

**CARACTERIZACIÓN DE EROSIÓN POR CAVITACIÓN ULTRASÓNICA Y SU  
CORRELACIÓN CON MICRODUREZA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS**

**ERWING RUBEN MARCON CABALLERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE FÍSICA  
BUCARAMANGA  
2018**

**CARACTERIZACION DE EROSIÓN POR CAVITACIÓN ULTRASÓNICA Y SU  
CORRELACIÓN CON MICRODUREZA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS**

**ERWING RUBEN MARCON CABALLERO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE FÍSICO**

**DIRECTOR**

**ARTURO PLATA GÓMEZ**

**PhD: CIENCIAS PARA EL INGENIERO**

**CODIRECTORA**

**CAROLINA MENDOZA LUNA**

**MSc: FÍSICA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE FÍSICA**

**BUCARAMANGA**

**2018**

## **DEDICATORIA**

*A TODA MI FAMILIA, PRINCIPALMENTE A MI MADRE ANA MERCEDES CABALLERO, QUE CON ESFUERZO ME HA SACADO ADELANTE Y SIEMPRE ME HA BRINDADO SU AMOR INCONDICIONAL DURANTE TODO ESTE PROCESO DE APRENDIZAJE.*

*A MIS HERMANITOS: JUAN SEBASTIAN MARCON, HEIDY VANESA MARCON, POR TODO EL CARIÑO Y APRECIO TODOS ESTOS AÑOS.*

*A MI TÍA MARINA POR SU GENEROSIDAD Y COMPRENSIÓN, A MIS AMIGOS ROBINSON ACUÑA, GILBERT SANCHEZ Y DANIEL MEJIA QUIENES SIEMPRE ESTUVIERON AHÍ PARA BRINDARME SUS MEJORES CONSEJOS, A DIANITA RINCON POR ANIMARME CON SU SONRISA.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A LA ESCUELA DE FÍSICA Y A LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER POR DARMER LA OPORTUNIDAD DE UNA EDUCACIÓN INTEGRAL EN MI FORMACIÓN.*

*A MI DIRECTOR, PhD. ARTURO PLATA Y A MI CODIRECTORA MSc CAROLINA MENDOZA, AL PROFESOR CARLOS CHACÓN, POR SU ACOMPAÑAMIENTO, ORIENTACIÓN Y COMPRENSIÓN.*

*A LA PhD. ELCY CORDOBA Y A DOMINGO, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES, POR SU APOYO EN EL USO DE LAS INSTALACIONES Y EQUIPOS.*

*A LOS INTEGRANTES DEL GRUPO DE ÓPTICA Y TRATAMIENTO DE SEÑALES (GOTS), QUIENES ME HA ACONSEJADO DE LA MEJOR FORMA POSIBLE.*

*AL PhD CARLOS RIOS Y AL LABORATORIO DE MICROSCOPIA- UIS POR SU APOYO EN EL ANALISIS S.E.M.*

*AL PhD. VALERY DOUGAR ZABON Y AL MA. FABIAN GONZALEZ, POR SUS RECOMENDACIONES EXPERIMENTALES Y OBSERVACIONES.*

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	16
1. CAVITACIÓN ULTRASÓNICA.....	19
1.1 DEFINICIÓN Y FORMACIÓN .....	19
1.2 CRECIMIENTO DE BURBUJAS .....	21
1.2.1 Cavitación inercial y no inercial.....	23
1.3 CAMPO DE ULTRASONIDO Y DISTRIBUCIÓN DE BURBUJAS .....	24
1.4 MECANISMOS DE INTERACCION POR CAVITACION ULTRASONICA. ....	25
1.4.1 Chorros liquidos. ....	25
1.4.2 ondas de choque. ....	28
1.4.3 Colisiones por desgaste.....	31
1.5 EFECTOS DE CAVITACIÓN ULTRASÓNICA EN METALES .....	33
1.6 MICRODUREZA VICKERS.....	34
1.7 TÉCNICAS DE MICROSCOPIA .....	36
1.7.1 Microscópio AXIO IMAGER.Z1M (CARL ZEISS).....	36
1.7.2 Microscópio eletrónico de barrido FEI Quanta FEG 650.....	36
2. MONTAJE EXPERIMENTAL .....	38
2.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA MICRODUREZA.....	38
2.1.2 Medición de la microdureza. ....	38
2.2 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE ULTRASONIDO.....	40
2.3 POSICIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS.....	40
2.4 ARREGLO EXPERIMENTAL EN EQUIPO DE ULTRASONIDO. ....	43
3. ANÁLISIS DE EROSIÓN POR TÉCNICAS DE MICROSCOPIA .....	46
3.1 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES .....	46

3.1.1 Acero inoxidable 404. ....	49
3.1.2 Acero 1020.....	51
3.1.3 Aluminio .....	54
3.1.4 Bronce.....	56
3.1.5 Aluminio-cobre .....	58
3.1.6 Fundición gris.....	63
3.1.7 Titanio .....	67
3.1.8 Magnesio .....	68
3.1.9 Estaño.....	72
4. CONCLUSIONES .....	73
5. RECOMENDACIONES.....	75
BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXOS.....	80

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Relación entre frecuencia del dispositivo de ultrasonido y presión externa. .....	27
Tabla 2. Microdurezas Vickers promedio de estructuras metálicas .....	39
Tabla 3. Mediciones de los máximos de presión en papel aluminio. ....	42
Tabla 4. Comparación entre la longitud de onda teórica y experimental. ....	43
Tabla 5. Mediciones del radio que contiene las distribuciones de erosión.....	57
Tabla 6. Mediciones de porosidades generadas en la superficie de Al-Cu.....	63
Tabla 7. Mediciones del largo de grietas sobre superficie de Mg. ....	71

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama de fases del agua en el proceso de ebullición y cavitación ....	19
Figura 2. Núcleo de cavitación en una grieta .....	21
Figura 3. Comportamiento temporal del radio de una burbuja en un campo acústico. .....	23
Figura 4. Distribución espacial de burbujas en limpiador de ultrasonidos.....	25
Figura 5. Desarrollo de chorro entrante para cavidad cercana y lejana.....	26
Figura 6. Presión externa del transductor [Atm] contra Frecuencia [KHz]. ....	28
Figura 7. Esquema de ondas de ultrasonido en el fluido, superpuesto con ondas de choque generadas por la distribución de burbujas.....	30
La Figura 8. Colisión de partículas en incidencia normal y para ángulo de distinto de 90° . ....	32
Figura 9. Proceso del daño de una burbuja sobre la capa de pasivación de un metal. .....	33
Figura 10. Comportamiento de la erosión en el tiempo del SUS304. ....	34
Figura 11. Geometría del indentador Vickers y Indentación en la superficie. ....	35
Figura 12. Superficies de acero SUS304, a) 45 minutos de exposición, b) 3 horas de exposición, en microscopía (S.E.M).....	37
Figura 13. Resultado de la medición de una huella de microdureza Vickers del Aluminio en equipo de microdureza INNOVATEST423D. ....	39
Figura 14. Esquema de posicionamiento del papel aluminio en cubeta de ultrasonido .....	41
Figura 15. Patrones de distribución de erosión obtenida en papel Aluminio a 10 minutos de exposición .....	42
Figura 16. Montaje experimental de las muestras en el limpiador de ultrasonido..	44
Figura 17. Posición de focalización z en hundimiento en papel aluminio. ....	47

Figura 18. Visualización tridimensional por (C-DIC) de hundimiento en papel aluminio. ....	48
Figura 19. Imágenes de contraste de fase a) 50x en la parte superior b) 100x en la parte inferior del acero inoxidable, antes en la columna izquierda y después a la derecha.....	49
Figura 20. Imágenes de contraste de fase a) 50x en la parte superior b) 100x en la parte inferior del acero 1020, antes en la columna la izquierda y después a la derecha.....	51
Figura 21. Imágenes (S.E.M) de; a) electrones secundarios, b) retrodispersados de la indentación Vickers en acero 1020 a 5000x columna izquierda y 10000x columna derecha.....	52
Figura 22. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios y retrodispersados en zona aladaña al borde del Vickers en acero 1020 a 40000x. ....	53
Figura 23. Imágenes de contraste de fase en aluminio a) 50x , b)100x del Aluminio, antes en la columna izquierda y después a la derecha .....	54
Figura 24. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios en zona Vickers en acero Aluminio a) antes de la exposición b) después de la exposición. ....	55
Figura 25. Imágenes de contraste de fase a 50x del Bronce a) antes, b) después de la exposición. ....	56
Figura 26. Imagen (S.E.M) de electrones secundarios de distribución de erosión en Bronce a) 500x, b) 40000x, tomadas después de la exposición a ultrasonidos.....	57
Figura 27. Imágenes de contraste de fase a) 50x, b) 100x del Aluminio-Cobre, antes en la columna izquierda y después a la derecha. ....	58
Figura 28. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios de la indentacion Vickers en aleación de Al-Cu, a) 5000x,10000x b) 20000x, 40000x. ....	59
Figura 29. Distribuciones de erosión en otro sector de la muestra de Aluminio-Cobre a 20x por técnica de contraste de fase. ....	61
Figura 30. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios de zonas de picado de aleación de Al-Cu, a) 500x izquierda, 1000x derecha, b) 5000x izquierda, 10000x derecha.....	62

Figura 32. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios de indentación Vickers de fundición gris antes y después a aumentos de a) 5000x, b) 40000x. ....	65
Figura 33. Distribución de erosión en otro sector de la muestra de Fundición gris después de la exposición 100x a la izquierda B) 2500x (S.E.M) a la derecha.....	66
Figura 34. Imágenes de contraste de fase a) 50x en la parte superior b) 100x en la parte inferior del Titanio, antes en la columna izquierda y después a la derecha. .	67
Figura 35. Imágenes de contraste de fase a) 50x en la parte superior b) 100x en la parte inferior del Magnesio, antes en la columna izquierda y después a la derecha. ....	68
Figura 36. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios de indentaciones Vickers en fundición gris después de la exposición, tomado a aumento de 500x. ....	69
Figura 37. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios de indentacion Vickers en Magnesio, antes y después de la exposición a ultrasonidos a 5000x. ....	70
Figura 38. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios de grietas en indentación Vickers de fundición gris a aumentos de 20000x, 80000x. ....	70
Figura 39. Imágenes de contraste de fase a) 50x, b) 100x del Estaño, antes en la columna izquierda y después a la derecha. ....	72

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Ecuación Dinámica de Rayleigh-Pleseeet.....	80
Anexo B. Analisis de Composición Elemental de cada Muestra .....	85

## RESUMEN

**TITULO:** CARACTERIZACIÓN DE EROSION POR CAVITACIÓN ULTRASÓNICA Y SU CORRELACIÓN CON MICRODUREZA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS\*

**AUTOR:** ERWING RUBEN MARCON CABALLERO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** cavitación, erosión, microscopia óptica, aleaciones.

### **DESCRIPCIÓN:**

Cavitación ultrasónica es el fenómeno asociado a la creación, crecimiento e implosión de burbujas generadas en un líquido por una o varias fuentes de osciladores piezoeléctricos. El colapso de las burbujas trae como consecuencia la interacción entre chorros líquidos y el campo acústico sobre la capa de pasivación de la superficie, así que, la energía cinética de dichos efectos puede causar transformaciones en las superficies en forma de porosidades, hundimiento o agrietamiento dependiendo de los modos de deformación del material como también de sus propiedades mecánicas. En este trabajo se evaluó por técnicas de microscopia (C-DIC) y (S.E.M) el comportamiento de superficies de diferentes aleaciones y metales con acabado espejo ante cavitación ultrasónica en el equipo Branson 2510 en agua desionizada a temperatura de 25 °C y 40 minutos de exposición, también se encontraron las condiciones ideales de posicionamiento z de las muestras para garantizar la interacción de las burbujas con la superficie de cada estructura. Los resultados obtenidos indican cambios a nivel morfológico en la superficie de algunos materiales como el aluminio-cobre, magnesio, fundición gris, bronce y acero 1020, estos fueron comparados con la microdureza para establecer una correlación con el daño por cavitación. Adicionalmente, las estructuras como titanio y acero inoxidable no manifestaron cambios superficiales por los efectos de cavitación.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Arturo Plata, PhD: Ciencias para el Ingeniero

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS OF SURFACE CHANGES CAUSED BY ULTRASONIC CAVITATION AND CORRELATION WITH MICROHARDNESS IN METALLIC STRUCTURES\*

**AUTHOR:** ERWING RUBEN MARCON CABALLERO\*\*

**KEYWORDS:** cavitation, erosion, optical microscopy, alloys.

### **DESCRIPTION:**

Ultrasonic cavitation is the phenomenon associated with the creation, growth and implosion of bubbles generated in a liquid by one or several sources of piezoelectric oscillators. The collapse of the bubbles results in the interaction between liquid jets and the acoustic field on the passivation layer of the surface, so the kinetic energy of these effects can cause surface transformations in the form of porosities, subsidence or cracking depending of the ways of deformation of the material as well as its mechanical properties. In this work, the behavior of surfaces of different alloys and metals with mirror finish before ultrasonic cavitation in the Branson 2510 equipment was evaluated in de-ionized water at a temperature of 25 °C and 40 minutes of time, using microscopy techniques (C-DIC) and (SEM). In addition, the ideal conditions of z positioning of the samples were also found to guarantee the interaction of the bubbles with the surface of each structure. The results obtained indicate morphological changes in the surface of some materials such as aluminum-copper, magnesium, gray cast iron, bronze and steel 1020, these were compared with the microhardness to establish a correlation with cavitation damage. Additionally, structures such as titanium and stainless steel showed no surface changes due to the effects of cavitation.

---

\* Degree Work

\*\* Science Faculty. School of Physics. Director: Arturo Plata, PhD: Sciences for the Engineer

## INTRODUCCIÓN

Las investigaciones de cavitación en el campo de las ciencias e ingeniería es un tópico que barca muchos estudios como: litotricia<sup>1</sup>, viscosidad de crudos<sup>2</sup>, sonoporación<sup>3</sup>, sonoluminiscencia<sup>4</sup>.

Este estudio inicia un proyecto de investigación entre microbiología y física, la principal motivación nace ante la necesidad de sintetizar un biopolímero biodegradable del interior de la bacteria *Azotobacter S*, la metodología a llevar a cabo consiste en estresar a la bacteria para que genere el biopolímero y luego extraerlo al romper la membrana de fosfolípidos por medio de cavitación ultrasónica, este método tiene algunos inconvenientes experimentales, ya que, los equipos utilizados para romper de manera local la membrana de las bacterias requieren frecuencias de [MHz], estos equipos tienen costos elevados. El estudiar cómo se distribuyen las burbujas en el campo de ultrasonido y la interacción de las burbujas con las fronteras de un material es importante para llevar a cabo este proyecto aplicación.

Actualmente en el mercado se encuentran equipos de ultrasonido que llegan a hasta los [KHz] a costos asequibles, por lo tanto, se optó primero por entender y estudiar el proceso de distribución de burbujas y la interacción con superficies no biológicas, en este caso metales y aleaciones, con el fin de comparar y entender como la interacción de esta burbujas afectan las fronteras de un material.

---

<sup>1</sup> FUERTES, Manuel, *et al.* Estado actual de la litotricia extracorpórea mediante ondas de choque. Servicio de Urología. Hospital Clínico Universitario San Carlos. Universidad Complutense de Madrid. Unidad de Litotricia. Hospital Ruber Internacional de Madrid.

<sup>2</sup> DÍAZ ÁLVAREZ, Juan Carlos, *et al.* Estudio experimental sobre la eficiencia de un tratamiento de ultrasonido en un sistema de flujo continuo para la reducción de viscosidad de crudo pesado. Grupo de Investigación Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos – GMPH. Escuela de Ingeniería Química. Ecopetrol S. A – Instituto Colombiano del Petróleo, A.A. 4185.Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2013. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rion/v26n2/v26n2a06.pdf>

<sup>3</sup>PAULINE, Labelle. Sonoporation de cellules adhérentes par cavitation inertielle régulée. Acoustics. Université Claude Bernard - Lyon I. French, 2014. <NNT: 2014LYO10273>.

<sup>4</sup>URTEAGA, Raúl. Concentración de energía en sonoluminiscencia. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica. Instituto Balseiro, 2009. Disponible en : <http://campi.cab.cnea.gov.ar/fulltext/ft20488.pdf>

Los equipos de ultrasonido del rango de los [KHz] son dispositivos que se emplean generalmente en limpieza de estructuras metálicas. La explicación a este fenómeno se debe al colapso progresivo de burbujas que interactúan mediante chorros y ondas de choque con las fronteras del material. El efecto en conjunto por la superposición de ondas de choque y el campo ultrasónico, además de la presión mecánica de chorros podrían ocasionar daños en la capa superficial, generándose corrosión, deformación y en consecuencia transformaciones de la superficie<sup>5 6</sup>.

Con relación a lo anterior, las Industrias y compañías de ultrasonido, revelan poca información al usuario con respecto al tipo de estructuras que se pueden tratar sin llegar a perjudicar el material en el proceso de limpieza por cavitación ultrasónica. Por ejemplo: una cubeta de ultrasonidos comercial se utiliza para limpiar joyería, elementos quirúrgicos<sup>7</sup>, cuchillas de afeitarse, piezas metálicas contaminadas, láminas para experimentos, etc. De esta manera, es importante examinar la respuesta de algunas estructuras metálicas ante la cavitación por ultrasonidos, con el fin de determinar si el proceso de limpieza se convierte en algo nocivo para la muestra de interés, bajo las condiciones experimentales propuestas.

En este estudio se compara la respuesta de los daños generados en las superficies con la microdureza Vickers para establecer si existe correlación entre estas dos variables.

Los capítulos están organizados de la siguiente manera. En el capítulo 1, se describen los detalles de cómo se forman las burbujas, su distribución en el campo acústico y la manera en que estas interactúan con superficies. En el capítulo 2, se describe el procedimiento del acabado espejo de las muestras para ultrasonido y la

---

<sup>5</sup> ROMO ARANGO, Sebastian Andrés. Evaluación de la resistencia a la erosión por cavitación de superficies texturizadas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2013. P 6-8.

<sup>6</sup> BOMBIM MONSALVE, Rafael. Estudio de recubrimientos delgados por la técnica cavitación-erosión. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas. Abril. 2008. P 3-5.

<sup>7</sup> LU, Hai-long; *et al.* Research and application of ultrasonic wave cleaning technique in cleaning surgical tool. Hebei Journal of industrial science and technology, China. Mayo. 2009

medición de la microdureza para comparar con los efectos del daño sobre la superficie de cada material. También, se encuentran las posiciones óptimas de mayor interacción de las burbujas con el material en el equipo de ultrasonido. En el capítulo 3, se describe los efectos de la cavitación ultrasónica mediante técnicas de microscopía (C-DIC) y (S.E.M) de 9 estructuras metálicas con acabado espejo.

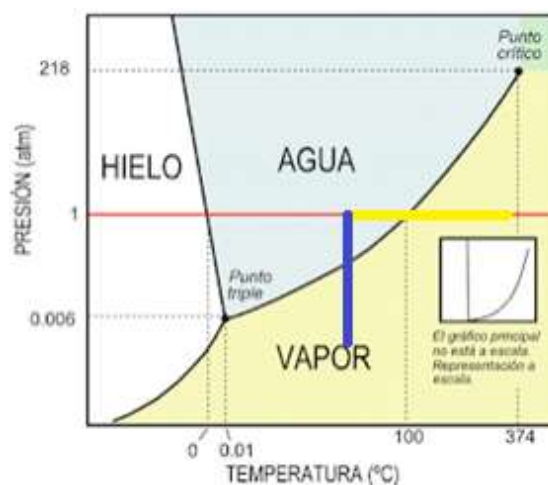
El estudio teórico y experimental de la cavitación es necesario dependiendo de la aplicación que se requiera, es por ello que hoy en día las interacciones de las burbujas con distintos materiales siguen siendo hoy motivo de investigación y controversia.

# 1. CAVITACIÓN ULTRASÓNICA

## 1.1 DEFINICIÓN Y FORMACIÓN

El término cavitación ultrasónica se atribuye al fenómeno de nacimiento, formación y crecimiento de burbujas, las cuales interactúan con un campo ultrasónico. Se puede entender desde la termodinámica con un diagrama de fases. Por ejemplo, en el agua se conoce que, si el líquido sobrepasa el punto ebullición, se forman burbujas ya que las moléculas se disocian debido al aumento gradual de temperatura. Lo anterior se puede observar a lo largo de la línea amarilla en la figura presentada figura N°1. No obstante, si la presión disminuye de tal manera que es menor a la presión de vapor los enlaces en las moléculas se rompen, transformándose en gas. Esto se ilustra en la línea azul de la misma figura<sup>8</sup>.

Figura 1. Diagrama de fases del agua en el proceso de ebullición y cavitación



Fuente: MARTINEZ GARCIA, Diana. Ciencia en la cocina. [en línea]. El agua puede hervir o congelarse instantáneamente. [18 de mayo del 2016]. Disponible en: <http://cienciadetrasedelacocina.blogspot.com.co/>

<sup>8</sup> DOPAZO, César. ¿Cavitar o no cavitar? - La inevitable ubicuidad de las burbujas. Ed. Real Academia de Ingeniería. 2008. P 10-11

Por otro lado, si se quiere generar cavitación en un líquido mediante una onda acústica, el mecanismo de excitación debe ser lo suficiente rápido para vencer la energía de estabilización del líquido. En un equipo de ultrasonidos para limpieza, el mecanismo de excitación es una onda de presión de frecuencias mayor a 20 KHz, esta perturbación es suficientemente rápida para crear fluctuaciones de presión y generar cavitación. Si el campo acústico interactúa en todos los puntos del líquido origina regiones de rarefacción y compresión. Las regiones de rarefacción son puntos de baja presión que dan una condición favorable para la formación de burbujas.

