



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“ESTUDIO DEL FENÓMENO DE EROSIÓN POR  
CAVITACIÓN EN MATERIALES METÁLICOS”**

---

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE MANUFACTURA**

**PRESENTA:**

**ING. MAYRA SARETH TOVAR OLIVA**

**DIRECTORES:**

**DR. MANUEL VITE TORRES**

**DR. EZEQUIEL ALBERTO GALLARDO HERNÁNDEZ**



**MÉXICO D.F. ENERO DE 2012.**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F., siendo las 13:00 horas del día 10 del mes de Enero del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME-UA para examinar la tesis titulada:

"Estudio del fenómeno de erosión por cavitación en materiales metálicos"

Presentada por el alumno:

<u>Tovar</u>	<u>Oliva</u>	<u>Mayra Sareth</u>							
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s):							
	Con registro:	<table border="1"> <tr> <td>B</td> <td>0</td> <td>9</td> <td>1</td> <td>6</td> <td>2</td> <td>7</td> </tr> </table>	B	0	9	1	6	2	7
B	0	9	1	6	2	7			

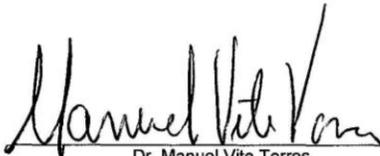
aspirante de:

Maestría en Ingeniería de Manufactura

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

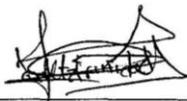
Directores de tesis

  
 Dr. Manuel Vite Torres  
 Primer Vocal

  
 Dr. Ezequiel Alberto Gallardo Hernández  
 Segundo Vocal

  
 Dr. Orlando Susarrey Huerta  
 Presidente

  
 Dra. Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes  
 Secretario

  
 Dr. José Martínez Trinidad  
 Tercer Vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
 Dr. Jaime Pacheco  
 UNIDAD PROFESIONAL  
 AZCAPOTZALCO  
 SECCION DE ESTUDIOS DE  
 POSGRADO E INVESTIGACION





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, D.F., el día **11** del mes **Enero** del año **2012**, el (la) que suscribe **Mayra Sareth Tovar Oliva** alumno (a) del Programa de **Maestría en Ingeniería de Manufactura** con número de registro **B091627**, adscrito a **ESIME** Unidad Azcapotzalco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de

**Dr. Manuel Vite Torres y Dr. Ezequiel Alberto Gallardo Hernández**

y cede los derechos del trabajo titulado:

**"Estudio del fenómeno de erosión por cavitación en materiales metálicos",**

al **Instituto Politécnico Nacional** para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección:

**my\_tool11@live.com.mx, drmanuelvite9@hotmail.com, e.a.gallardo@hotmail.com**

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

Ing. Mayra Sareth Tovar Oliva

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres y hermanos, por su apoyo comprensión y esfuerzo, por no dejarme sola nunca y porque me han permitido realizar mis estudios profesionales.

A Joss, por su paciencia, amor, comprensión y ayuda para la realización de este trabajo.

Al Dr. Manuel Vite Torres y al Dr. Ezequiel Alberto Gallardo Hernández, por su tiempo, confianza, asesoría y apoyo incondicional durante la maestría.

Al Grupo de Tribología y Superficies del la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por su apoyo absoluto para realizar los ensayos experimentales de ésta investigación.

A mis compañeros de la Maestría y del Grupo de Tribología de la ESIME – Zacatenco.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
RESUMEN .....	x
ABSTRACT .....	xii
INTRODUCCIÓN .....	xv
OBJETIVO GENERAL .....	xix
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	xix
CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DE TRIBOLOGÍA.....	20
1.1 Introducción a la Tribología .....	20
1.2 Desgaste .....	22
1.3 Tipos de desgaste .....	22
CAPÍTULO II. CAVITACIÓN .....	27
2.1 El fenómeno de la cavitación .....	27
2.2 Clasificación .....	28
2.3 Erosión por cavitación .....	30
2.4 Efectos de la cavitación.....	33
2.4.1 Efectos internos .....	33
2.4.2 Efectos externos .....	34
2.5 Mecanismos de cavitación .....	34
2.5.1 Microchorro .....	35
2.5.2 Onda de choque .....	36
2.6 La corrosión como un factor en la erosión por cavitación .....	37
2.7 Problemas de erosión por cavitación .....	39
2.8 Investigaciones de erosión por cavitación.....	42
CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	52
3.1 Norma ASTM G32.....	52
3.2 Descripción del equipo .....	53
3.3 Diseño experimental.....	54

## ÍNDICE

3.4	Especímenes .....	55
3.5	Selección de materiales .....	56
3.6	Metodología experimental .....	59
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....		62
4.1	Resultados y discusiones.....	62
4.1.1.	Pérdida de masa acumulada .....	62
4.1.2.	Tasa de desgaste .....	65
4.1.3.	Profundidad Media de Erosión (MDE) .....	67
4.1.4.	Pérdida de volumen.....	70
4.1.5.	Tiempo de incubación.....	74
4.1.6.	Tasa máxima de erosión .....	75
4.2	Aumento de la Microdureza .....	76
4.3	Microscopía de Fuerza Atómica (AFM).....	77
4.4	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	80
4.5	Difracción de Rayos X (XRD).....	86
REFERENCIAS.....		92
ANEXOS .....		97

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura1. El primer túnel de cavitación construido por Parsons.....	xvi
Figura 1.1 Ciencias que apoyan a la Tribología. ....	21
Figura 1.2. Desgaste por adhesión.. ....	23
Figura 1.3 Desgaste por abrasión. ....	24
Figura 1.4 Desgaste por fatiga. Formación de grietas superficiales.....	24
Figura 1.5 Desgaste corrosivo. Formación de la capa de óxido.....	25
Figura 1.6 Erosión de una superficie según el ángulo de impacto .....	24
Figura 1.7 Erosión por cavitación .....	26
Figura 2.1 Formación de burbujas y fenómeno de implosión. ....	28
Figura 2.2. Clasificación de la cavitación. ....	29
Figura 2.3 Curva tasa de desgaste vs tiempo de acuerdo a Thiruvengadam & Preiser.....	31
Figura 2.4 Curva tasa de desgaste vs tiempo de acuerdo a Plesset & Devine ....	31
Figura 2.5. Evolución de las etapas de erosión por cavitación .....	32
Figura 2.6 Evolución de las etapas de la erosión por cavitación en la curva de la tasa de pérdida de volumen .....	33
Figura 2.7 Colapso asimétrico de la cavidad.....	35
Figura 2.8 Formación de microchorros.....	35
Figura 2.9 Colapso de la burbuja .....	36
Figura 2.10 Corrosión en el proceso de cavitación. ....	38
Figura 2.11 Daños por cavitación.....	40
Figura 2.12 Daños por cavitación en el lado de succión de un impulsor de bomba radial.....	40
Figura 2.13 Daños por cavitación en un impulsor. ....	41
Figura 2.14 Hélice de turbina hidráulica dañada por cavitación. ....	41
Figura 2.15 Equipos de Cavitación.....	42
Figura 2.16 Especímenes erosionados .....	44
Figura 2.17 Equipo de cavitación vibratoria .....	44

## ÍNDICE

Figura 2.18 Cavidades completas .....	45
Figura 2.19 Cavidades térmicas.....	45
Figura 2.20 Modelo de la formación de burbuja .....	46
Figura 2.21 Muestra de ensayo de acero al alto Cromo.....	47
Figura 2.22 Equipo vibratorio Telsonic SG 1000 .....	48
Figura 2.23 Patrones XRD de las muestras antes y después de la hidrogenación.....	50
Figura 2.24 Muestras sin hidrogenación .....	50
Figura 2.25 Muestras con hidrogenación .....	51
Figura 3.1 Equipo ultrasónico para pruebas de erosión por cavitación .....	53
Figura 3.2 Cavitómetro.....	54
Figura 3.3 Esquema del espécimen de prueba.....	56
Figura 3.4 Desmagnetizador de especímenes.....	59
Figura 3.5 Distancia de 1 mm entre la superficie del espécimen y la del horn.....	60
Figura 3.6 Profundidad de inmersión de la muestra.....	60
Figura 3.7 Parámetros de ensayo.....	61
Figura 3.8 Programación del tiempo de prueba .....	61
Figura 4.1 Pérdida de masa acumulada Aluminio 6061-T6.....	63
Figura 4.2 Pérdida de masa acumulada Bronce SAE 430A.....	63
Figura 4.3 Pérdida de masa acumulada del Acero AISI 316L.....	64
Figura 4.4 Comparación de la pérdida de masa acumulada de los materiales. ....	64
Figura 4.5 Tasa de desgaste del Aluminio 6061-T6 .....	66
Figura 4.6 Tasa de desgaste del Bronce SAE 430A .....	66
Figura 4.7 Tasa de desgaste del Acero AISI 316L .....	67
Figura 4.8 Profundidad Media de Erosión del Aluminio 6061-T6 .....	68
Figura 4.9 Profundidad Media de Erosión del Bronce SAE 430A.....	69
Figura 4.10 Profundidad Media de Erosión del Acero AISI 316L .....	69
Figura 4.11 Comparación de la MDE de los materiales.....	70
Figura 4.12 Pérdida de volumen del Aluminio 6061-T6.....	71
Figura 4.13 Pérdida de volumen del Bronce SAE 430A.....	71
Figura 4.14 Pérdida de volumen del Acero AISI 316L.....	72

## ÍNDICE

Figura 4.15 Comparación de la pérdida de volumen de los materiales.....	73
Figura 4.16 Pérdida de volumen de materiales en dos tipos de generación de cavitación. ....	73
Figura 4.17 Tiempo de Incubación .....	75
Figura 4.18 Tasa máxima de erosión.....	76
Figura 4.19. Comparación del aumento de microdureza.....	77
Figura 4.20. Topografía en tres dimensiones del Aluminio 6061-T6.....	78
Figura 4.21 Topografía en tres dimensiones del Bronce SAE 430A.....	79
Figura 4.22 Topografía en tres dimensiones del Acero AISI 316L.....	79
Figura 4.23 Micrografías SEM de la superficie erosionada del Aluminio 6061-T6 .....	81
Figura 4.24 Micrografías SEM de la superficie erosionada del Bronce SAE 430A .....	83
Figura 4.25 Micrografías SEM de la superficie erosionada del Acero AISI 316L.....	85
Figura 4.26 Patrón XRD del Aluminio 6061-T6 .....	87
Figura 4.27 Patrón XRD del Bronce SAE 430A.....	88
Figura 4.28 Patrón XRD del Acero AISI 316L.....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Parámetros de ensayo de erosión por cavitación.....	55
Tabla 3.2 Intervalos de tiempo de los materiales .....	55
Tabla 3.3 Propiedades químicas del Aluminio 6061-T6. ....	57
Tabla 3.4 Propiedades químicas del Bronce SAE 430A .....	58
Tabla 3.5 Propiedades químicas del Acero inoxidable AISI 316L. ....	58
Tabla 4.1. Valores de Microdureza HV.....	76

## RESUMEN

En este trabajo se presenta el estudio experimental para realizar ensayos de erosión por cavitación en tres tipos de materiales metálicos: Aluminio 6061-T6, Bronce SAE 430A y Acero inoxidable AISI 316L. Se realizaron los ensayos mediante cavitación acústica, bajo los parámetros establecidos en la Norma ASTM G-32-03.

El tiempo total de ensayo de cada material se determinó en base a los datos obtenidos de la literatura y al comportamiento de la curva de tasa de desgaste con respecto al tiempo, es decir cuando se observó que se había alcanzado la tasa máxima de erosión, terminó el ensayo; el tiempo es diferente para cada material debido a que las propiedades de cada uno son diferentes.

Se presentan y analizan los resultados de la pérdida de masa acumulada, la tasa de desgaste, Profundidad Media de Erosión (MDE), pérdida de volumen, tiempo de incubación y tasa máxima de erosión, para poder tener al comparar la resistencia a la erosión por cavitación de los materiales.

Se realizó un ensayo de microdureza (HV) para evaluar el aumento de la microdureza en la superficie erosionada por cavitación; la huella generada después de los ensayos se analizó mediante Difracción de Rayos X (XRD), Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) y Microscopía electrónica de Barrido (SEM).

El comportamiento que presentaron los materiales es consistente con los datos de la literatura, el material con mayor tiempo de prueba fue el Acero inoxidable AISI 316L con 540 min, posteriormente el Bronce SAE 430A con un tiempo de 240 y finalmente el Aluminio 6061-T6 con tan solo 80 min. Al comparar la superficie original del material con la superficie dañada mediante Microscopía de Fuerza Atómica, se observó que la rugosidad cambia considerablemente; por otra parte, al analizar la huella de desgaste mediante Microscopía Electrónica de Barrido, se

## RESUMEN

observaron cavidades de diferentes tamaños, así como deformación plástica, grietas y desprendimiento de material. Por medio del análisis de Difracción de Rayos X, se encontró un cambio en los tres materiales; en el Aluminio 6061-T6 se presentó un cambio en el tamaño de grano, mientras que en el Bronce SAE 430A, se dio un cambio en la dirección de los granos, finalmente en el Acero inoxidable AISI 316L, se presentó un cambio de fase.

Por último se encontró que en los tres materiales aumenta la microdureza después de realizarse los ensayos de erosión por cavitación.

## ABSTRACT

In this work presents the experimental study for cavitation erosion testing in three types of metallic materials: Aluminum 6061-T6, Bronze SAE 430A and stainless steel AISI 316L. Assays were performed by acoustic cavitation, the guidelines set forth in ASTM G-32-03.

The total time of each test material was determined based on data from the literature and the behavior of the wear rate curve with respect to time, ie when it was noted that he had reached the maximum rate of erosion, finished the test, the time is different for each material because the properties of each are different.

Are presented and analyzed the results of the cumulative mass loss, the wear rate, Mean Depth of Erosion (MDE), loss of volume, incubation time and maximum rate of erosion, to be comparing the erosion resistance cavitation of the materials.

A test was conducted microhardness (HV) to assess the microhardness increase in cavitation eroded surface, the footprint generated after the tests were analyzed using X-ray Diffraction (XRD), Atomic Force Microscopy (AFM) and Scanning Electron Microscopy (SEM).

The materials presented behavior is consistent with the data from literature, the material with a longer test was the AISI 316L stainless steel with 540 min, then the Bronze SAE 430A with a time of 240 and finally the Aluminum 6061-T6 only 80 min. By comparing the original surface of the damaged surface material by Atomic Force Microscopy, we observed that the roughness changes considerably, on the other hand, when analyzing the trace of wear by scanning electron microscopy, was observed different cavity sizes and plastic deformation, cracking and loosening of material. Through the analysis of X-ray diffraction, we found a change in the three materials, in Aluminum 6061-T6 is a change in grain size, while the Bronze SAE 430A, there was a change in direction grains, finally in stainless steel AISI 316L, presented a phase change.

## ABSTRACT

Finally it was found that the three materials increases the microhardness tests performed after cavitation erosion.

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 100 años el fenómeno de desgaste erosivo por cavitación, ha sido un tema de estudio para los científicos e ingenieros, debido a que ha sido un grave problema en la industria.

El uso de la cavitación acústica e hidrodinámica inducida, parece ser un medio prometedor para el análisis de la formación de burbujas de vapor o de gas en un líquido por efecto de una reducción en la presión a temperatura constante. Una vez que estas burbujas de cavitación se forman, al llegar a una zona de alta presión, ocurre el colapso de las mismas; lo cual provoca el daño en la superficie de los materiales con que interactúan. En consecuencia el análisis e inspección, el mantenimiento y la reparación son vitales para el desarrollo de maquinaria hidráulica resistente a dicho fenómeno, evitando así pérdidas económicas, por tiempos muertos en la maquinaria empleada.

La cavitación acústica se ha utilizada ampliamente para estudiar este fenómeno; dónde las ondas de choque y microchorros surgen de los colapsos de las burbujas y tienen la capacidad de causar la degradación de los materiales a través del impacto y la erosión (Gogate & Pandit, 2004). El rápido crecimiento y el colapso de la burbuja, puede ser inducido por una fuente de sonido ultrasónico que se efectúa utilizando las ondas de sonido de alta frecuencia.

La información disponible sobre la erosión por cavitación en la literatura, son importantes y necesarios para entender y mejorar los procesos de diseño, construcción y mantenimiento de maquinaria hidráulica, hoy en día no se podría minimizar o prevenir éste fenómeno sin las investigaciones que han realizado en varios países. Este trabajo presenta resultados experimentales de la cavitación acústica en los materiales aluminio 6061-T6, Bronce comercial y Acero inoxidable 316L.

## ANTECEDENTES

La cavitación es un problema frecuentemente encontrado en equipos hidráulicos, el cual genera grandes problemas de su mantenimiento. Las primeras observaciones sobre cavitación fueron hechas por Isaac Newton en 1704, quien realizó estudios en zonas de baja presión entre superficies en contacto rodante, separadas por una capa delgada de agua.

En el siglo XIX, el problema que presentaban los tornillos de los barcos de vapor a perder su control sobre el agua, daba como resultado disminuir la vida de los motores, lo cual había desconcertado a los ingenieros, aunque Euler previó esto en 1754 en su obra sobre la teoría de turbinas. Euler afirmó que un líquido sometido a tensión, en zonas de alta velocidad, puede perder su medio continuo del fluido al formarse cavidades de aire.

En el siglo XIX, Reynolds describió el fenómeno de cavitación como se conoce hoy en día. En 1894, Reynolds realizó experimentos en un tubo Venturi y observó que se formaban burbujas en las proximidades, en la disminución del diámetro, observó que puede aumentar la temperatura del agua en un tubo abierto a temperatura ambiente a niveles de ebullición.

Durante el año 1895, Charles Algernon Parsons, construyó el “Turbinia”, un barco de vapor, donde se dio cuenta que el agua se agitaba simultáneamente con la formación de burbujas, como consecuencia de una reducción brusca de la presión, detrás de las hélices; es decir el agua se impactaba en las superficies de las hélices, las cavidades no contenían aire, sólo vapor de agua, además la mayor parte de la potencia del motor se consumía en la propulsión del barco. Parsons diseñó y construyó para el estudio de la cavitación; un circuito cerrado en forma ovalada, con sección transversal rectangular, propulsado por una hélice en movimiento que se muestra en la Figura 1. En 1910 Parsons, construyó un túnel de cavitación más grande en Newcastle Upon Tyne, para el estudio de la cavitación, que le permitió hacer ensayos con hélices de 12 pulgadas de diámetro

## ANTECEDENTES

(Burrill, 1951). Por otra parte el término "cavitación" apareció por primera vez en el artículo de Sidney Barnaby y Thornycroft (Barnaby& Thornycroft, 1895; Barnaby & Parsons, 1987), donde se describe la cavitación sobre hélices de buques, sin embargo se le atribuye al ingeniero naval, R.E. Froude la invención del término (Knapp, Daily, & Hammit, 1970).

En 1917 Lord Rayleigh presentó un estudio sencillo y realista del colapso de una burbuja con simetría esférica, los resultados indicaron que las burbujas contienen los elementos necesarios para generar ondas de choque intensas y producir un daño en una superficie, erosionando al material. Durante el mismo año Dieter Thoma define el parámetro de cavitación,  $\sigma_V$  como la diferencia entre la presión absoluta en zonas susceptibles a la cavitación y la presión de vapor del líquido. Plesset trató problemas muy relevantes para la dinámica de burbujas, como su estabilidad en soluciones líquido-gas (Knapp, et al.; Dopazo, 2008).

Hacia 1950 Glaser, inventa la cámara de burbujas, dando origen a la investigación de cavitación inducida por radiación. Seitz explicó la formación de burbujas por partículas cargadas en líquidos sobrecalentados, en el mismo año Noltingk y Neppiras desarrollan un modelo equivalente a la ecuación de Raleygh-Plesset (Knapp, et al.).

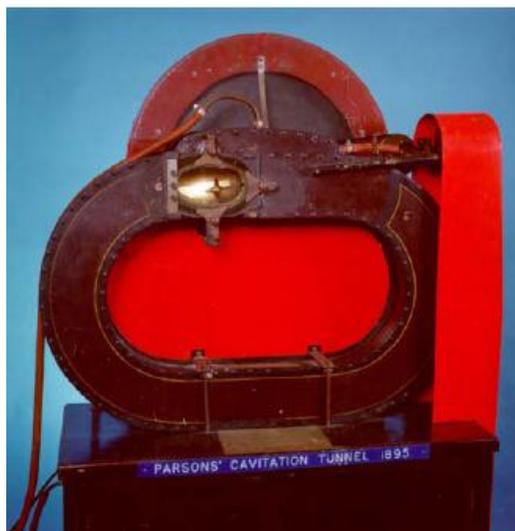


Figura 1 El primer túnel de cavitación construido por Parsons (Richardson, 1911).

## JUSTIFICACIÓN

El poco conocimiento de la ciencia y tecnología Tribológica en México, ha generado grandes pérdidas económicas, causadas por el fenómeno de erosión por cavitación. Por lo tanto se requiere un esfuerzo interdisciplinario para lograr un mejor entendimiento y solución a este fenómeno.

La cavitación es un problema presente en sistemas hidráulicos, el cual genera gran dificultad para su mantenimiento, convirtiéndose así, en un obstáculo para rendimiento de dichos equipos. Para entender la cavitación, se deben considerar cuidadosamente las medidas adecuadas para la selección de materiales, diseño mecánico y cómo reducirla al mínimo, esto es a un nivel aceptable para minimizar el costo de futuras reparaciones, facilitar el mantenimiento o sustitución de las partes que puedan dañarse.

Al seleccionar o diseñar una máquina determinada, la experiencia y los datos previos de estudio, deben ser utilizados como una referencia, para conocer la comportamiento de los materiales y por lo tanto tener una selección cuidadosa de materiales con alta resistencia a la erosión por cavitación que además tengan bajo costo.

La Tribología permite estudiar diversos materiales metálicos con el fin de conocer sus propiedades anti erosión por cavitación para poder ser seleccionados desde la parte de diseño de componentes de equipos hidráulicos.

Actualmente los países desarrollados siguen realizando investigaciones para la creación de nuevos diseños que permitan el desarrollo de maquinaria eficiente que resista el daño ocasionado por la cavitación. En México, aún no se cuenta con el equipo adecuado para realizar investigaciones similares, lo que causa que no existan datos confiables que puedan ser utilizados en el diseño y construcción de maquinaria resistente a dicho fenómeno.

## JUSTIFICACIÓN

Hasta hoy no hay una manera de prevenir el desgaste de un equipo; sin embargo, existen dos maneras de lidiar con el problema de la cavitación: uno es el desarrollo de materiales más resistentes, y otro es mejorar el diseño de equipos hidráulicos evitando caídas de presión muy bruscas.

## **OBJETIVO GENERAL**

Estudiar y evaluar la erosión por cavitación, en materiales metálicos mediante vibraciones ultrasónicas, a fin de conocer su resistencia al fenómeno.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a. Conocer y entender la cavitación mediante la revisión de la literatura para conocer su efecto en los equipos y componentes hidráulicos.
- b. Desarrollar una serie de ensayos experimentales de erosión por cavitación en Aluminio 6061-T6, Bronce SAE 430A y Acero inoxidable AISI 316L, para comparar su resistencia mediante las etapas de la erosión por cavitación.
- c. Validar los resultados experimentales, en base a la información de la Norma ASTM-G32 y mediante la comparación con otras investigaciones.

# CAPÍTULO I.

## FUNDAMENTOS DE TRIBOLOGÍA

### 1.1 Introducción a la Tribología

La Tribología fue aplicada empíricamente por el hombre desde antigüedad. Los primeros antecedentes de esta ciencia datan desde tiempos muy remotos, apuntan que este conocimiento fue aplicado para producir fuego o hacer agujeros, el desgaste de materiales usados en la construcción de herramientas, la reducción de la fricción en las ruedas hizo posible que los seres humanos se transportaran más lejos y la lubricación de trineos permitió el transporte de bloques y poder levantar grandes construcciones.

Muchos fueron los científicos que sentaron las bases y dieron un gran avance en el estudio y desarrollo de la Tribología, creando herramientas esenciales que facilitan el análisis de diversas situaciones científicas y de la ingeniería, pero para estudiar y entender la Tribología, se requiere de un conocimiento multidisciplinario como la Ciencia de materiales, la aplicación de las leyes básicas de la Ingeniería Mecánica, Física de superficies y la Química, entre otras disciplinas científicas, ya que las propiedades de los cuerpos que se encuentran en interacción y movimiento relativo, determinan el comportamiento de los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación.

Un alcance más integral, incluyendo la interacción con otras disciplinas científicas, es necesario para satisfacer las necesidades tanto de la sociedad como de la industria. En la Figura 1.1, se muestran estas disciplinas que son importantes para el desarrollo de nuevos conocimientos científicos y tecnológicos para minimizar recursos financieros, materias primas y reducir el consumo de energía.

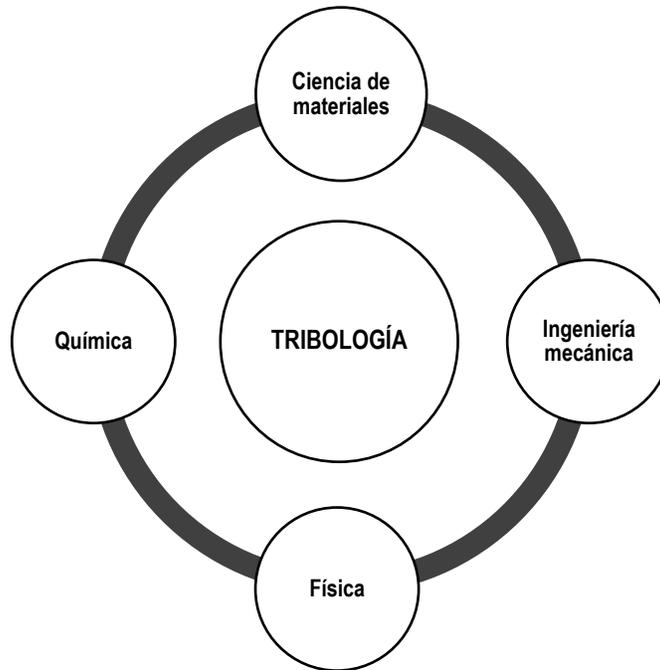


Figura 1.1 Ciencias que apoyan a la Tribología.

La aplicación de la Tribología, como ciencia, cumple un rol importante, contribuye a evitar serias consecuencias a las cuales se encuentran expuestas las industrias en general. De hecho, el desarrollo tecnológico de algunas naciones es clara evidencia de las ventajas que se obtienen cuando se aplica correctamente.

La preocupación por el medio ambiente, la conservación de energía y productos de consumo, la fiabilidad de la producción, son algunas de las fuerzas que impulsan a la investigación de la Tribología. Los avances en investigación de esta ciencia han evolucionado a lo largo de los años para satisfacer las necesidades industriales, hasta llegar a estudios de nano y micro de componentes, aparatos y máquinas, por lo que ha logrado la reducción de la fricción y el desgaste para ahorrar energía, el aumento de la productividad, y una disminución en el mantenimiento, lo que conlleva un ahorro significativo de capital (Stolarski, 1991).

El propósito de la investigación de la ciencia de Tribología es la minimización y eliminación de las pérdidas resultantes de la fricción y el desgaste. La palabra

Tribología proviene del griego tribos (τριβος) cuyo significado es rozamiento o fricción y logos (λογος) que significa estudio o tratado, se define como: “La ciencia y tecnología que estudia la superficie de los cuerpos que se encuentran en contacto y movimiento relativo, así como los fenómenos que de ello se derivan”. Por lo que la fricción, desgaste y lubricación son temas fundamentales para esta ciencia (Bhushan, 2002; Vizintin, Kalin, Dohda, & Jahanmir, 2004; Williams, 2005).

