

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Equipo para Pruebas de Resistencia a la Erosión por Cavitación por
Ultrasonido: Experimentación en Recubrimientos de Carburo de
Tungsteno por HVOF según la norma ASTM G32-16**

Juan José Giler Morán

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de Ingeniero
Mecánico

Quito, 10 de mayo de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Equipo para Pruebas de Resistencia a la Erosión por Cavitación por
Ultrasonido: Experimentación en Recubrimiento de Carburo de
Tungsteno por HVOF según la norma ASTM G32-16**

Juan José Giler Morán

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Alfredo Valarezo Ph.D.
Docente Departamento de Ingeniería
Mecánica

Firma del profesor

Quito, 10 de mayo de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Juan José Giler Morán

Código: 00124313

Cédula de Identidad: 1311339962

Lugar y fecha: Quito, 10 de mayo de 2019

RESUMEN

La erosión por cavitación es un fenómeno que afecta a turbinas y bombas de manera gradual y que eventualmente si no se toma medidas correctivas generan daños irremediables. Un equipo para medir la resistencia a la erosión ha sido implementado en este proyecto de titulación para realizar experimentos recreando el efecto de cavitación con un transductor piezoeléctrico bajo una configuración específica usando la norma ASTM G32-16 (*Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus*). El método usado bajo la norma es el de espécimen estacionario, donde se evaluó dos materiales. El primero, una Aleación de Aluminio 6061 como referencia estándar y el segundo, un recubrimiento compuesto por Carburo de Tungsteno por HVOF para observar el funcionamiento del equipo específicamente. Se realizaron 5 ensayos con cada material, respectivamente, donde se determinó finalmente los factores de variabilidad que afectan a los resultados de cada prueba. Finalmente, se demostró la confiabilidad del ensayo en el equipo bajo la norma ASTM G32-16 sobre las probetas y se demostró la superior resistencia del recubrimiento sobre el sustrato analizado, es decir, un material cementado y un material dúctil, respectivamente.

Palabras clave: Erosión, Cavitación, Ultrasonido, Turbinas, Recubrimientos, Resistencia a Erosión, Método Especimen Estacionario.

ABSTRACT

Erosion by cavitation is a phenomenon that affects turbines and pumps gradually and that eventually, if corrective measures are not taken, they cause irreparable damage. An equipment to measure erosion resistance has been implemented in this undergraduate project to perform experiments recreating the cavitation effect with a piezoelectric transducer under a specific configuration using ASTM G32-16 (Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus). The method used under the standard is the stationary specimen, where two materials were evaluated. First, an Aluminum Alloy 6061 as a standard reference and second, a coating composed of Tungsten Carbide by HVOF to observe the operation of the equipment under specific conditions. Five tests were carried out with each material, respectively, where the variability factors that affect the results of each test were eventually determined. Finally, the reliability of the test in the equipment under the ASTM G32-16 standard on the test pieces was demonstrated and the superior resistance of a cemented material over a ductile material was demonstrated.

Key Words: Erosion, Cavitation, Ultrasound, Turbines, Coatings, Erosion Resistance, Stationary Specimen Method.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	11
TEORÍA Y ANÁLISIS	18
Análisis de la longitud del Horn.....	18
Módulo de Refrigeración de Agua.....	20
Curvas de Erosión	21
METODOLOGÍA.....	23
Materiales	23
Requerimientos.....	24
Condiciones de Experimentación.....	26
Componentes del Equipo.....	27
Transductor Piezoeléctrico.....	27
Horn.....	28
Generador Ultrasónico.....	28
Sistema de enfriamiento de agua.....	29
Obtención de Muestras para Experimentación	29
Operación del Equipo	30
Calificación del Equipo y Diferencia entre Métodos	31
Procedimiento General	34
RESULTADOS.....	39
Equipo Final.....	39
Presupuesto	46
Pruebas de Erosión por Cavitación.....	47
Pruebas en Aleación de Aluminio 6061 T6.....	47
Probeta 1	48
Probeta 2	51
Probeta 3	53
Probeta 4	56
Probeta 5	58
Resumen Experimentación.....	61
Análisis de Resultados Gráfica Pérdida de Masa Acumulada	61
Análisis de Resultados Gráfica Tasa de Erosión	64
Pruebas en Recubrimiento con Carburo de Tungsteno.....	67

Probeta 1	68
Probeta 2	70
Probeta 3	72
Probeta 4	74
Probeta 5	76
Resumen de Experimentación	77
Análisis de Resultados Gráfica de Pérdida de Masa Acumulada	78
Análisis de Resultados Gráfica de Tasa de Erosión	82
Comparativa mediante MDE Acumulado entre Aleación Aluminio 6061 y Carburo de Tungsteno.....	87
CONCLUSIONES.....	89
REFERENCIAS.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones General del equipo.....	16
Tabla 2. Requerimientos para equipo de pruebas de erosión por cavitación ...	25
Tabla 3. Registro de información para resultados de experimentación.....	35
Tabla 4. Presupuesto del equipo completo	46
Tabla 5. Resumen de datos para set de pruebas.....	48
Tabla 6. Datos obtenidos para probeta 1	48
Tabla 7. Progreso de erosión por cavitación para probeta 1	49
Tabla 8. Datos obtenidos para probeta 2	51
Tabla 9. Progreso de erosión por cavitación para probeta 2.....	51
Tabla 10. Datos obtenidos para probeta 3	53
Tabla 11. Progreso de erosión por cavitación para probeta 3.....	53
Tabla 12. Datos obtenidos para probeta 4	56
Tabla 13. Progreso de erosión por cavitación para probeta 4.....	56
Tabla 14. Datos obtenidos para probeta 5	58
Tabla 15. Progreso de erosión por cavitación para probeta 5.....	59
Tabla 16. Tabla resumen para datos obtenidos en el set de probetas.....	61
Tabla 17. Datos obtenidos para probeta 1	68
Tabla 18. Datos obtenidos para probeta 2	70
Tabla 19. Datos obtenidos para probeta 3	72
Tabla 20. Datos obtenidos para probeta 4	74
Tabla 21. Datos obtenidos para probeta 5	76
Tabla 22. Resumen para datos obtenidos en el set de probetas	78
Tabla 23. Valores de MDE acumulado para 50 μm y 100 μm	88

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Esquema de Generador-Transductor-Horn.....	15
<i>Figura 2.</i> Configuración del Sistema	24
<i>Figura 3.</i> Parámetros de representación en el comportamiento de la Curva de Tasa de Erosión Acumulado vs Tiempo Acumulado (ASTM International, 2016)	36
<i>Figura 4.</i> Horn seleccionado.....	39
<i>Figura 5.</i> Simulación del horn para obtención de frecuencia natural.....	40
<i>Figura 6.</i> Configuración módulo de enfriador de agua	42
<i>Figura 7.</i> Curva de Temperatura para monitoreo	42
<i>Figura 8.</i> Placa Principal.....	44
<i>Figura 9.</i> Placa Auxiliar para sistema de enfriamiento mejorado.....	45
<i>Figura 10.</i> Esquema real del equipo.....	46
<i>Figura 11.</i> Muestras iniciales.....	48
<i>Figura 12.</i> Pérdida de masa acumulada de probeta 1.....	50
<i>Figura 13.</i> Tasa de erosión de probeta 1	50
<i>Figura 14.</i> Pérdida de masa acumulada de probeta 2.....	52
<i>Figura 15.</i> Tasa de erosión de probeta 2	53
<i>Figura 16.</i> Pérdida de masa acumulada de probeta 3.....	55
<i>Figura 17.</i> Tasa de erosión de probeta 3	55
<i>Figura 18.</i> Pérdida de masa acumulada de probeta 4.....	57
<i>Figura 19.</i> Tasa de erosión de probeta 4	58
<i>Figura 20.</i> Pérdida de masa acumulada de probeta 5.....	60
<i>Figura 21.</i> Tasa de erosión de probeta 5	60
<i>Figura 22.</i> Pérdida de Masa Acumulada respectivo de cada probeta usada en el conjunto.....	62
<i>Figura 23.</i> Gráfica con datos promedios de MDE del conjunto de pruebas con Aluminio 6061.....	64
<i>Figura 24.</i> Tasa de erosión respectivo de cada probeta usada en el conjunto. 65	
<i>Figura 25.</i> Gráfica con datos promedios de tasa de erosión del conjunto de pruebas con Aluminio 6061	66
<i>Figura 26.</i> Probetas Recubiertas con Carburo de Tungsteno	68
<i>Figura 27.</i> Estado final de Probeta 1	69
<i>Figura 28.</i> Pérdida de Masa Acumulada probeta 1	69
<i>Figura 29.</i> Tasa de Erosión probeta 1	70
<i>Figura 30.</i> Estado final de Probeta 2	71
<i>Figura 31.</i> Pérdida de Masa Acumulada probeta 2	71
<i>Figura 32.</i> Tasa de Erosión probeta 2.....	72
<i>Figura 33.</i> Estado final de Probeta 3	73
<i>Figura 34.</i> Pérdida de Masa Acumulada probeta 3	73
<i>Figura 35.</i> Tasa de Erosión probeta 3	74
<i>Figura 36.</i> Estado final de Probeta 4	75
<i>Figura 37.</i> Pérdida de Masa Acumulada probeta 4	75
<i>Figura 38.</i> Tasa de Erosión probeta 4	76
<i>Figura 39.</i> Estado final de Probeta 5	76

<i>Figura 40.</i> Pérdida de Masa Acumulada probeta 5	77
<i>Figura 41.</i> Tasa de Erosión probeta 5	77
<i>Figura 42.</i> Tasa de erosión respectivo de cada probeta usada en el conjunto. 79	
<i>Figura 43.</i> Gráfica con datos promedios de tasa de erosión del conjunto de pruebas con Recubrimiento de Carburo de Tungsteno.....	80
<i>Figura 44.</i> Perdida Volumétrica Acumulada	81
<i>Figura 45.</i> Pérdida Volumétrica Acumulada – Investigación (Lamana et al., 2018)	82
<i>Figura 46.</i> Tasa de erosión respectivo de cada probeta usada en el conjunto. 83	
<i>Figura 47.</i> Gráfica con datos promedios de tasa de erosión del conjunto de pruebas con Recubrimiento de Carburo de Tungsteno.....	84
<i>Figura 48.</i> Tasa de Erosión Volumétrico	86
<i>Figura 49.</i> Tasa de Erosión Volumétrico - Investigación (Lamana et al., 2018) 86	
<i>Figura 50.</i> Curvas de MDE promedio para ambos conjuntos de probetas	88

INTRODUCCIÓN

El ultrasonido de alta potencia acústica ha sido usado durante varios años en procesos integrales industriales de limpieza, homogenización, emulsificación, entre otros. Desde el año 1955 (ASTM International, 2016), se implementó una norma, ASTM G32 (*Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus*), para pruebas de erosión por cavitación usando un aparato vibratorio. Dicho aparato vibratorio que se denomina de manera técnica, transductor, es capaz de convertir energía eléctrica en deformaciones mecánicas a frecuencias de trabajo del orden de los mil Hertz. Desde la fecha de publicación de la norma se han establecido varios parámetros de operación del equipo de pruebas tales como materiales, configuración, manufactura de probetas, procedimiento de experimentación, entre otros factores.(ASTM International, 2016).

La erosión por cavitación es un fenómeno que aparece en todas las turbinas hidráulicas y bombas en aplicaciones de mediana y gran escala. El desgaste que se produce es tan significativo que puede dejar inutilizados a los álabes de la turbina o de la bomba, para solventar este problema se aplican tratamientos superficiales sobre su superficie para aumentar considerablemente la vida útil de la turbina o bomba durante la actividad cíclica de la misma, se trata de mejorar considerablemente la resistencia a la fatiga y al desgaste del componente. Los recubrimientos que se usan industrialmente son basados en aleaciones de carburo de tungsteno (WC) y de cobalto (Co) en su mayoría para producir tal efecto de protección contra la erosión por cavitación. Se emplean dichos componentes (WC - Co) principalmente debido a la alta dureza y resistencia al impacto que brindan al recubrir una superficie específica (Kumar, Chittosiya, & Shukla, 2018). Como se mencionó anteriormente las burbujas que se generan

por cavitación implosionan sobre la superficie generando un impacto cíclico que durante un tiempo genera daños considerables y pérdidas de masa, debido a tal situación los recubrimientos mencionados se usan para mitigar la situación. Las técnicas de deposición se realizan actualmente con High Velocity Oxy- Fuel (HVOF) y Detonation Gun (DS), donde la deposición de múltiples capas es un factor que ayuda a eliminar la porosidad del recubrimiento y mejora la adhesión con el sustrato en el que se realiza el depósito de material (Kumar et al., 2018). Cabe recalcar que comercialmente existen también otras aleaciones basadas de cobalto que se las conoce como Stellite (Co-based alloys) para la misma aplicación, y existen varios tipos de composiciones según los elementos que comprenda y propiedades mecánicas como dureza, densidad, esfuerzo de cedencia, esfuerzo de fractura, entre otros. Stellite 6 presenta alta resistencia en cuanto a erosión por cavitación debido a las propiedades mecánicas que le brinda al sustrato (dureza y tenacidad) y es usado ampliamente para combatir el fenómeno de la cavitación (Hattori & Mikami, 2009).

Las pruebas que normalmente se realizan son de campo, es decir, se llevan pruebas de desgaste "*insitu*" que pueden extenderse a tiempos relativamente grandes y el comparar distintos tipos de recubrimientos llega a ser una tarea complicada y en algunos casos no realizable. En el Ecuador, el principio del ultrasonido es una tecnología poco explotada y conocida dentro de varios sectores industriales. Si bien es cierto dentro de los ensayos no destructivos se usa un equipo que de igual manera lleva incorporado un transductor para analizar la velocidad de onda de propagación que se produce en el material y así determinar fallas dentro del mismo. Actualmente, dentro del país se han desarrollado varios trabajos de titulación acerca del estudio del fenómeno de

cavitación en bombas y turbinas, así como modelos matemáticos para determinar el área de daño en base a la energía liberada en el material, mas no cuanta masa se pierde por dicho fenómeno. Mediante este trabajo de titulación se incorpora una metodología nueva a nivel nacional para evaluar la pérdida de masa de un material sometido a cavitación dentro de un laboratorio. Existen investigaciones sobre este tema a nivel mundial, pero localmente no existen progresos establecidos en cuanto a la erosión por cavitación usando un transductor piezoeléctrico. Es importante la implementación de un equipo de pruebas de resistencia a la erosión por cavitación en nuestro medio ya que abre las puertas a futuras investigaciones dentro del campo de los tratamientos superficiales resistentes al fenómeno planteado a lo largo del documento. Lo fundamental del equipo es su estabilidad y patrones de datos que también dependen particularmente de la composición del recubrimiento superficial.

En el 2018, el 71.17% de energía generada en el Ecuador se obtiene a través de método hidráulicos (Corporación Eléctrica del Ecuador, 2018). Es decir, que existen varias instalaciones dentro del país para cubrir tal porcentaje de generación de energía, se basan en centrales hidroeléctrica la cuales trabajan con turbinas que se encuentran en constante operación y mantenimiento para soportar grandes cargas dinámicas que se producen a lo largo de la actividad. Cabe recalcar que la cavitación es un fenómeno que va a existir en mayor o menor escala dependiendo la configuración del sistema, sin embargo, su presencia acorta de manera significativa el tiempo de vida de una turbina. Como se mencionó anteriormente los recubrimientos son usados para prevenir ese recorte de vida útil de álabes de una turbina, sin embargo, las técnicas usadas son en su mayoría "in situ" lo cual demanda mayor exigencia de recursos. Por tal

razón un procedimiento de laboratorio estandarizado y que se realice en un corto periodo de tiempo que permita discernir entre varias opciones de tratamientos superficiales y escoger la óptima, resulta conveniente para disminuir costos y tiempos muertos en recuperación/repación de turbinas.

Con el equipo de pruebas para evaluar la resistencia de un material a erosionar por cavitación se pretende conseguir un sistema funcional y estandarizado que permita realizar experimentos reproducibles y estables para evaluar diferentes tipos de recubrimientos superficiales tales como el carburo de tungsteno (evaluado en este proyecto de titulación) y Stellite 6. Además, puede ser usado como herramienta para realizar futuras investigaciones en composiciones de tratamientos superficiales con diferentes compuestos que presenten propiedades adecuadas para ser resistentes a la erosión por cavitación, abriendo de tal manera un campo de estudio para intervenciones de interés a la ingeniería de materiales enfocada en este tipo de fenómeno que actualmente representa un problema a nivel industrial sobre todo en el Ecuador que tiene un gran porcentaje de energía generada a través de medios hidráulicos donde la intervención de turbinas es constante. Debido a que el equipo es para uso en laboratorio, un procedimiento y manual de usuario es necesario para futuros usos, el cual también juega papel importante como objeto final del desarrollo del trabajo de titulación.

La configuración general del dispositivo se compone de un transductor, un generador ultrasónico y un accesorio del transductor ("*horn*") que va roscado a la parte inferior del transductor. Para mayor facilidad de entendimiento a lo largo del documento se definirá mediante el esquema cuales son estos 3 componentes vitales para las pruebas de erosión por cavitación.

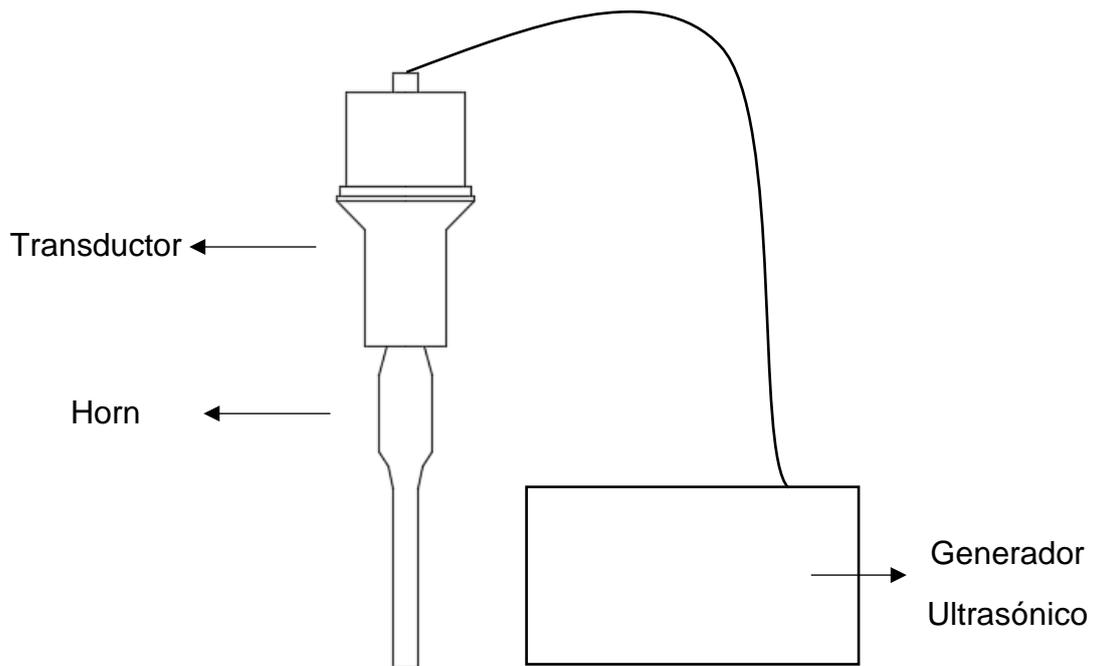


Figura 1. Esquema de Generador-Transductor-Horn

La función principal del “horn” (se llamará a este elemento por su nombre en inglés a lo largo del documento) es permitir que se alcancen amplitudes elevadas necesarias para reducir la presión en el área de prueba del fluido y que se generen burbujas a temperatura ambiente (Gugulothu, Kumar, & Deekshith, 2012). Con los dispositivos mencionados es factible generar el efecto de cavitación a condiciones de laboratorio controlables. El parámetro más importante para medir será la pérdida de masa durante un tiempo determinado a configuraciones establecidas en la norma ASTM G32-16 bajo el método de espécimen estacionario. Existen mediciones de temperatura del fluido que determinarán condiciones iniciales del experimento para efectos de reproducibilidad, además la presión atmosférica del lugar en donde se realicen las pruebas variará los valores de pérdida masa con respecto a si las pruebas se realizarán en un país con diferente altitud en cuanto a localización, dichos temas se tratarán al largo del desarrollo del documento. La frecuencia viene

determinada nominalmente por el transductor y la amplitud del sistema es un factor que se controla desde una fuente de generación ultrasónica regulable (Peshkovsky & Peshkovsky, 2007a). A continuación, se presenta en resumen las especificaciones actuales del equipo con el que llevó acabo la experimentación de recubrimientos según los requerimientos:

Tabla 1. Especificaciones General del equipo

Componentes	Especificación
Transductor Piezoeléctrico	1500 KW, 20 KHz
Horn (Probeta)	Aleación de Titanio (dimensiones respectivas para frecuencia natural de 20 KHz).
Generador Ultrasónico	Output 1500 KW (Regulable), 20 KHz
Sujetador (Transductor + Horn)	Acero Inoxidable con regulación
Sujetador (Muestras)	Capacidad de 1 pulgada (placas y ejes)

Con respecto a los parámetros de operación serán detallados en la sección de materiales y métodos, donde se explicará con mayor detalle el procedimiento de selección de componentes y consideraciones especiales tales como: sensores de temperatura, sistemas de refrigeración, entre otros.

Cabe destacar que existen dos métodos para pruebas de erosión por cavitación según la norma G32-16. En el método directo la muestra a evaluar va roscada en el extremo del horn, mientras que en el método de espécimen estacionario se coloca la muestra sobre una base regulable, es decir, que existe una distancia entre el extremo del horn y la superficie de la muestra. Como se mencionó anteriormente el segundo método es el que va a ser empleado y se debe a que dicho procedimiento permite evaluar tratamientos/recubrimientos superficiales gracias a que se produce gran implosión de burbujas sobre la superficie de interés durante el proceso. Dado que existe una distancia entre el horn y la muestra, es necesario buscar la configuración óptima ya que no existe

una estándar para todos los procesos. Razón por la cual es pertinente encontrar dicha distancia para las pruebas que se van a realizar de acuerdo con el tipo de tratamiento superficial que se pretende evaluar, se recomienda en su mayoría usar una distancia de $500 \mu m$ (Chahine, Franc, & Karimi, 2014).

TEORÍA Y ANÁLISIS

Análisis de la longitud del Horn

El horn es el accesorio que permite la amplificación del efecto vibratorio y ayuda a que sea factible recrear el fenómeno de cavitación en la siguiente sección se detalla su funcionalidad e importancia dentro del equipo. La manera en la que se obtuvo el horn, fue en primer lugar observar los tipos que existían y que eran adecuados según la norma para el efecto en específico, además de las restricciones que se generan al momento de montar un equipo de cavitación. Dentro de la investigación que se generó se conoce que el piezoeléctrico genera deformaciones de manera axial al eje del horn (Peshkovsky & Peshkovsky, 2007). Una vez definido el tipo de horn que se desea emplear ya sea de tipo exponencial o escalonado, los cuales aparecen dentro de la norma y son los más fáciles de maquinar es importante conocer la frecuencia a la cual trabaja el transductor. Bajo ese parámetro se debe calcular la longitud del horn para que su frecuencia natural sea igual al aparato vibratorio por cuestiones de eficiencia dentro del proceso. Bajo estas condiciones es posible relacionar la velocidad de propagación del sonido con la frecuencia del sistema para encontrar la longitud de onda respectiva, λ (Rao, 2012).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Donde:

c = velocidad de propagación de onda en el material específico [m/s]

f = frecuencia [Hz]

Dado que se conoce f ya que es el valor nominal de operación del transductor, solo queda encontrar el valor de c que se encuentra en diversas tablas de propiedades del material.

Finalmente, para encontrar la longitud aproximada del horn se usa la siguiente relación que nace de usar el primer modo de vibración para el diseño del horn, en donde se obtiene la mitad de longitud de onda (Nad, 2010).

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Para observar de manera intuitiva el desplazamiento que realiza el horn en el equipo se realizó una simulación en SolidWorks con el fin de observar la frecuencia natural en cuestión de un cilindro de material específico para una frecuencia natural respectiva, por lo que eventualmente se usará como ejemplo el caso particular de 20 KHz, el cual es el comportamiento actual del equipo. Además, el diseño cuenta con varias eliminaciones de aristas vivas y perforaciones que afectan de manera real la frecuencia natural final y que por ende resulta ser un diseño iterativo en el que intervienen factores de experiencia. El software es usado para el cálculo de la frecuencia natural del accesorio, en donde es importante observar que el modo de vibración sea aquel puramente axial al horn, el cual simula lo que sucede en la práctica. El procedimiento para la realización de esta simulación no será discutido puesto que requeriría una exploración mucho más profunda y se derivaría en un trabajo de investigación fuera del alcance de este trabajo de titulación en particular.

Módulo de Refrigeración de Agua

Dentro de la experimentación la temperatura es un factor importante, por lo que se implementó celdas Peltier y un intercambiador de calor para fluidos para mantener la temperatura constante de acuerdo a la norma. Para conocer la cantidad de energía que debe retirarse del sistema debido a la introducción de calor por parte del horn se midió experimentalmente la tasa a la cual se añade calor en el sistema, y se calculó con la ecuación (3):

$$Q = \frac{m_w c_p \Delta T}{t} \quad (3)$$

Donde:

m_w = Masa de agua [kg]

c_p = Calor específico del agua $\left[\frac{kg}{kj} \right]$

ΔT = La diferencia de temperatura [K]

t = Tiempo en que se alcanzó la temperatura final [s]

En la ecuación (3) se obtiene una tasa de calor correspondiente a una diferencia de temperatura en un tiempo específico. Por lo que se realizó un experimento para obtener la tasa de calor que entra, esto se realizó en una serie de experimentos en la que ya en posesión del generador ultrasónico, transductor y horn, se puso en marcha dicha configuración en un litro de agua, se observó el cambio de temperatura que existió en un tiempo en específico. Con lo cual se obtiene la tasa de energía añadida al sistema. De la misma manera para saber cuántos módulos Peltier se necesitan para contrarrestar el calor que es añadido por el horn se empleó la ecuación (3) usando solo la recirculación de agua con un módulo de enfriamiento. Un módulo de enfriamiento se compone de manera específica de una celda Peltier, un intercambiador de calor con las mismas

dimensiones de largo y ancho que la celda y un disipador de calor para mantener a la celda en operación. Esto es importante ya que se tomará como la referencia o unidad para saber cuántas celdas se necesitarán para controlar la temperatura y para establecer de manera real la tasa de calor que puede retirar del agua en un tiempo determinado.