En el interior del fluido existen imperfecciones a nivel molecular, las cuales actúan como núcleos de cavitación. Estos pueden ser gas atrapado en grietas de la superficie donde está contenido el fluido, presencia de motas que atrapan pequeñas cantidades de gas o impurezas disueltas que debilitan la interacción entre moléculas del líquido<sup>9</sup>. De acuerdo con lo anterior, en un líquido como el agua no solamente se pueden crear burbujas de gas mediante de fluctuaciones de presión. Por ejemplo, si en agua se establece un campo ultrasónico el cual contiene una mezcla de gases disueltos, es más probable formar burbujas en comparación a un líquido desgasificado.

Cuando las ondas de presión se propagan en un medio como el agua e interactúan con los núcleos, se produce una mayor separación de las moléculas, el campo acústico ejerce presión sobre todos los puntos del fluido a medida que se superponen las ondas de presión incidentes y reflejadas<sup>10</sup>. Por lo anterior, se crea como resultado un patrón de onda de presión que facilita el crecimiento de los núcleos. Este proceso conlleva a un desgarre molecular del fluido, de inmediato las

---

<sup>9</sup>JEAN-PIERRE, Franc; JEAN MARIE, Michael. Fundamental of Cavitation. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS. 2005. Springer Science + Business Media, Inc. P.16,25. ISBN: 1-4020-2233-6

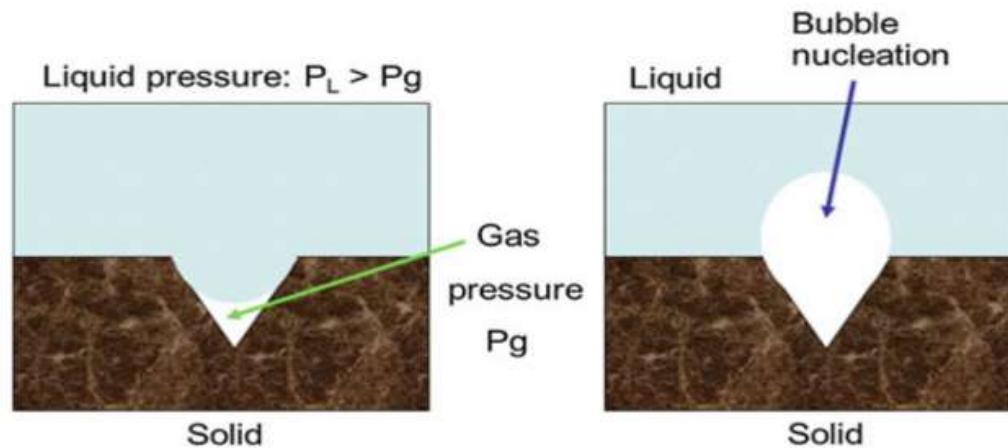
<sup>10</sup> NIÑO RAMIREZ, Juan Pablo; MENDEZ SUAREZ Jorge Andrés y SALAS LOZANO, Lorena del Pilar. Diseño y construcción de un prototipo de cavitación acústica, con fines de limpieza industrial. Tesis de ingeniería de sonido. Bogotá D.C: Universidad de San Buenaventura. Facultad de ingeniería, 2010, P 50

moléculas adoptan la configuración de mínima energía potencial formándose así una burbuja.

## 1.2 CRECIMIENTO DE BURBUJAS

Retomando la idea anterior, el tamaño de las burbujas también puede variar dependiendo de las condiciones de nucleación, existe un valor umbral de presión llamado presión de Blake, donde los núcleos de cavitación salen de su condición de cautividad y se transforman en burbujas<sup>11</sup>. La figura N°2 muestra la formación de un núcleo en una grieta.

Figura 2. Núcleo de cavitación en una grieta



Fuente: YASUI K. Dynamics of acoustic bubbles. Sonochemistry and the acoustic bubble. Elsevier. Ámsterdam. 2015. P 65.

Para un dispositivo de limpieza el campo de ultrasonidos acondiciona la distribución de burbujas a lo largo del tanque e interactúa en la interfaz líquido-gas de cada una.

<sup>11</sup> DOPAZO. Op. cit , p. 4-5

La condición de crecimiento de cada burbuja se debe a las presiones que interactúan en la frontera y al proceso de difusión del gas a través de la burbuja<sup>12</sup>.

Una manera de entender el modo en el que crece la burbuja es pensar que, si la tasa de concentración de gas disuelto en el líquido es mayor a la tasa de concentración de la mezcla de gases, el flujo neto de gas es hacia el interior de la burbuja, es decir aumenta la presión en el interior, si esta presión interna está en fase y en la misma dirección de la presión externa del transductor la burbuja se expande. Si la tasa de concentración de gases en el interior es mayor a la tasa de concentración de gas disuelto en el líquido, en ese caso el flujo neto de gas es hacia afuera y la presión en interior disminuye, luego si la presión de la onda proveniente del transductor está en fase y en dirección hacia el centro de la burbuja, la burbuja se comprime.

Cabe aclarar que una burbuja en su etapa de crecimiento experimenta efectos de: flotación, translación y oscilación. El comportamiento oscilatorio tiene especial relevancia pues con ello se puede estimar el tiempo de implosión de la burbuja, al cual se le denomina tiempo de colapso de Rayleigh<sup>13</sup>. Los factores que más tienen influencia en el movimiento oscilatorio de la burbuja: la presión alterna del transductor, tensión superficial y viscosidad, ver (Anexo A).

A continuación, se presentan las características principales del proceso de cavitación: cavitación inercial y no inercial, Posteriormente en la sección 1.3 se menciona como el campo acústico genera una distribución de burbujas, además, el cómo se distribuyen las burbujas a lo largo de un limpiador de ultrasonidos.

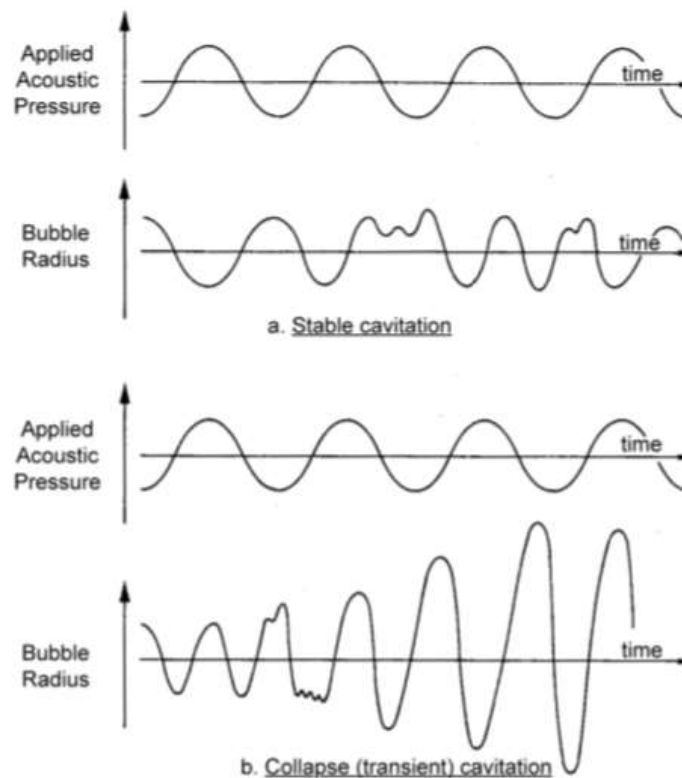
---

<sup>12</sup> C.R. Hill, J. C. Bamber & G.R. ter Haar. Physical Principles of Medical Ultrasonics. Ultrasonic Biophysics. Second Edition. ISBN 0 471 97002 6. England. 2004. P 364

<sup>13</sup> RAYLEIGH, Lord (1917) 'VIII. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity', Philosophical Magazine Series 6,34:200 94-98. DOI:10.1080/14786440808635681.

**1.2.1 Cavitación inercial y no inercial.** El crecimiento de las burbujas en un campo ultrasónico puede tener dos comportamientos distintos: si la burbuja sobrevive durante varios ciclos de oscilación y mantiene su tamaño de forma regular, se denomina cavitación no inercial. Sin embargo, si la burbuja oscila y crece de forma inestable presentando cambios de forma y finalmente implosión, se considera que la cavitación es inercial<sup>14</sup>. La figura N° 3 muestra las diferencias de la evolución temporal del radio, en la cavitación inercial y no inercial, para una misma presión alterna.

Figura 3. Comportamiento temporal del radio de una burbuja en un campo acústico.



Fuente: C. R. Hill, J. C. Bamber and G. R. ter Haar. Physical Principles of Medical Ultrasonics. Ultrasonic Biophysics. Second Edition. ISBN 0 471 97002 6. England. 2004. P 365.

<sup>14</sup> C.R. Hill. Op. cit , p. 364.

### 1.3 CAMPO DE ULTRASONIDO Y DISTRIBUCIÓN DE BURBUJAS

En un limpiador ultrasónico tipo baño, se origina una onda estacionaria, producto de la superposición de ondas incidentes emitidas por el transductor y las ondas reflejadas en la interfaz aire-agua del equipo.<sup>15</sup> La distancia entre dos máximos de onda estacionaria de presión es igual media longitud de onda, como lo describe la ecuación<sup>16</sup> (1):

$$z_2 - z_1 = \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

La onda acondiciona a las burbujas a migrar a los nodos y antinodos del campo acústico, así que, las tienen un radio menor que el radio de resonancia se mueve en dirección del gradiente de presión y se acumulan en los antinodos de presión. Sin embargo, las burbujas que tiene un radio mayor al radio de resonancia se mueven en dirección contraria al gradiente de presión y se acumulan en los nodos del campo<sup>17</sup>.

La Figura N°4 muestra el esquema idealizado de una distribución de burbujas en un limpiador de ultrasonidos. Según Yasui (2018), se forma una distribución periódica de burbujas con distintos tamaños. En los puntos donde la onda estacionaria tiene un mínimo de presión se forman las burbujas y en los máximos da lugar a la implosión de estas<sup>18</sup>.

---

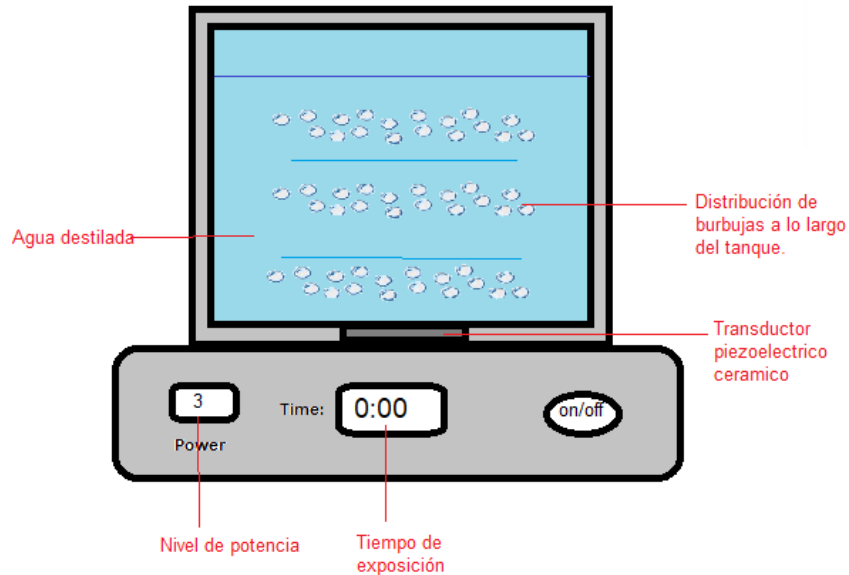
<sup>15</sup> YASUI, kyuichi. *Acoustic Cavitation and Bubble Dynamics*. Springer, Cham. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. ISBN 978-3-319-68237-2. Japan. 2018. P 7. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68237-2>

<sup>16</sup> A.P.French. *Vibraciones y Ondas*. REVERTE, 1993. P.203.

<sup>17</sup> DOPAZO. Op. cit , p. 9

<sup>18</sup> YASUI. Op. cit , p.13

Figura 4. Distribución espacial de burbujas en limpiador de ultrasonidos.



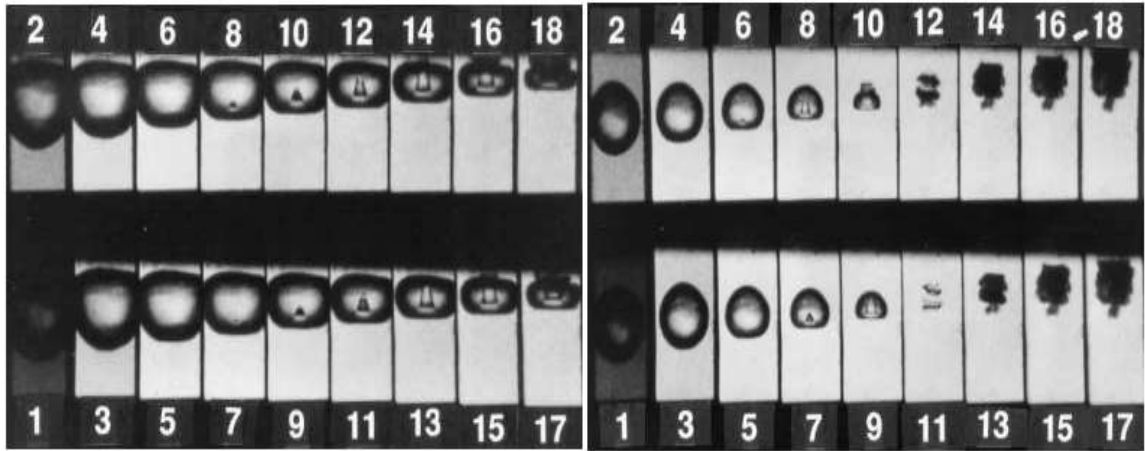
## 1.4 MECANISMOS DE INTERACCION POR CAVITACION ULTRASONICA.

**1.4.1 Chorros líquidos.** Durante la fase del colapso se tienen dos etapas, la primera consiste en la formación de un microchorro entrante de líquido que se dirige hacia la superficie del sólido, en la segunda etapa el rebote de gas comprimido origina un chorro saliente de la superficie. Según Brennet (1995), este chorro entrante se origina debido a que la frontera del sólido genera una asimetría del movimiento del líquido durante el colapso de la burbuja, por tanto, la frontera de la cavidad que está alejada del sólido se acelera mucho más que la cercana a la pared <sup>19</sup>. Cuando una burbuja colapsa sobre una frontera tiene un factor característico  $\gamma$ , el cual está definido como la relación entre el radio máximo de la burbuja y la distancia medida desde la frontera hasta el centro, la Figura N°5 muestra una burbuja en contacto con la superficie con  $\gamma=1$  y otra lejana con  $\gamma$  distinto de 1<sup>20</sup>.

<sup>19</sup> EARLS BRENNET, Christopher. Cavitation and bubble dynamics: © Oxford University Press , 1995. P 84. ISBN 0-19-509409-3. Disponible en: <https://authors.library.caltech.edu/25017/5/BUBBOOK.pdf>

<sup>20</sup> WAN, Mingxi; FENG, Yi & HAAR, Gail ter. Cavitation in Biomedicine Principles and Techniques: Springer, 2015. p.255. ISBN 978-94-017-7254-9. DOI 10.1007/978-94-017-7255-6

Figura 5. Desarrollo de chorro entrante para cavidad cercana y lejana.



Fuente: EARLS BRENNET, Christopher. Cavitation and bubble dynamics: © Oxford University Press, 1995. P86. ISBN0-19-509409-3. Disponible en: <https://authors.library.caltech.edu/25017/5/BUBBOOK.pdf>.

Investigaciones de modelado realizadas por Chachine, (2004)<sup>21</sup>, indican una relación cuadrática entre la presión que genera un chorro líquido  $P_{chorro}$  de la burbuja y la presión de colapso,  $P_{colapso}$ .

$$P_{chorro} \approx 2.6c\sqrt{\rho P_{colapso}} \quad (2)$$

Donde  $C$  es el valor de la velocidad del sonido, en agua desionizada es  $1484 \left[ \frac{m}{s} \right]$ ,  $\rho$  es la densidad del agua  $1000 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$ . Esta relación del golpe del chorro entrante y la presión de colapso fue estudiada por Cook (1928), en donde se llega a una conclusión similar al utilizar la conservación de la energía mecánica por unidad de área durante la implosión<sup>22</sup>.

<sup>21</sup> KIM, Ki-Han. Op. cit., p. 137

<sup>22</sup> COOK, Stanley S. Erosion by Water-Hammer. Proc. R. Soc. Lond. A (1928) 119, 441-488. DOI: 10.1098/rspa.1928.0107

La presión de colapso se define como la diferencia de presión máxima exterior sobre la burbuja y la presión de vapor. Según Yasui (2018), la presión del exterior sobre la burbuja depende de la frecuencia del equipo del ultrasonido, por ejemplo, en la tabla 1 se pueden ver los valores de frecuencia y presión externa del transductor <sup>23</sup>.

Tabla 1. Relación entre frecuencia del dispositivo de ultrasonido y presión externa.

Frecuencia de transductor [kHz]	Presión externa [Atm]
20	1.2
140	1.6
1000	3.0
5000	5.8

De modo que, al realizar un ajuste polinomial con los resultados anteriores, se pueden interpolar los datos, así que, como se conoce la frecuencia del ultrasonidos de interés correspondiente a  $F = 40 \text{ KHz}$ , se puede determinar el valor de presión externa sobre la burbuja<sup>24</sup>.

Al realizar el cálculo para una frecuencia de  $F = 40 \text{ KHz}$ , le corresponde una presión externa de  $P = 1.295 \text{ atm} = 131215.88 \text{ Pa}$ , el ajuste está dado por:

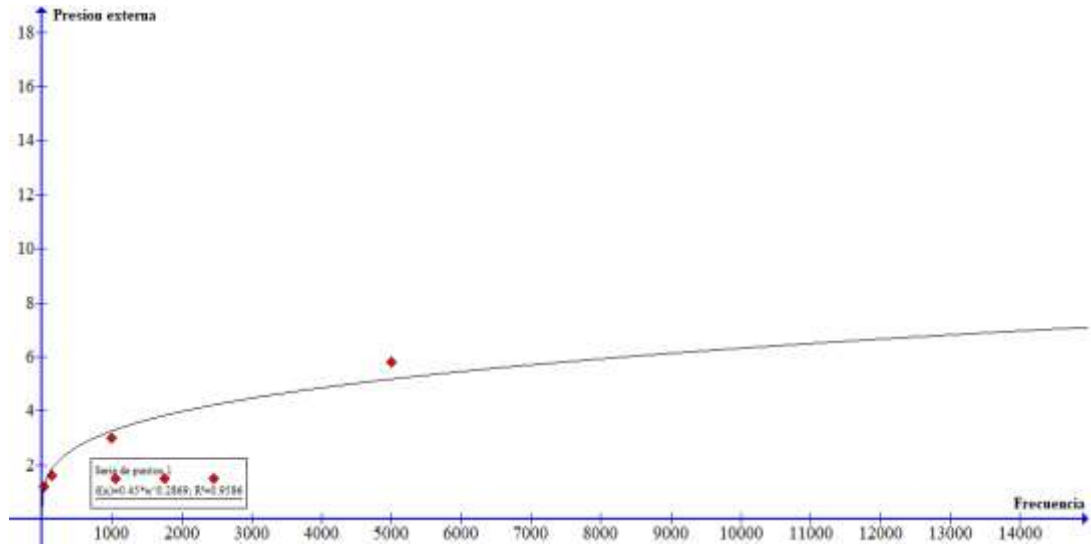
$$P = 0.45F^{0.287} \quad (3)$$

El ajuste polinomial se realizó en Graph, con un factor de  $R^2 = 0.9586$ . Ahora como el valor de presión externa es conocido, se puede estimar la presión de colapso.

<sup>23</sup> YASUI. Op. cit , p.3

(\*\*) El cálculo de la presión del microchorro entrante fue realizado por el autor.

Figura 6. Presión externa del transductor [Atm] contra Frecuencia [KHz].



Los valores de la expresión (2) se encuentran en la literatura; el valor de la presión de vapor para el agua a 25 °c es de  $p_v = 2333.14 [p_a]$ , el valor de la presión externa es  $P = 131215.88 [P_a]$ , el valor de la velocidad del sonido en agua desionizada es  $C = 1484 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , la densidad del agua  $1000 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$ . De esta manera al reemplazar los parámetros anteriores en la ecuación (3), se obtiene la presión aproximada del jet entrante para el transductor del dispositivo de limpieza de 40 KHz.

$$P_{microchorro} \approx 2.6 \left( 1484 \frac{m}{s} \right) \sqrt{\left( 1000 \frac{Kg}{m^3} \right) (128882.74 Pa)} = 46.49 MPa \quad (4)$$

En dispositivos de ultrasonidos, el colapso progresivo de burbujas en materiales produce una acumulación de energía cinética en la superficie, sin embargo, este valor calculado en (4), sirve como punto de partida para estudiar el efecto sobre distintas estructuras.

**1.4.2 ondas de choque.** El proceso de evolución de la burbuja conlleva al desarrollo de un microchorro entrante sobre la frontera, justo en el momento de interacción el

gas se comprime a tal punto que las moléculas de la interfaz se comportan colectivamente como un sólido, en tal caso el agua llega a su estado de punto triple. Los experimentos indican que después de la fase de colapso se origina un pequeño rebote en la burbuja, ya que la energía potencial del gas se transforma de nuevo en energía cinética en la interfaz, la respuesta es la formación de un microchorro saliente de la superficie a alta presión<sup>25</sup>.

