005	-3,5 %
75	$1{,}15 \times 10^{-9}$	$1{,}53 \times 10^{-9}$	$2{,}67 \times 10^{-9}$	6,158	5,790	6,4 %

Tabla 6.4. Participación relativa de las componentes del modelo en la pérdida de masa total calculada.

Ángulo [°]	Deformación [%]	Corte [%]
20	6,18	93,82
45	26,40	73,60
60	40,45	59,55
75	42,93	57,07

La Tabla 6.4 muestra que la contribución por deformación crece de forma monótona con el ángulo de incidencia, desde un 6,18 % a 20° hasta un 42,93 % a 75°, sin llegar a superar en ningún caso a la componente de corte. El incremento no es uniforme: entre 20° y 45° la participación de la deformación aumenta unos 20 puntos porcentuales y entre 45° y 60° unos 14, mientras que entre 60° y 75° el cambio se reduce a 2,5 puntos. Esta saturación indica que, en el intervalo ensayado, el sistema no alcanza una transición hacia un régimen dominado por impactos normales, sino que tiende a un reparto aproximadamente equitativo entre ambos mecanismos.

A partir del enfoque iterativo para ajustar el modelo, se obtuvieron los valores de ε y φ que mejor ajustaban el modelo. La energía asociada a la deformación, ε, fue de $112\,\mathrm{J/mm^3}$ y la energía asociada al corte, φ, fue de $155\,\mathrm{J/mm^3}$. Estos valores se encuentran un orden de magnitud por encima de los reportados en bibliografía para polímeros, $14{,}5 - 24{,}6\,\mathrm{J/mm^3}$ y $18{,}0 - 27{,}9\,\mathrm{J/mm^3}$ [14].

Para hacer una comparación con los valores de bibliografía se debió considerar que los coeficientes ε y φ no fueron determinados de manera independiente mediante ensayos específicos, sino ajustados de modo de reproducir las mediciones de pérdida volumétrica. Por lo tanto, estos parámetros abarcan no solo la resistencia intrínseca del material a la remoción por deformación y por corte, sino también el conjunto de simplificaciones introducidas en la cadena de cálculo que los precede, lo que limita su interpretación como propiedades del polímero. Esta limitación se aprecia al examinar las condiciones del ajuste. Dos parámetros fueron determinados a partir de cuatro configuraciones angulares, de modo que la calibración dispone de solo dos grados de libertad residuales. En conjunto con las diferencias de sustrato, erodente y fluido, esta consideración explica la discrepancia observada respecto de los rangos reportados en la bibliografía.

6.6.2.4. Componentes del modelo de erosión

La distribución de la erosión calculada no depende únicamente de la magnitud de la velocidad con la que las partículas alcanzan el cupón, sino también de la orientación de dicha velocidad respecto de la superficie. En términos generales, la componente tangencial favorece el desplazamiento de la partícula sobre el material y, por lo tanto, la contribución asociada al corte o microarado. Por el contrario, el aumento de la componente normal incrementa la transferencia de energía perpendicular a la superficie y favorece la indentación, la acumulación de daño y el eventual desprendimiento de material. La separación entre erosión por corte y por deformación debe entenderse como una descomposición del modelo, ya que ambos aportes pueden coexistir durante un mismo impacto [4, 14].

Las Figuras 6.20, 6.21, 6.22 y 6.23 muestran que, al aumentar la inclinación del cupón, la región en la cual las partículas conservan las mayores velocidades de impacto se desplaza progresivamente hacia la zona inferior de la superficie representada. Este comportamiento es consistente con la mayor obstrucción que el cupón impone al flujo, que genera una distribución más heterogénea de velocidades y modifica las trayectorias de las partículas. En paralelo, la región de impactos con mayor componente normal, identificada por ángulos próximos a la incidencia normal, aparece inicialmente en la parte superior y se desplaza hacia el sector central al aumentar el ángulo nominal del cupón. La posición final del daño resulta, por lo tanto, de la superposición entre ambas distribuciones.