Curvas de Erosión

De manera intuitiva se puede concluir que la pérdida de masa de un material se debe a la diferencia entre su masa en el estado 1 y su estado 2, luego de haber sido sometido a la cavitación.

En primer lugar, la siguiente relación representa las tasas de erosión que muestra el material a lo largo de todo el proceso de experimentación y como se mencionó en un inicio, este comportamiento es importante ver ya que dentro de dicha curva se logra visualizar la respuesta del material de manera gráfica a lo largo de los diversos intervalos de exposición (ASTM International, 2016). Para obtener la tasa de erosión se debe aplicar la siguiente ecuación para cada evento de masa erosionada:

$$\text{Tasa de Erosión} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (4)$$

Donde:

Δm = Pérdida de masa del material [*g*]

Δt = Tiempo de exposición respectivo para cada Δm [*min*]

En segundo luego, se debe mencionar que debido a que la norma dispone de una variable en particular para comparar diferentes tipos de probetas con densidades distintas, la ecuación que se emplea en lugar de la pérdida de

masas, es la de pérdida volumétrica la cual es catalogada en inglés como “Mean Depth Erosion” o MDE. Según la norma ASTM G32-16, el MDE se define como el promedio de la masa erosionada en un área específica del material, que normalmente se calcula dividiendo la masa erosionada para la densidad del material y luego dividiendo dicho valor para el área específica de la probeta que se está evaluando (ASTM International, 2016). Para el caso de comparar materiales con diferentes densidades se debe aplicar la relación con la masa acumulada perdida.

$$MDE = \frac{m_a}{\rho A} \quad (5)$$

Donde:

m_a = Pérdida de masa acumulada del material [g]

ρ = Densidad del material $\left[\frac{g}{\mu m^3}\right]$

A = Área del material sometida a cavitación [μm^2]

METODOLOGÍA

Para el desarrollo completo de las pruebas de resistencia a la erosión de los recubrimientos propuestos mediante el armado de un equipo que genera dicho fenómeno en base a vibraciones producidas por un piezoeléctrico, se deben establecer los parámetros y etapas que se tienen establecidas para cumplir con los objetivos propuestos. Cabe recalcar que en la norma usada para implementar el equipo existen dos métodos de experimentación: “direct method” y “stationary specimen method”. El segundo mencionado va a ser usado para el desarrollo del proyecto de titulación debido a la versatilidad que ofrece para el tamaño de muestras y la capacidad de evaluar recubrimientos, dicha condición será discutida en Condiciones de Experimentación en esta sección de Métodos.

Materiales

Para realizar las pruebas de erosión por cavitación es necesario contar con los siguientes materiales:

1. Transductor 20 KHz
2. Horn (Aleación de Titanio) diseñado para 20 KHz
3. Beaker (600 mL a 1000 mL)
4. Generador Ultrasónico
5. Espécimen de Prueba
6. Sistema de refrigeración
7. Base reguladora
8. Agua destilada (Temperatura Ambiente)
9. Balanza de precisión 0.1 mg

Con los materiales mencionados anteriormente se logra un ensayo completo para pruebas de resistencia a la erosión por el método escogido para el desarrollo del proyecto. De manera provisional se obtiene un esquema de la siguiente manera con los elementos centrales para las pruebas de erosión por cavitación sin tomar en cuenta el sistema de refrigeración y el generador:

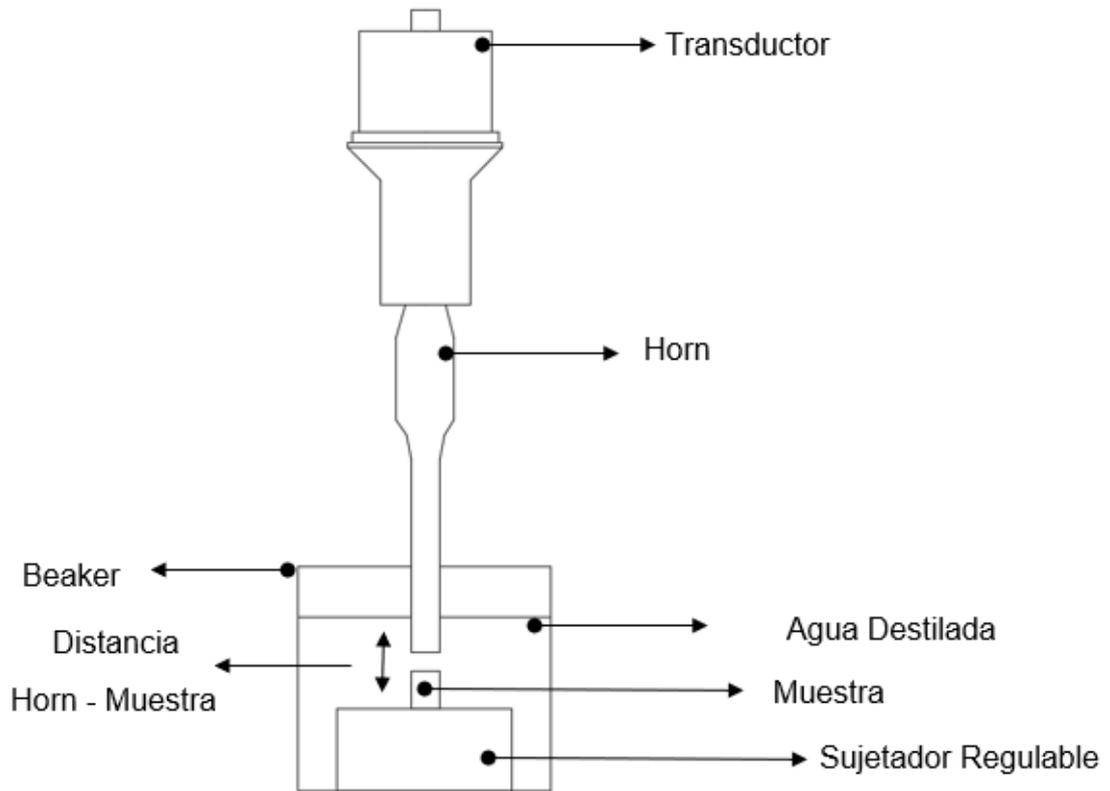


Figura 2. Configuración del Sistema

Requerimientos

El equipo que se plantea armar debe estar bajo la norma ASTM G32 (Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus) con el fin de que los resultados puedan ser repetibles. Para que se logre estar bajo la norma, existen parámetros fundamentales que deberán respetarse durante el procedimiento de experimentación, estos son relacionados con respecto a amplitud, diámetro del extremo del horn, frecuencia del sistema, temperatura del agua y cantidad de volumen

de agua dentro del beaker. A continuación, se presenta un cuadro en el que se especifican los valores nominales para cada condición que deber presentarse en el equipo para condiciones bajo normas ASTM G32-16:

Tabla 2. Requerimientos para equipo de pruebas de erosión por cavitación

Frecuencia	Transductor nominal de 20 KHz
Amplitud	50 micrones (potencia de entrada al transductor variable para alcanzar dichos valores).
Diámetro del extremo del <i>horn</i>	16 mm
Temperatura del agua	25 °C
Volumen de agua	600 mL a 1000 mL

Para las condiciones de calibración que se tratarán más adelante, es importante el observar constantemente varios parámetros durante el experimento como: frecuencia, potencia y tiempo de exposición. La amplitud es un parámetro que puede ser calibrada una única vez antes de empezar las pruebas y luego no necesita de monitoreo constante ya que es dependiente de la potencia de entrada al transductor y que se amplifica con el diseño específico del horn.

Existe una condición de calibración que son pruebas con materiales referenciales de la norma ya que la norma provee de estos resultados como punto de estándar y reproducibilidad, sin embargo, esto es realizado mediante el “direct method”, ya que el método de pruebas que se está implementado puede contribuir en variaciones significativas con el material estándar de calibración que provee la norma. La norma brinda tres materiales que pueden ser usados para las pruebas de calibración del equipo. Sin embargo, cabe mencionar que la diferencia de métodos impide que se pueda comparar de manera directa con la norma, por lo que se centrará a lo largo de este trabajo de titulación en que los resultados presenten repetibilidad entre cada probeta experimentada para el mismo material. Además, es importante tener en cuenta que la presión atmosférica como se manifestó anteriormente puede alterar los

resultados en cierto nivel, sin embargo, la norma permite dicha variación siempre y cuando sea mencionada en los datos que se presentan de manera definitiva.

Condiciones de Experimentación

Dentro de la norma usada existen algunos factores que deberán ser considerados para los procedimientos de experimentación para recubrimientos, debido a que se desvía de la prueba estándar llamado “método directo”, en el cual se establecen los parámetros de diseño para la forma geométrica del espécimen a evaluar, el cual va roscado directamente en el extremo del horn. En este método se presenta la desventaja de versatilidad de pruebas que se pueden realizar, además de que no se usa para evaluar recubrimientos superficiales en piezas

Como se mencionó anteriormente, el método a usar será el de “stationary specimen method”, la cual es válida para implementar dentro de la norma seleccionada. Dicho método permite evaluar recubrimientos en condiciones de erosión por cavitación, el cual cumple con los objetivos y visión aplicativa de este proyecto, en donde se pueda implementar para la inspección de resistencia del fenómeno estudiado en recubrimientos para hidroturbinas y bombas. Dentro de este método existe una base para sostener la pieza a someter a pruebas, se deberá encontrar en primera instancia una distancia óptima entre la superficie del espécimen y el extremo del horn, usualmente en los experimentos que se realizan bajo este método se coloca una distancia entre 0.5 mm a 0.7 mm de separación, debido a que se han observado resultados reproducibles con baja desviación estándar dentro del número de pruebas que se realizan. Además, para cumplir con la distancia de inmersión del horn dentro del fluido el sistema de transductor-horn tiene el grado de libertad para graduarse linealmente, en donde claramente se obtendría mayor control de la distancia en cada

experimento y se genera mayor repetibilidad de pruebas al cumplir con el parámetro de inmersión establecido por la norma y el de la distancia de separación entre el horn y la superficie de la probeta que se va a someter a este tipo de ensayo.

Con las condiciones mencionadas ya es posible la selección de materiales para el armado correspondiente del equipo y que funcione bajo condiciones de laboratorio establecidos por el estándar seleccionado para implementar las pruebas pertinentes.

Componentes del Equipo

Para la selección de componentes es importante mencionar que varios de ellos no se encuentran disponibles de manera comercial y debido a tal razón es fundamental conocer las características de cada uno para implementar de manera correcta dentro del sistema. A continuación, se detalla los 3 componentes que permiten la recreación del fenómeno de cavitación en condiciones de laboratorio controladas y adicionalmente se menciona acerca del sistema de refrigeración usado para mantener la temperatura del agua dentro de los requerimientos de la norma.

Transductor Piezoeléctrico.

Las características principales de este componente deben ser en base a su frecuencia y potencia máxima de operación, dado que es el actuador del equipo debe ser seleccionado en base a la frecuencia nominal de 20 KHz y tener una potencia mayor a 250 W. El valor de la potencia es recomendado por la norma, sin embargo, no ofrece la seguridad en cuanto si con dicha potencia y un diseño de horn específico vaya a alcanzar los 50 μm de desplazamiento en operación. Para la implementación del equipo mostrado en este proyecto de titulación se colocó un transductor piezoeléctrico de 1500 W como potencia máxima de entrada a 20 KHz, con lo cual se

cumple el parámetro de la frecuencia del sistema. Este tipo de transductor produce solo deformaciones axiales lo cual es compatible con el tipo de experimentos que se quiere llevar a cabo.

Horn

El horn es un accesorio que se coloca luego del transductor, tiene la función específica de aumentar las amplitudes que produce el transductor. En este elemento entran cuestiones de diseño que permiten que este accesorio tenga una frecuencia natural igual a la del transductor piezoeléctrico. Se conoce que los factores principales al diseño del horn se deben a la impedancia acústica del material que se está usando y el tipo de horn que se desee implementar, el cual deber tener los parámetros geométricos obtenidos mediante ecuaciones específicas e incluso se puede realizar un modelamiento en un programa de elementos finitos para verificar su frecuencia natural en un modo de vibración netamente axial o unidireccional perpendicular a la superficie del extremo del horn. Básicamente las ecuaciones brindan una aproximación de la longitud el horn, pero será trabajo luego de calibración para obtener una frecuencia natural de 20 KHz que se facilita con el uso de simulaciones respectivas. Como se mostró previamente para el diseño de horn existen algunos lineamientos que seguir y teorías de aproximación, pero siempre requieren arreglos luego del proceso de maquinado inicial para su correcto funcionamiento como se muestra dentro de las simulaciones en dónde eliminar aristas vivas ya tiene un efecto dentro de la frecuencia natural del accesorio, por lo que un proceso iterativo es necesario para su correcto diseño.

Generador Ultrasónico.

El generador ultrasónico es la principal fuente de alimentación del sistema, puesto que tiene la capacidad de enviar potencia ajustable a una frecuencia específica. Existen generadores de varias frecuencias, pero se seleccionó uno de 20 KHz con capacidades de alimentar en cuestiones de potencia al transductor usado. Se debe tener en cuenta también el rango ajustable de potencia ya que como se mencionó antes está ligado a la capacidad de producir mayor o menor amplitud con los cual se llega a cumplir otro requisito de la norma ASTM G32-16.

Sistema de enfriamiento de agua.

Para establecer el control de temperatura se implementa un conjunto de celdas Peltier con un intercambiador de calor para agua controlados por un Arduino. En primer lugar, las celdas Peltier se ubican de manera que logren retirar el calor del intercambiador de calor para enfriar de manera constante el agua. Dado que el horn añade una tasa de calor significativa es importante tener varios módulos Peltier actuando sobre el intercambiador de calor. Cada celda es controlada con el Arduino y la ayuda de los N-Channel Mosfet respectivo para cada celda en el cual se establecen los rangos de potencia que se van a manejar para cada módulo Peltier.

Obtención de Muestras para Experimentación

Las pruebas que se va a realizar para comprobar el funcionamiento del equipo van a consistir en dos sets de probetas. En el primer set se va a experimentar con sustratos de una aleación de aluminio 6061 T6, en el cual se van a extraer 5 probetas de 25mm de diámetro para realizar las pruebas correspondientes. Para el segundo conjunto de pruebas se va a experimentar con un recubrimiento de carburo de tungsteno, donde dicho recubrimiento fue ejecutado y donado por un cliente en

probetas de Acero Inoxidable 304, con un total de 5 muestras para completar el segundo conjunto de pruebas.

Operación del Equipo

Dentro del funcionamiento del equipo será intuitivo de manera que cualquier investigador pueda realizar experimento sin ningún problema. De manera general para proceder con un procedimiento de experimentación:

- a.** Limpiar el espécimen de prueba, se requiere que esté libre de grasas, aceites y polvo, para luego medir su masa en una balanza de precisión.
- b.** Colocar el espécimen dentro del sujetador y asegurar de manera que no permita el desplazamiento en ninguna dirección de la muestra.
- c.** Agregar agua destilada a 25 °C al beaker, en donde se ocupe un volumen de 600 mL a 1000 mL, es importante mencionar que para comparar dos o más tipos de recubrimientos se debe colocar la misma cantidad de agua.
- d.** Ajustar la distancia del horn con la probeta a un valor de 0.5 mm entre ambas superficies, dicho valor puede tener cierta variación, pero debe ser registrado y mencionado durante la presentación de resultados. Adicionalmente, se debe ajustar la distancia de inmisión del horn en el fluido y observar que el beaker se encuentre concéntricamente alineado con el horn.
- e.** Una vez realizado los ajustes principales, proceder a colocar la potencia preestablecida (77%) para una correcta amplitud durante la operación.
- f.** Establecer el tiempo de intervalo en el controlador para configurar el temporizador que indicará una alarma para avisar sobre la finalización del intervalo respectivo.

- g. Simultáneamente encender el transductor y presionar el cronómetro de la caja de circuitos, en donde empezará a correr un cronómetro. Observar que la temperatura se encuentre dentro de los 25 °C, para el correcto funcionamiento de las pruebas.
- h. Al final del primer intervalo se debe detener el equipo, quitar el espécimen de la base y proceder a usar algún método de limpieza (verificar norma para detalle de dichos métodos). Proceder a secar y pesar la muestra.
- i. Repetir los pasos 5 y 6 respectivamente, hasta que se produzca una tasa de erosión máxima, es decir, que el siguiente valor de tasa de erosión sea menor que el anterior (verificar que por lo menos 2 valores sean menores para efectos de confiabilidad).

Notas adicionales:

No usar ningún tipo de solventes para la limpieza en el paso 6, y si la superficie se encuentra porosa verificar que se haya secado de manera correcta antes de proceder con el peso. Una vez concluido el experimento es necesario cambiar el agua destilada por nueva, antes de empezar otro ensayo.

Calificación del Equipo y Diferencia entre Métodos

Debido a que se usa el método de espécimen estacionario o también llamado “alternativo” es importante recalcar la diferencia de métodos con los que fueron calculado los valores referenciales de la norma para cada material, en la cual se usa el método directo. En resumen la norma brinda valores de tiempo de incubación nominal t_0 , tiempo cuando $MDE = 50 \mu m (t_{50})$ y $MDE = 100 \mu m (t_{100})$ y un valor de tasa de erosión máxima en términos de pérdida volumétrica por unidad de área, respectivamente con sus desviaciones estándar. Si los valores obtenidos experimentalmente con un equipo en específico caen dentro de las desviaciones

estándar entonces implica que el set de experimentos está bajo norma. Sin embargo, como se explicó anteriormente la justificación de usar el método alternativo es debido a su aplicación dentro de los ensayos para recubrimientos. La diferencia entre ambos métodos recae además de su configuración inicial, en la manera en que se desarrollan las tasas de erosión, siendo la del método directo por lo menos 2 veces mayor que la del método estacionario con el mismo material, intervalos de tiempo y duración de experimentación. Adicionalmente, se observan diferencias en cuanto al patrón de erosión que se forma en la superficie del material que en el método directo el impacto se encuentra un área larga de erosión centralizada y puntual, mientras que en el segundo método se observa un efecto más disperso de erosión y se debe a la forma en la que las burbujas generadas impactan en la superficie del material, siendo en el primer caso, método directo, un contacto hemisférico y en el segundo caso se genera un impacto cilíndrico (Kim et al., 2014).

Es importante recalcar que no se puede realizar una comparación correcta bajo los valores referenciales y el método estacionario de la norma debido a que no existe un valor de equivalencia directo para todos los parámetros que brinda el estándar de comparación para cada material referencial y en la norma se especifica que no se pueden comparar valores de dos métodos distintos e incluso normalizando datos se presentan diferencias significativas cuando se usan métodos distintos, esto debido a lo que se manifestó previamente sobre las tasas de erosión que básicamente son el parámetro con mayor análisis dentro de los ensayos de erosión. Es importante que las variables que se controlen dentro del equipo son: temperatura, volumen del fluido, distancia horn-probeta, amplitud y frecuencia, mientras que existe una adicional la cual genera diferencias en cuanto a los valores nominales de la norma, siendo esta la presión atmosférica, que en cuestión de la norma solo pide que sea especificada si

esta varía significativamente con el resto de los países. Lo fundamental aquí es que se observe tendencias proporcionales a la que se generan con el método directo y que se produzca reproducibilidad entre cada una de las probetas realizadas, es decir, que dentro de los resultados que se genere dentro de una probeta no difieran en gran magnitud en cuanto a la media de masa perdida o el valor de tasa de erosión máxima, por ejemplo. En el procedimiento general se especificará de manera puntual los valores que deben estar registrados para cada probeta y que son objetos de comparación entre ellos para confirmar su similitud o diferencia. Se espera que los resultados para un mismo material contengan desviaciones estándar pequeñas entre ellas debido a que en teoría si se mantienen las variables controladas mencionadas es factible que las muestras analizadas posean entre ellas una variabilidad relativamente pequeña.

De igual manera se va a realizar las pruebas de erosión por cavitación en un material referencia por motivos de observación de datos y repetibilidad más que por efectos de calificación del equipo ya que por definición no se puede comparar resultados de ambos métodos. Mientras se conozca que los parámetros de operación se encuentran dentro del rango de lo que establece la norma se sigue que el equipo esta normalizado, sin embargo, no se pueden comparar con los valores que se muestran en la norma (ASTM International, 2016). Finalmente se obtendrán medias y desviaciones estándares para cada parámetro en específico, la cuales serán referentes para futuras experimentaciones del mismo material en el equipo. Este es otro punto importante ya que debido a que los intervalos de tiempos para cada probeta llegan a ser dependientes de cada investigador no se puede predefinir la desviación estándar general ya que dichos valores no serán comparables entre intervalos de tiempos diferentes.

Procedimiento General

Para un set de pruebas de un recubrimiento en específico, lo que se debe tener en consideración es principalmente el intervalo de periodos en el que se desea realizar las mediciones, en la norma se establecen varios valores para intervalos de tiempos según materiales específicos. Sin embargo, debido a que se están haciendo pruebas sobre recubrimientos, dichas recomendaciones no aplican en este estudio. Se recomienda empezar con intervalos pequeños de entre 5 a 15 min durante las primeras mediciones y luego se puede incrementar dicho intervalo de 30 min hasta 45 min de manera gradual.

El criterio de procedimiento que se va a implementar es basado en la medición continua de pérdida de masas hasta que la última tasa promedio de erosión o tasa de erosión acumulada haya alcanzado su punto máximo y comience a disminuir gradualmente, dependiendo del método o investigador este criterio podría variar pero debido al alcance del proyecto de titulación actual se procede a usar este criterio por cuestiones de resultados y verificación de operación del equipo. Para el efecto de medir la resistencia a la erosión en recubrimientos es necesario que el material base sea el mismo que del otro espécimen a analizar, ya que si la densidad del material es diferente del otro se debe aplicar otro método adicional para el reporte de resultados.

Para la presentación de resultados de manera general y generar el informe debe contener la siguiente información:

- a. De manera inicial se debe especificar una etiqueta respectiva del recubrimiento en la que se incluya información acerca de su composición, propiedades mecánicas y aplicaciones específicas de dicho recubrimiento.
- b. Método en el que se realizó la limpieza superficial para iniciar la experimentación.
- c. Números de especímenes testeados.

d. Presentar los datos obtenidos en las mediciones respectivas para los intervalos de tiempos determinados previamente y los registros de masa en una tabla como se presenta a continuación:

Tabla 3. Registro de información para resultados de experimentación

Tiempo Acumulado	Intervalo Tiempo	Masa del Espécimen
t [min]	Δt [min]	m [mg]

Dentro del informe de resultados se deberá presentar dos gráficas: Curva de Erosión Volumétrica Acumulada vs Tiempo Acumulado y Curva de Tasa de Erosión Acumulado vs Tiempo Acumulado. En la primera gráfica se va a observar el comportamiento del material durante el procedimiento de experimentación, sin embargo, el verdadero estudio está dentro de la segunda curva que es donde se establece las etapas de evolución de la pérdida de masa a través del tiempo y es donde se aplica el criterio mencionado anteriormente del pico máximo de tasa de erosión. A continuación, se presenta un esquema ideal de dicha curva:

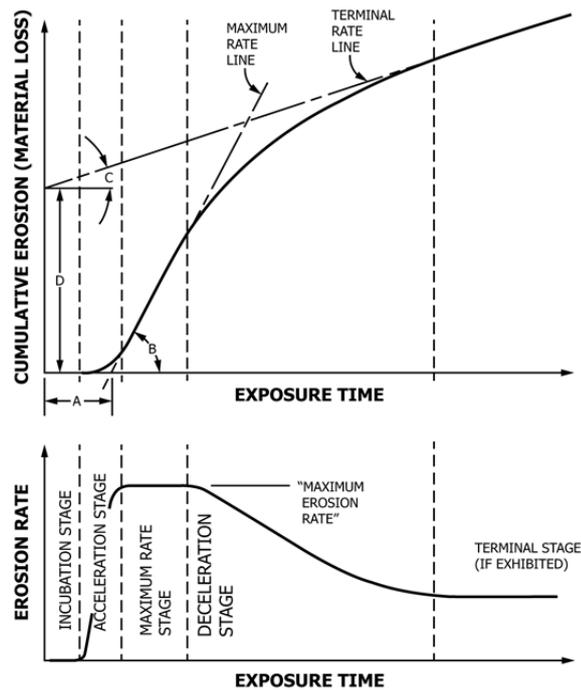


Figura 3. Parámetros de representación en el comportamiento de la Curva de Tasa de Erosión Acumulado vs Tiempo Acumulado (ASTM International, 2016)

En dicha curva se pueden observar las etapas que sufre el espécimen al ser sometido a dichas pruebas: Incubación, Aceleración, Tasa Máxima, Desaceleración, Etapa terminal. El objetivo de la experimentación es poder observar la tasa máxima de erosión como se planteó inicialmente además de visualizar varios patrones que posee la curva para cierto material respectivamente. Dependiendo del tipo de investigación que se requiera realizar, las zonas que se presentan en la imagen pueden ser localizadas. Este criterio puede cambiar cuando se experimenta con recubrimientos, en este caso específico es importante comparar las tasas de erosiones en términos volumétricos por unidad de área.

e. Resumir la información más relevante en cuanto a pérdidas de masa totales de los recubrimientos analizados. En esta sección es importante recalcar los siguientes valores en orden:

- Número de especímenes experimentados.