La formación del microchorro saliente de la frontera crea una fluctuación de presión del orden de [Mpa], esta genera una potente onda de choque, la cual tiene un comportamiento no lineal al comienzo de la emisión, la amplitud de estas ondas decaen más rápido que  $1/r$ .<sup>26</sup> De acuerdo a las investigaciones de Brujan (2005), las burbujas que están más alejadas de la pared tienen mayor compresión en comparación con las burbujas más cercanas a las paredes, esto implica que la energía de ondas de choque en las burbujas cercanas a las paredes sea más débil en comparación a las que se encuentran más lejos de la frontera.<sup>27</sup>

La explosión de las burbujas en fase, en el interior del líquido genera interferencia por ondas de choque, de tal manera que se superponen con el campo de ultrasonidos, afectando las condiciones iniciales de las burbujas y por ende la formación de nuevas burbujas.

La Figura N °10 muestra el efecto mencionado, para un limpiador de ultrasonidos que tiene acoplados dos transductores tipo (BLT), en ella se puede notar el efecto de la interferencia de dos frentes de onda esféricos producidos por dos fuentes, además frentes de ondas esféricos mucho más pequeños en la parte central, las ondas de choque se producen porque la explosión de las burbujas generan

---

<sup>25</sup> WAN, Mingxi. Op. cit., p. 223

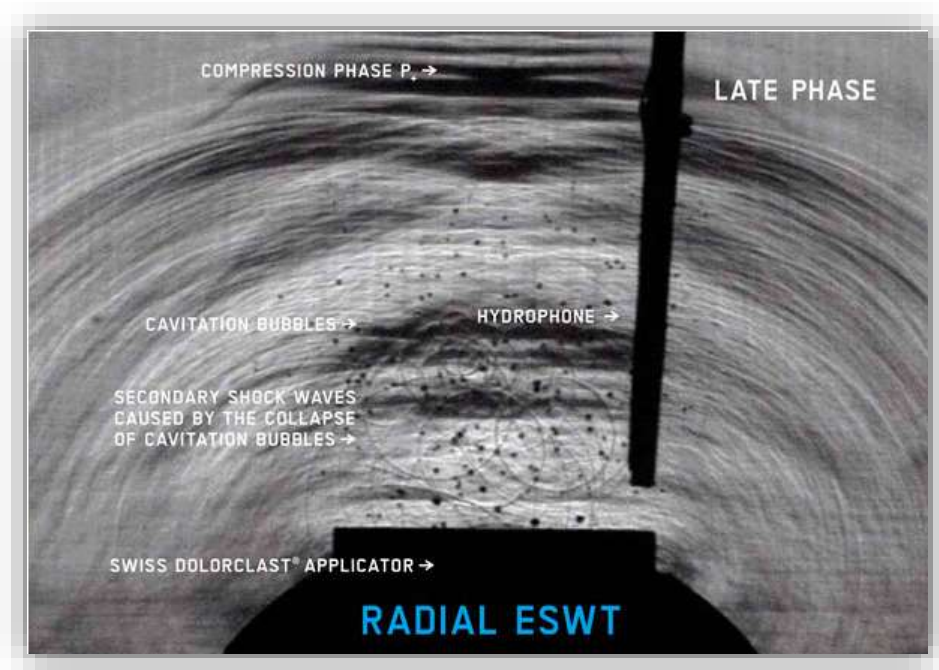
<sup>26</sup> *Ibíd.*, p.234

<sup>27</sup> BRUJAN, E.A *et al* .Jet formation and shock wave emission during collapse of ultrasound-induced cavitation bubbles and their role in the therapeutic applications of high-intensity focused ultrasound. [Base de datos en línea]. 28 September 2005. IOP PUBLISHING. P 4806. (Recuperado en 4 de febrero 2017). DOI:10.1088/0031-9155/50/20/004

microchorros salientes con presiones casi del mismo orden del equipo de ultrasonidos, estos microchorros tienen suficiente potencia para crear deformaciones en el fluido y generar la onda. Se puede observar la superposición de ondas de choque con las generadas por el transductor.

En la imagen se pueden ver franjas oscuras de compresión y blancas en franjas de rarefacción, con la ayuda de un hidrófono se puede medir y estimar la presión en el tiempo aproximada de las ondas de choque. Sin embargo, estos equipos usualmente son costosos y tienen tiempos de obsolescencia muy cortos en vista de que el mismo proceso tiende a dañarlos muy rápido.

Figura 7. Esquema de ondas de ultrasonido en el fluido, superpuesto con ondas de choque generadas por la distribución de burbujas.



Fuente: SCHWARZES, Werner. Notas de Cavitación por el Dr Werner Schwarzes. [en línea]. [08 de febrero del 2016]. Disponible en: <https://www.ondaschoque.net/blog/notas-sobre-la-cavitacion-por-el-dr-werner-schwarze>

Como se había mencionado, la formación del chorro que se aleja de la frontera durante la explosión trae consigo la emisión de una potente onda de choque, la presión de esta onda de choque depende de la velocidad que desarrolla el microchorro durante la explosión, la relación está dada por:

$$P_{onda\ de\ choque} = A\rho V_{jet-salida} \left( 10^{\frac{V_{jet}-c}{B}} - 1 \right) \quad (3)$$

“En donde c es la velocidad del sonido, A y B son constantes de Rankine-Hugoniot, para presiones medidas a unos 4 milímetros del substrato indican que la presión es de 1MPa. Sin embargo, al acercarnos más, la presión crece exponencialmente obteniéndose valores de hasta 20 veces más, por lo que es posible entonces causar daño en superficies metálicas y dieléctricas”.<sup>28</sup>

De acuerdo con lo anterior para que la explosión genere daños por ondas de choque sobre un material, el material debe estar muy cerca de la burbuja. Algunas veces la energía de las ondas de choque producidas durante la explosión no es suficiente para deformar o causar daños en la superficie, sin embargo, debe tenerse en cuenta que el golpe del microchorro líquido entrante y la onda de choque son procesos reiterativos de implosión-explisión acumulados, por lo tanto, la energía en la superficie del material debe estar cambiando de forma progresiva.<sup>29</sup>

**1.4.3 Colisiones por desgaste.** El proceso de formación de nuevas burbujas en el sitio de la picadura es reiterado, el material empieza a fracturarse y por efectos de fatiga se empieza a desgastar dependiendo de la cantidad de tiempo al cual ha sido expuesto la región con las burbujas. Este desprendimiento inicial del material en el tiempo es lo que se conoce como periodo de iniciación-incubación.

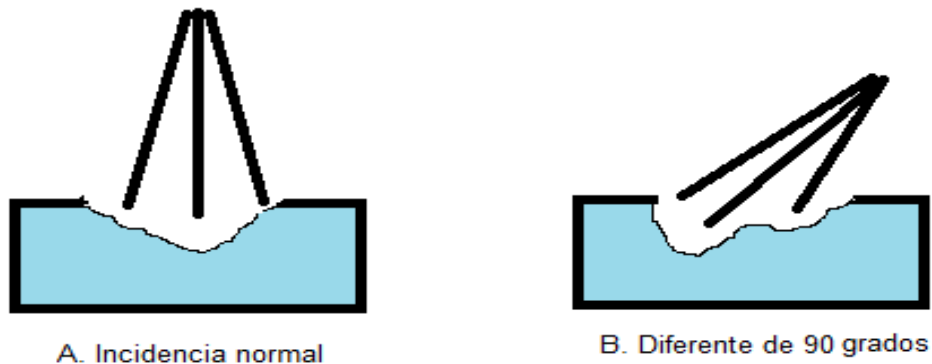
---

<sup>28</sup> ECUACIÓN. Relación entre la velocidad de chorro saliente y presión de la onda de choque generado por una burbuja. Pagina 18. S.F. Tesis. Anónimo. Consultado en agosto 12 de 2018. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22520/Capitulo1.pdf>

<sup>29</sup> CORREA HERNÁNDEZ, Carlos Eduardo. Relación entre resistencia a cavitación y propiedades Físico-químicas y mecánicas de recubrimientos poliméricos para aplicaciones en turbinas hidráulicas. Trabajo de maestría en ciencia de materiales, Universidad Nacional De Colombia. 2009.P 17.

Este se caracteriza porque las partículas que han sido desprendidas rodean la muestra e intervienen incrementando los núcleos de cavitación por impurezas, estas partículas pueden ser aceleradas por la presión de las ondas de choque e impactar en distintas direcciones las fronteras de material. La figura N°8 muestra el proceso del golpe de partículas en incidencia normal y para ángulo menor de 90 grados. Según Velez (2008) “los materiales dúctiles se deforman y se endurecen cuando se les golpea en forma perpendicular, pero a un ángulo crítico de aproximadamente 20° el material se elimina por una acción de corte”<sup>30</sup>. Este mecanismo de interacción secundario en la muestra se trata de un bombardeo de partículas metálicas progresivo que incrementa a medida que aumenta el tiempo de incubación, la aparición de las partículas en el agua sigue creciendo a medida que se da mayor desprendimiento, sin embargo, existe una etapa en la que tasa de desgaste en la muestra se desacelera, hasta llegar a un máximo de pérdida de masa, luego la tasa de desgaste de la estructura entra en un periodo de atenuación<sup>31</sup>.

La Figura 8. Colisión de partículas en incidencia normal y para ángulo de distinto de 90°.



**Fuente:** TOVAR OLIVA, Mayra Sareth. Estudio del fenómeno de erosión en materiales metálicos. México D.F. Tesis de maestría en ingeniería de manufactura. Instituto Politécnico Nacional. 2012.

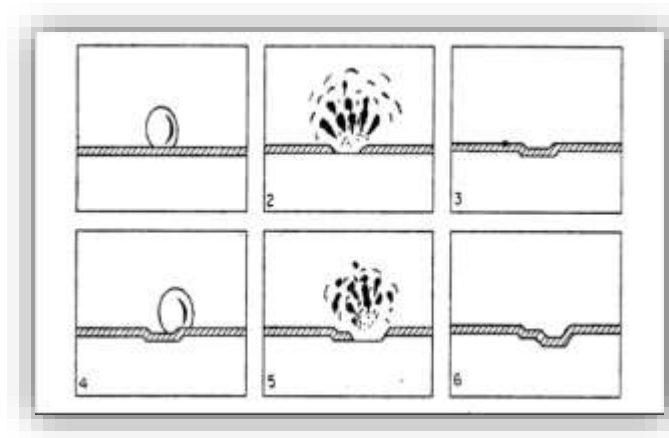
<sup>30</sup> VELEZ, L. M. Materiales industriales. Teoría y aplicaciones. ITM. (2008). Citado por: TOVAR OLIVA, Mayra Sareth. Estudio del fenómeno de erosión en materiales metálicos. México D.F. Tesis de maestría en ingeniería de manufactura. Instituto Politécnico Nacional. 2012. p. 25.

<sup>31</sup> Norma ASTM G 32-03. Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus. P 8.

## 1.5 EFECTOS DE CAVITACIÓN ULTRASÓNICA EN METALES

Cuando una burbuja está en contacto con la superficie de un metal, el proceso de implosión genera un chorro que incide sobre la capa de pasivación del metal, si la presión del chorro más la presión del campo acústico circundante exceden la tensión en la superficie se genera rompimiento en la capa. Posteriormente el metal queda expuesto ante el medio oxidativo y la interfase superficial se reconstruye, de tal forma que sobre esta se forma una hendidura que facilita la acumulación de gas y la nucleación de nuevas burbujas<sup>32</sup>. Este proceso se puede apreciar en diferentes etapas en la Figura N°9.

Figura 9. Proceso del daño de una burbuja sobre la capa de pasivación de un metal.



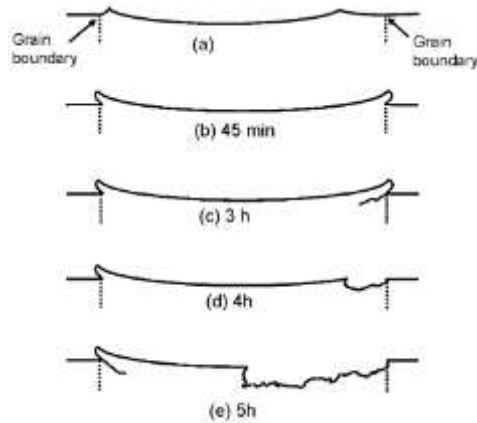
Fuente: Proceso de erosion- corrosión. Tomada de Blog web. Fuentes de Ahorro y Energía. (2011). Disponible en: <http://fuentes-de-ahorro-energa-itstlaxco.blogspot.com.co/2011/12/que-es-la-cavitacion.html>

Las investigaciones sobre la interacción de las burbujas en aceros SUS304, ST6 han llevado a plantear modelos de erosión en el tiempo basados en microscopía electrónica (S.E.M). Inicialmente el efecto de los microchorros líquidos interactúan en el SUS304 y producen una deformación plástica acumulando el material hacia

<sup>32</sup> CORREA HERNÁNDEZ, Carlos Eduardo. Op. cit., p. 7.

las fronteras de grano en los primeros 45 minutos, a las 3 horas de exposición la tensión en el límite aumenta y la presión del campo acústico de las burbujas y los microchorros generan una pequeña fisura, después esta grieta se propaga en el material dando efectos de remoción del mismo a las 4 horas, al final los efectos de fatiga terminan desgastando la superficie y se remueve en gran parte material de la superficie. En la figura N°10 se puede ver la secuencia de estados superficiales del SUS304 ante cavitación ultrasónica <sup>33</sup>.

Figura 10. Comportamiento de la erosión en el tiempo del SUS304.



Fuente: SHIJI Hattory; NORIHIRO, Mikamy. Cavitation erosion resistance of stellite allow weld overlays. Science Direct. ELSEVIER. University of Fukui. Japan. 2009. .P 4.

## 1.6 MICRODUREZA VICKERS

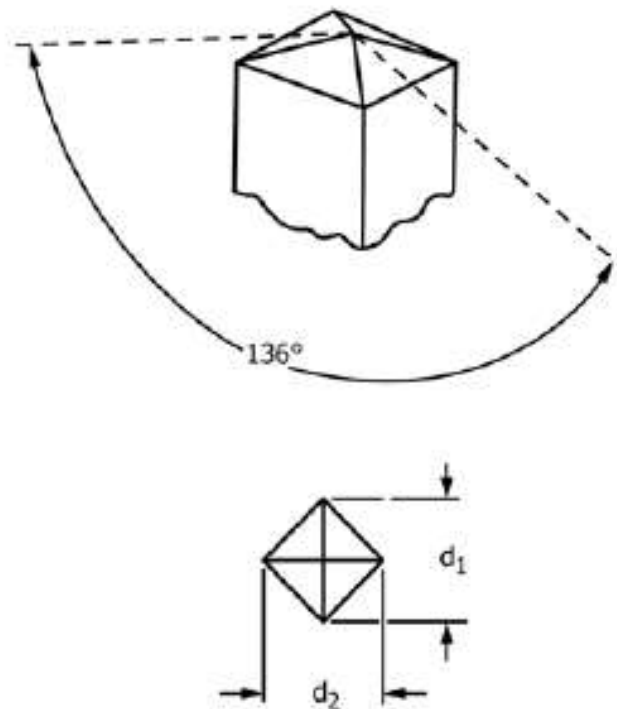
El ensayo de dureza mide la resistencia al rayado y es una medida cualitativa de la resistencia del material<sup>34</sup>. El ensayo de microdureza Vickers permite medir la microdureza de los materiales, en este caso se mide la microdureza de un material mediante la penetración de un indentador punta diamante, como aparece en la

<sup>33</sup> Fuente: SHIJI Hattory; NORIHIRO, Mikamy. Cavitation erosion resistance of stellite allow weld overlays. Science Direct. ELSEVIER. University of Fukui. Japan. 2009. .P 4.

<sup>34</sup> ASKELAND Donald R & PHULE Pradeep P. Ciencia e ingeniería de los materiales. México: International Thomson Editores S.A, 2004. P. 257

figura N°13. Según la carga del durómetro y del tiempo en el que se realizó la indentación se puede establecer la dureza del material<sup>35</sup>.

Figura 11. Geometría del indentador Vickers y Indentación en la superficie.



Fuente: Norma ASTM E384. (2012). P.2. Recuperado de: [http://xn--e1aatjjidcc.xn--p1ai/upload/gost/ASTM\\_E384-11e1.pdf](http://xn--e1aatjjidcc.xn--p1ai/upload/gost/ASTM_E384-11e1.pdf)

Para calcular la microdureza del material, basta con promediar las diagonales  $d$  [ $\mu m$ ] de la Indentación y conocer la carga sobre el Vickers  $P$  [ $gF$ ], así que se puede medir indirectamente mediante la siguiente relación<sup>36</sup>.

$$HV = 1.854 \frac{P}{d^2} \quad (4)$$

<sup>35</sup> Norma ASTM E384. (2012). P 2. Recuperado de: [http://xn--e1aatjjidcc.xn--p1ai/upload/gost/ASTM\\_E384-11e1.pdf](http://xn--e1aatjjidcc.xn--p1ai/upload/gost/ASTM_E384-11e1.pdf)

<sup>36</sup> *Ibíd.*, P.4

## 1.7 TÉCNICAS DE MICROSCOPIA

**1.7.1 Microscópio AXIO IMAGER.Z1M (CARL ZEISS).** Este microscopio tiene un sistema de iluminación Kohler, óptica al infinito libre de esfuerzos, corrección cromática, diseñado para microscopia de contraste de fase C-DIC. El DIC de luz reflejada (Contraste de interferencia diferencial en luz circularmente polarizada) sirve para producir imágenes de alto contraste, imágenes de especímenes de fase, es decir, aquellas muestras que sólo cambian la fase de la luz en contraste con muestras de amplitud<sup>37</sup>. En el microscopio se pueden hacer reconstrucciones tridimensionales, gracias a su sistema motorizado de posicionamiento vertical con capacidad de barrido del orden de 10 nm, además cuenta con un algoritmo de adquisición y procesamiento de imágenes para la reconstrucción de la morfología,

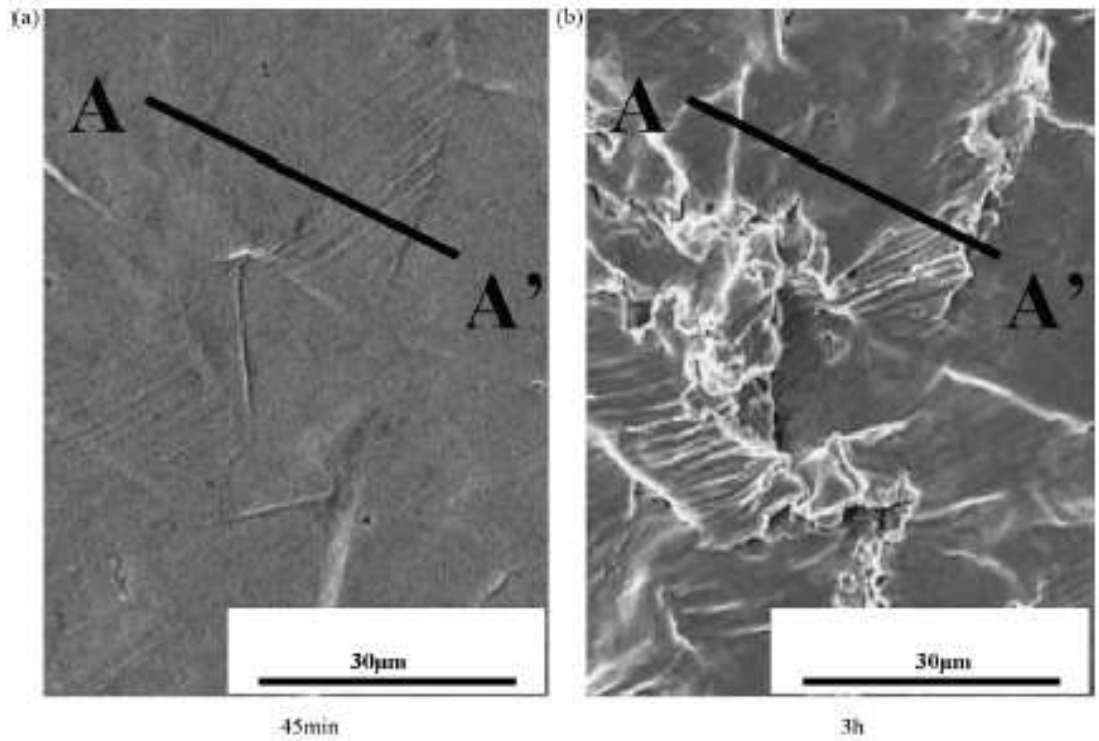
**1.7.2 Microscópio electrónico de barrido FEI Quanta FEG 650.** “Es un microscopio de presión variable, con capacidad de resolver características a una escala de ~ 5 nm en muestras de hasta 6 pulgadas de tamaño”<sup>38</sup>. Debido al alto poder de resolución del microscopio es óptimo para verificar los efectos de variación en la superficie de las muestras expuestas a cavitación ultrasónica, en el se pueden obtener imágenes de electrones secundarios y retrodispersados para observar la morfología de las muestras. Adicionalmente el equipo permite tomar análisis de composición elemental de las muestras. En la figura N°12 se visualiza en imágenes (S.E.M) de una muestra de acero SUS304 en él se notan los efectos de deformación y erosión por cavitación Ultrasónica a 45 y 3 horas de exposición.

---

<sup>37</sup> Operating Manual Axio Imager Upright Microscope. Carl Zeiss, Copyright / Trademarks, Axio Imager. Disponible en: [https://biochimie.umontreal.ca/wpcontent/uploads/sites/37/2016/02/zeiss\\_axio\\_imager\\_manual.pdf](https://biochimie.umontreal.ca/wpcontent/uploads/sites/37/2016/02/zeiss_axio_imager_manual.pdf)

<sup>38</sup> FEI Quanta FEG 650 Manual. P.1 Utah State University. Disponible en: [http://rgs.usu.edu/microscopy/wpcontent/uploads/sites/28/2015/08/SEM\\_user\\_manual.pdf](http://rgs.usu.edu/microscopy/wpcontent/uploads/sites/28/2015/08/SEM_user_manual.pdf)

Figura 12. Superficies de acero SUS304, a) 45 minutos de exposición, b) 3 horas de exposición, en microscopía (S.E.M).