6.6.2.5. Cupón a 20°

Para 20°, los impactos fueron predominantemente rasantes (Fig. 6.20.b.), mientras que las mayores velocidades se distribuyeron en una zona central de la superficie (Fig. 6.20.a.). Sin embargo, la reducida componente normal de la velocidad limitó la penetración de las partículas y, en consecuencia, la erosión por deformación fue prácticamente nula (Fig. 6.26.a.).

La erosión modelada se originó casi exclusivamente por la componente de corte, aunque su magnitud absoluta fue baja (Tablas 6.3 y 6.4). El daño se concentró débilmente hacia el borde inferior del cupón (Figs. 6.27.a. y 6.25.a.), donde la componente tangencial de la velocidad fue suficiente para producir deslizamiento y rayado superficial. Esta predicción es coherente, en términos generales, con las microscopías experimentales, en las cuales el cupón a 20° presentó marcas longitudinales leves y una superficie menos afectada que las restantes configuraciones (Fig. 6.7).

6.6.2.6. Cupón a 45°

Al aumentar la inclinación a 45°, la región de mayor velocidad de impacto se desplazó hacia la mitad inferior del cupón (Fig. 6.21.a.), mientras que los mayores ángulos de impacto se localizaron en una franja próxima al borde superior (Fig. 6.21.b.). Debido a que ambas regiones no coincidieron espacialmente, la contribución normal permaneció limitada y la erosión por deformación fue relativamente baja (Fig. 6.26.b.).

El daño se mantuvo dominado por la componente de corte, que representó aproximadamente el 70 % de la pérdida calculada. En consecuencia, la zona de erosión total se concentró principalmente en el sector inferior (Figs. 6.27.b. y 6.25.b.), donde la mayor velocidad de impacto coincidió con una componente tangencial todavía elevada. La distribución obtenida es compatible con la aparición experimental de una zona de daño más definida que a 20° y con la presencia de trazas direccionales asociadas al movimiento de las partículas sobre la superficie observadas en la microscopía (Fig. 6.8).

6.6.2.7. Cupón a 60°

Para 60°, la zona de mayor velocidad continuó concentrándose en la región inferior (Fig. 6.22.a.); en cambio, los ángulos de impacto más elevados ocuparon una franja amplia en la parte superior (Fig. 6.22.b.). Esta separación espacial se trasladó directamente a las componentes del modelo: la erosión por corte se concentró en el borde inferior (Fig. 6.27.c.), mientras que la contribución asociada a la componente normal apareció principalmente en la zona superior (Fig. 6.26.c.).

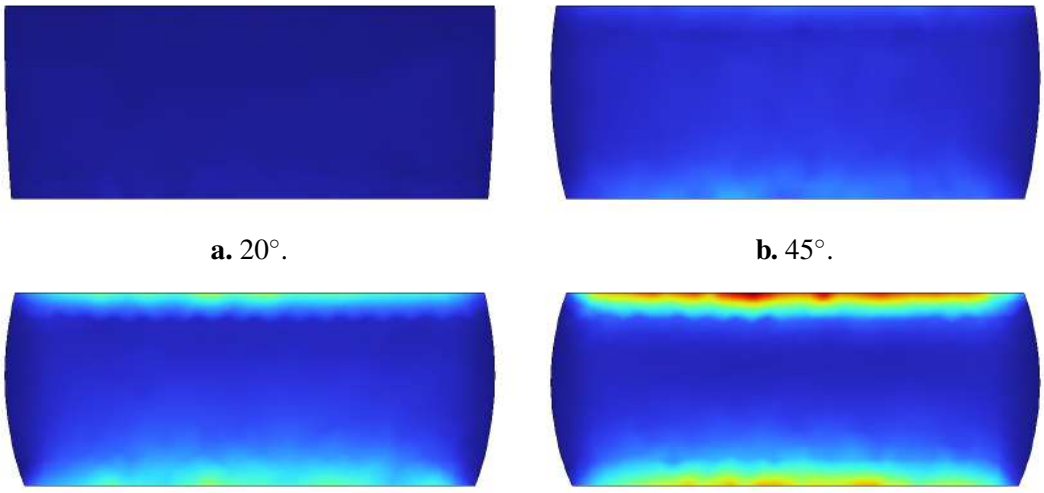
Como ambas contribuciones fueron de magnitud similar (Tabla 6.4), el patrón total dejó de estar concentrado en una única franja y pasó a abarcar una mayor extensión vertical del cupón (Fig. 6.25.c.). En términos físicos, esta configuración representa una transición desde un daño predominantemente tangencial hacia un régimen mixto, en el que coexisten deslizamiento, indentación y acumulación de daño. Las microscopías mostraron también una zona afectada más extendida y menos direccional que para los ángulos menores, lo cual resulta cualitativamente consistente con la superposición de ambas componentes (Fig. 6.9).

