

## El efecto del espesor del recubrimiento en la erosión por cavitación de los sistemas epóxicos

### The effect of coating thickness on cavitation erosion of epoxy systems

G.L. García<sup>1</sup>   A. Espinosa<sup>2</sup>  J.F. Santa<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Grupo de Diseño Mecánico Computacional, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Calidad del Software, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

<sup>3</sup> Grupo de Tribología y Superficies, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

## Resumen

**Introducción:** la erosión por cavitación es un problema común en las máquinas hidráulicas, ya que reduce su eficiencia. Los recubrimientos epóxicos se utilizan con frecuencia para reparar componentes desgastados y mejorar su durabilidad.

**Objetivos:** este trabajo estudia el comportamiento frente a la erosión por cavitación de tres sistemas de recubrimientos epóxicos multicapa con diferentes espesores, con el fin de evaluar su resistencia y determinar la configuración más efectiva.

**Metodología:** las pruebas de cavitación se realizaron conforme a la norma ASTM G32. Se utilizó un modelo de onda de choque débil para calcular el comportamiento mecánico de los recubrimientos sometidos a desgaste por cavitación, determinando los valores máximos de presión en la superficie (Pmax). Las huellas de desgaste producidas por el impacto de las ondas de choque se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para caracterizar el daño superficial y los mecanismos de desgaste.

**Resultados:** el recubrimiento más delgado, con un espesor de 380  $\mu\text{m}$ , presentó el período de incubación más largo, de 271 segundos. En cambio, el recubrimiento más grueso mostró la mayor tasa de erosión, de 2822 mg/min. Los valores de presión calculados fueron significativamente menores que la dureza del sistema de recubrimiento (H), indicando que el daño no se debió a deformación plástica directa. Las observaciones por SEM revelaron la formación de fisuras y la coalescencia de grietas durante el período de incubación.

**Conclusiones:** los resultados demuestran que el espesor del recubrimiento influye fuertemente en la resistencia a la cavitación: los recubrimientos delgados retrasan el inicio de la erosión, mientras que los más gruesos presentan mayores tasas de desgaste debido a tensiones internas acumuladas y propagación de grietas.

**Palabras clave:** Cavitación acústica, ASTM G32, daños por cavitación, sistemas de recubrimiento epóxico, fatiga; ondas de choque

## Abstract

**Introduction:** cavitation erosion is a common issue in hydraulic machines because it decreases their efficiency. Epoxy coatings are often applied to repair worn components and improve their durability.

**Objectives:** this work studies the cavitation erosion behavior of three multilayer epoxy coating systems with different thicknesses to evaluate their resistance and identify the most effective configuration.

**Methodology:** cavitation tests were conducted according to the ASTM G32 standard. A weak shock model was used to calculate the mechanical behavior of the coatings under cavitation wear, determining the maximum pressure values at the coating surface (Pmax). The wear marks produced by the impact of shock waves were analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM) to characterize the surface damage and wear mechanisms.

**Results:** the thinner coating, with a thickness of 380  $\mu\text{m}$ , exhibited the longest incubation period of 271 seconds. In contrast, the thickest coating showed the highest erosion rate of 2822 mg/min. The calculated pressures from impact shock waves were significantly lower than the coating hardness (H), indicating that surface damage was not due to direct plastic deformation. SEM observations revealed the formation of crazing and crack coalescence during the incubation period, confirming that surface fatigue and microcrack propagation dominate the wear process.

**Conclusions:** the results demonstrate that coating thickness strongly influences cavitation resistance. Thinner coatings delay the onset of erosion, while thicker layers experience higher erosion rates due to accumulated internal stresses and crack propagation.

**Keywords:** Acoustic Cavitation, ASTM G32, Cavitation Damage, Epoxy Coating Systems, Fatigue; Shock Wave.

### ¿Cómo citar?

García GL, Espinoza A, Santa JF. El efecto del espesor del recubrimiento en la erosión por cavitación de los sistemas epóxicos. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(3)e-20114715

<https://doi.org/10.25100/iyv.v27i3.14715>

Recibido: 28/01/25

Revisado: 25/04/25

Aceptado: 17/09/25

Online: 23/10/25

### Correspondencia

glgarcia@unal.edu.co



### ¿Por qué se realizó este estudio?

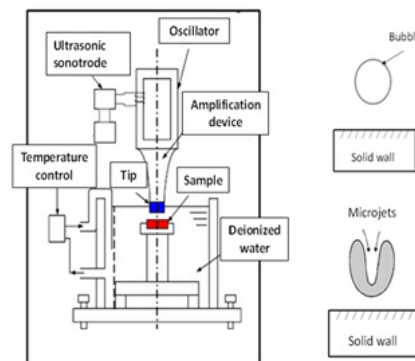
Este trabajo se realizó para evaluar el efecto del espesor del recubrimiento en la erosión por cavitación de sistemas epóxicos. Además, se estudiaron los mecanismos de daño de los recubrimientos durante el período de incubación, donde las pérdidas de masa son insignificantes.

### ¿Cuáles fueron los hallazgos más relevantes?

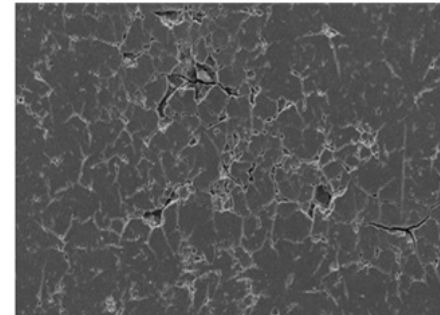
El período de incubación más largo (271 s) se encontró para el recubrimiento más delgado (380  $\mu\text{m}$ ). La mayor tasa de erosión (2822 mg/min) se encontró para el recubrimiento más grueso. El análisis de los mecanismos de desgaste mostró la formación de grietas y coalescencia de grietas en la superficie de los recubrimientos durante el período de incubación.

### ¿Qué aportan estos hallazgos?

Los hallazgos son útiles para estimar la vida útil de los recubrimientos epóxicos cuando se aplican a componentes hidráulicos. Además, las tasas de erosión y el período de incubación pueden utilizarse para tomar decisiones sobre el espesor.



**Cavitation Erosion**



**Wear rates and erosion mechanisms**

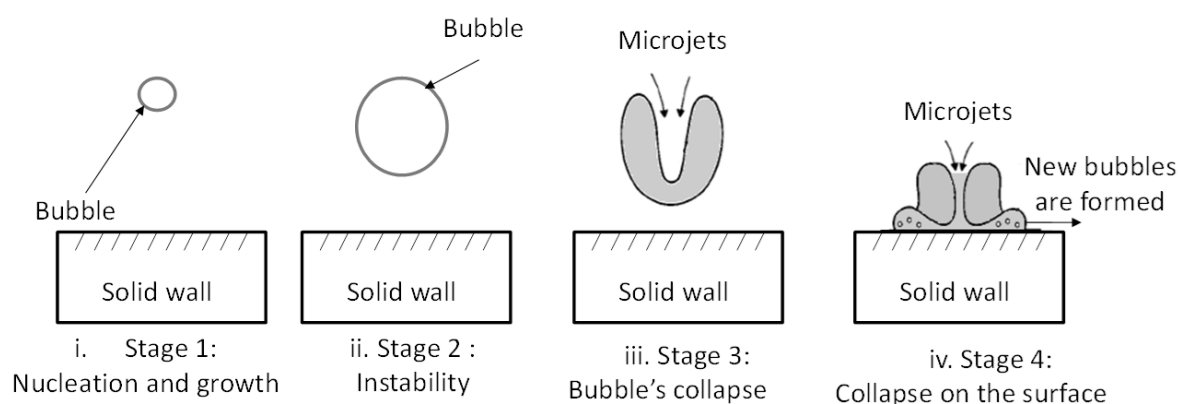


## Introducción

La cavitación es un fenómeno complejo relacionado con la formación de burbujas de vapor y/o racimos de burbujas (1). Las burbujas crecen, colapsan y rebotan repentinamente dependiendo de las condiciones hidrodinámicas y termodinámicas del flujo cavitante (2-4). Durante la fase de colapso, las burbujas pueden generar altas temperaturas y la presencia de ondas de choque afecta a la superficie y causa erosión por cavitación (5-6).

Se han publicado muchos estudios sobre daños por cavitación, pero la mayoría se concentran en metales y algunas cerámicas (7-13). Sin embargo, existe un interés creciente en el comportamiento de cavitación bajo condiciones de laboratorio de algunos polímeros de ingeniería (14-17), con posible aplicación en la reparación de sistemas hidráulicos. Sin embargo, se requieren más investigaciones para correlacionar el daño con los parámetros de cavitación y las propiedades mecánicas, ya que los resultados obtenidos por diferentes investigadores mediante modelado y pruebas experimentales muestran variaciones significativas en los resultados (6,18-24). En los últimos 20 años, se han utilizado herramientas computacionales para proporcionar una comprensión más profunda de la cavitación, pero muchos fenómenos físicos que surgen durante la fase de colapso de los cúmulos de burbujas aún están en discusión (6,20-24).