- Total de horas para cada probeta.
- Total de masa erosionada
- Tasa de erosión máxima
- Designación de t_{50} y t_{100} respectivamente para cada material.

f. Si se realizó pruebas con un mismo material es importante calcular la desviación estándar de cada parámetro mencionado en el paso anterior, es importante ya que indica la repetibilidad de datos y consolida la información sobre un material en específico, estas desviaciones no se especifican dentro de la norma, pero se requiere que su valor sea relativamente pequeño y que las medias no difieran tanto una de otra si se trata del mismo material.

g. Si se comparó dos materiales distintos presentar un análisis al comportamiento y realizar comparaciones entre los recubrimientos que se sometieron a las pruebas, de ser el caso. Adicionalmente, se debe especificar cualquier anomalía que existió durante las pruebas realizadas, de lo contrario especificar que no existieron.

Si se desea comparar dos materiales de diferente densidad, se lo deberá realizar en función de cuánto tiempo se demora en alcanzar un valor de MDE acumulado para cada probeta y la que contenga el mayor tiempo en alcanzar dichos valores establecidos será más resistente a la erosión por cavitación. Los valores se designan como t_{50} y t_{100} .

Consideraciones:

Aunque no es proceso dentro de la normativa ASTM G32-16, es importante colocar imágenes macroscópicas de los elementos cuando se visualice cambios en la superficie erosionada, esto con el fin de obtener un mejor entendimiento dentro del reporte en cuando a concatenar datos con las gráficas obtenidas. Además, se deberá

especificar en cada fotografía el tiempo de operación acumulado que tuvo hasta el momento de la fotografía. Dependerá del investigador seleccionar cada longitud de intervalo o en que tiempos específicos desea tomar las fotografías ya que no existe algún formato en específico.

RESULTADOS

Equipo Final

Con el modelo de horn que se planteó inicialmente fue manufacturado con una aleación de titanio que permite el funcionamiento correcto del equipo. Este incluye algunas modificaciones realizadas por la empresa manufacturera de ultrasonido. El transductor se encuentra en un case para facilitar su protección contra factores externos y permite la entrada de aire comprimido para retirar el calor que se produce por efectos del transductor. Esto permite que la operación del equipo no se interrumpa y la vida útil de los equipos se alargue.



Figura 4. Horn seleccionado

A continuación, se presentan una simulación realizada en SolidWorks, la cual brinda el valor de la frecuencia natural para la geometría que posee el horn. Cabe recalcar que la simulación es ilustrativa y solo tiene el fin de mostrar que bajo lo mencionado en la teoría y bajo una geometría en específico en conjunto con el material seleccionado es posible obtener una frecuencia natural que sea igual a la del transductor usado.

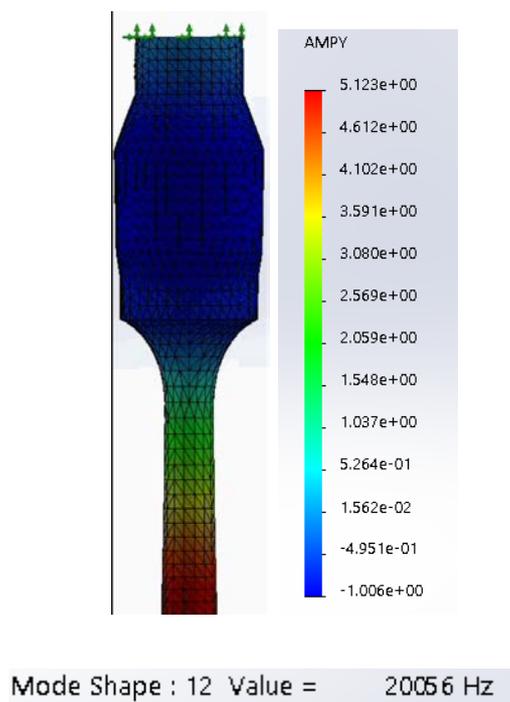


Figura 5. Simulación del horn para obtención de frecuencia natural

Como medida de aclaración en la figura 5, la distribución de colores se debe a una escala de amplitud y simplemente lo que indica es que las amplitudes más elevadas se encuentran en el extremo del horn, lo cual permite corroborar la teoría sobre el funcionamiento del horn.

Como se planteó la necesidad de controlar la temperatura dentro del proceso en tiempo real. Se encontró la tasa de calor que añade el horn, para lo cual también se

estableció la capacidad de retirar calor en un módulo de enfriamiento, como se estableció previamente un módulo de enfriamiento se definirá aquí como una celda, un intercambiador de calor para fluidos de igual, largo y ancho que la celda y un disipador de calor para controlar el calor que es liberado por el lado caliente de la celda Peltier. En repetidas pruebas se encontraron las tasas respectivas y finalmente se realizó un promedio de cada una de ellas para establecer un valor más real. Al final de las pruebas se estableció que la tasa de calor que añade el horn es de 68 W y que la capacidad para retirar calor de un módulo de enfriamiento es de aproximadamente 18 W. Cabe recalcar que estas tasas son específicamente bajo la configuración propuesta del banco de pruebas y no son teóricas de cada uno de los elementos. Entonces si cada módulo de enfriamiento tenía la capacidad de retirar 18 W, se planteó la suposición de que teniendo 4 módulos se iba a lograr anular el calor añadido por el horn para lograr un control de temperatura. Ahora es importante mencionar que con la ayuda de los mosfets y el Arduino es posible controlar los valores de potencia que ingresan a la celda, esto controla y modifica a las celdas de acuerdo con la necesidad que se presente, fue un método implementado en caso de que la temperatura empiece de decrecer durante las pruebas. Tras varias pruebas se encontró que para mantener al fluido en una temperatura constante se deber trabajar casi a máxima potencia ya que la configuración fue elegida justamente para eliminar la tasa de calor que era añadida por el horn.

De acuerdo con la sección de teoría y metodología, el sistema de enfriamiento posee la siguiente configuración real:



Figura 6. Configuración módulo de enfriador de agua

Adicionalmente, una curva con los datos de temperatura fue recopilada durante una prueba de 10 minutos, con el fin de ver como oscila la temperatura dentro de las pruebas y confirmar que esta se encuentre dentro del rango establecido por la norma.

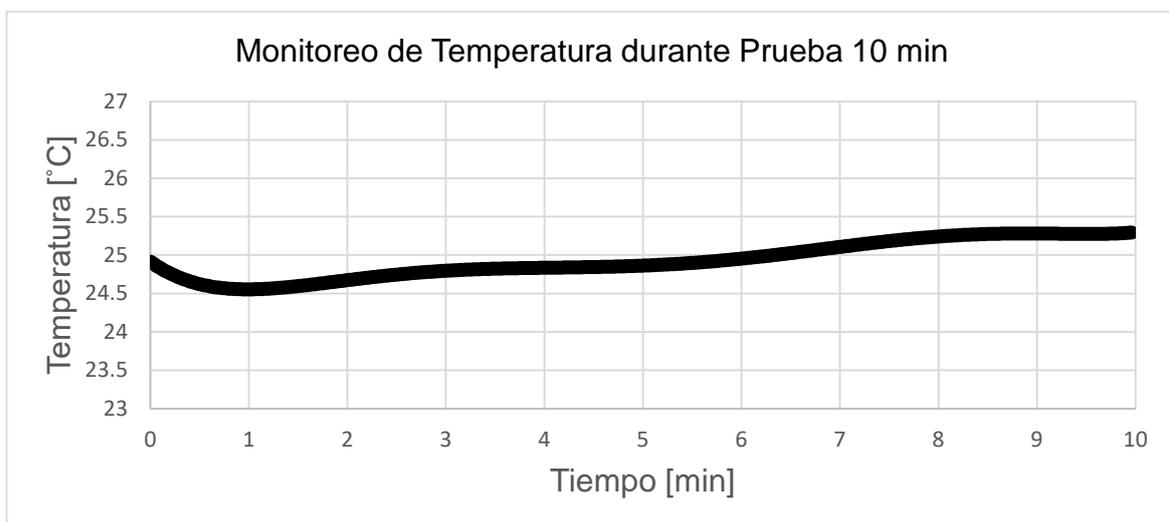


Figura 7. Curva de Temperatura para monitoreo

La curva anterior, ya cuenta con una línea de tendencia entre sus puntos de dispersión. Debido a que la cantidad de datos es larga, para visualizar mejor la curva

se ha evitado colocar todos los puntos. Lo importante de enfocar dentro de la gráfica es que en promedio la temperatura se mantiene entre ± 1.5 °C mayormente y se encuentra dentro de los parámetros de operación establecido en la norma previamente. Con esto se confirma que el sistema de refrigeración cumple con su propósito de diseño,

Finalmente se presentan las placas electrónicas que fueron diseñadas en base a la necesidad de diversos dispositivos que estaban siendo utilizados para el control de temperatura y control del tiempo de operación. Dado que este banco de pruebas de erosión por cavitación es un primer prototipo es posible encontrar mejorar en cuanto a las placas que fueron usadas, ya que a medida que avanzaban las pruebas era fundamental realizar cambios para su funcionamiento, sin embargo, se podrían realizar mejoras en intervenciones futuras.

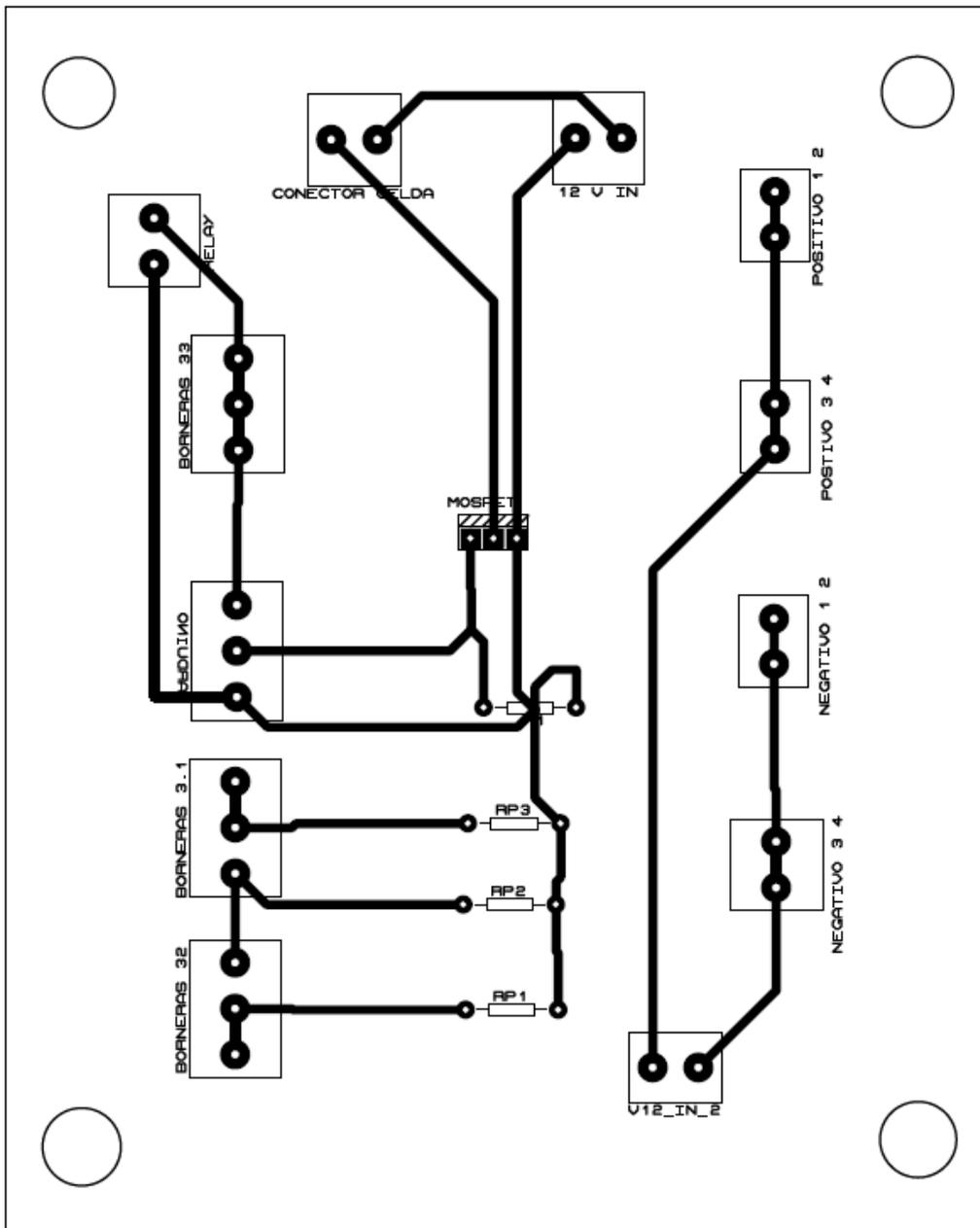


Figura 8. Placa Principal

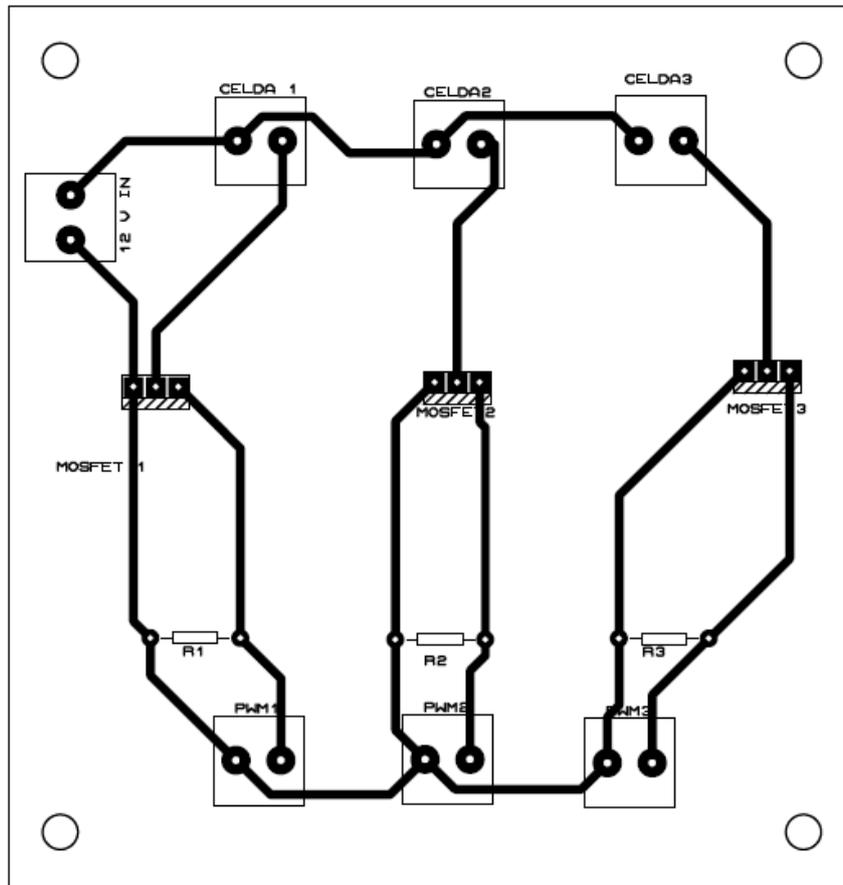


Figura 9. Placa Auxiliar para sistema de enfriamiento mejorado

De acuerdo con lo establecido en las secciones anteriores para el armado, diseño y construcción del equipo en el cual se pueda reproducir el efecto de cavitación y obtener datos que entre cada set se muestren repetitivos y siguiente con los esquemas planteados de manera inicial. El sujetador y su configuración no son mostrados ya que pertenecen esencialmente a un modelo de alternativas que pueden ser cambiados y que no necesariamente deben ser parte del equipo. A continuación, se presentan una vista del resultado final que se logró del equipo:



Figura 10. Esquema real del equipo

Presupuesto

A continuación, se presenta el presupuesto para el desarrollo del equipo como se propone a lo largo de la metodología en base a los requisitos y configuración planteados inicialmente:

Tabla 4. Presupuesto del equipo completo

Presupuesto		
Ítem	Cantidad	Valor
Generador Ultrasónico	1	\$850.00
Transductor	1	\$250.00
Horn	1	\$350.00
Base Regulable	1	\$50.00
Shipping	N/A	\$175.00
Manguera Hidráulica [5mm x 3m]	1	\$6.00
Beaker 1000 ml	1	\$3.00
Bomba Sumergible	1	\$9.00
Sujetador Muestras	1	\$10.00
Disipador de Calor	4	\$112.00
Pack de Modulo Peltier (4)	1	\$10.00
Intercambiador de Calor	1	\$20.00
Arduino Mega	1	\$30.00
PCB	2	\$15.00
Sujetador Sistema de Enfriamiento	1	\$30.00
Sujeción (Pernos, Arandelas, Placas)	N/A	\$10.00
Cables	N/A	\$12.00

Fuente 12 V 30 A	1	\$20.00
Caja Acrílico	1	\$30.00
Total		\$1,992.00

Pruebas de Erosión por Cavitación

La sección de resultados para la experimentación se presentará de dos maneras, la primera sección brinda los datos obtenidos para las pruebas de erosión por cavitación en un sustrato y en la segunda parte se presentan los valores para las pruebas realizadas en el recubrimiento de carburo de tungsteno.

Pruebas en Aleación de Aluminio 6061 T6

En primer lugar, se realizaron el total de 5 pruebas para el material de referencia Aleación de Aluminio 6061 T6 para establecer si los resultados experimentales no presentaban variabilidades elevadas. A continuación, se va a presentar los resultados registrados para cada probeta en manera de tablas con sus gráficas respectivas. Luego se resumirá de manera específica los valores importantes de cada probeta (mencionados previamente en procedimiento) de todas las probetas para posteriormente mostrar su desviación estándar y medias producidas para cada parámetro respectivamente. Este set de muestras contiene información útil para utilizar las tendencias de los datos y la congruencia de estos en pruebas futuras usando el mismo tipo de material en este equipo de cavitación. Para las gráficas de los MDE correspondiente a cada probeta se usará regresión lineal asistida por software para observar de mejor manera la tendencia de comportamiento que tienen las probetas de una manera ajustada y aproximada. A continuación, se muestran el estado inicial de las probetas que van a ser sometidas a la erosión por cavitación:



Figura 11. Muestras iniciales

A continuación, se muestran el resumen de datos para el material que se usó en el set de pruebas:

Tabla 5. Resumen de datos para set de pruebas

Material	Aleación Aluminio 6061 T6
Diámetro de zona afectada	16 mm
Densidad	2.71 g/cm ³
Rugosidad Superficial	240 μ
Separación Horn-Probeta	500 μm

Probeta 1

Tabla 6. Datos obtenidos para probeta 1

Tiempo Acumulado	Intervalo Tiempo	Masa del Espécimen	Masa Erosionada		Tasa de Erosión
			Intervalo	Acumulada	
t [min]	Δt [min]	m [mg]	Δm [mg]	ma [mg]	tpma [mg/h]
0	0	34337.9	0.0	0.0	0.0
5	5	34337.2	0.7	0.7	8.4
10	5	34335.4	1.8	2.5	21.6
20	10	34331.3	4.1	6.6	24.6
30	10	34324.5	6.8	13.4	40.8
45	15	34312.5	12.0	25.4	48.0
60	15	34296.3	16.2	41.6	64.8
75	15	34278.5	17.8	59.4	71.2
90	15	34258.6	19.9	79.3	79.6
105	15	34239.7	18.9	98.2	75.6
120	15	34222.1	17.6	115.8	70.4
135	15	34206.1	16.0	131.8	64.0

Tabla 7. Progreso de erosión por cavitación para probeta 1

	
10 min	30 min
	
45 min	75 min
	
90 min	135 min

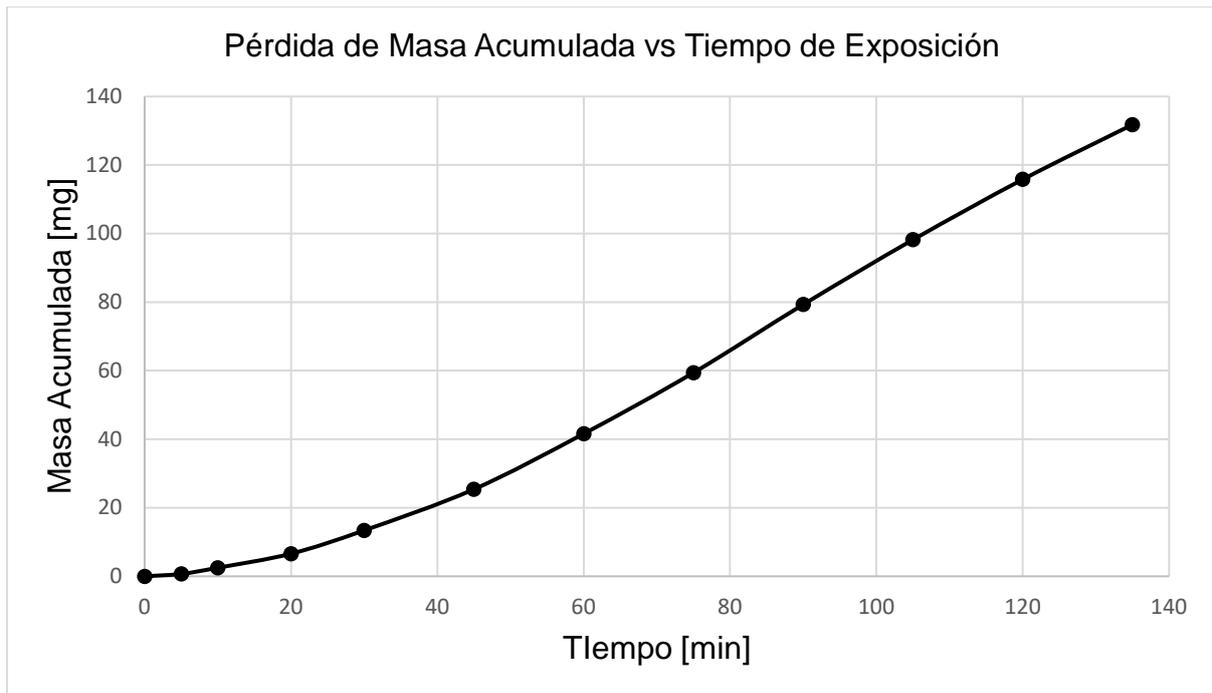


Figura 12. Pérdida de masa acumulada de probeta 1

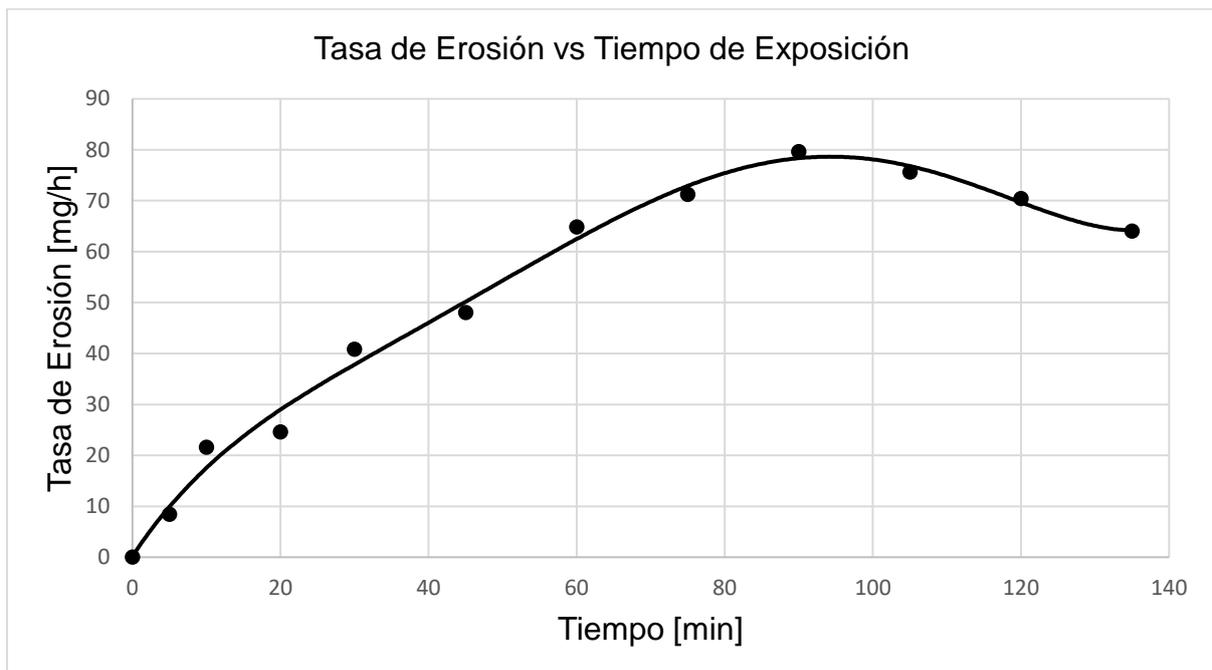


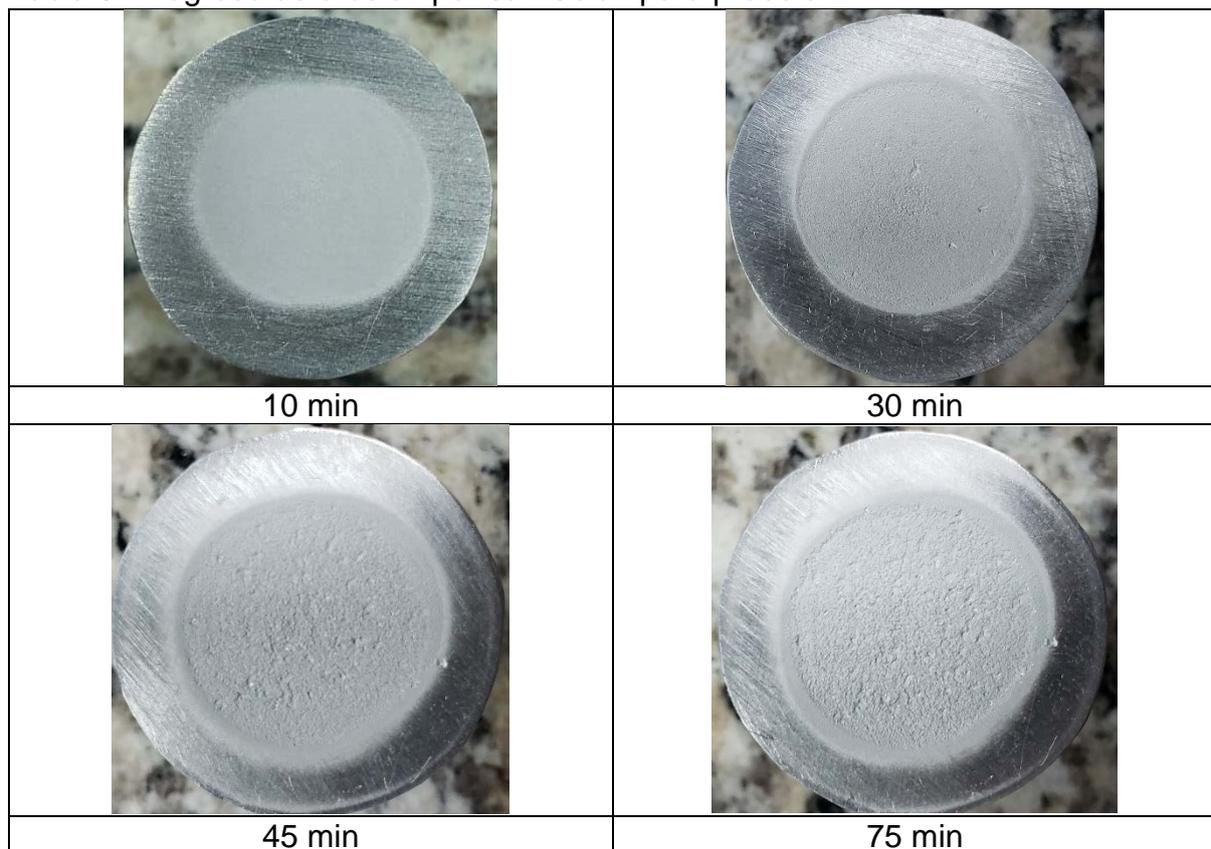
Figura 13. Tasa de erosión de probeta 1

Probeta 2

Tabla 8. Datos obtenidos para probeta 2

Tiempo Acumulado	Intervalo Tiempo	Masa del Especimen	Masa Erosionada		Tasa de Erosión
			Intervalo	Acumulada	
t [min]	Δt [min]	m [mg]	Δm [mg]	ma [mg]	tpma [mg/h]
0	0	33040.7	0.0	0.0	0.0
5	5	33040.4	0.3	0.3	3.6
10	5	33038.7	1.7	2.0	20.4
20	10	33034.9	3.8	5.8	22.8
30	10	33028.6	6.3	12.1	37.8
45	15	33015.9	12.7	24.8	50.8
60	15	33001.3	14.6	39.4	58.4
75	15	32985.1	16.2	55.6	64.8
90	15	32967.5	17.6	73.2	70.4
105	15	32951.4	16.1	89.3	64.4
120	15	32935.5	15.9	105.2	63.6
135	15	32921.9	13.6	118.8	54.4