6.6.2.8. Cupón a 75°

Para 75°, la zona de mayor velocidad permaneció próxima al borde inferior (Fig. 6.23.a.); sin embargo, la región de ángulos elevados se desplazó desde el borde superior hacia el sector central del cupón (Fig. 6.23.b.). De esta manera, una porción más amplia de las partículas alcanzó la superficie con una componente normal significativa.

La erosión por corte continuó localizada principalmente en la zona inferior (Fig. 6.27.d.), siguiendo la distribución de las mayores velocidades. No obstante, la contribución por deformación alcanzó su máximo valor relativo dentro del rango ensayado (43 % del total), concentrándose en una franja superior y extendiéndose hacia la región central (Fig. 6.26.d.). Aun así, el corte se mantuvo como componente predominante en todos los ángulos analizados, sin que se observara una inversión del mecanismo dominante dentro del intervalo estudiado. Como resultado, el daño total presentó dos regiones reconocibles: una contribución inferior asociada al movimiento tangencial y una franja superior vinculada con impactos de mayor componente normal (Fig. 6.25.d.). El crecimiento progresivo de esta última componente, junto con el aumento sostenido de la contribución por corte, explica la mayor severidad global del daño. En una resina epoxi termorrígida, este aporte debe relacionarse con indentación localizada, microfisuración y desprendimiento de pequeños fragmentos, y no únicamente con deformación plástica. La mayor intensidad observada en las microscopías del cupón a 75° es coherente con esta evolución del mecanismo de erosión (Fig. 6.10).

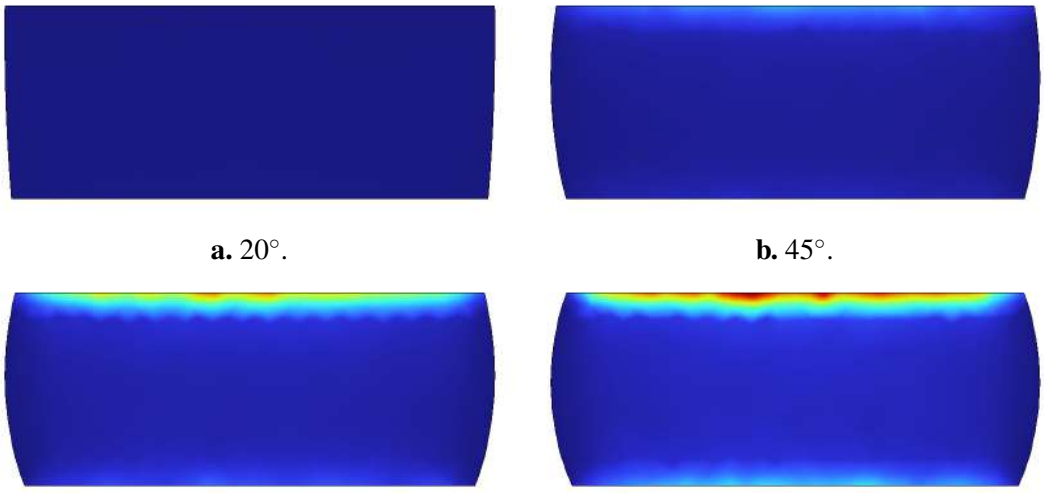
En conjunto, el modelo predijo un desplazamiento progresivo del daño desde una zona inferior dominada por corte, para los menores ángulos, hacia una distribución más extendida y con mayor participación de la región superior y central al aumentar la componente normal del impacto. Esta evolución coincide con la transición experimental desde marcas superficiales predominantemente direccionales hacia un daño más intenso y menos orientado. La comparación con las microscopías es cualitativa, dado que las imágenes experimentales y los mapas numéricos no fueron registrados sobre un mismo sistema de coordenadas; por ello, la concordancia debe evaluarse principalmente a partir de la localización general y del tipo de daño observado.



a. 20°. **b.** 45°.

c. 60°. **d.** 75°.