La cavitación acústica es una interacción física de un líquido, burbujas y/o un cúmulo de burbujas en un campo de ondas acústicas que conducen a inestabilidades en el fluido por tensiones de tracción, la formación y crecimiento de burbujas, entre otros eventos. Cuando la población de burbujas y/o los grupos de burbujas son sometidos a procesos de oscilación con ondas de presión de alta amplitud, se generan pulsaciones no lineales que provocan la formación de microchorros de alta velocidad y concentración de presión que provoca grandes tensiones cortantes en la superficie (25-26). La Figura 1 muestra un diagrama del proceso de cavitación cuando ocurre sobre o cerca de una superficie sólida, mostrando las etapas durante el colapso de las burbujas.



**Figura. 1.** Representación esquemática del fenómeno de cavitación que ilustra eventos de (i) nucleación y crecimiento, (ii) diámetro máximo y inicio de inestabilidad, (iii) colapso y formación de microchorros, (iv) colapso cerca de la superficie. Adaptado de (2).

Durante la cavitación acústica, se forman algunas burbujas y otras crecen a partir de burbujas preexistentes. Este proceso comienza en la parte negativa del ciclo acústico, cuando la presión local cae por debajo de la presión de vaporización. La expansión (rarefacción) de la onda acústica es causada por la separación de fluidos en los sitios que contienen las cavidades. Esos sitios se conocen como puntos débiles del fluido. El número de burbujas que se forman y/o crecen durante el ciclo de rarefacción es proporcional a la densidad de los puntos débiles (27). Luego, cuando la presión de la onda acústica es positiva, el crecimiento de la burbuja disminuye, lo que provoca un colapso repentino. Este fenómeno ha sido descrito previamente por Leong y sus colaboradores (28).

Se han utilizado recubrimientos para proteger las superficies frente a la erosión por cavitación. Los recubrimientos poliméricos son interesantes porque pueden aplicarse fácilmente sobre superficies metálicas. Varios autores han estudiado la erosión por cavitación de recubrimientos epoxi (29-33). P. Veerabhadra Rao et al. (29) estudiaron la erosión por cavitación de resinas epoxi para hormigón en flujo de agua. Estudiaron dos resinas epoxi, una con endurecedor de anhídrido ftálico, y reportaron el periodo de incubación más largo (60 minutos). Otro resultado importante es que P. Veerabhadra Rao et al. estudiaron los mecanismos al final de las pruebas y encontraron que el tipo de fractura más habitual era el modo frágil. También descubrieron que las resinas epoxi endurecidas con amina eran más resistentes a la cavitación y observaron marcas que llamaron apariencia "derretida". Sin embargo, no estudiaron el mecanismo que conducía a la fractura frágil.

J. Zhang *et al.* (30) estudió la resistencia de los recubrimientos no metálicos a la abrasión por sedimentos y la erosión por cavitación en un banco de pruebas de disco giratorio. Se evaluaron varios recubrimientos: epoxi sin rellenar y lleno, copoliámida, epoxi de nailon y poliuretano. Los autores encontraron que la mayor resistencia a la erosión por cavitación se obtenía con recubrimientos de poliuretano. Cuando los autores intentaron correlacionar propiedades mecánicas con resistencia al desgaste, descubrieron que no era posible establecer relaciones debido a la complejidad del proceso.

Chi, S., Park, J., & Shon (31) también estudiaron la resistencia a la erosión por cavitación de resinas epoxi utilizadas en la industria naval, suministradas por Kukdo chemical en Corea del Sur. Los autores estudiaron recubrimientos epoxi comerciales (EP), recubrimientos epoxi reforzados con escamas de vidrio (EGP) y recubrimientos de silicona (SP). Los recubrimientos de silicona reportaron una temperatura de transición vítrea relativamente más baja y una mayor estabilidad mecánica, además de mostrar mejor resistencia a la erosión por cavitación. Los autores también concluyeron que la resistencia a la erosión por cavitación es mayor en recubrimientos con mejores propiedades dúctiles y resistentes que en materiales de mayor resistencia o dureza.

Más recientemente, C.E. Correa et al. (32) estudiaron la resistencia a la erosión por cavitación de recubrimientos epoxi y poliuretano rellenos con partículas inorgánicas. El periodo de incubación más largo se reportó para los recubrimientos epoxi. El mecanismo de fallo más importante fue la eliminación de partículas y la formación de grietas alrededor de los rellenos. Posteriormente, los autores (33) retiraron los rellenos de la matriz para evaluar si se mejoraba la erosión por cavitación y si también se modificaba el recubrimiento de unión. En ese artículo estudiaron la etapa final de daño en los sistemas de recubrimiento durante el periodo de incubación. Los autores estudiaron

la erosión por cavitación de sistemas epoxi, pero el comportamiento de cavitación se reportó en términos de longitud de grieta y no pérdidas de masa. Además, los mecanismos se estudiaron al final del periodo de incubación, no durante el proceso, y no se realizó ninguna simulación para estudiar el fenómeno.

Otros autores (34) han investigado cambios en la morfología superficial inducidos por la erosión por cavitación de recubrimientos basados en cordierita con una matriz epoxi aplicada sobre un sustrato de aluminio. Las pruebas mostraron la formación de pequeños pozos en las primeras etapas del proceso de cavitación; sin embargo, no se puso énfasis en la fase de incubación.

Por otro lado, Caisheng Huang, et al., (2024) (35) estudiaron los mecanismos de fallo de los recubrimientos epoxi y poliurea con una capa intermedia de mortero epoxi mediante ensayos ultrasónicos de cavitación durante las etapas iniciales de la erosión por cavitación. La investigación se centró en la formación de fosas durante el proceso de cavitación. El mortero epoxi como capa intermedia mejoró significativamente la resistencia a la cavitación del material al mejorar su capacidad de absorción de energía, mientras que la excelente capacidad de deformación elástica de la poliurea redujo la probabilidad de desprendimiento del material. No obstante, se requiere más investigación para comprender los mecanismos subyacentes, como el posible impacto del desarrollo de fosas de cavitación secundarias sobre el recubrimiento intermedio en la progresión de la fosa primaria de cavitación.

En este artículo se estudió la erosión por cavitación de los sistemas de recubrimiento epoxi sometidos a ensayos de cavitación vibratoria, según la norma ASTM G32-99. El objetivo era investigar el efecto del espesor en la erosión por cavitación y, dado que se esperaba que las propiedades mecánicas dependieran del grueso, también se estudiaron. La presión de impacto en la superficie se estimó considerando el modelo de onda de choque débil propuesto por Colonius y sus colaboradores (22-24). Además, se propusieron correlaciones entre el daño observado en la superficie, los mecanismos de desgaste y los resultados de la simulación para el recubrimiento epoxi. Se estudiaron los mecanismos de desgaste durante el periodo de incubación para comprender los eventos que conducen a altas tasas de desgaste al final de las pruebas. Una hipótesis de investigación para este trabajo es que el grosor de los recubrimientos influirá en su resistencia a la erosión por cavitación. Además, durante el periodo de incubación, hay daños en los recubrimientos aunque las pérdidas de masa sean insignificantes.

## Materiales y métodos

### Preparación y caracterización del recubrimiento

Los sistemas de recubrimiento polimérico multicapa se aplicaron sobre una placa de acero (aproximadamente 75 mm de largo x 25 mm de ancho x 3 mm de grosor). Se aplicaron dos tipos diferentes de resinas utilizando el mismo procedimiento. Inicialmente, se aplicaron dos capas de resina epóxi-fenólica (EPF) sin refuerzos sobre la superficie de un sustrato de acero inoxidable (grado ASTM A743 CA6NM). Se cortaron placas de acero inoxidable del tipo ASTM A743 CA6NM con dimensiones aproximadas de 75 mm x 25 mm x 3 mm de grosor. Se realizó un proceso inicial de pulido utilizando una máquina rotativa equipada con papel de lija circular de grano 180 para obtener progresivamente una superficie homogénea. Un segundo proceso de pulido mecánico se

realizó utilizando una pulidora manual de alta velocidad con discos circulares de lija de grano 120 para simular el posible acabado superficial que un operador podría aplicar manualmente a las palas de una turbina afectada por cavitación y reparada mediante procedimientos convencionales de soldadura por arco eléctrico. Posteriormente, las superficies de la muestra pasaron por un proceso de desengrasado y limpieza con acetona durante 10 minutos utilizando un dispositivo ultrasónico vibratorio. Finalmente, se realizó un proceso de secado durante 2 minutos sobre las muestras de acero inoxidable usando aire seco a una presión de 4 bar.

