



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación de la resistencia a erosión por cavitación de superficies texturizadas

Sebastián Andrés Romo Arango

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de materiales y minerales

Medellín, Colombia

2013

Evaluación de la resistencia a erosión por cavitación de superficies texturizadas

Sebastián Andrés Romo Arango

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en ingeniería – Materiales y procesos

Director:

PhD. Alejandro Toro

Grupo de Tribología y Superficies

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2013

Resumen

En este trabajo se evaluó la hipótesis de que mediante la generación de topografías adecuadas es posible modificar la resistencia al desgaste por cavitación de un acero inoxidable. Para esto se evaluó la resistencia al desgaste de muestras cuya superficie fue modificada mediante texturizado para obtener una topografía controlada; se realizaron pruebas de erosión por cavitación, en las cuales se comparó la respuesta de las superficies modificadas y el comportamiento del material con una superficie con un pulido tradicional. La morfología controlada se obtuvo mediante remoción de material utilizando un proceso electroquímico, dicho método fue puesto a punto mediante la caracterización de las superficies obtenidas.

Se estudiaron los cambios de la topografía en las pruebas de cavitación por medio de descriptores numéricos, de la función de autocorrelación y de la densidad espectral de potencia; las superficies también fueron analizadas mediante microscopía óptica, electrónica de barrido (SEM), y estereoscopia.

Palabras clave: Erosión por cavitación, acero inoxidable, texturizado superficial, resistencia al desgaste, rugosidad, tribología.

Abstract

In this investigation the possibility of changing the cavitation resistance of a stainless steel through proper modification of surface topography was studied. Wear tests were performed using a cavitation stationary machine in which chemically textured surfaces were evaluated. Controlled surface topography was obtained by material removal using an electrochemical method, which was tuned by using the information from geometrical characterization of the surfaces obtained.

It was measured the change of surface roughness using a contact profilometer and statistical descriptors of surface such as R_q , R_{sm} , the autocorrelation function and the power spectral

density. The surfaces were also analyzed by optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and stereoscopy.

Keywords: Cavitation erosion, stainless steel, surface texturing, wear resistance, surface roughness, and tribology.

Contenido

	Pág.
Introducción	1
1. Marco teórico	5
1.1 Desgaste por cavitación	5
1.1.1 Aspectos generales	5
1.1.2 Mecanismos de desgaste que ocurren durante la exposición a la cavitación	7
1.1.3 Pruebas de laboratorio	9
1.1.4 Métodos para mejorar la resistencia a la erosión por cavitación	12
1.1.5 Funcionalización de superficies sometidas a erosión por cavitación	15
1.2 Ingeniería de superficies para desempeño funcional	18
1.2.1 Propiedades funcionales de superficies	19
1.2.2 Caracterización de superficies	21
1.2.3 Tecnología para texturizado de superficies	21
1.2.4 Desgaste de superficies texturizadas	24
2. Objetivos	27
2.1 Objetivo general	27
2.2 Objetivos específicos	27
3. Metodología	29

3.1	Materiales	29
3.1.1	Composición química	30
3.1.2	Tratamiento térmico	30
3.2	Obtención de texturas	30
3.3	Pruebas de erosión por cavitación	34
3.3.1	Diseño experimental	36
3.4	Caracterización superficial	39
3.4.1	Caracterización de la microestructura	39
3.4.2	Caracterización topográfica	40
4.	Resultados y discusión	43
4.1	Microestructura y composición química de los materiales de estudio	43
4.2	Texturizado electroquímico	44
4.3	Resistencia al desgaste por cavitación	55
4.3.1	Pérdida de masa	55
4.3.2	Evolución de la topografía de las superficies	59
4.3.3	Consideraciones sobre los mecanismos de desgaste	66
5.	Conclusiones y recomendaciones	71
5.1	Conclusiones	71
5.2	Recomendaciones	72

Contenido

IX

Bibliografía

73

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Esquema del colapso de una burbuja de vapor cerca de la superficie sólida. Tomado de [22].	6
Figura 1-2. Esquema de una máquina para pruebas de cavitación con tubo Venturi. Tomado de [27].	9
Figura 1-3. Esquema de una máquina de chorro cavitante para pruebas de cavitación. Tomado de [28,29].	10
Figura 1-4. Esquema de una máquina tipo disco rotativo para pruebas de cavitación. Tomado de [30].	10
Figura 1-5. Esquema de una máquina vibratoria para pruebas de cavitación	11
Figura 1-6. Curvas características de los ensayos de cavitación construidas a partir de la pérdida de masa. Nota: A = Tiempo de incubación nominal, B = Tasa de erosión máxima, C = Tasa de erosión final, D = Intercepto de la línea de erosión final. Tomado de [31].	12
Figura 1-7. Proceso de desarrollo de aplicaciones basadas en la superficie	19
Figura 1-8. Corte transversal de una superficie con textura auto-formante	24
Figura 3-1. Esquema de la geometría de las probetas de acero AISI 304 obtenidas a partir de la placa	29
Figura 3-2. Ciclo térmico programado para el tratamiento térmico del acero inoxidable 304.	31
Figura 3-3. Diseño geométrico de los patrones para la impresión de la máscara protectora	32

Figura 3-4. Montaje en prensa de la probeta para transferir la tinta polimérica al metal	33
Figura 3-5. Condiciones de montaje de la celda electrolítica	33
Figura 3-6. Esquema de la máquina para las pruebas de erosión por cavitación.	34
Figura 3-7. Esquema de las variables de entrada, los factores controlables y las salidas del diseño experimental.	37
Figura 3-8. Portaprobetas del cavitómetro	38
Figura 4-1. Micrografía de las muestras correspondientes al acero AISI 304. a) Muestra atacada con HNO_3 60 % v/v + H_2O , ataque electrolítico, 1.1 voltios – 0.075-0.14 A/cm ² , b) Muestra atacada con <i>Beraha's II</i> .	44
Figura 4-2. Máscaras poliméricas aplicadas sobre el acero AISI 304 observadas en un microscopio estereoscópico. a) Círculos de 1 mm de diámetro espaciados 1.5 mm entre sí (10X), b) Detalle de un círculo de 0.5 mm de diámetro (100X), c) Representación esquemática del flujo de polímero que produce cambios en la geometría diseñada.	46
Figura 4-3. Superficie texturizada obtenida a partir de un ataque un reactivo compuesto por HCl, HNO ₃ , ácido acético [57]. a) Imagen estereoscópica de la muestra 10X, b) Detalle de los fondos de los agujeros con picadura, c) Perfil de rugosidad de la muestra	47
Figura 4-4. Área de las muestras usadas para calcular las condiciones de corriente durante el proceso de remoción de material	48
Figura 4-5. Evaluación de la profundidad de los agujeros en función del tiempo de exposición en el proceso de texturizado.	49
Figura 4-6. Perfiles 3D de las superficies texturizadas, a) P1,0-100-2,0-00, b) P1,0-100-1,5-00, c) P0,5-050-2,0-00, d) P0,5-100-1,5-00	50

Figura 4-7. Vista superior de las superficies texturizadas, a) P1,0-050-1,5, b) P0,5-050-1,5	51
Figura 4-8. Imagen estereoscópica de las superficies texturizadas obtenidas a partir del proceso electroquímico. a) P1,0-100-1,5 a 10X, b) P1,0-100-1,5 a 50X, c) P0,5-050-1,5 a 10X, d) P0,5-050-1,5 a 50X	52
Figura 4-9. Perfil transversal de las superficies texturizadas. a) Perfil transversal de una muestra de agujeros de 500 μm de diámetro y espaciamiento entre ellos de 1,5 mm, b) Perfil transversal de una muestra de agujeros de 1 mm de diámetro y espaciamiento entre ellos de 2 mm.	53
Figura 4-10. Perfiles para la medición de la profundidad de la textura	54
Figura 4-11. Pérdida de masa acumulada en función del tiempo ensayo en las pruebas de erosión por cavitación, a) M1, b) M2, c) M3, d) M4	55
Figura 4-12. Estimación de la tasa de desgaste en estado estable y el tiempo de incubación	58
Figura 4-13. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados, a) Variable respuesta TI, b) Variable respuesta RD	59
Figura 4-14. Comparación entre el estado inicial y final de las superficies de la muestra sin texturizar	60
Figura 4-15. Evolución del perfil de rugosidad durante la prueba de desgaste en una muestra texturizada. a) Perfiles medidos en la zona de los agujeros de la textura, b) Perfiles tomados en la zona no afectada por el proceso electrolítico	61
Figura 4-16. Cambio de los parámetros de rugosidad Wq y Wsm en función del tiempo de ensayo de cavitación	62

-
- Figura 4-17. Curvas de ACF medidas en las muestras sometidas a erosión por cavitación. a) Cambio de la ACF de una superficie sin texturizar, b) Cambio de la ACF de una zona sin agujeros en una superficie texturizada, c) Cambio de la ACF de una zona con agujeros en una superficie texturizada. 63
- Figura 4-18. Curvas de **PSD** de las superficie texturizada en la zona sin agujeros. a) Muestra con geometría M4 durante los ensayos de cavitación, b) Muestra con geometría M2 durante los ensayos de cavitación. 64
- Figura 4-19. Curvas de PSD de las superficie texturizada en la zona con agujeros 65
- Figura 4-20. Superficie de una muestra sometida a la prueba de desgaste. (a) Estado inicial y (b) después de 30 minutos de ensayo. 67
- Figura 4-21. Partículas removidas de la superficie durante el proceso de desgaste 68
- Figura 4-22. Bordos de agujeros altamente deformados por el proceso de pulido. Pueden apreciarse bandas de deformación causadas por la cavitación. 68
- Figura 4-23. Vista superior de las zonas pulidas de las muestras después del ensayo de cavitación. 69
- Figura 4-24. Borde de un agujero de muestras texturizadas en el período de tasa de desgaste estable en un ensayo de cavitación. 70

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Procesos de texturizado por adición o remoción de material	21
Tabla 1-2. Procesos de texturizado por desplazamiento de material	22
Tabla 3-1. Compuestos químicos usados durante el proceso de texturizado	31
Tabla 3-2. Características de la prueba de cavitación	35
Tabla 3-3. Niveles de los factores del experimento	37
Tabla 3-4. Experimento de la evaluación del texturizado en cavitación, donde – significa bajo y + alto	38
Tabla 3-5. Parámetros de trabajo en el perfilómetro	41
Tabla 4-1. Composición química nominal y medida en las muestras por espectrometría de emisión óptica.	44
Tabla 4-2. Valores de profundidad obtenidos para cada condición de texturizado	54
Tabla 4-3. Tiempo de incubación (TI) y tasa de desgaste en estado estable (TD) para las pruebas de desgaste de las muestras con y sin textura	56

Introducción

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en la evaluación de la resistencia al desgaste erosivo por cavitación de superficies con un tratamiento de texturizado. Se buscó, con esta investigación, explorar nuevas alternativas que permitan incrementar la vida útil de distintos elementos sometidos al desgaste, a través de la búsqueda de características morfológicas de la superficie, que permitan obtener un mejor comportamiento. El estudio de la topografía de la superficie, por medio del análisis de una serie de descriptores estadísticos, permite un mayor acercamiento al entendimiento de las superficies como una parte funcional de sistemas tribológicos. De esta manera se pueden diseñar superficies para obtener comportamientos esperados, como se lleva a cabo hoy en día en la aplicación de recubrimientos para barreras térmicas o en el texturizado de superficies para mejorar las condiciones de lubricación. Esta última ruta, sin embargo, ha sido poco estudiada para aplicaciones en el área de erosión por cavitación.