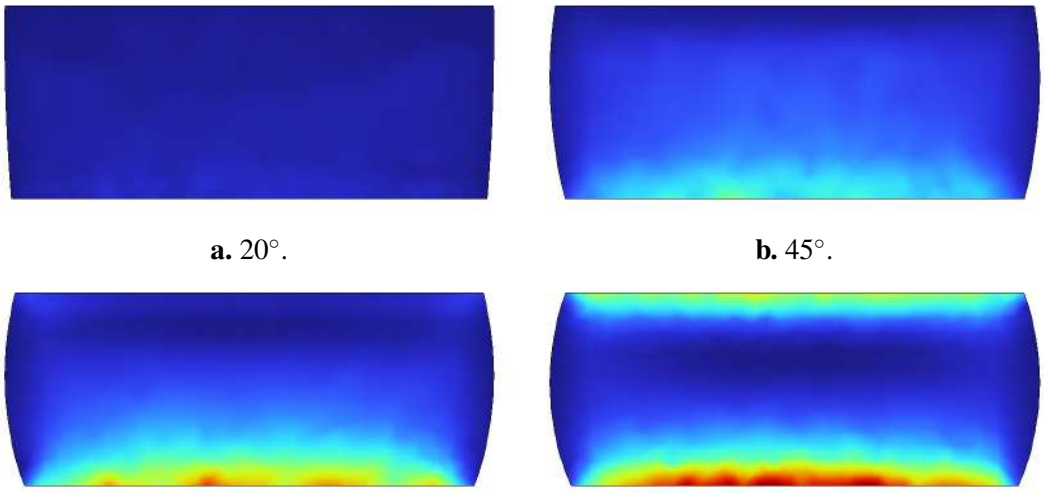
Figura 6.25. Distribución superficial de erosión.



a. 20°. **b.** 45°.

c. 60°. **d.** 75°.

Figura 6.26. Componente de erosión por deformación.



a. 20°. **b.** 45°.

c. 60°. **d.** 75°.

Figura 6.27. Componente de erosión por corte.

7 Discusión

En este trabajo se diseñó y evaluó una metodología experimental y numérica para estudiar la erosión por lodos sobre resina epoxi, que combinó un sistema piloto de ensayos, la caracterización del erosionante, mediciones gravimétricas, observación óptica, perfilometría de contacto y un modelo computacional del flujo y del impacto de las partículas. Si bien estas etapas pudieron concretarse, la validación cuantitativa del modelo quedó limitada por aspectos geométricos y metrológicos del montaje experimental. Por lo tanto, los resultados deben interpretarse como una primera aproximación al problema, restringida a las condiciones evaluadas, que no debe extrapolarse a otros materiales, distribuciones granulométricas, concentraciones de sólidos o velocidades de flujo sin una validación experimental adicional.

La pérdida de masa de los cupones aumentó aproximadamente de forma lineal con la masa acumulada de arena transportada, lo que indica que el sistema produjo una remoción progresiva de material. Sin embargo, las tasas de erosión gravimétricas obtenidas para los diferentes ángulos resultaron similares entre sí y no reprodujeron claramente el incremento esperado para una resina epoxi con respuesta predominantemente frágil. Este resultado no implica que el ángulo de impacto carezca de influencia sobre el proceso erosivo, sino que la medición global de masa estuvo afectada por mecanismos adicionales que impidieron separar el desgaste de la cara de interés del producido en otras superficies del cupón.