## 1.2 Desgaste

El desgaste, es definido como el proceso de remoción de material de una superficie sólida, como un resultado del movimiento relativo de superficies en contacto. En dicho proceso, el material puede ser removido, deformado, expulsado o puede resultar transferido de una superficie a otra.

## 1.3 Tipos de desgaste

Existen varios tipos de desgaste, llamados también Mecanismos, según Burwell (1957), dichos mecanismos pueden clasificarse como: Adhesión, abrasión, fatiga y corrosión.

### Adhesión

Conforme dos superficies se deslizan una sobre otra y ocurre la unión de las asperezas, el movimiento continuo de las superficies requiere del rompimiento de las uniones enlazadas. Para ello deben existir las condiciones de limpieza, presión de contacto, entre otras: para llevarse a cabo este proceso. En la Figura 1.2, puede observarse: (a) La presión de contacto muy alta debido a la pequeña área de contacto, (b) La partícula es deformada plásticamente aumentando su área de contacto, la presión de contacto se calcula de acuerdo a la ecuación (1.1).

$$P = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

Donde,

$A$ , es el área de contacto,

$F$ , es la fuerza aplicada

$P$ , es la presión de contacto.

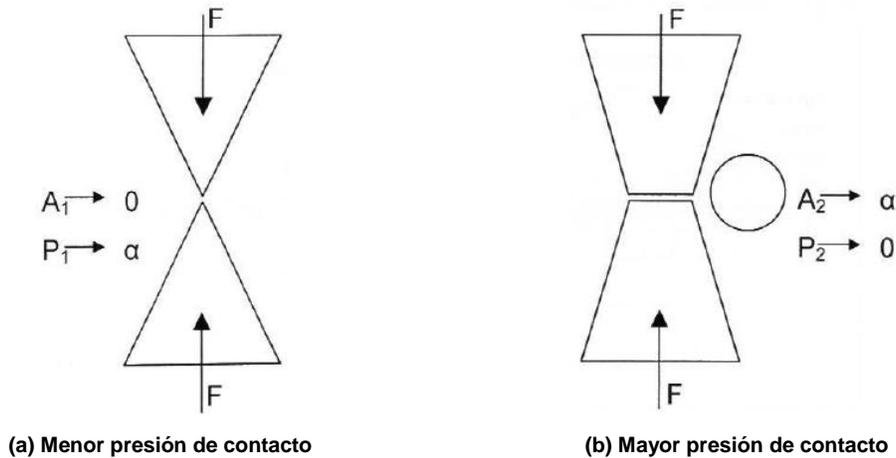


Figura 1.2 Desgaste por adhesión.

## Abrasión

Se produce en situaciones en las que se produce un contacto físico entre dos superficies, una de las cuales es significativamente más dura que la otra. Al aplicar una carga normal, una superficie dura penetra a la que es más suave produciendo deformaciones plásticas, rayado y remoción de material. Existen 2 tipos de abrasión y remoción de material de una superficie:

1) *Abrasión de dos cuerpos.* Ocurre cuando las protuberancias duras de una superficie son deslizadas contra otra.

2) *Abrasión de 3 cuerpos.* Se presenta en sistemas donde partículas tienen la libertad de deslizarse o girar entre dos superficies en contacto. En la Figura 1.3, se muestra los procesos de dos y tres cuerpos.

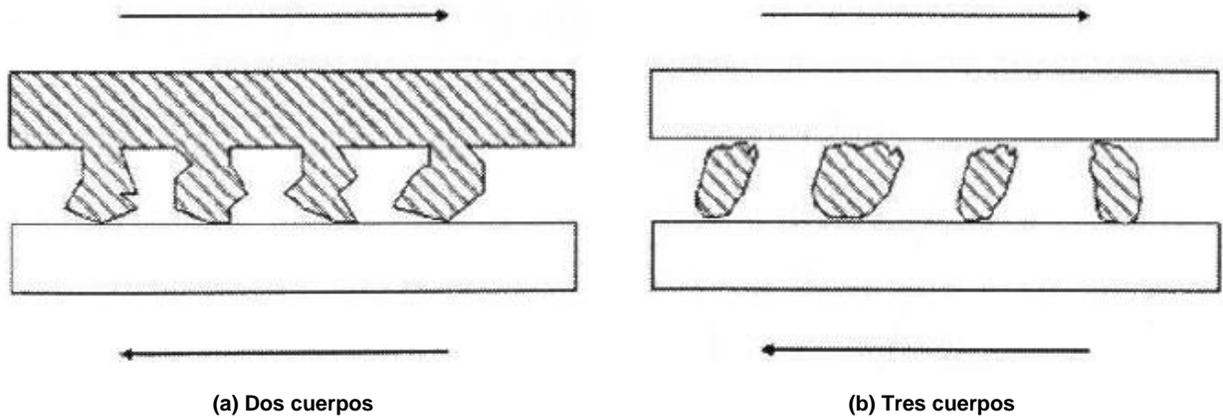


Figura 1.3 Desgaste por abrasión (Hutchings, 1992).

## Fatiga

El desgaste por fatiga es el resultado de esfuerzos cíclicos entre las asperezas de dos superficies en contacto. Aparentemente, por principio no se notan daños significativos, pero en realidad la resistencia del material cede por los repetidos ciclos de carga y descarga pueden inducir la formación de grietas superficiales y sub superficiales que eventualmente después de un número crítico de ciclos se crean grietas superficiales y sub-superficiales, las cuales pueden crear un daño irreversible en el material. En la Figura 1.4, se muestra el proceso de formación de grietas superficiales o sub-superficiales y la propagación de la grieta por fatiga.

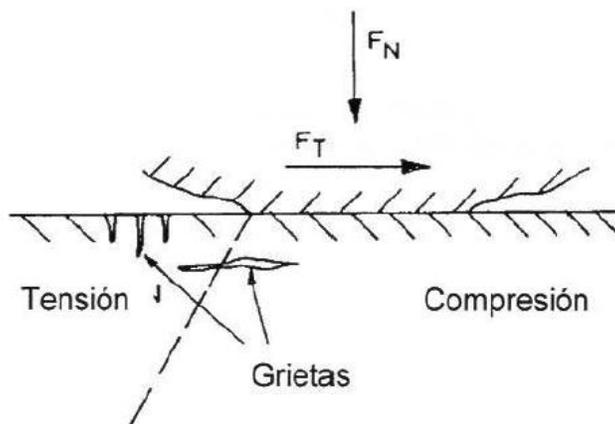


Figura 1.4 Desgaste por fatiga. Formación de grietas superficiales (Bhushan & Gupta, 2007).

## Corrosión

En este mecanismo de desgaste, una delgada película superficial se forma por oxidación u otras reacciones químicas. La película es más débil que el metal base, lo cual facilita la remoción de las partículas superficiales por acción de algún tipo o mecanismo de desgaste.

El mecanismo se repite y desgasta gradualmente hacia abajo; la remoción de la película superficial expone una nueva superficie al ataque químico, la cual es removida y así sucesivamente. En la Figura 1.5, se observa un modelo representativo de la formación de la capa de óxido.

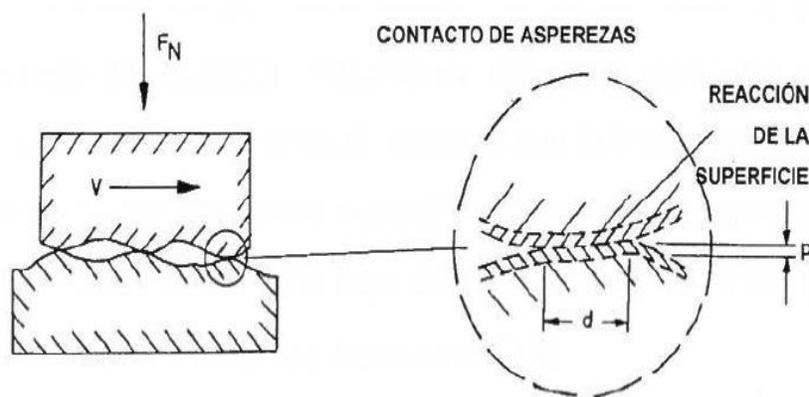


Figura 1.5 Desgaste corrosivo. Formación de la capa de óxido (Bhushan & Gupta, 2007).

## Erosión por partículas sólidas

Se define como el proceso de eliminación de material provocado por la incidencia de partículas sólidas sobre una superficie; el grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula respecto de la superficie. Los materiales dúctiles se deforman y se endurecen cuando se les golpea en forma perpendicular, pero a un ángulo crítico de aproximadamente  $20^\circ$  el material se elimina por una acción de corte (Vélez, 2008). En la Figura 1.6, se observa la erosión de acuerdo al ángulo de impacto.

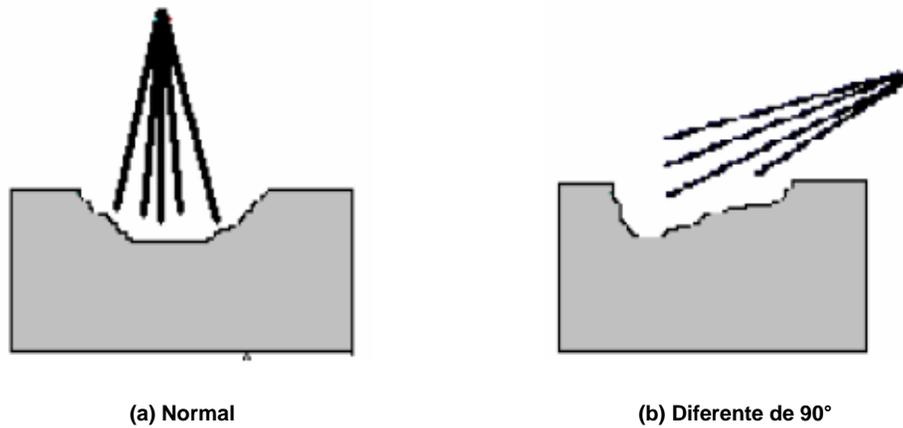


Figura 1.6 Erosión de una superficie según el ángulo de impacto.

### Erosión por cavitación

Cavitación es la formación de burbujas en un fluido sometido a grandes velocidades u ondas ultrasónicas de gran energía, este fenómeno erosiona el material debido a las grandes presiones durante el colapso de las burbujas, la Figura 1.7, muestra un esquema de este mecanismo. En el capítulo siguiente se presenta a detalle el fenómeno de erosión por cavitación.

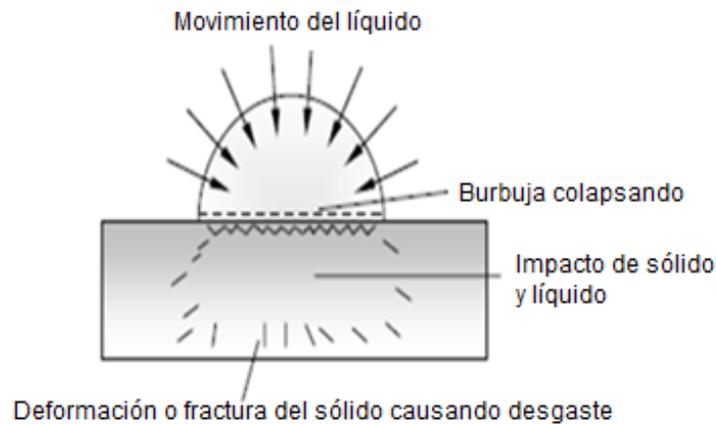


Figura 1.7 Erosión por cavitación (Stachowiak & Batchelor, 2001).

# CAPÍTULO II.

## CAVITACIÓN

Cavitación es un fenómeno generado por la formación cíclica de burbujas o cavidades de vapor y/o gas, en este medio la presión estática o dinámica desciende a presión de vapor a temperatura constante. Una vez que las burbujas son originadas, estas se mueven a través del líquido hasta someterse a un aumento de presión donde colapsan o implotan, es decir regresan al estado líquido de manera súbita (Knapp, et al.; Streeter, Wylie, & Bedford, 2004).

Las presiones pueden ser transmitidas desde el colapso de las burbujas a la superficie, ya sea en la forma de una onda de choque o por un microchorro, dependiendo de la distancia con la superficie. El ciclo de formación y colapso de las burbujas se produce a alta frecuencia y la tensión dinámica, pueden causar daño en el material por fatiga (Schwetzke & Kreye, 1996).

### 2.1 El fenómeno de la cavitación

El fenómeno de erosión por cavitación consiste en la formación, crecimiento y colapso de burbujas en un líquido, es responsable de los daños en materiales metálicos y no metálicos en medios líquidos.

La formación de burbujas es causada por la disminución de presión en el líquido siendo cercana a cero o negativa. La cual es descrita en las siguientes etapas (ver Figura 2.1):

1. Se forman en el líquido numerosas burbujas microscópicas.
2. Las burbujas recién formadas se expanden o se agrandan en el líquido.

3. La presión extrema ejercida sobre las burbujas recién expandidas se comprimen, aumentando la temperatura del vapor contenido en ellas.
4. Por último las burbujas colapsan, ocasionando la liberación de una enorme cantidad de energía al impacto, causando daños en la superficie del material.

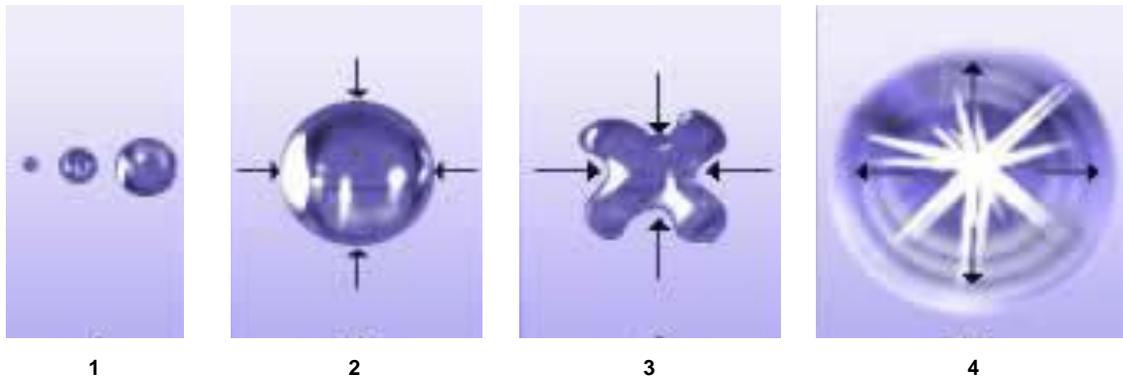


Figura 2.1 Formación de burbujas y fenómeno de implosión (Laguna, 2008).

## 2.2 Clasificación

La cavitación puede clasificarse de acuerdo con el contenido de las burbujas, las cuales pueden contener gas o vapor o una combinación de ambos.

Si las burbujas contienen gas, la expansión en el líquido puede ser por la difusión de gases disueltos en el líquido en la burbuja, por reducción de la presión o por aumento de la temperatura; sin embargo, si las burbujas contienen vapor, la reducción de la presión es suficiente para la formación de las burbujas, siendo la temperatura constante es la causa principal de un efecto "explosivo" en las cavidades, mientras que elevar la temperatura lo suficiente hace que el vapor de las burbujas crezca continuamente produciendo el efecto conocido como *hervir*.

Existen cuatro formas de generar el crecimiento de la burbuja:

1. Para una burbuja llena de gas, por la reducción de la presión o por el aumento de la temperatura, se llama cavitación gaseosa.

2. Para obtener una burbuja llena de vapor, por reducción de la presión, se conoce como cavitación vaporosa.
3. Para una burbuja llena de gas, sí el gas que viene del exterior del líquido por difusión, llena la burbuja, al proceso se le conoce como desgasificación.
4. Para obtener una burbuja llena de vapor, es suficiente con aumentar la temperatura, a esto se le denomina ebullición (Young, 1989).

La burbuja por lo general contiene una mezcla de gas y vapor, por lo que clasificar y entender el origen claramente de la cavitación puede ser complicado. De acuerdo al modo de generación la cavitación se puede clasificar en cuatro tipos diferentes como lo propone Lauterborn, la clasificación se muestra en la Figura 2.2.

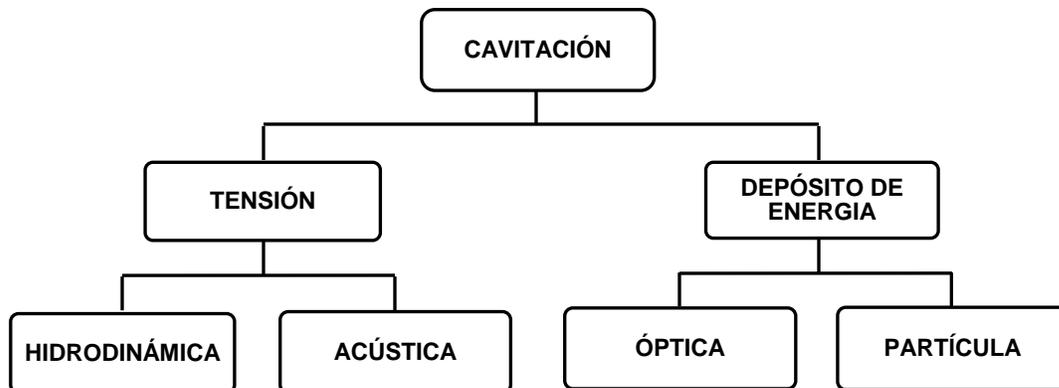


Figura 2.2 Clasificación de la cavitación (Lauterborn, 1979).

Lauterborn también sugirió que la cavitación hidrodinámica y acústica son causadas por la tensión del líquido, mientras que la cavitación óptica y de partícula son generadas por un depósito local de energía. A continuación se listan las cuatro formas de cavitación propuestas por Lauterborn:

1. La cavitación hidrodinámica es producida por las variaciones de presión en un flujo del líquido debido a la geometría del sistema.
2. La cavitación acústica es generada por las ondas de sonido en un líquido debido a las variaciones de presión.

3. La cavitación óptica es inducida por los fotones de luz de alta intensidad que atraviesan a un líquido.
4. La cavitación de partículas se produce por cualquier otro tipo de partículas en el líquido.

### **2.3 Erosión por cavitación**

La erosión por cavitación es el daño mecánico de un material a causa de la presión impulsiva generada por el continuo colapso de las burbujas (Okada & Iwai, 1989). Ésta comienza cuando el área de cavitación es considerablemente grande, la zona de mayor daño ocurre en la región de colapso de las burbujas.

Mediante pruebas experimentales se ha determinado que este fenómeno es causado inicialmente por fatiga, para dar paso a la fractura, el subsecuente impacto de burbujas, existiendo un valor límite por encima del cual, las cargas comienzan a contribuir a la fractura por fatiga (Knapp, et al.). La fractura por fatiga del material se produce a lo largo de la superficie de impacto desprendiendo partículas.

Thiruvengadam y Preiser (Thiruvengadam & Preiser, 1963), propusieron que la curva característica de la tasa de desgaste versus tiempo de la Figura 2.3, se puede dividir en cuatro zonas: 1) Zona de incubación, donde no hay pérdida de masa, 2) Zona de acumulación, la tasa de pérdida de masa se incrementa, 3) Zona de tasa máxima de desgaste, en la que disminuye la tasa de desgaste y 4), Zona de equilibrio, con una tasa de desgaste constante; sin embargo, esta propuesta fue cuestionada por Plesset y Devine (Plesset & Devine, 1966), demostrando que la zona de atenuación se asocia a cavidades de menor intensidad de implosión, que atribuyeron a una amortiguación asociada a los efectos hidrodinámicos. Por otra parte, indicaron que la tasa máxima de desgaste, permanece estable por un tiempo, y no formando un pico estrecho, como lo indicaron Thiruvengadam y preiser. La gráfica que describen los autores se muestra en la Figura 2.4.

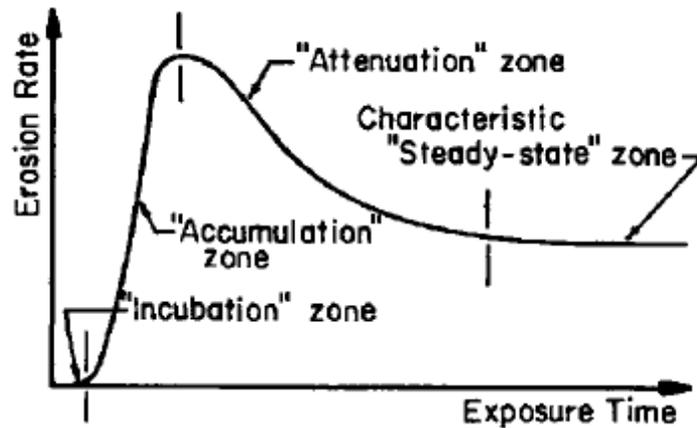


Figura 2.3 Curva tasa de desgaste vs tiempo de acuerdo a Thiruvengadam & Preiser.

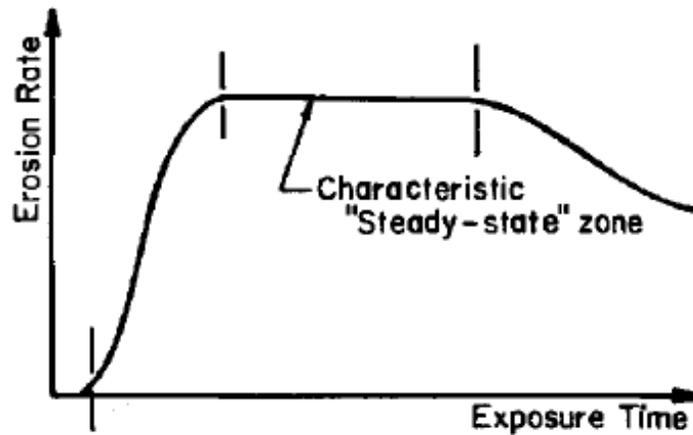


Figura 2.4 Curva tasa de desgaste vs tiempo de acuerdo a Plesset & Devine.

En información de la literatura más reciente, el proceso de erosión debido por cavitación, según la norma ASTM G 32 puede clasificarse en diferentes etapas: 1) incubación, la pérdida de masa es insignificante o cero, 2) aceleración, aumenta considerablemente la pérdida de material, y la deformación plástica. 3) tasa máxima de erosión, la superficie original se elimina por completo, 4) desaceleración, disminución de la tasa de erosión, 5) tasa terminal de erosión, después de que la tasa de erosión se ha reducido desde su valor máximo y permanece constante por un periodo de tiempo suficientemente largo.

En la Figura 2.5, es posible observar la evolución de cada etapa mediante el gráfico de tasa de desgaste, así como los parámetros que representan la curva de pérdida de masa acumulada.

Donde:

- A, Tiempo de incubación.
- tan B, Tasa máxima de erosión.
- tan C, Tasa terminal de erosión.
- D, Línea de intercepción con la etapa terminal.

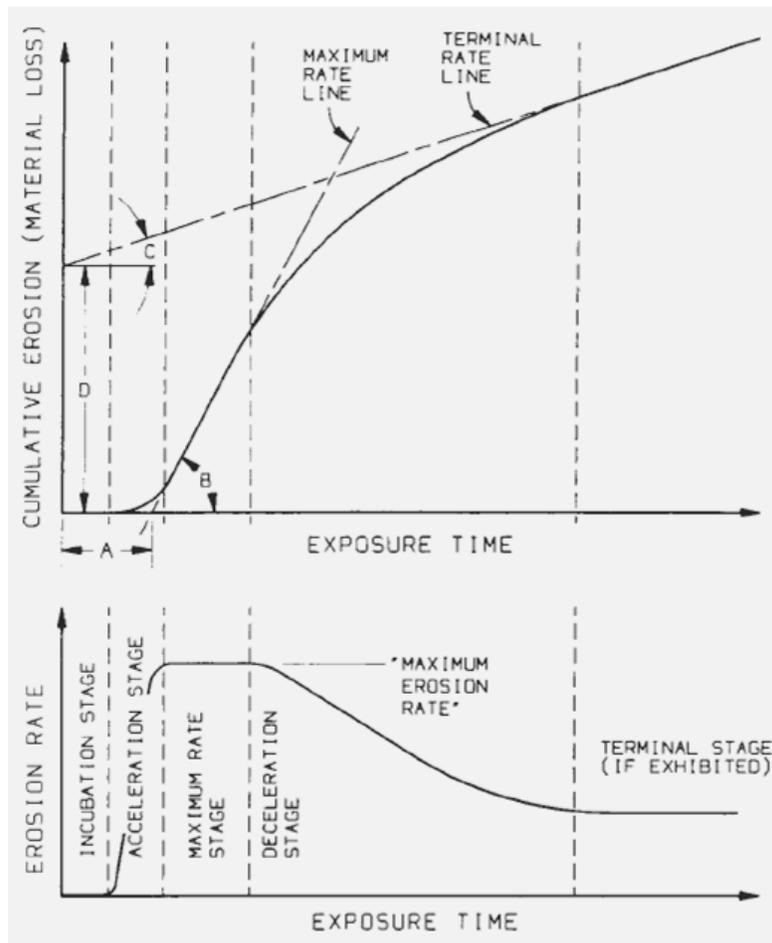


Figura 2.5 Evolución de las etapas de erosión por cavitación.

Hammit (Knapp, et al.) clasifica el proceso de erosión por cavitación en cuatro etapas: la etapa inicial se caracteriza por una alta tasa de pérdida de volumen al inicio del ensayo; la segunda es la etapa de incubación, en la que disminuye la tasa de pérdida de volumen, durante esta etapa se produce un endurecimiento por trabajo en la superficie, como consecuencia de la deformación plástica del material; la siguiente es la etapa de aceleración, en la que se acumula la deformación plástica y comienza la remoción de material, que se puede observar en distintas áreas de la superficie, finalmente, la última etapa es la tasa máxima de erosión, donde la superficie original es totalmente removida, lo cual puede explicar que la tasa de pérdida de volumen es constante en esta etapa. En la Figura 2.6, es posible observar la evolución de cada etapa.

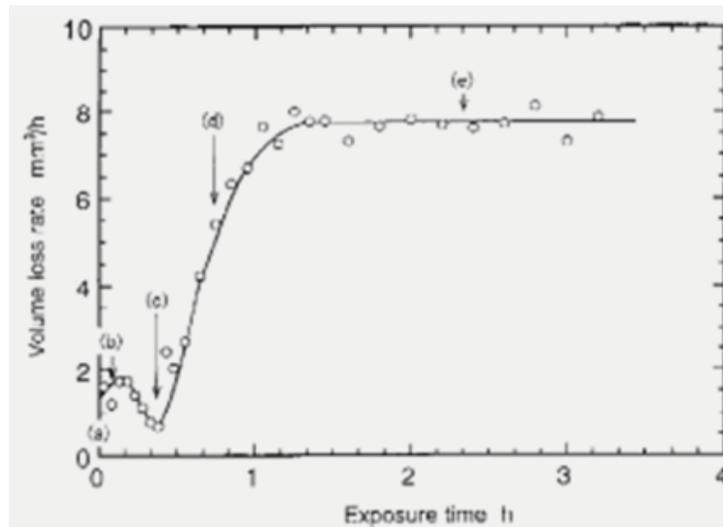


Figura 2.6 Evolución de las etapas de la erosión por cavitación en la curva de la tasa de pérdida de volumen.

## 2.4 Efectos de la cavitación

### 2.4.1 Efectos internos

Como su nombre lo indica se producen en el interior de la burbuja. El efecto interno de la cavitación es un aumento de temperatura local y de presión. En estas regiones, pueden ocurrir reacciones químicas que normalmente no proceden líquido y por lo tanto llevan a la formación de partículas de tamaño nanométrico

(Fujikawa, 1980; Kumar, Kumar, & Pandit, 2000). Esta mezcla microscópica puede aumentar la transferencia de masa y generar algunas reacciones (Hammit, 1980; Hagenson & Doraiswamy, 1988).

