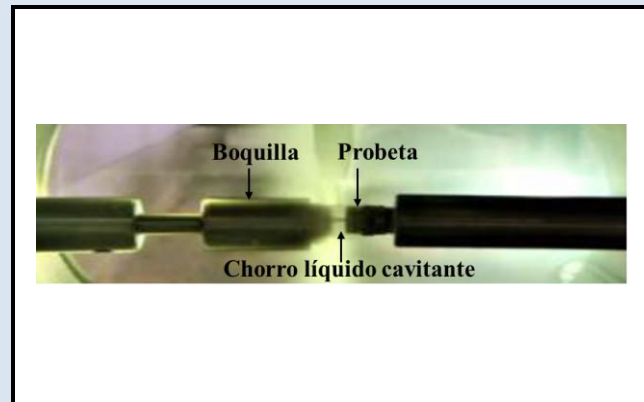


EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA EROSIÓN POR CHORRO LÍQUIDO CAVITANTE DE MATERIALES UTILIZADOS EN IMPULSORES DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

Christopher Díaz*, Glorys López, Daniel Soucre, Orlando Urriola.

Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui Departamento de Mecánica. Venezuela.

*e-mail: christopherdiazudo@hotmail.com



RESUMEN

En el presente trabajo, se llevaron a cabo ensayos de erosión por chorro líquido cavitante (agua) en diversos materiales, mecanizados en forma de probetas, siguiendo el método establecido en la norma ASTM G-134. Los materiales utilizados fueron: aceros inoxidable (AISI 316, AISI 410 y el grado 15-5 PH) y una aleación NiCu (nombre comercial Monel K500); todos estos contemplados en la norma API 610 para la fabricación de impulsores de bombas centrífugas y adicionalmente, un recubrimiento de CoCr (nombre comercial Estelite 6). Estos se caracterizaron química, microestructural y mecánicamente, y, fueron sometidos al impacto de un chorro cavitante emergente desde una boquilla cilíndrica por tiempos estipulados y cronometrados, produciéndose así, la erosión en ellos, cuantificada mediante la pérdida de masa. Así mismo, también fueron inspeccionados visual y microscópicamente, analizando la pérdida total de masa respecto a sus durezas y comparando las tasas de erosión acumulativas en función del tiempo. Se obtuvo que el Estelite 6 fue el material más resistente ante este tipo de desgaste, seguido del acero inoxidable AISI 410 y su versión endurecida por tratamiento térmico; el acero inoxidable grado 15-5 PH, presentó una resistencia intermedia; mientras que el acero inoxidable AISI 316 y el Monel K500, arrojaron las mayores pérdidas de masa en el ensayo.

Palabras Claves: Cavitación, erosión, chorro cavitante, aceros inoxidables, ASTM G-134.

EVALUATION OF RESISTANCE TO EROSION BY CAVITATING LIQUID JET OF MATERIALS USED IN CENTRIFUGAL PUMP IMPELLERS

ABSTRACT

In this paper, cavitating liquid jet (water) erosion tests were performed on various materials, machined in the form of specimens, using the method established in the ASTM G-134 standard. The materials used were stainless steels (AISI 316, AISI 410 and grade 15-5 PH) and a Ni-Cu alloy (trade name Monel K500); all these contemplated in the API 610 standard for the manufacturing of centrifugal pump impellers and additionally, a CoCr weld overlay (trade name Estelite 6). They were characterized chemically, microstructurally and mechanically. The materials were subjected to the impact of a cavitating jet emerging from a cylindrical nozzle, for stipulated and timed times, thus producing erosion in them, quantified by the loss of mass. The materials were inspected visually and microscopically, analyzing the total mass loss with respect to their hardness and also comparing the cumulative erosion rates as a function of time. It was found that Estelite 6 was the most resistant material to this type of wear, followed by AISI 410 stainless steel and its version hardened by heat treatment; grade 15-5 PH stainless steel had medium resistance; while AISI 316 stainless steel and Monel K500 showed the greatest mass losses in the test.