La cavitación es un fenómeno producido por la formación y colapso de cavidades de vapor en líquidos debido a cambios significativos en la presión hidrostática. La erosión por cavitación se produce cuando las cavidades de vapor colapsan cerca de la superficie sólida provocando ondas de choque y micro-chorros de manera cíclica, causando remoción de material. Este proceso de erosión ocurre frecuentemente en componentes hidráulicos de centrales hidroeléctricas como turbinas hidráulicas, en las cuales se generan daños localizados que afectan su estabilidad estructural y rendimiento [1].

Es necesario buscar alternativas que permitan disminuir los problemas de erosión en estos componentes, para lo cual se analizó el efecto que tienen las características morfológicas de las superficies sobre el proceso de erosión. Este tipo de análisis podría permitir diseñar

texturas superficiales y procedimientos mediante los cuales se obtengan superficies que puedan ser resistentes al desgaste por cavitación, o en cualquier otra condición tribológica.

Para disminuir el desgaste por cavitación se han implementado diferentes estrategias, una de ellas es diseñar perfiles hidráulicos con los cuales se trata de evitar que se produzcan las cavidades de vapor o para que colapsen en puntos del sistema en los que sea menos perjudicial, sin embargo, debido a las condiciones de operación de muchos sistemas, no es posible evitar totalmente que se produzca la cavitación [2], adicionalmente, ésta es una solución que requiere el estudio particular de cada componente.

Otra posible forma de enfrentar este problema ha sido desarrollar materiales cuyas propiedades le den una resistencia al desgaste superior a las aleaciones tradicionales, en este campo se han logrado grandes avances, por ejemplo, la utilización de aleaciones a base de cobalto de alta resistencia al desgaste [3], estas aleaciones son costosas por lo que se han desarrollado como alternativa aceros cuya resistencia sea también elevada [4] y que tengan un costo menor; también se han desarrollado tratamientos superficiales como nitruración con los que se generan capas de alta resistencia al desgaste [5]. El principal problema que se ha encontrado con el desarrollo de materiales para mejorar la resistencia a la cavitación es que, en muchos casos, es producto de un conocimiento principalmente empírico, esto podría atribuirse a la falta de modelos que relacionen la resistencia al desgaste por cavitación, dada su naturaleza dinámica, directamente con las propiedades cuasi-estáticas de los materiales (dureza, módulo de Young, etc.) en las que se basa el desarrollo de nuevos materiales [6]. Por lo anterior, es necesaria la aplicación de estrategias alternativas que permitan incrementar la resistencia al desgaste por cavitación.

Una variable que tiene una influencia importante sobre el fenómeno de cavitación es la rugosidad de la superficie sólida [7–15], debido a que la geometría de la superficie puede generar cambios en la presión local del líquido con el que interactúa. Por lo tanto, sería posible generar diferentes condiciones hidrodinámicas en el sistema líquido + superficie, en el cual se genera la cavitación, y obtener, a partir de esto, respuestas distintas en el proceso de erosión para un mismo material [12]. Sin embargo, en la literatura estudiada, no se

encontró información acerca de un proceso de diseño de superficies relacionado con el comportamiento de la superficie sometida a la erosión por cavitación. Dado lo anterior, se consideró relevante evaluar qué relación existe entre el proceso de desgaste por cavitación y las características morfológicas de la superficie. Para ello fue necesario implementar, a nivel de laboratorio, técnicas de texturizado que permitieran obtener superficies con características controladas para evaluar el efecto que tienen dichas variables sobre el proceso de erosión por cavitación.

Se encontró en la literatura estudiada que los aceros inoxidable se encuentran entre los materiales más utilizados para la construcción de elementos hidráulicos, esto se debe a la combinación de sus propiedades mecánicas, las cuales son adecuadas para las condiciones de trabajo de estos elementos, y su buena resistencia al desgaste por erosión. Para algunas aplicaciones hidráulicas, se ha encontrado que es recomendable el uso de acero austenítico con alto contenido de cobalto o aceros sometidos a procesos de nitruración superficial [3,16,17], estos materiales han sido evaluados en pruebas de desgaste en laboratorio y en campo, demostrando que tienen las propiedades mecánicas adecuadas, que su resistencia al desgaste es superior a la de los aceros tradicionalmente utilizados en estos elementos y que son aplicables con técnicas convencionales que no elevan de manera considerable los costos de fabricación o reparación. Se buscó entonces establecer si la resistencia al desgaste por cavitación, de elementos hidráulicos, se ve afectada positiva o negativamente a través de la modificación de la morfología de la superficie a escala micrométrica, esto implica que no se tuvo en cuenta el efecto que podría tener el material sobre la resistencia al desgaste.

Se evaluaron los procedimientos de texturizado sobre una aleación acero austenítico 304 y no en las aleaciones más resistentes, el uso de este material permitió realizar pruebas de desgaste por cavitación de una duración menor a las de las aleaciones más resistentes, lo que implica una disminución en los tiempos de evaluación y los costos de la investigación.

1. Marco teórico

En este capítulo se presenta una definición de los principales conceptos y teorías discutidos a lo largo de este trabajo. Se presenta inicialmente una revisión del estado del arte haciendo enfoque en los trabajos que han estudiado la morfología de la superficie en aplicaciones relacionadas con la erosión por cavitación. En segundo lugar se presenta una definición de conceptos relacionados con los procesos de erosión por cavitación y la ingeniería de superficies, y una breve descripción de las técnicas utilizadas para fabricar superficies texturizadas.

1.1 Desgaste por cavitación

1.1.1 Aspectos generales

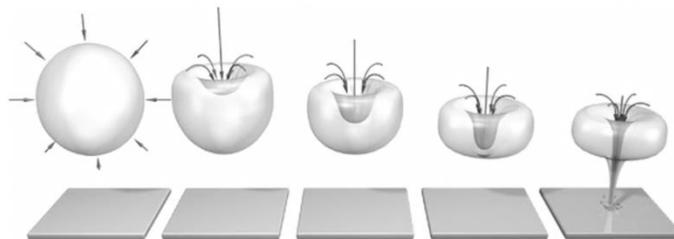
La tribología es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación que tienen lugar entre superficies que interactúan en movimiento relativo [18]. Los procesos de desgaste se pueden clasificar de diversas formas, si se toma como base la cinemática del sistema tribológico, se clasifica como: desgaste por deslizamiento, por rodadura, por oscilación, por impacto o por erosión; por otro lado, basándose en el mecanismo de remoción de material se podría clasificar como: desgaste por adhesión, por fatiga superficial, por abrasión, o por reacción triboquímica, [19,20]. De acuerdo a las anteriores clasificaciones, un proceso de desgaste por erosión, cuyo principal mecanismo es el desgaste por fatiga superficial, es la *erosión por cavitación* o *desgaste por cavitación*, el cual se presenta en gran cantidad de componentes hidráulicos como: tuberías, turbinas, propulsores, válvulas, etc. El daño derivado del desgaste por cavitación se presenta como una serie de agujeros o una superficie “escarchada” en la zona del componente sometido a la cavitación,

causando pérdidas en la eficiencia de las máquinas hidráulicas, vibraciones, e incluso fallas catastróficas, como por ejemplo: perforación completa del componente.

El desgaste por cavitación es causado por el proceso cíclico de nucleación, crecimiento y colapso violento de cavidades que contienen gas en un líquido, esto ocurre cuando la presión del líquido fluctúa, ya sea por cambios súbitos en el patrón de flujo o por vibraciones en el sistema. La cavitación se origina por la disminución localizada de la presión hidrostática en el líquido por debajo de la presión de vapor [19,21], posteriormente, cuando el líquido es sometido a esfuerzos de compresión, es decir, presiones hidrostáticas altas, estas cavidades se vuelven inestables y colapsan. Es importante notar que la fuerza generadora del colapso de las cavidades es la diferencia entre la presión hidrostática y la de vapor del líquido. Dicho colapso es directamente responsable por el proceso de desgaste, ya que se producen ondas de choque y micro-chorros en el líquido que causan deformación localizada y/o remoción de material [6]. La erosión por cavitación se define entonces como la pérdida progresiva de material de una superficie sólida debido a la exposición continua a esas ondas de choque y microchorros [19].

Cuando una cavidad colapsa en el líquido, lejos de cualquier superficie sólida, lo hace simétricamente y emite una onda de choque que viaja a través del líquido, que finalmente atenúa su efecto. Por otro lado, las cavidades que están en contacto con una superficie sólida o muy cerca y colapsan, lo hacen asimétricamente formando un micro-chorro de líquido dirigido hacia el sólido [6]. En la Figura 1-1 se puede observar el fenómeno previamente descrito.

Figura 1-1. Esquema del colapso de una burbuja de vapor cerca de la superficie sólida. Tomado de [22].



Las ondas de choque y el impacto de los chorros producidos por el colapso de las cavidades han sido considerados como las más probables causas de desgaste. Sin embargo, el daño en la superficie sólida no se produce por la acción de una sola cavidad sino por la acción repetida de un conjunto de estas, ya que una onda de choque se atenúa rápidamente y los diámetros de los chorros suelen ser muy pequeños, mientras que en conjunto se pueden lograr energías de impacto más altas, además de que se puede cargar cíclicamente la superficie de manera que esta puede fallar por fatiga.

Hay dos tipos de sistemas en los cuales se presenta cavitación: cavitación por flujo y cavitación por vibración. En el primero las cavidades nucleas y crecen hasta estabilizarse en el líquido, después son llevadas por la corriente hasta otro punto en el cual la presión hidrostática aumenta provocando su colapso; esta forma de cavitación ocurre comúnmente en hélices, tuberías, bombas hidráulicas, turbinas hidráulicas y válvulas. La cavitación por vibración ocurre cuando un líquido estacionario está sometido vibraciones que producen fluctuaciones en la presión suficientemente altas como para nuclear, crecer y colapsar las cavidades, dando como resultado la erosión de cualquier superficie sólida que se encuentre en las cercanías del conjunto de cavidades; este tipo de erosión se puede observar, por ejemplo, en camisas de cilindros en motores Diésel [6].