Al final de los procedimientos de preparación superficial, se obtuvo una rugosidad que iba de  $R_a = 3,5\text{--}4,3\text{ }\mu\text{m}$ , medida por un perfilómetro de contacto. Tras la preparación superficial de los sustratos de acero inoxidable, se prepararon muestras del sistema de recubrimiento con 2, 4 y 5 capas de recubrimiento epoxi, además de la capa de anclaje y cebación aplicada al sustrato. La preparación superficial es importante porque asegura la adhesión mediante anclaje mecánico en la rugosidad de la superficie. Además, la limpieza y eliminación de contaminantes superficiales mejoran aún más la adhesión.

Para las resinas, se utilizaron los componentes reactivos de resina epoxi basada en bisfenol-A, agentes viscosos de amidoaminas y endurecedores de la familia de poliaminas aromáticas, entre otros. Además, los recubrimientos contienen partículas de dióxido de titanio, silicio y óxido de aluminio. La función estructural de la resina EPF era mejorar la adhesión del recubrimiento (capa de unión) a la placa de acero inoxidable. Tras aplicar la capa de unión, se aplicó resina epoxi (EP) sin refuerzos sobre la resina epóxi-fenólica en varias capas (multicapa) para obtener varios espesores de recubrimiento. El EP se utilizaba para generar adhesión química a la resina (EPF) y resistir la cavitación.

Las dos resinas (EPF) y (EP) se aplicaban con un pincel sintético mediante un proceso de pintura manual. El grosor medio obtenido para las dos capas de resina (EPF) osciló aproximadamente entre  $90\text{ }\mu\text{m}$  y  $125\text{ }\mu\text{m}$ . En el caso de la resina resistente a la cavitación (EP), el grosor medio de cada capa osciló entre  $130\text{ }\mu\text{m}$  y  $160\text{ }\mu\text{m}$ . Finalmente, el grosor total de cada sistema de recubrimiento correspondió a la suma de los grosores de las resinas EPF y EP aplicadas en capas del sustrato de acero. El grosor final de los recubrimientos a probar en erosión por cavitación fue de  $380\pm 20\text{ }\mu\text{m}$ ,  $720\pm 20\text{ }\mu\text{m}$  y  $920\pm 20\text{ }\mu\text{m}$ .

Los espesores reportados se determinaron con base a pruebas en las que se aplicaron diferentes cantidades de capas. En este caso, se aplicaron cinco capas de resina epoxi más una capa de anclaje epóxi-fenólico sobre el sustrato para lograr el mayor grosor (920 micras). Para los recubrimientos con espesores de 720 y 380 micras, se aplicaron cuatro y dos capas, respectivamente, además de la misma capa de anclaje.

Las pruebas de microindentación se realizaron en un equipo instrumentado Zwick/Roell Z2.5 (TS1S) equipado con un microscopio óptico y una cámara CCD disponibles en el laboratorio de Materiales de la Universidad Carlos III de Madrid-España. Durante las pruebas, la temperatura fue de  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  y la humedad relativa de  $42 \pm 2\%$ . Se realizaron mediciones en la superficie de los recubrimientos con una carga máxima de 5 N y una velocidad de indentación de  $1\text{ Ns}^{-1}$ . El tiempo utilizado durante el cesión fue de 10 segundos y se utilizó un indentador Vickers según la norma DIN 50359-1. En



todos los casos, los resultados reportados son la media de al menos cinco mediciones diferentes. También se reportó la desviación estándar ( $\sigma$ ) de las propiedades.

Pruebas de cavitación

Las pruebas de cavitación se realizaron con el dispositivo vibratorio TELSONIC ULTRASONICS DG-2000 (potencia de 2000 W) y las condiciones de prueba se ajustaron a la norma ASTM G32-09. Los parámetros experimentales utilizados para todas las pruebas de cavitación vibracional se enumeran en la Tabla 1. Fig. 2. muestra un esquema de la configuración de pruebas. El equipo contaba con una unidad de recirculación de agua para controlar la temperatura del agua desionizada.

Tabla 1. Parámetros utilizados para pruebas de cavitación vibratoria.

Parámetro de cavitación	Valor
Distancia desde la punta del sonotrodo hasta la muestra de prueba	1 mm
Frecuencia de oscilación de la punta del sonotrodo	20 kHz
Amplitud pico a pico de la punta del sonotrodo	50 $\mu$ m
Diámetro de la punta del sonotrodo	15,9 $\pm$ 0,05 mm
Fluido de cavitación	Agua desionizada
Temperatura del fluido de cavitación	25 $\pm$ 1 $^{\circ}$ C
Tipo de prueba	Indirecto con la muestra sumergida

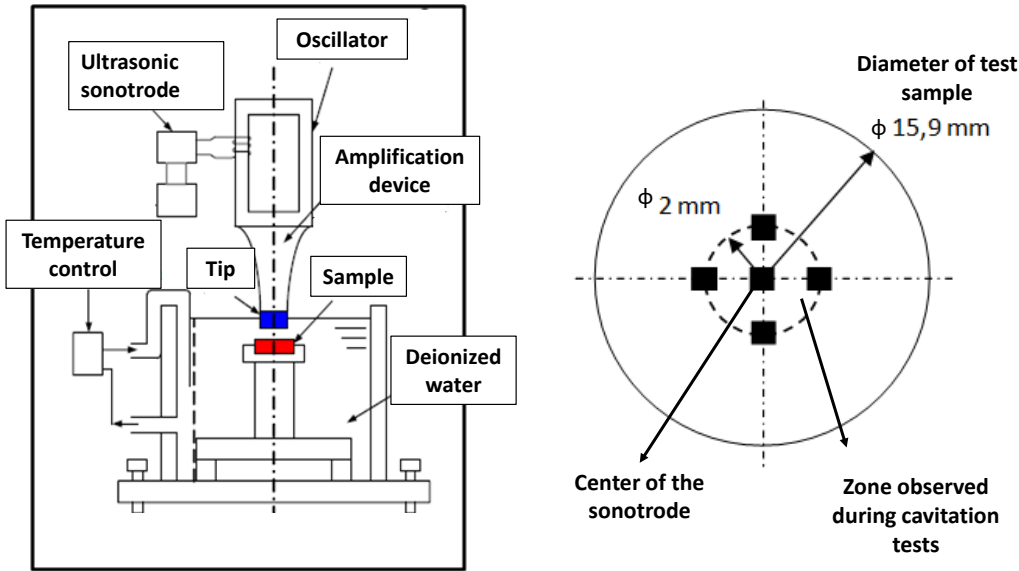


Figura 2. Esquema de la configuración de pruebas

Las muestras de prueba se molieron utilizando varios papeles de esmeril (240, 320, 400, 600 y 1000). En todos los casos, la rugosidad cuadrática media ( $R_q$ ) de la raíz fue de 0,12 a 0,16  $\mu\text{m}$ , siendo mucho menor que el valor recomendado en el estándar ( $R_a=0,8 \mu\text{m}$ ). Se realizaron pruebas de cavitación durante 225 segundos y cada 15 segundos se extraían muestras de prueba para ser observadas en el SEM y así evaluar los mecanismos de daño. La masa de las muestras también se midió en una escala para evaluar la tasa de erosión. Tras las pruebas, se calculó el periodo de incubación para cada recubrimiento. Posteriormente, se incrementaron los intervalos de cavitación para estudiar el comportamiento de cavitación de los recubrimientos durante la etapa acelerada. Se ampliaron las pruebas para cada material para evaluar los mecanismos de desgaste. Al final de las pruebas de cavitación y tras cada parada, las muestras se limpiaban con agua desionizada, se secaban con aire seco a 20 °C y se ponderaban en una escala analítica con una resolución de (0,00001 g). En todos los casos, se analizaron al menos tres muestras y se reportaron los valores medios.

### Observación de superficies de cavitación

Se observó daño por cavitación en una pequeña zona central circular de aproximadamente 2 mm de radio. El área seleccionada mostró un mayor daño superficial debido a las sucesivas ondas de choque que impactan la superficie y los microractores generados durante la implosión de los grupos de burbujas. Dado que la cavitación se presenta de forma aleatoria y el daño no es uniforme en la superficie de la muestra de prueba, se seleccionó la misma zona para evaluar la evolución del daño y los mecanismos de desgaste de todas las muestras de prueba.

Se ampliaron las pruebas para cada material para evaluar los mecanismos de desgaste. La extensión de los periodos de prueba indica que, para estudiar los mecanismos del daño por cavitación, las pruebas se prolongaron más allá del periodo de incubación.