Tabla 9. Progreso de erosión por cavitación para probeta 2



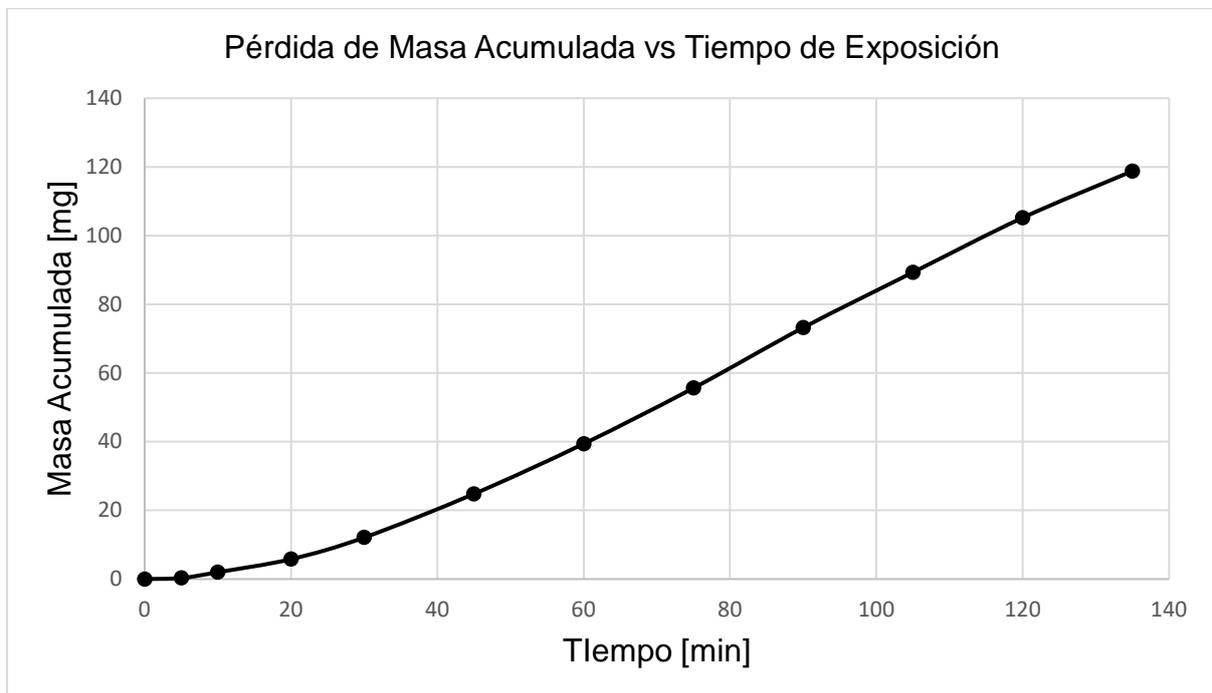


Figura 14. Pérdida de masa acumulada de probeta 2

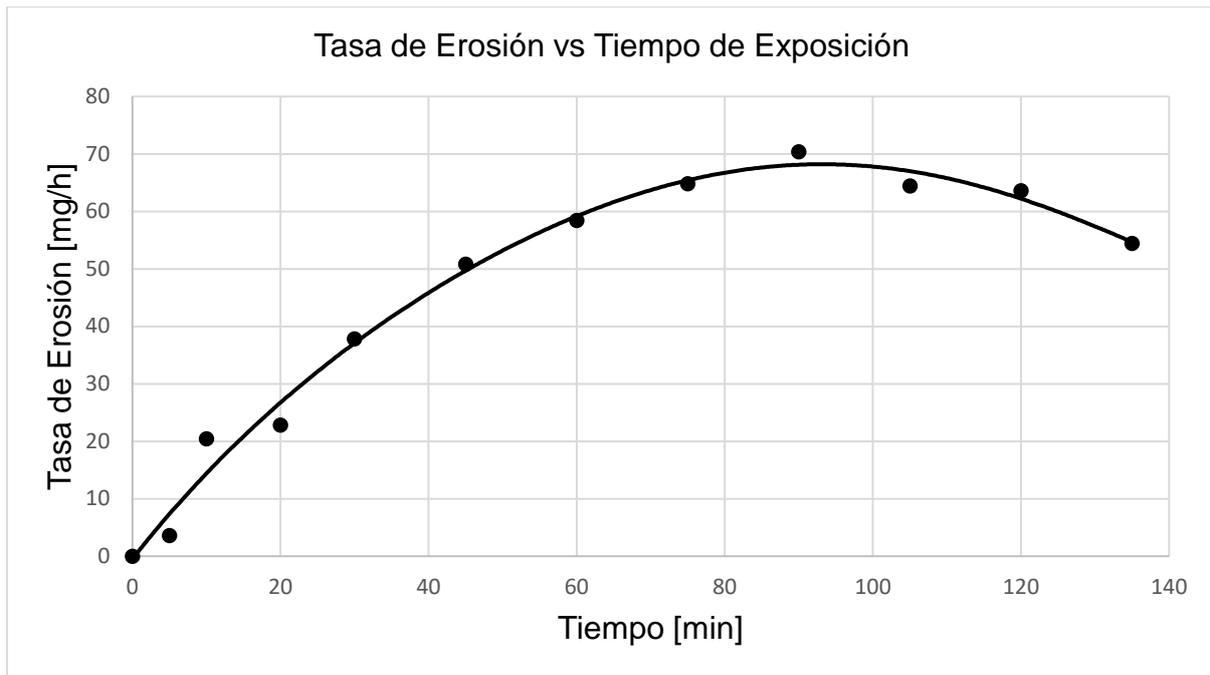


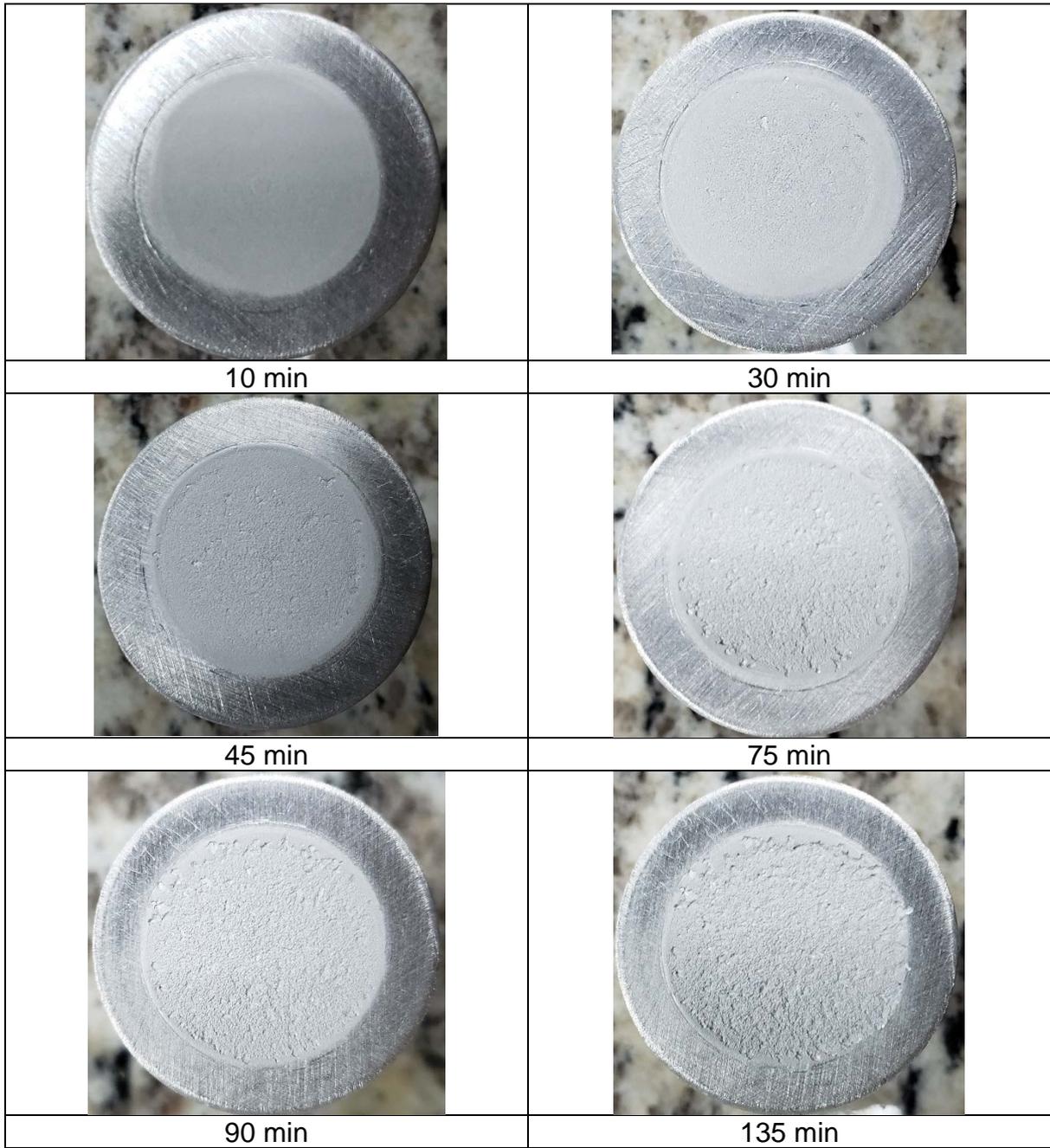
Figura 15. Tasa de erosión de probeta 2

Probeta 3

Tabla 10. Datos obtenidos para probeta 3

Tiempo Acumulado	Intervalo Tiempo	Masa del Espécimen	Masa Erosionada		Tasa de Erosión
			Intervalo	Acumulada	
t [min]	Δt [min]	m [mg]	Δm [mg]	ma [mg]	tpma [mg/h]
0	0	32153.4	0.0	0.0	0.0
5	5	32153.1	0.3	0.3	3.6
10	5	32151.3	1.8	2.1	21.6
20	10	32147.3	4.0	6.1	24.0
30	10	32140.7	6.6	12.7	39.6
45	15	32128.7	12.0	24.7	48.0
60	15	32113.4	15.3	40.0	61.2
75	15	32097.6	15.8	55.8	63.2
90	15	32079.4	18.2	74.0	72.8
105	15	32062.7	16.7	90.7	66.8
120	15	32048.2	14.5	105.2	58.0
135	15	32036.3	11.9	117.1	47.6

Tabla 11. Progreso de erosión por cavitación para probeta 3



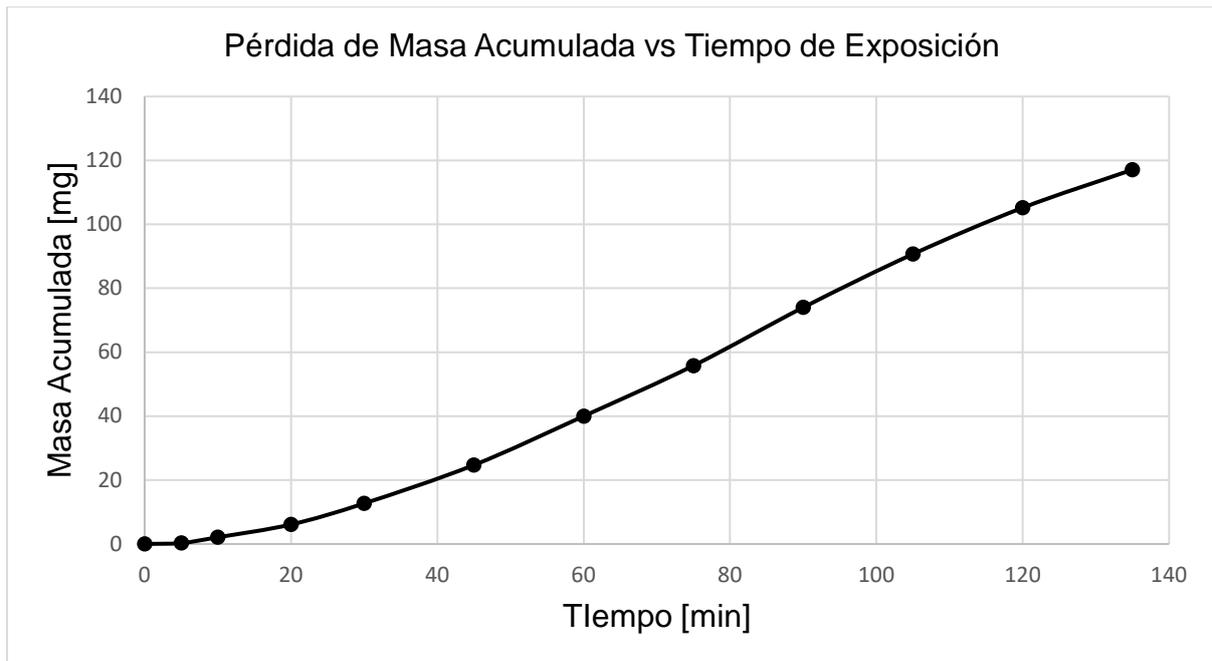


Figura 16. Pérdida de masa acumulada de probeta 3

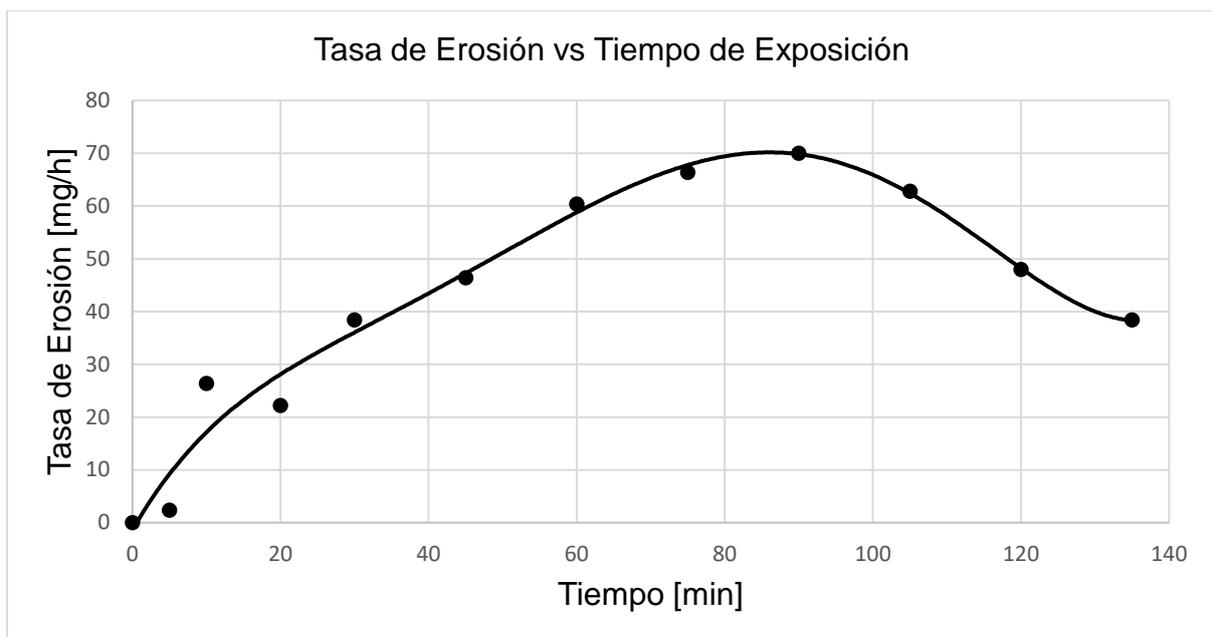


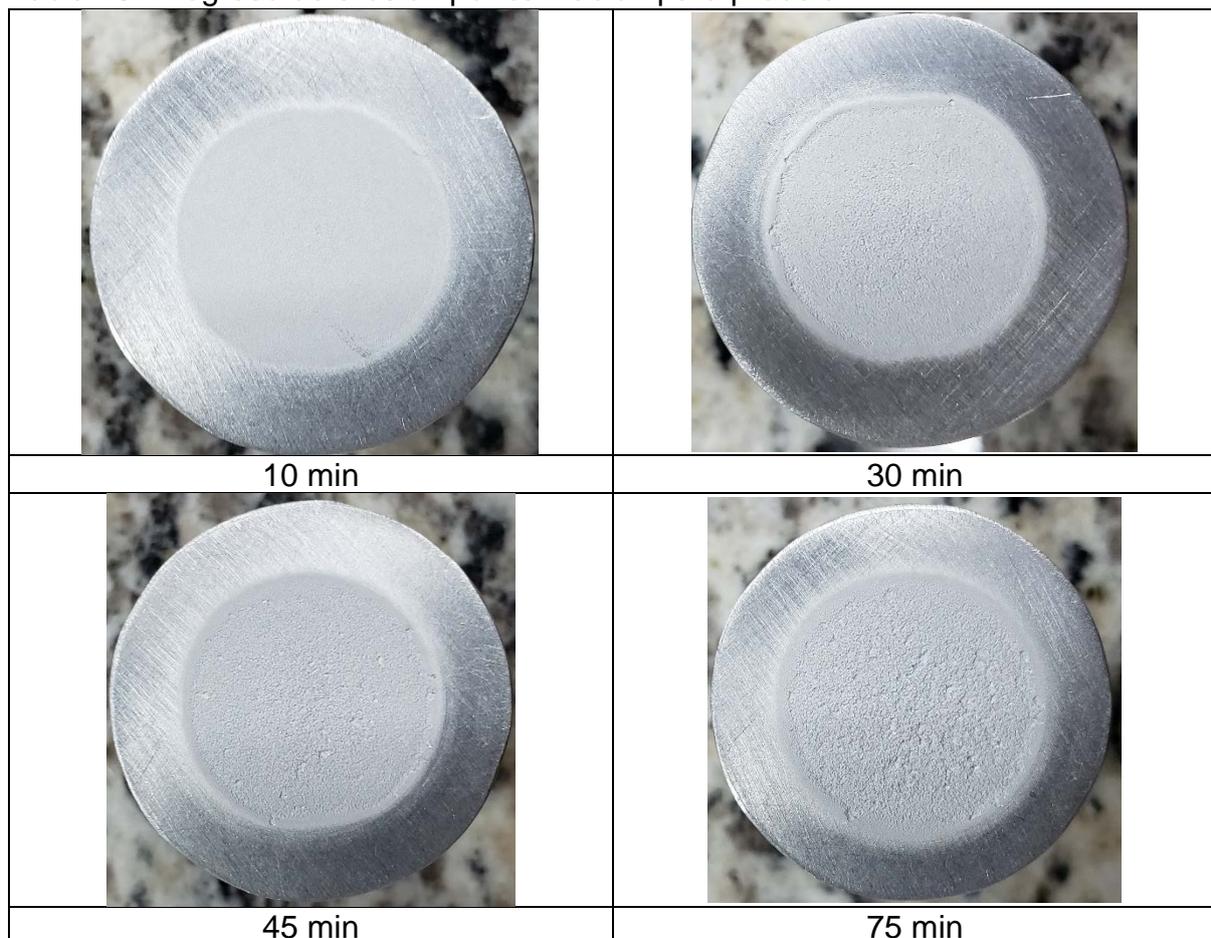
Figura 17. Tasa de erosión de probeta 3

Probeta 4

Tabla 12. Datos obtenidos para probeta 4

Tiempo Acumulado	Intervalo Tiempo	Masa del Espécimen	Masa Erosionada		Tasa de Erosión
			Intervalo	Acumulada	
t [min]	Δt [min]	m [mg]	Δm [mg]	ma [mg]	tpma [mg/h]
0	0	30828.9	0.0	0.0	0.0
5	5	30828.7	0.2	0.2	2.4
10	5	30826.5	2.2	2.4	26.4
20	10	30822.8	3.7	6.1	22.2
30	10	30816.4	6.4	12.5	38.4
45	15	30804.8	11.6	24.1	46.4
60	15	30789.7	15.1	39.2	60.4
75	15	30773.1	16.6	55.8	66.4
90	15	30755.6	17.5	73.3	70.0
105	15	30739.9	15.7	89.0	62.8
120	15	30727.9	12.0	101.0	48.0
135	15	30718.3	9.6	110.6	38.4