La principal limitación estuvo asociada con la exposición de los cantos de las muestras. El corte de los cupones generó bordes con irregularidades, defectos y posibles microfisuras, los cuales constituyeron sitios preferenciales para el inicio y propagación del daño. Además, la orientación del cupón modificó simultáneamente el ángulo presentado por su cara principal y por sus cantos. En particular, para los cupones dispuestos a bajos ángulos, uno de los cantos quedó expuesto al flujo con una orientación próxima a la incidencia normal, condición que favorece la deformación localizada, la fractura y el desprendimiento de material. Debido a que la balanza registró la pérdida total de masa del cupón, no fue posible diferenciar la contribución correspondiente a la cara analizada de la originada en los bordes y en las superficies laterales.

Este efecto fue especialmente relevante para el cupón a 20°, dado que la proyección transversal del canto no resultó despreciable frente a la proyección de la cara principal.

Por lo tanto, una fracción significativa de las partículas pudo impactar sobre una superficie distinta de aquella cuyo ángulo se pretendía estudiar. En estas condiciones, la tasa de erosión calculada mediante la relación entre la masa perdida y la masa de arena transportada no representa exclusivamente la resistencia erosiva de la cara inclinada. Por este motivo, la ausencia de una tendencia angular clara en los resultados gravimétricos debe atribuirse principalmente a una limitación de la geometría experimental y no a un comportamiento intrínseco del material.

Las pérdidas de masa predichas por el modelo mostraron una tendencia creciente con el ángulo de impacto, mientras que los resultados gravimétricos experimentales permanecieron dentro de un rango relativamente uniforme. Esta diferencia sugiere que los mecanismos de desgaste asociados a los cantos introdujeron una contribución comparable o incluso superior al efecto angular que se pretendía evaluar. En consecuencia, la dispersión observada en los resultados experimentales no puede interpretarse como una evidencia de independencia respecto del ángulo de impacto, sino como una manifestación de las limitaciones geométricas del montaje utilizado.

A diferencia de la medición gravimétrica, las observaciones macroscópicas y microscópicas permitieron identificar una evolución sistemática del daño sobre la cara expuesta. El cupón ensayado a 20° conservó gran parte de la textura superficial inicial y presentó modificaciones localizadas de baja intensidad. A 45° se observó una mayor extensión de la zona afectada y una disminución progresiva de la definición del patrón superficial. Para 60°, el deterioro resultó más generalizado, con una mayor pérdida de nitidez de las marcas de fabricación y un incremento de la rugosidad aparente. Finalmente, el cupón ensayado a 75° presentó la mayor alteración superficial, con regiones en las cuales el patrón original se encontraba fuertemente atenuado o prácticamente ausente.

Las micrografías también evidenciaron diferencias entre las regiones superior e inferior de los cupones. En la zona superior se observaron principalmente discontinuidades e improntas de contornos aproximadamente circulares o redondeados. Esta morfología es compatible con impactos que presentan una componente normal elevada, capaces de producir indentación, deformación localizada, nucleación de fisuras y eventual desprendimiento de material. Por el contrario, en las regiones inferiores se identificaron huellas alargadas y orientadas en la dirección del flujo, asociables a mecanismos de microcorte, microarado y deslizamiento superficial. La coexistencia de ambas morfologías demuestra que el daño no estuvo gobernado por un único mecanismo, sino por una combinación de componentes normales y tangenciales de la velocidad de impacto.

La transición observada desde marcas predominantemente direccionales hacia improntas más redondeadas al aumentar el ángulo es coherente con la descomposición mecánica de la erosión en una componente de corte y otra de deformación. A bajos ángulos, la componente tangencial de la velocidad es elevada y favorece el desplazamiento de las partículas sobre la superficie. A medida que aumenta el ángulo, crece la componente normal, incrementando la energía transferida perpendicularmente al material y favoreciendo la deformación localizada, la acumulación de daño y la fractura superficial. Esta tendencia fue identificada con mayor claridad mediante microscopía que mediante pérdida de masa, lo cual destaca la importancia de utilizar técnicas de caracterización complementarias.

Los resultados de perfilometría de contacto fueron consistentes con las observaciones ópticas. Para el cupón a 20° no se identificó una depresión claramente definida, y los perfiles conservaron oscilaciones comparables con el relieve superficial inicial. A 45° comenzó a distinguirse una región central deprimida y relativamente plana, indicativa de una remoción de material más extendida. Para los ángulos superiores, los perfiles evidenciaron modificaciones topográficas de mayor magnitud y una reducción de las irregularidades superficiales originales.