Keywords: *Cavitation, erosion, jet erosion, ASTM G-134*

1. INTRODUCCIÓN

En las bombas centrífugas, la cavitación puede ser generada debido a un bajo margen de altura de succión positiva neta (*Net Positive Suction Head, NPSH*), corrientes de recirculación de alta velocidad en el impulsor, líquido caliente, entre otras causas, las cuales dan como resultado que la presión del líquido bombeado caiga por debajo de su presión de vapor, permitiendo la formación de burbujas o cavidades de vapor que viajan a zonas de mayores presiones en el impulsor, donde implosionan y lo someten a impactos impulsivos de energía, fatigando su superficie hasta una subsecuente fractura o desprendimiento localizado de material; esto trae como consecuencia el daño conocido como erosión por cavitación, fenómeno que afecta el normal funcionamiento de estas turbomáquinas. Este tema se ha convertido en un motivo fundamental de investigación para la ingeniería de superficies [1-4], soportada por las ciencias e ingeniería de materiales, donde nace la necesidad de estudiar materiales a partir de sus propiedades y características mecánicas, para la fabricación de impulsores de bombas centrífugas, con mayor resistencia ante este tipo de desgaste, a fin de garantizar un mayor tiempo de vida útil de estos.

2. PARTE EXPERIMENTAL

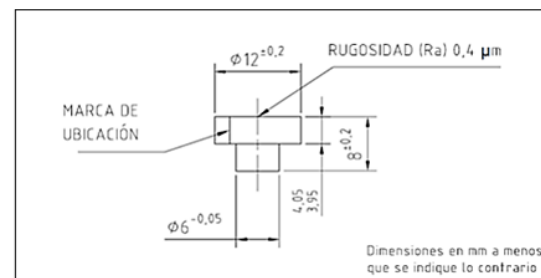
2.1 Selección de materiales, fabricación de probetas para ensayo y caracterización

Se tomaron en consideración los materiales de construcción para impulsores de bombas centrífugas industriales en la norma API 610 11ª edición [5], según el servicio donde se desempeñan, seleccionándose los utilizados con mayor frecuencia y disponibilidad dentro de la industria venezolana, los cuales fueron aportados por una empresa dedicada a la manufactura y reparación de bombas, a saber: aceros inoxidable (AISI 316, AISI 410 y un grado 15-5 PH), una aleación NiCu (Monel K500) y un recubrimiento duro CoCr (Estilite 6).

Respecto a la fabricación de probetas, la norma ASTM G-134 [6] (Método de Prueba Estándar de Erosión por Chorro Líquido Cavitante en Materiales Sólidos), establece muestras para ensayo tipo botón, con dimensiones normalizadas para ser sujetadas en el porta muestra del banco de pruebas. La cara de prueba expuesta al chorro cavitante

admite tener una rugosidad máxima de $0,40 \mu\text{m}$ ($16 \mu\text{pulg}$). Las probetas se fabricaron en un torno horizontal y estuvieron conformes con: a) el acabado superficial requerido (medido en rango de $0,23\text{-}0,40 \mu\text{m}$), validado con un rugosímetro y b) las dimensiones estandarizadas (diámetros y longitudes), inspeccionadas con vernieres y micrómetros.

En la Figura 1, se muestra el dibujo en 2D de la probeta (botón) estipulado por la norma ASTM G-134 y una fotografía de una probeta fabricada.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Dibujo en 2D del botón con sus dimensiones [2] y (b) fotografía de un botón fabricado

Por su parte, la caracterización consistió en: a) revelar la microestructura a través de un microscopio óptico metalográfico (MO), b) validar la composición química y c) medir dureza de cada material seleccionado; lo que hizo posible establecer un criterio de análisis acerca del comportamiento de cada aleación frente a la erosión por chorro líquido cavitante (agua). Para el estudio metalográfico, se realizó un pulido mecánico estándar hasta alcanzar una superficie especular; seguidamente aplicando ataque químico a las muestras, con el objeto de identificar la microestructura, usándose una solución química de una parte de ácido clorhídrico (HCl), una parte de ácido nítrico (HNO₃) y dos partes de etanol (C₂H₆O₆). Mediante la identificación positiva de materiales (*Positive Material Identification, PMI*),

se comprobó la composición química de los aceros inoxidables y, en el caso del Monel K500 y Estelite 6, se revisó su composición química estándar. Las durezas fueron obtenidas usando un durómetro de banco Rockwell (RB y RC) y convertidas a microdureza Vickers (HV) para mejor comparación

en una misma escala.