### Estimación de las presiones de cavitación

La presión de cavitación se calculó según las directrices propuestas por Colonius y sus colaboradores (22-24). En su trabajo, presentaron un procedimiento sistemático para estimar las características dinámicas del proceso de cavitación acústica en condiciones de flujo burbujeante, comparable a lo que ocurre en las pruebas de cavitación vibratoria. Los autores son conscientes de que la evaluación de la presión creada por la onda de choque, en la cavitación vibratoria, donde el mecanismo hidrodinámico es diferente al creado por burbujeo. Sin embargo, en este artículo se utilizó la ecuación para evaluar la presión máxima y compararla con las propiedades mecánicas de los recubrimientos. El modelo de onda acústica para el choque débil está regido por la ecuación característica (1):



$$P_{\max} = \begin{cases} P_A & \text{if } x < \frac{\pi \rho_0 c_0^3}{2 \beta_0 P_A \omega} \\ \frac{\pi P_A}{1 + P_A \left( \frac{x \beta_0 \omega}{\rho_0 c_0^3} \right)} & \text{if } x > \frac{3 \pi \rho_0 c_0^3}{\beta_0 P_A \omega} \end{cases} \quad (1)$$

Donde:  $P_A$  es la amplitud de la onda de presión acústica en la pared del recubrimiento,  $\rho_0$  y  $c_0$  son la densidad y velocidad del sonido a temperatura ambiente,  $\omega$  es la frecuencia de oscilación del sonotrodo y  $\beta_0$  es un coeficiente de no linealidad termodinámica para la mezcla burbujeante de flujo cavitante. Los valores de los parámetros en la ecuación anterior para modelar la débil onda de choque relacionada con la amplitud de  $P_A$  oscilación, el radio inicial de  $R_0$  la burbuja, la velocidad del sonido  $c$  en agua destilada a 20°C, se tomaron de varias referencias, (4,20-23,36). En todos los casos, el criterio utilizado para seleccionar los valores del parámetro fue que los investigadores hubieran demostrado validación experimental en sus desarrollos analíticos.

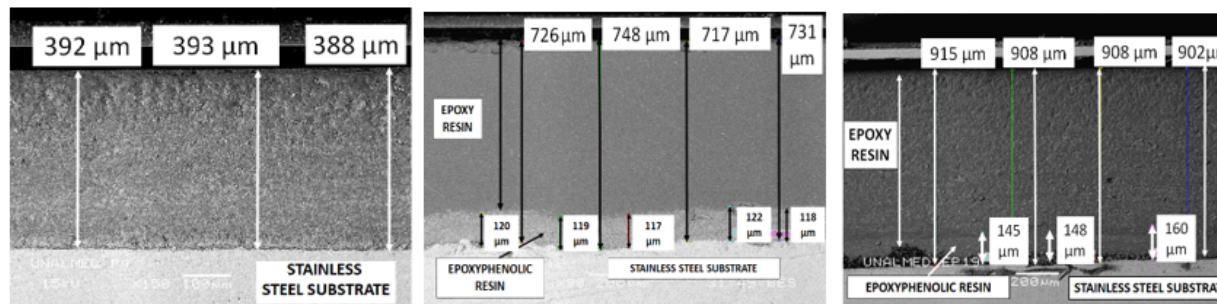
Las condiciones establecidas para la predicción de las presiones de impacto en la superficie del recubrimiento, durante la prueba de cavitación vibratoria, fueron las siguientes: porcentaje de concentración de burbujas dentro del cúmulo del 1%, ( $\alpha = 0.01$ ); densidad del agua desionizada a 20°C,  $\rho_{\text{water}} = 998 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ; coeficiente politrófico del fluido-vapor de la mezcla, ( $\gamma = 1.4$ ); frecuencia de oscilación del sonotrodo, ( $f = 20000 \text{ Hz}$ ); el radio inicial de la burbuja de vapor dentro de los cúmulos, ( $R_0 = 20 \mu\text{m}$ ); coeficiente de amortiguación debido a efectos viscosos en el fluido ( $\delta = 0.040$ ); oscilación acústica de la burbuja dentro del cúmulo, ( $\omega_0 = 1.5 \text{ MHz}$ ). Los valores típicos de caída de presión ( $P_s$ ) para los grupos de agua se tomaron como 5 y 10 MPa (22).

## Resultados y discusión

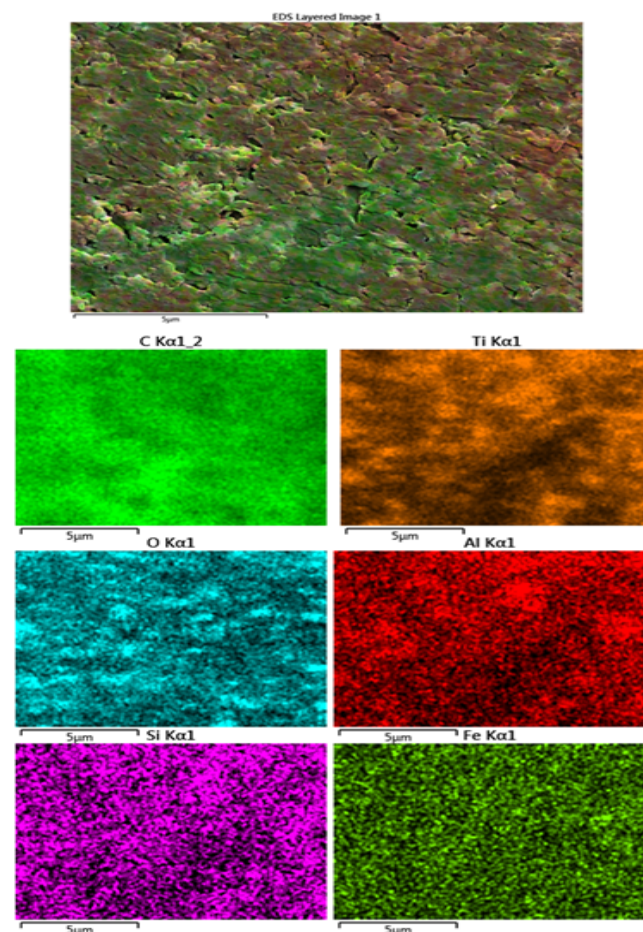
### Caracterización de recubrimientos

La Figura 3 muestra tres secciones transversales típicas de los recubrimientos observados en el SEM. Los grosores de los recubrimientos eran  $380 \pm 20 \mu\text{m}$ ,  $720 \pm 20 \mu\text{m}$  y  $920 \pm 20 \mu\text{m}$  para dos, cuatro y cinco capas, respectivamente. A partir de ahora, los recubrimientos se denominarán 380, 720 y 920. La resina (EPF) se une mecánicamente a las irregularidades superficiales del sustrato de acero, actuando como capa de acoplamiento, mientras que la resina (EP) se une químicamente a la resina (EPF). La variación en el grosor de los recubrimientos se considera normal según la técnica utilizada para fabricar los recubrimientos (aplicación manual con pincel). Los recubrimientos contienen partículas de dióxido de titanio, silicio y óxido de aluminio. Existen pequeños defectos en la superficie, como olas y arañazos causados por el cepillado manual, pero no se medieron en este trabajo. Los resultados del mapeo EDS (figura 4) mostraron que los recubrimientos con un grosor de  $720 \pm 20 \mu\text{m}$  tienen un alto contenido de aluminio, silicio y titanio. El contenido de esos elementos

está relacionado con los rellenos utilizados para fabricar los recubrimientos: óxido de aluminio y silicio y óxido de titanio. Cabe destacar que este trabajo no se centró en las características microestructurales del recubrimiento, sino en el comportamiento del desgaste bajo cavitación y los mecanismos de desgaste. La imagen EDS de las muestras se tomó antes de las pruebas de erosión por cavitación.



**Figura. 3.** Sección transversal de tres sistemas de recubrimiento observados en el SEM. a) Recubrimientos con  $380 \pm 20$  µm de espesor. b) Recubrimientos con  $720 \pm 20$  µm de espesor c) Recubrimientos con  $920 \pm 20$  µm de espesor.



**Fig. 4.** Mapeo EDS de la sección transversal de recubrimientos con un grosor de  $720 \pm 20$  µm que contienen altos contenidos de aluminio, silicio y titanio.

La Tabla 2 muestra un resumen de las propiedades mecánicas de los recubrimientos. Se muestran la dureza, el módulo de Young y la resistencia en elástico. Los resultados muestran que se encontraron la mayor dureza y el mayor módulo de Young para el recubrimiento más fino. La misma tabla muestra el periodo de incubación en segundos y la tasa máxima de erosión (mg/min). El mejor comportamiento en términos de periodo de incubación se encontró para el recubrimiento 380 (más fino) y también mostró la tasa de erosión más baja. En términos generales, las propiedades mecánicas de los recubrimientos 720 y 920 son muy similares.