Fuente: SHIJI Hattory; NORIHIRO, Mikamy. Cavitation erosion resistance of stellite allow weld overlays. Science Direct. ELSEVIER. University of Fukui. Japan. 2009. .P 2.

## 2. MONTAJE EXPERIMENTAL

Para poder estudiar los efectos de cavitación en diferentes estructuras de metales y aleaciones es necesario tener superficies con acabado espejo, de manera que se puedan diferenciar los estados de superficies antes y después de la exposición en el equipo de ultrasonidos.

### 2.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA MICRODUREZA

Se sometieron 9 muestras de aleaciones y metales puros a devastado en las instalaciones del laboratorio de metalmecánica asociado a la escuela de ingeniería metalúrgica (UIS), primero para quitar líneas gruesas y medianas se pasaron por lija 180, 200, 400, 600 y para líneas poco profundas se utilizaron lijas de granos más pequeños de 1200 y 1500. Este proceso de lijado manual se realizó con precaución para evitar deformaciones indeseadas, se mantuvo presión constante y uniforme con movimientos rectos sobre la lija, cada muestra se rotó 90 grados y se realizaron los mismos movimientos. Posterior al proceso de devastado las muestras se pasaron por paños suaves con alúmina de distintos tamaños de grano, se utilizaron tamaños de 0,1 micrómetros y 0,01 micrómetros, en este caso se vertió la alúmina sobre el paño en rotación, se presionó de forma suave y constante girando la muestra, después se examinaron en el microscopio para descartar cualquier rayadura pronunciada que se hubiese dado durante el proceso de lijado y devastado.

**2.1.2 Medición de la microdureza.** Al obtener el acabado espejo de las muestras, se procedió a medir la microdureza de las muestras, para ello se verificó la limpieza y el estado inicial del indentador Vickers, además la perpendicularidad del Vickers con respecto a las superficies, las cargas que se utilizan dependen del material. El microdurómetro INNOVATEST423D permite ubicar el indentador con aumentos de

5x, 50x, después de ubicar la zona de interés, se indento la superficie con el fin de obtener la huella sobre el material. Para poder medir las diagonales se utiliza la escala en la mirilla, así que, se mide la parte entera en micras y con la ayuda del tornillo micrométrico se mide la parte decimal, posteriormente se ingresan los datos de la medición de las diagonales en pantalla, y automáticamente el equipo arroja datos de la microdureza del material, la carga y el tiempo de indentación.

Figura 13. Resultado de la medición de una huella de microdureza Vickers del Aluminio en equipo de microdureza INNOVATEST423D.



De esta manera se tomaron mediciones de 6 huellas Vickers para cada material y se tomó el promedio de las microdurezas para establecer la microdureza promedio de cada material. La tabla 1, Mediciones de microdureza Vickers promedio para 9 estructuras metálicas.

Tabla 2. Microdurezas Vickers promedio de estructuras metálicas

Estructura metálica.	Microdureza [HV]	Carga [gF]
Estaño	33.95 $\mp$ 4.55	10
Magnesio	59.33 $\mp$ 7.39	10
Aluminio-cobre	124.26 $\mp$ 23.51	10
Aluminio	155.62 $\mp$ 14.80	10
Bronce	233.11 $\mp$ 12.17	25
Titanio	278.31 $\mp$ 27.08	25
Acero inoxidable 404	299.18 $\mp$ 18.24	50
Acero 1020	357.65 $\mp$ 12.29	50
Fundición gris.	358.48 $\mp$ 17.89	50

La microdureza Vickers sirve para obtener una estimación de que tan resistente es el material ante el rayado, de tal manera que estas mediciones se pueden comparar con los resultados experimentales y así indagar sobre los efectos en la superficie de cada estructura.

## **2.2 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE ULTRASONIDO**

El equipo de ultrasonido (Branson 2510), según el fabricante está diseñado para limpiar joyería fina, remover aceites pesados de muestras, limpiar CDS, y quitar suciedad de muestras de laboratorio. Este opera a una potencia 80 watts y funciona a una frecuencia de 40 KHz, el equipo se puede programar a intervalos de 5 minutos hasta máximo 60 minutos. El tanque tiene una capacidad de almacenar  $\frac{3}{4}$  de galón<sup>39</sup>.

Para el diseño del experimento, la distancia entre la superficie preparada y la base del tanque es aproximadamente de  $41.90 \pm 0.05$  mm, la distancia medida desde la base hasta el nivel máximo especificado por el equipo es de  $77.75 \pm 0.05$  mm.

## **2.3 POSICIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS.**

Posicionamiento vertical de las muestras fue necesario encontrar en cual región se produce la mayor distribución de burbujas a lo largo de la profundidad z del tanque, ya que, una mayor distribución de burbujas proporciona una mayor probabilidad de interacción de las burbujas con el metal.

Antes de exponer las muestras se hizo una prueba de distribución de erosión en papel aluminio, esta consiste en sumergir un trozo de papel aluminio adherido a los bordes de una regla fija e introducirla en dirección vertical y perpendicular al fondo

---

<sup>39</sup> Marshal Cientific. Disponible en: [www.marshallscientific.com/Branson-2510-Ultrasonic-Cleaner p/br-uc.htm](http://www.marshallscientific.com/Branson-2510-Ultrasonic-Cleaner-p/br-uc.htm)

de la cubeta, esta se debe colocar hacia el centro del tanque como se aprecia en la Figura N°14.

Figura 14. Esquema de posicionamiento del papel aluminio en cubeta de ultrasonido



En este paso del experimento se introdujo el papel aluminio en el agua desionizada, se dejó un espacio de 1mm entre el papel aluminio y la base del tanque para evitar cualquier toque con el transductor y como prevención para evitar efectos de resonancia entre el papel aluminio y la base del tanque. La regla siempre estuvo fija por la base y el sujetador. Terminado este paso, se programó el limpiador de ultrasonidos a 10 minutos de exposición.

Al finalizar el proceso se subió el papel aluminio y se midieron con el calibrador algunos parámetros asociados a los efectos de erosión en el papel aluminio, tales como; la distancia desde el vértice de la regla hasta cada uno de los máximos de cada distribución de erosión, la longitud de onda asociada al equipo ultrasonido. En la tabla 2, se sintetizan estos resultados.

Al finalizar sobre el papel se producen 4 distribuciones de erosión sobre el papel aluminio, en la Figura N°15 se puede apreciar dichos resultados en el material.

Figura 15. Patrones de distribución de erosión obtenida en papel Aluminio a 10 minutos de exposición



En la fotografía se muestra los máximos centrales de cada distribución en  $z = 8.95, 23.00, 41.90, 60.85$  mm respectivamente. La longitud de onda teórica del equipo de ultrasonidos se puede hallar reemplazando la frecuencia de equipo Branson 2510,  $f = 40 \text{ K[Hz]}$  y reemplazando la velocidad de propagación de la onda en agua desionizada  $C = 1484 \left[ \frac{m}{s} \right]$ .

Tabla 3. Mediciones de los máximos de presión en papel aluminio.

Numero	Posición del máximo de presión, $z$ [mm] $\mp 0.05$
1	8.95
2	23.00
3	41.90
4	60.85

Luego la longitud de onda se calcula como:

$$\lambda = \frac{1484 \left[ \frac{m}{s} \right]}{40 K [Hz]} = 0.0371 [m] = 37.1 [mm]$$

Utilizando la ecuación (1), se puede obtener la longitud de onda experimental con la medición de los 4 máximos, la tabla 2 muestra la distancia entre máximos, la longitud de onda asociada entre los dos máximos y el error experimental.

$$\frac{\lambda}{2} = (41.90 - 23.00) [mm]$$

Tabla 4. Comparación entre la longitud de onda teórica y experimental.

Longitud de onda teórica [mm] $\mp$ 0.05	Longitud de onda experimental [mm] $\mp$ 0.05	% $\varepsilon$
37.10	28.10	24
37.10	37.80	1.9
37.10	37.90	2.1

Los resultados anteriores muestran efectivamente que en el interior de la cubeta de ultrasonidos con agua desionizada existe una onda estacionaria, de modo que para garantizar la interacción entre las burbujas y la superficie metálica se debe colocar la superficie en los puntos de máxima presión

La tercera zona de distribución tiene un máximo alrededor de  $z = 41.90 \pm 0.05$  mm como lo muestra la figura N° 15. Este valor de  $z$  es la distancia medida desde el fondo del tanque hasta la cara de la superficie pulida de la muestra, este valor siempre fue tomado como referencia al ubicar cada material.

## 2.4 ARREGLO EXPERIMENTAL EN EQUIPO DE ULTRASONIDO.

Las muestras fueron tratadas bajo las mismas condiciones, el mismo posicionamiento de las muestras en  $z = 41.90 \pm 0.05$  mm y en el centro de la rejilla. Al equipo de ultrasonidos se le adaptó una rejilla portable para sostener las muestras, esta rejilla se sujetó a unas pinzas con un soporte y una base de tornillo

para facilitar el desplazamiento vertical de las muestras. En la figura 15. se muestra el esquema del montaje experimental con la rejilla, el soporte y la base.

Cada estructura fue centrada en la rejilla, ya que en esta región se da mayor intensidad de la onda de presión durante el tiempo de exposición. Con relación al nivel del agua se llenó al nivel máximo de operación permitido por la cubeta del ultrasonido de  $77.75 \pm 0.05$  mm, esta es la cantidad equivalente a 3/4 de galón de agua desionizada.

La temperatura inicial del líquido de trabajo fueron  $25 \pm 2$  °C la cual fue medida por un termómetro de mercurio, durante todo el proceso al sistema siempre se le suministro la energía de las fuentes de ultrasonidos, lo cual incremento temperatura, se obtuvo una temperatura final  $40 \pm 2$  °C a 40 minutos de exposición. En cada material se cambió el agua desionizada, después del vaciado del tanque se dejó descansar el equipo de ultrasonidos por 20 minutos, con el fin de mantener las mismas condiciones iniciales.

Las muestras se secaron en aire caliente a 1 minuto, después a 4 minutos de aire frio con el secador (Attiva tourmaline ion 160).

Figura 16. Montaje experimental de las muestras en el limpiador de ultrasonido



En la figura N° 16 en la parte izquierda se muestra el esquema experimental de perfil, en la parte externa se posiciono la base de tornillo conectada a la base fija y las pinzas que sujetan la regla con papel aluminio adherido; ese esquema fue utilizado como se había mencionado en el anterior ítem para encontrar las posiciones optimas que garantizan la mayor interacción de las burbujas con el material. En la parte derecha se muestra el posicionamiento de la muestra de Al-Cu en la rejilla.

### 3. ANÁLISIS DE EROSIÓN POR TÉCNICAS DE MICROSCOPIA

#### 3.1 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

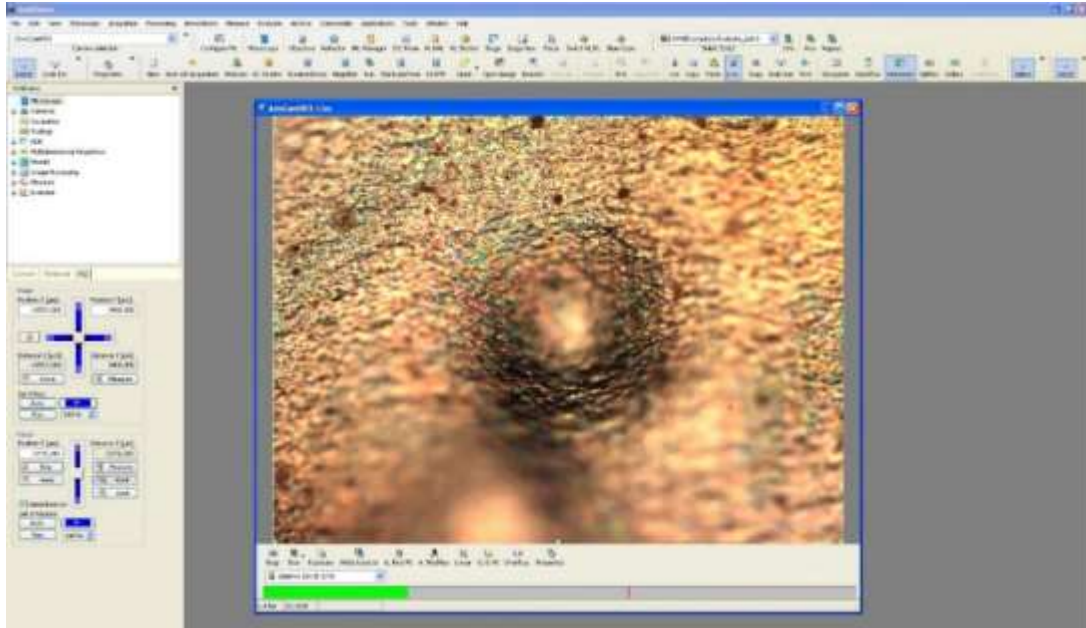
Para la observación de los efectos que se produjeron debido a la cavitación por ultrasonidos sobre cada estructura metálica, se obtuvieron imágenes en cada material para el estado inicial y final de superficie a 40 minutos de exposición. La obtención de imágenes se llevó a cabo en AXIO VISION (CARL ZEISS) por contraste de fase, con esta técnica se pueden obtener imágenes de alto contraste, dando así una sensación tridimensional de la superficie.

El procedimiento para tomar las imágenes por la técnica de contraste de fase se basa en el algoritmo de adquisición y procesamiento de imágenes en el Software AXIO IMAGER. En este procedimiento se posiciono cada estructura en el porta-muestras del microscopio sobre la bandeja, luego mediante la herramienta de posicionamiento se centralizo la muestra sobre la marca Vickers para que sirviera de indicador y facilitara la observación, se ajustaron los parámetros del microscopio para la toma de imágenes tales como la intensidad de la fuente, el tiempo de exposición, el posicionamiento de los prismas para mejorar las características del contraste de las imágenes.

Después de este paso, se focalizo la parte más baja de la muestra como lo muestra la figura N° 20 a), se fijó la referencia para tomar el barrido en z. Una vez se posiciona la parte más baja, se desfocaliza el fondo y se focaliza la posición más alta del metal como aparece en la figura N° 17 b), establecidas las posiciones en z, se corre el algoritmo de adquisición de imágenes en z cada 20 nm, con el fin de obtener imágenes que muestran a detalle las características de las muestras. Este mismo procedimiento se realizó con todos los metales y aleaciones con los objetivos de 50x, 100x.

Figura 17. Posición de focalización z en hundimiento en papel aluminio.

a) Z= más bajo.

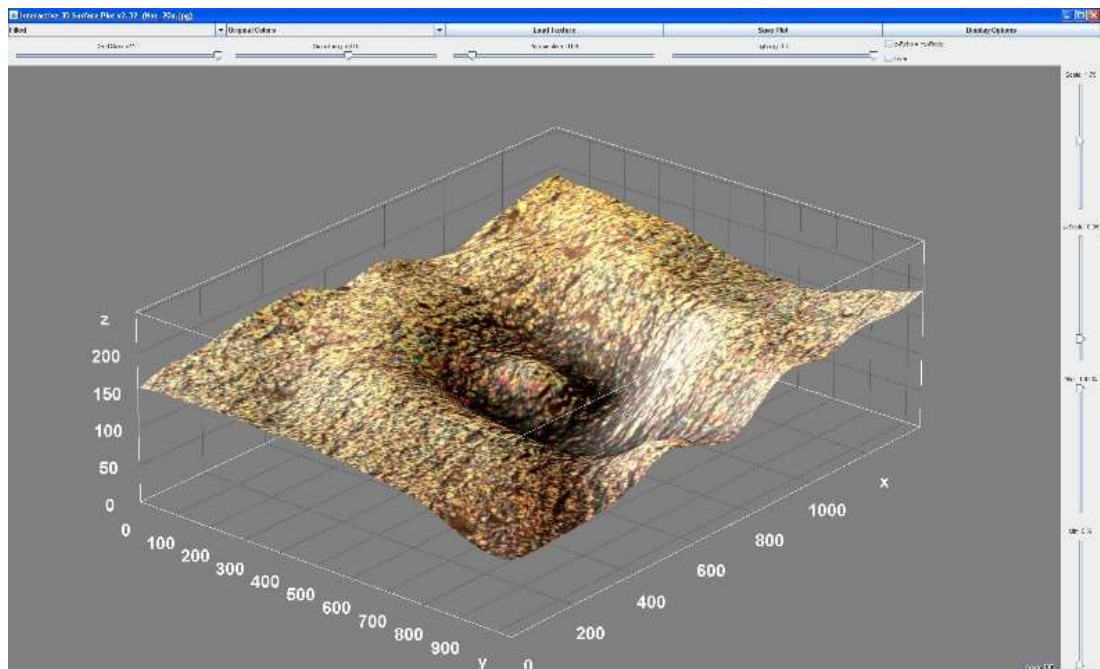


b) Z = más alto.



Como resultado de la superposición de imágenes del algoritmo se obtiene finalmente una imagen alto de contraste que describe la morfología de la superficie. En la figura N° 18 se muestra la visualización tridimensional de la imagen final con ayuda del programa Imagen J.

Figura 18. Visualización tridimensional por (C-DIC) de hundimiento en papel aluminio.



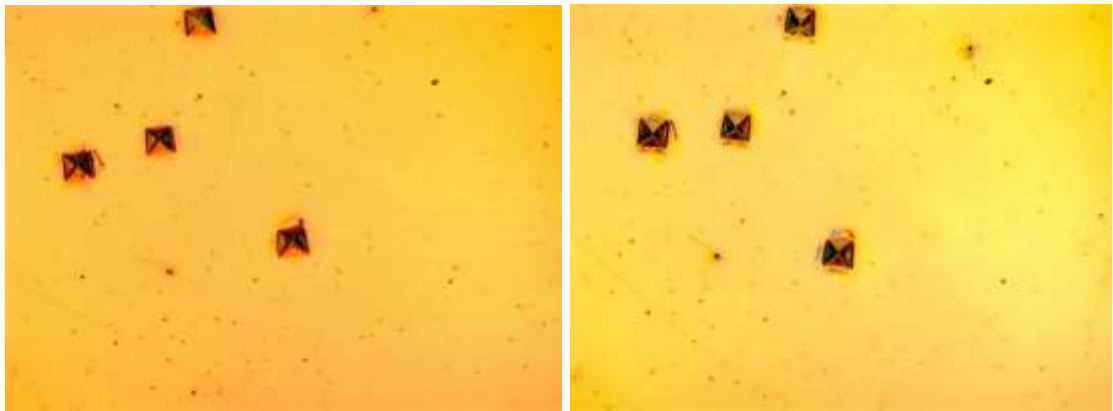
En los resultados de la caracterización en algunos materiales se evidenciaron cambios notorios en la superficie, estos cambios se dieron de forma local y en consecuencia demandaron mayor resolución para precisar con más detalle las zonas de observación, en colaboración del laboratorio de microscopía (UIS), se tomaron imágenes de electrones secundarios y retrodispersados para aumentos que varían desde 500x hasta 80000x en el microscopio electrónico de barrido FEG (Field Emission Gun). Por otro lado, se tomaron imágenes (E.D.S) para análisis químico de composición elemental y se hizo la respectiva verificación de la estructura. (ANEXO B). En las páginas subsiguientes se estudia con ayuda de estas

técnicas la respuesta de cada estructura metálica ante los efectos del proceso de cavitación por ultrasonido dadas las condiciones de este experimento.

### 3.1.1 Acero inoxidable 404.

Figura 19. Imágenes de contraste de fase a) 50x en la parte superior b) 100x en la parte inferior del acero inoxidable, antes en la columna izquierda y después a la derecha

a)



b)



Las imágenes de la columna izquierda corresponden al estado inicial de superficie, las imágenes en la columna derecha corresponden al estado final de superficie después de la exposición. En el estado inicial se pueden observar algunos puntos

oscuros asociados a huecos e imperfecciones del material. Antes de la exposición sobre el material se observan rayas muy sutiles a pesar de pasar por lijado y acabado tipo espejo. Las deformaciones de las huellas Vickers, se tomaron como referencia para no tener confusiones al diferenciar los cambios. Transcurridos los 40 minutos y después del secado, se posiciono la muestra en la plataforma del microscopio y se volvió a tomar la imagen de la zona de indentación Vickers, los resultados muestran que la distribución de burbujas durante este tiempo no se afectó la zona aledaña a la indentación, esto se puede ver ya que no sé modificaron las líneas ni los huecos del estado inicial.

De acuerdo con la idea anterior, no se observó cambio en la zona Vickers, a pesar de que se buscó en distintas áreas de la muestra posibles modificaciones en la morfología., esto es comprensible ya que esta muestra de acero inoxidable contiene un 17.93% de Cromo, (ver anexo B), este elemento forma una capa de pasivación de óxido de Cromo, por el general el porcentaje mínimo de Cromo en aceros inoxidables es del 11%, en este caso el porcentaje de Cromo es alto y clasifica como un acero inoxidable austenítico, esto implica que entre mayor es la cantidad de Cromo en el acero inoxidable más fuerte es la capa de pasivación y es mayor la resistencia a la erosión por cavitación<sup>40</sup>. La microdureza del material es de  $300 \pm 20$  Hv, según la correlación de Hattori (2014) realizada para aceros inoxidables le corresponde una resistencia a la erosión  $0.23 \text{ h}/\mu\text{m}^{41}$ .