Sin embargo, la interpretación cuantitativa de estas mediciones estuvo condicionada por el relieve inicial de los cupones. Las muestras presentaban marcas asociadas al proceso de fabricación mediante bolsa de vacío, cuya amplitud era comparable con algunas de las variaciones producidas por erosión. Como consecuencia, una única medición posterior al ensayo no permitió reconstruir con exactitud la superficie original de cada región. La interpolación de tres perfiles lineales permitió obtener una estimación tridimensional del volumen afectado, pero no equivale a una medición completa de la pérdida volumétrica de toda la cara, lo que conlleva a que estos volúmenes calculados deben considerarse estimaciones comparativas y no mediciones absolutas de alta exactitud.

A pesar de estas limitaciones, la ubicación general de las regiones deprimidas identificadas mediante perfilometría resultó compatible, desde un punto de vista cualitativo, con las zonas de mayor interacción partícula-superficie previstas por el modelo numérico. Esta coincidencia aporta evidencia adicional de que la simulación logra capturar adecuadamente las tendencias espaciales principales asociadas al proceso erosivo.

El modelado numérico permitió estudiar aspectos que no podían determinarse directamente mediante las técnicas experimentales. En particular, se obtuvo el campo de velocidades del fluido, las trayectorias de las partículas, la distribución de velocidades

de impacto y los ángulos locales de impacto sobre la superficie. El modelo mostró que el cupón modifica de manera sustancial el flujo dentro de la tubería. A medida que aumenta su inclinación, se incrementa la obstrucción efectiva de la sección de paso, se generan zonas de aceleración alrededor de la muestra y aparecen regiones de desaceleración o estancamiento. Por lo tanto, el ángulo geométrico nominal del cupón no coincide necesariamente con el ángulo real de impacto de todas las partículas.

Este resultado muestra que la trayectoria de las partículas no permanece paralela al eje de la tubería al aproximarse al cupón, sino que se modifica por el campo de velocidades, los gradientes de presión, la fuerza de arrastre y la inercia de las partículas. En consecuencia, sobre una misma superficie pueden coexistir impactos con diferentes velocidades y ángulos locales, lo cual genera una distribución que explica la presencia simultánea de huellas redondeadas y marcas alargadas, así como las variaciones observadas entre las regiones superior, media e inferior de los cupones.

El modelo de erosión predijo un incremento de la pérdida de masa al aumentar el ángulo nominal. Para un tiempo de funcionamiento de 2 300 s, la pérdida calculada aumentó desde aproximadamente 0,556 mg para 20° hasta 6,158 mg para 75°. De manera simultánea, la participación relativa de la componente de corte disminuyó desde 93,82 % a 20° hasta 57,07 % a 75°, mientras que la componente de deformación aumentó desde 6,18 % hasta 42,93 %. Estos resultados reproducen la transición física esperada entre un régimen dominado por interacción tangencial a bajos ángulos y otro con mayor contribución normal a ángulos elevados.

La evolución calculada por el modelo presenta una correspondencia cualitativa con las observaciones microscópicas donde la componente de corte para 20° coincide con la presencia de trazas alargadas y con el bajo nivel general de alteración de la superficie. Para 45° y 60° se obtuvo una participación progresivamente mayor de la deformación, consistente con la coexistencia de huellas direccionales e improntas redondeadas. Para 75°, si bien la componente de corte continúa siendo ligeramente predominante, la contribución de la deformación alcanza valores significativamente mayores que para los restantes ángulos. Este comportamiento reproduce correctamente la coexistencia de surcos orientados en la dirección del flujo y una elevada densidad de improntas aproximadamente circulares, asociadas a impactos con una componente normal más importante. Como consecuencia, se observa el mayor nivel de deterioro superficial generalizado registrado experimentalmente entre todos los ángulos.