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas y tiempos de incubación (TI) de los recubrimientos dependiendo del grosor (W). (33)

W	L	Propiedades mecánicas (*)				Incubatio Periodo n	Erosión tasa*
		H	E	Sy	H/E		
µm	#	Mpa	GPa	Mpa	Adim.	s	mg/min
380±20	2	136.00	2.800	45.33	0.0486	271	298 ±52
		σ=9.0%	σ=8.7%				
720±20	4	109.80	2.054	36.60	0.0535	142	312±56
		σ=5.2%	σ=2.8%				
920±20	5	116,00	2.130	38.66	0.0545	164	2822±423
		σ=10,9%	σ=5.7%				

(\*): Propiedades mecánicas obtenidas mediante microindentación instrumentada.

L: Capas de EP M: Tasa máxima de erosión

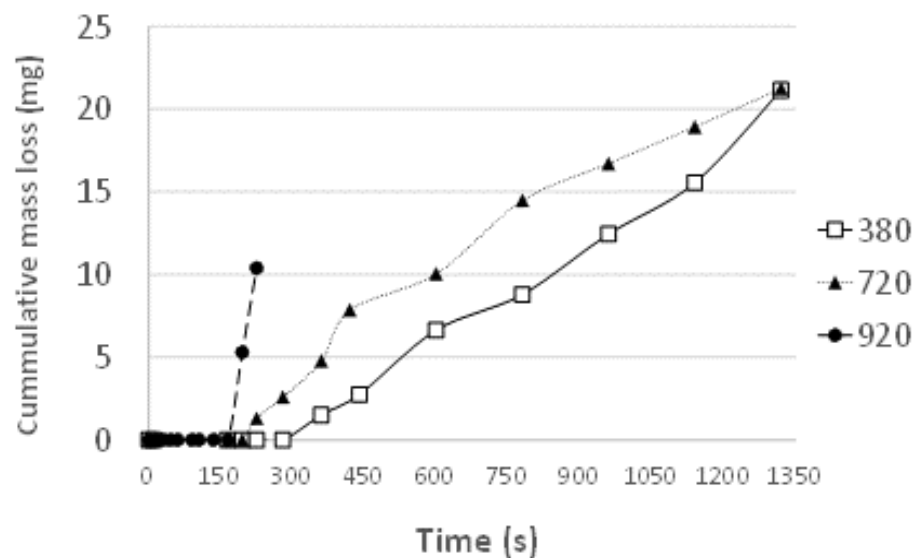
\* El error para la tasa de erosión se calculó incluyendo la incertidumbre de los Tipos A y B

Erosión por cavitación

La Figura 5 muestra los resultados de pruebas de cavitación vibratoria de sistemas de recubrimiento. A partir de la curva se puede concluir que existe un periodo de incubación en el que las pérdidas de masa son insignificantes para recubrimientos de diferentes grosores. La prueba para el recubrimiento 920 se detuvo tras 225 s porque la pérdida de masa era alta y el recubrimiento tenía daños graves. El valor de la tasa máxima de erosión de los recubrimientos durante las pruebas de erosión por cavitación (la pendiente máxima de la curva de pérdidas de masa) también se muestra en la tabla 2. Se observó la tasa máxima de erosión para el recubrimiento de 920 (más grueso) (µm). La tasa de erosión de los recubrimientos con la tasa más alta (920) fue aproximadamente nueve veces superior a la tasa de erosión de los recubrimientos, mostrando el mejor comportamiento (380). Este resultado es importante ya que las diferencias en las tasas de erosión son mucho mayores que las diferencias en el periodo de incubación. Las diferencias en la tasa de erosión pueden estar relacionadas con la rigidez del sistema de recubrimiento. La relación H/E proporciona información relacionada con la deformación elástica que debe romperse y está fuertemente correlacionada con la disipación de energía en contacto mecánico. Cuando el

recubrimiento es más fino, el sistema se vuelve menos rígido y la energía que impacta la superficie se disipa a través de las capas del recubrimiento y el sustrato. El recubrimiento con la mayor resistencia mecánica y el mayor módulo de Young mostró la mejor resistencia a la cavitación. Al final de la prueba, se observaron pérdidas de masa similares para el recubrimiento 380 (15,5 mg) y el recubrimiento 720 (18,9 mg). La mayor resistencia al desgaste (en términos de pérdidas de masa) se mostró en el recubrimiento 380 (2 capas de EP) seguido por el recubrimiento con un grosor de 720  $\mu\text{m}$  (4 capas de EP).

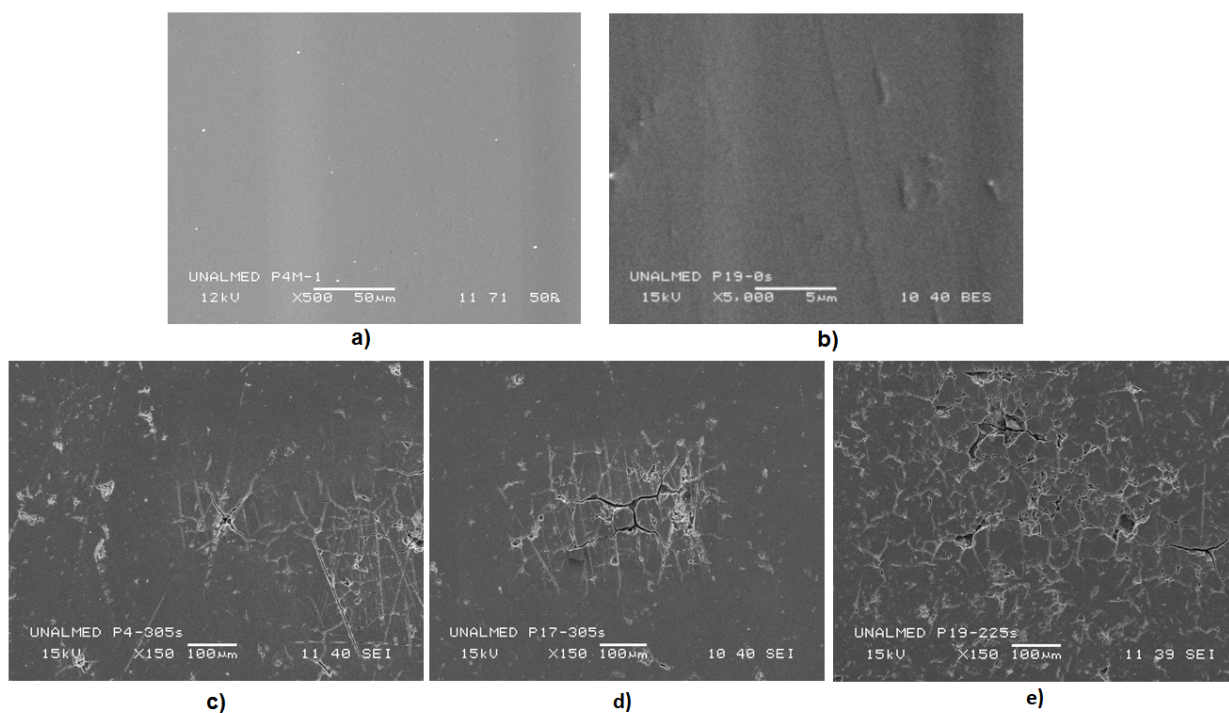
El periodo de incubación calculado a partir de la cifra se mostró previamente en la Tabla 2. El periodo de incubación (TI) más largo de 271 segundos se observó para el recubrimiento de 380 grados (2 capas de EP), cuyas propiedades mecánicas (Tabla 2) corresponden a los valores más altos de microdureza (H), módulo de Young (E) y esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ ).



**Figura. 5.** Pérdida masiva acumulada de resinas epoxi tras la prueba de cavitación

#### Daño por cavitación

Las figuras 6a y 6b muestran imágenes de los recubrimientos 380 y 920 antes de las pruebas de cavitación. Las figuras 6c a 6e muestran una imagen representativa del daño de los sistemas de recubrimiento epoxi al final del periodo de incubación durante las pruebas de erosión por cavitación. Hay evidencias de deformación plástica y grietas en la superficie de los recubrimientos. Como los recubrimientos estaban previamente deformados por los abrasivos en los papeles de esmeril, en algunas zonas aparecían líneas paralelas en la superficie y se formaban grupos de burbujas preferentemente. A partir de las superficies desgastadas mostradas en la Figura 5, el recubrimiento con menos defectos superficiales también reportó las menores pérdidas de masa y la menor tasa de erosión (grosor 380  $\mu\text{m}$ ). Los recubrimientos 920 tienen más grietas causadas por la cavitación incluso en tiempos más cortos. Estas muestras (920) no se evaluaron hasta 225 s debido a que el daño era severo.