---

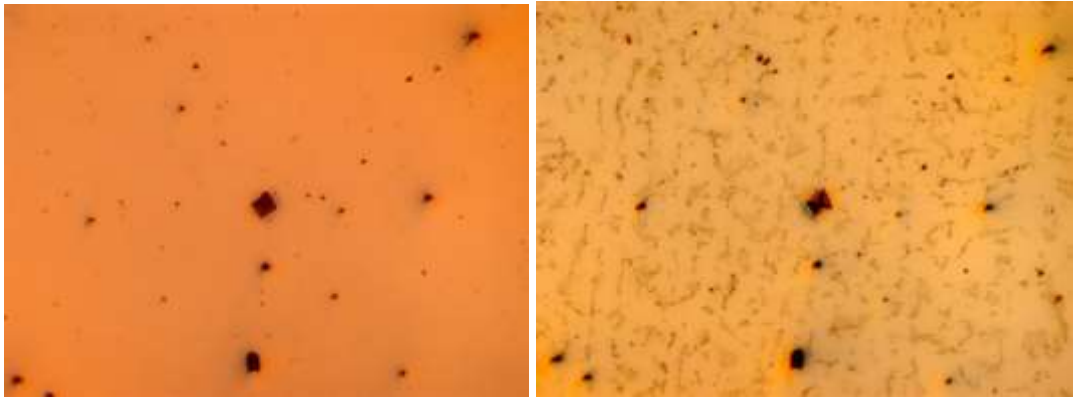
<sup>40</sup> ASKELAND, Donald R; PRADEEP P, Fulay y WENDELING, J Wrigth. Ciencia e ingeniería de los materiales. Mexico: Cengage learning, 2011.P.521. ISBN 978-607-481-620-4

<sup>41</sup> KIM, Ki-Han *et al.*Op. cit., p 263 .

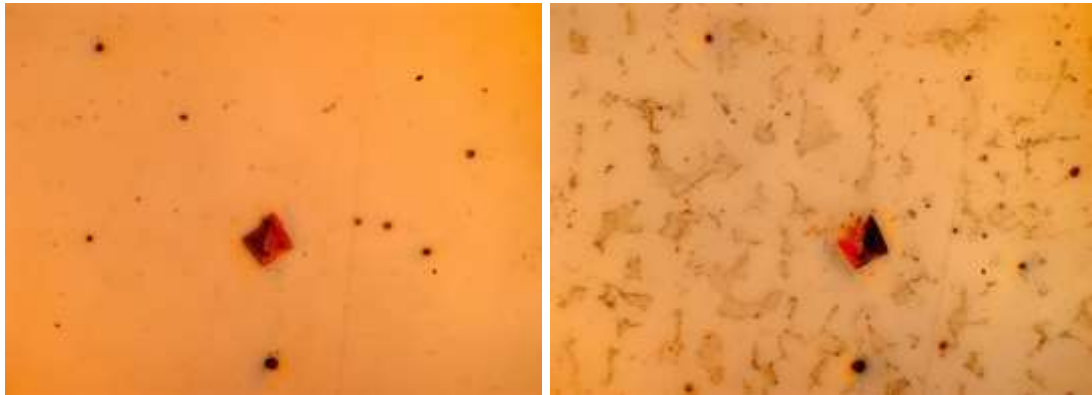
### 3.1.2 Acero 1020

Figura 20. Imágenes de contraste de fase a) 50x en la parte superior b) 100x en la parte inferior del acero 1020, antes en la columna la izquierda y después a la derecha.

a)



b)

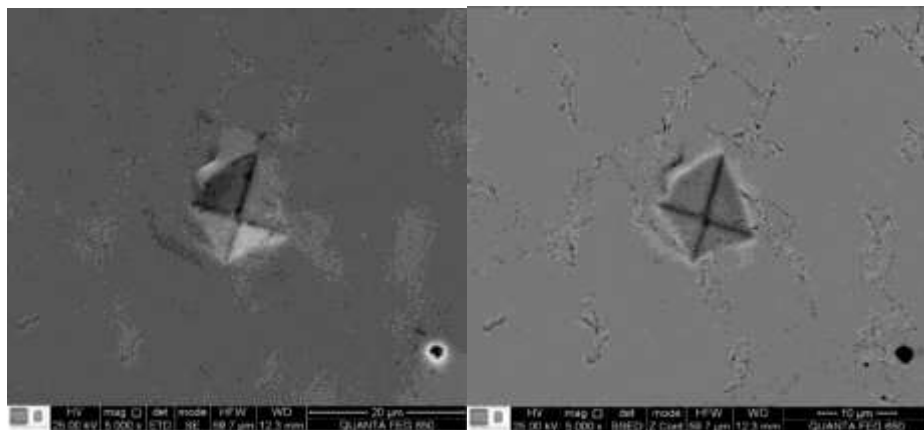


En la columna izquierda se pueden observar la indentación Vickers de acero 1020 antes de la exposición y en la columna derecha se muestra el después de la exposición en el limpiador de ultrasonidos. Los resultados revelan que, aunque no hubo picadura en el material, en las superficies aparecen regiones de líneas oscuras estos son los límites de grano de los metales que conforman la aleación. Figura

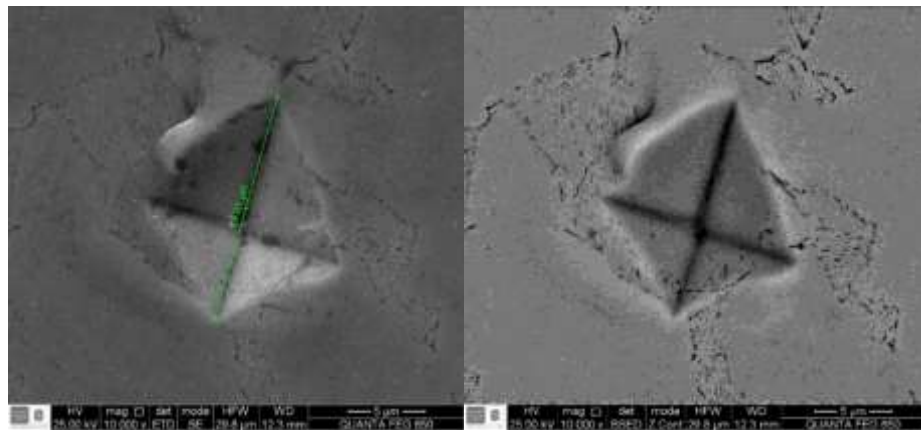
N°21 muestra con mayor resolución estas fronteras de grano aledañas a la indentación Vickers.

Figura 21. Imágenes (S.E.M) de; a) electrones secundarios, b) retrodispersados de la indentación Vickers en acero 1020 a 5000x columna izquierda y 10000x columna derecha.

a)



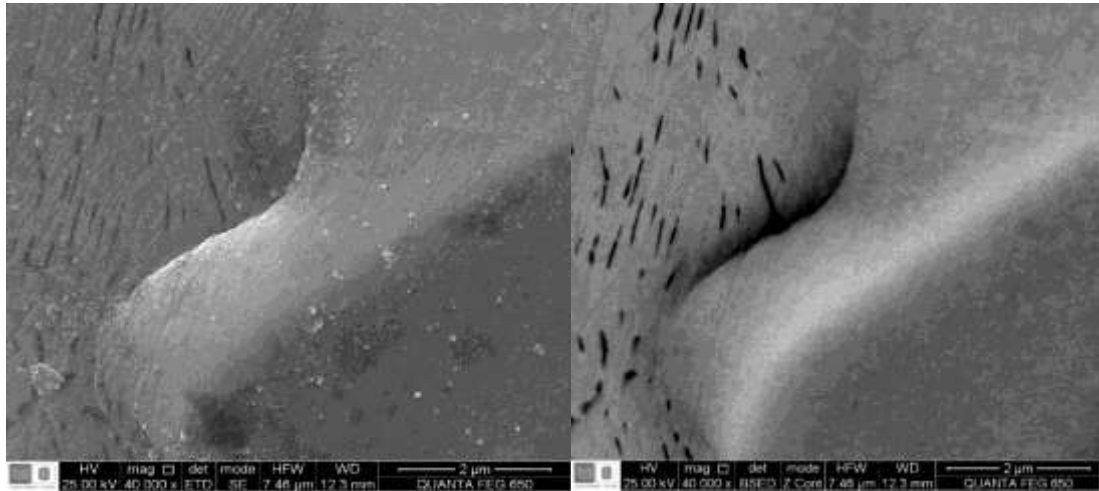
b)



El acero 1020 es una aleación ferrosa, que según la medición de microdureza de  $357.65 \pm 12.29$ , por lo tanto, tiene una resistencia a la erosión por cavitación alta, estos golpes reiterados de los microchorros en conjunto con las ondas de choque

solo provocan hundimiento y compresión en los límites de grano, por los tanto aquí se revela la estructura del material.

Figura 22. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios y retrodispersados en zona aledaña al borde del Vickers en acero 1020 a 40000x.



En la imagen de electrones secundarios en la parte izquierda, revela partículas sobre la superficie que probablemente podrían ser contaminantes o residuos desprendidos del material debido al proceso de cavitación. En la parte derecha de la imagen de electrones retrodispersados se dan líneas discontinuas oscuras asociadas a compresión de defectos aledaños a la zona Vickers.

Las líneas representan porosidades del material entre las fronteras de grano por deformación plástica, así que los metales que conforman la aleación se deforman uno más que otro produciéndose pequeñas salientes, luego en estas hay desprendimiento por fatiga debido esfuerzos incidentes de los microchorros y las ondas de choque sobre la superficie<sup>42</sup>.

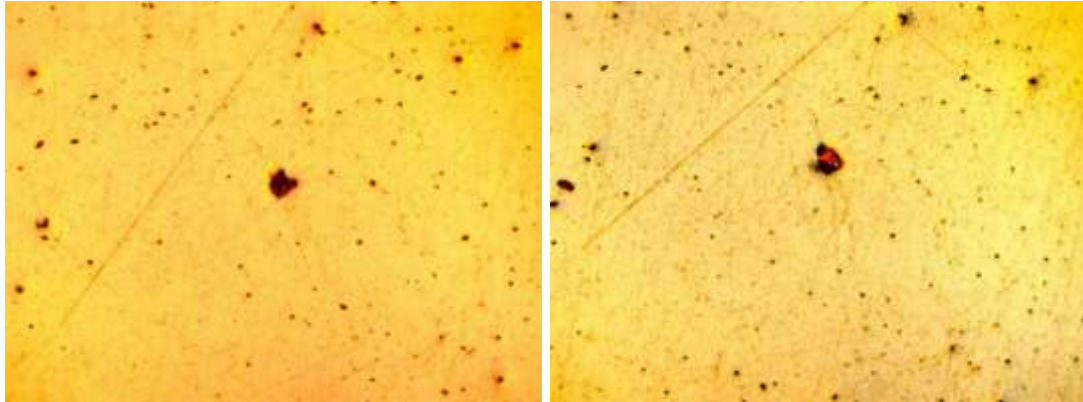
---

<sup>42</sup> KIM, Ki-Han *et al.* Op. cit., p 270

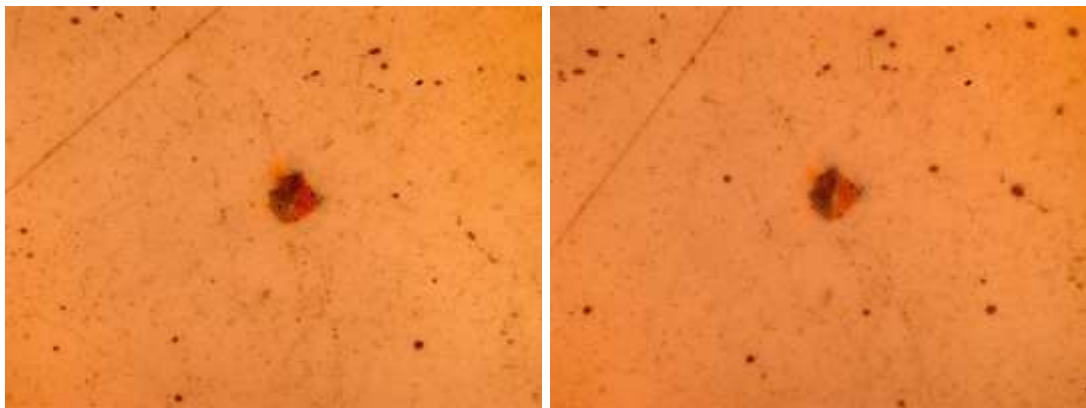
### 3.1.3 Aluminio

Figura 23. Imágenes de contraste de fase en aluminio a) 50x , b)100x del Aluminio, antes en la columna izquierda y después a la derecha

a)

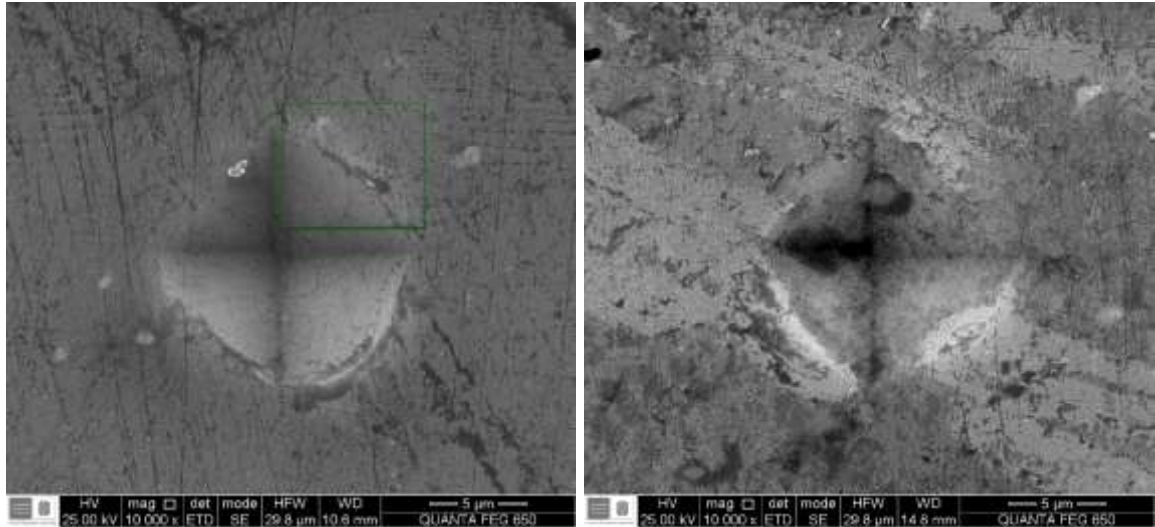


b)



En las imágenes tomadas con el microscopio interferométrico se pueden observar que las líneas de pulido no se modificaron durante el proceso, tampoco se ven distribuciones de picado en la zona de observación, sin embargo, algunos puntos negros de la imagen asociados a partículas de polvo ya no se encuentran en la misma configuración sobre la superficie. Con el fin de verificar se tomaron imágenes en el microscopio (S.E.M), ver figura N° 24.

Figura 24. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios en zona Vickers en acero Aluminio a) antes de la exposición b) después de la exposición.

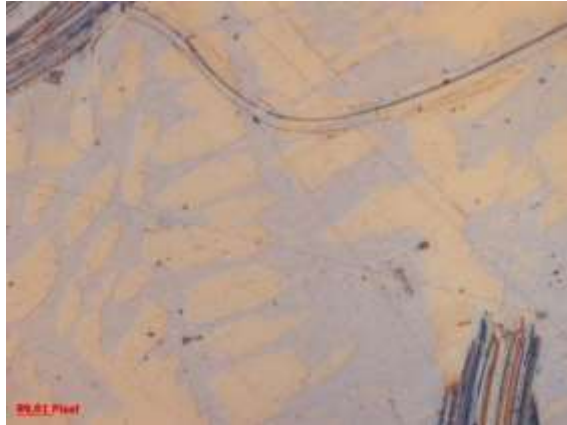


En las imágenes antes de la exposición se pueden ver las líneas de pulido bien definidas, conjuntamente se pueden observar partículas de contaminación cerca a los bordes del Vickers, en la zona se pueden notar que las partículas de suciedad no se encuentran en la misma configuración inicial. Después de la exposición se puede ver aparentemente cambios de forma en la indentación Vickers, lo cual se debe a que después del proceso estas partículas se depositaron en el hueco, dando la impresión de que el Vickers tuvo cambios de forma. Al revisar en otros sectores de la muestra no se encontró evidencias de distribuciones de erosión.

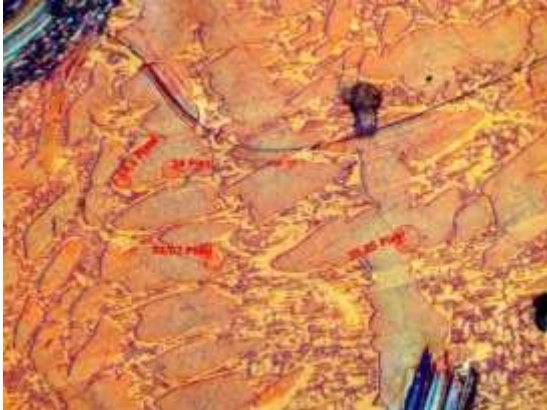
### 3.1.4 Bronce

Figura 25. Imágenes de contraste de fase a 50x del Bronce a) antes, b) después de la exposición.

a)



b)



En este material se utilizó como referencia tres líneas de rayado pronunciadas, con el fin de llevar a cabo las observaciones. Los resultados de las imágenes tomadas en el microscopio interferométrico revelan zonas de picado por cavitación enmarcadas en los círculos rojos en la figura, en estas zonas se nota el picado y cambio en la morfología, Las mediciones del radio que contiene estas distribuciones se muestran en la tabla 3. Dichas mediciones se realizaron sobre la imagen de la

parte derecha, las mediciones se realizaron en pixeles y el factor de conversión esta dado por:

$$89.01 \text{ [pixeles]} = 18.3 \text{ [\mu m]}$$

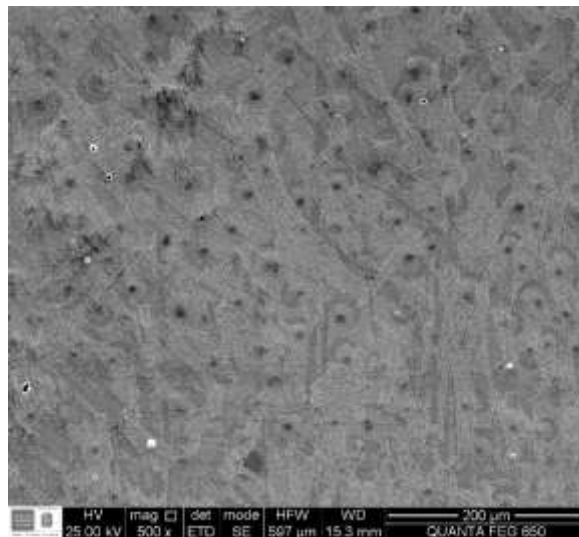
La Figura N°26 muestran puntos oscuros productos de la corrosión por cavitación en la imagen izquierda a 500x aumentos, en la imagen derecha de 40000x se muestra el rompimiento de la capa superficial, pues se evidencia nano-porosidades inducidas por el proceso de tensión por microchorros y ondas de choque en la superficie.

Tabla 5. Mediciones del radio que contiene las distribuciones de erosión.

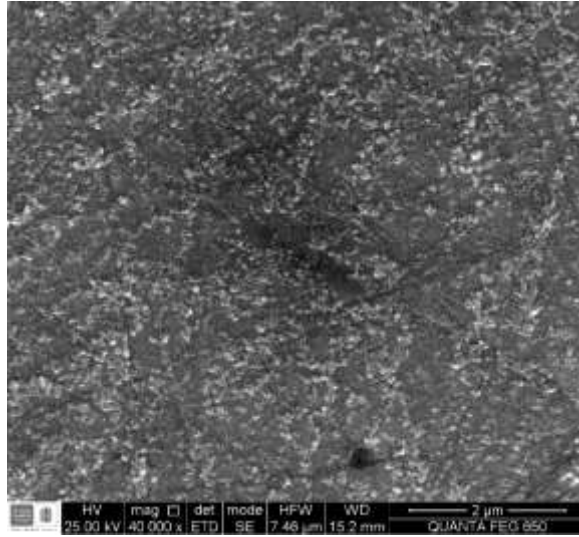
Zona	Radio de distribución de erosión Píxel	Radio de distribución de erosión $\mu\text{m}$
1	19.10	3.93
2	24.00	4.93
3	32.02	6.58
4	35.85	7.37
-	Promedio	5.70

Figura 26. Imagen (S.E.M) de electrones secundarios de distribución de erosión en Bronce a) 500x, b) 40000x, tomadas después de la exposición a ultrasonidos.

a)



b)

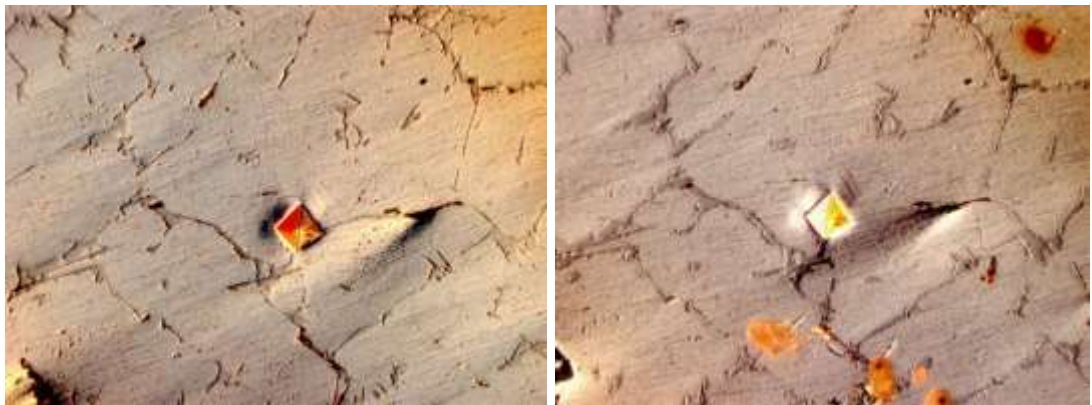


La imagen a 40000x al lado derecho es la ampliación de un punto oscuro de de la imagen del lado izquierdo a 500x.