#### **2.4.2 Efectos externos**

Se originan en el exterior de la burbuja. La presencia de cavitación produce tres efectos externos principales: ruido, alteración del flujo de fluidos, y daños en los materiales. El ruido de alta frecuencia es asociado a la cavitación y se debe al colapso de burbujas y se considera generalmente como una molestia auditiva en algunas aplicaciones por ejemplo, es perjudicial para los militares navales ya que delata la ubicación de los buques al enemigo.

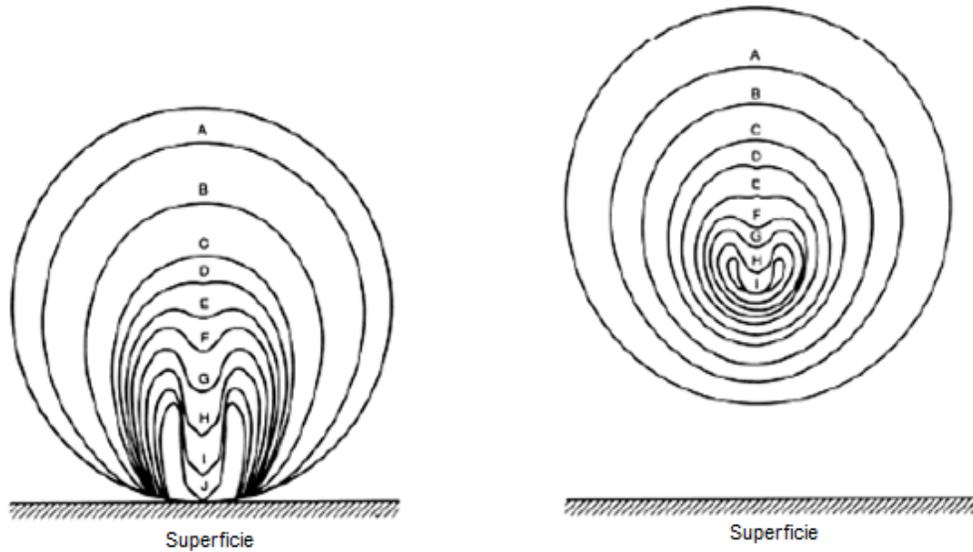
La cavitación modifica el flujo de los líquidos, lo cual puede provocar la disminución de la fuerza que se puede aplicar a una superficie, por ejemplo puede dar lugar a la limitación de empuje en las hélices de los buques y barcos de velocidad. En las bombas centrífugas y existe una pérdida de la eficiencia debido a la presencia de cavitación, misma que puede ocasionar la disminución en la potencia de las bombas y turbinas (Knapp, et al.).

#### **2.5 Mecanismos de cavitación**

Los mecanismos de la erosión por cavitación pueden tener dos orígenes distintos:

El primero se encuentra relacionado con el hecho de que el colapso de una burbuja puede ser inestable en cuanto a su forma. Cuando el colapso se produce en contacto o muy cerca de una superficie sólida, las burbujas colapsan asimétricamente, formando un micro chorro de líquido dirigido hacia el sólido (Naude & Ellis, 1961; Benjamin & Ellis, 1966).

El segundo, cuando ocurre el colapso de la burbuja lejos de cualquier superficie sólida, lo hace de manera simétrica y emite una onda de choque en el líquido circundante (Plesset & Chapman, 1971), como se observa en la Figura 2.7.



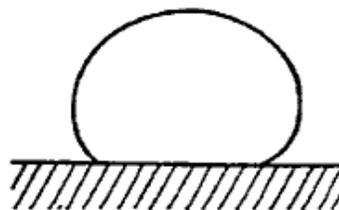
(a) Burbuja en contacto con la superficie sólida

(b) Burbuja adyacente a una superficie sólida

Figura 2.7 Colapso asimétrico de la burbuja.

### 2.5.1 Microchorro

El colapso de una gran cantidad de burbujas de forma asimétrica, provoca que el líquido que rodea se apresure a llenar el vacío, lo que origina un microchorro de líquido como se observa en la Figura 2.8, posteriormente el microchorro, rompe la burbuja con tal fuerza que se produce una acción de martilleo, el cual puede picar la superficie del material. Se ha reportado que puede alcanzar velocidades de hasta 1000 m/s y puede alcanzar presiones superiores a 1 GPa (Arviza, Balbastre, & González, 2002).



(a) Burbuja inicial



(b) Inicio del colapso de la burbuja

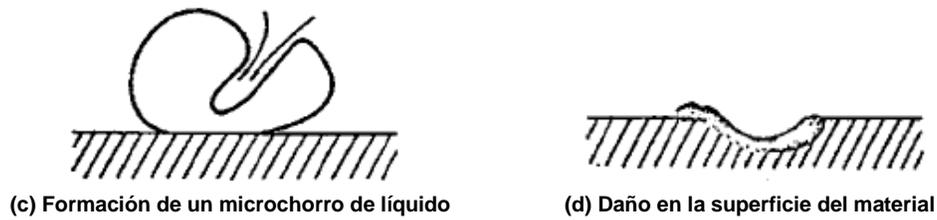


Figura 2.8 Formación de microchorros (Bregliozzi, Di Schino, Haefke, & Kenny, 2003).

### 2.5.2 Onda de choque

En la mecánica de fluidos, una onda de choque es aquella onda de presión abrupta producida por un objeto que viaja más rápido que la velocidad del sonido en el medio correspondiente (Potter & Wiggert, 2002), así mismo a través de diversos fenómenos produce diferencias de presión extremas e incremento de la temperatura. La onda de presión se desplaza como una onda frontal por el medio. Una de sus características es que el aumento de presión en el medio se percibe como explosiones. La Figura 2.9, muestra la formación de las ondas de choque durante la implosión.

Dicho término también se aplica para designar a cualquier tipo de propagación ondulatoria, y que transporta, por tanto energía a través de un medio continuo o el vacío, de tal manera que su frente de onda provoca un cambio abrupto de las propiedades del medio (Anderson, 1984).

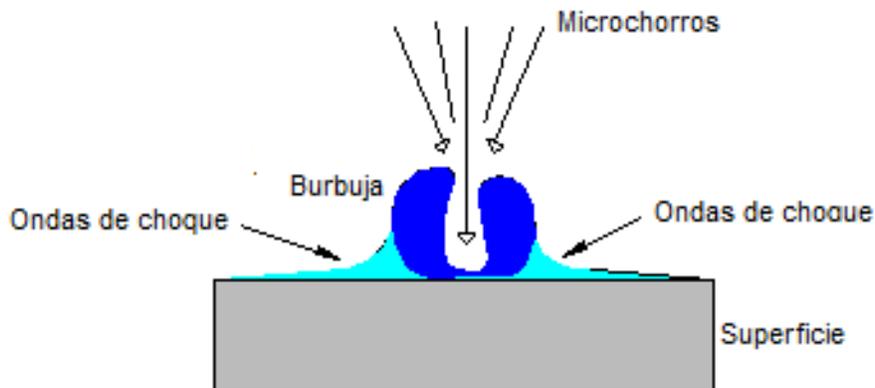


Figura 2.9 Colapso de la burbuja.

Para que las ondas de choque puedan provocar daño a un material, es necesario que el colapso ocurra muy próximo a las superficies del sólido donde interactúa. Se han medido presiones superiores a 100,000 psi, en las ondas de choque producidas por burbujas de cavitación (Vyas & Preece, 1976).

## **2.6 La corrosión como un factor en la erosión por cavitación**

En un medio donde comúnmente se presenta la cavitación, y que al mismo tiempo es un medio corrosivo, como en agua de mar o un medio ácido, tanto de la erosión mecánica como la corrosión están presentes y pueden interactuar entre sí de forma sinérgica, lo que puede agravar el ataque contra el material. En este caso el proceso se conoce como cavitación – corrosión (ASTM International, 2002).

La corrosión es una oxidación electroquímica, de la materia. La interacción de la corrosión con la cavitación puede tener efectos que pueden conducir a un daño mayor. Por otra parte, el mecanismo de la cavitación puede inhibir o reducir los efectos nocivos sobre la corrosión y viceversa, dando lugar a una reducción en el daño total (ASM International, 1992).

El daño por cavitación se atribuye parcialmente a efectos de desgaste mecánico. La corrosión se origina cuando ocurre el colapso de la burbuja, ya que destruye la película protectora, como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.10, mediante los siguientes pasos:

1. Se forma una burbuja de cavilación sobre la película protectora.
2. El colapso de la burbuja causa la destrucción local de la película.
3. La superficie no protegida del metal está expuesta al medio corrosivo y se forma una nueva película por medio de una reacción de corrosión.
4. Se forma una nueva burbuja en el mismo lugar, debido al aumento de poder de nucleación de la superficie irregular.
5. El colapso de la nueva burbuja destruye otra vez la película.
6. La película se forma de nuevo y el proceso se repite indefinidamente hasta formar huecos bastante profundos.

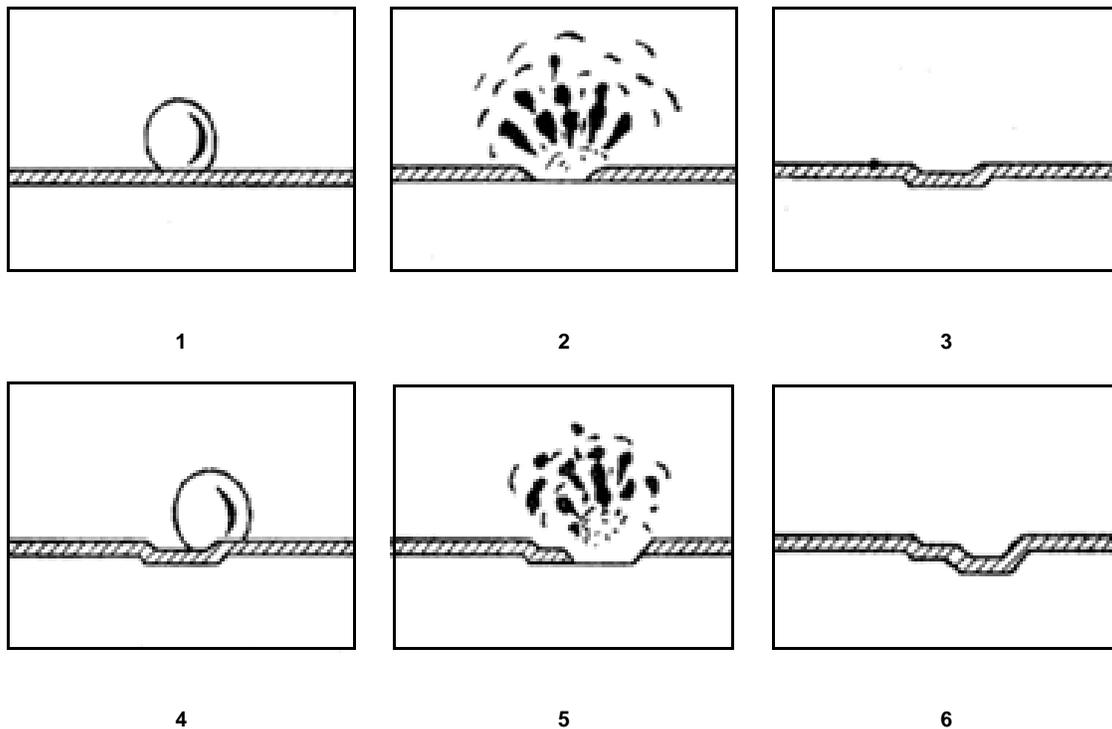


Figura 2.10 Corrosión en el proceso de cavitación.

El mecanismo anterior también funciona sin la presencia de una película protectora, ya que la implosión de la burbuja ya es suficiente para deformar el metal plásticamente y arrancarle pedazos de material. Por lo que la cavitación es un fenómeno de corrosión-erosión.

### **Efecto de cavitación en el proceso de corrosión**

La cavitación se puede tener una variedad de efectos en los procesos de corrosión, incluyendo:

- La eliminación de cualquier película protectora de la superficie del metal.
- Aumento de las tasas de difusión de los gases disueltos en la superficie del metal.
- Aumento de la velocidad de eliminación de los materiales por la reacción a la corrosión de las proximidades de la superficie.

### **Efecto de la corrosión en el proceso de cavitación**

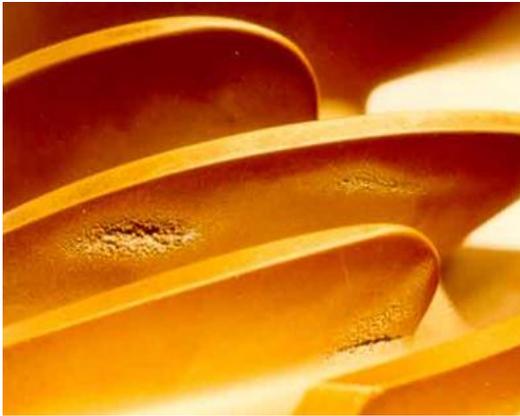
El proceso de corrosión electroquímica puede ser descrito por dos reacciones: la reacción anódica, que consiste en la oxidación del metal y la reacción catódica, que por lo general consiste en el desprendimiento de hidrógeno; lo cual puede generar que:

- Los gases disueltos pueden amortiguar la implosión de las burbujas y reducir sus efectos perjudiciales.
- Es posible que las partículas sólidas producidas por el proceso de corrosión, puedan actuar como núcleos de cavidades y con ello aumentar la aparición de cavitación (ASM International, 1992).

### **2.7 Problemas de erosión por cavitación**

El daño que las burbujas de cavitación pueden causar en un material cuando se colapsan en las proximidades de la superficie, ha sido intensamente estudiado por muchos años por científicos e ingenieros. Cuando este colapso se produce cerca de una superficie sólida, la reproducción de colapsos de millones de burbujas puede provocar falla por fatiga superficial, y como consecuencia el desprendimiento de fragmentos de material dando origen a la erosión por cavitación.

La Figura 2.11 (a), muestra los daños por cavitación en una hélice de bomba de flujo mixto, fabricado de una aleación basada en aluminio, mientras que en la Figura 2.11 (b), se muestran daños más severos en las alabes de una turbina Francis, la cavitación se ha generado en las cuchillas (Brennen, 1995). En la Figura 2.12, se ilustra la severidad del daño que es capaz de ocasionar la cavitación sobre el lado de succión de un impulsor de una bomba radial.



(a) Hélice de una bomba



(b) Alabes de una turbina Francis

Figura 2.11 Daños por cavitación (Brennen, 1994).

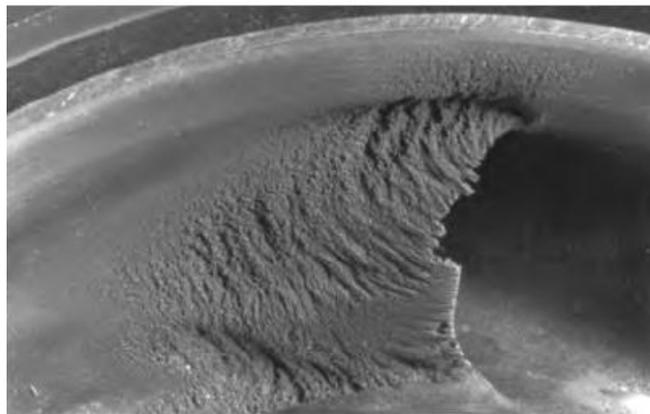
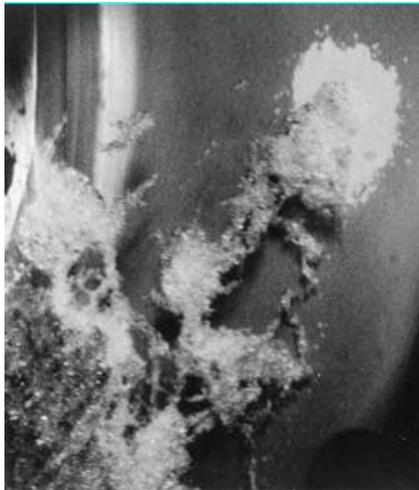


Figura 2.12 Daños por cavitación en el lado de succión de un impulsor de bomba radial (Gülich & Rösch, 1988).

En la actualidad, varios esfuerzos de investigación se centran en la dinámica de grupos de burbujas de cavitación. Estos estudios sugieren que el colapso puede ser más violento que el de las burbujas individuales, otro caso, sucede en los impulsores de bombas centrífugas. En la Figura 2.13, se muestran dos fotografías tomadas en la misma zona, en la Figura 2.13 (a), se observa como las burbujas se están colapsando durante el flujo, esto ocasiona a los daños localizados en el material que se muestran en la Figura 2.13 (b).



(a) Burbujas colapsando en la placa base



(b) Zona dañada por cavitación

Figura 2.13 Daños por cavitación en un impulsor (Soyama, Kato, & Oba, 1992).

El problema de mantenimiento continuo en las turbinas hidráulicas es por lo general ocasionado por la erosión, la corrosión y la cavitación de componentes que se encuentran en contacto con el agua. Las picaduras o cavidades observadas son producto de es una acción erosiva producida por la cavitación y se produce en áreas de baja presión y altas velocidades de agua (Rheingans, 1962). La Figura 2.14, exhibe el daño de cavitación después de aproximadamente cuatro años de funcionamiento.

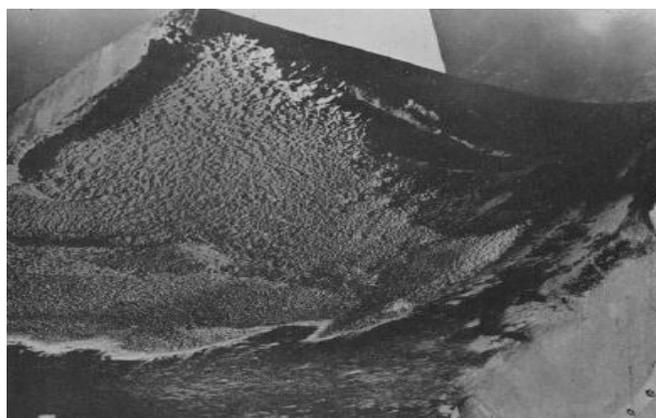


Figura 2.14 Hélice de turbina hidráulica dañada por cavitación.

Las burbujas en la cavitación desempeñan un papel importante en varios campos de la ciencia y la tecnología contemporánea, por ejemplo, la rápida rotación de las hélices de barco causa las caídas de presión cerca de las hélices y la posterior formación de burbujas cuyo colapso genera la cavitación.

En algunos países, las centrales hidroeléctricas son la fuente más importantes de energía y, a fin de operarlas de manera eficiente, los componentes en contacto con el agua, por lo general requieren de procesos especiales de mantenimiento, como reparaciones de soldadura, recubrimiento, remplazo de partes, tratamientos térmicos, etc. (Santa, Espitia, J.A, & Toro, 2009).

## 2.8 Investigaciones de erosión por cavitación

Hattori y sus colaboradores (Hattori, Ogiso, Minami, & I, 2008) realizaron pruebas de erosión por cavitación en acero al carbono S15C, también probaron con Aluminio puro A1070BD-F, que es comúnmente utilizado en las pruebas de cavitación por el método vibratorio. Un equipo de vibración como el que se especifica en la Norma ASTM G32-03 (ver Figura 2.15 (a), fue utilizado para el ensayo Otra prueba se realizó utilizando un método de cavitación por chorro de líquido de acuerdo con la norma ASTM G134-95 para simular la condición de flujo (ver Figura 2.15 (b)).

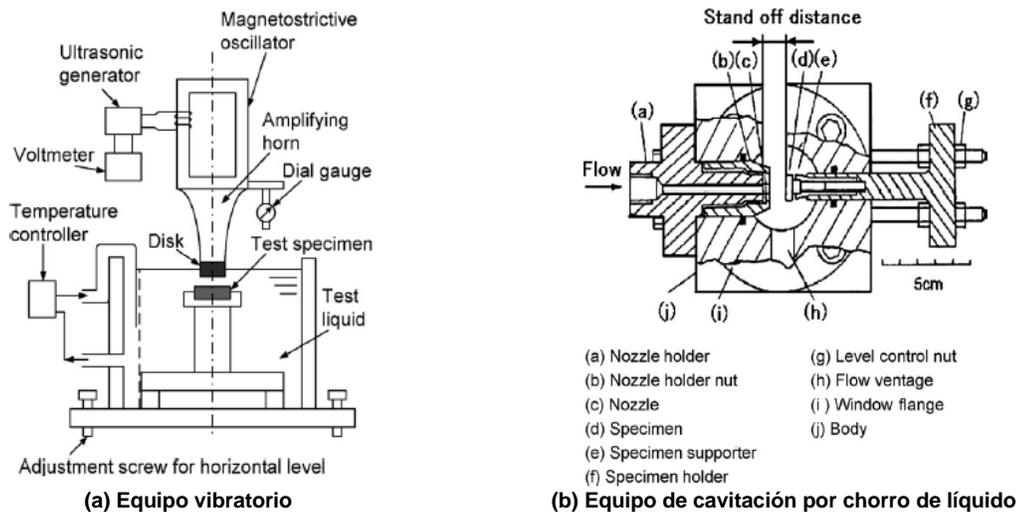


Figura 2.15 Equipos de Cavitación.

El acero al carbono S15C y el Aluminio A1070BD-F se pusieron a prueba utilizando el equipo vibratorio. La distancia entre el disco y la muestra fue de 1 mm. La frecuencia del oscilador fue de 19,5 kHz, 50  $\mu\text{m}$  de amplitud pico a pico, con agua desionizada como líquido de prueba, que se mantuvo a  $25 \pm 1$  °C con un control de temperatura dispositivo.

El Aluminio A1070BD-F fue probado usando el equipo de cavitación por chorro de líquido con el fin de verificar si los resultados de la prueba de vibración se podían aplicar a un flujo efectivo del sistema. Los resultados fueron evaluados en términos de la profundidad máxima de la erosión y el perfil de la superficie por la observación de la muestra de prueba después del experimento.

El líquido fue presionado por una bomba de émbolo, el número de cavitación se mantuvo en 0,025 (la presión de entrada fue de 17.4MPa y la presión de salida de 0.44 MPa), mientras que la velocidad del flujo del chorro se mantuvo a 185 m/s. La muestra se colocó a una distancia entre la boquilla y la superficie de ensayo de la muestra a 15 mm y un diámetro del orificio de la boquilla a 0.4mm, el líquido de prueba fue el agua simple.

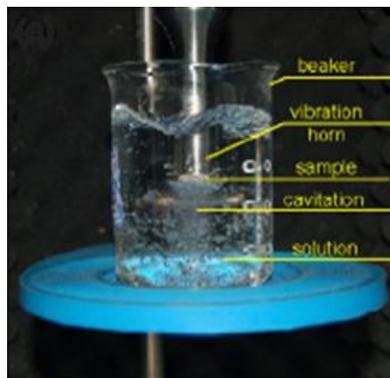
La Figura 2.16, muestra una vista general de los especímenes de prueba después de las pruebas de erosión. Estas son las muestras de S15C después de 100 h de exposición, A1070BD-F después de 10 h, y A1070 después de 75 min. Se observa que la superficie de prueba se erosionó de manera uniforme para S15C y A1070BD F-por el método vibratorio. La erosión es profunda y localizada para A1070 probado por el método de cavitación por chorro de líquido.



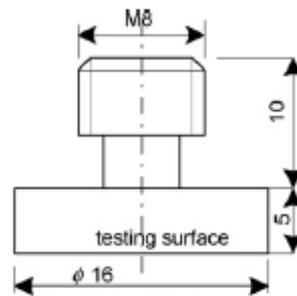
Figura 2.16 Especímenes erosionados.

Concluyeron que la profundidad máxima de erosión es aproximadamente 4 veces la profundidad media de erosión para S15C y para el A1070BD-F y 1,5 veces para el A1070. Además el tamaño de las picaduras se incrementa con el tiempo de exposición, disminuyendo a la vez el número de picaduras profundas.

Haosheng y otros (Haosheng, Li, Chen, & Jiadao, 2008) investigaron los daños ocasionados por cavitación en la superficie de acero industrial 40Cr durante la etapa de incubación, utilizaron un aparato de cavitación vibratoria como se muestra en la Figura 2.17 (a), con vibración a una frecuencia de 20 kHz y de amplitud de 6  $\mu\text{m}$ . La muestra se instaló en la punta del horn, como se muestra en la Figura 2.17 (b), donde también se observa las dimensiones del espécimen utilizado.



(a) Ensayo de cavitación



(b) Especímen

Figura 2.17 Equipo de cavitación vibratoria.

Después de 1 min de prueba identificaron tres tipos de cavidades en la superficie de la muestra, la primera llamada cavidad completa, que tiene forma triangular, lo que significa que el diámetro de la cavidad se hace más pequeño desde la superficie hasta la parte inferior como se observa en la Figura 2.18. El material de la capa superficial en el borde parece ser arrancada y tiene una abertura escalonada.

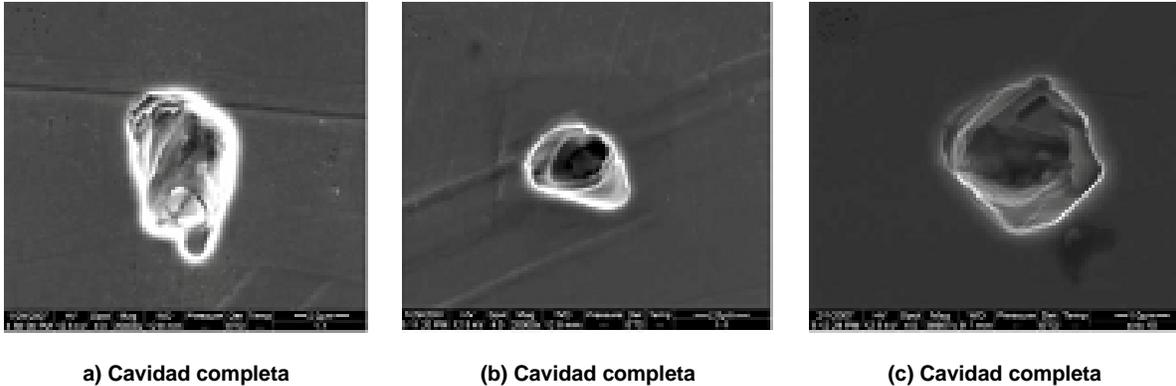


Figura 2.18 Cavidades completas.

En la segunda llamada cavidad incompleta, el material de la superficie dañada se presiona hacia la cavidad con grietas evidentes en el mismo (ver Figura 2.19 a). La tercera se llama cavidad térmica, cuya característica es que tiene forma de aguja en el centro con un área de influencia a su alrededor, mostrado en la Figura 2.19 b y c. El diámetro del área de influencia fue 6.5 veces más grande que el diámetro de la cavidad y el color del área de influencia son diferentes de la superficie en buen estado.

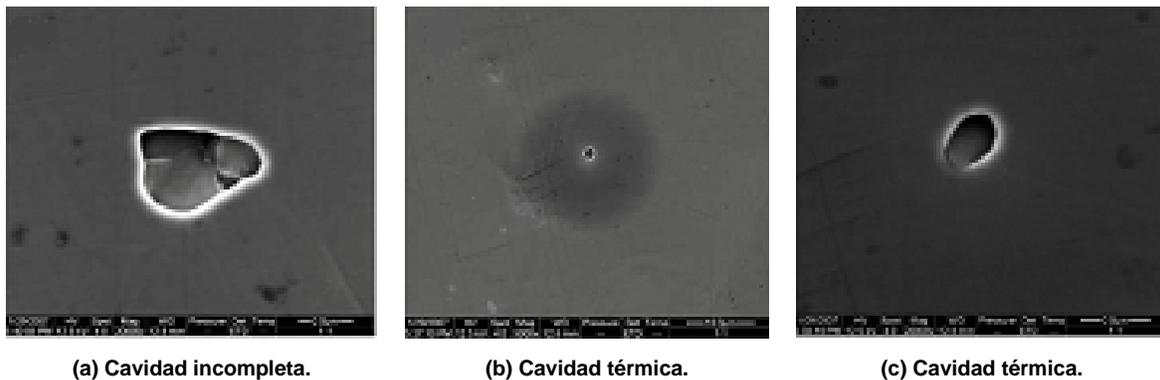


Figura 2.19 Cavidades térmicas.