En la Figura 2, se muestran las micrografías de los materiales ensayados, donde se indica el nombre de su microestructura característica y valores de dureza.




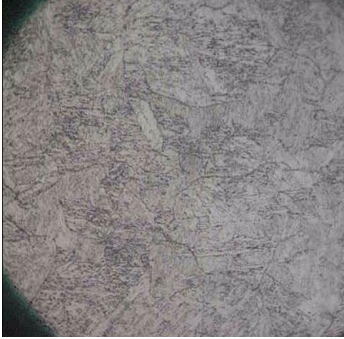
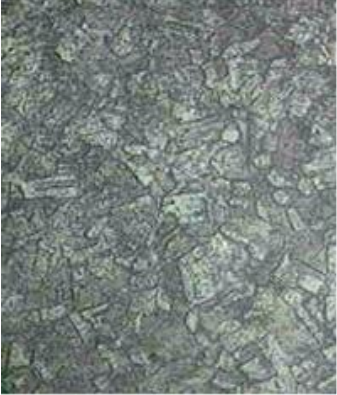
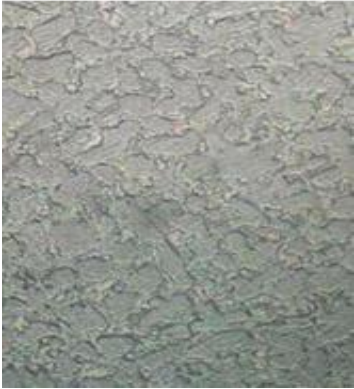
 <p>Acero inoxidable AISI 316. Mag. 200X. Microestructura: Austenita + poros + precipitados dispersos. Dureza: 17 RC (228 HV)</p>	 <p>Acero inoxidable AISI 410. Mag. 400X. Microestructura: Martensita + ferrita delta (zonas dispersas). Dureza: 25 RC (266 HV)</p>
 <p>Acero inoxidable AISI 410TT (templado en aceite). Mag. 400X. Microestructura: Martensita fresca + ferrita delta + precipitados en límites de granos. Dureza: 40 RC (392 HV)</p>	 <p>Acero inoxidable grado 15-5 PH. Mag. 200X. Microestructura: Martensita revenida + ferrita delta + precipitados de carburos. Dureza: 34 RC (337 HV)</p>
 <p>Aleación NiCu (Monel K500). Mag. 400X. Microestructura: Austenita (solución sólida NiCu). Dureza: 68 RB (123 HV)</p>	 <p>Aleación CoCr (Estelite 6). Mag. 400X. Microestructura: Solución sólida CoCr + carburos de cromo. Dureza: 36 RC (353 HV)</p>

Figura 2. Micrografías de los materiales ensayados con sus respectivas microestructuras, dureza y magnificación.

2.2 Montaje experimental: banco de pruebas, fabricación de probetas y ensayos

El montaje experimental se basó en el método de prueba establecido en la norma ASTM G-134; el cual consiste en someter una muestra estacionaria, al impacto de un chorro cavitante sumergido, haciendo que las burbujas de cavitación colapsen sobre ella y por lo tanto la erosionen. Generalmente, el ensayo consta de una bomba de desplazamiento positivo que suministra el líquido de prueba (agua) a través de una pequeña boquilla cilíndrica de entrada afilada, que descarga un chorro en una cámara a una presión controlada. La cavitación comienza en la región de la vena contracta del chorro dentro de la longitud de la boquilla; se estabiliza por el orificio cilíndrico y emerge, percibiéndose al ojo humano como una

nube que es visible alrededor del chorro de líquido sumergido. La muestra tipo botón, se coloca en la trayectoria del chorro a una distancia de separación especificada desde el borde de entrada de la boquilla. Las burbujas de cavitación colapsan sobre la misma, causando así la pérdida de material (erosión).