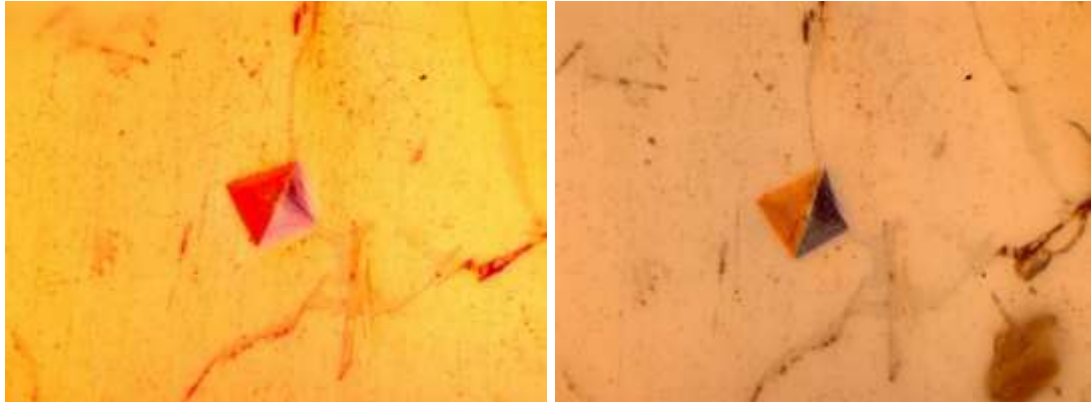
### 3.1.5 Aluminio-cobre

Figura 27. Imágenes de contraste de fase a) 50x, b) 100x del Aluminio-Cobre, antes en la columna izquierda y después a la derecha.

a)



b)



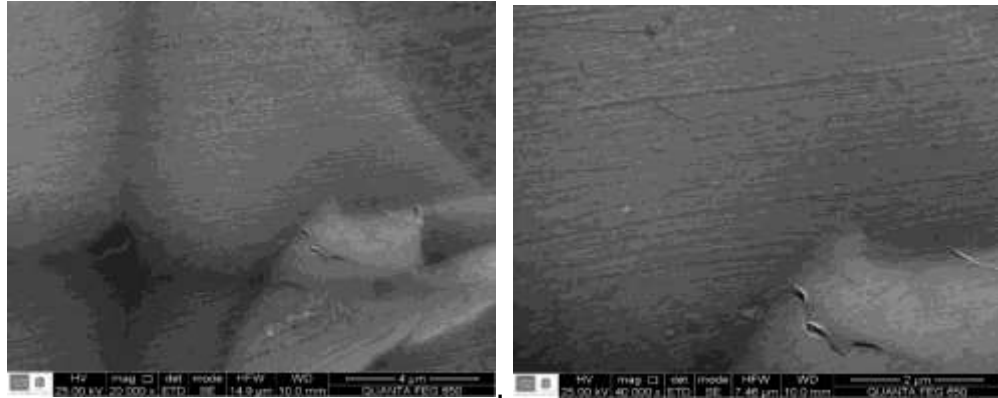
Las imágenes de contraste de fase no revelan cambios en la morfología, sin embargo, en el proceso se introdujo una impureza no deseada adherida a la superficie cerca a la huella Vickers. En la Figura N° 28 se muestran a mayor resolución la misma zona de interés, como resultado no se encontraron marcas de alguna deformación en la superficie. Cabe aclarar de que el hecho de que no se hayan encontrado marcas en la zona de observación no quiere decir, que no se puedan encontrar en otro sector distinto de la muestra. Todas las muestras fueron revisadas en la zona de observación y en otras zonas distintas de la muestra, con el fin de encontrar alguna distribución de picado localizado

Figura 28. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios de la indentación Vickers en aleación de Al-Cu, a) 5000x, 10000x b) 20000x, 40000x.

a)



b)



En la zona de observación Vickers no se detectó algún cambio apreciable, por lo tanto, se procedió a buscar en otras zonas que posiblemente afectadas.

En este caso la manera más rápida de encontrar rastros de erosión es observar en que región la muestra toma un tono más opaco, ya que el estado inicial la superficie pulida espejo tiene todo el brillo, posterior al proceso de cavitación por ultrasonidos las zonas donde hubo posibles deformaciones sufren modificaciones de la superficie y en consecuencia la luz es difusa, dándose la pérdida de brillo. Aplicando este método se encontró la distribución de erosión que muestra la figura N°33. Al revisar la muestra se encontró una distribución de picado cerca a un hueco.

En la figura N°29 revela otro sector de la muestra con una distribución de característica del picado por cavitación, ya que se pueden notar picados localizados. En las zonas más cercanas a los huecos profundos (manchas oscuras), se puede chequear que la densidad de erosión es mucho mayor comparada con la densidad de erosión que se encuentra en el centro de la imagen, esto se debe a q más probable que se hallan formado núcleos de cavitación al lado de grietas grandes y es menos probable que se formen núcleos en la parte central puesto que existen grietas de menor profundidad, el acondicionamiento de la distribución de burbujas en esta zona está relacionado con la distribución de erosión en el material.

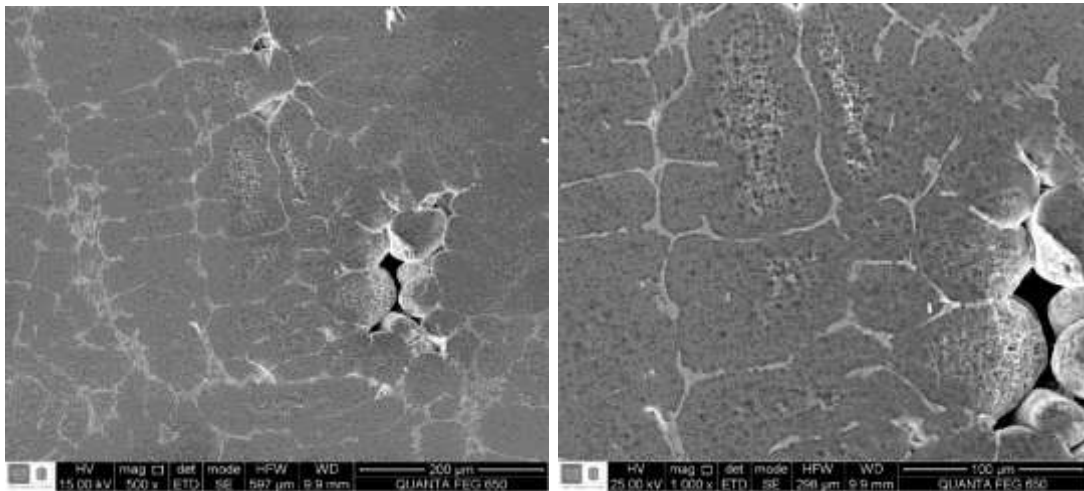
Figura 29. Distribuciones de erosión en otro sector de la muestra de Aluminio-Cobre a 20x por técnica de contraste de fase.



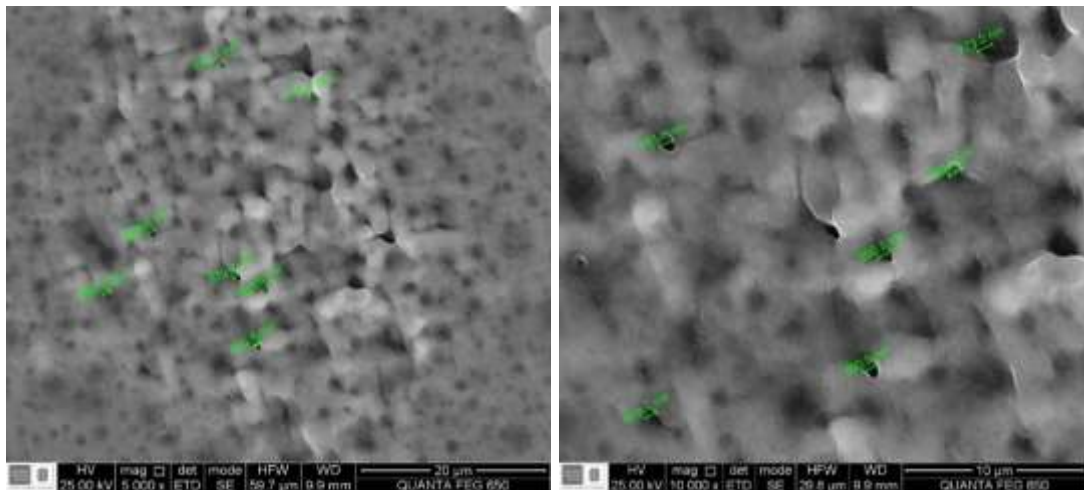
El ancho de cráter sobre esta aleación no es posible de medirlo en el microscopio interferométrico, entonces se tomaron imágenes (S.E.M) con mayor resolución a 500x, 1000x ,5000x, 10000x como lo muestra la Figura N°30.

Figura 30. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios de zonas de picado de aleación de Al-Cu, a) 500x izquierda, 1000x derecha, b) 5000x izquierda, 10000x derecha.

a)



b)



Los resultados de las imágenes (S.E.M) muestran huecos localizados generados por los efectos de cavitación, el ancho promedio de estas picaduras está del orden de nanómetros. En la tabla 3. Se muestran los resultados de las mediciones y el ancho promedio de erosión en aleación de Al-Cu.

Tabla 6. Mediciones de porosidades generadas en la superficie de Al-Cu.

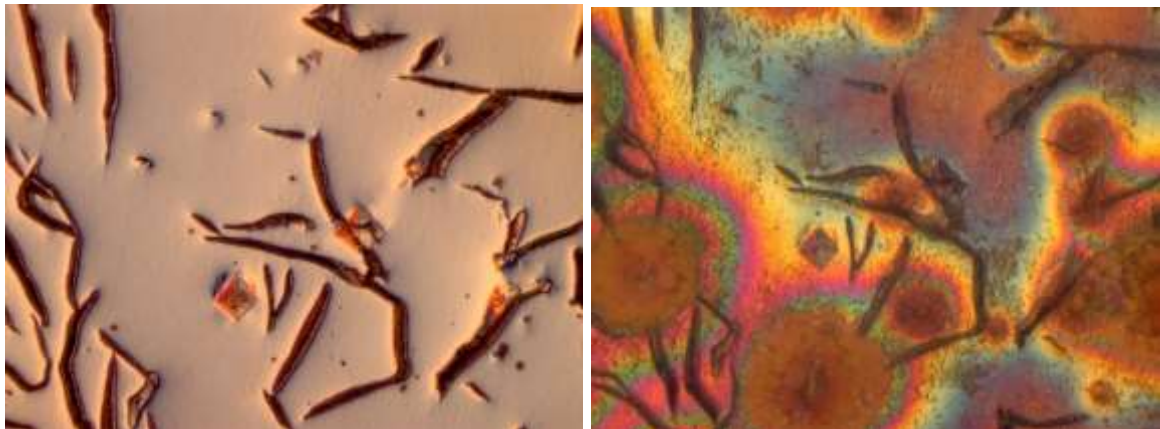
Numero de hueco	Ancho del hueco [nm]
1	861.0
2	873.2
3	902.0
4	860.5
5	860.5
6	769.7
Promedio	854.5

El promedio de picadura en el Al-Cu, fue calculado al tomar las mediciones de la imagen (S.E.M) de 10000x.

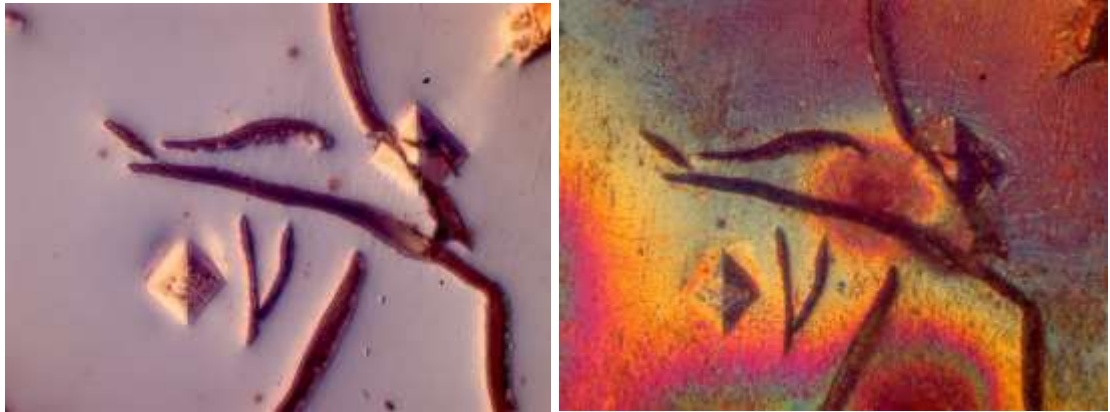
### 3.1.6 Fundición gris

Figura N°31. Imágenes de contraste de fase a) 50x parte superior b) 100x parte inferior fundición gris, antes en la columna la izquierda y después a la derecha.

a)



b)



Las imágenes obtenidas en contraste de fase en la zona de la indentaciones revelan círculos de colores correspondientes a montículos de corrosión que crecen desde el centro hacia afuera, las líneas de grafito permanecen intactas.

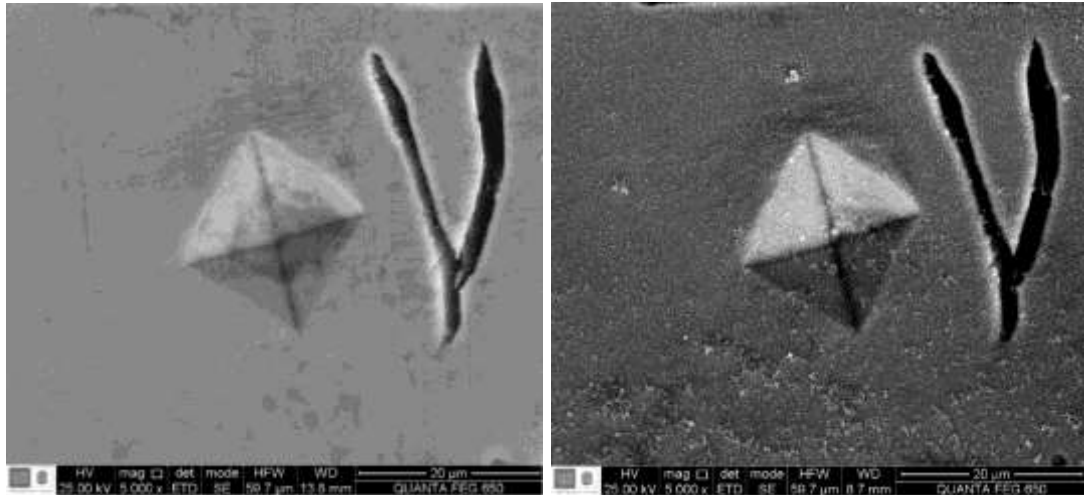
Los experimentos de cavitación realizados bajo la norma ASTM G-32 muestran resultados diferentes en este material, ya que se manejan otras condiciones experimentales diferentes en el equipo de ultrasonidos, esta norma se aplica para hallar la respuesta de los materiales ante el proceso de cavitación, en este caso la cavitación a 5 minutos de exposición es bastante agresiva ya que causa desprendimiento rápido de las hojuelas de grafito<sup>43</sup>.

---

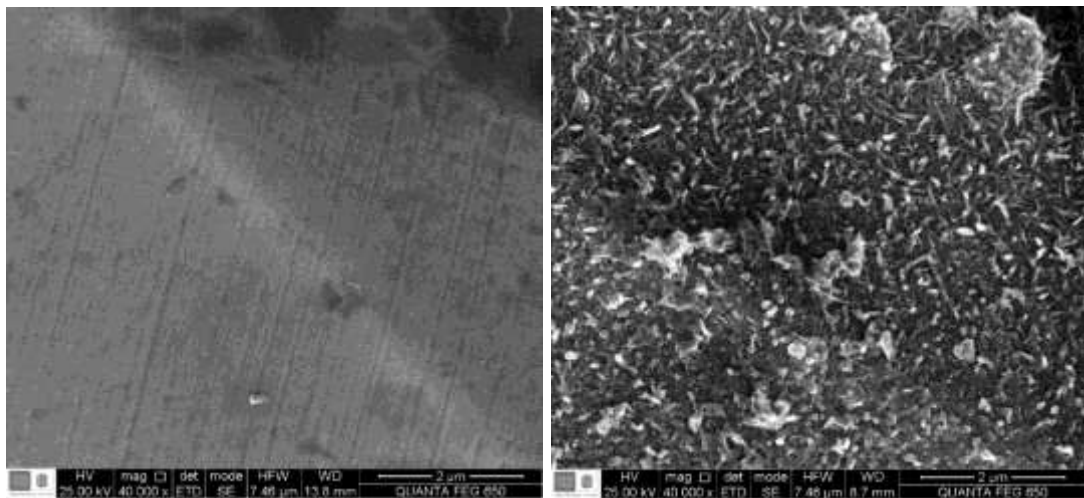
<sup>43</sup> KIM, Ki-Han *et al.* Op. cit., p267

Figura 32. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios de indentación Vickers de fundición gris antes y después a aumentos de a) 5000x, b) 40000x.

a)



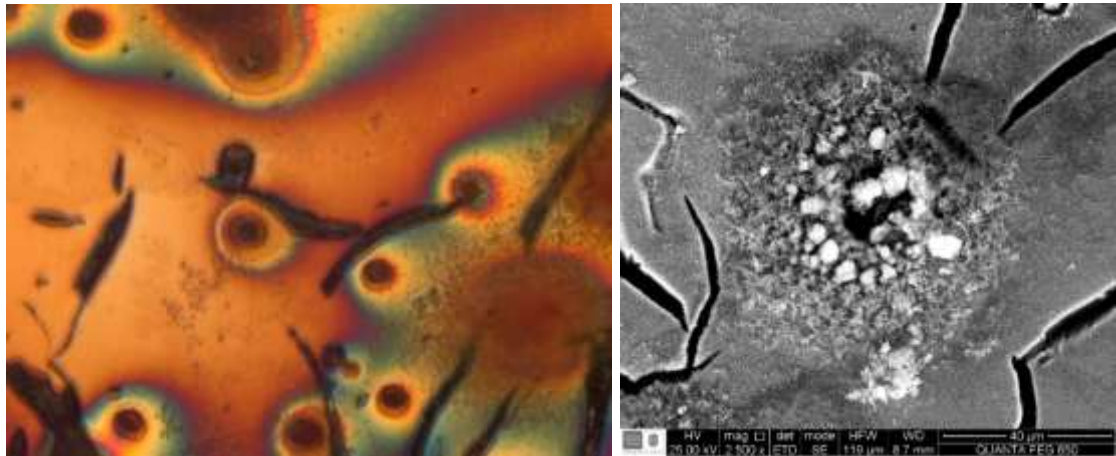
b)



En el borde del Vickers se puede evidenciar cambios en la superficie, las líneas del pulido se han distorsionado, la línea de parte inferior izquierda que limita el Vickers se deforma. Cabe resaltar que se notan unos crecimientos de óxido correspondiente a las partículas blancas esféricas y unos aglomerados blancos asociados a productos derivadas del grafito. También hay otros crecimientos con morfología

acicular estos son asociados a crecimiento de hidróxidos, también la presencia poros de orden nanométrico.

Figura 33. Distribución de erosión en otro sector de la muestra de Fundición gris después de la exposición 100x a la izquierda B) 2500x (S.E.M) a la derecha



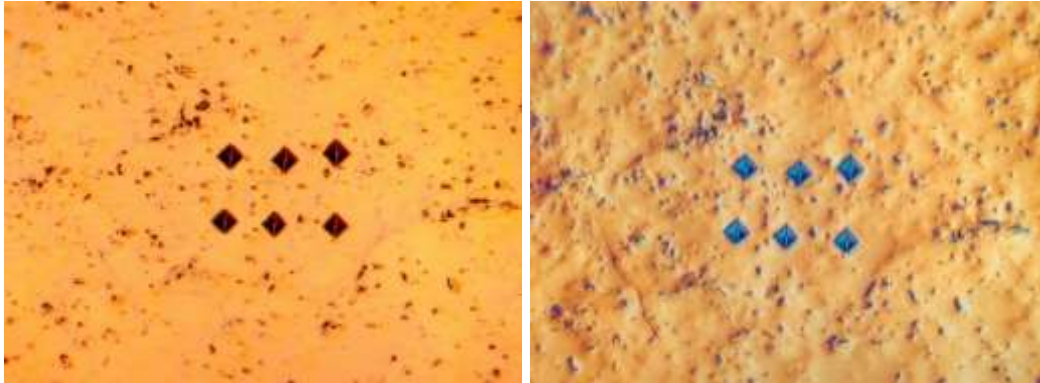
Los resultados de contraste de fase muestran pequeños montículos de corrosión de diferentes tamaños, en la parte central se dio una distribución de erosión en el exterior a los círculos de corrosión, en la parte superior también se puede observar un patrón de crecimiento de picado. En la parte derecha se tomó una imagen de electrones retrodispersados para observar más resolución la morfología del montículo, las marcas de partículas blancas son residuos de contaminación que se dieron en el proceso experimental.