1.1.2 Mecanismos de desgaste que ocurren durante la exposición a la cavitación

En situaciones en las cuales ocurre cavitación, se producen gran número de cavidades al mismo tiempo que constituyen un clúster de cavidades, las cuales colapsan concertadamente cuando la presión hidrostática externa aumenta, comenzando por las que se encuentran en la periferia del clúster y continuando con las que están adentro. Esta secuencia hace que parte de la energía que se produce en el colapso de las cavidades, ubicadas en la parte exterior del clúster, se transfiera a las cavidades internas a través de un aumento en la presión hidrostática en el colapso individual, lo que resulta en un aumento significativo de la intensidad del colapso de las cavidades internas [6].

Los esfuerzos sobre la superficie son muy localizados debido al colapso conjunto del clúster de cavidades y pueden ser bastante severos, resultando en deformación de la superficie. La carga cíclica sobre la superficie lleva eventualmente a la remoción de material de la superficie [23].

El efecto erosivo de un clúster de cavidades depende de varios factores como la presión hidrostática, tamaño del clúster, distancia de las cavidades a la superficie, distribución del tamaño de las cavidades y la temperatura y densidad del líquido. La energía total del clúster de cavidades que es transferida al material sólido debe ser absorbida, disipada por el sólido o reflejada como ondas de choque en el líquido. El material sólido absorbe la energía de impacto como deformación elástica, plástica o fractura; los dos últimos procesos llevan a la erosión del material. Mientras más energía de deformación elástica o plástica pueda absorber un material, mayor será su resistencia a la erosión por cavitación. La erosión es generalmente asociada a pérdida de masa de la superficie, y para muchos materiales, bajo distintas formas de cavitación, es precedida de un periodo de incubación durante el cual el material se deforma ya sea elástica o plásticamente [6,24,25].

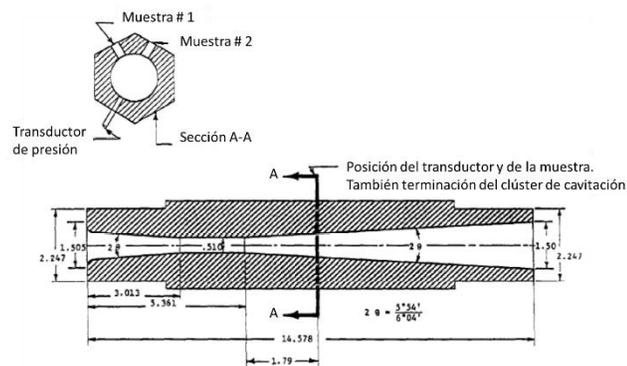
La carga que experimenta el material durante la exposición a un líquido con cavitación es localizada, dinámica y al menos, inicialmente, de naturaleza compresiva. La naturaleza localizada de la carga y el hecho de que ocurre en una superficie libre, hacen que la deformación no suceda bajo las condiciones normales que se presentan en la deformación de sólidos, por lo tanto el material es libre de deformarse de manera localizada o extendida. Debido a que el material no es deformado como un todo, la deformación de un grano o una fase dentro de un grano no se ve influenciada por el comportamiento de los granos alrededor, como sí sucedería en la deformación del cuerpo sólido en casos como el desgaste abrasivo. Adicional a este factor de carga localizada, se encuentra la naturaleza dinámica y de impacto de la carga. A esto se atribuye que no se haya observado una correlación universal con las propiedades mecánicas cuasi-estáticas y por lo tanto la selección o desarrollo de nuevos materiales resistentes a la erosión por cavitación no se ha basado en los métodos utilizados tradicionalmente para otras aplicaciones, siendo casi exclusivamente empírico [6].

1.1.3 Pruebas de laboratorio

Para probar la resistencia a la erosión de los materiales no existe un procedimiento experimental, a nivel de laboratorio, que simule totalmente el comportamiento de un componente estructural expuesto a líquidos que promuevan la cavitación. Sin embargo, hay varias técnicas y procedimientos de laboratorio que pueden ser utilizados para comparar la resistencia a la erosión por cavitación de materiales seleccionados. Las técnicas más comúnmente utilizadas para simular situaciones de cavitación acelerada son: canales de flujo, sistemas vibratorios y chorro cavitante, sin embargo, es importante aclarar que en la mayoría de situaciones reales, en las que se involucra cavitación, también hay ataque corrosivo y otras cargas mecánicas sobre el material que en algunas de estas pruebas no pueden ser evaluados. A continuación se presenta una breve descripción de cada una de estas técnicas [6].

Canal de Flujo: Consiste en un canal de circuito cerrado en el cual se hace circular una corriente de líquido. La reducción de presión es realizada por un Venturi. Este canal permite introducir modelos a escala para simular las condiciones que permiten que ocurra cavitación [26]. Ver Figura 1-2.

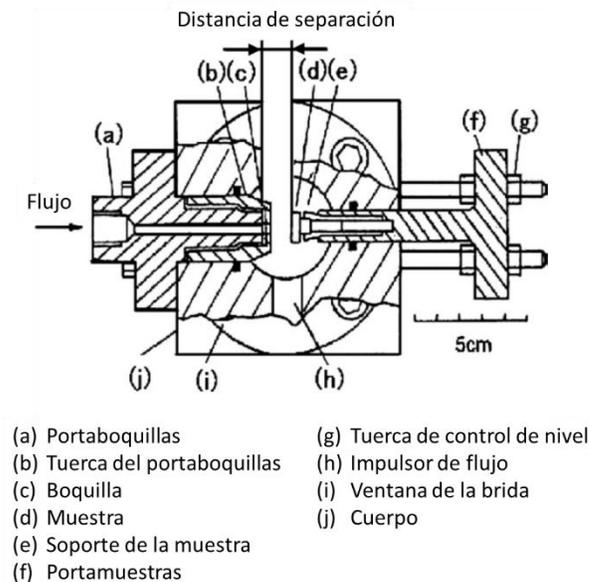
Figura 1-2. Esquema de una máquina para pruebas de cavitación con tubo Venturi. Tomado de [27].



Chorro cavitante: Este método produce un chorro de líquido con burbujas que impacta sobre una muestra estacionaria. El chorro y la muestra se encuentran sumergidos en un líquido. El líquido de prueba pasa a través de una boquilla la cual descarga un chorro dentro de una

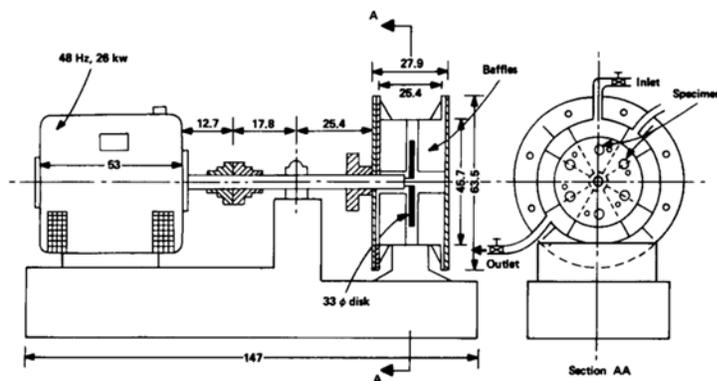
cámara a presión controlada. La cavitación se origina en la región de la vena contracta del chorro dentro de la boquilla. Este ensayo está definido por la norma ASTM G134 [12,28] y se muestra en la Figura 1-3.

Figura 1-3. Esquema de una máquina de chorro cavitante para pruebas de cavitación. Tomado de [28,29].



Disco Rotativo: En esta prueba se hace rotar un disco sumergido en un líquido. El disco tiene un orificio encargado de generar cavitación y la muestra se ubica cerca de éste orificio [30]. Ver Figura 1-4.

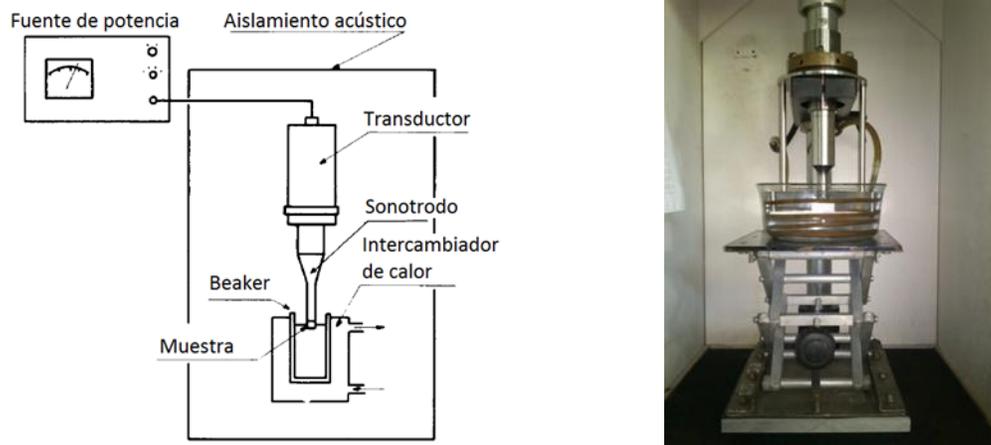
Figura 1-4. Esquema de una máquina tipo disco rotativo para pruebas de cavitación. Tomado de [30].



Equipo vibratorio: Consiste en un generador ultrasónico que está parcialmente sumergido en un líquido contenido en un recipiente. La vibración, típicamente a 20 KHz, produce

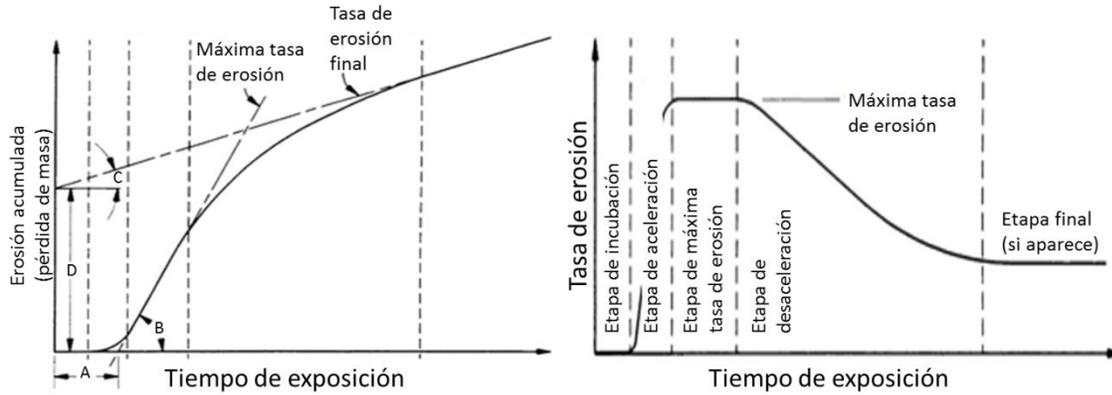
presiones negativas para nucleación y crecimiento de burbujas y presiones positivas para colapsarlas en un pequeño y estacionario volumen del líquido. La muestra está sumergida en el líquido. Este ensayo está definido por la norma ASTM G 32 [31]. Ver Figura 1-5.