Para llevar a cabo el ensayo, fue necesario construir un banco de pruebas provisional, ensamblado principalmente de componentes hidráulicos, en una disposición sencilla que permitiera un manejo accesible del sistema, adoptando como referencia, los criterios de construcción del modelo estandarizado en la norma ASTM G-134, en función al criterio de disponibilidad y factibilidad económica. En la Figura 3, se muestra un boceto del banco de pruebas construido.

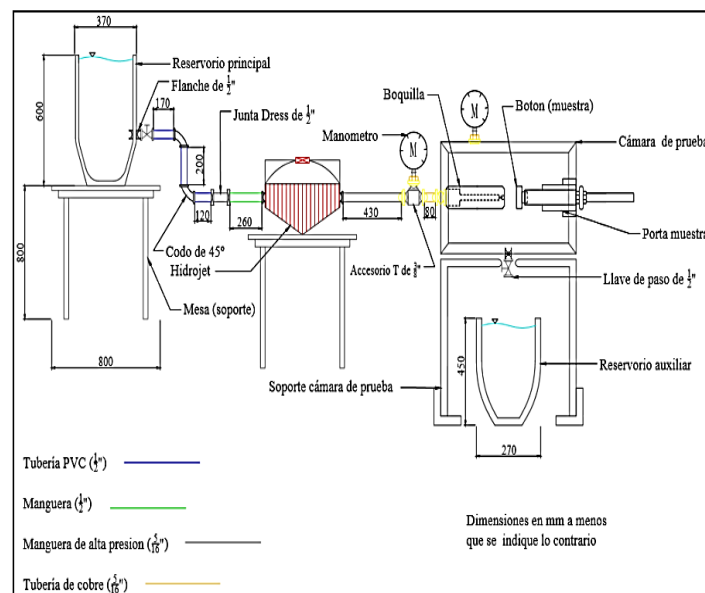


Figura 3. Boceto del banco de pruebas construido para los ensayos de erosión por cavitación.

En la Figura 4, se presenta el dibujo de la boquilla diseñada y una fotografía luego de ser fabricada, teniendo 1 mm de diámetro de la vena contracta, el cual difiere del establecido por la norma (0,4 mm). Esta modificación, fue realizada por la inexistencia en el mercado nacional de una broca de tal dimensión. No obstante, hay reportes de ensayos donde la geometría de la boquilla fue modificada de igual manera, como el estudio de erosión por chorro líquido cavitante realizado por Usta, O., et

al [7], en la Universidad de Estambul, Turquía. Este cambio no condicionó la generación de la cavitación, ya que, 1 mm de diámetro, igualmente provocó la caída de presión del fluido impulsado por el *Hidrojet* (dotado de una bomba tipo émbolo), al punto de formar las burbujas de cavitación, simulándose así el efecto producido en el interior de las bombas centrífugas.

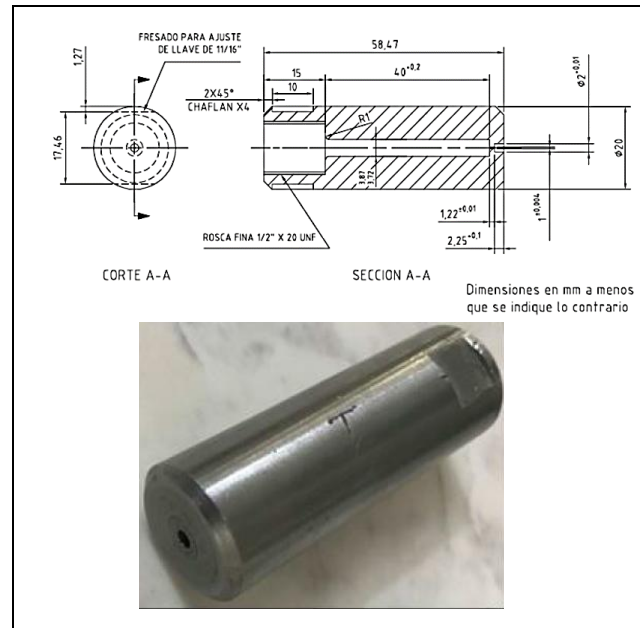


Figura 4. (a) Dibujo en 2D de la boquilla diseñada y (b) fotografía luego de haber sido fabricada (acero inoxidable AISI 410).