A pesar que la fundición gris es la aleación con mayor microdureza aproximadamente con  $358.48 \pm 17.89$  Hv, las imágenes evidencia que este material si es perjudicado por el proceso que interacción con las burbujas pues se ven distribuciones de picados aisladas a los montículos de corrosión y se presencia deformación de la línea del Vickers.

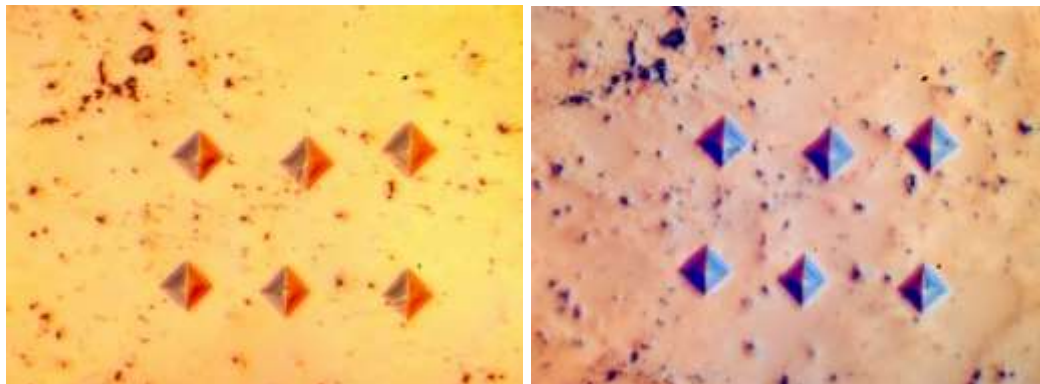
### 3.1.7 Titanio

Figura 34. Imágenes de contraste de fase a) 50x en la parte superior b) 100x en la parte inferior del Titanio, antes en la columna izquierda y después a la derecha.

a)



b)



Esta muestra de Titanio con 99.99% de pureza al ser expuesta no se evidencio cambio en la morfología de las huellas, según Askeland la resistencia del titanio no aleado le da muy buena resistencia a la corrosión, sin embargo, presencia de oxigeno le da mayor resistencia mecánica y una disminución de la resistencia a la corrosión<sup>44</sup>. Los resultados corroboran la teoría ya que no se dan manchas de

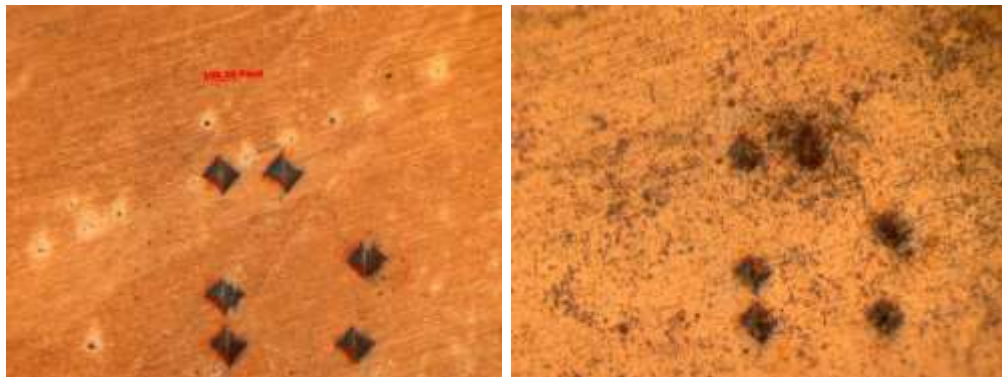
<sup>44</sup> ASKELAND, Donald R. Op. cit., p. 556

oxidación, ni se evidencia picado, o marcas de erosión. El titanio aunque tiene una dureza de  $278.31 \mp 27.08$  menor a la de fundición no fue afectado por el proceso de cavitación y el campo acústico en su superficie.

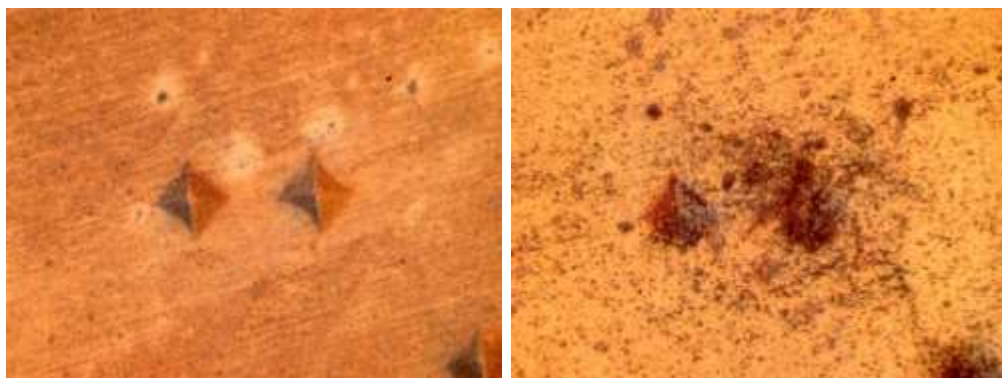
### 3.1.8 Magnesio

Figura 35. Imágenes de contraste de fase a) 50x en la parte superior b) 100x en la parte inferior del Magnesio, antes en la columna izquierda y después a la derecha.

a)



b)



Al realizar el mismo procedimiento de adquisición de imágenes, en la superficie después se revela la aparición de puntos negros en el área circundante a los Vickers. Estos puntos son transformaciones de la superficie causadas por el proceso de chorros en diferentes direcciones y ondas de choque. El magnesio es

un metal blando comparado con el acero, tiene una dureza de  $59.33 \pm 7.39$  HV, en consecuencia, tiene una resistencia muy baja a la erosión lo cual concuerda con las imágenes obtenidas en contraste de fase. En la figura N° 36 y 37 se muestran de forma contundente los efectos provocados por la cavitación en microscopia electrónica.

Figura 36. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios de indentaciones Vickers en Mg después de la exposición, tomado a aumento de 500x.

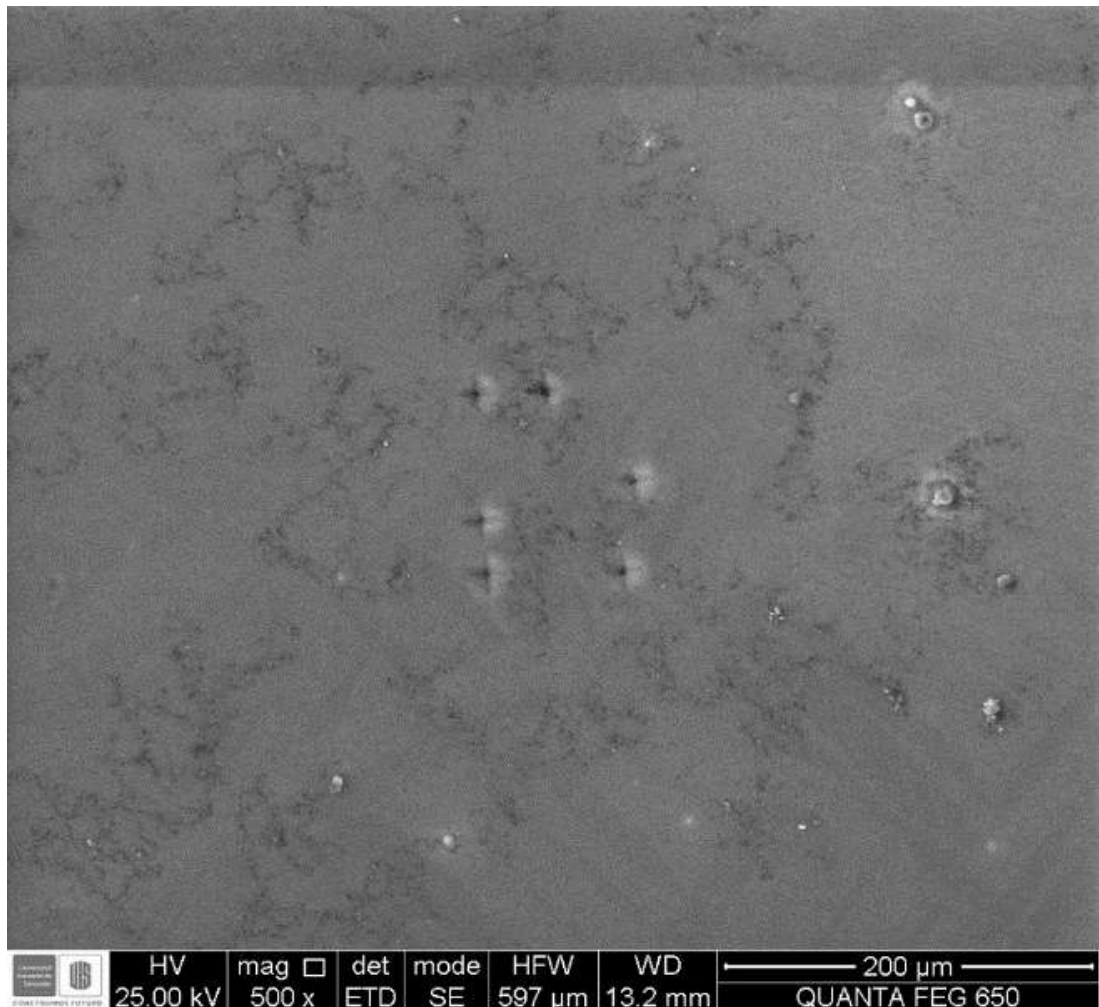


Figura 37. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios de indentación Vickers en Magnesio, antes y después de la exposición a ultrasonidos a 5000x.

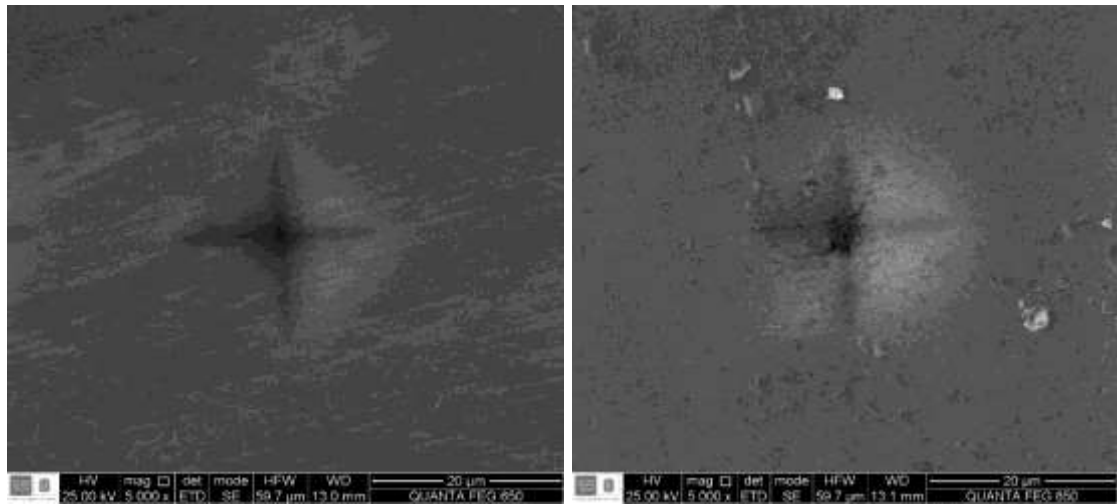
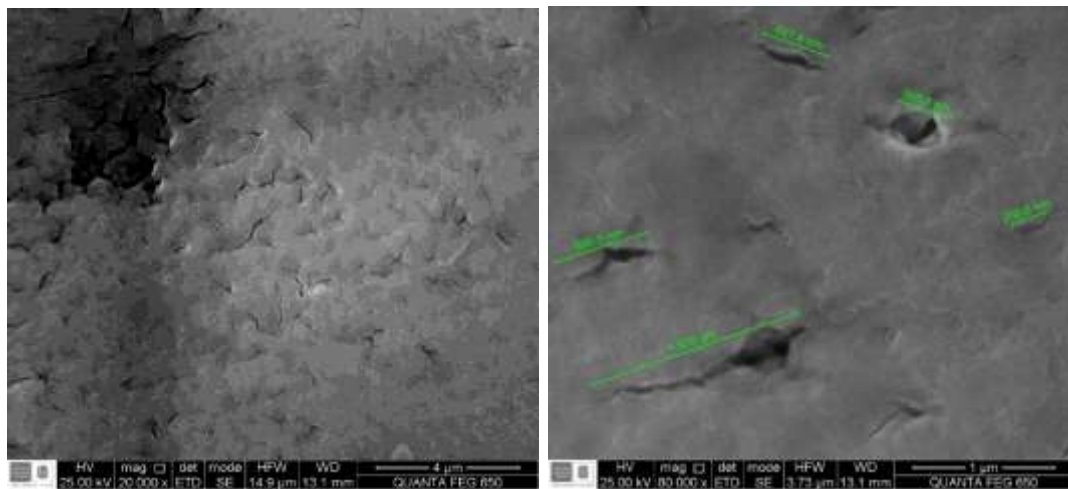


Figura 38. Imágenes (S.E.M) de electrones secundarios de grietas en indentación Vickers de Mg a aumentos de 20000x, 80000x.



Al comparar las imágenes de la figura N° 37 se puede verificar que las líneas asociadas al pulido se borraron, el magnesio es un material frágil, en la imagen los poros actúan como puntos de iniciación de las grietas, así que con esfuerzos mecánicos de la cavitación generan la propagación de grietas, dando lugar efectos de fractura y como consecuencia desprendimiento del material.

En la figura N° 37 se ven rastros del material depositados sobre la indentación, lo que pone en evidencia los cambios de la superficie. En la Figura N° 38 se pueden ver en el centro de la indentación Vickers la presencia de grietas. A continuación, en la Tabla 4 se consignan los resultados del tamaño promedio de las grietas

Tabla 7. Mediciones del largo de grietas sobre superficie de Mg.

Numero de grieta	Tamaño de grieta
1	487.4 nm
2	385.9 nm
3	225.8 nm
4	686.5 nm
5	1539.0 nm
Promedio de tamaño de grieta	664.9 nm

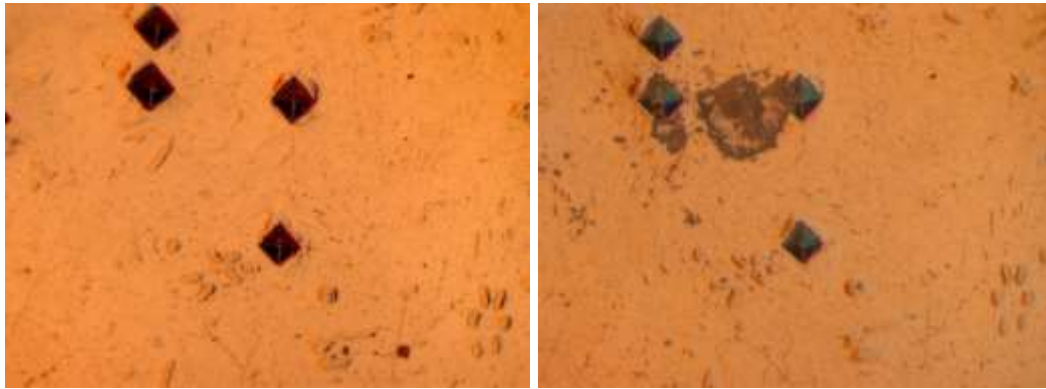
Los resultados de erosión del Mg se deben a que los microchorros y ondas de choque interactúan en diferentes direcciones provocando distintas marcas de agrietamientos en el material, sin embargo, como el tiempo de exposición es prolongado estos golpes incrementan la energía cinética en la superficie produciendo aumentos en el tamaño de las grietas. Los ataques reiterados producen fatiga y en consecuencia desprendimiento en pedazos de residuos en las vecindades de la zona Vickers.

La estructura del magnesio antes de la exposición es de color amarillo oscuro, posterior al proceso de cavitación se observa cambio de coloración adquiriendo un tono plateado y se da pérdida de brillo en toda la superficie de la muestra..

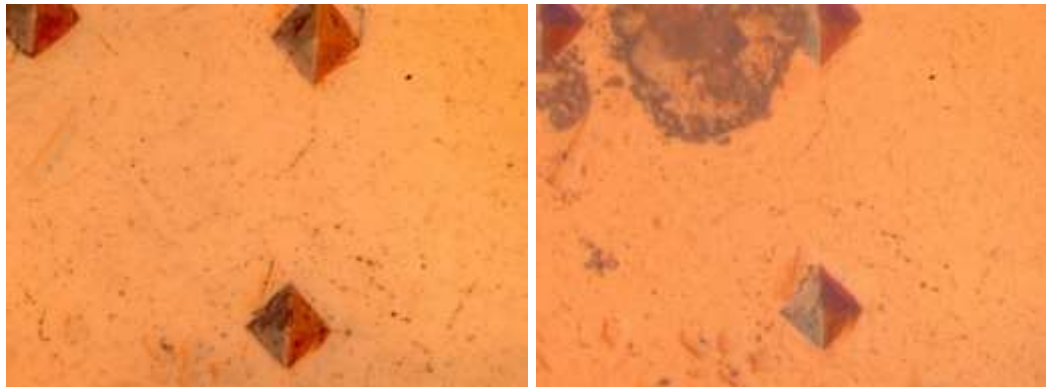
### 3.1.9 Estaño

Figura 39. Imágenes de contraste de fase a) 50x, b) 100x del Estaño, antes en la columna izquierda y después a la derecha.

a)



b)



En la imagen de contraste de fase se puede apreciar después de la exposición una configuración de superficie muy distinta al estado inicial. En el medio de las dos huellas se formó un crecimiento producto de algún contaminante en la superficie que reaccionó con la superficie, ya que las distribuciones de erosión por ultrasonidos tienen a ser localizadas y se presenta en varios sectores de las muestras, el estaño a pesar de tener la menor de las durezas es un material que tiene alta resistencia a la corrosión, incluso se utiliza para mejorar la resistencia a la corrosión de aleaciones.

#### 4. CONCLUSIONES

Se evidencia mediante la prueba de picado en papel aluminio la onda estacionaria en el interior de la cubeta de ultrasonidos con longitud de onda de 37.1 [mm]. Se encontraron las posiciones en el eje z del limpiador de ultrasonidos Branson 2510, donde se produce mayor probabilidad de interacción entre las burbujas y la muestra. Esto le permitirá al usuario de la cubeta ubicar muestras en una zona donde haya una mayor distribución de burbujas y por ende conseguir mejores efectos de limpieza en materiales que presenten alta resistencia a la cavitación.

El equipo Branson 2510 a 40 minutos de exposición en agua desionizada a 25 °C y posicionamiento vertical de la superficie en  $z = 41.90$  mm es nocivo para las muestras de Mg llegando a producir grietas de 664.9 nm, asimismo en Al-Cu se producen porosidades de 854.5 nm.

En los metales tales como el acero inoxidable y el titanio no se hay evidencia de cambios en la superficie debido a la capa de pasivación que recubre a estos metales les brinda alta resistencia a la tensión generada por los microchorros líquidos y en campo acústico de las burbujas. En acero 1020 aunque es un material con una microdureza alta y una tenacidad alta, se modificó la superficie pues se revelan los límites de grano de la estructura, por aplastamiento reiterado de la superficie. En el bronce se dieron regiones de porosidades que no existían inicialmente en las estructuras, en fundición gris a pesar de tener la dureza más alta de los materiales se presentaron crecimientos de oxidación, presencia de hidróxidos y productos del grafito acumulados en la superficie.

Es claro que la rugosidad de la superficie proporciona un ambiente favorable para la acumulación de gas y por ende mayor número de núcleos de cavitación, dándose mayor distribución de picado en la superficie. En los resultados del Al-Cu se

evidencia una mayor distribución de picado cercana a las grietas profundas en comparación con el centro de la imagen donde se observan grietas de menor profundidad.

Al comparar los resultados de las mediciones del daño y las microdurezas del Mg y el Al-Cu, se puede ver que el Al-Cu es un material casi 2 veces más duro que el magnesio y tiene un tamaño de cráter promedio menor al tamaño de grieta promedio en Mg. Sin embargo, el comportamiento de las otras estructuras no evidencia una correlación entre el daño por cavitación y la microdureza HV, pues en algunos de ellos tales como; el acero inoxidable 404, en Titanio la resistencia a la cavitación depende en gran medida de la tensión superficial de la capa de pasivación.

## 5. RECOMENDACIONES

Para establecer la correlación entre la microdureza y tamaño promedio de cráter es necesario utilizar un equipo de mayor potencia acústica, adicionalmente que permita un mayor tiempo de exposición de la cavitación con las superficies y así lograr daños contundentes en todas las muestras, inclusive las más resistentes a la erosión como el titanio y acero inoxidable. El equipo Branson 2510 no es un equipo adecuado para causar daño en estructuras resistentes a la cavitación, ya que el tiempo de exposición máximo es de 60 minutos y muchas de ellas pueden tener cambios solo si el tiempo de exposición es prolongado.

Es importante mencionar que este experimento es válido para el llenado total del tanque hasta el nivel máximo de trabajo, si se modifica el llenado del tanque a otro nivel del agua inmediatamente se está modificando las condiciones de la onda estacionaria y por ende las distribuciones periódicas de burbujas.

Puede realizarse el mismo experimento apoyado por microscopia (A.F.M), cambiando el tiempo de exposición en el equipo de ultrasonidos y analizar la evolución temporal de las superficies expuestas a cavitación ultrasónica con el fin de establecer un modelo erosión.

Pueden probarse otros experimentos cambiando el líquido de trabajo, como, por ejemplo: etanol, acetona, líquidos coloides, Hg, aceites, etc. Adicionalmente pueden agregarse otras variables de estudio tales como el control de la nucleación y la variación de la temperatura en el líquido de trabajo.