Figura 1-5. Esquema de una máquina vibratoria para pruebas de cavitación



Para evaluar la resistencia al desgaste de la muestra sometida a erosión por cavitación, en laboratorio, se utiliza una curva de pérdida de masa en el tiempo, esta se construye sometiendo la muestra a desgaste mientras se monitorea su masa a cada ciertos intervalos de tiempo, finalmente se grafica la masa perdida por la muestra a lo largo del tiempo, en la Figura 1-6 se puede observar dicha curva. La duración del ensayo de cavitación depende de la resistencia al desgaste de cada material y los datos que se busque obtener, en este caso se tomó como criterio que en la curva de pérdida de masa se llegue al periodo de máxima tasa de erosión.

Figura 1-6. Curvas características de los ensayos de cavitación construidas a partir de la pérdida de masa. Nota: A = Tiempo de incubación nominal, B = Tasa de erosión máxima, C = Tasa de erosión final, D = Intercepto de la línea de erosión final. Tomado de [31].



1.1.4 Métodos para mejorar la resistencia a la erosión por cavitación

Para reducir la erosión por cavitación en diferentes sistemas se han establecido varias estrategias que se podrían agrupar de la siguiente manera: selección y desarrollo de materiales, diseño de componentes y tratamiento superficial.

Selección y desarrollo de materiales: El primer grupo de selección y desarrollo de materiales presenta, como gran desafío, la dificultad que existe para establecer una correlación directa entre las propiedades de los materiales y su resistencia al desgaste por cavitación. Sin embargo, la selección de materiales que deban operar bajo condiciones de desgaste por cavitación se basa, por lo general, en su capacidad de disipar la energía de impacto mediante mecanismos no destructivos como la formación de defectos de apilamiento y la transformación de fase martensítica inducida por esfuerzos o deformación plástica.

Los mecanismos de deformación y falla de los metales están fuertemente influenciados por la sensibilidad a la tasa de deformación y por su capacidad de absorber la energía de impacto sin deformación macroscópica. En aleaciones de dos o más fases, la fracción volumétrica, el tamaño y la dispersión de fases secundarias, generalmente, tiene una influencia diferente

en las tasas de erosión y es menos significativo de lo que es en las propiedades mecánicas cuasi-estáticas [6].

A continuación se presenta una descripción del comportamiento de los metales frente a la erosión por cavitación, dependiendo de la estructura cristalográfica, tomando como referencia las estructuras cúbica centrada en las caras (FCC), cúbica centrada en el cuerpo (BCC) y hexagonal compacta (HCP) [32]:

Los metales con estructura FCC son isotrópicos y son menos sensibles a la tasa de deformación que las estructuras BCC y HCP. Por lo tanto, su respuesta a la cavitación es similar al comportamiento de sus propiedades mecánicas cuasi-estáticas y la falla típicamente ocurre por un mecanismo de ruptura dúctil.

Los metales con estructura BCC también son isotrópicos, pero su deformación es muy sensible a la tasa de deformación. Su respuesta a un esfuerzo aplicado es siempre una competición entre flujo y fractura. A medida que la temperatura disminuye o la tasa de deformación aumenta, el flujo se vuelve más difícil y entonces hay un incremento en la tendencia a fracturarse frágilmente.

Los metales con estructura HCP son anisotrópicos en diversos grados y pueden o no ser sensibles a la tasa de deformación dependiendo de la relación axial de la celda unitaria. Por ejemplo, dos metales que se comportan muy diferentes son Zinc y Cobalto. El Zinc es altamente anisotrópico, muy sensible a la tasa de deformación y tiene baja resistencia a la cavitación. El Cobalto, por otro lado, es una de los metales estudiados con mayor resistencia a la erosión; su excelente resistencia es atribuida a su alta capacidad de maclado, con la que logra absorber energía de cavitación sin una distorsión significativa del metal.

El estudio de aleaciones de dos o más fases ha mostrado que el tamaño y la dispersión de fases secundarias determina si estas fases influyen o no el comportamiento frente a la erosión por cavitación. Por ejemplo, en los aceros la ferrita determina la resistencia a la cavitación, porque su respuesta es similar a la del hierro puro el cual muestra mecanismos de falla dúctil y frágil. Entonces una microestructura con una fase continua de ferrita, como

un acero recocido, muestra baja resistencia a la erosión ya que la ferrita puede ser erosionada y los carburos removidos fácilmente. En este caso es necesario reforzar la fase de la matriz, por ejemplo con tratamiento térmico para producir martensita o bainita.

En aplicaciones prácticas las aleaciones a base de cobalto [3,33] y el acero inoxidable austenítico [16,34], han sido reconocidos como materiales de alta resistencia a la erosión por cavitación, a pesar de su relativamente baja resistencia mecánica y baja dureza. La razón más importante es que ambas presentan baja energía de defecto de apilamiento por lo que son propensas a generar defectos de apilamiento, maclas y/o transformación martensítica con lo cual disipan energía de cavitación y sufren poca distorsión de la estructura cristalina.

En la actualidad la mayoría de materiales para diferentes componentes se desarrollan con base en sus requerimientos estructurales y los requerimientos superficiales son enfrentados con tratamientos superficiales o recubrimientos. Capas soldadas, aspersion térmica, aspersion por plasma, endurecimiento por láser, implantación de iones y recubrimientos electrolíticos han sido investigados [17,35,36]. Entre estas técnicas hay grandes diferencias y dependiendo de la aplicación pueden o no ser viables. Por ejemplo, en componentes en los cuales las propiedades del sustrato se puedan ver ampliamente afectadas, técnicas como soldadura o plasma son desventajosas debido a que se alcanzan altas temperaturas; en aplicaciones en las cuales hay superficies de geometrías bastante complejas o de difícil acceso, técnicas como el láser no son fáciles de implementar. A pesar de las desventajas que puedan tener, en aplicaciones prácticas se han utilizado ampliamente diferentes técnicas, por ejemplo: recubrimientos por láser en camisas de pistón de motores Diésel, capas soldadas en cangilones de turbina, aspersion térmica o por plasma en tuberías, etc.

Diseño de componentes: A pesar de que se puedan encontrar materiales de alta resistencia o técnicas que permitan la implementación de soluciones preventivas o correctivas, es importante resaltar que un buen diseño del sistema hidráulico representa el mejor camino para reducir o eliminar la erosión por cavitación. Por lo tanto, los sistemas de flujo de líquidos deben ser diseñados para minimizar los cambios en la presión del flujo que ocurren cuando la velocidad aumenta o disminuye, así mismo como deben disminuirse las

vibraciones y su amplitud, con lo que se logra un decrecimiento del problema de cavitación. En situaciones en las cuales es inevitable que se produzca la cavitación, pueden ser diseñadas las regiones en las cuales se produce este fenómeno de manera que se hagan colapsar las cavidades lo más lejos posible de la superficie sólida.

Tratamiento superficial: El grupo de tratamientos superficiales incluye la aplicación de recubrimientos o la modificación localizada de las propiedades de la superficie. La combinación de las propiedades mecánicas de un sustrato, junto con las de resistencia a la corrosión que ofrece el recubrimiento, ha mostrado una gran contribución en cuanto al aumento en la resistencia a la erosión.

1.1.5 Funcionalización de superficies sometidas a erosión por cavitación

Cuando cerca de una superficie se producen variaciones de presión localizadas en las zonas del fluido que interactúan con las asperezas de la superficie, una posible solución, desde el punto de vista de diseño, es encontrar la morfología óptima que permitiera minimizar el problema de erosión, ya sea disipando al máximo la energía recibida por el material o creando condiciones dinámicas para que el colapso de las cavidades genere el menor daño posible.

La capa límite de un flujo sin cavitación puede interactuar con la rugosidad de la superficie y de esta manera influenciar el inicio y desarrollo de la cavitación. Se ha observado que un elemento de la topografía que interactúa de manera aislada con el flujo de un líquido puede causar altas velocidades y turbulencia en los alrededores, causando la estabilización de las cavidades [24].

En un flujo de un líquido que interactúa aisladamente con un elemento de la rugosidad, a una pequeña distancia aguas abajo, la forma del perfil de velocidades en la capa límite es similar al de la capa límite sin rugosidad, pero las fluctuaciones de la velocidad se incrementan, por eso el mecanismo de estimulación de la turbulencia parece ser a través del aumento en la inestabilidad del flujo [37].

En 1970 Knapp [24] presentó una revisión en la cual se describe la relación entre el comienzo de la cavitación en un líquido y la rugosidad de la superficie sólida con la que este interactúa. En esta revisión la discusión se centró en la manera como el fluido se comporta al interactuar con obstáculos individuales de diferentes tamaños, los cuales representan cambios en la rugosidad. Es claro, a partir de su discusión, que superficies con irregularidades aisladas pueden crear cambios localizados drásticos en la presión hidrostática y aumentar la formación de cavidades. Posteriormente Hammit [23] hace referencia a la rugosidad como una de las causas principales del aumento en el daño en la superficie; se menciona que la erosión por cavitación es un fenómeno con alto grado de auto reforzamiento, en el cual la superficie removida durante el proceso de desgaste genera más cavitación debido a que la rugosidad resultante ayuda al comienzo de más cavitación en el fluido; también se menciona que la tasa de erosión alcanza un valor máximo que disminuye posteriormente y que, a medida que el proceso de desgaste continúa, pueden aparecer nuevos máximos, los cuales dependen principalmente, según Hammit, de la interacción de la alteración del patrón de flujo debido al cambio en la rugosidad y el cambio de las propiedades del material debido a las deformaciones permanentes acumuladas; esto claramente indica que la evolución de la tasa de desgaste está directamente afectada por la morfología de la superficie.

Posteriormente Wood [38] y Ahmed [7,39] hicieron un análisis de superficies sometidas a erosión por cavitación. Wood, utilizó mediciones de perfil de rugosidad en sistemas bajo erosión-corrosión para mirar efectos sinérgicos, por lo que no se centró en la evolución de la superficie sino en el estado final. Ahmed hizo un seguimiento de la evolución del perfil de rugosidad de una superficie sometida a erosión por cavitación, en su trabajo presentó un modelo analítico en el cual describió la evolución de la rugosidad de la superficie a medida que el proceso de erosión avanzaba, dividiendo su comportamiento en tres etapas a partir del análisis de la medición de parámetros de amplitud de la superficie (R_a , R_{ms} y R_{max}), también describe, usando parámetros de forma, el tipo de superficie que hay posiblemente en cada etapa así: en las etapas I y II se menciona una superficie probablemente dominada por protuberancias y durante la etapa III se asocia a una superficie con depresiones o valles.