Tabla 13. Progreso de erosión por cavitación para probeta 4



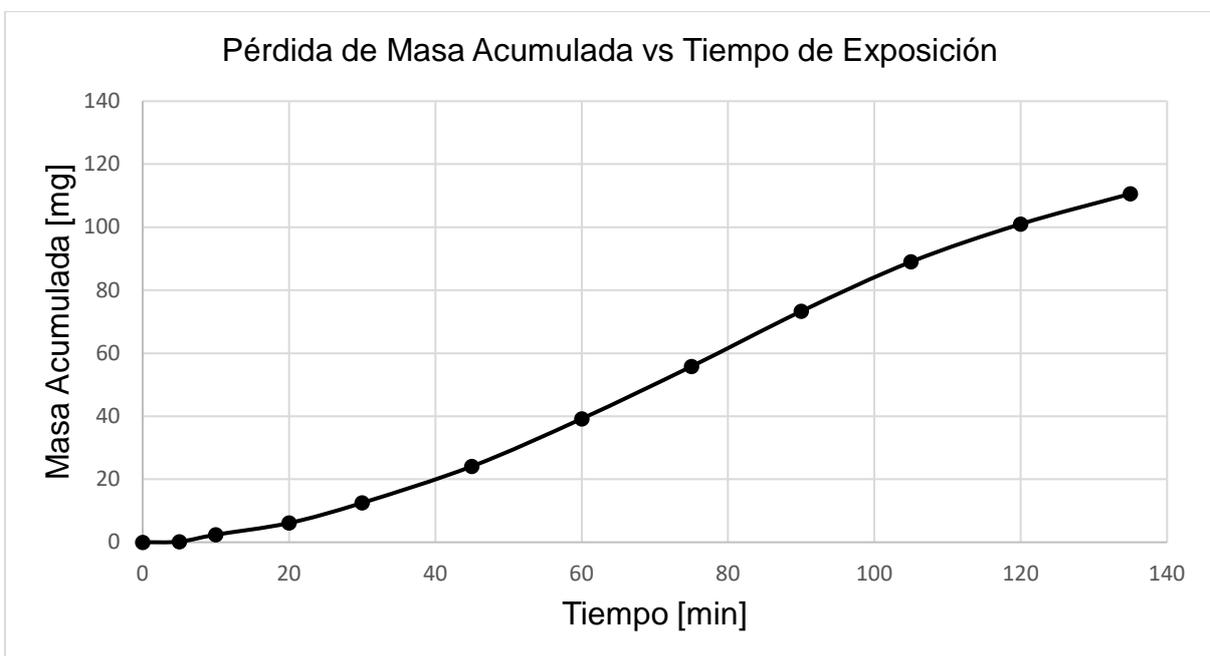


Figura 18. Pérdida de masa acumulada de probeta 4

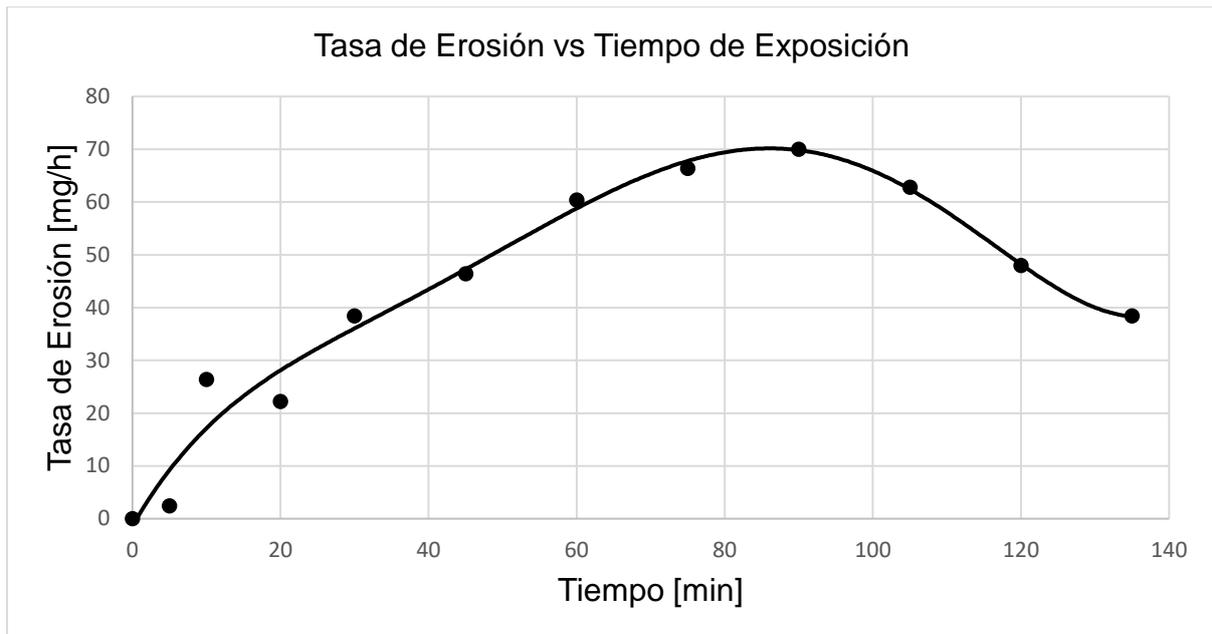


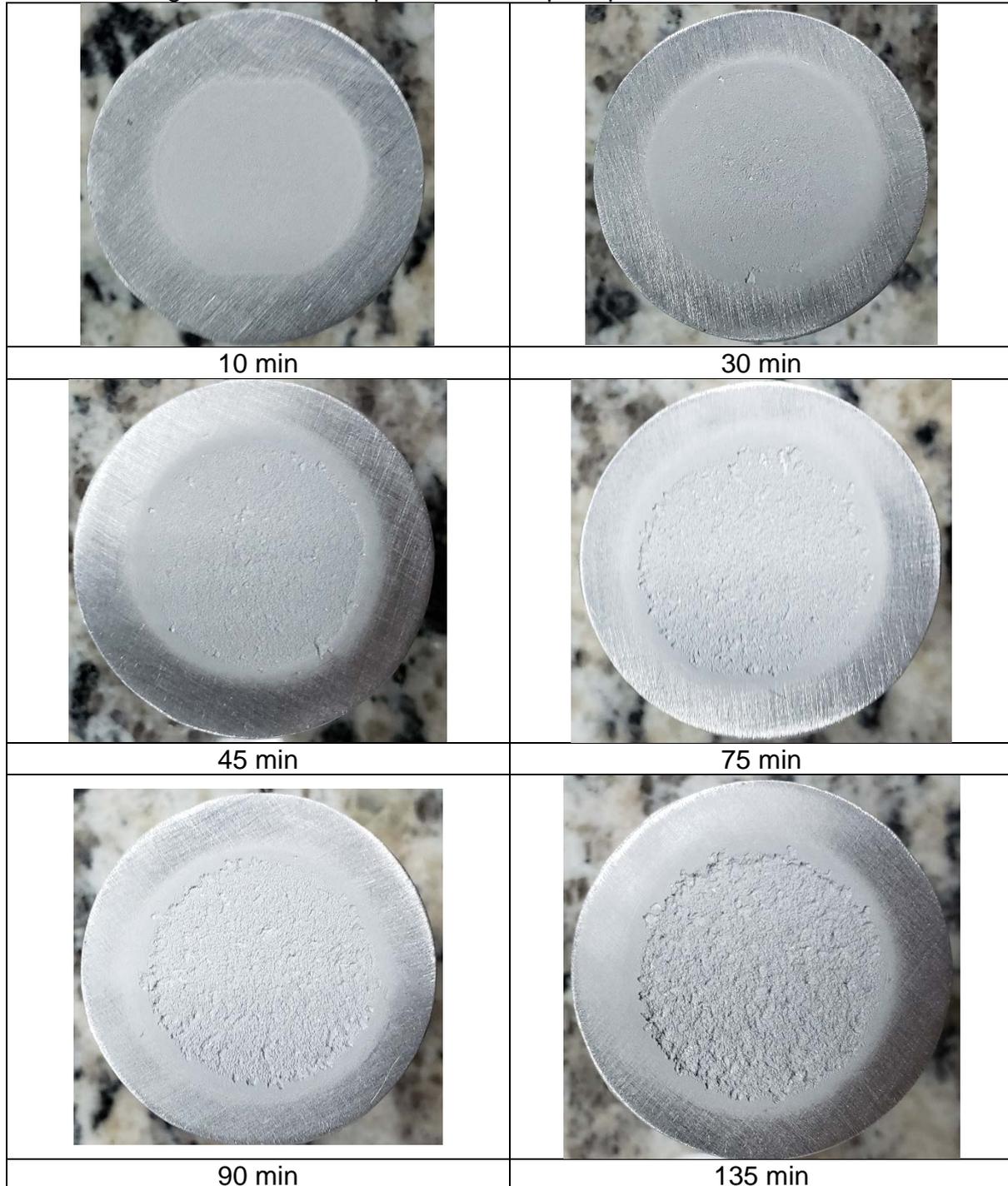
Figura 19. Tasa de erosión de probeta 4

Probeta 5

Tabla 14. Datos obtenidos para probeta 5

Tiempo Acumulado	Intervalo Tiempo	Masa del Espécimen	Masa Erosionada		Tasa de Erosión
			Intervalo	Acumulada	
t [min]	Δt [min]	m [mg]	Δm [mg]	ma [mg]	tpma [mg/h]
0	0	32767.5	0.0	0.0	0.0
5	5	32767.1	0.4	0.4	4.8
10	5	32765.9	1.2	1.6	14.4
20	10	32762.5	3.4	5.0	20.4
30	10	32756.9	5.6	10.6	33.6
45	15	32744.8	12.1	22.7	48.4
60	15	32730.3	14.5	37.2	58.0
75	15	32715.0	15.3	52.5	61.2
90	15	32698.1	16.9	69.4	67.6
105	15	32682.0	16.1	85.5	64.4
120	15	32667.6	14.4	99.9	57.6
135	15	32654.5	13.1	113.0	52.4

Tabla 15. Progreso de erosión por cavitación para probeta 5



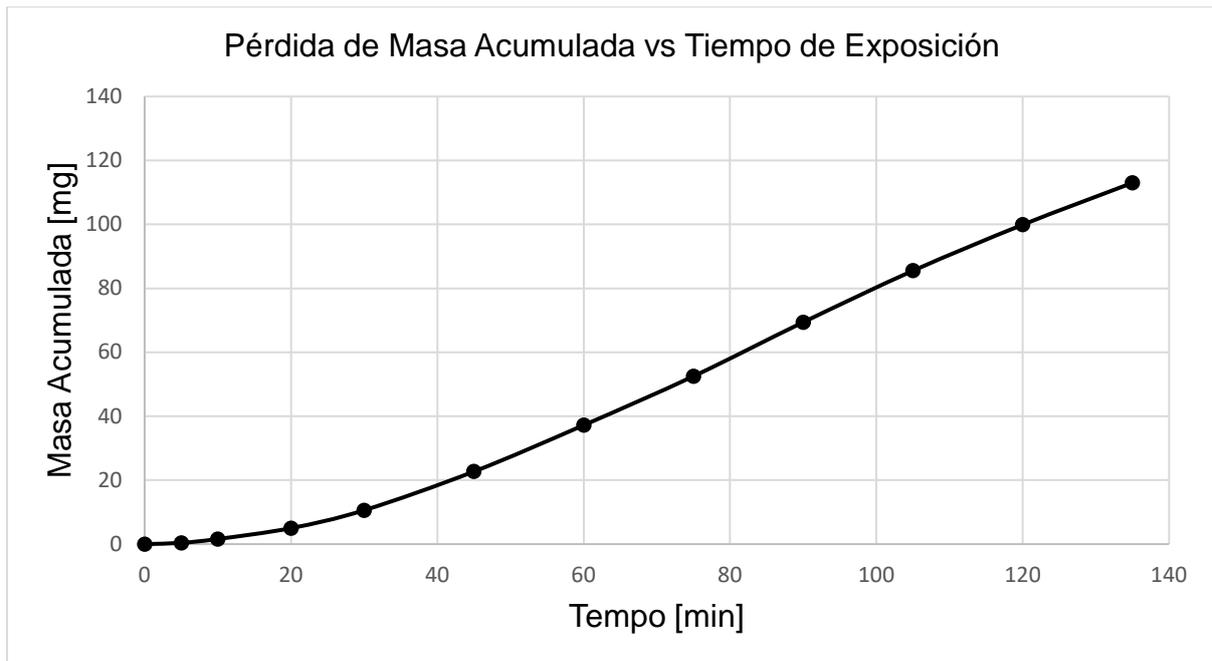


Figura 20. Pérdida de masa acumulada de probeta 5

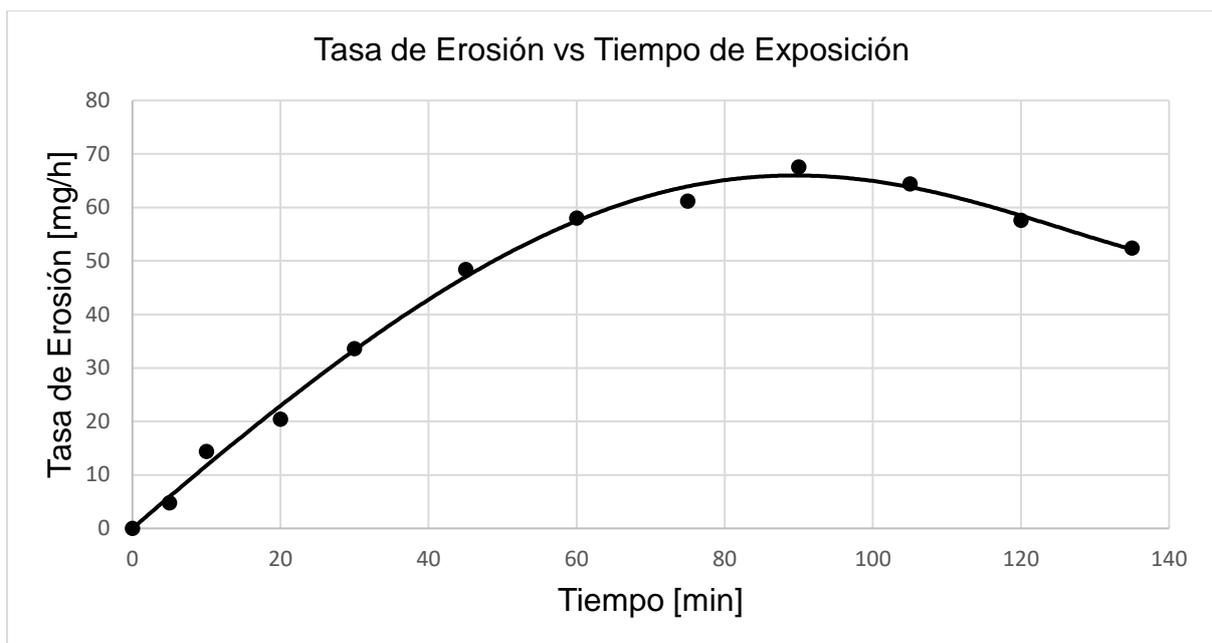


Figura 21. Tasa de erosión de probeta 5

Resumen Experimentación

A continuación, se presenta una tabla con los valores resumidos para cada muestra con el objetivo de observar la media y desviaciones estándar de los parámetros que se presentaron durante de la prueba, siendo estos: masa total erosionada, tasa de erosión.

Tabla 16. Tabla resumen para datos obtenidos en el set de probetas

Probeta	1	2	3	4	5	Promedio
Pérdida de Masa Acumulada [mg]	131.8	118.8	117.1	110.6	113.0	246.6
Tasa de Erosión [mg/h]	79.6	70.4	72.8	70.0	67.6	331.2

Los intervalos de tiempos usados para llevar a cabo la experimentación son los siguientes: 5, 5, 10, 10, 15, 15, 15, 15, 15, 15, 15.

Para analizar los resultados entre cada curva obtenida por probetas y de manera general con el conjunto de datos, se procederá a analizar la gráfica de la pérdida de masa acumulada y la de Tasa de Erosión respectivamente para observar las variaciones entre probetas.

Análisis de Resultados Gráfica Pérdida de Masa Acumulada

A continuación, se presenta una gráfica que contiene todas las curvas de las probetas analizadas en términos de la pérdida de m, en la cual se observa de manera visual los datos obtenidos finalmente y que se presentan en la tabla Tabla 16 en una sola gráfica para su posterior análisis. En esta gráfica en particular no se presentan las líneas de tendencia para cada probeta, sino las líneas generadas por los puntos obtenidos en cada una con el objetivo de visualizar de mejor manera la diferencia o similitud que existen entre ellos.

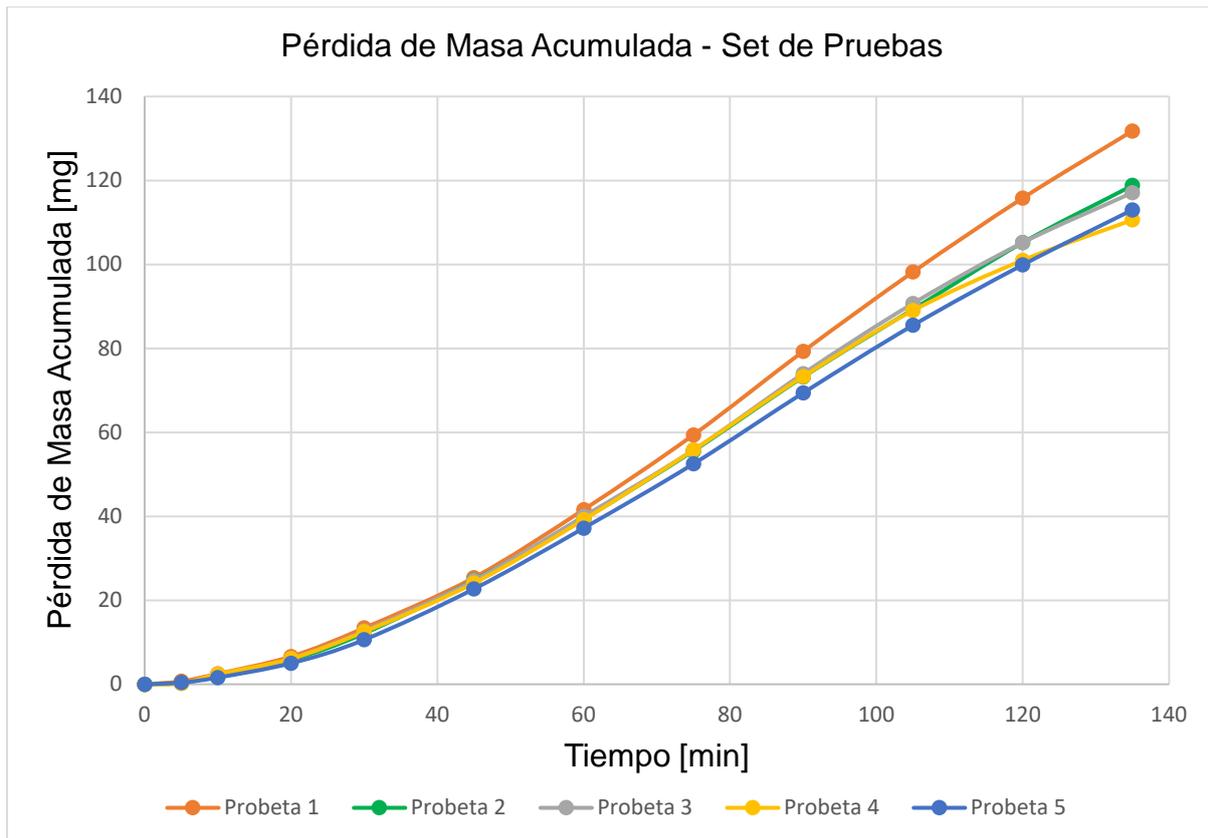


Figura 22. Pérdida de Masa Acumulada respectivo de cada probeta usada en el conjunto

En la figura *Figura 22*, se observan las curvas superpuestas para tener un espectro amplio y observar el comportamiento de las probetas durante las pruebas realizadas. Si bien es cierto en la curva polinómica de la probeta 1 se observa una varianza relativamente mayor en la zona de tasa de erosión máxima con respecto de las otras probetas. Esto se debe a que la temperatura es un factor importante, la cual es mencionada en la norma ASTM G32-16 en la que describe específicamente que se han encontrado que temperaturas elevadas del límite de control propuesto pueden ocasionar tasas de erosión mayores que en aquellas pruebas donde se mantiene un mejor control en la temperatura. En la primera probeta ocurrió un ligero problema con la temperatura que al ser mayor que con las demás pruebas, esta produjo tasas mayores comparadas con el resto. Sin embargo, en las siguientes probetas siguen un comportamiento similar, lo que es interesante es que entre más avanza el tiempo se

observa una variación entre curvas ligeramente mayor, esto sugiere que el patrón de ataque puede no ser constante causando estos errores dentro de las tasas de erosión, también podría ser un factor de la sujeción en el cual los pernos que actúan como prisioneros llegan a desenroscarse debido a la vibraciones que se producen en el fluido. Sin embargo, estas variaciones no son significativas ya que cuando se realiza un promedio de los puntos que conforman dicha curva el comportamiento que modela dicha curva llega a ser representativo para el conjunto de probetas evaluadas. A continuación, se presenta una gráfica con los valores promedios y cabe recalcar que se excluirá la zona desde las tasas de erosión máxima de la probeta 1 para obtener el comportamiento mejor aproximado para la aleación de aluminio 6061 T6. Estas gráficas será la MDE. Solo se coloca una gráfica ya que refleja la variabilidad que existieron entre pruebas y es una buena aproximación visual de las diferencias y similitudes que se tuvieron durante la experimentación, además se incluirán como etiqueta de datos los valores de desviaciones estándar en cada intervalo de tiempo entre las 5 probetas, excluyendo desde el minuto 90 los resultados de la probeta 1.

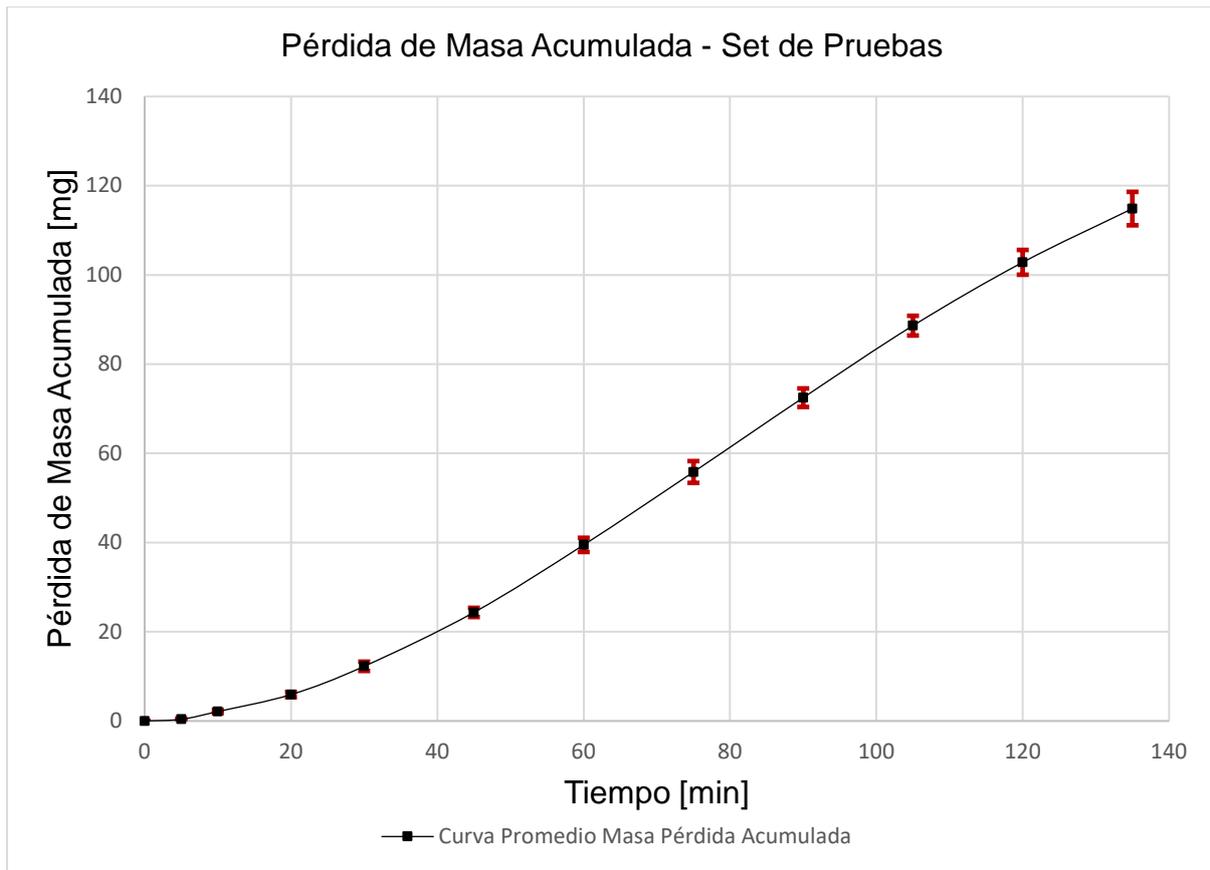


Figura 23. Gráfica con datos promedios de MDE del conjunto de pruebas con Aluminio 6061

En la gráfica anterior, se observa los valores de desviaciones estándar en cada punto tomado como intervalo de tiempo, la tendencia que muestra es que entre mayor tiempo transcurre, los datos generan mayor variabilidad. Esto se debe a dos razones principalmente, en primer lugar, la altura de las probetas no eran idénticas, entonces entre cada experimento había que regular la distancia entre la probeta, lo cual genera a la larga cierto nivel de variabilidad ya que al tratarse de valores pequeños estos son sensibles al cambio. En segundo lugar, la norma menciona que este tipo de método genera cierta variabilidad de manera inherente debido al patrón de dispersión, no siempre es distribuido de manera homogénea y puede ocasionar diferencia entre los resultados (ASTM International, 2016).

Análisis de Resultados Gráfica Tasa de Erosión

Una vez que se han mencionado los factores de variabilidad es importante conocer como estos también afectan a las curvas de tasa de erosión, debido a que el mismo está asociado a intervalos de tiempos específicos y establecidos previamente a los ensayos respectivos. A continuación, se muestran los resultados de cada probeta superpuestos en un solo gráfico para su análisis.

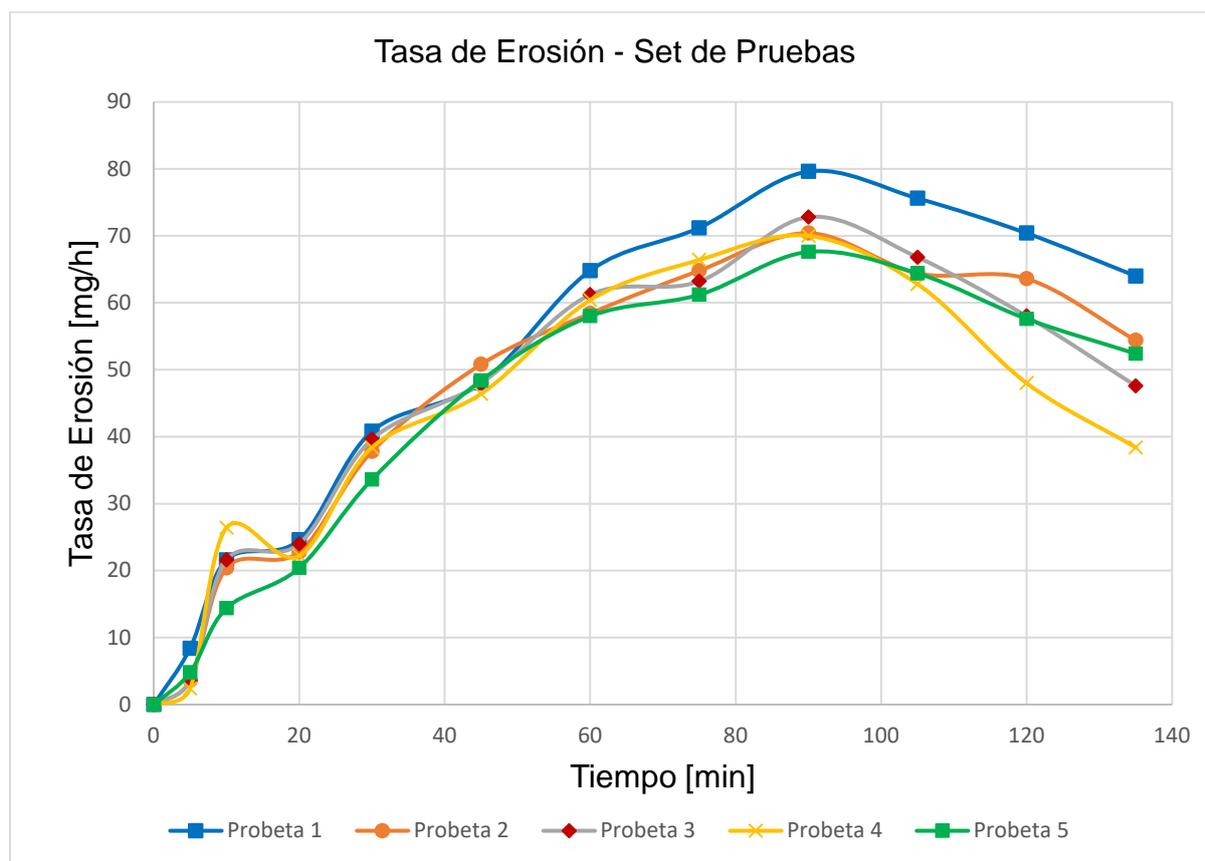


Figura 24. Tasa de erosión respectivo de cada probeta usada en el conjunto

En la figura Figura 24 se observa cada curva obtenida para la tasa de erosión, en donde se observa el comportamiento esperado para sustratos, donde se inician con tasas pequeñas que eventualmente tienen un máximo y posteriormente decrecen hasta un lugar de equilibrio según el segundo criterio que establece la norma y que se encuentra en resultados de experimentación con diferentes sustratos en otras investigaciones (Chirus & Nedeloni, 2013). A continuación, se mencionarán las desviaciones que tienen cada punto con respecto al intervalo de tiempo

respectivamente. La gráfica se presentará a manera de promedios entre los puntos de igual manera excluyendo a partir del minuto 90 a la probeta 1, para hacer un análisis homogéneo con respecto al primer parte.