Además, realizaron una simulación numérica del proceso de colapso de la burbuja. De acuerdo con los resultados, explicaron la formación del área de influencia de la cavidad térmica, que se encuentra en la Figura 2.20, donde la distancia  $H$  afecta no sólo a la velocidad del chorro, sino también en la forma de la burbuja en el momento del colapso. El radio de la parte inferior de burbujas aumenta a medida que ocurre el colapso, el cual se puede dar en un punto cercano de la superficie sólida.

Los resultados experimentales mostraron que la burbuja puede alcanzar una temperatura elevada en el momento del colapso, si la burbuja contiene suficiente gas. Sin embargo, sólo las burbujas que contienen bastante gas pueden llegar a una temperatura lo suficientemente alta, como para generar el área de influencia.

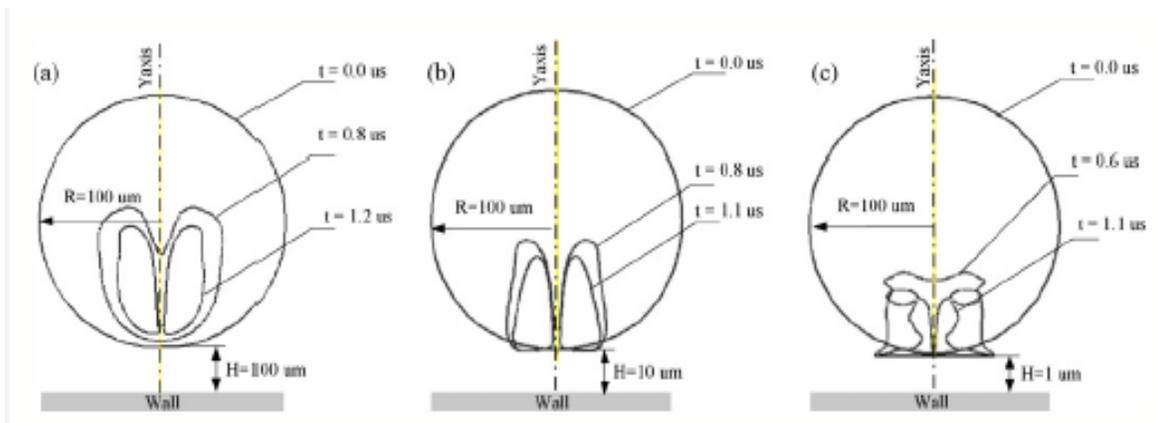


Figura 2.20 Modelo de la formación de burbuja

A partir de la simulación numérica concluyeron que el microchorro es la principal razón de las cavidades completas, la onda de choque es la razón principal de la cavidad incompleta y la alta temperatura en la burbuja en el momento del colapso se considera como la razón para la formación de las cavidades térmicas.

Di Vernieri y otros investigadores (Di Vernieri, Wischnowski, Tanaka, & Sinatora, 1999), analizaron la correlación entre la microestructura y la resistencia a la erosión por cavitación de acero fundido al alto cromo para el desarrollo de nuevos materiales el cual dicen, depende de la comprensión de la relación entre la

microestructura y la erosión, por ello se analizó la influencia de la microestructura sobre las tasas de erosión por cavitación de tres tipos aleaciones de acero al alto cromo, con y sin adición de tungsteno para la evaluación de la resistencia a la erosión por cavitación, las aleaciones fueron fundidas en un horno de inducción, utilizaron como material de referencia un acero inoxidable austenítico AISI 304.

Determinaron que el colapso de la burbuja de gas genera tensiones transitorias muy altas en los materiales, la estructura cristalina, el endurecimiento por trabajo y la presencia de partículas pueden afectar la resistencia del material, por lo tanto, la microestructura determina el comportamiento del material. Las pruebas de cavitación y las pruebas metalográficas de las muestras fueron realizadas en dos secciones diferentes de la fundición, cuya forma se muestra en la Figura 2.21.

La temperatura no se midió durante la solidificación, a pesar de que se esperaba que las velocidades de enfriamiento de las secciones debieran ser diferentes a causa de la geometría de la muestra.

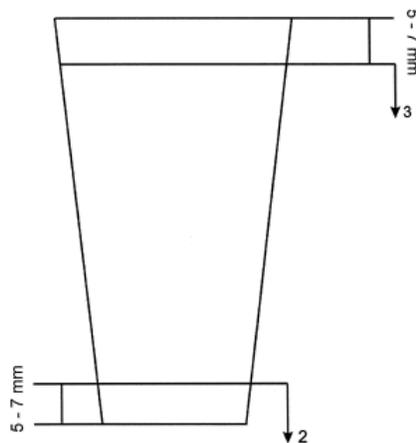


Figura 2.21 Muestra de ensayo de acero al alto Cromo.

Los ensayos de cavitación se realizaron en un dispositivo generador de vibraciones Telsonic SG 1000 con una frecuencia de 20 kHz y 40  $\mu$ m de amplitud. Las muestras se colocaron a 0.5 mm por debajo del horn como se muestra en la Figura 2.22, se utilizó como medio líquido agua destilada a 25 °C.

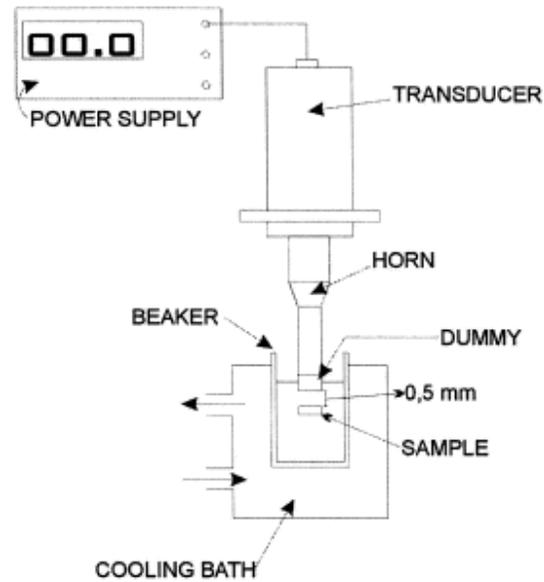


Figura 2.22 Equipo vibratorio Telsonic SG 1000

Concluyeron que las aleaciones con mayor austenita presentaron mayor pérdida de masa por cavitación. En el acero fundido al alto cromo, con el aumento del contenido de austenita, disminuyó la resistencia a la cavitación. También se observó que la morfología de las partículas más finas de carburo tiene un efecto beneficioso sobre la resistencia a la cavitación de estos materiales.

Todas las aleaciones de prueba presentaron una mejora en la resistencia a la cavitación en comparación con el AISI 304. La diferencia en las microestructuras fue una consecuencia de las distintas velocidades de enfriamiento debido a la geometría del molde de fundición. De esta forma la velocidad de enfriamiento afecta a la microestructura de las aleaciones por lo tanto, afecta a la resistencia a la cavitación.

El acero AISI 316L tiene una resistencia a la erosión por cavitación relativamente baja, es por ello que Chiu, y sus colaboradores (Chiu, Cheng, & Man, 2007), investigaron el efecto del hidrógeno electrolítico y su resistencia al fenómeno, modificándolo con NiTi (Nitinol, aleación de níquel y titanio), al cual llamarán NiTi-316L recubierto, también evaluaron la resistencia del acero AISI 316L y de la placa

de NiTi que fue el material de revestimiento. Para comparar el efecto de hidrógeno, los tres tipos de muestras fueron sometidas a la misma carga de intensidad electrolítica.

El objetivo del estudio fue investigar el efecto del hidrógeno electrolítico en la resistencia a la erosión por cavitación de los materiales antes mencionados. Se realizó el ensayo en agua desionizada a 23 °C fueron estudiados conforme a la norma ASTM G32. La amplitud y la frecuencia de vibración fueron de 100  $\mu\text{m}$  y 20 kHz, respectivamente, y la muestra se colocó a una distancia de 0.5 mm por debajo de la punta del horn o transformador de velocidad. Las muestras se pesaron en intervalos regulares y el peso perdido se convirtió en una profundidad media de la erosión.

Los patrones de difracción de rayos X obtenidos de las muestras antes y después del hidrógeno de carga se muestran en la Figura. 2.23. Se sabe que el Grupo IV de metales (por ejemplo, Ti y Zr) y metales del grupo V (por ejemplo, V, Nb y Ta) tienen una mayor tendencia a formar hidruros en los metales ferrosos. Por tanto el acero AISI 316L y el NiTi-316L recubierto, no llevaron a la formación de hidruros en la intensidad de hidrogenación utilizada; para la placa de NiTi, los picos correspondientes de hidruros se presentan después de la hidrogenación (ver Figura 2.23 c).

La presencia de hidruros en la placa de NiTi fue consistente con la aparición de grietas en la superficie de la muestra como se observa en la Figura 2.25 (f). Las grietas se formaron debido al crecimiento de los hidruros, que tienen mayor volumen específico que la matriz. Por otro lado, la superficie de las muestras de AISI 316L y NiTi-316L recubierto se mantuvo sin problemas y sin rasgos distintivos, es decir no se formaron hidruros, lo cual se verificó con el patrón de Difracción de Rayos X que se observa en la Figura 2.23 b y c.

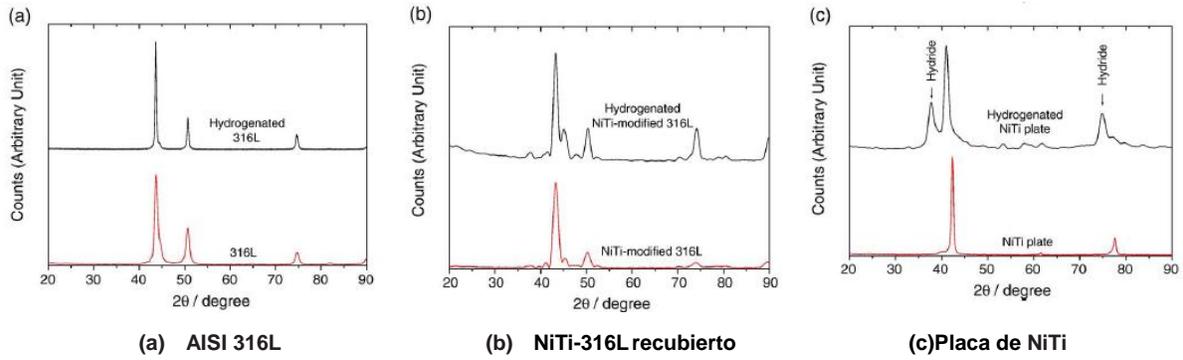


Figura 2.23 Patrones XRD de las muestras antes y después de la hidrogenación.

Las micrografías SEM de la Figura 2.24, revelaron la diferencia en el daño morfología después de la erosión por cavitación en las muestras con y sin hidrogenación.

Para el AISI 316L, las superficies de ambas muestras fueron dañadas por la ruptura nodular, mientras que para NiTi-316 recubierto y la placa de NiTi, los daños por erosión fueron mucho más graves en el hidrogenado de la muestra. La erosión comenzó, de las grietas en la mayor parte del NiTi (Figura 2.25). En NiTi-316 recubierto, la morfología de los daños en la muestra hidrogenada fue consistente con una capa superficial mucho más suave.

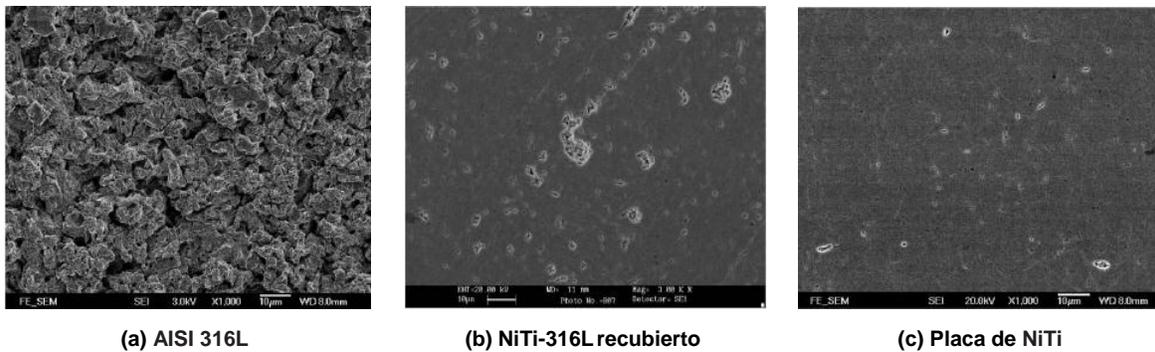


Figura 2.24 Muestras sin hidrogenación.

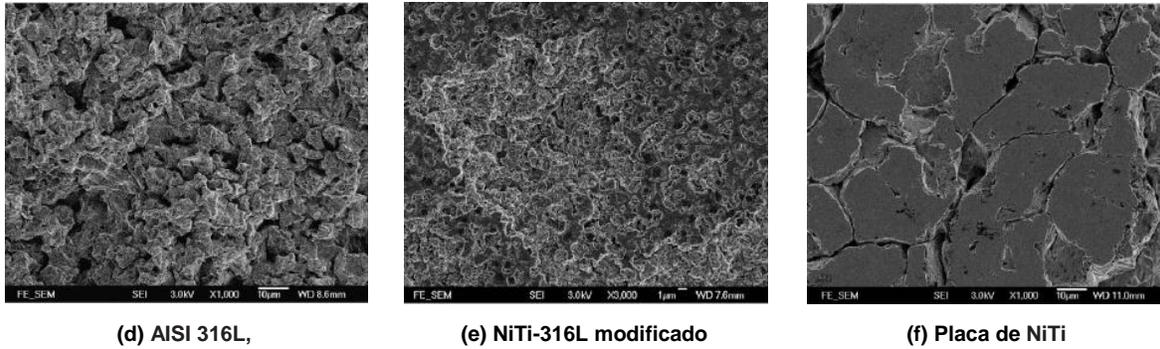


Figura 2.25 Muestras con hidrogenación.

Concluyeron que los efectos de la formación de hidruros, es cambiar las propiedades y la resistencia a la erosión por cavitación a; los hidruros se formaron solamente en el NiTi, y fueron los principales responsables de la aparición de grietas en la superficie y de la reducción significativa (~ 2,74 veces) de la resistencia en la erosión por cavitación. Por otro lado, el NiTi-316L modificado, presentó una reducción similar en la resistencia a la cavitación erosión (~ 3,74 veces), pero la reducción se debió a la deterioro de las propiedades. El AISI 316L fue levemente afectado por el hidrógeno.

# CAPÍTULO III.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1 Norma ASTM G32

Es uno de los métodos de prueba de vibraciones ultrasónicas más utilizado para realizar pruebas de cavitación (March & Hubble, 1996). El procedimiento para los ensayos de cavitación es el que ha sido desarrollado por la American Society for Testing and Materials (ASTM), que se rige por la Norma ASTM G 32. El cual es un método estandarizado para los ensayos de erosión por cavitación (ASTM, 2006).

El mecanismo de generación de cavitación difiere con el que se produce en los sistemas de flujo y máquinas hidráulicas; sin embargo, la naturaleza del mecanismo de generación de daño es similar, por lo que el método es controlable y utilizado para comparar la resistencia a la erosión por cavitación de diferentes materiales, de igual forma la evolución de la erosión puede ser monitoreada.

Asimismo se establecen las condiciones y parámetros de prueba estándar, tales como: la amplitud de vibración, la amplitud de onda, frecuencia, así como el fluido y características del contenedor. De igual forma propone las partes críticas y las características de los principales componentes del equipo y las precauciones para el buen desarrollo de pruebas. También se describe el método de análisis a seguir con los resultados a partir de materiales de referencia.

Además propone las partes críticas y las características de los principales componentes del equipo y de las precauciones a tomar para el buen desarrollo de los ensayos.

### 3.2 Descripción del equipo

Los ensayos se llevaron a cabo en un equipo ultrasónico basado en la norma ASTM G32. El equipo consta de un transductor piezoeléctrico que convierte la energía eléctrica de alta frecuencia en vibraciones mecánicas hasta  $20 \pm 0,5$  kHz y  $50 \mu\text{m}$  de amplitud. Cuenta con un sistema regulador de temperatura para mantener el agua a  $25 \pm 2$  °C. Para obtener una mayor amplitud de vibración, se utiliza un elemento cilíndrico cónico, llamado también transformador de velocidad (horn por su nombre en inglés), el diámetro en la punta debe ser igual al tamaño de la muestra. En la Figura 3.1, se puede observar un esquema del equipo utilizado.

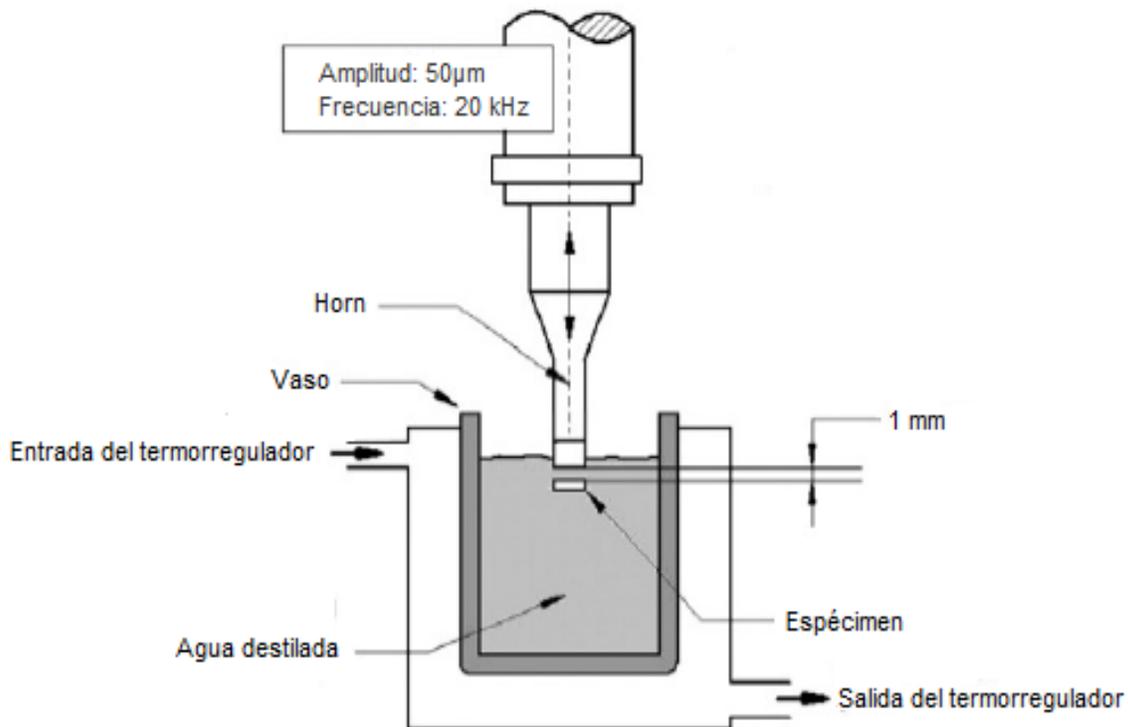


Figura 3.1 Equipo ultrasónico para ensayos de erosión por cavitación (Escobar, Correa, Santa, Giraldo, & Toro, 2010).

El cavitómetro TELSONIC ULTRASONICS DG-2000-2, en el que se realizaron los ensayos y el arreglo del mismo se presenta en la Figura 3.2.



Figura 3.2 Cavitómetro TELSONIC ULTRASONICS DG-2000-2.

### 3.3 Diseño experimental

Para cada material se realizaron tres ensayos con los mismos parámetros y de esta forma obtener tanto repetitividad como reproducibilidad en los resultados. Se realizó el diseño experimental para los ensayos de erosión por cavitación a continuación se describen las etapas del mismo:

- a) Preparación y caracterización de las muestras.
- b) Se utiliza el método de cavitación vibratoria de acuerdo a la Norma ASTM G-32, cuyos parámetros son presentados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros de ensayo de erosión por cavitación.

Frecuencia	20±0.2 kHz
Amplitud	50±2.5µm
Fluido	Agua destilada
Temperatura	25±2 °C
Distancia de separación	1 mm

- c) El ensayo se interrumpió a determinados intervalos de tiempo para determinar la pérdida de masa de los especímenes a fin de identificar las etapas de erosión por cavitación. En la Tabla 3.2, se muestran los intervalos de tiempo en los que se interrumpió el ensayo, así como el tiempo total de ensayo de cada material.

Tabla 3.2 Intervalos de tiempo de los materiales.

<b>Materiales</b>	<b>Mediciones de pérdida de masa (min)</b>	<b>Tiempo total de ensayo (min)</b>
Aluminio 6061-T6	5, 10	80
Bronce SAE 430A	10, 20, 30	240
Acero AISI 316L	30, 60, 120	540

- d) Caracterización de las muestras dañadas mediante las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Microscopía de Fuerza atómica (AFM) y Difracción de Rayos X (XRD).
- e) Ensayo de microdureza Vickers para determinar el efecto de la erosión por cavitación en la zona dañada.
- f) Interpretación de los resultados.

### 3.4 Especímenes

Las dimensiones de los especímenes son de 20 mm x 20 mm x 5 mm (ver Figura 3.3).

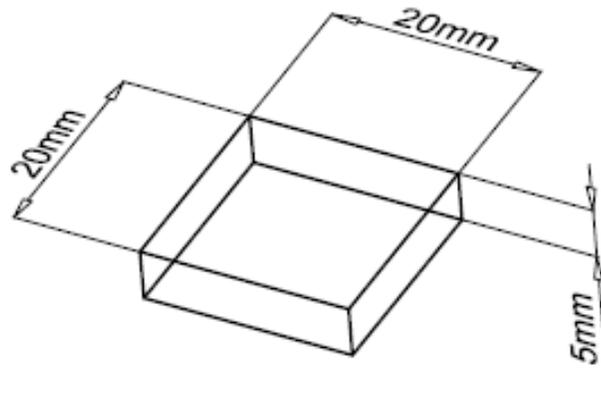


Figura 3.3 Esquema del espécimen de prueba.

Después de maquinar tres especímenes por material con las medidas indicadas, la preparación consistió en pulirlos con papel abrasivo de 120, 240, 360, 400, 600, 800, 100 y 1200, para obtener un acabado uniforme para cada espécimen.

### 3.5 Selección de materiales

A la fecha se han utilizado una gran variedad de materiales y recubrimientos para realizar pruebas de erosión por cavitación, lo cual ha traído un conocimiento más amplio acerca de que materiales son resistentes a este tipo de fenómeno, materiales tales como, aluminio, aleaciones de aluminio, bronce, aleaciones de titanio, aceros inoxidable, entre otros.

En las aplicaciones prácticas, los daños por cavitación son inevitables, se ha demostrado que las aleaciones de base cobalto y en menor medida los aceros inoxidable austeníticos, son las aleaciones más resistentes a la erosión por cavitación que otras aleaciones disponibles actualmente. Aunque la resistencia a la cavitación de las aleaciones de cobalto es superior a la de los aceros inoxidable, su costo resulta ser considerablemente más alto. (ASM International, 1992).

Para los ensayos de erosión por cavitación, se utilizaron tres materiales diferentes Aluminio 6061-T6, Bronce SAE 430A y Acero inoxidable 316L, la selección de los mismos se realizó se basó en su aplicación en equipos y componentes hidráulicos,

así como la comparación de los resultados con otros trabajos realizados por diversos investigadores.

### **Aluminio 6061-T6**

El aluminio 6061-T6, es una aleación dúctil, con gran resistencia mecánica y excelentes características de acabado, es ideal para la elaboración de piezas maquinadas de excelente calidad y para trabajos que requieran buen acabado superficial, posee excelente resistencia a la corrosión y tiene un costo accesible.

A pesar de que es considerado un material poco resistente a la cavitación, comúnmente es utilizado para componentes de bombas centrifugas y flechas hidráulicas; se seleccionó como material de prueba para valorar su resistencia con materiales más resistentes a la erosión por cavitación. En la Tabla 3.3, se presenta la composición química de este material.

Tabla 3.3 Propiedades químicas del Aluminio 6061-T6.

<b>Si %</b>	<b>Fe %</b>	<b>Cu %</b>	<b>Mg %</b>	<b>Cr %</b>	<b>Zn %</b>	<b>Ti %</b>	<b>Al %</b>
0.40-0.80	≤0.7	0.15-0.40	0.8-1.2	0.04-0.35	≤0.25	≤0.015	Balance

### **Bronce SAE 430A**

El bronce al manganeso, es un material común para hélices marinas, posee una resistencia menor a la erosión por cavitación que la estelita o que la del acero inoxidable, pero es resistente a la corrosión marina, se ha demostrado que la corrosión acelera la erosión por cavitación.

Quizá los metales más efectivos, son aquellos que presentan mayor dureza, así como una elevada resistencia de fluencia, o que se endurecen por trabajo. Los materiales más resistentes son la estelita y el acero inoxidable con 18% de Cromo y 8% de Níquel (Vélez, 2008).

El bronce también es utilizado engranajes, tornillos sinfín, levas, guías de válvulas, ejes, piezas de cilindros hidráulicos, bujes de puentes, pernos y émbolos. En la Tabla 3.4, se puede observar la composición química del Bronce SAE 430A (Bronce al Manganeso).

Tabla 3.4 Propiedades químicas del Bronce SAE 430A.

<b>Cu %</b>	<b>Sn %</b>	<b>Pb %</b>	<b>Zn %</b>	<b>Ni %</b>	<b>Fe %</b>	<b>Al %</b>	<b>Mn %</b>
60-68	0.2	0.2	Balance	0.5	2.00-4.00	3.00-6.00	2.5-5.0

### **Acero inoxidable AISI 316L**

El acero inoxidable AISI 316L, es un material altamente utilizado tanto en la ingeniería como en los sistemas de manejo de líquidos y la maquinaria hidráulica, principalmente debido a su resistencia a la corrosión, también a su resistencia mecánica, además tiene un costo relativamente razonable (Chiu, Cheng, & Man, 2007).

Los aceros inoxidables son los materiales comúnmente más utilizados para la reparación de la cavitación (Boy, Kumar, March, Willis, & Herman, 1997), por tal motivo en diversas investigaciones sobre cavitación se ha utilizado este tipo de acero, con los que se puede comparar los resultados de este trabajo.

El acero AISI 316L, contiene Mo que ayuda a tener una mayor resistencia a la corrosión por picaduras en ambientes marinos y propios de la industria química que otros aceros similares como el acero AISI 304 (OBTESOL, 2011). En la Tabla 3.5, se muestra la composición química del acero inoxidable AISI 316L.

Tabla 3.5 Propiedades químicas del Acero inoxidable AISI 316L.