Ahmed [40], adicionalmente, realizó una revisión de la literatura en la cual se presentaron diferentes análisis del efecto de la rugosidad sobre la resistencia a la erosión, de esta revisión se puede concluir que el efecto de la rugosidad es ambiguo ya que depende de las condiciones de prueba y del tipo de material probado; en su trabajo, Ahmed también encontró que la rugosidad, incluso en una escala micrométrica, facilita la aparición de microgrietas a lo largo de líneas de pulido que actúan como sitio preferencial de concentración de esfuerzos. Este resultado concuerda con aquellos obtenidos por Boccanera [41], Rao [12], y Pohl [11] quienes analizaron distintos acabados superficiales con y sin porosidad en recubrimientos. Boccanera resaltó que la porosidad tiene una influencia notoria sobre el periodo de incubación en recubrimientos, ya que a mayor porosidad menor es el tiempo de incubación y mayor la tasa de erosión; Tanto Ahmed como boccanera concluyeron que los valles dejados por la preparación superficial de los materiales tienen un efecto concentrador de esfuerzos que aumentan el proceso erosivo; adicionalmente Rao analizó la orientación de las líneas de pulido de la superficie y concluyó que el desgaste es menor si estas están en la misma orientación que el flujo. Pohl presentó un análisis en el cual define dos parámetros superficiales Skewness y Kurtosis, los cuales pueden ser empleados para el reconocimiento del inicio de la erosión debido a la correlación encontrada entre la evolución de dichos parámetros y la medición de pérdida de masa.

Recientemente Toro [9] presentó una discusión en donde concluyó que a partir de la relación observada entre algunos parámetros como R_q , R_y o R_{sm} y la resistencia a la erosión por cavitación de un acero inoxidable, se podrían buscar topografías cuyas características permitan retrasar el final del periodo de incubación. Li [14] evaluó experimental y teóricamente una combinación de parámetros morfológicos de la superficie, estos fueron: ancho, profundidad y espaciamiento de surcos producidos mediante una herramienta que dejaba huellas triangulares. En este trabajo se concluyó que la distribución de los surcos en una escala sub-milimétrica afecta el grado de erosión en la superficie. Feng [10] evaluó la resistencia a la cavitación de un material cuya superficie fue texturizada por láser y reportó que por medio de esta técnica se logró incrementar la resistencia a la erosión por cavitación por medio de un análisis de área erosionada, atribuyéndolo a un gradiente de durezas en la

superficie y efectos hidrodinámicos como la disminución del área de acción de las cavidades sobre la superficie.

Por otro lado, Pohl [42] evaluó las características cristalográficas de las muestras y encontró que la deformación de la superficie durante la exposición a cavitación produce una textura cristalográfica preferencial; por medio de la exposición a la cavitación de cristales de Fe- α orientados irregularmente encontró que se organizaban preferencialmente en una dirección $\langle 110 \rangle$ perpendicular a la superficie de la muestra. Similarmente Mesa [16] menciona que la orientación cristalográfica producida por un tratamiento termo-químico a la superficie, le confiere mayor resistencia a la erosión; en este caso se hizo nitruración gaseosa, en alta temperatura, a un acero austenítico con lo cual se obtuvo una textura cristalográfica con dirección preferencial $\langle 110 \rangle$ paralela a la superficie, la cual tuvo resistencia a la cavitación superior a la de un material con estructura orientada aleatoriamente. Este resultado es importante a la hora de diseñar un proceso de fabricación con el cual se podrían buscar texturas cristalográficas, como una característica funcional de la superficie.

1.2 Ingeniería de superficies para desempeño funcional

En las últimas décadas, la comprensión de los fenómenos de superficie, particularmente a escala micro y nanométrica, ha jugado un papel fundamental en el desarrollo de muchas aplicaciones en campos avanzados de la ingeniería como: electrónica, tecnología de la información, energía, óptica, tribología, biología, biomimética, etc. [43]. La superficie de muchos nuevos productos ha sido específicamente diseñada para cumplir una función en particular [44], una aplicación puede utilizar diferentes propiedades de superficie y además, una propiedad funcional específica puede ser la base de diferentes aplicaciones.

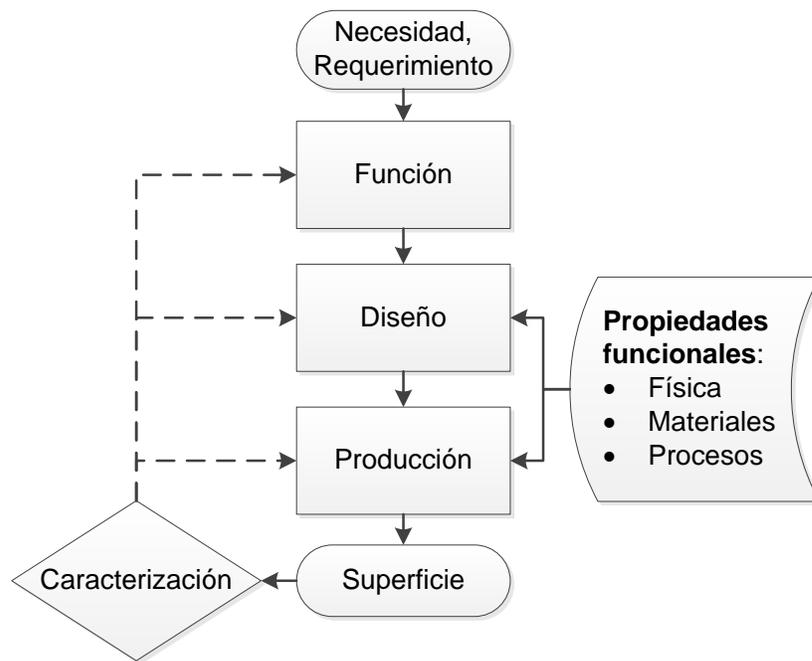
El diseño de un proceso de manufactura para implementar una aplicación que aprovecha las propiedades funcionales de la superficie se basa en el esquema presentado en la Figura 1-7. La aplicación específica se alcanza mediante el reconocimiento de las propiedades funcionales que requiere la superficie. La fase de diseño consiste en concebir una manera de implementar las funciones requeridas. La etapa de producción se basa únicamente en el

desarrollo, o utilización de técnicas disponibles para estructurar la superficie, y estas técnicas dependen esencialmente de las propiedades funcionales de la superficie [43]. El conocimiento de la física, los materiales y los procesos de manufactura es esencial durante las etapas de diseño y producción de una aplicación basada en la respuesta de la superficie.

1.2.1 Propiedades funcionales de superficies

Las superficies representan la interface a través de la cual ocurre un gran número de fenómenos. La disponibilidad de instrumentos avanzados como: Microscopios de sonda de barrido (Scanning Probe Microscope, SPM), perfilometría de contacto u otras técnicas específicas de observación, permite una mejor caracterización de superficies y consecuentemente facilita la investigación de las relaciones entre la superficie y las aplicaciones. La caracterización de superficies, en conjunto con la medición de todos los fenómenos relacionados con la aplicación requerida, permite mejorar el rendimiento de la superficie.

Figura 1-7. Proceso de desarrollo de aplicaciones basadas en la superficie



Una clasificación posible de las propiedades de la superficie se puede hacer desde el punto de vista de la aplicación tecnológica, esta puede verse afectada por el desarrollo y la importancia industrial de una clase de propiedades en particular. Desde este punto de vista, una primera clasificación de propiedades tecnológicas, que tienen un impacto relevante en ingeniería, se presenta a continuación [43]:

Propiedades mecánicas: Estas consisten en el efecto que tienen las características de la superficie sobre la resistencia del componente delimitado por dicha superficie, esto es, el efecto sobre la resistencia a esfuerzos y deformaciones mecánicas, resistencia aerodinámica e hidrodinámica, etc.; también corresponden al efecto de las interacciones entre las superficies que pertenecen a componentes diferentes, por ejemplo, en mecánica del contacto, a la carga soportada por las asperezas de la superficie y al área real de contacto que se observa en superficies deslizándose.

Propiedades hidrodinámicas: Estas tienen una gran influencia en la aplicación de superficies estructuradas. A escala micrométrica y nanométrica, las fuerzas de superficie prevalecen en relación a las fuerzas de masa, y factores como la tensión superficial, la disipación de energía y la resistencia al flujo controlan el sistema. Por eso el flujo de fluidos, a una escala micrométrica, actúa diferente de como lo hace a una escala macroscópica.

Propiedades tribológicas: La tribología se define como la ciencia y tecnología de superficies interactuando en movimiento relativo e involucra el estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación [25]. En muchos componentes mecánicos, el desgaste es responsable por un gran número de fallas de componentes, y ambos, fricción y desgaste son fenómenos superficiales que deben ser investigados apropiadamente para reducir costos asociados a estas fallas. El texturizado de superficies, como medio para mejorar lubricación, y reducir fricción y desgaste entre componentes en movimiento, ha sido ampliamente propuesto en la literatura y se comenzó a estudiar sistemáticamente en las dos últimas décadas [43].

1.2.2 Caracterización de superficies

Todas las superficies sólidas presentan alguna topografía superficial cuando se le considera a una pequeña escala. Las técnicas para analizar esta topografía incluyen microscopía óptica y electrónica, perfilometría de contacto, interferometría óptica, microscopía de efecto túnel, microscopía de fuerza atómica (Atomic Force Microscope, AFM), o medidas indirectas como mediciones eléctricas o térmicas. La cuantificación de la topografía superficial se basa en parámetros de rugosidad, ondulación y errores de forma, que han sido ampliamente discutidos y utilizados en ingeniería [45].

1.2.3 Tecnología para texturizado de superficies

Los métodos són caracterizados de acuerdo con sus principales características físicas en tres grupos principales:

Texturizado por adición o remoción de material: El patrón de las características es creado por adición o remoción de material a la superficie deseada, creando pequeñas áreas de relieve o valle. Las tecnologías utilizadas en este método se ven en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1. Procesos de texturizado por adición o remoción de material

Adición de material	Procesos químicos	Fosfatado y cromado patronado, deposición química de vapor, recubrimiento electrolítico
	Deposición física	Recubrimientos por precipitación, impresión de patrones resistentes al desgaste, deposición física de vapor, recubrimientos orgánicos (pintado), deposición de micro- o nano-partículas, auto-ensamblaje en capas poli-cristalinas
Remoción de material	Alta temperatura	Texturizado laser, micro-maquinado por descarga eléctrica
	Ataque químico	Texturizado químico y electroquímico, ataque asistido por láser, ataque anisotrópico

Remoción mecánica	Maquinado ultrasónico, rectificado, micro-corte,
-------------------	--

Los métodos de texturizado que involucran adición de material están muy relacionados con la deposición de recubrimientos patronados. La deposición localiza es controlada cambiando localmente la composición química o las propiedades físicas en ciertas áreas de la superficie antes de la deposición del recubrimiento, lo que promueve o inhibe la deposición en esas áreas [46]. Los procesos químicos involucran impresión sobre la superficie con tintas que pueden impedir o promover algunas reacciones químicas o electroquímicas. Otra aproximación es por medio de la deposición de características especiales sobre la superficie, por ejemplo, relieves compuestos por partículas cerámicas resistentes al desgaste que pueden ser imprimidas por inyección de tinta [47].