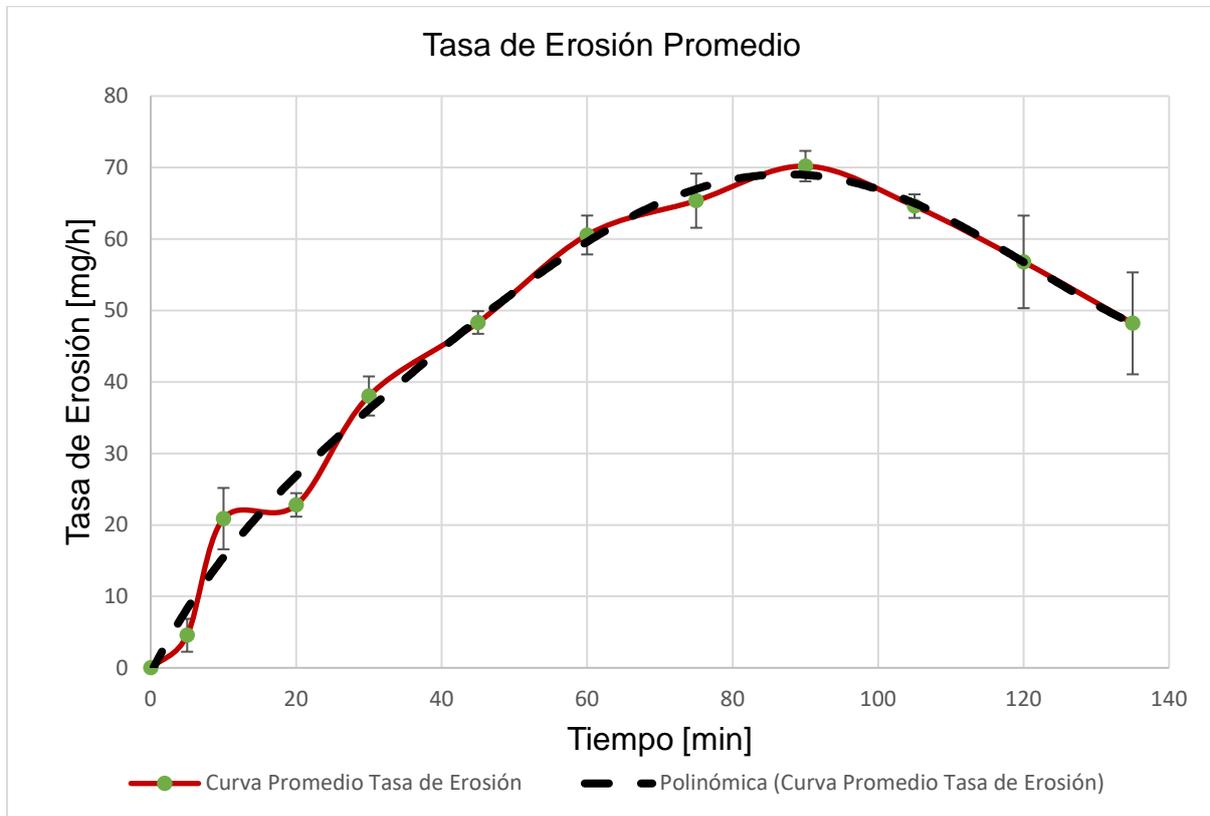


Figura 25. Gráfica con datos promedios de tasa de erosión del conjunto de pruebas con Aluminio 6061

Mediante las desviaciones estándar obtenidas para cada punto entre las 5 probetas analizadas, se observan que son mayores que las que provienen de la curva de MDE. Inicialmente se sabe que están de igual manera a las variaciones ya mencionadas, pero que son más sensibles ya que están relacionadas con intervalo de tiempo lo cual hace que exista otro parámetro de comparación con el cual la desviación estándar aumenta debido a este parámetro extra, el tiempo de exposición. Para el caso particular del Aluminio 6061, se tiene que de igual manera en la tasa de erosión la

variación crece a medida que continúan las pruebas por las razones expuestas previamente en la discusión de gráfica del MDE para este caso.

Pruebas en Recubrimiento con Carburo de Tungsteno

Las pruebas con recubrimientos varían ciertos parámetros de procedimiento ya que oficialmente no aparecen en la norma, sin embargo, como se explicó en un inicio la norma ASTM G32-16, indica que si se desea evaluar recubrimientos se aplique el método del espécimen estacionario razón por la cual se estableció esta configuración específica del equipo. Para la realización de estas pruebas, las probetas fueron donadas por un cliente para la evaluación de recubrimiento siguiendo con el objetivo del proyecto de titulación, en el cual la intención es de evaluar el funcionamiento del equipo, más no del material como tal. Se usó una investigación como referencia al comportamiento del recubrimiento cuando es sometido al fenómeno de la cavitación inducida por ultrasonido. En dicha investigación se muestran las gráficas de Volumen Erosionado Acumulado, y Tasas de Erosión Volumétrica. Luego que se presenten los resultados se presentará una comparación entre las gráficas obtenidas de dicha investigación con las obtenidas de manera promediadas en las probetas bajo las mismas unidades.

A continuación, se muestra el estado inicial de las probetas previo a la experimentación:



Figura 26. Probetas Recubiertas con Carburo de Tungsteno

Las condiciones de experimentación son iguales a las realizadas con el primer conjunto de probetas. Pero, por otro lado, en este conjunto de pruebas como motivo de comparación entre la investigación mencionada y los resultados obtenidos para cada probeta se realizarán las gráficas de Pérdida de Masa Acumulada y la Tasa de Erosión

Finalmente, durante estas pruebas en específico no se tomaron fotografías durante los intervalos de tiempo ya que no se presentan de manera visual cambios relevantes, por lo que se realizó una fotografía al final de cada experimentación debido a que ya se apreciaba un cambio significativo visualmente.

Probeta 1

Tabla 17. Datos obtenidos para probeta 1

Tiempo Acumulado	Intervalo Tiempo	Masa del Espécimen	Masa Erosionada		Tasa de Erosión
			Intervalo	Acumulada	
t [min]	Δt [min]	m [mg]	Δm [mg]	ma [mg]	tpma [mg/h]
0	0	102392.9	0.0	0.0	0.0
1	1	102387.1	5.8	5.8	348.0
2	1	102384.5	2.6	8.4	156.0
4	2	102380.1	4.4	12.8	132.0

8	4	102372.1	8.0	20.8	120.0
16	8	102354.6	17.5	38.3	131.3
32	16	102316.6	38.0	76.3	142.5
64	32	102256.3	60.3	136.6	113.1
128	64	102147.4	108.9	245.5	102.1



Figura 27. Estado final de Probeta 1

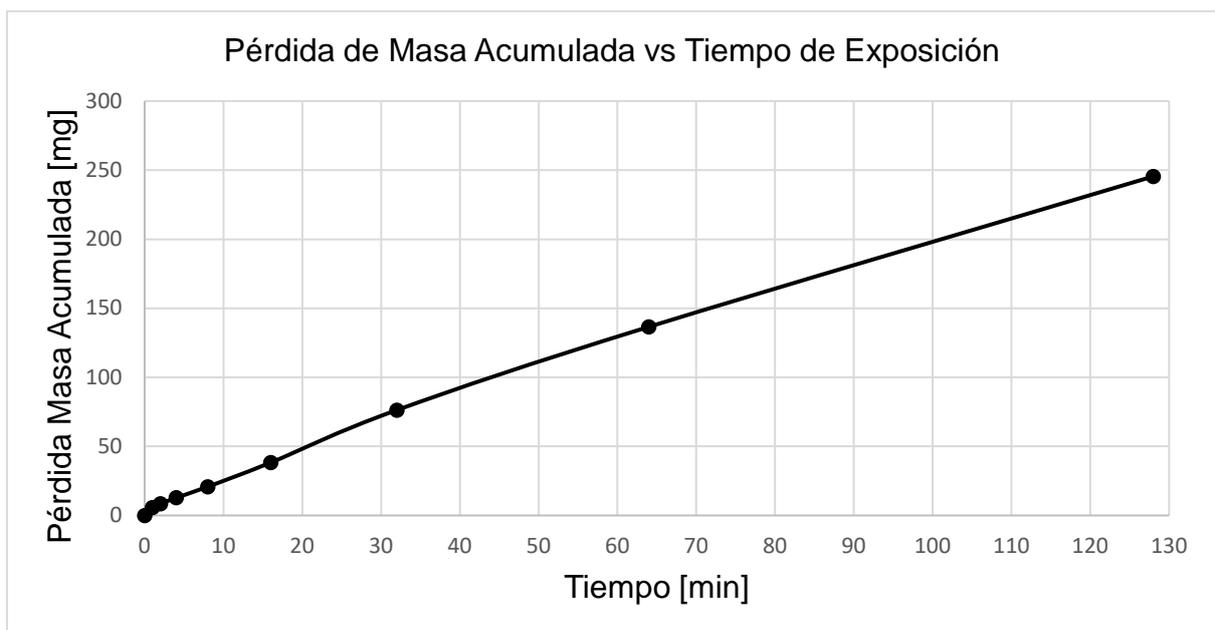


Figura 28. Pérdida de Masa Acumulada probeta 1

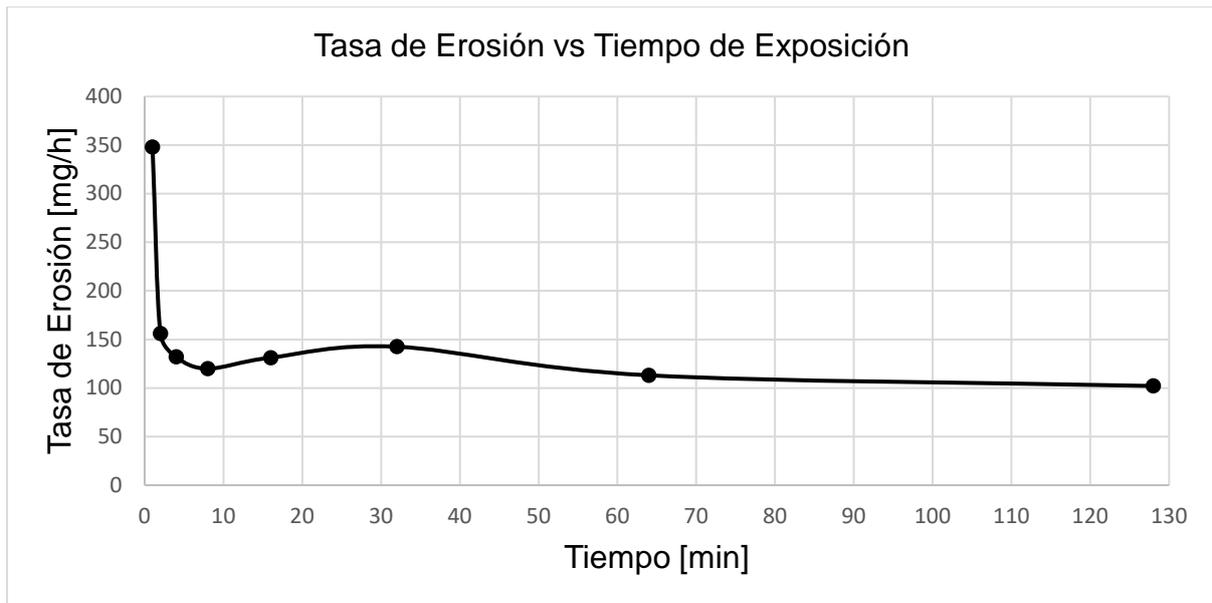


Figura 29. Tasa de Erosión probeta 1

Probeta 2

Tabla 18. Datos obtenidos para probeta 2

Tiempo Acumulado	Intervalo Tiempo	Masa del Espécimen	Masa Erosionada		Tasa de Erosión
			Intervalo	Acumulada	
t [min]	Δt [min]	m [mg]	Δm [mg]	ma [mg]	tpma [mg/h]
0	0	103349.9	0.0	0.0	0.0
1	1	103343.9	6.0	6.0	360.0
2	1	103341.0	2.9	8.9	174.0
4	2	103336.0	5.0	13.9	150.0
8	4	103326.3	9.7	23.6	145.5
16	8	103304.3	22.0	45.6	165.0
32	16	103267.3	37.0	82.6	138.8
64	32	103199.7	67.6	150.2	126.8
128	64	103088.6	111.1	261.3	104.2



Figura 30. Estado final de Probeta 2

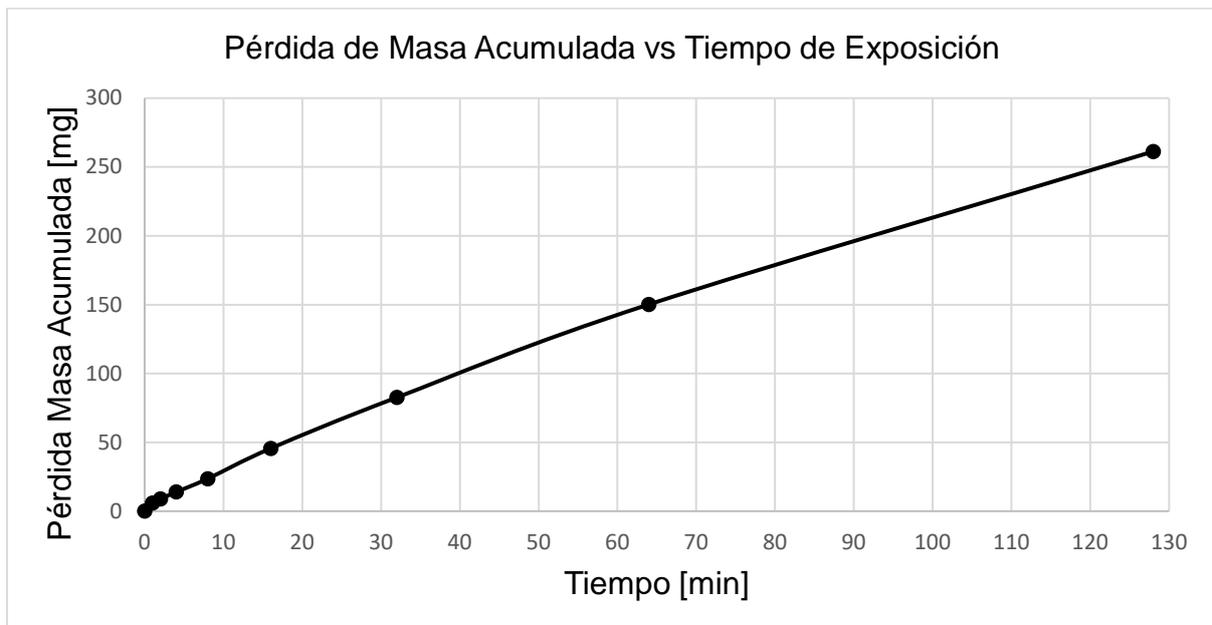


Figura 31. Pérdida de Masa Acumulada probeta 2

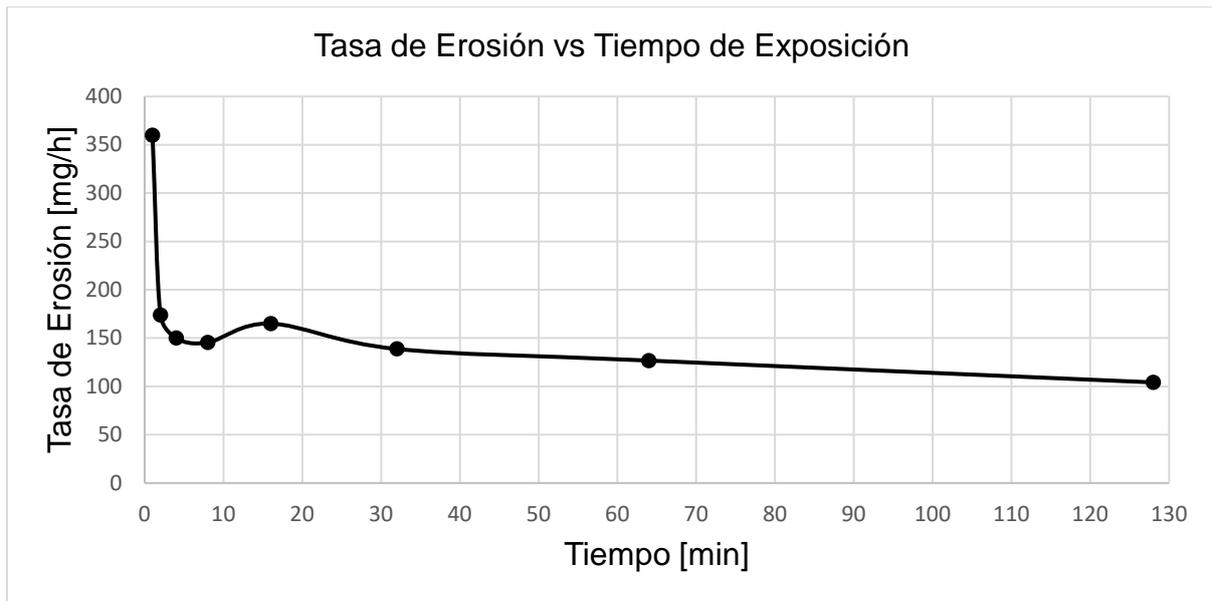


Figura 32. Tasa de Erosión probeta 2

Probeta 3

Tabla 19. Datos obtenidos para probeta 3

Tiempo Acumulado	Intervalo Tiempo	Masa del Espécimen	Masa Erosionada		Tasa de Erosión
			Intervalo	Acumulada	
t [min]	Δt [min]	m [mg]	Δm [mg]	ma [mg]	tpma [mg/h]
0	0	103671.9	0.0	0.0	0.0
1	1	103666.6	5.3	5.3	318.0
2	1	103664.2	2.4	7.7	144.0
4	2	103660.3	3.9	11.6	117.0
8	4	103652.7	7.6	19.2	114.0
16	8	103635.9	16.8	36.0	126.0
32	16	103598.7	37.2	73.2	139.5
64	32	103539.9	58.8	132.0	110.3
128	64	103447.4	92.5	224.5	86.7



Figura 33. Estado final de Probeta 3

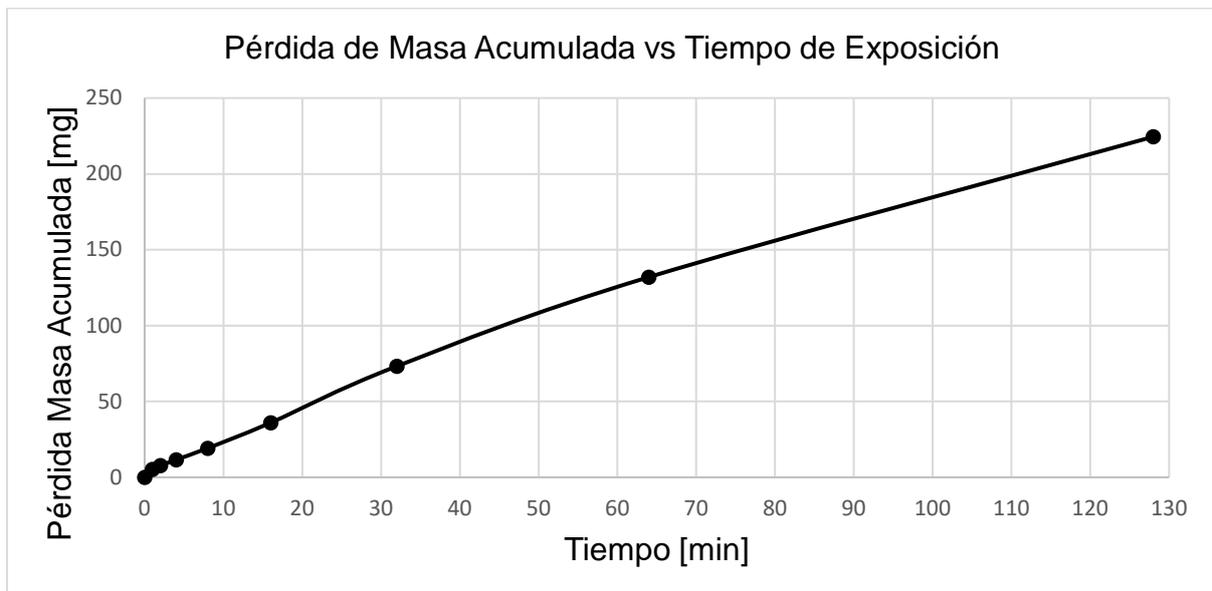


Figura 34. Pérdida de Masa Acumulada probeta 3

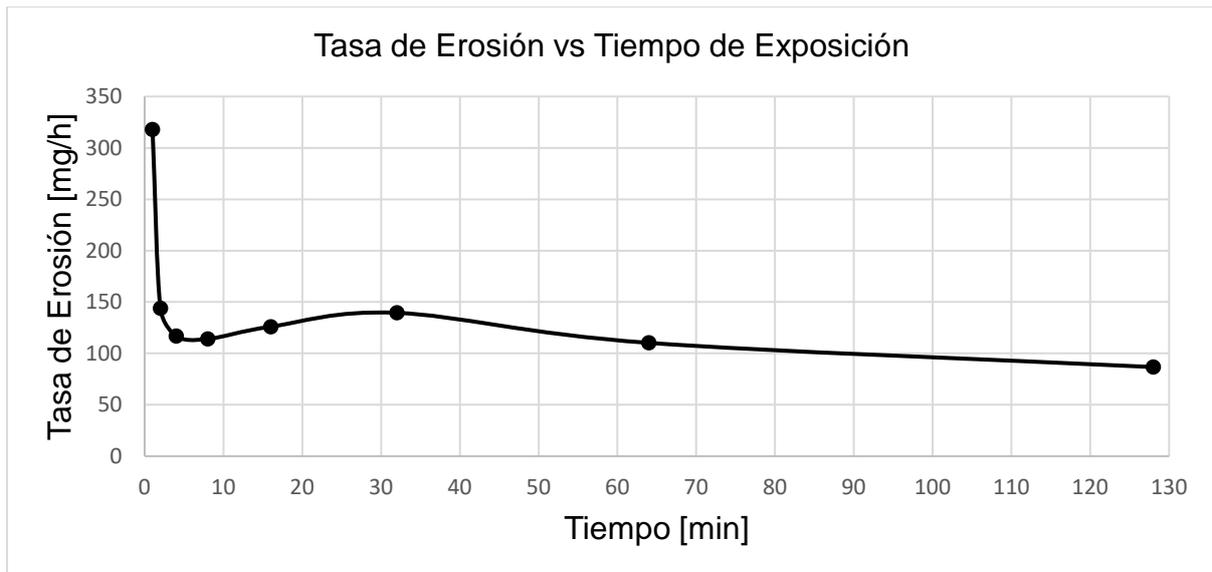


Figura 35. Tasa de Erosión probeta 3

Probeta 4

Tabla 20. Datos obtenidos para probeta 4

Tiempo Acumulado	Intervalo Tiempo	Masa del Espécimen	Masa Erosionada		Tasa de Erosión
			Intervalo	Acumulada	
t [min]	Δt [min]	m [mg]	Δm [mg]	ma [mg]	tpma [mg/h]
0	0	105010.5	0.0	0.0	0.0
1	1	105005.3	5.2	5.2	312.0
2	1	105003.1	2.2	7.4	132.0
4	2	104999.3	3.8	11.2	114.0
8	4	104991.8	7.5	18.7	112.5
16	8	104973.1	18.7	37.4	140.2
32	16	104940.0	33.1	70.5	124.1
64	32	104869.8	70.2	140.7	131.6
128	64	104760.6	109.2	249.9	102.4