Para la realización de los ensayos, se procedió a pesar inicialmente cada probeta ($\pm 0,1$ mg). Cada espécimen, se colocó en el porta probeta (ubicado dentro de la cámara), se estableció una distancia de separación de 15 mm desde su superficie hasta la boquilla (salida del chorro cavitante); posteriormente, se llenó de agua toda la cámara y se dio inicio al proceso de impacto. Esto se realizó hasta cumplir 60 min, en tres intervalos de 20 min, en los cuales se extraía la probeta y se registraba su pérdida de peso. El resto de las condiciones y variables de pruebas fueron las siguientes: temperatura (27°C), densidad del agua ($996,59\text{ Kg/m}^3$), presión aguas arriba ($6,89\text{ MPa}$), presión aguas abajo ($0,041\text{ MPa}$), número de cavitación ($\sigma = 0,006$), caudal ($8,577 \times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$) y coeficiente de descarga ($C_d=0,2328$).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5, se muestran las probetas ensayadas, luego de ser: a) digitalizadas sus superficies con un escáner de alta resolución y b) observadas con microscopía óptica a fin de apreciar con mayor precisión la morfología del daño. Dentro de paréntesis, se muestra la pérdida total de masa

registrada para cada material. Se visualizaron las distintas formas del desgaste, que varían en función a su magnitud. El tamaño de la huella de desgaste (macroscópicamente), fue mayor en algunas probetas, como en los casos del: Monel K500, grado 15-5 PH y AISI 410 TT, lo cual está directamente relacionado con la intensidad y proyección del chorro sobre la superficie de las probetas, incidiendo sobre el cambio topográfico (rugosidad y extensión del área afectada) experimentado por cada probeta, lo que se traduce a su vez en una alta intensidad del proceso erosivo. El análisis superficial realizado por microscopía óptica en los botones ensayados permitió determinar la morfología de las micropenetraciones observadas en cada material, caracterizándose por ser de formas circulares, ovaladas y poligonales (regulares e irregulares), de diferentes tamaños (áreas de $0,010\text{-}0,190\text{ mm}^2$) en función a la severidad, extensión o propagación del daño.

En la Figura 6, se muestra la relación entre pérdida de masa y dureza de las muestras ensayadas, apreciándose la tendencia que, a mayor dureza del material, menor fue la pérdida total de masa; no obstante, esto no se cumplió estrictamente para el










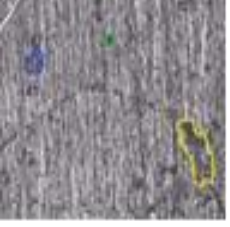


	Aspecto superficial macroscópico (Mag. 7X)	Aspecto superficial microscópico (Mag. 50X)
Estelite 6 (0,9 mg)		
AISI 410 (1,0 mg)		
AISI 410 TT (1,4 mg)		
Grado 15-5 PH (1,8 mg)		
AISI 316 (2,5 mg)		
Monel K-500 (3,5 mg)		

Figura 5. Inspección macroscópica y microscópica de las superficies de materiales sometidos a erosión por cavitación.

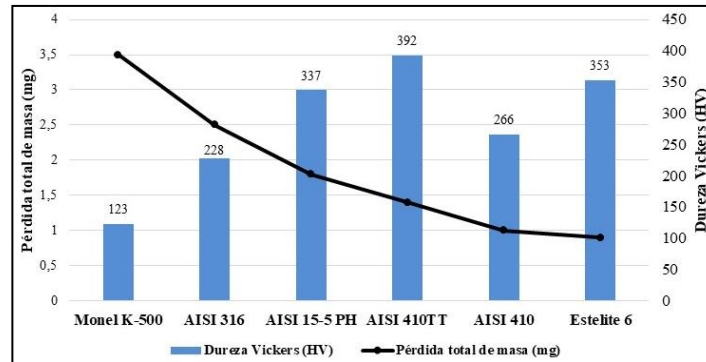


Figura 6. Relación entre pérdida total de masa (acumulada) y durezas de los materiales ensayados.

acero AISI 410TT que tuvo la mayor dureza de todos los materiales (392 HV), comparado con el Estelite (353 HV), hecho que es atribuible a los microconstituyentes de esta última aleación, compuesta por una solución sólida de cobalto rica en cromo y carburos de cromo, siendo estos últimos microconstituyentes (carburos) de naturaleza cerámica mucho más duros y estables ante el fenómeno de desgaste que la martensita fresca propia del acero AISI 410TT.