En los métodos de remoción de material, como en el texturizado por ataque químico, se aplican agentes reactivos selectivamente para remover material en regiones específicas y capas protectoras en las zonas en las cuales no se busca remover material, para luego hacer inmersión en un ataque químico. El material también puede ser removido de la superficie por acción mecánica, por ejemplo utilizando una herramienta de corte para remover material de una zona específica de la muestra, también se puede utilizar el impacto de partículas abrasivas sobre una superficie protegida en zonas específicas para que se remueva material de forma controlada.

Texturizado por desplazamiento de material: El cambio en la estructura de la superficie es atribuible a deformación plástica y redistribución del material de alguna parte de la superficie hacia otra [43]. Una clasificación de estas tecnologías se presenta en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2. Procesos de texturizado por desplazamiento de material

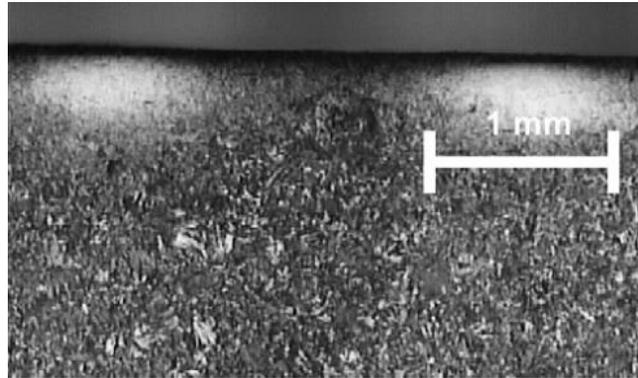
Desplazamiento mecánico	Granallado, estampado, indentación
Desplazamiento químico	Migración molecular, contracción por rayos UV (polímeros)

En el método mecánico se utiliza la deformación plástica de la superficie para producir una topografía superficial, algún incremento en la dureza puede ser debido al endurecimiento por deformación, pero es, en general, menos notorio que en los métodos de remoción de material a alta temperatura. Este método está restringido principalmente a superficies dúctiles. Las reacciones químicas también pueden ser utilizadas para desplazar material y así producir una textura superficial, por ejemplo, promoviendo el transporte de masa derivado de una migración molecular impulsada por luz utilizando un rayo láser, o sometiendo fotopolímeros al curado con rayos ultravioleta y generando contracción en lugares específicos para formar una textura.

Texturizado por auto-formación: Se forman regiones resistentes al desgaste en la superficie, de manera que la textura se va desarrollando por el desgaste de la superficie a medida que se pierde material de la zona menos resistente, generando las características de la textura [46].

En otros métodos, una vez se obtiene la textura, esta puede no soportar sistemas con cargas muy altas, esfuerzos severos, principalmente cortantes, pueden desgastar la textura superficial en unos pocos ciclos de trabajo; esto ocurre debido a que las propiedades de desgaste de la textura permanecen uniformes en todos los puntos de la superficie. Para mantener una textura superficial, que se mantenga durante un periodo funcional, se requiere de un método en el cual el proceso de desgaste, por sí mismo, sea utilizado para producir la textura superficial requerida. A esta formación es a lo que se llama proceso de texturizado de auto-formado. En él se utiliza la resistencia al desgaste localizada de algunas regiones de la pieza de trabajo, estas regiones se pueden obtener teniendo un gradiente localizado de propiedades mecánicas, lo cual asegura que el desgaste ocurre a diferentes tasas en diferentes regiones de la superficie, ayudando así a la generación de la textura superficial. Un gradiente en las propiedades mecánicas puede ser creado utilizando tratamientos metalúrgicos conocidos.

Figura 1-8. Corte transversal de una superficie con textura auto-formante



Las tarjetas de circuitos electrónicos PCB (*printed circuit board*) constan de dos partes: un sustrato, hecho comúnmente de láminas de fibra de vidrio pegadas con resina epóxica, y un revestimiento de cobre que puede ser una lámina adherida al sustrato. Las pistas de cobre de una PCB son obtenidas removiendo el revestimiento de cobre selectivamente, de manera que se deja sobre el sustrato sólo la geometría de las pistas del circuito diseñado, esta remoción selectiva se hace protegiendo la parte del cobre con una capa resistente al químico usado para remover el cobre innecesario [48], en algunos casos, la geometría de las pistas son protegidas mediante el uso de una capa polimérica que se adhiere al cobre mediante algún adhesivo o calor. Finalmente todo el sistema es sometido a la acción de un químico que corroe el cobre, este proceso se realiza durante un tiempo tal que el recubrimiento de cobre, en las zonas descubiertas, es removido totalmente, dejando al descubierto la placa de silicio, y quedando intactas las zonas cubiertas por la máscara. Finalmente la máscara polimérica es retirada, dejando descubiertas las pistas del circuito.

1.2.4 Desgaste de superficies texturizadas

El desgaste es la principal causa de pérdida de material y disminución de eficiencia en componentes mecánicos. En muchas situaciones, el desgaste entre dos superficies deslizando puede ser reducido con texturizado de superficies. Varios autores han estudiado el desgaste de superficies texturizadas [46,49–51], estos estudios incluyen principalmente evaluación experimental de superficies texturizadas.

Tres efectos principales parecen contribuir a reducir el desgaste de superficies texturizadas. El primero es el atrapamiento de desechos de desgaste entre los huecos que componen la textura, evitando así que estén presentes en el contacto entre las dos superficies y causen desgaste abrasivo. El segundo es el hecho de que superficies suaves lubricadas en contacto estacionario o deslizante usualmente muestran un comportamiento pobre debido a que no tienen suficiente capacidad de retención de lubricante para incrementar la lubricación en el contacto; la existencia de huecos llenos de lubricante, en ese tipo de superficies, puede ser muy útil como una segunda fuente de lubricante, especialmente en aplicaciones de alta deformación plástica. El tercero es la mejora de las condiciones de presión hidrodinámica entre superficies debido a las zonas de convergencia constituidas por los agujeros [43]

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la textura superficial sobre la resistencia a la erosión por cavitación de un acero austenítico.

2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

1. Diseñar texturas superficiales sobre una aleación resistente a cavitación implementando diferentes procedimientos de modificación de superficies.
2. Identificar características de la superficie que tengan importancia en el proceso de erosión, y caracterizarlas cualitativamente y cuantitativamente.
3. Evaluar las posibles correlaciones entre la evolución de algunos parámetros de descripción morfológica de las superficies y la respuesta frente a erosión por cavitación

3. Metodología

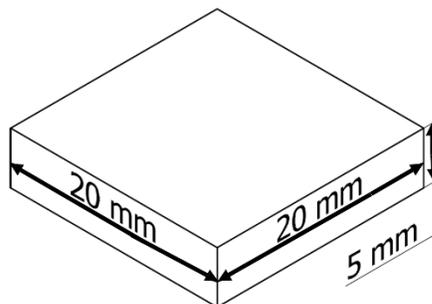
Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron diferentes herramientas técnicas y metodológicas que permitieran garantizar la confiabilidad de los resultados, entre éstas se encuentran equipos de caracterización de materiales como durómetros y microscopios, metodologías de diseño de experimentos, técnicas de análisis digital de imágenes, análisis morfológico de superficies, entre otros. A continuación se describe, de manera detallada, cada una de las herramientas utilizadas.

3.1 Materiales

El material base utilizado para este estudio fue un acero inoxidable austenítico AISI 304, esta es una aleación de amplio uso en diferentes aplicaciones en ingeniería y es un material utilizado en diversos trabajos investigativos relacionados con cavitación [34,52–54].

Las probetas utilizadas para las pruebas en laboratorio fueron obtenidas a partir de una placa de 150 mm x 150 mm x 5 mm, a partir de la cual se extrajeron 20 probetas cuya geometría se muestra en la Figura 3-1

Figura 3-1. Esquema de la geometría de las probetas de acero AISI 304 obtenidas a partir de la placa



3.1.1 Composición química

Para determinar si el material, a partir del cual se hicieron las probetas, correspondía al acero AISI 304 se verificó la composición química, esto se hizo tomando una muestra para analizarla en un equipo de espectrometría de emisión óptica marca *Shimadzu* modelo OES-5500 instalado en el taller de fundición de la Universidad de Antioquia, el cual fue calibrado con un estándar de verificación MBH-12854, BAS-467/1.

3.1.2 Tratamiento térmico

El material base, a partir del cual se obtuvieron las muestras de acero AISI 304, presentaba características desconocidas que podrían variar entre muestras, por lo tanto, todas las muestras se sometieron a un tratamiento térmico de homogenizado para garantizar que hubiese características microestructurales similares.

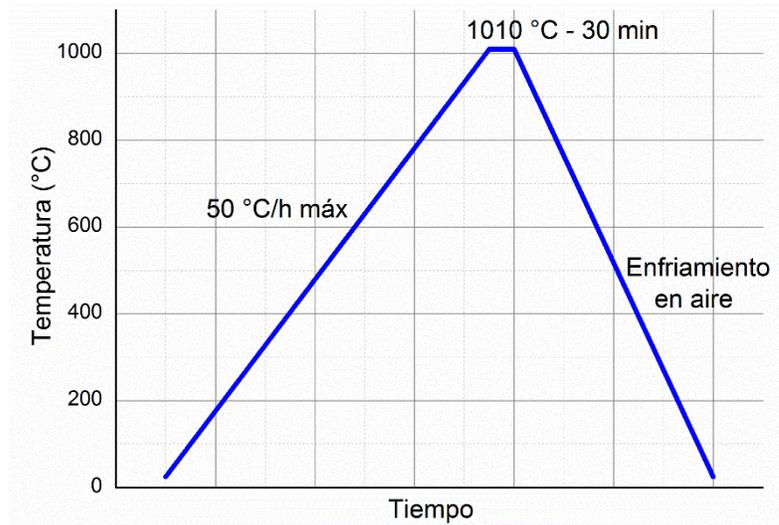
El tratamiento térmico fue realizado después del proceso de maquinado con el cual se obtuvieron las probetas, dicho tratamiento fue realizado en un horno convencional marca *Linn Elektro Therm*, modelo LK-312. En la Figura 3-2 se presenta el ciclo térmico utilizado, el cual es el recomendado para el recocido del acero AISI 304 [55] y consistió en calentar las piezas en el horno hasta 1010°C a una tasa de 50 °C/hora, luego se sostuvo la temperatura por un tiempo de 30 minutos (siguiendo recomendación de 3 a 5 minutos por cada 2.5 mm de espesor) y el enfriamiento se hizo manteniendo las piezas dentro del horno apagado y con la puerta abierta.

3.2 Obtención de texturas

Las características geométricas controladas de las superficies a estudiar se obtuvieron mediante remoción electroquímica con protección de máscara polimérica. Este método consiste en la implementación de una técnica utilizada en la producción de tarjetas de circuitos electrónicos, en la cual, para obtener la geometría deseada se debe proteger la parte de la superficie que no se quiere modificar por medio del uso de máscaras protectoras con

resistencia a un agente químico con el que se remueve el metal. Este método se seleccionó debido a que permite obtener superficies sin altos esfuerzos residuales.