Figura 36. Estado final de Probeta 4

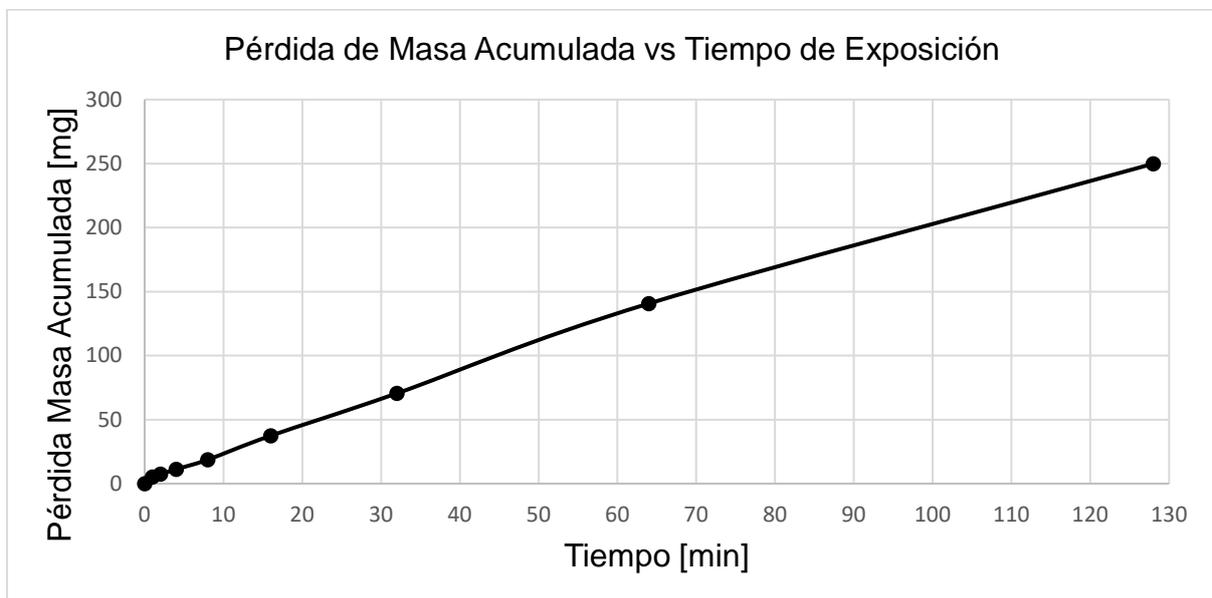


Figura 37. Pérdida de Masa Acumulada probeta 4

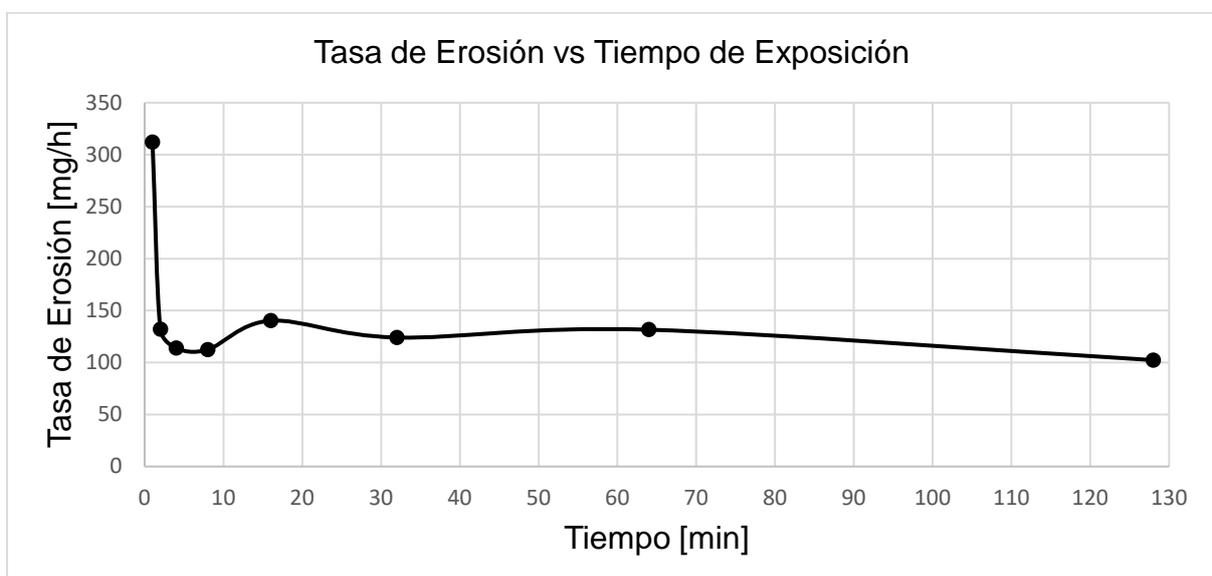


Figura 38. Tasa de Erosión probeta 4

Probeta 5

Tabla 21. Datos obtenidos para probeta 5

Tiempo Acumulado	Intervalo Tiempo	Masa del Espécimen	Masa Erosionada		Tasa de Erosión
			Intervalo	Acumulada	
t [min]	Δt [min]	m [mg]	Δm [mg]	ma [mg]	tpma [mg/h]
0	0	98303.2	0.0	0.0	0.0
1	1	98297.9	5.3	5.3	318.0
2	1	98295.7	2.2	7.5	132.0
4	2	98291.9	3.8	11.3	114.0
8	4	98284.0	7.9	19.2	118.5
16	8	98265.0	19.0	38.2	142.5
32	16	98231.0	34.0	72.2	127.5
64	32	98160.9	70.1	142.3	131.4
128	64	98051.3	109.6	251.9	102.7



Figura 39. Estado final de Probeta 5

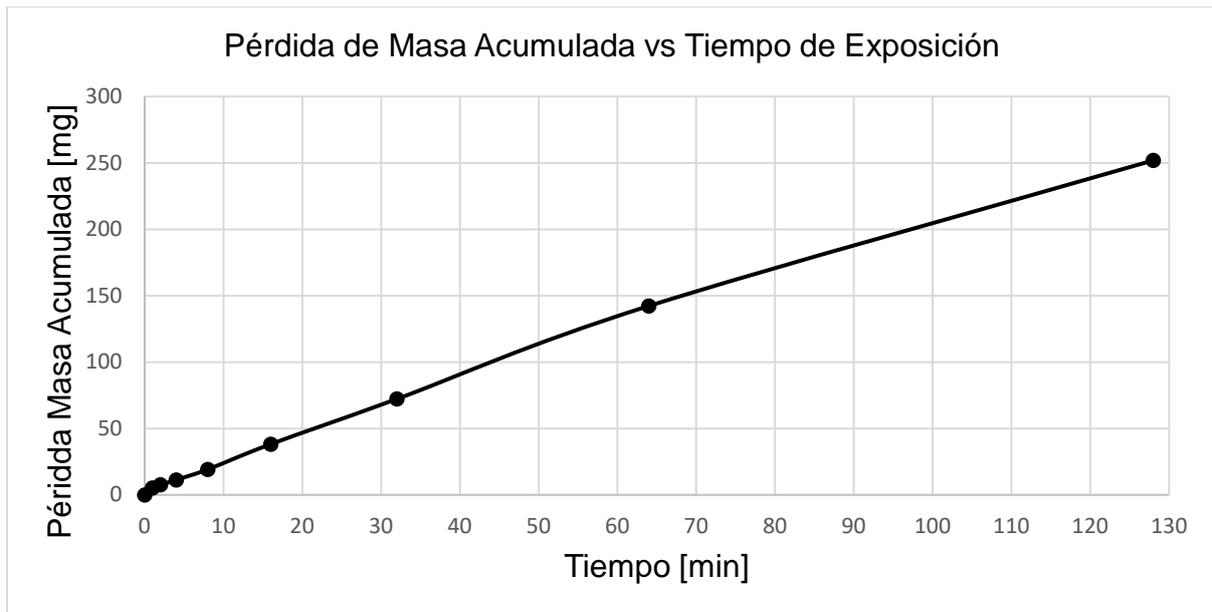


Figura 40. Pérdida de Masa Acumulada probeta 5

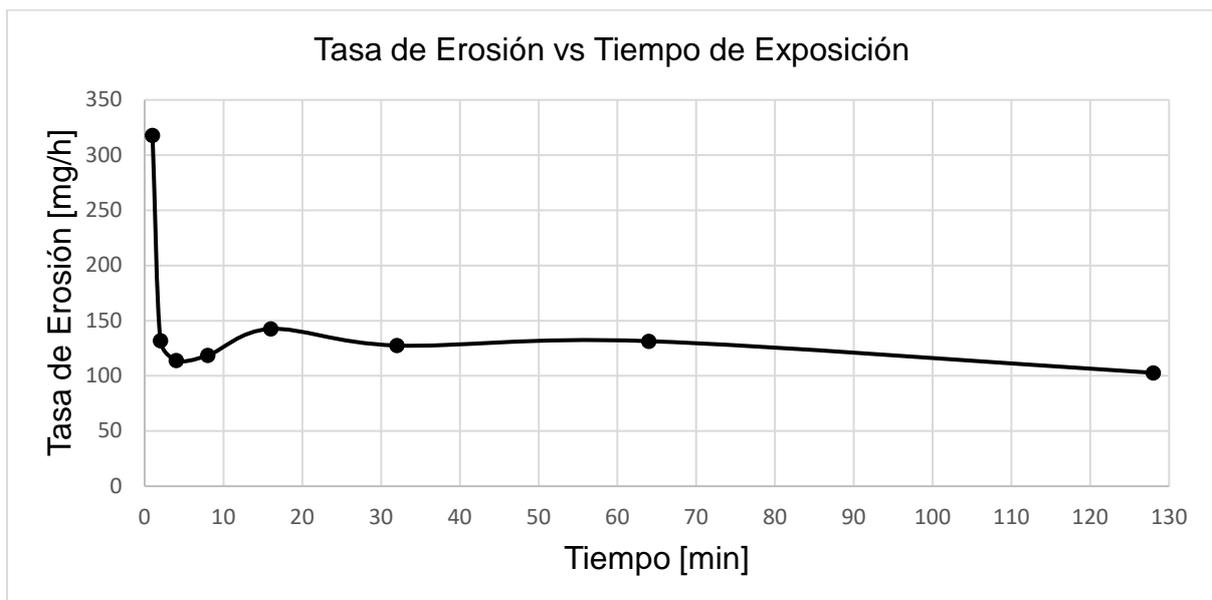


Figura 41. Tasa de Erosión probeta 5

Resumen de Experimentación

Los valores obtenidos para el conjunto de probetas que poseen el recubrimiento de carburo de tungsteno se presentan a continuación:

Tabla 22. Resumen para datos obtenidos en el set de probetas

Probeta	1	2	3	4	5	Promedio
Pérdida de Masa Acumulada [mg]	245.5	261.3	224.5	249.9	251.9	246.6
Tasa de Erosión [mg/h]	348.0	360.0	318.0	312.0	318.0	331.2

Los intervalos usados para llevar a cabo la experimentación son los siguientes: 1, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64. Los intervalos son tomados de literatura de investigación externa sobre recubrimientos (Lamana, Pukasiewicz, & Sampath, 2018). El análisis correspondiente de las variaciones entre resultados de cada probeta se realizará con respecto a la Pérdida de Masa Acumulada y Tasa de Erosión como se planteó al inicio de la presentación de los resultados para el recubrimiento de Carburo de Tungsteno.

Análisis de Resultados Gráfica de Pérdida de Masa Acumulada

A continuación, se muestran las curvas obtenidas para cada probeta con el objetivo de visualizar gráficamente, que tan grandes o pequeñas son las variaciones entre cada curva, luego se procederá de igual manera que en el primer conjunto de pruebas a analizar que causó dicha variabilidad.

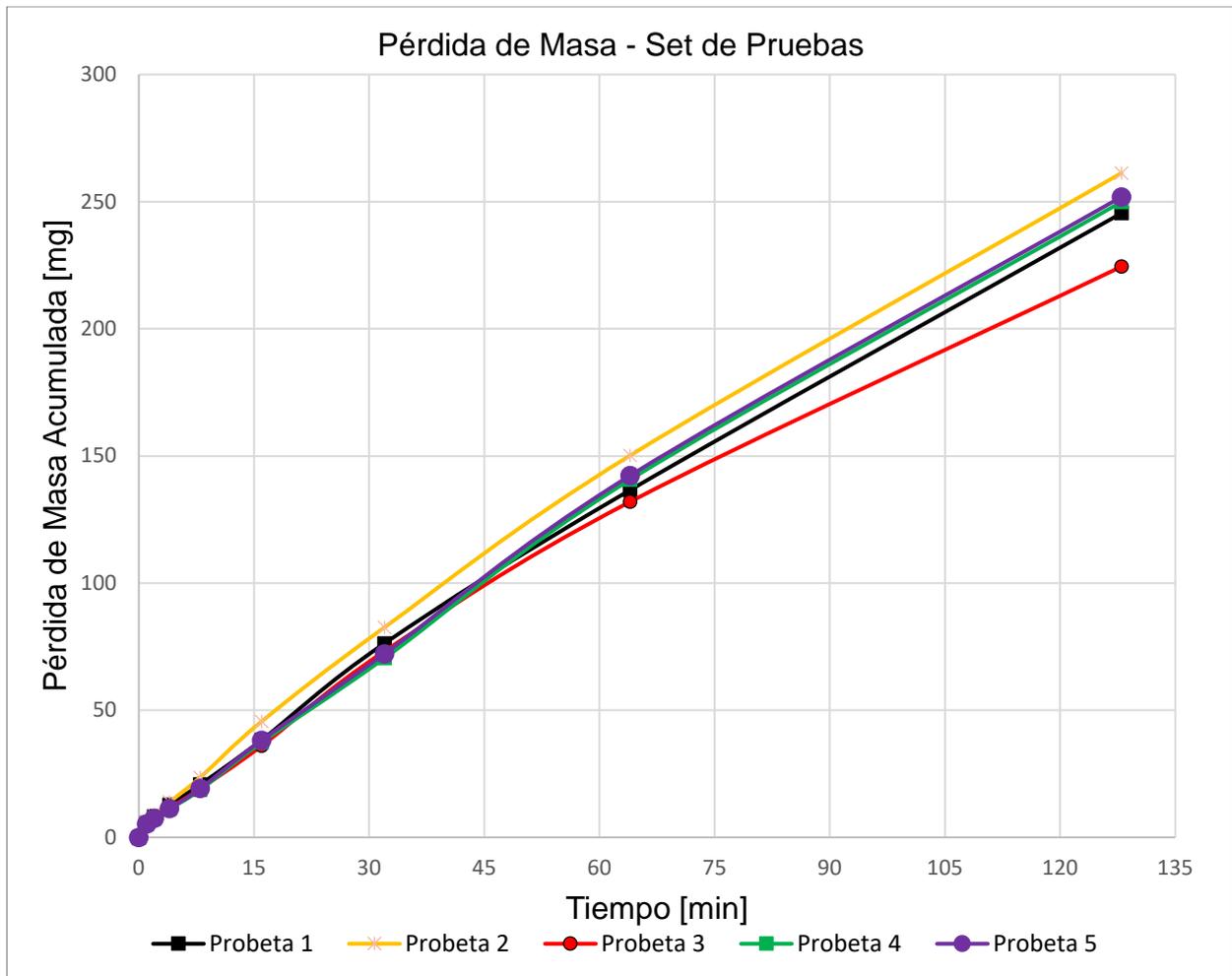


Figura 42. Tasa de erosión respectivo de cada probeta usada en el conjunto

En la figura presentada se observa que las curvas siguen un comportamiento similar en cada caso y de igual manera que en el primer conjunto de pruebas se observa que a medida que pasa el tiempo la variación aparentemente crece. Para este conjunto de pruebas no existieron problemas con respecto al control de temperatura. Para comentar mejor acerca de los resultados obtenidos en esta primera gráfica. Se presentan los promedios con los datos por cada intervalo y mostrando además la desviación estándar que tiene cada punto en particular. Con ello se puede establecer de mejor manera las diferencias entre datos y mencionar de mejor manera las variaciones que se obtuvieron.

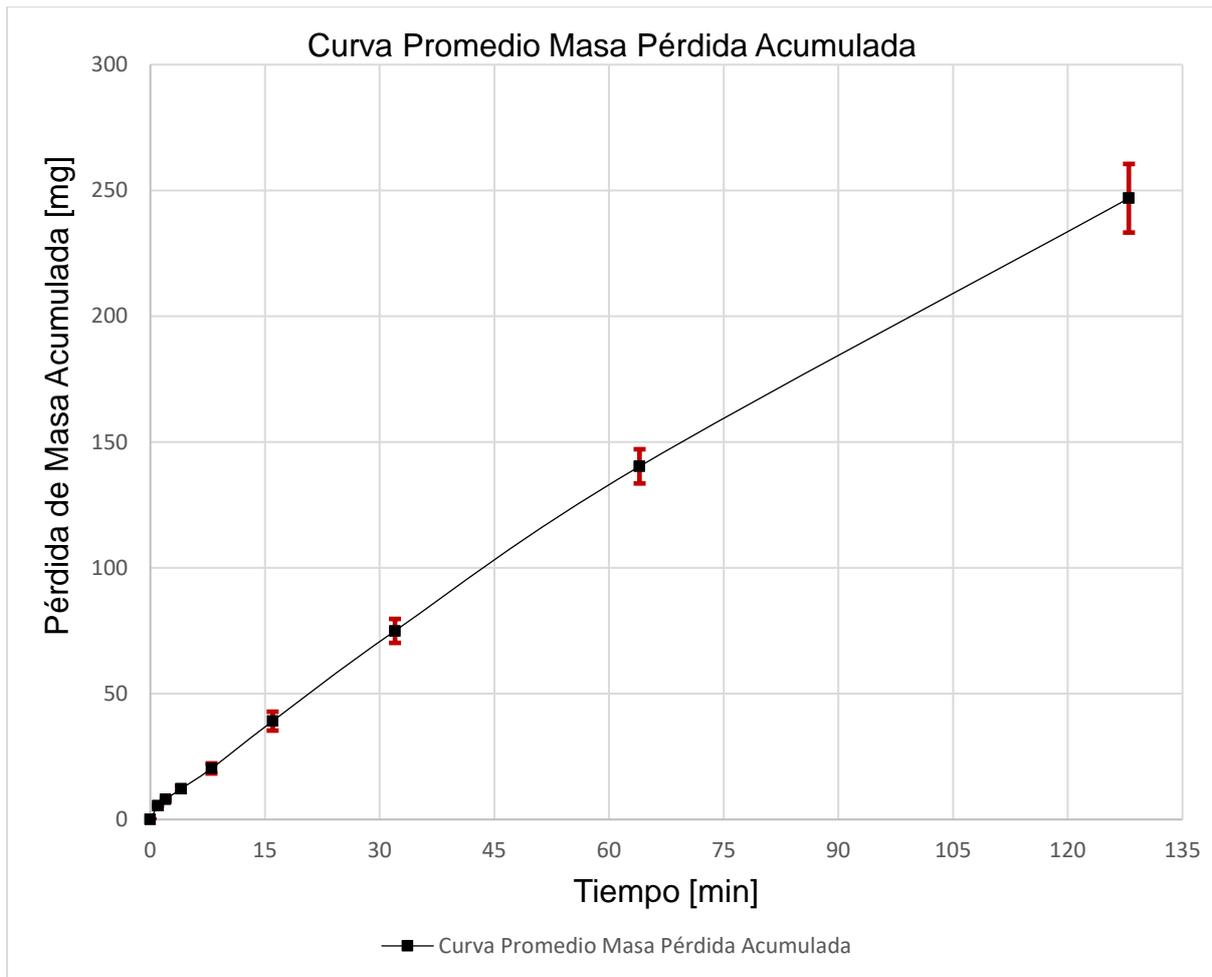


Figura 43. Gráfica con datos promedios de tasa de erosión del conjunto de pruebas con Recubrimiento de Carburo de Tungsteno

En la figura Figura 43, se aprecia de igual manera que en el primer conjunto de pruebas la variabilidad incrementa con el tiempo, por lo que se podría suponer que esto es un factor presente en las gráficas de pérdida de masa. Sin embargo, aquí se observan variabilidades mayores con respecto a las primeras pruebas realizadas. Esto se debe a que el recubrimiento puede contener sus variables internas de su proceso pertinente, como pueden ser densidad y porosidad que de alguna manera afecta a los valores obtenidos. Además, un inconveniente que era palpable fue que el espesor del recubrimiento no presentaba una medida continua, y por lo tanto existían problemas en la regulación de altura y esto consecuentemente afecta al impacto de

las burbujas, ya que en ciertas áreas se existen variaciones con respecto a la distancia entre el horn y la probeta. Dichos factores son externos al equipo pero que de igual manera pueden ser corregidos mediante una estandarización de las probetas. Ahora se presentan las curvas en términos volumétricos, tanto la cual resultó a partir del promedio de las probetas como la de la investigación externa.

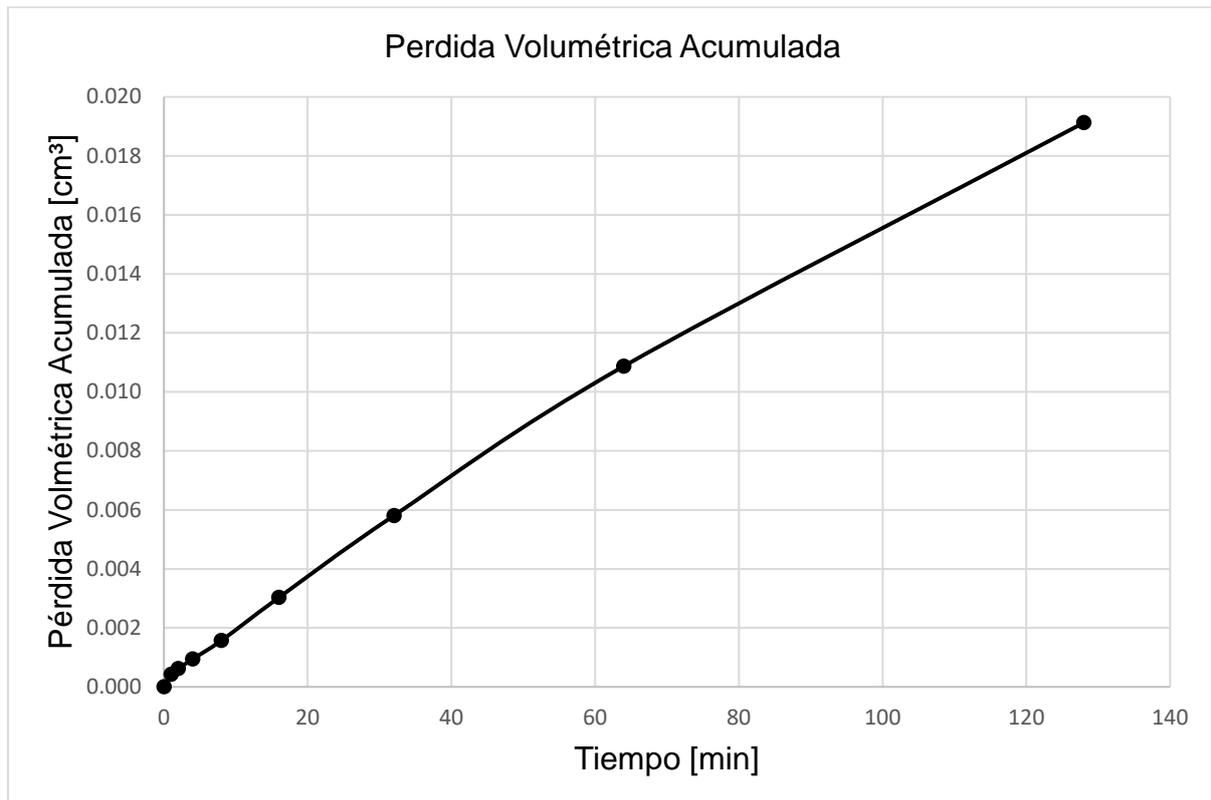


Figura 44. Pérdida Volumétrica Acumulada

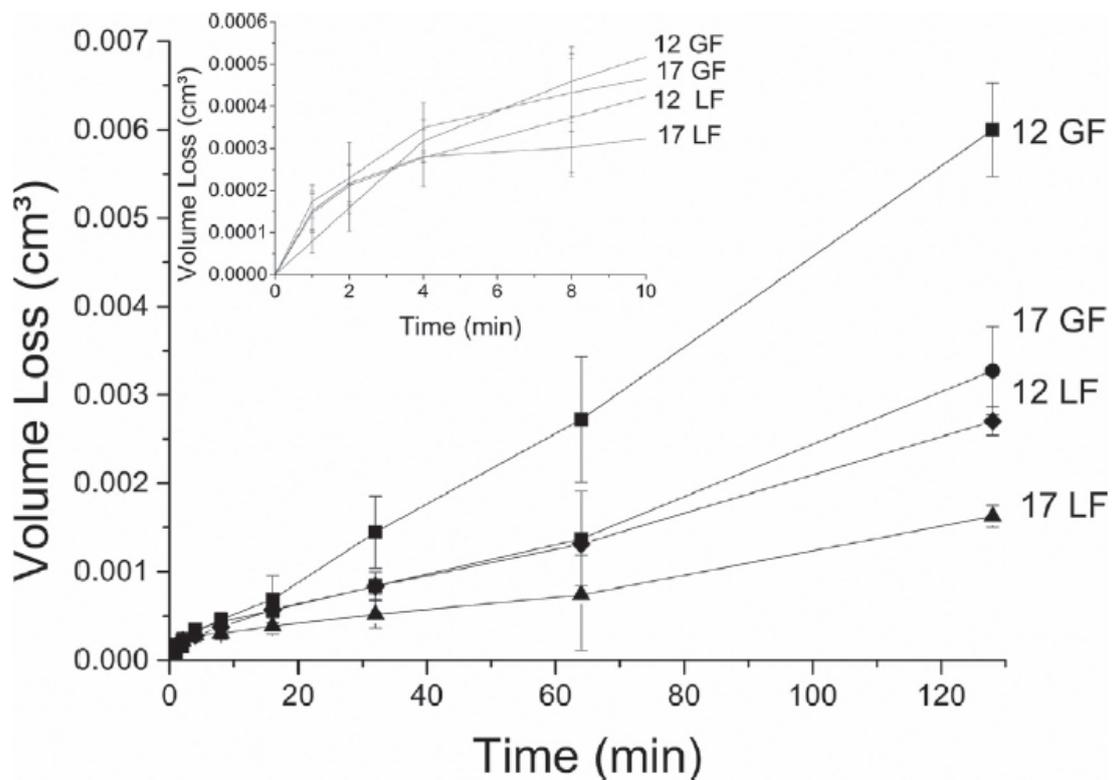


Figura 45. Pérdida Volumétrica Acumulada – Investigación (Lamana et al., 2018)

Con las gráficas presentadas, se corrobora el funcionamiento del equipo al obtener una referencia en cuanto al comportamiento que se presenta en la investigación. Los órdenes de magnitud son similares, sin embargo, la pérdida volumétrica en el recubrimiento evaluado posee menor eficiencia que en el de la investigación. El comportamiento se presenta de manera similar por lo que efectivamente las pruebas brindan resultados correctos.

Análisis de Resultados Gráfica de Tasa de Erosión

De igual manera se muestran las gráficas obtenidas para cada probeta de las tasas de erosión que se encuentran en cada probeta. La siguiente gráfica resulta relevante ya que permite ver el comportamiento de las tasas de erosión en un recubrimiento

que es usado para proteger a sistema que contienen fluidos del fenómeno de erosión por cavitación.