Según Karassik, *et al.* [8] era sabiduría convencional en la industria de las bombas hasta años recientes, que la resistencia a la cavitación de un material estaba directamente relacionada con su dureza; sin embargo, se ha demostrado que esta característica, también se relaciona con la capacidad que tiene el material para endurecerse en frío en su superficie, desarrollando una mayor resistencia a este mecanismo; así mismo, se ha encontrado que algunas aleaciones con durezas relativamente bajas y comparables con algunos

aceros inoxidables en la condición de recocido, pueden transformarse en su superficie en una martensita muy dura al exponerse a una carga por cavitación, generándose una capa superficial dura y resistente al inicio de grietas por fatiga. Este comportamiento no solo viene determinado por la dureza del material, sino también inciden la resistencia máxima a la tracción, el límite elástico, el módulo de elasticidad y la energía de deformación.

En la Figura 7, se graficó la tasa de erosión acumulativa para cada material en función del tiempo. Este parámetro se define como la erosión acumulativa (pérdida de masa acumulada) entre el tiempo de exposición acumulativo correspondiente de la muestra ensayada, cuyo comportamiento típico es alcanzar un valor máximo (tasa de erosión máxima) y luego disminuir debido a que el material ofrece mayor resistencia al trabajo en frío (menor pérdida de masa) a mayores tiempos acumulativos de exposición.

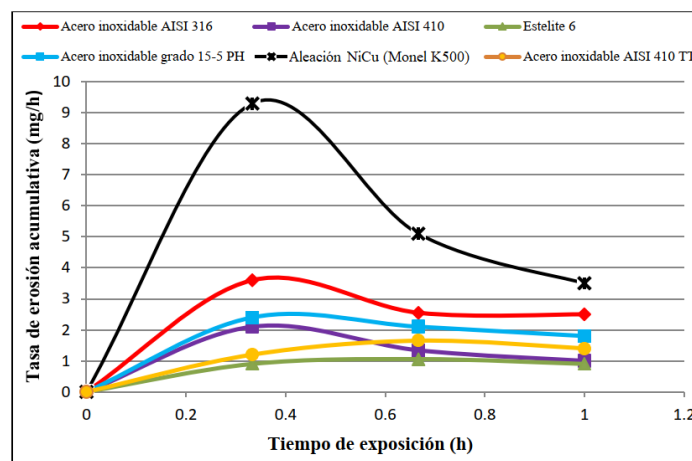


Figura 7. Comparación de tasas de erosión acumulativas en función al tiempo de los materiales ensayados.

Se observa que, para los aceros inoxidables AISI 316, AISI 410, grado 15-5 PH y la aleación NiCu (Monel K500), la tasa de erosión máxima se originó en sus primeras exposiciones (0,3333 h) al chorro de líquido cavitante, seguido del esperado decrecimiento instantáneo en la tasa de erosión acumulativa; esto se debe a que las propiedades mecánicas de estos materiales, no son tan elevadas para resistir el impacto del chorro cavitante en las primeras exposiciones, en comparación con los materiales Estelite 6 y acero inoxidable AISI 410 TT (tratado térmicamente), cuyas tasas de erosión máxima se produjeron en la segunda exposición en la prueba (0,6667 h), lo cual se relaciona con sus altas durezas y capacidad de ser más resistentes a las primeras exposiciones al chorro de líquido cavitante. De igual manera, estos materiales también presentaron un decrecimiento en sus tasas de erosión, luego de alcanzar el valor máximo instantáneo, manteniendo el mismo mecanismo de desgaste erosivo producido en el resto de los materiales.