**Figura. 6.** Superficies desgastadas tras la cavitación para recubrimientos de varios grosores. La superficie del recubrimiento de 920 $\mu$ m es la más afectada por los impactos de la cavitación. a) Muestreo de 380  $\mu$ m antes de las pruebas de cavitación b) Muestra 920  $\mu$ m antes de las pruebas de cavitación c) Recubrimiento 1: Espesor 380  $\mu$ m. Después de 305 s d) Recubrimiento 2: Espesor 720  $\mu$ m. Después de 305 s e) Recubrimiento 3: Espesor 920  $\mu$ m. Después de 225 s

Tras la observación inicial de las superficies desgastadas de todos los recubrimientos, se seleccionó el recubrimiento 720 para caracterizar el daño en la superficie durante las pruebas. La Figura 7 muestra el daño por cavitación durante la prueba, incluido el periodo de incubación, del recubrimiento 720 en la zona más afectada. En la figura 7 se pueden observar grietas causadas por fatiga en todos los sistemas de recubrimiento. Aunque los recubrimientos aún están en periodo de incubación, se pueden identificar varios mecanismos importantes.

Inicialmente, se forma una grieta en la superficie y se propaga radialmente alrededor de un defecto de los recubrimientos (véase la flecha 1 y 3 en la Figura 7a). Durante la etapa inicial en la que aparecieron las grietas y la propagación de grietas, las pérdidas de masa siguen siendo insignificantes, ya que no hay un desprendimiento medible de partículas de la superficie. Las grietas aparecen inicialmente en áreas donde el material ha agotado su capacidad de deformación. Las grietas pueden diferenciarse de las grietas ya que las primeras no tienen ramas y tienen fibrilación entre las paredes (flecha 3 en la figura 7a). Tras el desgarrado, aparece deformación plástica en la superficie y se forman nuevos defectos causados por el desgarrado y nuevas grietas (flechas en la Figura 7b).

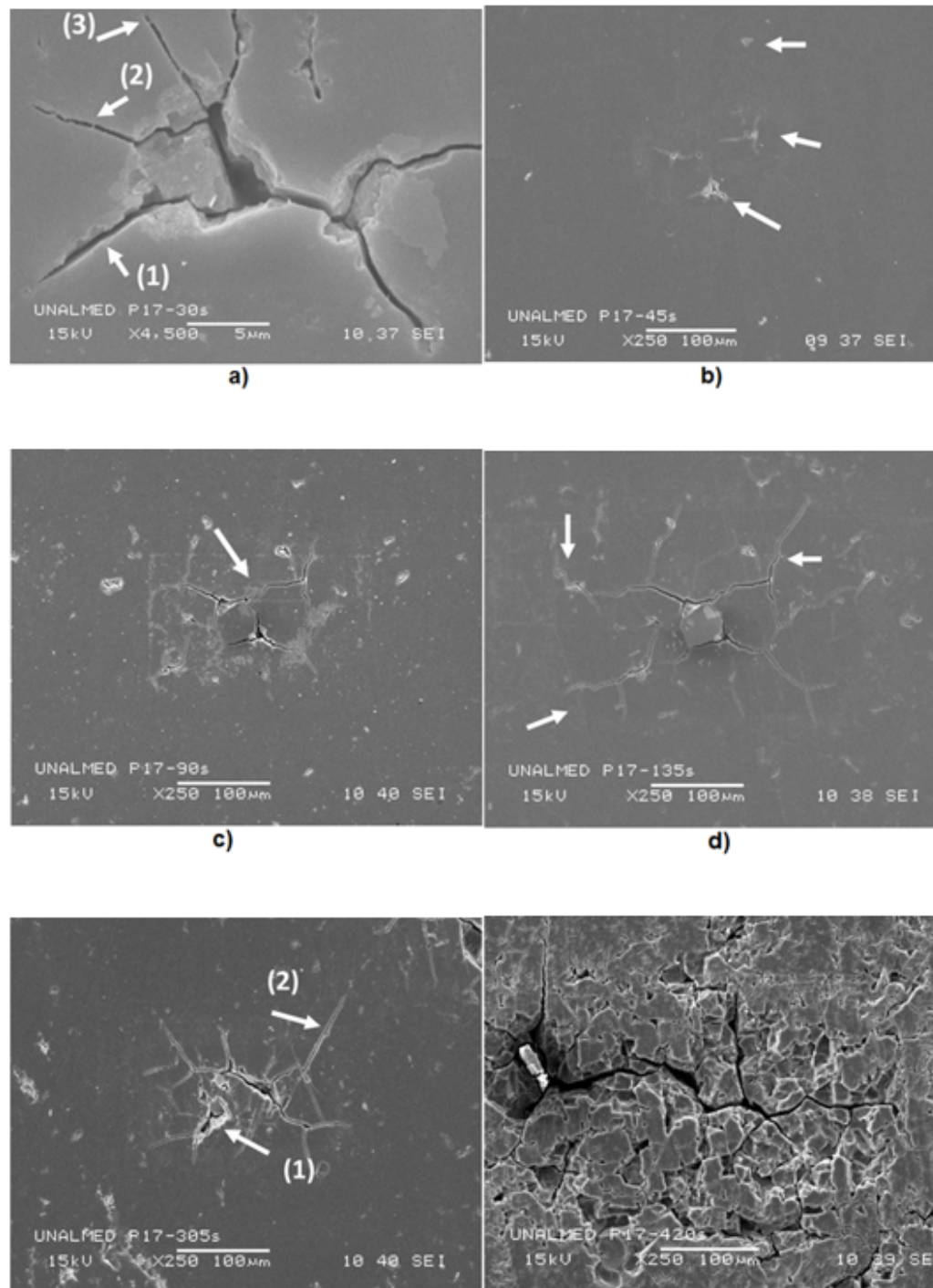
Las grietas se forman en defectos y, tras el impacto continuo de burbujas, varias grietas se agrupan (véase la flecha en la Figura 7c tomada en el mismo lugar que la Figura 7b). Además, la deformación



plástica aumenta en zonas cercanas a las grietas ya que se forman nuevas burbujas a medida que la superficie cambia, se vuelve más rugosa y crea más puntos de nucleación. Dado que las burbujas que colapsan cerca de la superficie provocan tensiones superficiales, la deformación plástica bajo la superficie es máxima (ya que el máximo esfuerzo en superficies bajo erosión por cavitación está bajo la superficie) y las grietas se propagan bajo la superficie y emergen a la superficie. (véase la Figura 7c para más detalles)

A medida que las grietas se agrupan, se propagan en múltiples direcciones, pero radialmente las grietas aparecían preferentemente (nótese las grietas en la Figura 7d). Esas grietas las causan las ondas de choque. Como las ondas de choque son bidimensionales, las burbujas o racimos provocan grietas radiales. En las etapas finales, cuando termina el periodo de incubación, aparecen marcas en la superficie en la dirección de molienda (véase la flecha 2 en la Figura 7e). Ese resultado implica que la dirección de pulido tiene un gran efecto, ya que el pulido provoca deformación plástica en la superficie y bajo las superficies. Al final del periodo de incubación, el daño acumulado en la superficie provoca el desprendimiento de partículas grandes (véase la flecha en la Figura 7f) y las pérdidas de masa comienzan a ser medibles. Al final del periodo de incubación, el desprendimiento de plaquetas causado por la coalescencia de grietas propagadas por fatiga se extiende a la superficie y se alcanza la máxima tasa de erosión.





**Figura. 7.** Evolución de superficies desgastadas durante pruebas de cavitación (incluido el periodo de incubación) del recubrimiento 720 a) Daños tras 30 segundos b) Daños tras 45 segundos c) Daños tras 90 segundos d) Daños tras 135 segundos e) Daños tras 305 segundos f) Daños tras 420 segundos.

#### Presión de cavitación

La Figura 8 muestra los resultados del cálculo en las etapas finales cuando el periodo de incubación ha finalizado. Las marcas aparecían en la superficie en una dirección de desgaste desde

el cúmulo hasta la pared superficial usando el modelo de choque débil desarrollado por Colonius y sus colaboradores (22). Es importante mencionar que las burbujas de cavitación cerca de la pared también provocan microchorros de muy alta velocidad. Las figuras 8 a) y b) muestran que, cuando el valor de la onda de presión acústica asumida  $P_a$  (5 MPa y 10 MPa) es mayor, la presión de impacto de la onda de presión  $P_{max}$ , en la superficie de los recubrimientos, también es mayor.