<b>C %</b>	<b>Si %</b>	<b>Mn %</b>	<b>P %</b>	<b>S %</b>	<b>C %r</b>	<b>Ni %</b>	<b>Mo %</b>	<b>Fe %</b>
≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	16-18	10-14	2.00-3.00	66-68

### 3.6 Metodología experimental

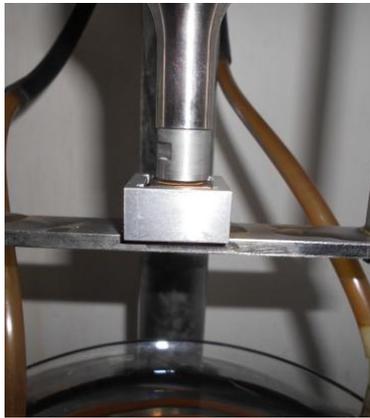
La metodología experimental consta de las siguientes etapas:

1. Para cada nueva muestra se limpia el recipiente del líquido, se llena con líquido nuevo (para todas las pruebas se utilizó 2 L de agua destilada), posteriormente se enciende el equipo sin el espécimen durante 30 minutos antes de iniciar la prueba para estabilizar el contenido de gas en el líquido.
2. Los especímenes se sometieron a un lavado en un limpiador ultrasónico LC30H, durante 5 minutos.
3. Posteriormente es secado con aire durante 5 minutos.
4. El espécimen se desmagnetizó (ver Figura 3.4), para eliminar cualquier campo magnético que pudiera producir variaciones en la balanza y por lo tanto en la lectura del peso de la muestra.

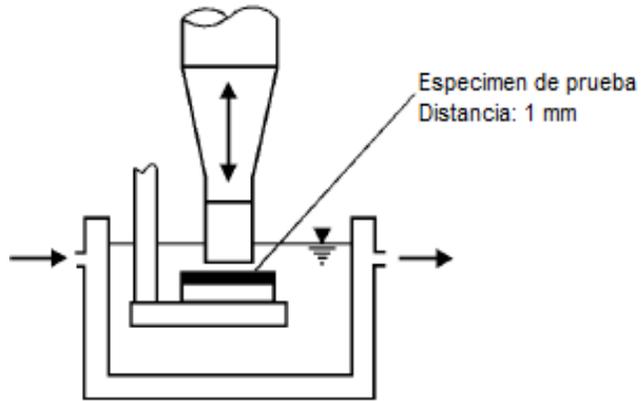


Figura 3.4 Desmagnetizador de especímenes.

5. A continuación, se pesó en una balanza analítica Sartorius CO225 D, con una precisión de 0.00001g, y se registró el peso.
6. Se coloca el espécimen en el porta espécimen y posteriormente en el cavitómetro ultrasónico a una distancia de 1 mm entre la superficie del espécimen y la superficie de la punta del transformador de velocidad como se observa en la Figura 3.5.



(a) Distancia entre el espécimen y la punta del horn



(b) Esquema de la distancia entre el espécimen y la punta del horn

Figura 3.5 Distancia de 1 mm entre la superficie del espécimen y la del horn (Schwetzke & Kreye, 1996).

7. El espécimen fue sumergido en agua destilada junto con el horn con una profundidad de inmersión de la superficie de la probeta de  $12 \pm 4$  mm como lo indica la Norma ASTM G 32 (ver Figura 3.6).

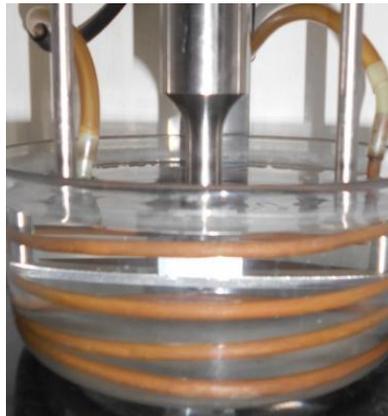


Figura 3.6 Profundidad de inmersión de la muestra.

8. Se verificó que los parámetros experimentales del equipo se mantuvieran tal como lo indica la Norma, es decir,  $20 \pm 0.5$  kHz de frecuencia,  $50 \mu\text{m} \pm 5\%$  de amplitud (ver Figura 3.7 a) y que la temperatura del líquido, se mantenga durante todo el ensayo a  $25 \pm 2$  °C de acuerdo a la Norma ASTM G-32 (ver Figura 3.7 b).



(a) Amplitud



(b) Temperatura

Figura 3.7 Parámetros de ensayo.

9. Por último se programa el tiempo y se inicia en ensayo (ver Figura 3.8).



Figura 3.8 Programación del tiempo de prueba

Durante el ensayo los especímenes fueron pesados a determinados intervalos, hasta llegar al tiempo total programado de ensayo, durante esos intervalos se repitió cada etapa del procedimiento, para registrar la pérdida de masa.

# CAPÍTULO IV.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Resultados y discusiones

Los resultados experimentales que se obtuvieron de cada uno de los materiales empleados: Aluminio 6061-T6, Bronce SAE 430A y Acero inoxidable AISI 316L, se compararon entre sí para determinar su resistencia a la erosión por cavitación. A continuación se presentan los resultados de los ensayos:

#### 4.1.1. Pérdida de masa acumulada

Se refiere a la cantidad total de pérdida de material de una superficie sólida durante todos los períodos de ensayo.

Al registrar la pérdida de masa de los especímenes, se puede encontrar el tiempo en que cada material alcanza la tasa máxima de erosión, así como en tiempo en que disminuye y se estabiliza tanto el tiempo como la tasa de desgaste; cuando esto sucede se termina el ensayo; por lo tanto se pueden determinar la resistencia del material a la erosión por cavitación.

En la Figura 4.1, se presenta el gráfico de pérdida de la masa acumulada del Aluminio 6061-T6, donde el tiempo total de ensayo necesario para erosionarlo fue de 80 minutos, con 16.35 mg de pérdida de masa, se observan además la duración y progreso de las etapas de la cavitación en este material.

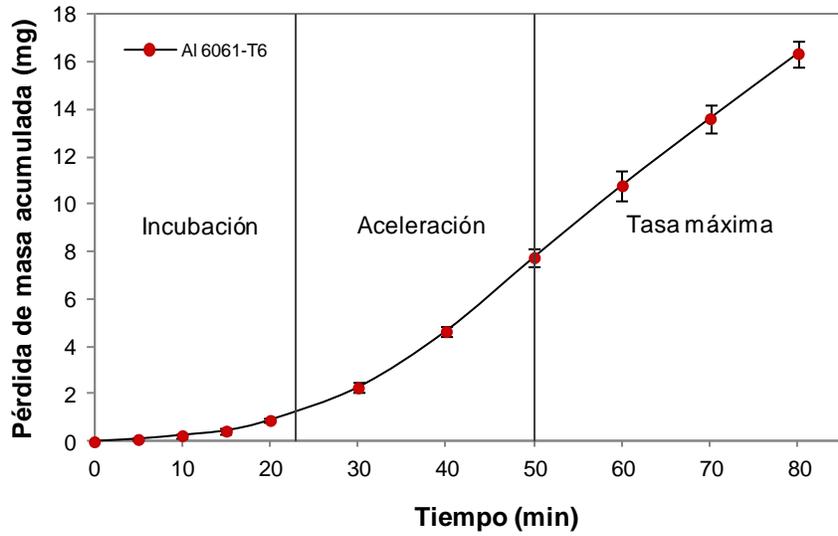


Figura 4.1 Pérdida de masa acumulada Aluminio 6061-T6

En la Figura 4.2, se observa que el tiempo de ensayo del Bronce SAE 430A, fue de 240 minutos, con una pérdida de masa de 19.81 mg, es decir, un desgaste relativamente similar al del Aluminio 6061-T6 pero en el triple de tiempo.

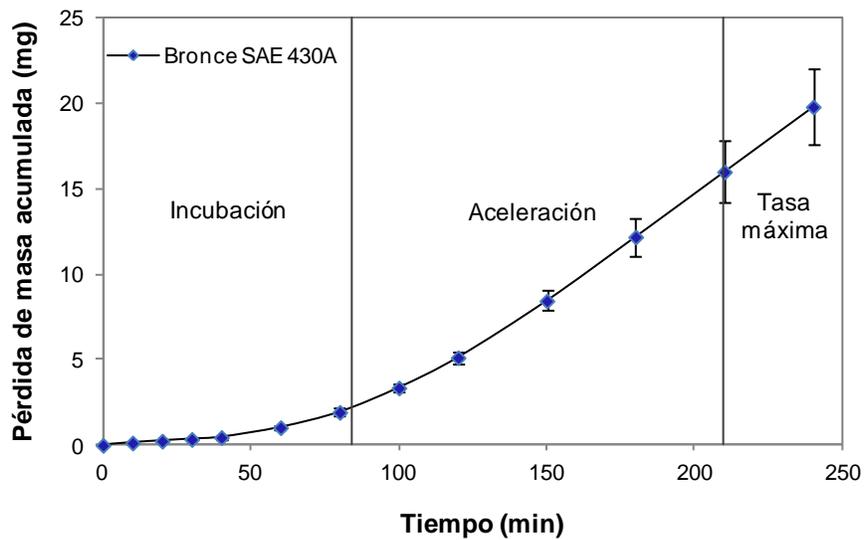


Figura 4.2 Pérdida de masa acumulada Bronce SAE 430A

La pérdida de masa de masa acumulada de Acero AISI 316L de la Figura 4.3, muestra que durante casi 200 min, es decir el tiempo de incubación, el desgaste del material fue casi de cero y durante más de 300 minutos se presentó la aceleración del desgaste, perdiendo en 540 minutos 11.08 mg de masa, es decir, menos que lo que perdieron los materiales anteriores. Lo cual indica que es mucho más resistente a la cavitación que el Aluminio 6061-T6 y que el Bronce SAE 430A, siendo éste último una excelente opción para la manufactura de equipos y componentes comúnmente dañados por cavitación.

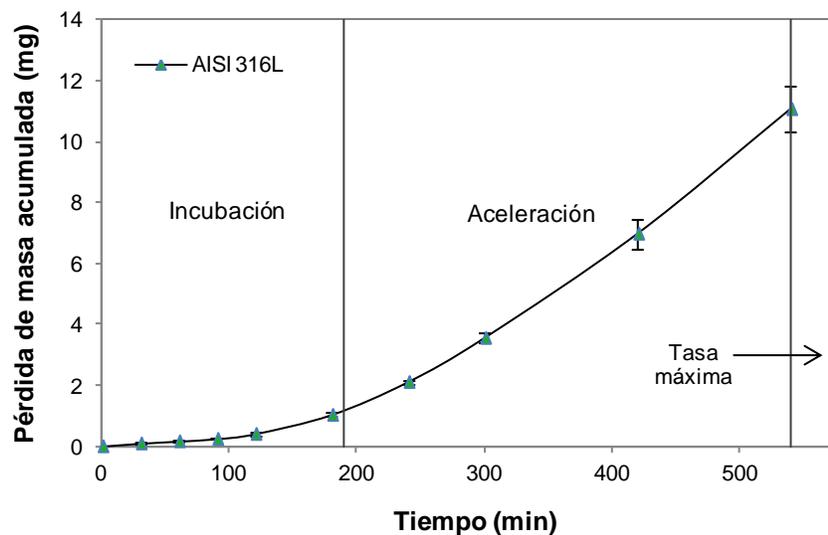


Figura 4.3 Pérdida de masa acumulada del Acero AISI 316L.

En la grafica de pérdida de masa acumulada versus tiempo de la Figura 4.4, se compara el desgaste de los tres materiales utilizados, donde el Acero inoxidable AISI 316L perdió menos cantidad de masa en mucho menos tiempo que el Aluminio 6061-T6 y el Bronce SAE 430A.

En realidad no tiene mucho sentido comparar los materiales de acuerdo a la pérdida de masa, ya que cada uno tiene diferente densidad, y es posible que mientras un material muy resistente a la cavitación como el acero inoxidable AISI 316L todavía se encuentre dentro de la etapa de incubación o en la etapa de aceleración un material poco resistente al fenómeno como el Aluminio 6061-T6, en

el mismo tiempo puede estar dentro de la tasa máxima o fase de desaceleración, pero si es posible seleccionar el material más adecuado, para el diseño y manufactura de un equipo o una pieza mecánica sometida a este tipo de fenómeno, siempre y cuando tenga un costo accesible.

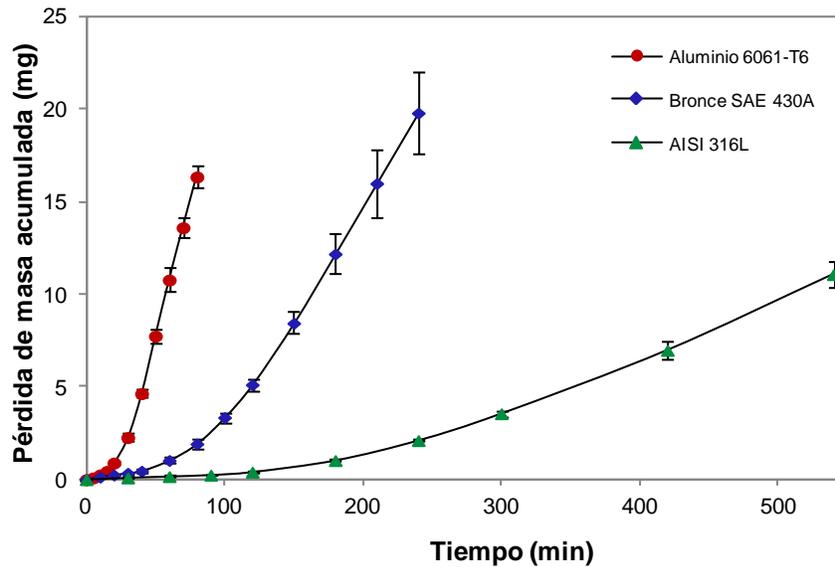


Figura 4.4 Comparación de la pérdida de masa acumulada de los materiales.

#### 4.1.2. Tasa de desgaste

La tasa de desgaste se calcula a partir de la derivada de la pendiente de cada recta de la curva de pérdida de masa acumulada, cada valor obtenido se grafica con respecto al tiempo de ensayo.

En la Figura 4.5, la gráfica de la tasa de desgaste del Aluminio 6061-T6, se observa que la erosión se origina a través de diferentes etapas, el tiempo de incubación se mantuvo durante 23 minutos, seguido por la aceleración del desgaste, asimismo en 50 minutos se alcanzó la tasa máxima de erosión.

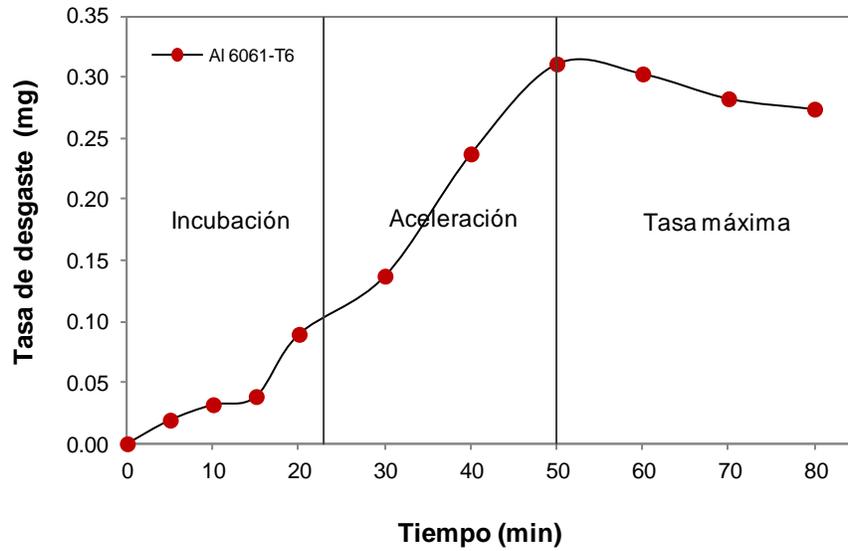


Figura 4.5 Tasa de desgaste del Aluminio 6061-T6

En la Figura 4.6 se presenta la tasa de desgaste del Bronce SAE 430A, donde el tiempo de incubación se mantuvo 84 minutos, y la tasa máxima se alcanzó en el minuto 210, a partir de este momento desciende la tasa de desgaste, es por ello que el ensayo de erosión por cavitación finalizó en el minuto 240.

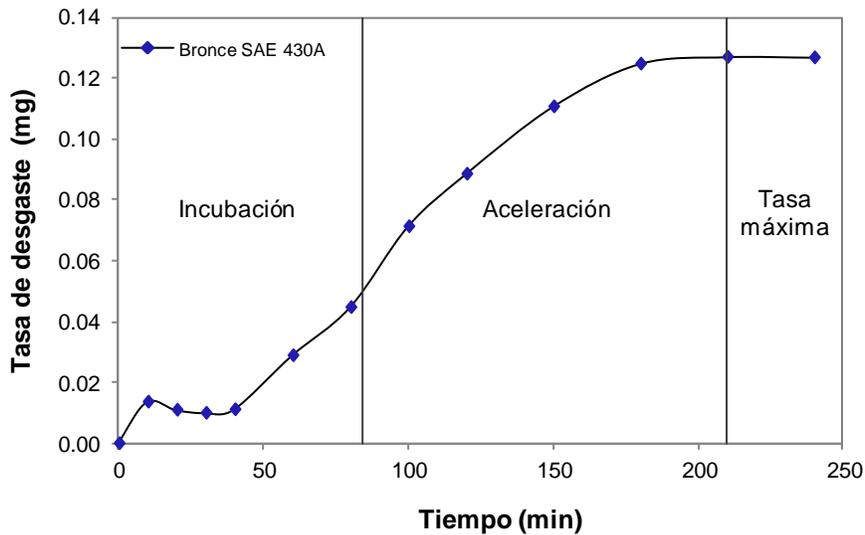


Figura 4.6 Tasa de desgaste del Bronce SAE 430A.

En la Figura 4.7, la tasa de desgaste del Acero AISI 316L resultó ser menor a la de los materiales anteriores, ya que hasta el minuto 190 la tasa de desgaste fue insignificante, durante este tiempo el choque cíclico de las burbujas ocasiona el endurecimiento por trabajo de la superficie originando también la deformación plástica del material.

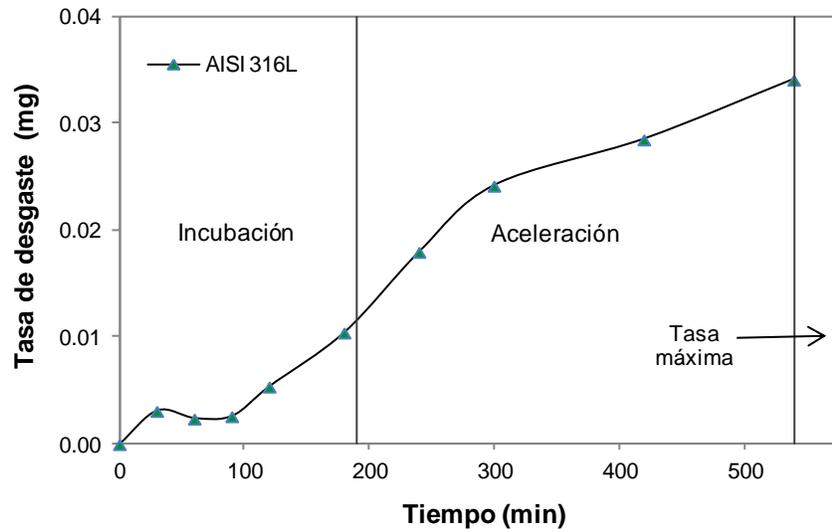


Figura 4.7 Tasa de desgaste del Acero AISI 316L

#### 4.1.3. Profundidad Media de Erosión (MDE)

La profundidad media erosión, también es llamada profundidad media de penetración (MDP), se refiere al espesor medio de material erosionado de una superficie específica, se calcula partir de la pérdida de masa acumulada de acuerdo a la ecuación (4.1).

$$MDE (\mu\text{m}) = \frac{\Delta W}{\delta A} \quad (4.1)$$

Donde,

$\Delta W$ , es la pérdida de masa acumulada.

$\delta$ , es la densidad del material

$A$ , es el área de la superficie.

Para fines de análisis e información de los ensayos de erosión por cavitación, fue necesario obtener la profundidad media de erosión (MDE), ya que una pérdida volumétrica es más significativa que una pérdida de masa cuando los materiales que son comparados tienen diferentes densidades, como es el caso de este trabajo.

En la Figura 4.8, la Profundidad Media de Erosión del Aluminio 6061-T6, fue de 151.45  $\mu\text{m}$  con 80 minutos de ensayo.

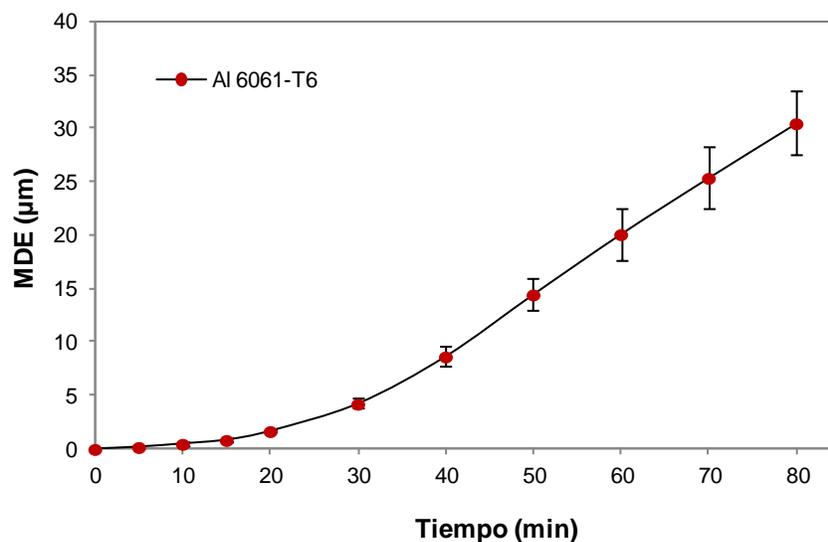


Figura 4.8 Profundidad Media de Erosión del Aluminio 6061-T6

Mientras tanto en la Figura 4.9, el espesor erosionado del Bronce SAE 430A fue de 63.49  $\mu\text{m}$ , que es menor al del Aluminio 6061-T6, en un tiempo mayor de 240 min.

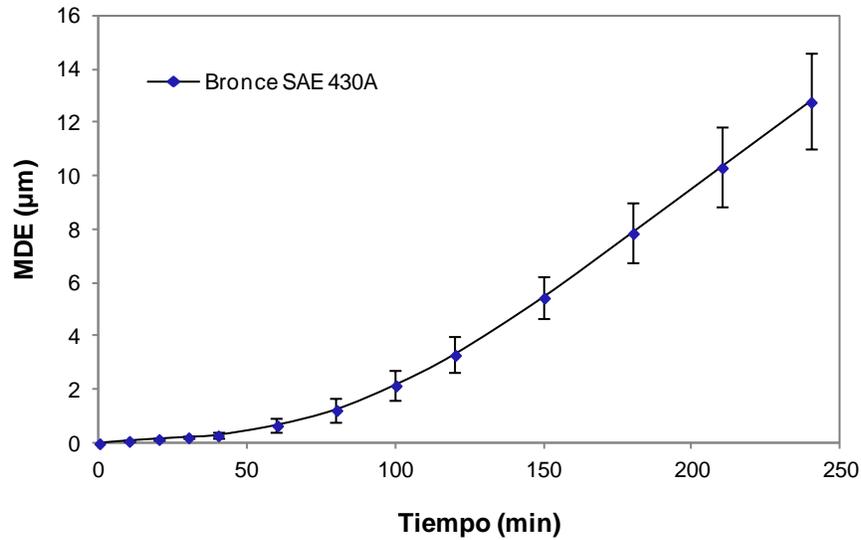


Figura 4.9 Profundidad Media de Erosión del Bronce SAE 430A

La Profundidad Media de Erosión del Acero AISI 316L, mostrado en la Figura 4.10, como era de esperarse fue menor que la del los demás materiales con 34.63 µm de espesor, esto debido a las diferencias físicas químicas y mecánicas de los materiales empleados.

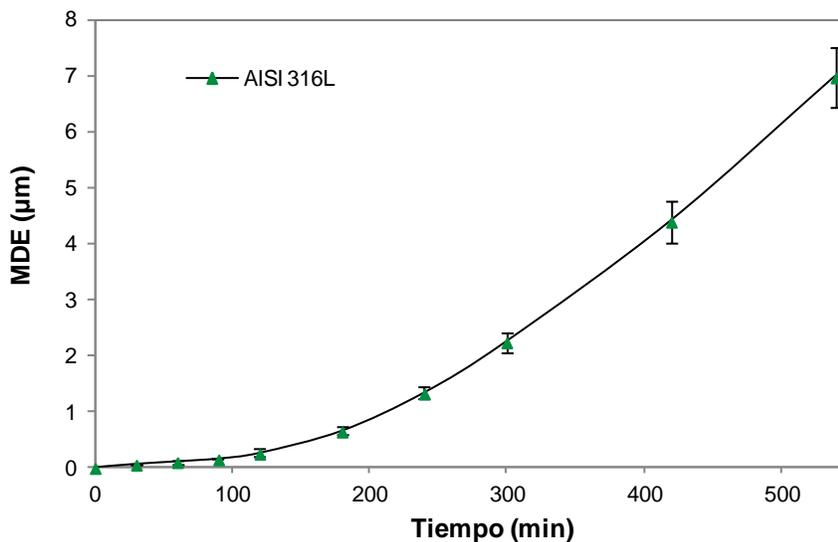


Figura 4.10 Profundidad Media de Erosión del Acero AISI 316L

En la Figura 4.11, en la gráfica de la MDE se aprecia la comparación de los tres materiales erosionados, donde el Acero inoxidable AISI 316L alcanzó una Profundidad Media de Erosión menor que la del los demás materiales, con el mayor tiempo de ensayo de 540 minutos, mientras tanto la MDE del Bronce SAE 430A fue de 46% mayor que del Acero AISI 316L en 240 minutos de ensayo y la MDE del Aluminio 6061-T6 fue 88% mayor que el Acero AISI 316L, siendo el material con mayor daño superficial en un tiempo de ensayo de 80 minutos.

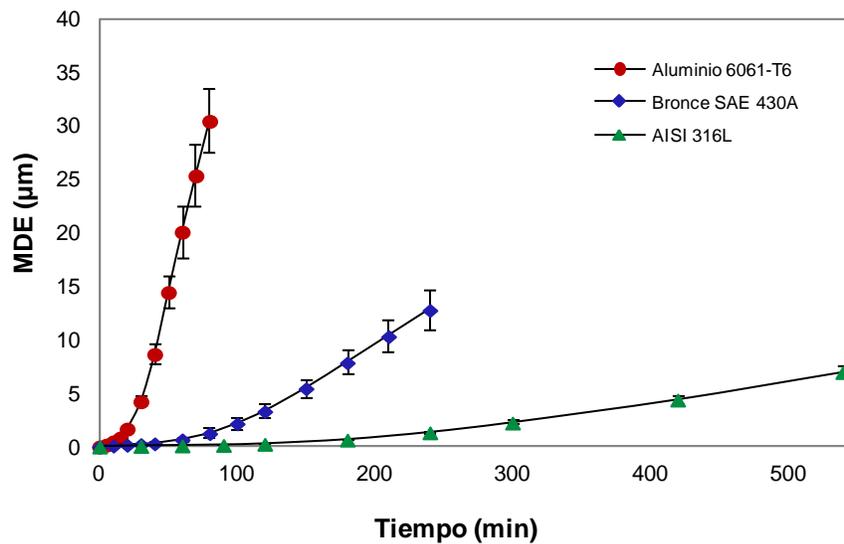


Figura 4.11 Comparación de la MDE de los materiales.

#### 4.1.4. Pérdida de volumen

Otra forma de comparar los materiales erosionados con diferentes densidades, es mediante la pérdida de volumen, la cual se calcula de acuerdo a la ecuación (4.2).

$$V(mm^3) = \frac{m}{\delta} \quad (4.2)$$

Donde,

$m$ , es la masa perdida.