Este estudio abre diferentes opciones en física computacional, por ejemplo en COMSOL MultiPhysics se pueden integrar los paquetes de acústica, fluidos y superficies, realizar simulaciones y comparar con el experimento.

## BIBLIOGRAFÍA

A.P.French. Vibraciones y Ondas. REVERTE, 1993. P.203.

ASKELAND, Donald R; PRADEEP P, Fulay y WENDELING, J Wriqth. Ciencia e ingeniería de los materiales. Mexico: Cencague learning, 2011.P.521. ISBN 978-607-481-620-4

BLAKE, J.R; GIBSON, D.C. Cavitation bubbles near boundaries. Ann. Rev. Fluid Mech.19: 99-123. University of Wollongong, CSIRO. Australia

BOMBÍM MONSALVE, Rafael. Estudio de recubrimientos delgados por la técnica cavitación-erosión. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas. Abril. 2008. P 3-5.

BRUJAN, E.A *et al* .Jet formation and shock wave emission during collapse of ultrasound-induced cavitation bubbles and their role in the therapeutic applications of high-intensity focused ultrasound. [Base de datos en línea]. 28 September 2005. IOP PUBLISHING. P 4806. (Recuperado en 4 de febrero 2017). DOI:10.1088/0031-9155/50/20/004

C.R. Hill, J. C. Bamber & G.R. ter Haar. Physical Principles of Medical Ultrasonics. Ultrasonic Biophysics. Second Edition. ISBN 0 471 97002 6. England. 2004. P 364

CHALINE, Jennifer. Analogie macroscopique et acousto-mécanique d'une microbulle: application aux agents de contraste ultrasonore. Acoustique [physics.class-ph]. Tesis de doctorado. Université Francois Rabelais de Tours, Francais. 2015. P 5-15. Disponible en: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01256967>.  
COOK, Stanley S. Erosion by Water-Hammer. Proc. R. Soc. Lond. A (1928) 119, 441-488. DOI: 10.1098/rspa.1928.0107

CORREA HERNÁNDEZ, Carlos Eduardo. Relación entre resistencia a cavitación y propiedades Físico-químicas y mecánicas de recubrimientos poliméricos para aplicaciones en turbinas hidráulicas. Trabajo de maestría en ciencia de materiales, Universidad Nacional De Colombia. 2009.P 17.

DÍAZ ÁLVAREZ, Juan Carlos, *et al.* Estudio experimental sobre la eficiencia de un tratamiento de ultrasonido en un sistema de flujo continuo para la reducción de viscosidad de crudo pesado. Grupo de Investigación Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos – GMPH. Escuela de Ingeniería Química. Ecopetrol S. A – Instituto Colombiano del Petróleo, A.A. 4185.Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2013. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rion/v26n2/v26n2a06.pdf>

DOPAZO, César. ¿Cavitar o no cavitar? - La inevitable ubicuidad de las burbujas. Ed. Real Academia de Ingeniería. 2008. P 10-11

EARLS BRENNET, Christopher. Cavitation and bubble dynamics: © Oxford University Press. 1995. P.84. ISBN 0-19-509409-3. Disponible en: <https://authors.library.caltech.edu/25017/5/BUBBOOK.pdf>

ECUACIÓN. Relación entre la velocidad de chorro saliente y presión de la onda de choque generado por una burbuja. Página 18. S.F. Tesis. Anónimo. Consultado en agosto 12 de 2018. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22520/Capitulo1.pdf>

FUERTE, Manuel, *et al.* Estado actual de la litotricia extracorpórea mediante ondas de choque. Servicio de Urología. Hospital Clínico Universitario San Carlos. Universidad Complutense de Madrid. Unidad de Litotricia. Hospital Ruber Internacional de Madrid.

JEAN-PIERRE, Franc; JEAN MARIE, Michael. Fundamental of Cavitation. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS. 2005. Springer Science + Business Media, Inc. P.16,25. ISBN: 1-4020-2233-6

KIM, Ki-Han, *et al.* Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction. Fluid Mechanics and Its Applications, Volume 106. Springer Science+Business Media Dordrecht .(2014). ISBN 978-94-017-8538-9. DOI 10.1007/978-94-017-8539-6

LAUTERBORN, Werner; KURZ, Thomas. Physics of bubble oscillations. [Base de datos en línea]. 10 September 2010. IOP Publishing. P 3-4, 23-24, 68-69. (Recuperado en 4 de febrero 2017). Disponible en: [stacks.iop.org/RoPP/73/106501](http://stacks.iop.org/RoPP/73/106501)

LU, Hai-long; *et al.* Research and application of ultrasonic wave cleaning technique in cleaning surgical tool. Hebei Journal of industrial science and technology, China. Mayo. 2009

NIÑO RAMIREZ, Juan Pablo; MENDEZ SUAREZ Jorge Andrés y SALAS LOZANO, Lorena del Pilar. Diseño y construcción de un prototipo de cavitación acústica, con fines de limpieza industrial. Tesis de ingeniería de sonido. Bogotá D.C: Universidad de San Buenaventura. Facultad de ingeniería, 2010, P 50

PAULINE, Labelle. Sonoporation de cellules adhérentes par cavitation inertielle régulée. Acoustics. Université Claude Bernard - Lyon I. French, 2014.

RAYLEIGH, Lord 'VIII. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity'.1917, Philosophical Magazine Series 6,34:200 94-98. DOI:10.1080/14786440808635681.

ROMO ARANGO, Sebastian Andrés. Evaluación de la resistencia a la erosión por cavitación de superficies texturizadas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2013. P 6-8.

SHIJI Hattory; NORIHIRO, Mikamy. Cavitation erosion resistance of stellite alloy weld overlays. Science Direct. ELSEVIER. University of Fukui. Japan. 2009.

URTEAGA, Raúl. Concentración de energía en sonoluminiscencia. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica. Instituto Balseiro, 2009. Disponible en: <http://campi.cab.cnea.gov.ar/fulltext/ft20488.pdf>

VELEZ, L. M. Materiales industriales. Teoría y aplicaciones. ITM. (2008). Citado por: TOVAR OLIVA, Mayra Sareth. Estudio del fenómeno de erosión en materiales metálicos. México D.F. Tesis de maestría en ingeniería de manufactura. Instituto Politecnico Nacional. 2012. p. 25.

WAN, Mingxi; FENG, Yi & HAAR, Gail ter. Cavitation in Biomedicine Principles and Techniques: Springer, 2015. p.255. ISBN 978-94-017-7254-9. DOI 10.1007/978-94-017-7255-6

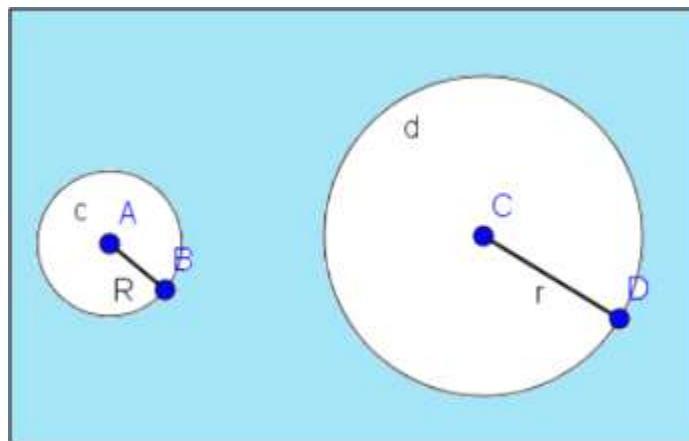
YASUI, kyuichi. Acoustic Cavitation and Bubble Dynamics. Springer, Cham. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. ISBN 978-3-319-68237-2. Japan. 2018. P 7. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68237-2>

## ANEXOS

### Anexo A. Ecuación Dinámica de Rayleigh-Plesset

Los primeros aportes a la descripción del comportamiento de la dinámica de la burbuja bajo las condiciones de un fluido incompresible, fue propuesto por Lord Rayleigh<sup>45</sup>, para ello imaginemos una burbuja esférica inmersa en un fluido infinito, y supongamos que inicialmente la burbuja tiene un radio  $R$ , en un tiempo  $t$ , siendo  $U$ , la velocidad de la interfaz liquido-gas (frontera) para el instante  $t$ .

Esquema grafico de la situación planteada.



Ahora si consideramos la velocidad de la frontera en un instante posterior  $t'$ , siendo  $t < t'$ , la velocidad para este instante será  $u$  y el radio asociado  $r$ . De modo que fijadas estas condiciones, se puede plantear los volúmenes de las burbujas para cada uno de los instantes sucesivos  $t$ ,  $t'$ . Por lo tanto las variaciones temporales de los volúmenes para cada instante de tiempo serán:

$$\frac{dV}{dt} = (4\pi R^2)U \quad (1)$$

<sup>45</sup> Rayleigh, Lord (1917) VII. On the pressure developed in a liquid during the collapse of spherical cavity', Philosophical Magazine Series 6, 34: 200, 94 -98

$$\frac{dV'}{dt'} = (4\pi r^2)u \quad (2)$$

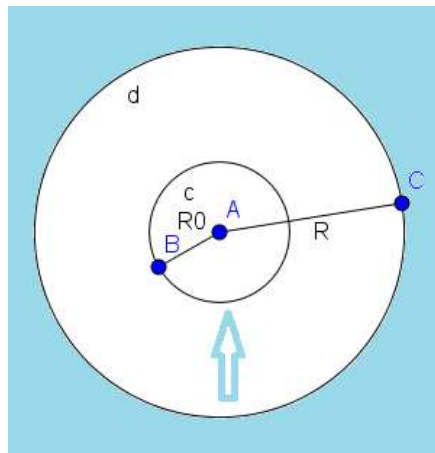
El modelo de Rayleigh se basa en la suposición de que estas variaciones temporales de los volúmenes son constantes, luego al igualar las expresiones (1) y (2), se obtiene la siguiente relación deducida por Rayleigh:

$$\frac{u}{U} = \frac{R^2}{r^2} \quad (3)$$

La energía cinética puede calcularse en la forma usual expresándola en términos de la densidad y en términos del diferencial de volumen, al utilizar la relación (3) la energía cinética dependerá solo de la coordenada radial, en la siguiente expresión se obtiene la energía:

$$E_k = \frac{1}{2} \rho \int_R^\infty u^2 (4\pi r^2) dr = 2\pi\rho U^2 R^3 \quad (4)$$

En este proceso, la expansión de la burbuja desde un radio  $R_0$  inicial hasta un radio  $R$  se considera adiabático, puesto que el proceso se considera casi instantáneo y entonces suele despreciarse el calor cedido del vapor de agua su contorno. El trabajo que realiza una presión  $p$  definida como diferencia de presión fuera de la burbuja y la presión en la superficie de la burbuja de gas deber ser igual a la energía cinética de la frontera. El vector en azul muestra la magnitud constante del campo de presión fuera de la burbuja a lo largo de la dirección radial.



Es decir la expresión para el balance de energía, se construye igualando (4) con el trabajo de expansión. El cálculo del trabajo está definido como el producto de la magnitud de las diferencias de presión fuera de la burbuja y la presión en la superficie de la burbuja, con la variación del volumen desde  $R_0$  hasta  $R$ .

$$\frac{4\pi(P_l - P_\infty)}{3}(R^3 - R_0^3) = 2\pi\rho U^2 R^3 \quad (5)$$

Al despejar el término que contiene  $R_0$  al lado izquierdo, y luego derivar con respecto a  $R$ , se obtiene que  $U = \frac{dR}{dt}$  y  $\frac{d^2U}{dr^2} = 2\frac{d^2R}{dt^2}$ . Esto conduce a la ecuación simplificada de Rayleigh-Plesset.

$$\rho \left[ R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \right] = (P_l - P_\infty) \quad (6)$$

El término  $P_l$  incluye la presión de vapor y la presión asociada a gases disueltos.

La modificación del modelo de burbuja se ha ido refinando, al agregar términos que involucran presiones que no se habían tomado en cuenta. Noltinck p y Nep (1950), utilizando el término de la ley de Laplace, introdujeron la diferencia de presión debido al efecto de la tensión superficial que se produce en la interfaz de gas-líquido. Esta presión debida a la tensión superficial se dirige hacia el centro de la burbuja, con magnitud de 2 veces la tensión superficial sobre el radio de la burbuja.

Otro parámetro físico que pasaba desapercibido se relaciona con la dinámica de fluidos externos de la burbuja, Poritsky,(1952) introdujo la viscosidad cinemática del fluido, para dicha configuración este término está relacionado con el amortiguamiento de la burbuja y pérdidas de energía, de manera que la ecuación (6) tiene dos términos de más, en consecuencia la complejidad de la solución del modelo aumenta a costo de que el modelo se acerca más a la dinámica real de la burbuja.

$$\rho \left[ R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \right] = \left( P_v + P_{g0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3k} - P_\infty - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} \right) \quad (7)$$

$$P_l = P_v + P_{g0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3k} \quad (8)$$

$P_v$  es la presión de vapor y  $P_{g0}$  es la presión de referencia una vez sobrepasa el radio inicial  $R_0$ ,  $k$  es la relación entre capacidad calórica a presión constante y la capacidad calórica a volumen constante.

Adicionalmente al modelo de Rayleigh- Plesset, existen otros modelos que describen todos los parámetros físicos de la burbuja en términos de sus propiedades radiales<sup>46</sup>. Ahora se toma en cuenta la compresibilidad de la burbuja, la difusión del calor, condensación, evaporación, el flujo de masa de gases través de la frontera etc., en ese caso la ecuación se reescribe como:

$$\left( 1 - \frac{\dot{R}}{c_L} + \frac{\dot{m}}{c_L} \right) R \ddot{R} + \frac{3}{2} (\ddot{R})^2 \left( 1 - \frac{\dot{R}}{c_L} + \frac{\dot{m}}{3c_L \rho_{LA}} \right) = \frac{1}{\rho_{LA}} \left( 1 + \frac{\dot{R}}{c_L} \right) \left[ P_B - P_s \left( t + \frac{\dot{R}}{c_L} \right) - P_\infty \right] + \frac{\dot{m}}{\rho_{LA}} R \left( 1 - \frac{\dot{R}}{c_L} + \frac{\dot{m}}{c_L} \right) + \frac{\dot{m}}{\rho_{LA}} \left( \dot{R} - \frac{\dot{m}}{2\rho_{LA}} + \frac{\dot{m}\dot{R}}{2c_L \rho_{LA}} \right) + \frac{R}{c_L \rho_\infty} \frac{dP_B}{dt} \quad (9)$$

Donde  $c_L$  es la velocidad del sonido del líquido en el infinito,  $\dot{m}$  es el flujo neto de evaporación por unidad de área y unidad de tiempo (positivo si el vapor es entrante)  $\rho_{LA}$ , es la presión del líquido en la superficie externa de la burbuja,  $P_B$  es la presión del líquido sobre la superficie externa de la burbuja,  $P_\infty$  es la presión ambiente en el infinito y  $P_s$  es la componente no constante de la presión de ultrasonidos dada por:

$$P_s = P_a \sin(\omega t - \phi) \quad (10)$$

<sup>46</sup> Puente, G F. Sonoluminiscencia y Cavitación en burbujas: Análisis Dinámico y de Estabilidad en Regiones altamente no lineales. Doctorado en ciencias de ingeniería, Instituto Balseiro, (2005).

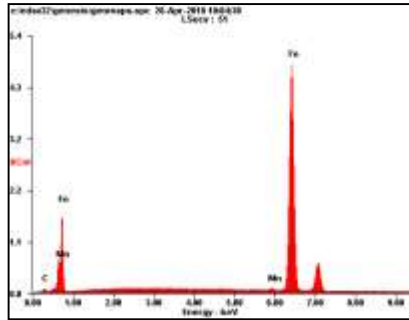
Donde  $P_a$  es la presión de ultrasonido  $w$  la frecuencia angular y  $\phi$  es la fase. La presión  $P_B$  sobre el líquido en la superficie de la burbuja se puede relacionar con la presión en el interior mediante.

$$P_B = \frac{R_g T a}{(v-b)v^2} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \left( \dot{R} - \frac{\dot{m}}{p_{LA}} \right) - (\dot{m})^2 \left( \frac{1}{\rho_{LA}} - \frac{1}{\rho_t} \right) \quad (11)$$

La viscosidad del líquido en la ecuación solo aparece en la condición de borde y a diferencia del modelo adiabático ahora la presión en el interior de la burbuja se describe mediante la ecuación de Van der Waals, los parámetros físicos que se tienen en cuenta es la transferencia de calor través de la interface liquido-mezcla, evaporación y difusión de las partículas de vapor, difusión de gases no condensables en la muestra, variación de la temperatura del líquido en función de la posición y el tiempo, variaciones térmicas debidas a procesos endotérmicos y exotérmicos producidos por la disociación de moléculas de vapor y de gases no condensables.

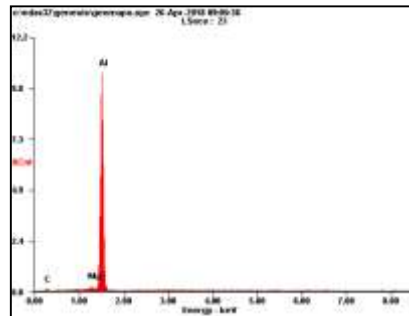
## Anexo B. Análisis de Composición Elemental de cada Muestra

### Acero 1020



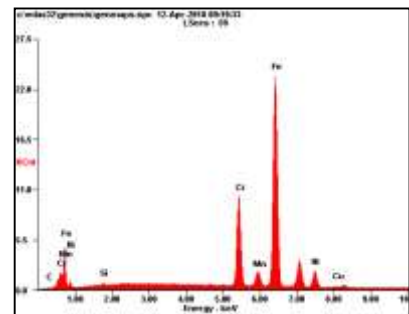
Element	Wt%	At%
CK	03.39	14.01
MnK	00.88	00.80
FeK	95.73	85.19

### Aluminio



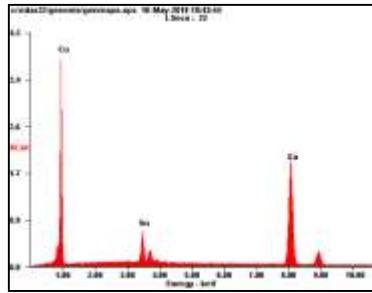
Element	Wt%	At%
CK	10.68	21.14
MgK	01.36	01.33
AlK	87.96	77.52

### Acero inoxidable



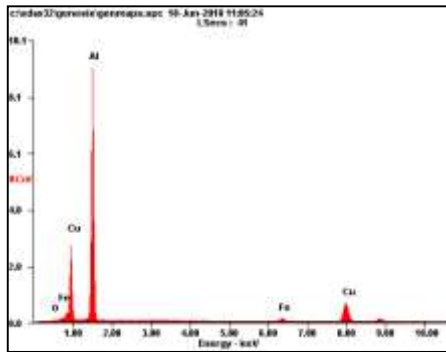
Element	Wt%	At%
CK	00.70	03.11
SiK	00.71	01.36
CrK	17.93	18.51
MnK	01.14	01.11
FeK	70.22	67.46
NiK	08.64	07.90
CuK	00.65	00.55

### Bronce



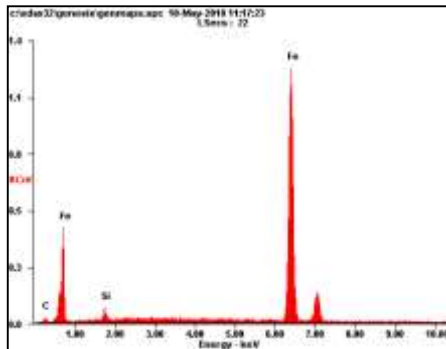
Element	Wt%	At%
SnL	15.91	09.20
CuK	84.09	90.80

### Aluminio-cobre



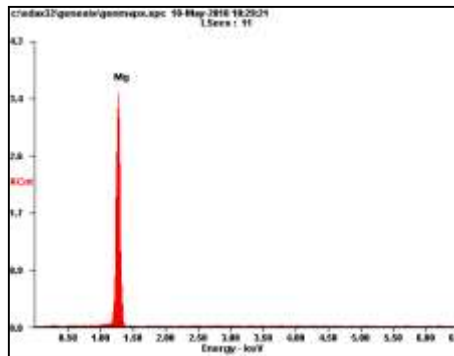
Element	Wt%	At%
CK	10.68	21.14
MgK	01.36	01.33
AlK	87.96	77.52

### Fundición gris.



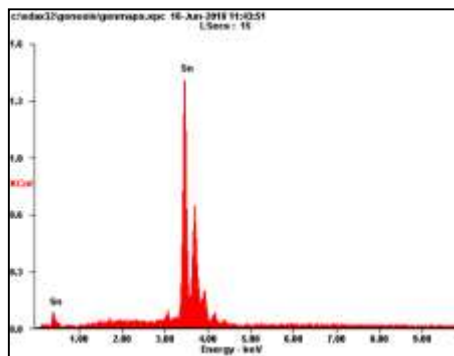
Element	Wt%	At%
CK	03.76	15.05
SiK	02.47	04.22
FeK	93.77	80.73

## Magnesio



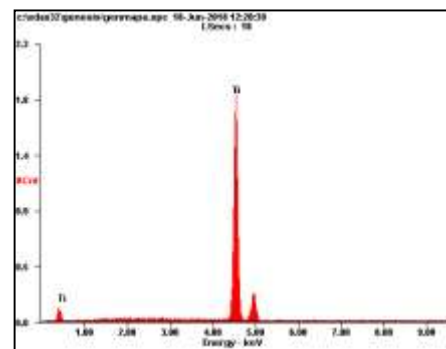
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>MgK</i>	100.00	100.00

## Estaño



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>SnL</i>	100.00	100.00

## Titanio



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>TiK</i>	100.00	100.00