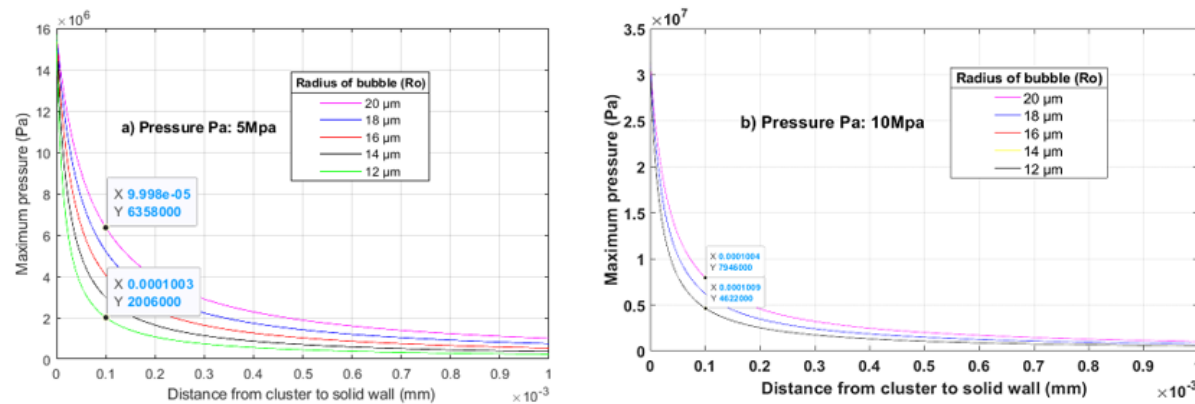
En el primer caso (Figura 8a), cuando  $P_a = 5$  MPa (37), los resultados mostraron que la presión máxima de choque cuando el cúmulo colapsa en o cerca de la superficie sin efectos viscosos del fluido, es de 14 MPa. Sin embargo, si el colapso ocurre a una distancia de 100  $\mu\text{m}$  de la superficie, la presión máxima disminuye a 6,4 MPa. Se observó una reducción significativa (equivalente al 53%) de la presión del cúmulo. Esta reducción de presión se debe al efecto viscoso de amortiguación. Para las burbujas más pequeñas, la presión máxima alcanza valores cercanos a 2 MPa.

En el segundo caso (figura 8b), se muestran los resultados de la presión máxima y su variación con la distancia desde el cúmulo hasta la pared superficial para un valor mayor de la onda de presión acústica  $P_a = 10$  MPa (35). Los resultados mostraron que la presión máxima en la superficie es de 30 MPa. Sin embargo, si el colapso del cúmulo ocurre a 100  $\mu\text{m}$  de la superficie del recubrimiento, el valor máximo de presión disminuye cerca de 8 MPa, lo que representa una reducción significativa (73%) en comparación con el primer caso (figura 7a). La diferencia comparativa de presión entre ambos casos indica que si  $P_{max}$  aumenta, la capacidad de atenuación de la onda de choque también se incrementa debido al efecto de saturación acústica propuesto por Colonius y sus colaboradores (22).

Dado que los valores de  $P_{max}$  no superaron las tensiones de cesión del material ( $\sigma_y$ ), presentadas en la Tabla 2 para los recubrimientos, podría interpretarse que el daño causado por el impacto de las ondas de choque y los microchorros causa fatiga, generada por la fluctuación de tensiones que varían en el tiempo y en el espacio. Estas variables se generan por el colapso aleatorio, el rebote de grupos de burbujas y microchorros, formados durante el proceso de cavitación.

Aunque las superficies estuvieron brevemente expuestas a la erosión por cavitación, durante ese tiempo se esperaba que varios cientos de miles de ciclos de ondas de choque impactaran en la superficie y causaran fatiga superficial. Se realizó un cálculo sencillo previamente informado en la literatura (36) para evaluar el número de ciclos de carga por cavitación. Si un grupo de burbujas con un diámetro de alrededor de 5  $\mu\text{m}$  impacta a 20 KHz la superficie, durante los primeros 15 segundos de prueba la superficie estuvo por debajo de los 300.000 ciclos. Estos impactos provocan fatiga en los recubrimientos observados por las plaquetas. El mecanismo de fatiga por erosión por cavitación ya se ha reportado previamente (14), (38)

Según Haosheng (39), el crecimiento de grietas puede producirse tanto con presión de contacto sobre la tensión de tracción última como por debajo de la tensión de efluencia del material. En este último caso, cuando la grieta inicia su proceso de propagación, existen mecanismos viscoelásticos y, por tanto, se requiere menos energía para la propagación de grietas y otros mecanismos de daño (40).



**Figura. 8.** Resultados de modelización para la estimación de la caída de presión desde la superficie hasta una distancia de 1 mm según la teoría del choque débil propuesta por Colonius y sus colaboradores (25). a) Caída de presión obtenida con  $P_a = 5 \text{ MPa}$ . b) Caída de presión obtenida con  $P_a = 10 \text{ MPa}$ .

## Conclusiones

Se estudió la erosión por cavitación de sistemas epoxi con diferentes espesores centrándose en los mecanismos durante el periodo de incubación. Los resultados más importantes se describen a continuación:

Las mayores pérdidas de masa se observaron para el recubrimiento más grueso (920  $\mu\text{m}$ ) y la mayor resistencia al desgaste (en términos de pérdidas de masa, tasa de erosión y periodo de incubación) se mostró con un recubrimiento de 380  $\mu\text{m}$  de espesor.

El mecanismo durante el periodo de incubación es el siguiente: inicialmente, se forma una grieta en la superficie y se propaga radialmente alrededor de un defecto de los recubrimientos. Durante las etapas iniciales en las que aparecieron las grietas y la propagación de grietas, las pérdidas de masa siguen siendo insignificantes, ya que no hay un desprendimiento medible de partículas de la superficie. Las grietas aparecen inicialmente en áreas donde el material ha agotado su capacidad de deformación. Más tarde, aparecieron grietas que se propagaron radialmente cerca de defectos del recubrimiento. Durante el periodo de incubación, las pérdidas de masa siguen siendo insignificantes ya que no hay un desprendimiento medible de partículas de la superficie. Al final del periodo de incubación, las grietas se forman y se observa el desprendimiento de partículas que provoca hoyos en la superficie.

La presión máxima  $P_{\text{max}}$ , calculada a partir del modelo de choque débil propuesto por Colonius, causada por burbujas impactando en la superficie, no superó la tensión de efluencia de los recubrimientos epoxi multicapa. En consecuencia, el daño superficial se atribuye a procesos de fatiga generados por los colapsos variables, aleatorios y sucesivos de los cúmulos de burbujas. Cuando aumentaba el espesor, los defectos actuaban como sitios de nucleación para las grietas y las tasas de desgaste eran mayores.

## Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas. Curación de datos. Análisis formal. Investigación. Metodología: Gestión de Proyectos. Recursos: Germán García. Software: Germán García, Albeiro Espinosa. Supervisión: Germán García, Albeiro Espinosa. Validación: Germán García, Juan Felipe Santa. Redacción - borrador original - Elaboración: Germán García, Juan Felipe Santa. Redacción - revisión y edición - Elaboración: Germán García, Juan Felipe Santa, Albeiro Espinosa

Financiación: no declara. Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

## Referencias

1. Knapp RT, Dailey JW, Hammitt FG. Cavitation. New York: McGraw-Hill Book Company; 1970. Catalog Card Number 77-96428.  
[https://books.google.com.co/books/about/Cavitation.html?id=T-hRAAAAMAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.co/books/about/Cavitation.html?id=T-hRAAAAMAAJ&redir_esc=y)
2. Brennen CE. Cavitation and bubble dynamics. Cambridge: Cambridge University Press; 2013.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760>
3. Hammitt FG, Huang YC, Kling CL, Mitchell TM, Solomon LP. A statistically verified model for correlating volume loss due to cavitation or liquid impingement. In: Characterization and Determination of Erosion Resistance. ASTM International; 1970.  
<https://doi.org/10.1520/STP26875S>
4. Johnsen E, Colonius T. Numerical simulations of non-spherical bubble collapse. J Fluid Mech. 2009 Jun 25;629:231. <https://doi.org/10.1017/S0022112009006351>
5. Shima A. Studies on bubble dynamics. Shock Waves. 1997 Feb 18;7(1):33-42.  
<https://doi.org/10.1007/s001930050060>
6. Tomita Y. Interaction of a shock wave with a single bubble. In: Shock Wave Science and Technology Reference Library. Berlin: Springer; 2007. p. 35-66.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-540-35846-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-35846-6_2)
7. Hattori S, Ishikura R, Zhang Q. Construction of database on cavitation erosion and analyses of carbon steel data. Wear. 2004 Nov 1;257(9-10):1022-9. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.07.002>
8. Wenge C, Chenqing G, Kang Z, Fusan S. Correlation of cavitation erosion resistance and mechanical properties of some engineering steels. J Mater Sci. 2006 Apr 1;41(7):2151-3.  
<https://doi.org/10.1007/s10853-006-5209-8>
9. Soyama H, Futakawa M. Estimation of incubation time of cavitation erosion for various cavitating conditions. Tribol Lett. 2004 Jul 1;17(1):27-30. <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000017415.79517.8c>
10. Bhagat RB. Cavitation erosion of composites a materials perspective. J Mater Sci Lett. 1987 Dec 1;6(12):1473-5. <https://doi.org/10.1007/BF01689327>
11. Okada T, Iwai Y, Hattori S, Tanimura N. Relation between impact load and the damage produced by cavitation bubble collapse. Wear. 1995 May 1;184(2):231-9.  
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)06581-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)06581-0)