$\delta$ , es la densidad del material.

En la Figura 4.12, la gráfica de pérdida de volumen con respecto al tiempo de ensayo el volumen perdido del Aluminio 6061-T6 fue de 6.05 mm<sup>3</sup>.

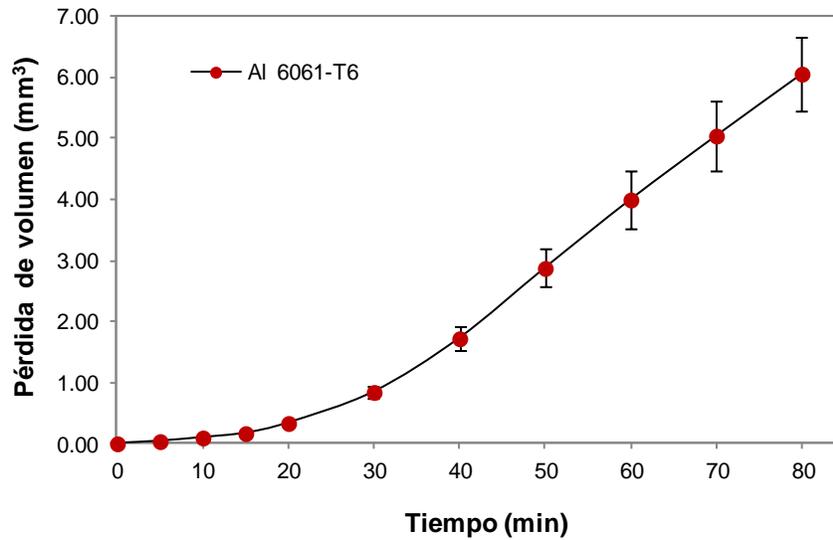


Figura 4.12 Pérdida de volumen del Aluminio 6061-T6

En el Bronce SAE 430A, la pérdida de volumen de la superficie fue de 2.53 mm<sup>3</sup>, es decir, menos volumen del que perdió el Aluminio 6061-T6, como se presenta en la Figura 4.13.

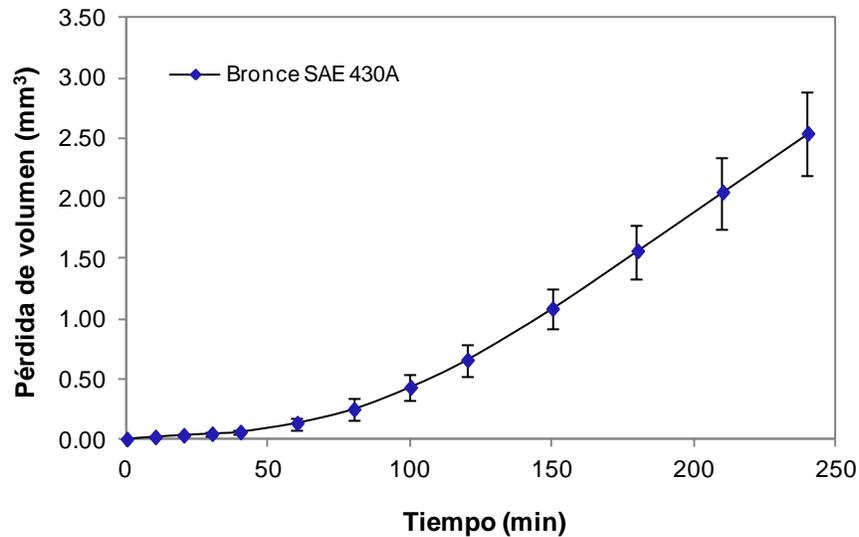


Figura 4.13 Pérdida de volumen del Bronce SAE 430A

En la Figura 4.14, se presenta la pérdida de volumen del Acero AISI 316L, donde se observa que solo perdió 1.38 mm<sup>3</sup> de volumen.

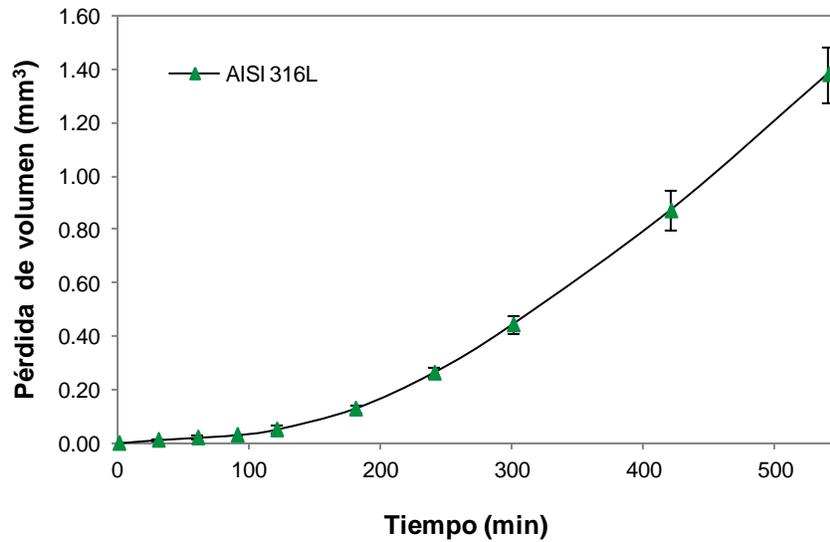


Figura 4.14 Pérdida de volumen del Acero AISI 316L

A continuación en la Figura 4.15, se muestra la gráfica de comparación de la pérdida de volumen con respecto al tiempo de los tres materiales erosionados, donde se puede observar que el valor del Aluminio 6061-T6, fue el material con mayor pérdida de volumen, es decir, 58% más que el Bronce SAE 430A y 77% más que el Acero AISI 316L.

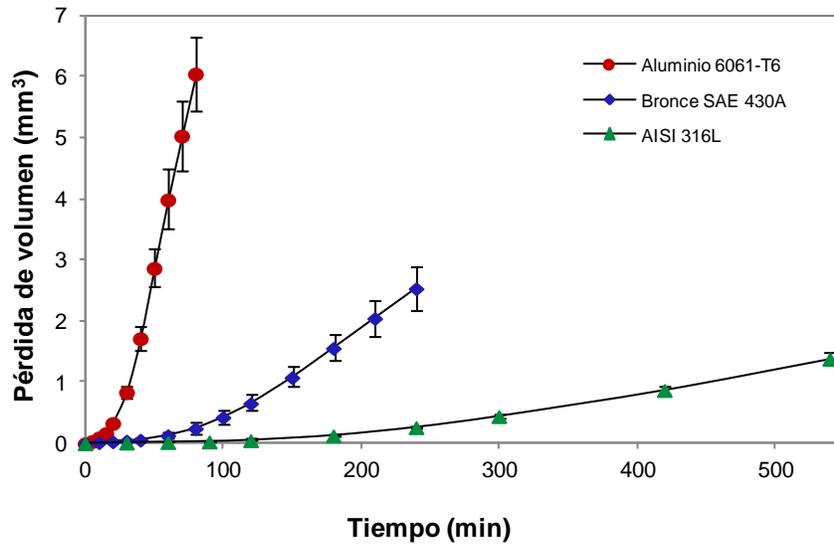
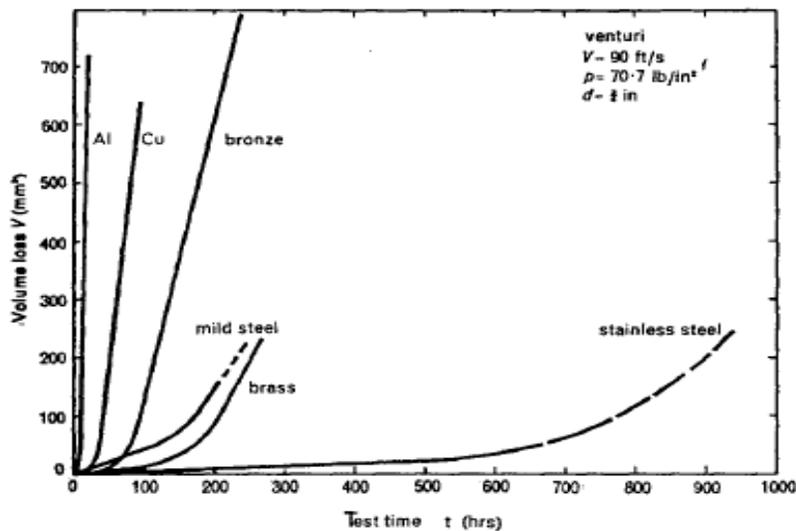
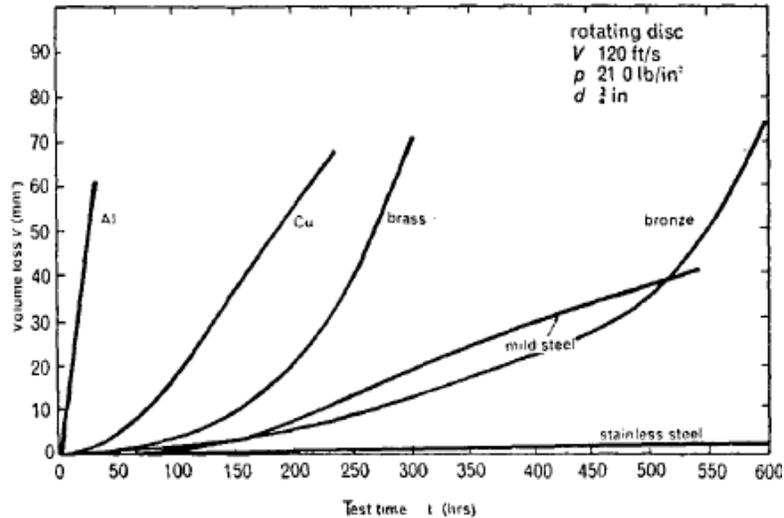


Figura 4.15 Comparación de la pérdida de volumen de los materiales.

S. Rao y sus colaboradores (Rao, Rao, & Seetharamiah, 1971), realizaron ensayos de cavitación sobre seis materiales incluyendo Aluminio, bronce y acero inoxidable, aunque utilizaron dos métodos diferentes de generación al este trabajo, en la Figura 4.16 a) y 4.16 b), muestran la pérdida de volumen de estos materiales. Al comparar los tres gráficos, se observa que la tendencia de la curva de los tres materiales es similar en los tres métodos.



(a) Ensayo en tubo venturi



(b) Ensayo mediante disco giratorio.

Figura 4.16 Pérdida de volumen de materiales en dos tipos de generación de cavitación.

#### 4.1.5. Tiempo de incubación

El tiempo de incubación, es la etapa inicial de la erosión, durante este periodo inicial la tasa de erosión es prácticamente cero o insignificante en comparación con las etapas posteriores, se calcula a partir de la gráfica de pérdida de masa acumulada, trazando una extensión de la línea recta de la pendiente máxima de la erosión acumulada en el eje del tiempo, el valor en la intersección es el tiempo de incubación.

En la Figura 4.17, se muestra una comparación donde el tiempo de incubación Aluminio 6061-T6 fue de 23 minutos, mientras que el Bronce SAE 430A duró 84 minutos sin tener una pérdida de masa significativa, por otra parte el tiempo de incubación del acero AISI 316L fue de 190 minutos; según la literatura, esta diferencia se debe a que el tiempo de incubación está relacionado con la dureza del material (He & Hammitt, 1982).

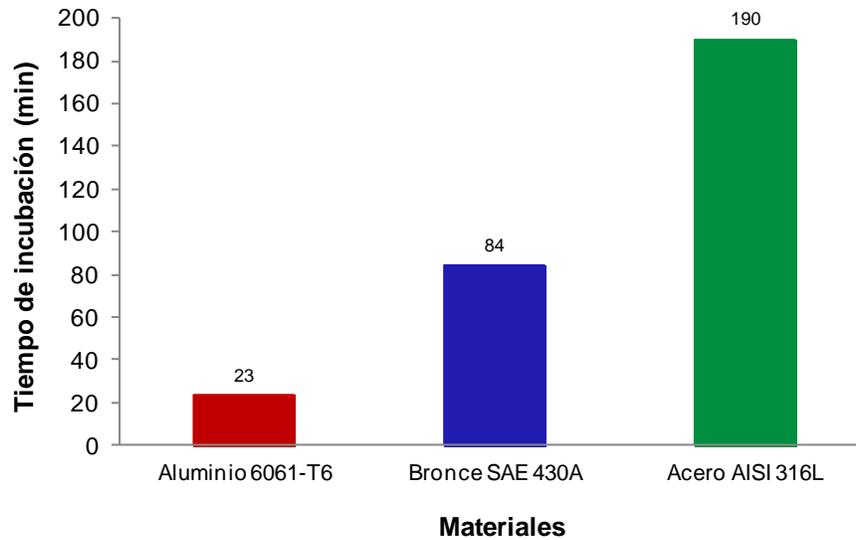


Figura 4.17 Tiempo de Incubación

#### 4.1.6. Tasa máxima de erosión

Como su nombre lo indica, se refiere al máximo valor de la tasa de erosión que puede alcanzar un material durante el ensayo de erosión por cavitación. Se obtiene de la pendiente de la línea más pronunciada en la curva de erosión acumulada versus tiempo; esta línea es seguida de una disminución en la tasa de erosión.

En la Figura 4.18, se presenta el gráfico de barras donde se observa la tasa máxima de erosión de los materiales de prueba; el Aluminio 6061-T6, alcanzó la tasa máxima de erosión en el minuto 50, el Bronce SAE 430A, en 210 minutos de ensayo y por último el Acero inoxidable AISI 316L, en 540 minutos.

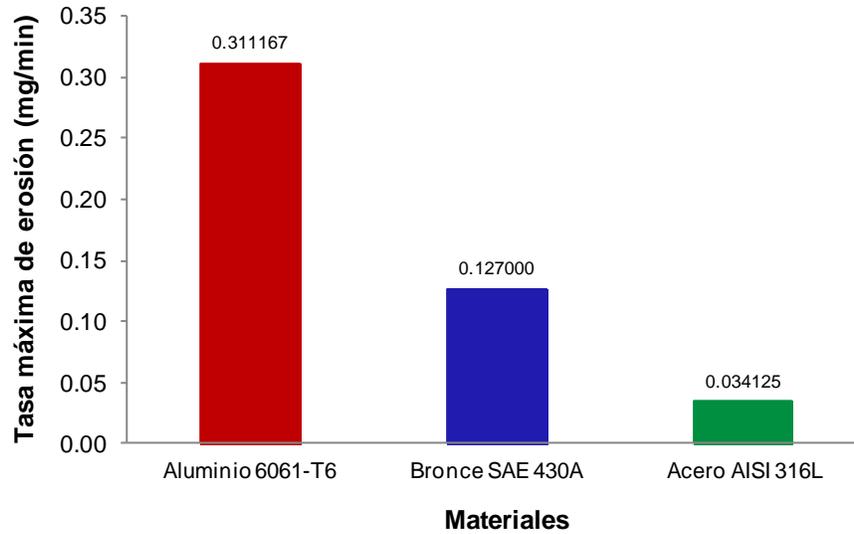


Figura 4.18 Tasa máxima de erosión.

#### 4.2 Aumento de la Microdureza

Se realizaron ensayos de microdureza sobre la superficie dañada, los resultados fueron comparados con los valores obtenidos antes de realizar el ensayo. Se encontró que hubo cambios en la microdureza de la zona dañada, probablemente debido a endurecimiento por trabajo, debido a la acumulación de deformación plástica en la superficie del material.

En la Tabla 4.1, se presentan los valores de un promedio de tres indentaciones con una carga de 100 g, durante 30 s tomados antes y después del ensayo, también se presenta el porcentaje del incremento de la microdureza de cada material.

Tabla 4.1. Valores de Microdureza HV.

Material	Microdureza (HV), Antes del ensayo	Microdureza (HV), Después del ensayo	$\Delta$
Aluminio 6061-T6	112	131	16%
Bronce SAE 430A	165	196	19%
Acero AISI 316L	240	304	27%

Cabe recordar que el tiempo de ensayo fue diferente para cada material, por lo tanto el aumento de la microdureza depende de diferentes factores como tiempo de total, propiedades del material, condiciones del ensayo, entre otros.

En la Figura 4.19, se muestra el incremento de la microdureza de los tres materiales, donde el incremento del Aluminio 6061-T6 y del Bronce SAE 430A es de 16% y 19%, respectivamente, es decir son relativamente similares, mientras que en el Acero AISI 316L la microdureza aumenta 27%.

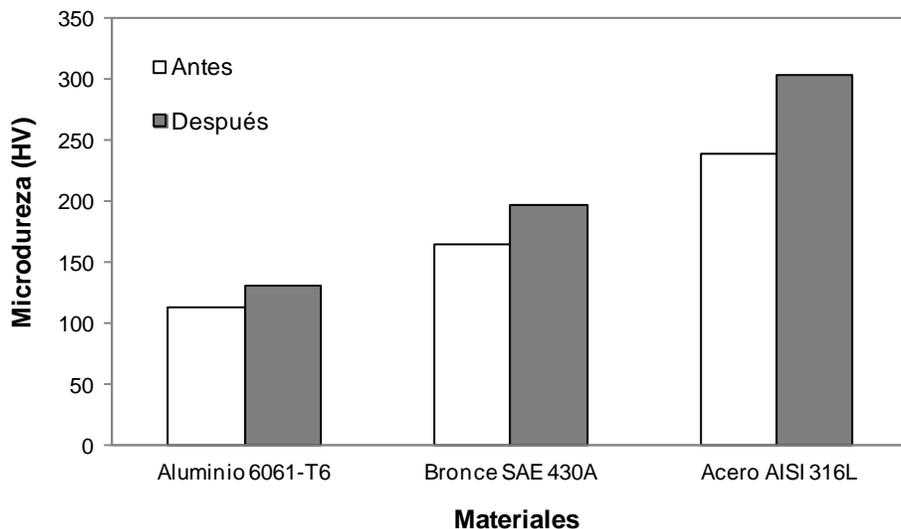


Figura 4.19 Comparación del aumento de microdureza.

Diversos investigadores han reportado un incremento en la dureza de los materiales después de ser sometidos a erosión por cavitación (Vyas & Preece, 1976; Zhou & Herman, 1982; Santa, Blanca, J.E. & Toro, 2011; Chiu, Cheng, & Man, 2005).

### 4.3 Microscopía de Fuerza Atómica (AFM)

Con el fin de analizar la topografía de la superficie de los tres materiales erosionados por cavitación, se utilizó un Microscopio de Fuerza Atómica tipo Multi Mode V Veeco, para obtener las imágenes en tres dimensiones de los

especímenes y así comparar y dimensionar las características de las huellas de desgaste.

Debido a que la punta de escaneo del microscopio utilizado no es lo suficientemente sensible para alcanzar la profundidad de las cavidades, solo se compara la rugosidad de los materiales antes y después del desgaste; sin embargo por medio del cálculo de la Profundidad media de Erosión, fue posible saber el espesor del material erosionado.

En la Figura 4.20 (a), se presenta la topografía de la superficie del Aluminio 6061-T6 antes del ensayo, se puede apreciar incluso el rayado del material, mientras que en la Figura 4.20 (b), se observa como las burbujas ocasionaron hendiduras en la superficie del material.

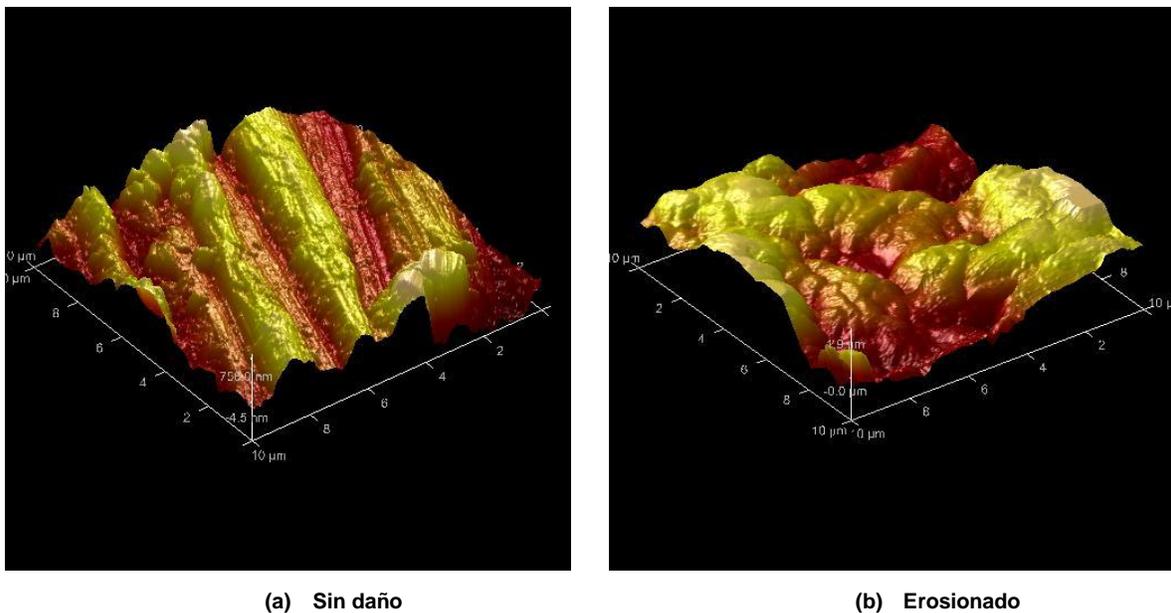
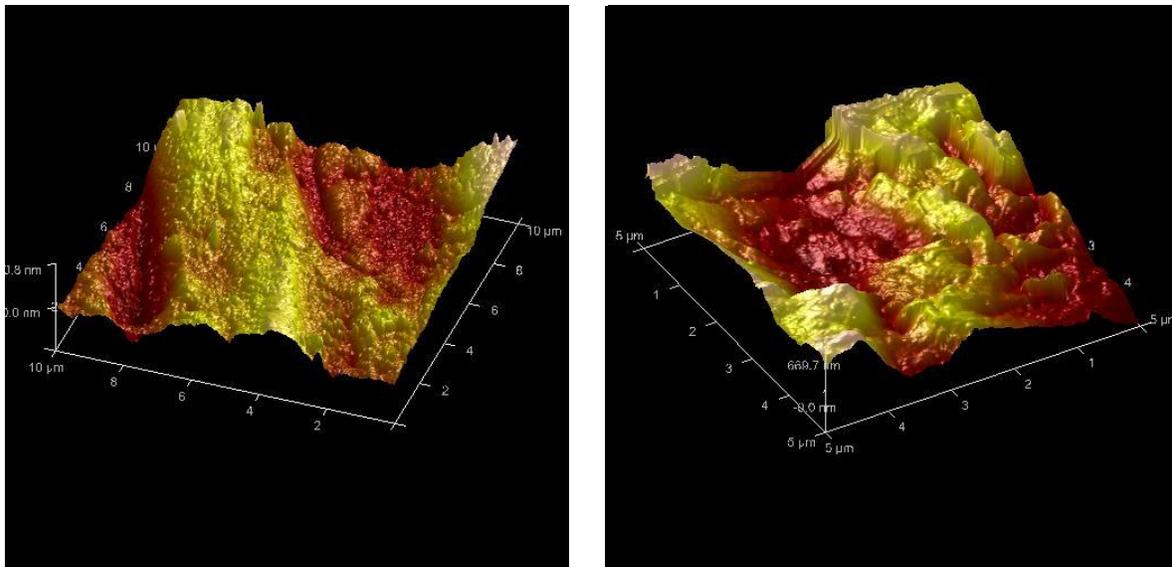


Figura 4.20. Topografía en tres dimensiones del Aluminio 6061-T6.

La topografía sin daño del Bronce SAE 430A se muestra en la Figura 4.21 (a), donde aún no existen picos pronunciados, solamente el rayado del material, en tanto la Figura 4.21 (b), muestra la formación de huecos en toda la superficie, los cuales pudieron ser causados por la implosión de las burbujas durante el ensayo.

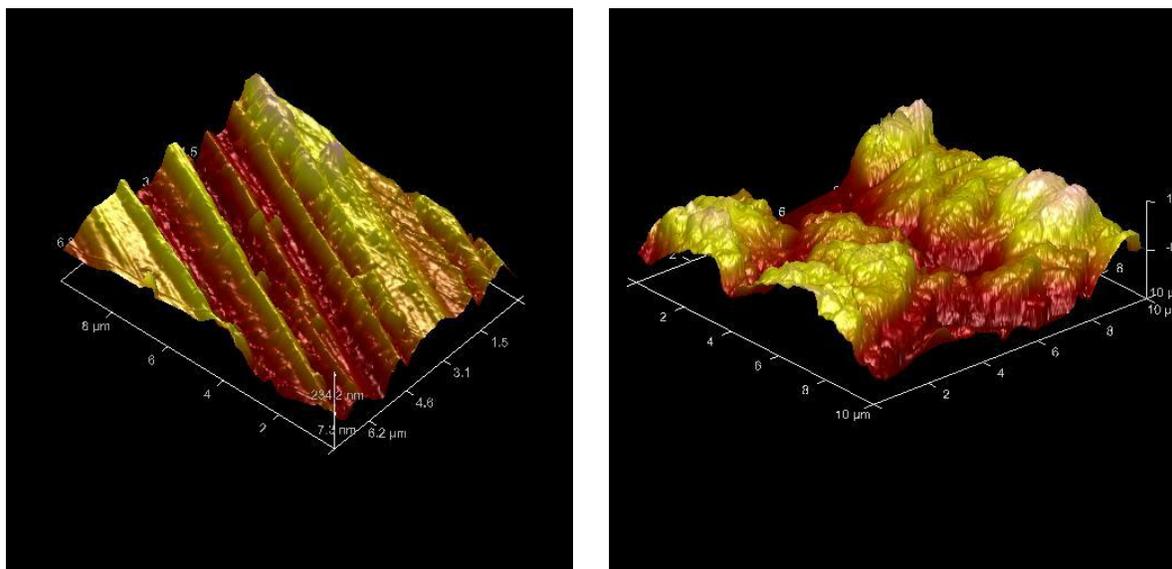


(a) Sin daño

(b) Erosionado

Figura 4.21 Topografía en tres dimensiones del Bronce SAE 430A.

En la Figura 4.22 (a), la superficie del Acero AISI 316L, presenta solo el rayado y algunos pequeños defectos del material. Sin embargo, en la Figura 4.22 (b), la superficie se encuentra severamente dañada por las burbujas generadas durante la cavitación, los agujeros son constantes en toda la superficie del espécimen.



(a) Sin daño

(b) Erosionado

Figura 4.22 Topografía en tres dimensiones del Acero AISI 316L.

Este cambio en la rugosidad de los materiales confirma que al final las etapas de la erosión por cavitación, la superficie del material es desprendida a causa de la implosión cíclica de las innumerables burbujas generadas en el proceso de erosión por cavitación.

#### **4.4 Microscopia Electrónico de Barrido (SEM)**

El Microscopio Electrónico de Barrido o SEM (Scanning Electron Microscopy, por sus siglas en inglés), se utilizó para obtener las micrografías de los materiales con las cuales que se realizó una evaluación de la superficie de los especímenes después de ser dañados por cavitación.

Las superficies de los tres materiales son diferentes después del ensayo debido a que las propiedades físicas químicas y mecánicas son diferentes como se ha mencionado en los capítulos anteriores. A continuación se presentan de las micrografías obtenidas así como un análisis correspondiente para cada material.