Figura 3-2. Ciclo térmico programado para el tratamiento térmico del acero inoxidable 304.



Para la etapa de remoción, con este proceso de texturizado, se probaron dos procedimientos: uno en el cual se removió material de la superficie usando un compuesto químico similar a los utilizados para el ataque metalográfico de aceros [56,57], en el cual sólo es necesario sumergir la muestra en el compuesto; el segundo consistió en un proceso electroquímico usando un electrolito recomendado para electropulido [58]. La composición del reactivo para el ataque y del electrolito se presenta en la Tabla 3-1.

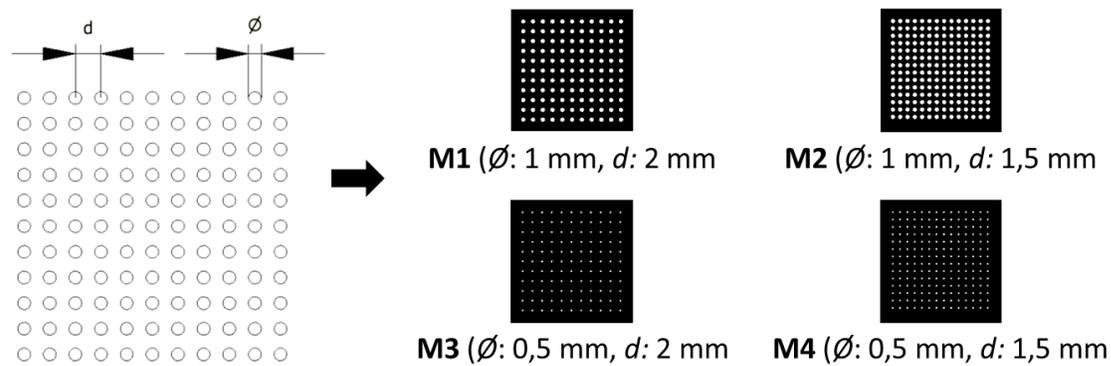
Tabla 3-1. Compuestos químicos usados durante el proceso de texturizado

Electrolito		Ataque químico	
Etanol al 70% V/V (C ₂ H ₆ O + H ₂ O)	140 ml	Ácido nítrico (HNO ₃)	10 ml
Glicerina (C ₃ H ₈ O ₃)	20 ml	Ácido acético (C ₂ H ₄ O ₂)	10 ml
Ácido perclórico al 65 % V/V (HClO ₄ + H ₂ O)	40 ml	Ácido clorhídrico (HCl)	15 ml

La geometría de las máscaras protectoras para el texturizado se diseñó usando el software *Autodesk Inventor*, allí se generaron diferentes patrones de círculos con diferentes diámetros

y espaciamentos. En la Figura 3-3 se muestra el diseño de los patrones generados en el software, la dimensión ϕ tuvo valores de 0.5 mm y 1 mm y la dimensión d tuvo valores de 1.5 mm y 2 mm. En total fueron cuatro máscaras identificadas como M1, M2, M3 y M4, en las que se combinaron los diferentes diámetros y espaciamentos posibles.

Figura 3-3. Diseño geométrico de los patrones para la impresión de la máscara protectora

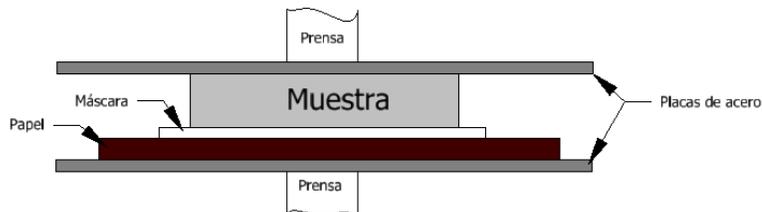


Los patrones se imprimieron en papel encerado usando una impresora láser HP LaserJet 1020 con resolución de 600 dpi. Se enmascararon las probetas con las texturas generadas, para lo cual la superficie de la probeta, que estaba en contacto con la tinta impresa sobre el papel por medio de un sistema de prensado, fue calentada alcanzar una temperatura de 180°C en un horno, luego se sostuvo a esa temperatura durante 1 minuto, después de lo cual fue enfriada con agua. La Figura 3-4 muestra el sistema de prensado, donde se puede ver que se utilizaron dos placas de acero para distribuir mejor la presión generada en la prensa, también se puso una capa de hojas de papel apiladas que pudieran deformarse y acomodarse a la superficie de la muestra, de manera que la máscara impresa hiciera contacto con toda la superficie de la muestra.

En el procedimiento electroquímico de remoción de material se utilizó un electrodo de acero AISI 316 (25 x 20 mm), utilizando un montaje como el que se muestra en la Figura 3-5. Para proteger las zonas de la probeta en las cuales no se quería remover material, se utilizó un encapsulado utilizando una resina epóxica rodeada de una cinta aislante que evitó que se degradara en el electrolito. Para la remoción de la película protectora de polímero se utilizó un paño humedecido con acetona. Para el texturizado se tomaron dos variables iniciales:

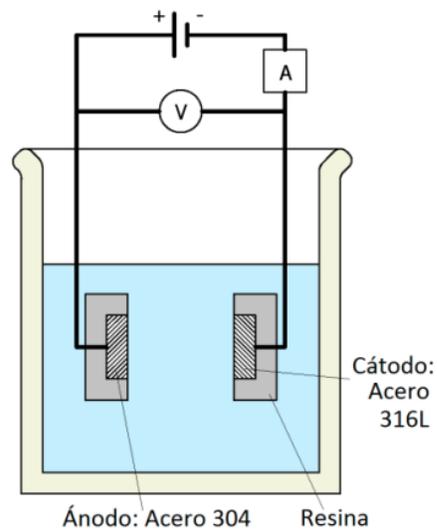
diámetro y profundidad. Se tomaron dos distribuciones con agujeros de diámetros distintos 1 mm y 0.5 mm, con espaciamiento de 2 mm y 1 mm respectivamente.

Figura 3-4. Montaje en prensa de la probeta para transferir la tinta polimérica al metal



Las muestras fueron sostenidas durante el electropulido con una pinza construida para tal fin, ésta fue hecha con el mismo material de las muestras y solamente tenía expuesta una pequeña punta que garantizaba la conductividad hacia la superficie de la muestra, el área expuesta de la pinza no fue tenida en cuenta al momento de determinar la corriente a utilizar.

Figura 3-5. Condiciones de montaje de la celda electrolítica



3.3 Pruebas de erosión por cavitación

Se realizaron pruebas de erosión por cavitación, en laboratorio, de acuerdo con la norma ASTM G32, utilizando el método indirecto [31], los ensayos fueron realizados en una máquina vibratoria *Telsonic* DG-2000 la cual se puede observar en la Figura 3-6.

Figura 3-6. Esquema de la máquina para las pruebas de erosión por cavitación.



Inicialmente se realizaron pruebas de cavitación sobre muestras que solamente fueron pulidas manualmente con lijas número 240, 320, 400 y 600 sin texturizado; estas pruebas fueron utilizadas como referencia para la resistencia a la cavitación del material base y evaluar así el efecto de la modificación superficial.

Las pruebas fueron realizadas utilizando las condiciones de trabajo que se presentan en la Tabla 3-2. Cada 30 minutos la prueba fue interrumpida para medir la pérdida de masa, adicionalmente se hizo seguimiento del estado de la superficie mediante análisis de rugosidad y observación de las superficies en SEM. La amplitud de vibración del equipo fue verificada por medio del montaje recomendado en la norma ASTM G32 [31], en la cual se indica que se puede medir, usando un comparador de carátula, el desplazamiento máximo que se muestra en el indicador del instrumento de medida y utilizar dicho valor como la medida de la mitad del desplazamiento pico a pico requerido. Aunque la norma recomienda

un valor de 50 μm , o permite utilizar 25 μm en casos de materiales de baja resistencia, fue necesario modificar la amplitud del equipo debido a que éste presentó algunas fallas a causa del desgaste de algunos de sus componentes y a que una amplitud muy pequeña alargaba demasiado las pruebas, por tanto el valor escogido para todas las pruebas fue 35 μm .

Tabla 3-2. Características de la prueba de cavitación

Parámetro	Valor
Frecuencia	20 \pm 0.2kHz.
Amplitud	35 μm .
Líquido de Ensayo	Agua desionizada (10 $\mu\text{S/cm}$ máx.).
Temperatura	25 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$.

Siguiendo los lineamientos de la norma ASTM G32, el agua para las pruebas de cavitación fue sometida a vibración por ultrasonido, en el equipo de cavitación, al menos 30 minutos antes de la realización del ensayo para estabilizar el contenido de gas en el líquido. Se usó agua previamente desionizada en un equipo de ósmosis inversa *Sartorius Arium 61316* y se verificó que la conductividad fuera inferior a 10 $\mu\text{S/cm}$ mediante una celda de conductibilidad *Schott Handylab LF 12/Sonda LF 5101T*; el agua fue utilizada por periodos de hasta 10 horas de prueba, tiempo después del cual se reemplazaba por agua desionizada nueva. La temperatura de la prueba fue controlada usando un baño termostático *Lauda Ecoline Star Edition RE106*, se controló la temperatura en el recipiente del agua, el cual tiene capacidad de 2 litros, para que permaneciera estable en 25 $^{\circ}\text{C}$ durante la prueba.

Se realizaron medidas de pérdida de masa en una balanza digital *Sartorius CP225D* con precisión de 0,01 mg. Debido a la alta sensibilidad de la balanza a la presencia de humedad en las muestras (sobre todo después de erosionadas o con agujeros producto de las texturas), éstas fueron limpiadas en un baño ultrasónico en alcohol isopropílico durante 1 minuto y posteriormente secadas con un secador de aire frío 2 minutos. El pesaje se llevó a cabo en un cuarto aislado para disminuir problemas de humedad en el ambiente.

La duración de las pruebas de cavitación fue entre 8 y 10 horas, este tiempo se obtuvo tomando como base la curva de pérdida de masa en función del tiempo, en la cual se consideró completo el ensayo el momento en el cuál se identificó la tasa de erosión en estado estable para cada muestra.

La punta del sonotrodo también estaba sometida al proceso de desgaste, por tanto perdía masa y su superficie cambiaba a medida que acumulaba horas de trabajo. Durante la realización de pruebas el sonotrodo fue reparado cada 10 horas de ensayo, la reparación consistió en pulir la punta con lija número 400 hasta que la huella de desgaste se borrara y se obtuviera una superficie con buen acabado superficial, garantizando que el peso de las puntas estuviera dentro del rango permitido por el equipo.

3.3.1 Diseño experimental

Para evaluar el efecto que tienen las características de cada superficie texturizada, se diseñó un experimento exploratorio, en el cual se pudieran evaluar varias condiciones superficiales, con pocas corridas experimentales, dada la larga duración de cada ensayo, se utilizó un diseño factorial completo 2^k de tres factores con dos niveles cada uno.