Esta concordancia morfológica no constituye por sí sola una validación cuantitativa del modelo debido a que tanto la velocidad de entrada utilizada en la simulación, como

la distribución del flujo másico de partículas y los parámetros específicos del modelo de erosión no pudieron contrastarse con mediciones experimentales independientes de suficiente exactitud. Además, la pérdida de masa experimental incluyó el daño producido en los cantos, mientras que la integración numérica se realizó sobre la cara definida como superficie erosionable. Por consiguiente, ambas magnitudes no representan exactamente el mismo dominio físico y su comparación directa presenta una incertidumbre elevada.

Finalmente, las condiciones analizadas corresponden a una configuración específica de laboratorio, lo que permitió controlar las variables del ensayo y estudiar el efecto del ángulo de incidencia de forma aislada. Precisamente, el valor de esta metodología radica en que, una vez validado el modelo numérico con el sistema piloto, podrá extenderse a otras geometrías y condiciones operativas de interés industrial, tales como regímenes de flujo más complejos, mayores longitudes de transporte, variaciones temporales de la concentración de sólidos, distribuciones granulométricas más amplias y geometrías internas de mayor complejidad, como cambios de dirección o de diámetro. De esta manera, la simulación permitiría estimar las trayectorias de las partículas y las tasas locales de erosión en situaciones cuya reproducción experimental resultaría difícil o costosa.

8 Conclusiones

El trabajo permitió diseñar y construir un sistema piloto para ensayos de erosión por lodos, con el que se expusieron cupones de resina epoxi a una suspensión de agua y arena con ángulos nominales de 20°, 45°, 60° y 75°. La arena empleada como erodente se caracterizó mediante análisis de imágenes y presentó una distribución log-normal de diámetros equivalentes, con un diámetro medio de 425 μm y una desviación estándar de 111 μm.

La evaluación del desgaste mostró que la técnica de medición condiciona la información que se obtiene. La gravimetría no permitió aislar el efecto del ángulo de incidencia, dado que la pérdida de masa incluyó el desgaste de los cantos de los cupones. En cambio, la microscopía óptica y la perfilometría de contacto evidenciaron un aumento sistemático del daño superficial con el ángulo, acompañado de una transición desde marcas alargadas y direccionales, propias del corte, hacia improntas de contorno redondeado, asociadas a impactos con una componente normal más importante.

El modelo numérico reprodujo cualitativamente esa transición: la participación de la componente de deformación aumentó desde un 6 % a 20° hasta un 43 % a 75°, mientras que el corte se mantuvo como mecanismo predominante en todo el intervalo ensayado. La correspondencia entre la distribución del daño observada experimentalmente y la calculada fue, por lo tanto, cualitativa: no se alcanzó una validación cuantitativa ni predictiva del modelo.

En consecuencia, el principal aporte del trabajo es una metodología integrada, experimental y numérica, para el estudio de la erosión por lodos en materiales poliméricos, junto con una plataforma sobre la cual continuar su validación siguiendo las líneas propuestas en la Sec. 9.

9 Trabajo a futuro

A partir de los resultados obtenidos y de las limitaciones identificadas, se proponen las siguientes líneas de trabajo:

- Modificar la geometría del portamuestras y de los cupones, evitando la exposición directa de los cantos, de manera que el desgaste medido corresponda principalmente a la superficie de interés.
- Realizar ensayos a diferentes velocidades de flujo e incorporar réplicas experimentales para evaluar la influencia de esta variable y cuantificar la dispersión de los resultados.
- Mejorar la caracterización de las condiciones de ensayo mediante la medición directa del caudal o de la velocidad del fluido y de la concentración efectiva de partículas que alcanza la zona de impacto.
- Incorporar mediciones topográficas de la superficie antes y después de los ensayos, para determinar mapas locales de pérdida de espesor y el volumen removido.
- Utilizar los nuevos resultados experimentales para calibrar y validar cuantitativamente el modelo numérico, empleando condiciones independientes de aquellas utilizadas durante el ajuste.
- Una vez validada la metodología, extender el estudio a diferentes materiales, granulometrías, concentraciones de sólidos y formulaciones de erosión, con el objetivo de ampliar la aplicabilidad del modelo a condiciones de interés industrial.