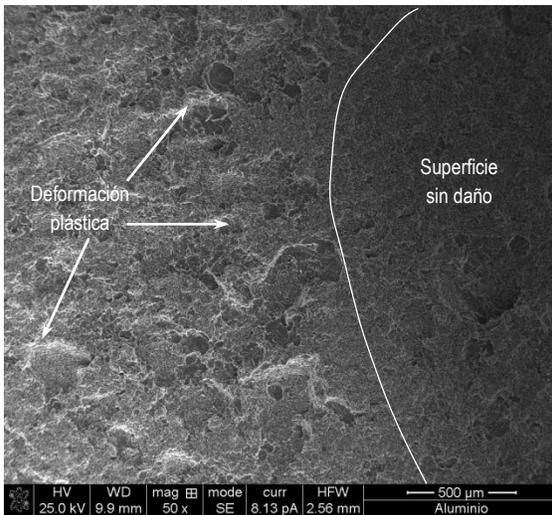
##### **Aluminio 6061-T6**

Según los resultados experimentales el material con mayor daño superficial fue el Aluminio 6061-T6. En la Figura 4.23 (a), se aprecia la diferencia entre la superficie erosionada y el zona no dañada del espécimen, así como la deformación plástica en algunas áreas. En Figura 4.23 (b), la superficie presenta cavidades, mismas que se destacan en los círculos, también se observa deformación plástica en la superficie.

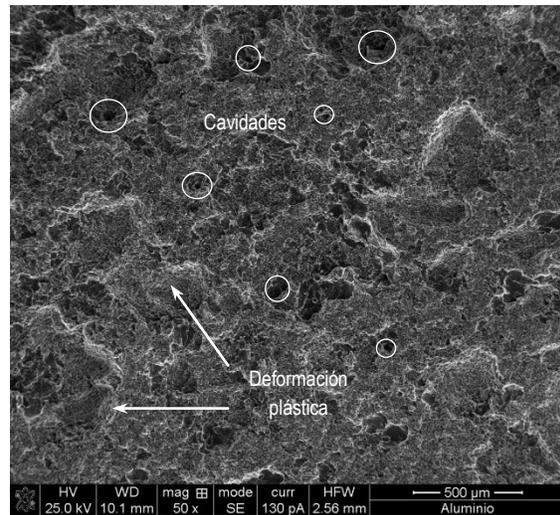
Las cavidades acompañadas de la acumulación de deformación plástica de la Figura 4.23 (c), son evidencias de que se alcanzó la tasa máxima de erosión durante los ensayos de cavitación. Por otra parte las grietas originadas por fatiga de la Figura 4.23 (d), se presentan principalmente alrededor de las cavidades de la superficie, en la que también se muestran evidencias de deformación plástica.

En la Figura 4.23 (e), el material fue desprendido por esfuerzos residuales alrededor de severas cavidades, en la Figura 4.23 (f), se presenta una

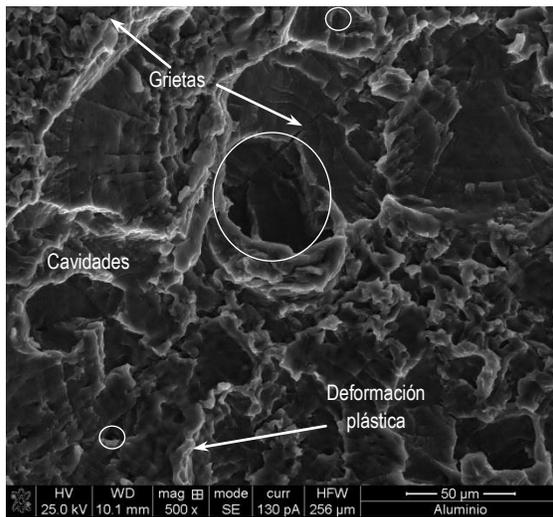
magnificación de estas cavidades que siguen manteniendo la constante de grietas alrededor.



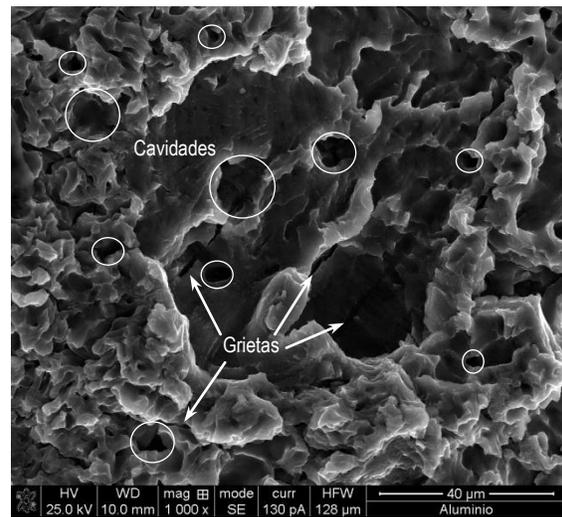
(a) Superficie observada a 50x.



(b) Superficie observada a 50x.



(c) Superficie observada a 500x.



(d) Superficie observada a 1000x.

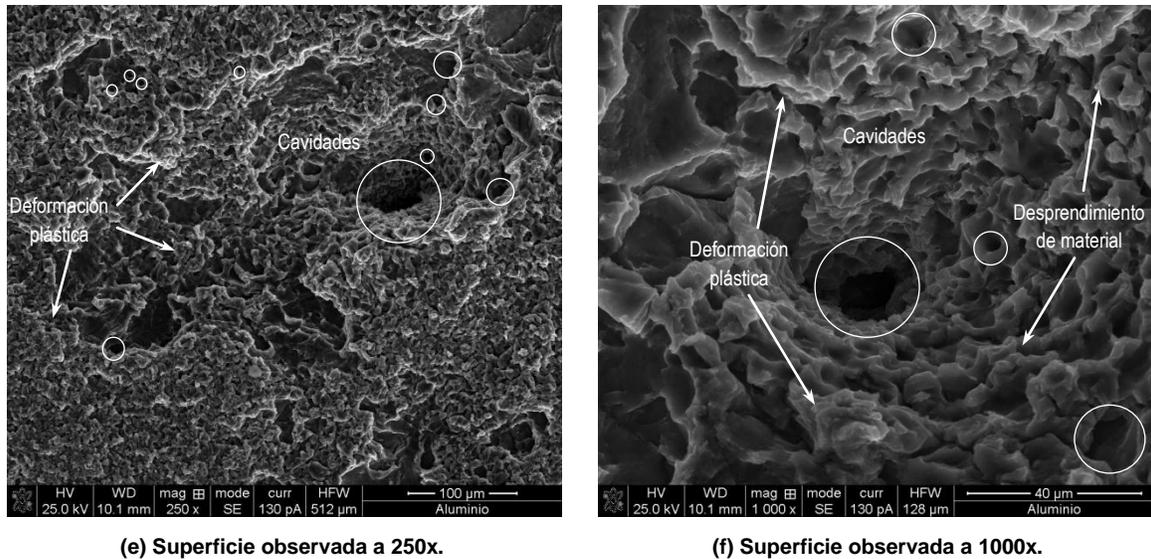


Figura 4.23 Micrografías SEM de la superficie erosionada del Aluminio 6061-T6.

### Bronce SAE 430A

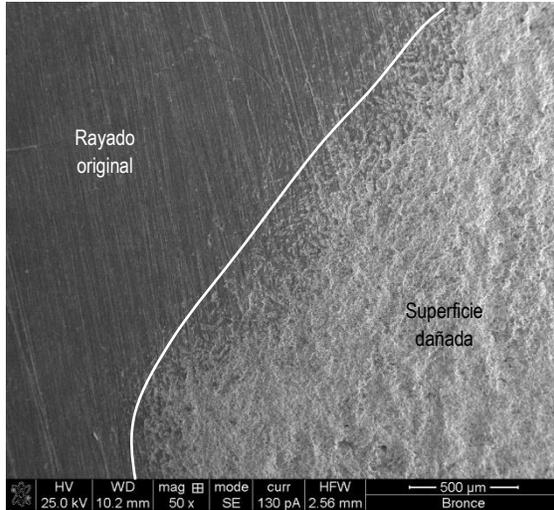
El Bronce SAE 430A, fue el segundo material con mayor daño. En la micrografía SEM de la Figura 4.24 (a), la parte izquierda de la línea, la superficie del Bronce SAE 430A, previa al ensayo donde se puede distinguir el rayado original del material, al compararlo con la zona dañada es evidente la diferencia con el daño ocasionado por las burbujas de cavitación.

Por otro lado en la Figura 4.24 (b), se observa una innumerable cantidad de micro cavidades, se puede apreciar el aspecto tipo esponja que caracteriza a una huella de erosión por cavitación.

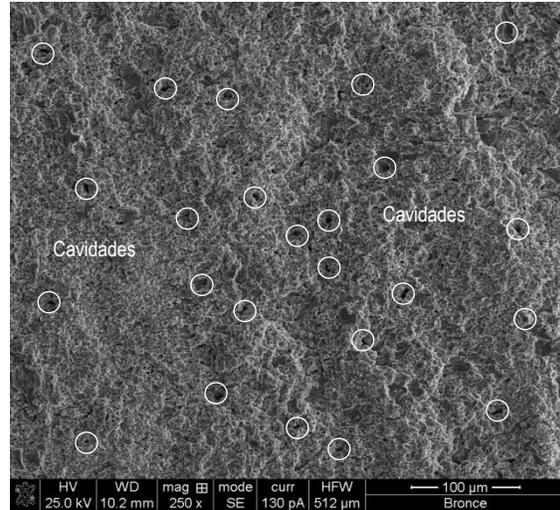
En la Figura 4,24 (c), se presentan cavidades de diferentes tamaños, así como fisuras y deformación plástica en distintas zonas de la superficie; en la Figura 4.24 (d), se aprecian mejor las cavidades con deformación plástica y grietas a su alrededor.

El desprendimiento de material que se presenta en la última etapa de la cavitación se observa en la Figura 4.24 (e), así como algunas cavidades acompañadas de grietas muy pronunciadas, que son menores que las que presentó el Aluminio

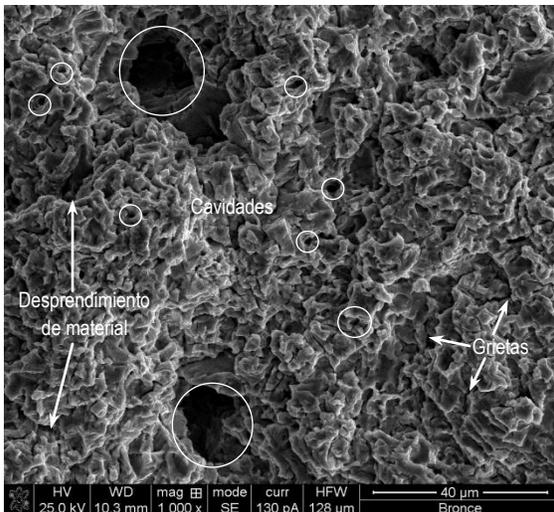
6061-T6, esto porque el Bronce SAE 430A, es más resistente. De igual forma en la Figura 4.24 (f), puede distinguirse una cavidad, de la que se originan grietas y deformación plástica.



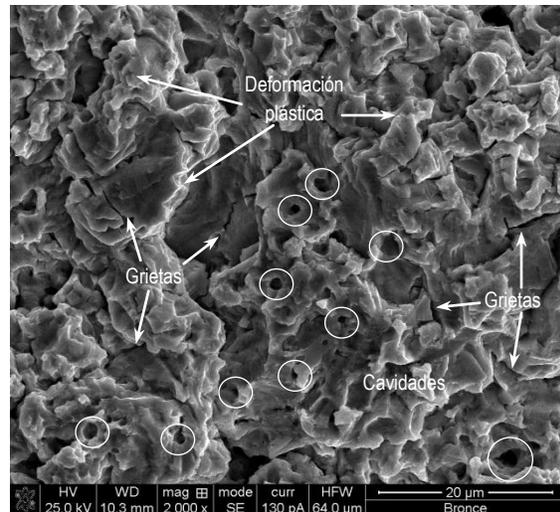
(a) Superficie observada a 50x.



(b) Superficie observada a 250x.



(c) Superficie observada a 1000x.



(d) Superficie observada a 2000x.

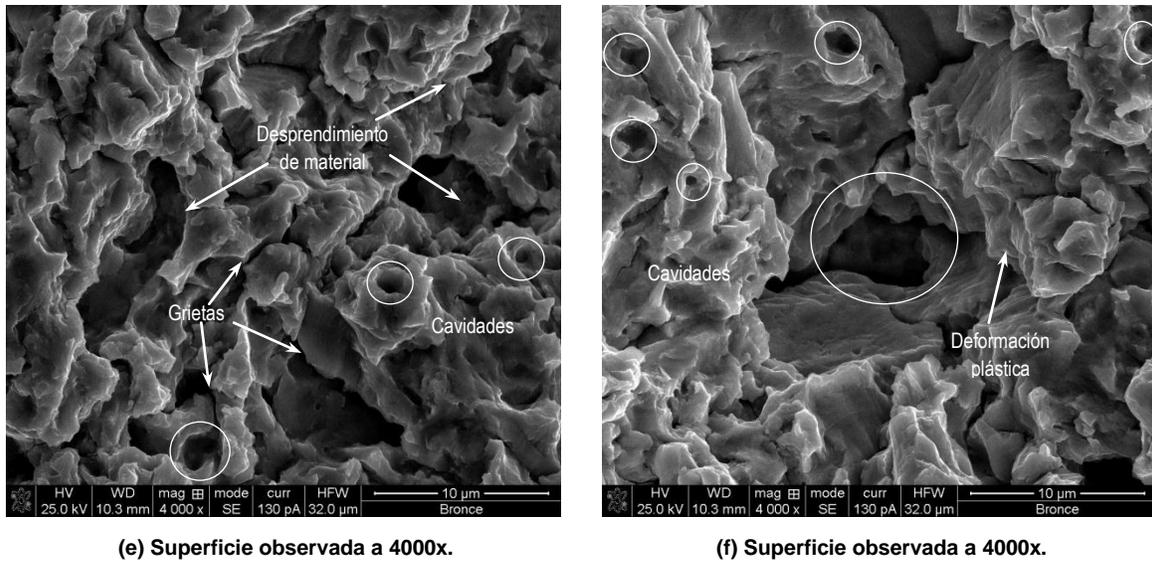


Figura 4.24 Micrografías SEM de la superficie desgastada del Bronce SAE 430A.

### Acero inoxidable 316L

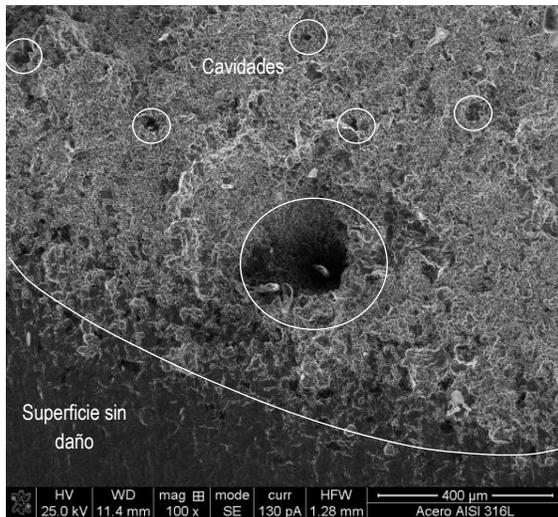
El Acero inoxidable AISI 316L, resultó ser el material de mayor resistencia de este trabajo, por lo tanto la superficie del mismo fue la menos dañada. En la Figura 4.25 (a), una línea que divide la superficie sin daño y la zona erosionada, donde se observan cavidades de diferentes tamaños, de las que sobresale la de mayor tamaño y profundidad, ubicada en el borde de la huella.

Mientras tanto en la Figura 4.25 (b), la superficie muestra una tendencia de desgaste más homogénea, con cavidades en toda la superficie que, al igual que los materiales anteriores la huella tiene aspecto como de una esponja.

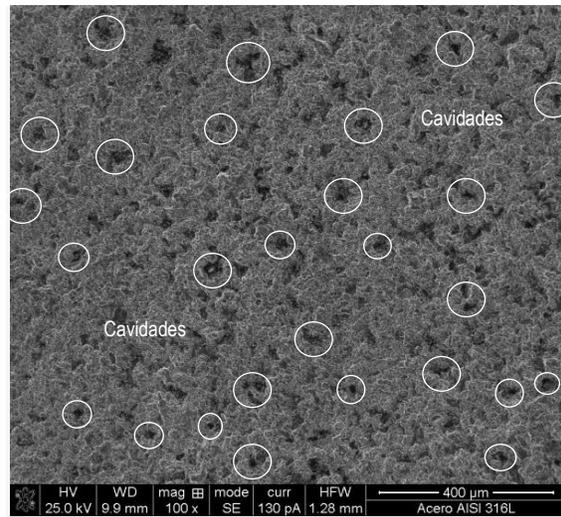
La superficie de la Figura 4.25 (c), se caracteriza grietas, deformación plástica y algunas cavidades en la superficie. En la Figura 4.25 (d), el material se ha desprendido de la superficie a causa de la implosión constante de burbujas, mismas que causan la deformación plástica.

La Figura 4.25 (e), se presentan fisuras y deformación plástica alrededor de pequeñas cavidades, además de material removido de la superficie; asimismo en la Figura 4.25 (f), además de las cavidades, se observa desprendimiento de

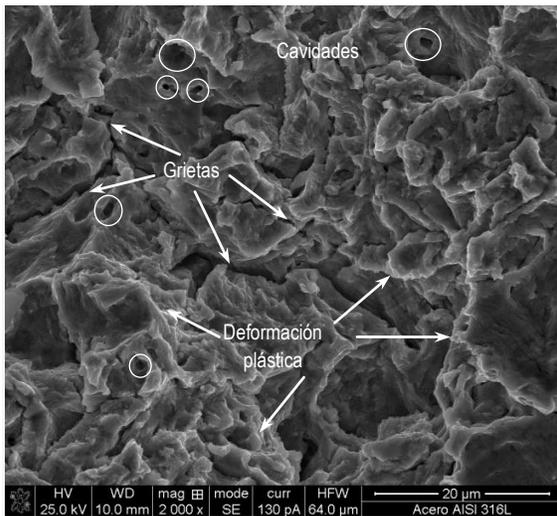
material, este se presenta tras someter al Acero AISI 316L a erosión por cavitación durante 540 minutos.



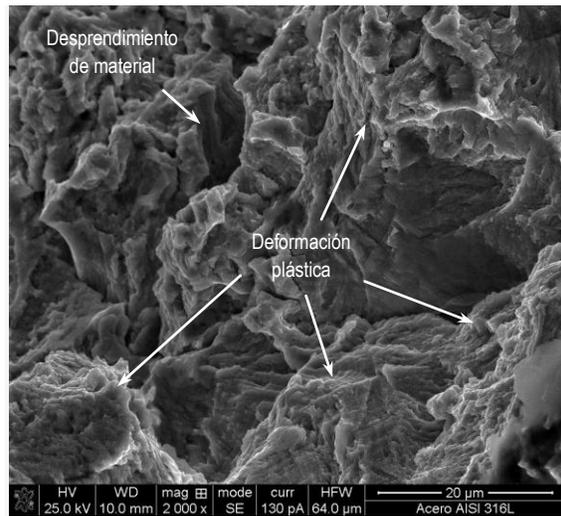
(a) Superficie observada a 100x.



(b) Superficie observada a 100x.



(c) Superficie observada a 2000x.



(d) Superficie observada a 2000x.

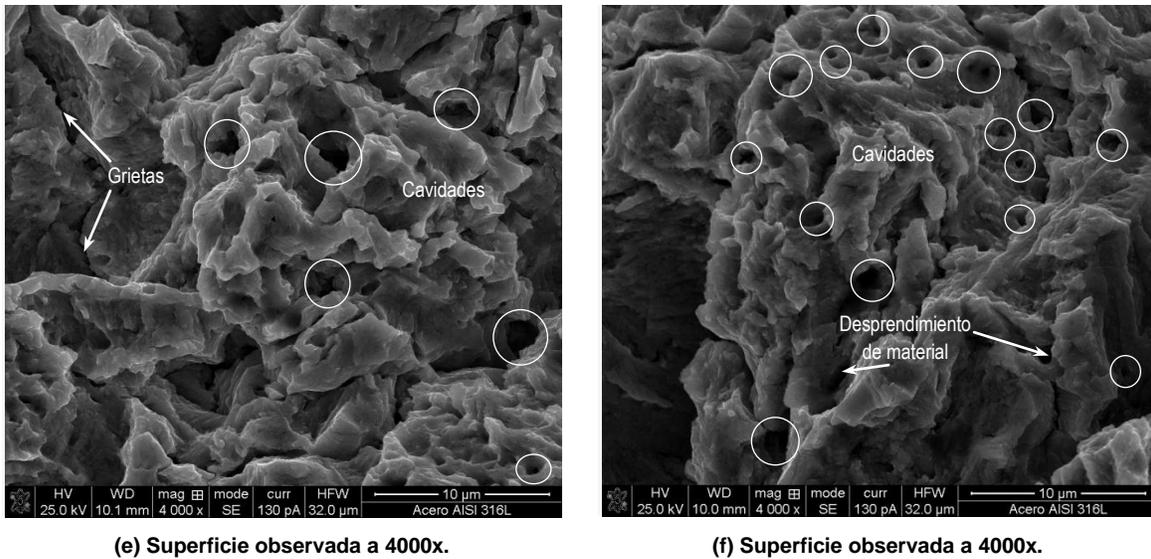
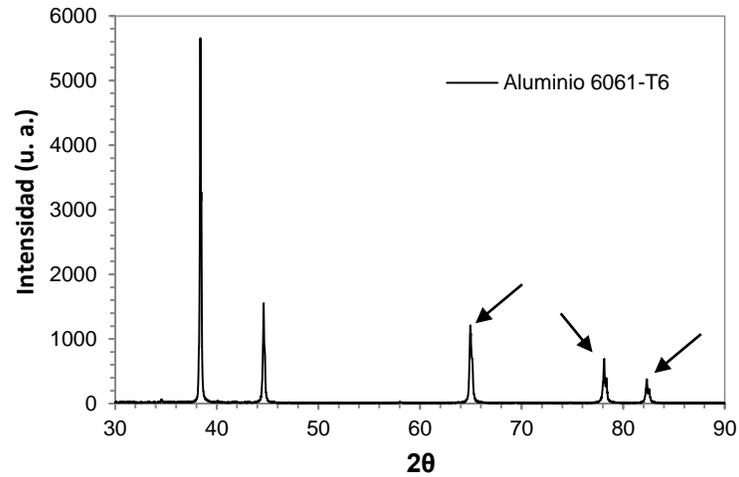


Figura 4.25 Micrografías SEM de la superficie desgastada del Acero AISI 316L.

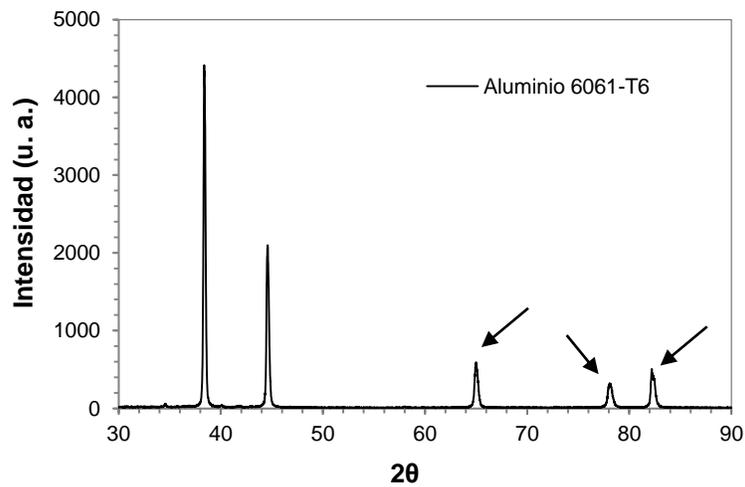
#### 4.5 Difracción de Rayos X (XRD)

Con el propósito de identificar posibles cambios en los materiales, durante los ensayos de erosión por cavitación en los materiales, se realizó un análisis por Difracción de Rayos X, con un ángulo de difracción  $2\theta$  entre los rayos x incididos y difractados.

En la Figura 4.26 (a) se observa el patrón XRD del Aluminio 6061-T6 antes de someterse a desgaste, al compararlo con la Figura 4.26 (b), los picos ligeramente más anchos después de la prueba, lo que puede significar que a causa de la erosión por cavitación, se dio un cambio en el tamaño de grano del material.



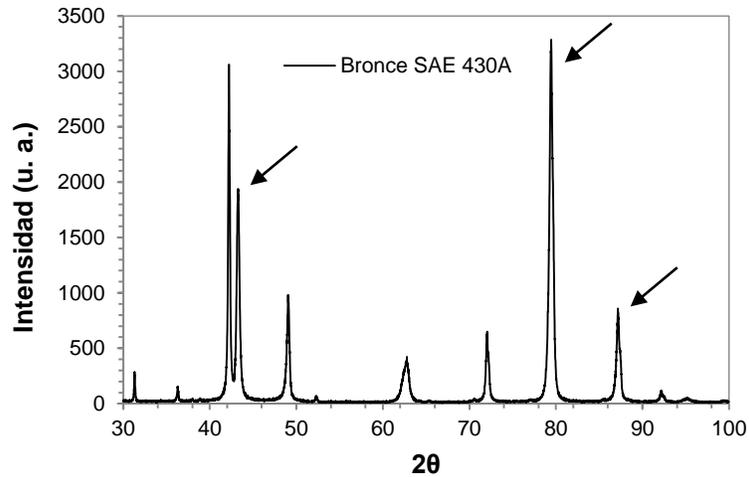
(a) Patrón XRD antes de la prueba de erosión por cavitación



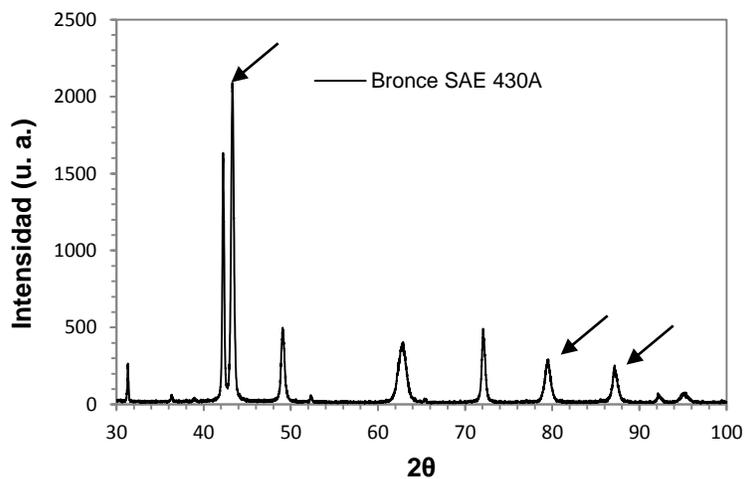
(b) Patrón XRD después de la prueba de erosión por cavitación

Figura 4.26 Patrón XRD del Aluminio 6061-T6.

En la Figura 4.27, los cambios entre los patrones XRD del Bronce SAE 430 A obtenidos antes y después de realizar las pruebas son evidentes, los cuales son representados por variaciones de las intensidades del patrón XRD, lo cual puede significar que al someterse el espécimen a erosión por cavitación, cambio la dirección de los granos, es decir, se dio un reacomodo de los granos del material.