4. CONCLUSIONES

El material que presentó el mejor comportamiento ante la erosión por cavitación fue el Estelite 6 (pérdida total de masa 0,9 mg y dureza 353 HV) y el que mostró peor desempeño fue el Monel K500 (pérdida total de masa 3,5 mg y dureza 123 HV). Las comparaciones establecidas respecto a la resistencia a la erosión por chorro líquido cavitante entre los materiales ensayados en la presente investigación, conllevan a inferir que existe una tendencia similar del comportamiento ante este daño, lo cual facilita comprensión del desgaste

erosivo en función a la dureza, es decir, a mayor dureza habrá menor desgaste erosivo, salvo excepciones particulares microestructurales que presente cada material.

5. REFERENCIAS

- [1] Szala M, Walczak M, Latka L, Gancarczyk K, Özkan D. 2020. "Cavitation erosion and sliding wear of MCrAlY and NiCrMo coatings deposited by HVOF thermal spraying". *Advance in Materials Science*. Vol. 20, nr 2 (64). 26-38. DOI 10.2478/adms-2020-0008.
- [2] Hutli E, Nedeljkovic M, Bonyár A, Légrády D. 2017. "Experimental study on the influence of geometrical parameters on the cavitation erosion characteristics of high-speed submerged jets". *Elsevier* 80 (2017) 281-292.
- [3] Lin C, Zhao Q, Zhao X, Yang Y. 2018. "Cavitation erosion of metallic materials". *IJGE* 4. <https://doi.org/10.15273/ijge.2018.01.001>
- [4] Kazama, T. *Materials Performance and Characterization*. 2018; 7 (3): 355-373, <https://doi.org/10.1520/MPC20170063>. ISSN 2379-1365
- [5] Norma ANSI/API Standard 610, 2010, "Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries". Undécima edición. American Petroleum Institute, NW, Washington, DC, USA, www.api.org.
- [6] Norma ASTM Standard G-134, 2009. "Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by a Cavitating Liquid Jet". Pennsylvania, USA
- [7] Usta O, Köksa, Ç, Korkut E. 2019. "An experimental study to investigate cavitation noise and erosion characteristics, using water jet test technique". Istanbul Technical University, Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering. 34469 Maslak. Estambul, Turquía.
- [8] Karassik I, Messina J, Cooper P, Heald C. 2008. *Pump Handbook*. Fourth Edition. McGraw-Hill. New York, USA.

6. MINIBIOGRAFÍA DE AUTORES

**Christopher Daniel Díaz Gutiérrez. ORCID 0009-0003-4400-4601.**

Ingeniero Mecánico (2009) egresado de la Universidad de Oriente (UDO, Venezuela), Núcleo de Anzoátegui y Licenciado en Educación Integral (2011) egresado de la Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez (UNESR, Venezuela), Núcleo Barcelona. Docente adscrito al Departamento de Mecánica de la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la UDO, Núcleo de Anzoátegui. Actualmente, Profesor de pregrado de la Asignatura Elementos de Metalurgia en la Sección de Materiales y Manufactura. Investigador activo en el área de materiales de bombas centrífugas y sellos mecánicos.

**Glorys López de Gómez. ORCID 0009-0003-4032-4640.**

Magister Scientiarum en Metalurgia y Ciencia de los Materiales (2004) de la Universidad Central de Venezuela. BSc. en Metalurgia (1980) de la *City of London Polytechnic*, Inglaterra. OND. Diploma Nacional Ordinario en Ingeniería Mecánica (1977) de la *Brighton Technical College*, Inglaterra. Investigadora y Profesora Titular jubilada del Departamento de Mecánica de la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Núcleo de Anzoátegui de la Universidad de Oriente (UDO, Venezuela).

**Daniel Alejandro Soucre López.**

Ingeniero Mecánico (2022) egresado de la Universidad de Oriente (UDO, Venezuela), Núcleo de Anzoátegui, con amplios conocimientos en el área de metalurgia y procesos de manufactura. Actualmente, especializado en el área de control de calidad de equipos rotativos industriales, procesos de mecanización y diseño de piezas mecánicas.

**Orlando Urriola Borges.**

Ingeniero Mecánico (2022) egresado de la Universidad de Oriente (UDO, Venezuela), Núcleo de Anzoátegui, actualmente laborando para la empresa multinacional española Técnicas Reunidas, como Ingeniero de Equipos Rotativos.