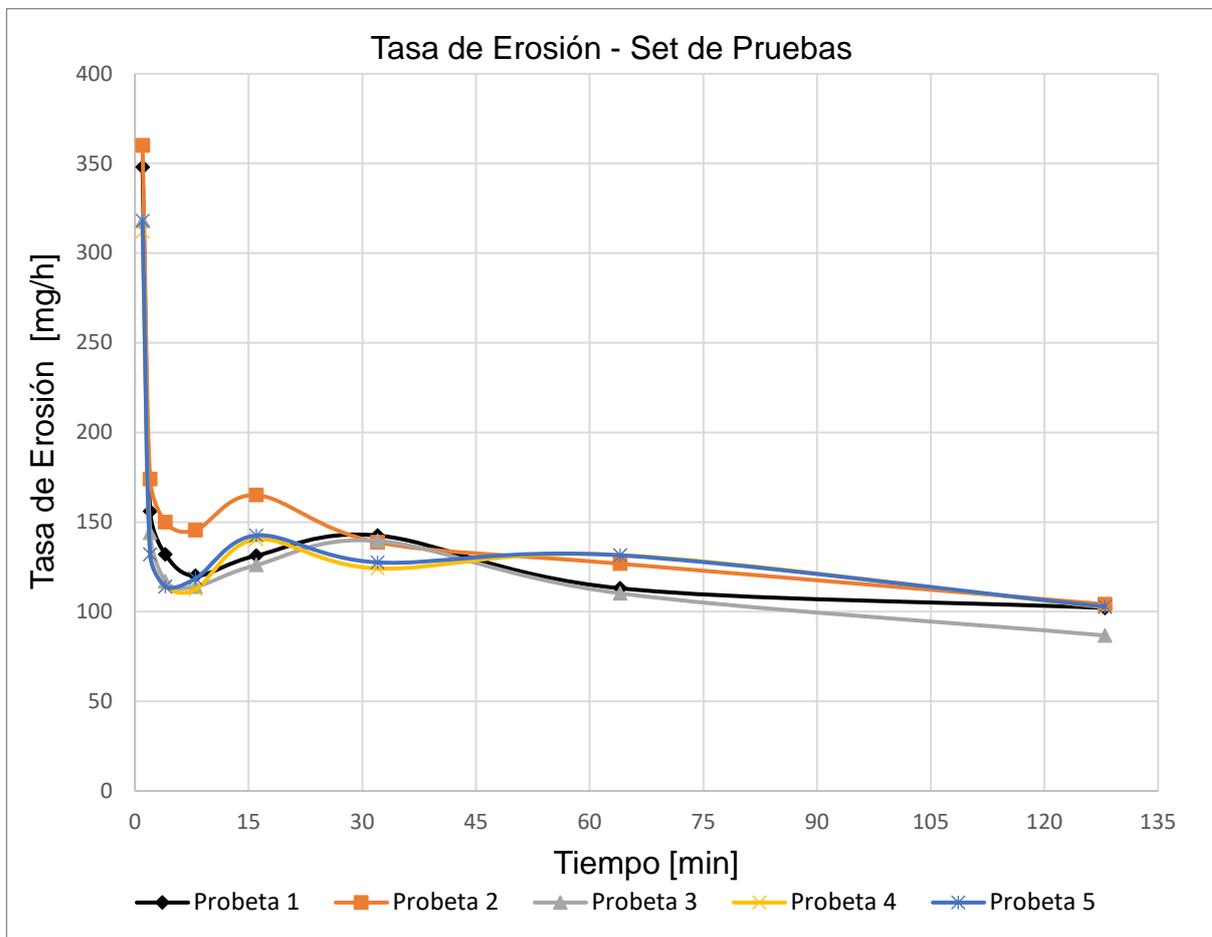


Figura 46. Tasa de erosión respectivo de cada probeta usada en el conjunto

En la figura 46, se observa un comportamiento similar al que se propone Lamada et al., en una investigación puntual sobre el efecto del cobalto en la protección a resistencia a varios fenómenos con respecto a recubrimientos. Donde, en sus resultados la tasa es mayor en un inicio y con el tiempo empieza a decrecer. El efecto de la cavitación puede inducirse en mayor escala en los recubrimientos cuando estos poseen efectos de esfuerzos residuales y porosidad, puesto que la fractura se propaga e amplifica el efecto de erosión del material, en este caso ruptura constante del recubrimiento y con ello desprendimiento del mismo (Lamana et al., 2018).

Una vez comprobado el comportamiento de la curva que se obtuvo frente a experimentos exteriores, es importante analizar la variabilidad de las pruebas que fueron expuestas a partir de la curva de pérdida de masa acumulada, los cuales se mencionarán nuevamente a lo largo del comentario sobre las desviaciones estándar encontradas para la tasa de erosión. A continuación, se presentará un gráfico el cual contiene un promedio de los puntos y contiene de etiqueta la desviación estándar que se producen entre los puntos para cada intervalo de tiempo usado.

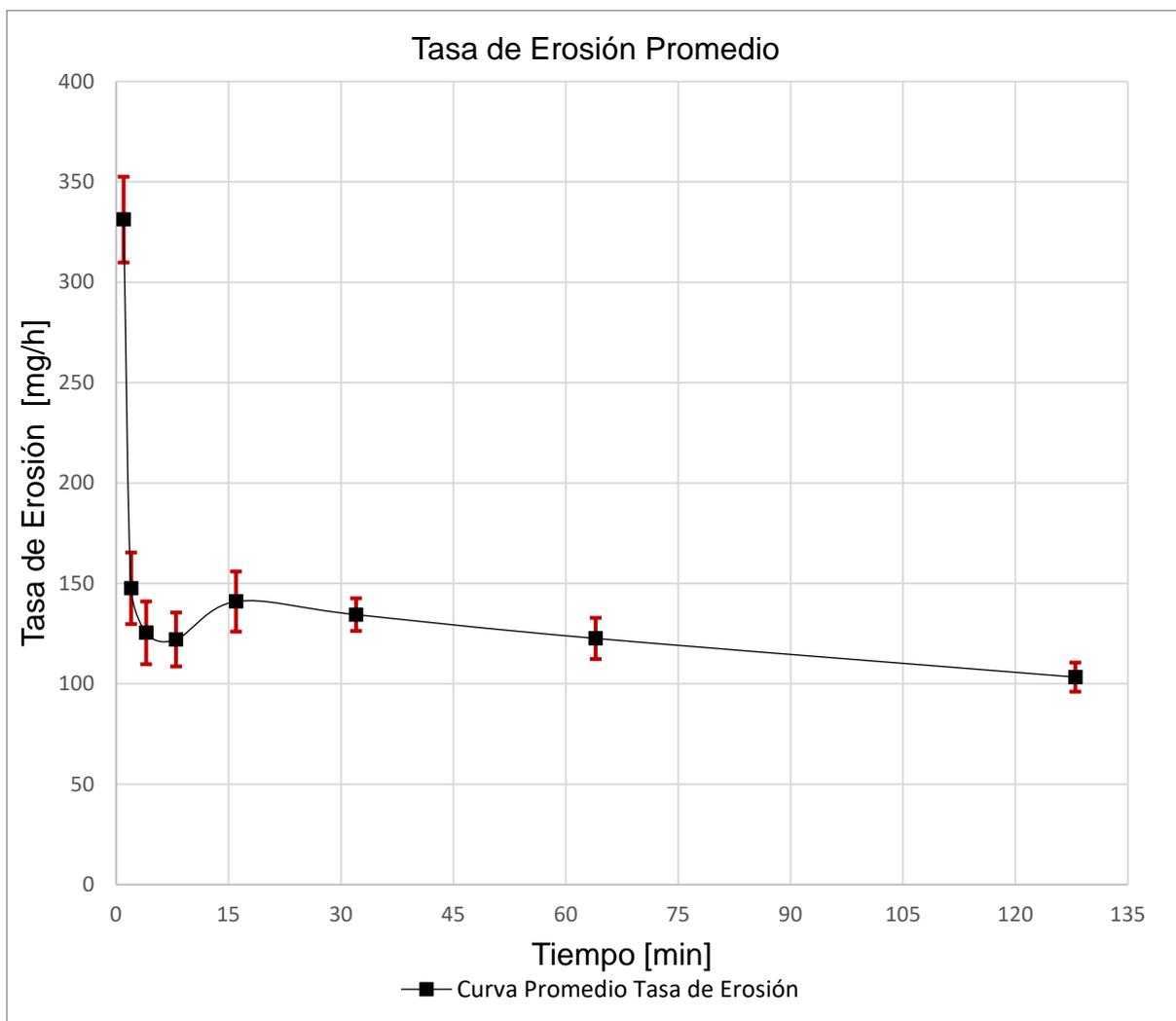


Figura 47. Gráfica con datos promedios de tasa de erosión del conjunto de pruebas con Recubrimiento de Carburo de Tungsteno

Las altas desviaciones estándar que se presentan en la gráfica anterior se deben a dos razones principalmente. En primer lugar, las variabilidades que se mencionaron anteriormente inherentes del proceso del recubrimiento en cuanto a términos de porosidad y espesor. De igual manera no son valores alarmantes ya que presentan un comportamiento similar frente a investigaciones externas. En segundo lugar, se encontró mediante estos experimentos que, en intervalos más cortos, los valores de tasa de erosión se vuelven bastante sensibles a la diferencia de miligramos. Entonces, esto también puede relacionarse con el sistema de medición que se esté empleando. Las balanzas de precisión pueden contener errores si no están calibradas en su totalidad, lo que ocasiona que las mediciones fluctúen y debido a que los valores iniciales que presentan tasas de erosión elevadas en periodos de tiempos cortos ocasionan que la desviación estándar incremente. En cualquier caso, los resultados obtenidos si reflejan el comportamiento normal de un recubrimiento frente al efecto de la erosión por cavitación, lo cual se muestra a continuación presentando las gráficas de la tasa de erosión en términos volumétricos, la obtenida mediante las pruebas y la presentada en la investigación seleccionada.

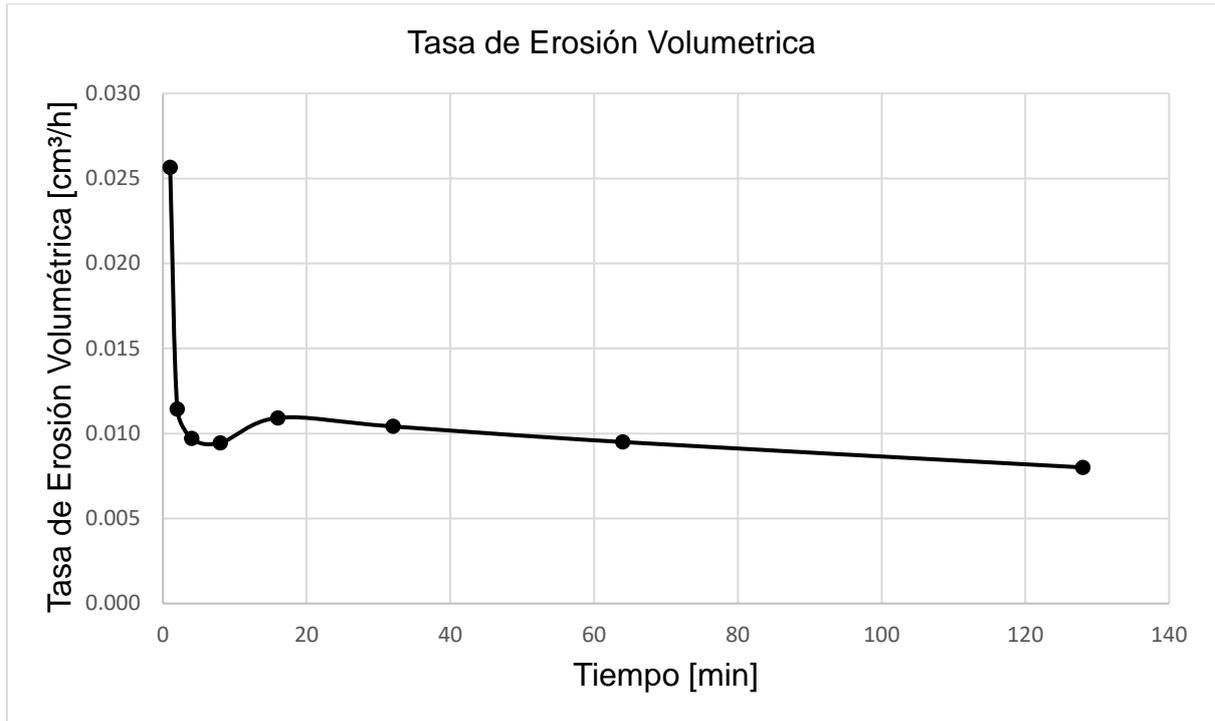


Figura 48. Tasa de Erosión Volumétrico

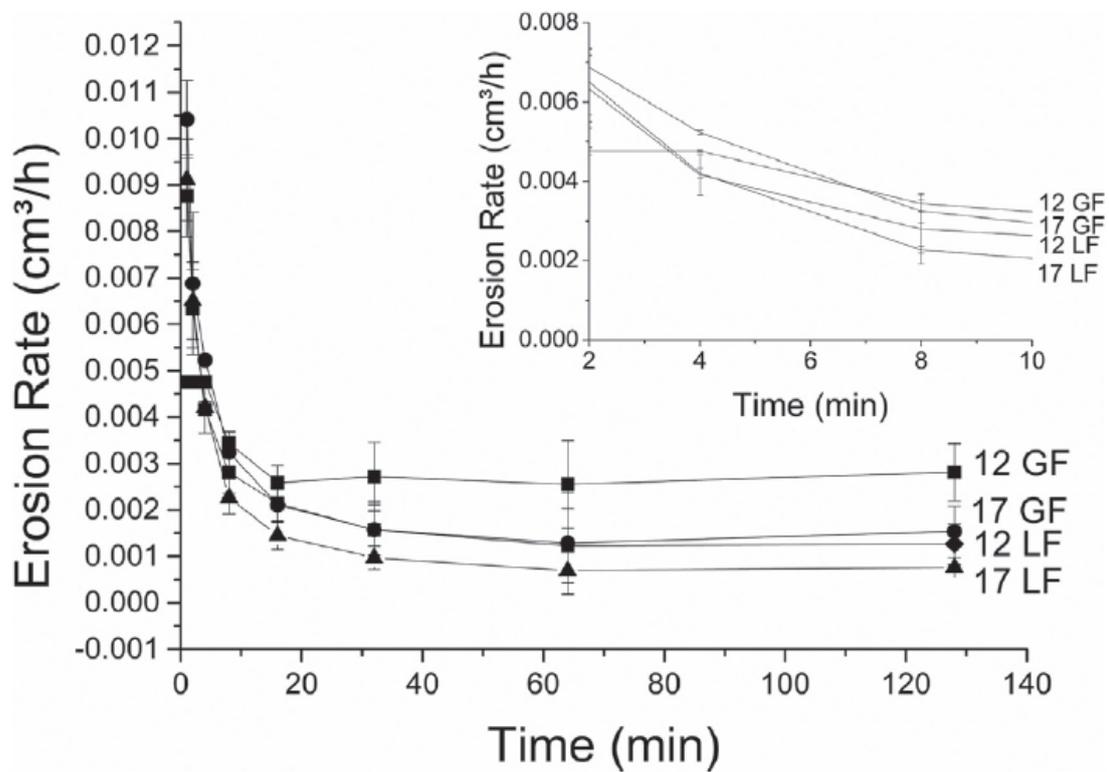


Figura 49. Tasa de Erosión Volumétrico - Investigación (Lamana et al., 2018)

En ambas gráficas presentadas se observa el mismo orden de magnitud en cuanto a las curvas presentadas. Se corrobora que el comportamiento es parecido a pruebas realizadas en otro equipo y en cuanto a los órdenes de magnitud que se presentan en el eje 'y'. A pesar, de que no son iguales, esto se debe a que el recubrimiento que se encuentra en la investigación es más eficiente que el evaluado, dado su composición y procedimiento.

Comparativa mediante MDE Acumulado entre Aleación Aluminio 6061 y Carburo de Tungsteno

Usando los datos promedios de la pérdida de masa acumulada obtenidos para cada conjunto de pruebas y transformando esos valores de [mg] a [μm], es decir, a la pérdida volumétrica por unidad de área, con el fin de comprobar que eventualmente el recubrimiento presenta una mejor resistencia a la erosión que la aleación de aluminio 6061. Para comprobar se va a elegir un valor de MDE acumulado de 50 μm y de 100 μm según establece la norma. Observando de manera gráfica en las curvas cuanto tiempo acumulado de exposición le toma al material llegar al valor especificado de MDE se puede establecer cual de los dos materiales es más resistente a la erosión por cavitación. Entre mayor sea el tiempo para alcanzar dicho valor, más resistente será el material a la erosión por cavitación.

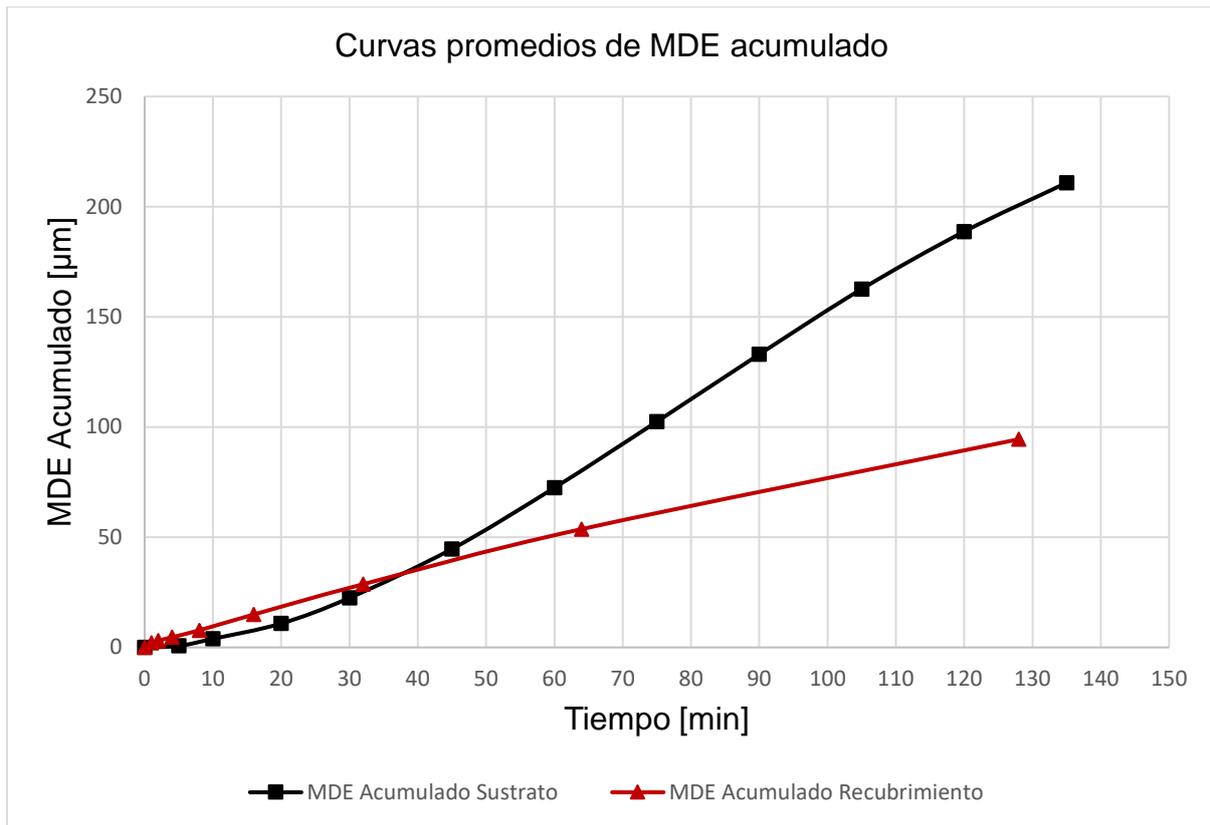


Figura 50. Curvas de MDE promedio para ambos conjuntos de probetas

De manera visual, se observa que eventualmente el recubrimiento presenta un crecimiento lento en comparación del sustrato evaluado. Los valores respectivos de MDE acumulado se presentan a continuación:

Tabla 23. Valores de MDE acumulado para 50 µm y 100 µm

Material	t_{50} [min]	t_{100} [min]
Aleación Aluminio 6061 T6	47	73
Carburo de Tungsteno	59	133

Los valores son extraídos de la figura 50, y en la tabla anterior se evidencia efectivamente que al recubrimiento le toma más tiempo en llegar a los mismos valores de MDE. Se confirma la suposición inicial de la resistencia mayor sobre el sustrato, el cual es un material dúctil.

CONCLUSIONES

A lo largo del proyecto de titulación se establecieron objetivos puntuales para la elaboración del equipo, lo cual abarca todo un largo proceso de extracción de parámetros y condiciones para la selección de componentes y soluciones a distintos problemas que se presentaron a lo largo de las pruebas iniciales y armado del equipo en general. Sin embargo, luego del proceso inicial se obtuvo un equipo con condiciones que coinciden con el estándar propuesto, ASTM G32-16. No obstante, es susceptible a mejoras continuas, lo cual eliminarían variabilidad entre los resultados y lo convertirían en un equipo más robusto. Se logra generar un equipo capaz de evaluar recubrimientos bajo el método correspondiente que lo respalda y la configuración del equipo es la correcta para ejecutar dichas pruebas, a su vez se cumplen los requisitos establecidos de manera específica para cierta configuración del equipo en su cumplimiento con la norma.

El control de temperatura logra mantener la temperatura en un rango deseado, lo cual es observable dentro de los resultados obtenidos, donde las curvas poseen tendencias similares y valores cercanos unos a otros.

El sistema de circuitos es funcional y cumple su propósito, este puede ser reducido en tamaño eventualmente para un mejor funcionamiento y traslado del equipo de ser necesario. Se puede inducir a usar nuevos dispositivos de control para incrementar la robustez del equipo, específicamente la parte de control.

En cuanto a los resultados que se obtienen en el primer set de pruebas con la aleación de aluminio 6061, se muestran variaciones pequeñas para un primer prototipo de “rig” de cavitación y que eventualmente puede ser mejorado y hacer que la repetibilidad de resultados sea aún mejor. Como se mencionó en la sección pertinente a estas pruebas, existió una curva que debido a un problema con la

temperatura sufre una variabilidad con respecto a las demás curvas, esto deja en evidencia que la temperatura en los ensayos es importante y afecta directamente a las tasas de erosión que se producen en las probetas. La estandarización de probetas es importante para futuros ensayos en la que las probetas tengan exactamente la misma altura, con esto solo se tendría que calibrar una sola vez para todo el conjunto de ensayos. Por parte de los resultados realizados con recubrimientos, se encontró que la variabilidad inherente del proceso para realizar el recubrimiento afectó en cierta forma a la regulación de distancia entre el horn y la probeta. Variables como porosidad, adherencia y densidad, pueden variar significativamente los resultados de cada probeta. Dado que se desconoce el procedimiento interno que se usó para las probetas se puede asumir de manera correcta que es un factor para aumentar la variabilidad. La medición de masas en ambos ensayos también puede verse afectado por el tipo de balanza que se emplee, esto puede ocasionar que las lecturas contengan un error y que se acumule en cuanto a cada probeta erosionada. Sin embargo, el comportamiento normal de un recubrimiento frente a la erosión por cavitación fue corroborado. Además, se corroboró efectivamente, la comparación entre dos materiales, en este caso un dúctil y un cementado. Donde, la resistencia por erosión se da mayor en el recubrimiento evaluado sobre el sustrato, esto se da por el método propuesto en la norma empleada para dicha comparación.

Finalmente, está a disposición del investigador para hacer el diseño de experimentos que crea convenientes, sin embargo, en la sección de metodología están mencionados los parámetros generales a tomar en cuenta para la experimentación.

REFERENCIAS

- ASTM International. (2016). ASTM G32-16 Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus. *ASTM Standards, i*, 1–18.
<https://doi.org/10.1520/G0032-10>
- Chahine, G. L., Franc, J., & Karimi, A. (2014). Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction, *106*.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-8539-6>
- Chirus, D., & Nedeloni, M. (2013). Cavitation Erosion Research for AISi12 Alloy Tested at Different Time Periods, (1), 55–64.
- Gugulothu, S. K., Kumar, P. R. V., & Deekshith, P. (2012). Exploring cavitating phenomenon with and without ultrasonic transducer. *Procedia Engineering, 38*, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.022>
- Hattori, S., & Mikami, N. (2009). Cavitation erosion resistance of stellite alloy weld overlays. *Wear, 267*(11), 1954–1960. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.05.007>
- Kim, K.-H., Franc, J.-P., Karimi, A., Kim, K.-H., Franc, J.-P., & Karimi, A. (2014). Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction, *106*, 399. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8539-6>
- Kumar, H., Chittosiya, C., & Shukla, V. N. (2018). HVOF Sprayed WC Based Cermet Coating for Mitigation of Cavitation, Erosion & Abrasion in Hydro Turbine Blade. *Materials Today: Proceedings, 5*(2), 6413–6420.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.253>
- Lamana, M. S., Pukasiewicz, A. G. M., & Sampath, S. (2018). Influence of cobalt content and HVOF deposition process on the cavitation erosion resistance of WC-Co coatings. *Wear, 398–399*(May 2017), 209–219.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.009>

Nad, M. (2010). Ultrasonic horn design for ultrasonic machining technologies.

Materials Science and Technology, 4, 79–88.

Peshkovsky, S. L., & Peshkovsky, A. S. (2007a). Matching a transducer to water at cavitation: Acoustic horn design principles. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(3), 314–322. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.07.003>

Peshkovsky, S. L., & Peshkovsky, A. S. (2007b). Matching a transducer to water at cavitation: Acoustic horn design principles. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(3), 314–322. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.07.003>

Rao, S. S. (2012). *Vibraciones Mecánicas. Lecturas De Ingeniería 17 Vibraciones*. <https://doi.org/10.1038/nclimate2815>