12. Haosheng C, Yongjian L, Darong C, Jiadao W. Experimental and numerical investigations on development of cavitation erosion pits on solid surface. *Tribol Lett.* 2007 May 1;26(2):153-9.  
<https://doi.org/10.1007/s11249-006-9188-3>
13. Dular M, Bachert B, Stoffel B, Širok B. Relationship between cavitation structures and cavitation damage. *Wear.* 2004 Dec 31;257(11):1176-84. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.08.004>
14. Hattori S, Itoh T. Cavitation erosion resistance of plastics. *Wear.* 2011 Jul 18;271(7):1103-8.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.05.012>
15. Paik BG, Kim KS, Kim KY, Ahn JW, Kim TG, Kim KR, Lee SU. Test method of cavitation erosion for marine coatings with low hardness. *Ocean Eng.* 2011;38(13):1495-1502.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.07.008>
16. Xu YM, Mellor BG. The effect of fillers on the wear resistance of thermoplastic polymeric coatings. *Wear.* 2001 Oct 31;251(1):1522-31. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00791-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00791-8)
17. Böhm H, Betz S, Ball A. The wear resistance of polymers. *Tribol Int.* 1990 Dec 1;23(6):399-406.  
[https://doi.org/10.1016/0301-679X\(90\)90055-T](https://doi.org/10.1016/0301-679X(90)90055-T)
18. Parlitz U, Mettin R, Luther S, Akhatov I, Voss M, Lauterborn W. Spatio-temporal dynamics of acoustic cavitation bubble clouds. *Philos Trans R Soc Lond A.* 1999 Feb 15;357(1751):313-34.  
<https://doi.org/10.1098/rsta.1999.0329>
19. Brennen C, Colonius T, Wang YC, Preston A. Cloud cavitation phenomena. *Natl Acad Sci.* 1999;239-53. [https://www.researchgate.net/publication/30759127\\_Cloud\\_Cavitation\\_Phenomena#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/30759127_Cloud_Cavitation_Phenomena#fullTextFileContent)
20. Holzfuss J. Acoustic energy radiated by nonlinear spherical oscillations of strongly driven bubbles. *Proc R Soc Lond A.* 2010 Jun 8;466(2118):1829-47. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0594>
21. Brujan EA, Ikeda T, Yoshinaka K, Matsumoto Y. The final stage of the collapse of a cloud of bubbles close to a rigid boundary. *Ultrason Sonochem.* 2011 Jan 31;18(1):59-64.  
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.07.004>
22. Colonius T, d'Auria F, Brennen CE. Acoustic saturation in bubbly cavitating flow adjacent to an oscillating wall. *Phys Fluids.* 2000 Nov;12(11):2752-61. <https://doi.org/10.1063/1.1313561>
23. Johnson E, Colonius T, Cleveland R. Damage potential of the shock induced collapse of a gas bubble. In: *Proceedings of the 7th Int Symposium on Cavitation CAV2009.* Ann Arbor, 2009; CAV2009-17. <https://deepblue.lib.umich.edu/items/917aad52-f903-4cd0-8de1-cbcfe023832d>
24. Hilgenfeldt S, Brenner MP, Grossmann S, Lohse D. Analysis of Rayleigh-Plesset dynamics for sonoluminescing bubbles. *arXiv*, 1998 <https://doi.org/10.1017/S0022112098001207>
25. Brujan EA, Williams PR. Bubble dynamics and cavitation in non-newtonian liquids. *Rheol Rev.* 2005;147. [https://www.researchgate.net/profile/Emil-Brujan/publication/266354042\\_BUBBLE\\_DYNAMICS\\_AND\\_CAVITATION\\_IN\\_NON-NEWTONIAN\\_LIQUIDS/links/5431916e0cf277d58e982b3e/BUBBLE-DYNAMICS-AND-CAVITATION-IN-NON-NEWTONIAN-LIQUIDS.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Emil-Brujan/publication/266354042_BUBBLE_DYNAMICS_AND_CAVITATION_IN_NON-NEWTONIAN_LIQUIDS/links/5431916e0cf277d58e982b3e/BUBBLE-DYNAMICS-AND-CAVITATION-IN-NON-NEWTONIAN-LIQUIDS.pdf)
26. Atchley AA, Crum LA. Acoustic Cavitation and Bubble Dynamics. University of Mississippi Physical Acoustics Research Lab; 1985 Jun 15. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA156888.pdf>
27. Leighton TG. What is ultrasound? *Prog Biophys Mol Biol.* 2007 Apr 30;93(1):3-83.  
<https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.026>
28. Leong T, Ashokkumar M, Kentish S. The fundamentals of power ultrasound-a review. *Acoust*



- Aust. 2011 Aug 1;39(2):54-63. [https://figshare.swinburne.edu.au/articles/journal\\_contribution/The\\_fundamentals\\_of\\_power\\_ultrasound\\_-\\_A\\_review/26223002?file=47528978](https://figshare.swinburne.edu.au/articles/journal_contribution/The_fundamentals_of_power_ultrasound_-_A_review/26223002?file=47528978)
29. Rao PV. Evaluation of epoxy resins in flow cavitation erosion. *Wear*. 1988 Feb 15;122(1):77-96. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90008-7)
30. Zhang J, Richardson MO, Wilcox GD, Min J, Wang X. Assessment of resistance of non-metallic coatings to silt abrasion and cavitation erosion in a rotating disk test rig. *Wear*. 1996 Jun 1;194(1-2):149-55. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06823-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06823-6)
31. Chi S, Park J, Shon M. Study on cavitation erosion resistance and surface topologies of various coating materials used in shipbuilding industry. *J Ind Eng Chem*. 2015 Jun 25;26:384-9. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.12.013>
32. Correa CE, García GL, García AN, Bejarano W, Guzmán AA, Toro A. Wear mechanisms of epoxy-based composite coatings submitted to cavitation. *Wear*. 2011 Jul 29;271(9):2274-9. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.088>
33. García GL, López-Ríos V, Espinosa A, Abenojar J, Velasco F, Toro A. Cavitation resistance of epoxy-based multilayer coatings: surface damage and crack growth kinetics during the incubation stage. *Wear*. 2014 Aug 15;316(1):124-32. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.04.007>
34. Pavlovic M, et al. Cavitation erosion of protective coating based on cordierite filler and epoxy matrix. *Materials*. 2025;18:1034. doi:10.3390/ma18051034. <https://doi.org/10.3390/ma18051034>
35. Huang C, et al. Cavitation pit evolution process of epoxy and polyurea coatings on mortar substrates. *Ultrason Sonochem*. 2024;104:106813. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106813>
36. Wang YC, Brennen CE. Numerical computation of shock waves in a spherical cloud of cavitation bubbles. *ASME J Fluids Eng*. 1999;121(4):872-80. <https://doi.org/10.1115/1.2823549>
37. Crum LA. Acoustic cavitation. In: 1982 Ultrasonics Symposium. IEEE; 1982 Oct 27. p. 1-11. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1982.197778>
38. Zhang YK, Hammitt FG. Cavitation erosion incubation period. *Wear*. 1983;86(2):299-313. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(83\)90168-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(83)90168-0)
39. Haosheng C, Shihan L. Inelastic damage by stress wave on steel surface at the incubation stage of vibration cavitation erosion. *Wear*. 2009 Jan 5;266(1):69-75. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.05.011>
40. González MG, Cabanelas JC, Baselga J. Applications of FTIR on epoxy resins-identification, monitoring the curing process, phase separation and water uptake. In: Theophilie Theopanides, editor. *Infrared Spectroscopy-Materials Science, Engineering and Technology*. 2012; p. 261-84. <https://doi.org/10.5772/36323>