Bibliografía

1. Alam, T., & Farhat, Z. N. (2018). Slurry erosion surface damage under normal impact for pipeline steels. *Engineering Failure Analysis*, *90*, 116-128.
2. Varley, R., & Leong, K. (2016). *Polymer Coatings for Oilfield Pipelines* (A. Hughes, J. Mol, M. Zheludkevich & R. Buchheit, Eds.). Springer.
3. de With, G. (2018). *Polymer Coatings: A Guide to Chemistry, Characterization, and Selected Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA.
4. Barkoula, N.-M., & Karger-Kocsis, J. (2002). Processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites. *Journal of Materials Science*, *37*, 3807-3820.
5. Pascault, J.-P., & Williams, R. J. J. (2010). Epoxy Polymers: New Materials and Innovations.
6. May, C. A. (1988). *Epoxy Resins: Chemistry and Technology* (2nd). Marcel Dekker.
7. Zawawi, M. H., Saleha, A., Salwa, A., Hassan, N. H., Zahari, N. M., Ramli, M. Z., & Muda, Z. C. (2018). A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD). *AIP Conference Proceedings*, *2030*(1).
8. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9.ª ed.). John Wiley & Sons.
9. Banks, L. V., & Ellis, B. (1982). The Glass Transition Temperatures of Highly Crosslinked Networks: Cured Epoxy Resins. *Polymer*, *23*(10), 1466-1472.
10. Zhai, W. (2026). Protective Coatings for Demanding Applications: A Special Issue on the Deposition, Characterization, and Performance of Advanced Anti-Corrosion and Lubricating Systems. *Coatings*, *16*(3).
11. Khan, A., & Saxena, K. K. (2022). A review on enhancement of mechanical properties of fiber reinforcement polymer composite under different loading rates [International Conference on Applied Research and Engineering 2021]. *Materials Today: Proceedings*, *56*, 2316-2322.
12. Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and wear of engineering materials: Second Edition*.
13. Ojala, N., Valtonen, K., Antikainen, A., Kemppainen, A., Minkkinen, J., Oja, O., & Kuokkala, V.-T. (2016). Wear performance of quenched wear resistant steels in abrasive slurry erosion. *Wear*, *354-355*, 21-31.

14. Clark, H. M., & Wong, K. K. (1995). Impact angle, particle energy and mass loss in erosion by dilute slurries. *Wear*, *186-187*, 454-464.
15. Shitole, P., Gawande, S., Desale, G., & Nandre, B. (2015). Effect of Impacting Particle Kinetic Energy on Slurry Erosion Wear. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, *1*.
16. Zienkiewicz, O., Taylor, R., & Nithiarasu, P. (2014). *The finite element method for fluid dynamics*. Butterworth-Heinemann.
17. Wilcox, D. C. (1988). Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *AIAA Journal*, *26*(11), 1299-1310.
18. Wilcox, D. (2008). Formulation of the k - ω Turbulence Model Revisited. *Aiaa Journal - AIAA J*, *46*, 2823-2838.
19. Schiller, L., & Naumann, A. (1933). Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, *77*(12), 318-320.
20. White, F. M. (2011). *Fluid mechanics* (7.ª ed.). McGraw-Hill.
21. Njobuenwu, D., & Fairweather, M. (2012). Modelling of pipe bend erosion by dilute particle suspensions. *Computers & Chemical Engineering*, *42*, 235-247.
22. Bitter, J. (1963a). A study of erosion phenomena: Part I. *Wear*, *6*(1), 5-21.
23. Bitter, J. (1963b). A study of erosion phenomena: Part II. *Wear*, *6*(3), 169-190.
24. Neilson, J., & Gilchrist, A. (1968). Erosion by a stream of solid particles. *Wear*, *11*(2), 111-122.
25. Epstein, B. R. (1947). The mathematical description of certain breakage mechanisms leading to the logarithmico-normal distribution. *Journal of The Franklin Institute-engineering and Applied Mathematics*, *244*, 471-477.
26. Barkoula, N.-M., Gremmels, J., & Karger-Kocsis, J. (2001). Dependence of solid particle erosion on the cross-link density in an epoxy resin modified by hygrothermally decomposed polyurethane. *Wear*, *247*(1), 100-108.
27. Beckmann, P., & Spizzichino, A. (1963). *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*. Pergamon Press.