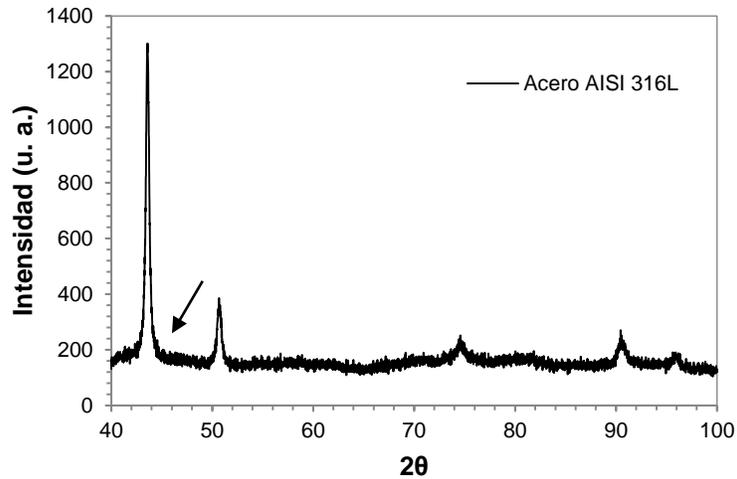
(a) Patrón XRD antes de la prueba de erosión por cavitación



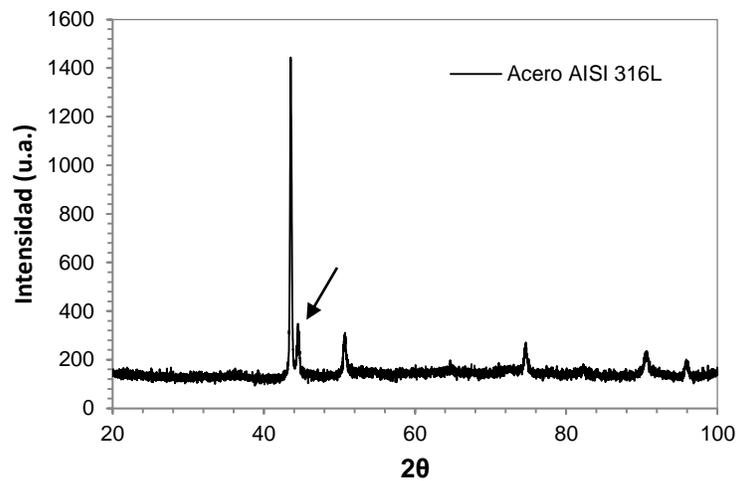
(b) Patrón XRD después de la prueba de erosión por cavitación

Figura 4.27 Patrón XRD del Bronce SAE 430A.

En el patrón XRD del Acero AISI 316L antes del ensayo de la Figura 4.28 (a); al ser comparado con el patrón XRD de la zona cavitada, que se encuentra en la Figura 4.28 (b), se observan evidencias claras de un cambio de fase, lo cual significa que posiblemente la energía absorbida por la implosión de las burbujas, pudo haber causado un cambio de fase, lo cual puede explicar los incrementos en dureza medida en este material.



(a) Patrón XRD antes de la prueba de erosión por cavitación



(b) Patrón XRD después de la prueba de erosión por cavitación

Figura 4.28 Patrón XRD del Acero AISI 316L.

Tang y su equipo (Tang, Cheng, & Man, 2004), reportaron cambios en el patrón XRD en aleaciones de bronce después de realizar ensayos de erosión por cavitación, de igual manera J.F. Santa (Santa J., Espitia, Blanco, Romo, & Toro, 2009) y su grupo, en sus investigaciones indicaron cambios en el patrón XRD de un acero inoxidable martensítico, ambos resultados son similares a los de este trabajo.

## CONCLUSIONES

Las superficies de los materiales erosionados, mostraron cavidades típicas de la cavitación, acompañadas de grietas originadas por fatiga, que es causada por la implosión cíclica de las burbujas en la superficie de los materiales; esto se observó en las micrografías obtenidas mediante Microscopía Electrónica de Barrido.

Las diferencias en el período de incubación de las muestras estudiadas fueron evidentes, ya que mientras el Acero AISI 316L seguía en la etapa de incubación, el Aluminio 6061-T6 había pasado por todas las etapas de la cavitación y la prueba había finalizado, mientras tanto el periodo de incubación del Bronce SAE 430A duró 56% menos que el Acero AISI 316L; por lo tanto estas diferencias están relacionadas con la capacidad de los materiales para deformarse plásticamente y su máxima resistencia mecánica.

La microdureza de la superficie dañada aumento 16% en el Aluminio 6061-T6, 19% en el Bronce SAE 430A y 56% en el Acero AISI 316L, debido al endurecimiento por trabajo, ocasionado por la acumulación de deformación plástica en la superficie del material. Por otra parte, a través del análisis de la topografía en tres dimensiones de los especímenes mediante Microscopía de Fuerza Atómica, se encontró un cambio severo en la rugosidad del material.

Además de los cambios que ocasiona la erosión por cavitación, mediante análisis por Difracción de Rayos X, se presentó un cambio en el tamaño de grano en el Aluminio 6061-T6, en el Bronce SAE 430A.se reacomodaron los granos del material al cambiar las intensidades de los picos en el patrón XRD, por otra parte en el Acero AISI 316L se observó un cambio de fase mediante la aparición de picos en el patrón XRD obtenido.

Al comparar el comportamiento los tres materiales con respecto a la cavitación, se concluyó que depende de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los

mismos. La erosión por cavitación en equipos y componentes hidráulicos no se puede evitar pero si minimizar con una adecuada selección de materiales resistentes al fenómeno.

Se proporciono un análisis profundo de tres materiales que son: Aluminio 6061-T6, Bronce SAE 430A y Acero inoxidable AISI 316L, de los cuales el Acero AISI 316L y el Bronce son una buena opción para la construcción, rediseño o mantenimiento de equipos utilizados en la industria hidráulica, ya que son resistentes a la erosión por cavitación así como a la corrosión, la cual si se presenta, agrava el problema de cavitación; por otra parte el Aluminio 6061-T6 sirvió como material de referencia para comparar y entender el daño de un material poco resistente comparado otro de mayor resistencia al fenómeno estudiado.

## REFERENCIAS

Anderson, J. D. (1984). *Fundamentals of Aerodynamics* (Tercera edición ed.). McGraw-Hill .

Arviza, J., Balbastre, I., & González, P. (2002). *Ingeniería rural: hidráulica*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

ASM International. (1992). *ASM Handbook* (Vol. 18). USA: ASM International.

ASTM International. (2002). ASTM Standard G 40. *Standard Terminology Relating to Wear and Erosion* . Philadelphia, USA.

ASTM. (2006). Norma ASTM G32, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using a Vibratory Apparatus. Philadelphia, USA.

Barnaby, S. W., & Parsons, C. W. (1897). Trans. Inst. Naval Arch. 38 , 232.

Barnaby, S. W., & Thornycroft, S. J. (1895). Torpedo boat destroyers. *Proc. Inst. Civ. Engrs* , 122, 57.

Bhushan, B. (2002). *Introduction to Tribology*. New York, USA: John Wiley & Sons.

Bhushan, B., & Gupta, B. (2007). *Handbook of tribology. Materials, Coatings, and Surface Treatments*. Michigan: McGraw-Hill.

Boy, J. H., Kumar, A., March, P., Willis, P., & Herman, H. (1997). *Cavitation- and Erosion-Resistant Thermal Spray Coatings*. US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratories. USACERL.

Bregliozzi, G., Di Schino, A., Haefke, H., & Kenny, J. M. (2003). Cavitation erosion resistance of a high nitrogen austenitic stainless steel as a function of its grain size. *Materials Science Letters* , 22, 981– 983.

Brennen, C. E. (1994). *Cavitation and Bubble Dynamics*. (O. University, Ed.) Oxford.

Brennen, C. E. (1995). *Cavitation and Bubble Dynamics*. (O. University, Ed.) Oxford.

Burrill, L. C. (1951). Sir Charles Parson and Cavitation. (T. I. Engrs., Ed.) *Parsons Memorial Lecture, 1950* , 63, 149.

Burwell, J. J. (1957). Survey of Possible Wear Mechanisms. *Wear* , 1, 119-141.

Chiu, K., Cheng, F., & Man, H. (2005). Cavitation erosion resistance of AISI 316L stainless steel laser surface-modified with NiTi. *Materials Science and Engineering A* , 392, 348–358.

Chiu, K., Cheng, F., & Man, H. (Abril de 2005). Evolution of surface roughness of some metallic materials. *Ultrasonics* , 713-716.

Chiu, K., Cheng, F., & Man, H. (2007). Hydrogen effect on the cavitation erosion resistance of AISI 316L stainless steel laser surface-modified with NiTi. *Wear* , 61, 239–243.

Di Vernieri, M. G., Wischnowski, F., Tanaka, D. K., & Sinatora, A. (1999). Correlation between microstructure and cavitation–erosion resistance of high-chromium cast steel—preliminary results. *Wear* , 517–522.

Dopazo, C. (Enero de 2008). ¿Cavitar o no cavitar? La Inevitable Ubicuidad de las Burbujas. 1-89. (R. A. Ingeniería, Ed.) Madrid, España.

Escobar, J., Correa, R., Santa, J., Giraldo, J., & Toro, A. (2010). Cavitation Erosion Welded Martensitic Stainless Steel Coatings. *First International Brazilian Conference on Tribology*. Rio de Janeiro.

Fujikawa, S., & Akamatsu, T. (1980). Effects of the non-equilibrium condensation of vapour on the pressure wave produced by the collapse of a bubble in a liquid. *Fluid Mechanics* , 481-512.

Gulich, J., & Rösch, A. (Julio de 1988). Cavitation Erosion in Centrifugal Pumps. *World Pumps* , 164-168.

Hagenson, L. C., & Doraiswamy, L. K. (1988). Comparison of the effects of ultrasound and mechanical agitation on a reacting solid-liquid system. *Chemical Engineering Science* , 53, 131-148.

Hammit, F. G. (1980). *Cavitation and Multiphase Flow Phenomena*. New York: McGraw-Hill.

Haosheng, C., Li, J., Chen, D., & Jiadao, W. (2008). Damages on steel surface at the incubation stage of the vibration cavitation erosion in water. *Wear* , 265, 692–698.

Hattori, S., Ogiso, T., Minami, Y., & I, Y. (2008). Formation and progression of cavitation erosion surface for long exposure. *Wear* , 265, 1619–1625.

He, J., & Hammit, F. (1982). COMPARISON OF CAVITATION EROSION TEST RESULTS FROM VENTURI AND VIBRATORY FACILITIES. *Wear* , 76, 269 - 292.

Hutchings, I. (1992). *Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials* (Primera edición ed.). U.K.: Edward Arnold .

Iwai, Y., Okada, T., Awazu, K., & Hammitt, F. (1982). Effects of applied stress on cavitation erosion. *Wear* , 283-293.

Knapp, R., Daily, J. W., & Hammit, F. (1970). *Cavitation*. New York, USA: McGraw Hill.

Kumar, P. S., Kumar, M. S., & Pandit, A. B. (2000). Experimental quantification of chemical effects on hydrodynamic cavitation. *Chemical Engineering Science* , 55, 1633–1639.

Laguna, J. (2008). Tesis de doctorado. Sheffield, Inglaterra: The University of Sheffield.

Lauterborn, W. (1979). Cavitation and Coherent Optics. *Cavitation and Inhomogeneities in Underwater Acoustics* , 3-12.

March, P., & Hubble, J. (Septiembre de 1996). Evaluation of Relative Cavitation Erosion Rates For Base Materials, Weld Overlays, and Coatings. Report No. WR28-1-900-282. (T. V. Laboratory, Ed.) Tennessee, USA.

Naude, C., & Ellis, A. (1961). On the mechanism of cavitation damage by non-hemispherical cavities in contact with a solid boundary. (ASME, Ed.) *Basic Engineering* , 83, 648-656.

OBTESOL. (2011). *Observatorio Tecnológico de soldadura*. (C. T. AIMEN, Editor) Recuperado el 14 de Octubre de 2011, de [www.obtesol.es/index.php?option=com\\_content&task=view&id=146&Itemid=30](http://www.obtesol.es/index.php?option=com_content&task=view&id=146&Itemid=30)

O'Connor, P. D. (2002). *Practical Reliability Engineering* (Cuarta edición ed.). John Wiley and Sons.

Okada, T., & Iwai, Y. (Diciembre de 1989). Cavitation Erosion. (F. University, Ed.) Japón: Dpt. of Mechanical Engineering.

Plesset, M. S., & Devine, R. (1966). Effect of Exposure Time on Cavitation Damage. *Basic Engineering Transactions* , 88D (4), 691-705.

Plesset, M., & Chapman, R. (1971). Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary. (C. U. Press, Ed.) *Fluid Mechanics* , 47, 283-290.

Potter, M., & Wiggert, D. (2002). *Mecánica de fluidos* (Tercera edición ed.). México, D.F.: Thomson Learning.

Rao, S., Rao, L., & Seetharamiah, K. (Abril de 1971). Selecting Metal and Alloys to Resist Cavitation Damage. *Water Power & Dam Canstruction* .

Rheingans, W. J. (1962). Cavitation In Hydraulic Turbines. *Symposium On Erosion And Cavitation* , 17-31.

Richardson, A. (1911). The evolution of the Parsons Steam Turbine. Engineering.

Santa, J. F., Espitia, L., J.A, B., & Toro, A. (2009). Slurry and cavitation erosion resistance of thermal. *Wear* , 160-167.

Santa, J., Blanco, J., J.E, G., & Toro, A. (2011). Cavitation erosion of martensitic and austenitic stainless steel welded coatings. *Wear* , 271, 1445– 1453.

Santa, J., Espitia, L., Blanco, J., Romo, S., & Toro, A. (2009). Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings. *Wear* , 267, 160–167.

Schwetcke, R., & Kreye, H. (1996). Cavitation Erosion of HVOF Coatings. En A. I. C.C. Berndt (Ed.), *Proceedings of the 9th National Thermal Spray Conference*, (págs. 153-158).

Soyama, H., Kato, H., & Oba, R. (1992). Cavitation observations of severely erosive vortex cavitation arising in a centrifugal pump. *Third I.Mech.E. Int. Conf. on Cavitation*, (págs. 103-110).

Stachowiak, G., & Batchelor, A. (2001). *Enginnering tribology*. Boston: Butterworth-Heinemann.

Stolarski, T. (1991). *Tribology in Machine Desing*. USA: Industrial Press Inc.

Streeter, V. L., Wylie, E., & Bedford, K. W. (2004). *Mecánica de fluidos*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.

Tang, C. H., Cheng, F., & Man, H. (2004). Improvement in cavitation erosion resistance of a copper-based propeller alloy by laser surface melting. *Surface and Coatings Technology* , 182, 300–307.

Thiruvengadam, A., & Preiser, H. S. (Diciembre de 1963). On Testing Materials for Cavitation Damage Resistance. *Technical Report* . Hydronautics, Inc.

Vélez, L. M. (2008). *Materiales industriales. Teoría y aplicaciones*. ITM.

Vizintin, J., Kalin, M. J., Dohda, K., & Jahanmir, S. (2004). *Tribology of mechanical systems: A guide to present and future technologies*. New York: ASME Press.

Vyas, B., & Preece, C. M. (1976). Stress produced in a solid by cavitation. *Applied Physics*, 47 (12), 5133-5138.

Williams, J. A. (2005). *Engineering Tribology* (Vol. X). (C. U. Press, Ed.) New York, USA.

Young, F. (1989). *Cavitation*. Londres: McGraw-Hill.

Zhou, K. S., & Herman, H. (1982). Cavitation Erosion of Titanium and Ti-6Al-4V: Effects of Nitriding. *Wear*, 80, 101- 113.

## ANEXOS

### CONGRESOS

Simposio Iberoamericano Multidisciplinario de Ciencias e Ingenierías 2011 (CIMCI 2011), Pachuca, Hidalgo. 21-23 Septiembre 2011. *Estudio y análisis del fenómeno de desgaste Erosión por Cavitación en Aluminio 6061 y Acero al carbono AISI 1018*. Mayra Sareth Tovar Oliva, Jhonatan Reyes Mariscal, Manuel Vite Torres, Ezequiel Alberto Gallardo Hernández, Juan Rodrigo Laguna Camacho.

6° Congreso Internacional de Metodología de la Ciencia y la Investigación para la Educación, San Francisco de Campeche, Campeche. 12-14 Octubre 2011 *Metodología para evaluar la erosión por cavitación empleando un cavitómetro funcional*. Mayra Sareth Tovar Oliva, Juan R. Laguna Camacho, Manuel Vite Torres.

11° Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales SAM / CONAMET 2011, Rosario, Argentina. 18-21 Octubre 2011. *Estudio experimental del acero AISI 1018 sometido a erosión por cavitación acústica*. Manuel Vite Torres, Mayra Sareth Tovar Oliva, Juan R. Laguna Camacho.

II Jornada Nacional de innovación y competitiva, Mazatlán, Sinaloa. 10 y 11 Noviembre 2011. *Análisis del fenómeno de erosión por cavitación en acero inoxidable AISI 316L*. Manuel Vite Torres, Mayra Sareth Tovar Oliva, Ezequiel A. Gallardo-Hernández.



Zempoala Hidalgo, a 15 de Julio de 2011

*MAYRA S. TOVAR OLIVA, JHONATAN REYES MARISCAL, MANUEL VITE TORRES, EZEQUIEL A. GALLARDO HERNÁNDEZ, JUAN R. LAGUNA CAMACHO*

Por medio de la presente, se informa que su contribución titulada “ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE DESGASTE EROSIÓN POR CAVITACIÓN EN ALUMINIO 6061 Y ACERO AL CARBONO AISI 1018” identificada con el código de recepción MA01 ha sido ACEPTADA para ser presentada en la modalidad de EXPOSICIÓN ORAL en el Simposio Iberoamericano Multidisciplinario de Ciencias e Ingenierías 2011 (SIMCI-2011), que se llevará a cabo del 21 al 23 de Septiembre de 2011 en el Centro de Convenciones TuzoForum, Pachuca, Hidalgo.

Si desea que el trabajo en extenso sea publicado en la **Revista Iberoamericana de Ciencias e Ingenierías Emergentes con ISBN: 978-607-95344**, será necesario enviarlo para su evaluación en el formato que se encuentra disponible en <http://www.upp.edu.mx/simci/presentacion-de-articulos.php>. La fecha límite de recepción de trabajos es el 1 de Septiembre del presente año.

Para mayor información puede comunicarse con el Comité Organizador del evento al correo: [simci@site.upp.edu.mx](mailto:simci@site.upp.edu.mx)

Sin otro particular, reciba saludos cordiales.

ATENTAMENTE

Dr. Marco Antonio FLORES-GONZÁLEZ  
COMITÉ ORGANIZADOR

[www.upp.edu.mx/simci](http://www.upp.edu.mx/simci)  
[simci2011@upp.edu.mx](mailto:simci2011@upp.edu.mx)



Sexto Congreso Internacional de  
Metodología de la Ciencia y de la Investigación  
para la Educación

Asociación Mexicana de Metodología de la Ciencia y de la Investigación, A. C.  
Instituto Campechano



**COMITÉ ORGANIZADOR**  
Dr. Ángel Eduardo Vargas Garza  
Coordinador General  
M. en C. Silvia de Lourdes Sánchez Pizar  
Erléno y Representación  
M. en C. Elío Ángel Altamir  
Lic. Claudia Ocaña Isauro Moseno  
Mtra. Gabriela Flores López  
Dr. José de Jesús Baldeón Cortés  
Dr. Guadalupe Ce Eslita  
M. en C. Víctor Florencio Ramírez  
Historia  
Tifología  
M. en C. Mado Esther Zavala Rosales  
Comunicación  
M. en C. Sergio Ramón Wain Flóres  
Finanzas  
Dra. Beatriz Dolores Guardián Soto  
Confederación Magisterial y Colegiada  
Dra. Beatriz Dolores Guardián Soto (México)  
Dr. Pío Martín González García (España)  
Dr. Antoni Esteve Vallés (España)  
Dra. María Carolina de Castillo (Venezuela)  
Dra. Zaida La Parola Gómez (Colombia)  
C/Dr. María Azahí Carrizosa Escopido (México)  
M. en C. María F. Agraza (Jamaica)  
Mtro. Francisco Escobar Pablos (México)  
Mtro. Gabriel Colorado Padilla (México)  
Mtro. Marco Cosío Martínez (México)  
Dr. José de Jesús Baldeón Cortés (México)  
Dra. Virginia Alcántara Méndez (México)  
C/Dr. Susi A. Hernández Hernández (México)  
Dr. José Rodrigo Arizano Sánchez (México)  
Dra. Margarita Suarez Rodríguez (México)  
Dra. Silvia María Peraldo Mada (México)  
Dra. Carolina Montoya Neri (México)  
Dr. Rodrigo Páez Lara (México)  
Dra. Lorea Ledezma Rijo (España)  
Dra. Amelina González Zabalza (España)  
Dr. Felipe Sánchez Díaz Albarán (México)  
M. en C. Rosalva Rivas Guardián (México)  
Dr. Miguel Zamora Escoto (España)  
C/Dr. Doraci Floriano García (Argentina)  
C/Dr. Doraci Rosado Sogliano (Uruguay)  
**Técnico Científico**  
Pdr. Tomazén Patricia Vargas Soto  
Registro y Control de participantes  
M. en C. Silvia de Lourdes Sánchez Pizar  
Medios de Comunicación  
M. en C. Ernesto Cervantes Álvarez  
Logística  
M. en C. María Patricia Agraza (Jamaica)  
Cartera  
Lic. Elías Virgilio Mejía  
Talleres  
Lic. Elizabeth Maestas Alarcón  
Eventos Culturales y Sociales  
Lic. Karina Carrillo Ocas  
Hospedaje, Estadia y Transporte  
Dr. Guadalupe Ce Eslita  
Atención a participantes  
Lic. Alan Mederos Rosero  
Editorial

México, D.F., 04 de agosto de 2011

Oficio No. AMMCI CTC/113/2011

C. Lic MAYRA SARETH TOVAR OLIVA  
Presente.

El Comité Técnico Científico tiene el agrado de notificarle que su ponencia:

**"Metodología para evaluar la erosión por cavitación empleando un cavitometro funcional."**

Ha sido aceptada para su presentación en la Mesa: Metodología para el desarrollo de competencias científicas en el Sexto Congreso Internacional de Metodología de la Ciencia y de la Investigación para la Educación, que se llevará a cabo en las instalaciones del Instituto Campechano, en la Ciudad de San Francisco de Campeche, Cam. México. Del 12 al 14 de octubre de 2011.

Por lo que solicitamos se realice el pago de la cuota de inscripción de la ponencia a la cuenta BBVA Bancomer No. De Cuenta 0135078326, a nombre de la Asociación Mexicana de Metodología de la Ciencia y de la Investigación, A. C. Para transferencia Interbancaria SI es de otros bancos el número de CLABE es 012180001350783269. En caso de requerir factura se deberá realizar el pago del 16% del IVA además de la cuota correspondiente. Una vez hecho el depósito se debe enviar el número de movimiento, o comprobante bancario escaneado con los nombres de los autores, a las direcciones electrónicas [angel@ammci.org.mx](mailto:angel@ammci.org.mx) y [finanzas@ammci.org.mx](mailto:finanzas@ammci.org.mx). La inscripción de la ponencia se hará en línea en la dirección: [www.ammci.org.mx/eventos/congreso6/entrada.php](http://www.ammci.org.mx/eventos/congreso6/entrada.php). Posteriormente será enviado el programa de ponencias, con el día y la hora de su participación o bien se podrá consultar en la página del congreso a más tardar el 1 de octubre.

Para que la ponencia se publique en las Memorias del Congreso es necesario enviar, a los correos antes mencionados, el formato, requisitado y escaneado, de la cesión de derechos de la ponencia, con el fin de realizar los trámites del ISBN, antes del 1 de septiembre de 2011; de lo contrario no se incluirá en las mismas. (Se anexa formato)

Se recomienda realizar los trámites necesarios para la reservación de transporte y hotel. (Se anexa información)

Asimismo se recuerda presentar el original del comprobante bancario de pago, con sus nombres correctamente escritos, en la mesa de registro el día 12 de octubre.

Sin más por el momento y esperando poder saludarle personalmente durante el Congreso, queda de usted muy atentamente,

Dra. Beatriz Dolores Guardián Soto  
COMITÉ TÉCNICO CIENTÍFICO

c.c.p. Expediente

Jardín de Occidente No. 128, Col. Carmen Serdán, Copacalpan, Mérida, D.F., Mérida, CP 94910

e-mail: [angel@ammci.org.mx](mailto:angel@ammci.org.mx)

URL: <http://www.ammci.org.mx>



*Asociación  
Argentina de  
Materiales*



**Congreso SAM-CONAMET 2011**  
Octubre 2011, Rosario - Argentina

Rosario, 26 de agosto de 2011

Estimada Ing. Mayra Sareth Tovar Oliva:

Tengo el agrado de dirigirme a Ud. a los fines de comunicarle la aceptación de su trabajo titulado:

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL ACERO AISI 1018 SOMETIDO A EROSIÓN POR  
CAVITACIÓN ACÚSTICA**

**Mayra Sareth Tovar Oliva, Manuel Vite Torres, Juan R. Laguna Camacho  
y Ezequiel A. Gallardo Hernández**

El mismo ha sido seleccionado para ser presentado en las Jornadas SAM, conjuntas al Congreso CONAMET, del 18 al 21 de octubre en Rosario, Provincia de Santa Fe, Argentina.

Se expide la presente constancia a fines de invitar a Usted a asistir a este evento para exponer su trabajo.

Saludo a Usted atentamente,

Prof. Dr. Alberto F. Armas  
Presidente de la Comisión Organizadora  
SAM-CONAMET2011



Culiacán Rosales, Sinaloa, 28 de octubre de 2011.

Ing. Mayra Sareth Tovar Oliva  
Presente.-

Por medio de la presente le comunico que su trabajo titulado ***“Análisis del Fenómeno de Erosión por Cavitación en Acero Inoxidable AISI 316L”*** después de haber sido revisado por el Comité de Carteles Libres, fue aceptado para su presentación en la modalidad de **CARTEL** en la **III Jornada Nacional de Innovación y Competitividad**, a celebrarse en el puerto de Mazatlán, Sinaloa, durante los días 10 y 11 de noviembre de 2011.

Sin otro particular, le damos las gracias por su aportación y aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo

Atentamente

Dr. Héctor Manuel Cárdenas Cota  
Coordinador de la Sesión de Carteles Libres.

Ccp.- Archivo



[www.conacyt.gob.mx](http://www.conacyt.gob.mx)  
[www.coecytsinaloa.gob.mx](http://www.coecytsinaloa.gob.mx)  
[www.sinaloa.gob.mx](http://www.sinaloa.gob.mx)





# 2011 SIMPOSIO IBEROAMERICANO MULTIDISCIPLINARIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

La Universidad Politécnica de Pachuca, otorga el presente

## *Reconocimiento a:*

Mayra S. Tovar Oliva, Jhonatan Reyes Mariscal, Manuel Vite Torres,  
Ezequiel A. Gallardo Hernández, Juan R. Laguna Camacho

Por haber participado con la exposición oral “ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE  
DESGASTE EROSIÓN POR CAVITACIÓN EN ALUMINIO 6061 Y ACERO AL CARBONO AISI  
1018”, en el marco del **Simposio Iberoamericano Multidisciplinario de Ciencias e Ingenierías**,  
efectuado del 21 al 23 de septiembre de 2011, en la ciudad de Pachuca, Hidalgo, México.



M.A.F. Sergio Arteaga Carreño  
Rector



**11º CONGRESO BINACIONAL DE METALURGIA Y MATERIALES  
SAM/CONAMET 2011**

**18-21 de octubre 2011**

Centro de Convenciones Ariston Hotel  
Pueyrredón 762, ROSARIO, ARGENTINA

**CERTIFICADO**

**M.S. TOYAR OLIVA**

Participó del 11º Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales SAM/CONAMET 2011

Dr Alberto F. Armas  
Presidente SAM/CONAMET2011