En la Figura 3-7 se representa el experimento con sus variables de entrada, los factores controlables y las variables de salida; los tres factores controlables del experimento fueron: (1) diámetro y (2) profundidad de cada agujero en la superficie texturizada, y (3) espaciamiento entre agujeros generados. Los factores se controlaron en dos niveles: alto y bajo; los valores de cada factor, como se mencionó anteriormente en el capítulo 3.2, se muestran en la Tabla 3-3. Las variables de entrada (material, fluido, temperatura, etc.) son las condiciones de la prueba y las muestras que se han descrito previamente.

Figura 3-7. Esquema de las variables de entrada, los factores controlables y las salidas del diseño experimental.

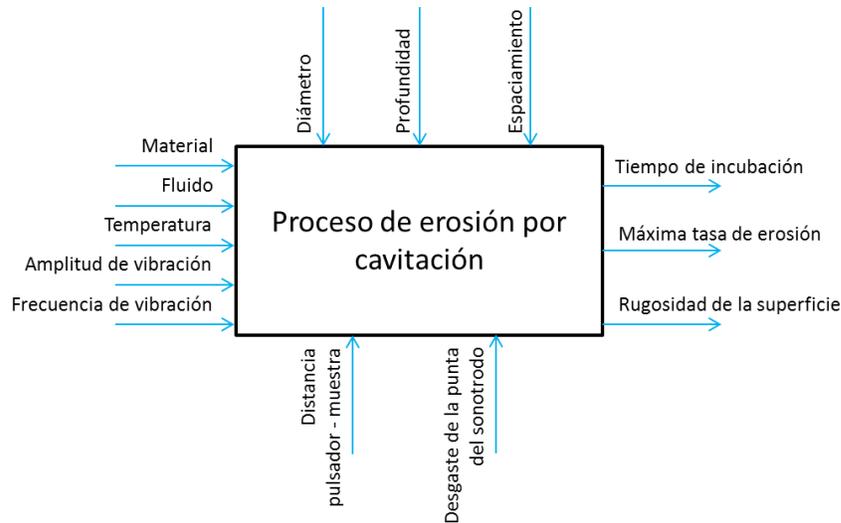


Tabla 3-3. Niveles de los factores del experimento

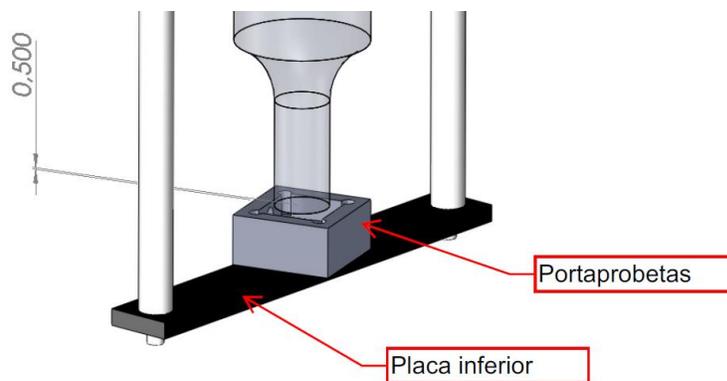
Factor	Bajo (-)	Alto (+)
Diámetro (mm)	0.5	1.0
Profundidad (μm)	50	100
Espaciamiento (mm)	1.5	2.0

Los factores incontrolables que se consideraron de mayor peso en el experimento fueron el desgaste de la superficie del sonotrodo y la distancia entre la superficie de la muestra y el sonotrodo, cada uno se analiza con más detalle a continuación:

Desgaste de la punta del sonotrodo: Debido al desgaste, la calidad superficial de la punta del sonotrodo cambiaba a medida que avanzaba cada ensayo y adicionalmente las reparaciones disminuían su peso, por tanto, se podía afectar la amplitud o la frecuencia de vibración. Para evitar que esto afectara los resultados de la prueba, todos los ensayos fueron corridos al mismo tiempo de la siguiente manera: cada muestra fue sometida al ensayo de cavitación y en el momento en que se paraba el equipo para el pesaje de dicha muestra, se montaba otra. Por esto la aleatorización de los experimentos no representa el orden en que se hizo un ensayo completo, sino el orden en que cada muestra se montaba después de desmontar la anterior para un pesaje intermedio.

Distancia entre la muestra y el sonotrodo: El portaprobetas utilizado, como lo muestra la Figura 3-8, está ubicado al frente de la punta del sonotrodo de manera que la superficie superior esté a 500 μm de distancia. Esta distancia se puede ver afectada por la reparación de la punta desgastada ya que ésta pierde longitud, por tanto, entre una prueba y otra se adecuó el montaje para que entre la superficie de la muestra y la de la punta del sonotrodo se pudiera verificar siempre la distancia con una galga de espesores.

Figura 3-8. Portaprobetas del cavitómetro



Para determinar el orden experimental de las pruebas se diseñó un experimento utilizando el software *Minitab 16*, en éste se obtuvo la secuencia de experimentación que se presenta en la Tabla 3-4, donde se muestran los niveles de cada factor correspondientes a la corrida experimental y la identificación de cada probeta en los ensayos de erosión, dicha identificación se hizo teniendo en cuenta la siguiente nomenclatura:

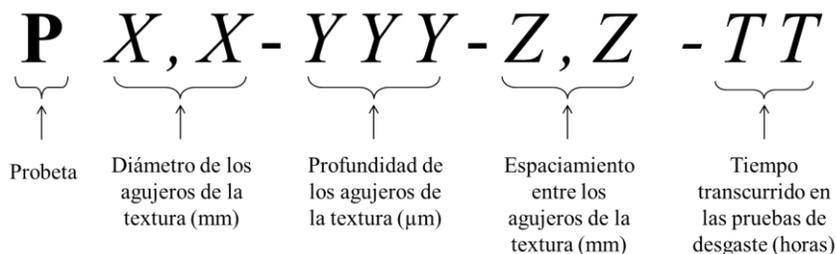


Tabla 3-4. Experimento de la evaluación del texturizado en cavitación, donde – significa bajo y + alto

Corrida experimental	Identificación de la muestra	Diámetro	Profundidad	Espaciamiento
----------------------	------------------------------	----------	-------------	---------------

1	P0,5-050-2,0	-	-	+
2	P0,5-100-1,5	-	+	-
3	P1,0-100-1,5	+	+	-
4	P1,0-050-2,0	+	-	+
5	P1,0-050-1,5	+	-	-
6	P0,5-100-2,0	-	+	+
7	P0,5-050-1,5	-	-	-
8	P1,0-100-2,0	+	+	+

3.4 Caracterización superficial

Para la caracterización de las muestras se usaron las técnicas de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y fluorescencia de rayos X. A continuación se describen las condiciones de trabajo utilizadas para cada una de estas técnicas

3.4.1 Caracterización de la microestructura

La microestructura del material fue evaluada después de someter las probetas a un tratamiento térmico de homogenización. Para ello se realizó una preparación metalográfica de las muestras según la norma ASTM E3 [59].

Las muestras fueron cortadas utilizando una cortadora metalográfica ISOMET 5000 con una velocidad de rotación del disco de 4000 rpm, refrigerando la muestra con fluido de corte IsoCut fluid, y con una velocidad de avance de 1 mm/min. Posteriormente, las muestras fueron montadas en una resina acrílica utilizando una prensa de montaje en caliente Simplimet 3000. Las muestras montadas en la resina fueron preparadas para que se pudieran montar en una celda electrolítica para un ataque electrolítico posterior, esto se hizo sujetando la muestra con una pinza de polímero que tenía adaptado un cable conductor y una placa metálica de acero inoxidable AISI 304 en la punta.

Las muestras fueron pulidas utilizando secuencialmente papeles abrasivos de carburo de silicio número 240, 320, 400 y 600, después se pulieron en paño rotativo usando partículas abrasivas de diamante de 1 μm .

Para revelar la microestructura de las muestras se utilizó un ataque electrolítico usando HNO_3 al 60% V/V como electrolito y un electrodo de acero 316L [60]. Se utilizó una fuente de voltaje DC de referencia *BK Precision 1671A*, en la cual se fijó el voltaje en 1.1 V con el circuito fuera del medio ácido, posteriormente se activó la fuente controlando la distancia y ubicación del electrodo y la muestra para obtener una densidad de corriente de 1.38 mA/mm^2 y la muestra fue atacada durante 120 segundos.

Después de atacar las muestras, se utilizó un microscopio óptico NIKON Eclipse LV100, para obtener imágenes de la microestructura después de los tratamientos térmicos, estas imágenes fueron adquiridas con el software NIS Elements-D por medio de una cámara externa acoplada al microscopio y fueron utilizadas para cuantificar el tamaño de grano en las muestras por medio del método descrito en la norma ASTM-E112.

3.4.2 Caracterización topográfica

La caracterización de los cambios morfológicos de las superficies se realizó con un perfilómetro de contacto de referencia *Mitutoyo SV 3000M4*, con el que se realizaron mediciones 2D del perfil de rugosidad de las superficies. Se utilizó una punta cónica de diamante con radio de $2 \mu\text{m}$ en la punta. Las condiciones de medición establecidas para todas las probetas se muestran en la Tabla 3-5.

El perfil de evaluación utilizado para el seguimiento de los perfiles fue W (*Waviness*, perfil de ondulación), esto se debe a que los tamaños de cada “agujero” creado al texturizar superaron el límite superior del *cut-off* aplicable para los perfiles de rugosidad R ($L_c=2.5 \text{ mm}$); Dado que en la programación del perfilómetro utilizado no era posible aumentar el L_c para el perfil R pero sí era posible disminuir el valor del límite inferior para el perfil W, se optó por usar límites L_f y L_c que abarquen todo el rango del perfil R. Los parámetros tradicionales, como R_a o R_q , son, por definición, para el perfil de ondulación W_a , W_q o cualquier otro que corresponda, sin embargo, debido a que los límites del perfil medido en este caso abarcan todo el perfil R se puede considerar que sólo es necesario reportar los valores de W_a , W_q , etc.

Tabla 3-5. Parámetros de trabajo en el perfilómetro

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Perfil de evaluación	W_ISO	Nº de longitudes de muestreo	3
Longitud de muestreo	2.5 mm	Filtro	Gaussiano
<i>Cut-off</i> (Lf)	8.0 mm	Pre/pos recorrido	1.0 mm
<i>Cut-off</i> (Lc)	0.008 mm		

Adicionalmente se obtuvieron, a partir de los perfiles de la superficie, las funciones estadísticas de autocorrelación (*ACF*), densidad espectral de potencia (*PSD*) y función de estructura. Para obtener estas funciones se utilizó un procedimiento de cálculo diseñado para el software OriginLab 9.0, a través de su herramienta de programación de código para la manipulación de datos.

Esta técnica permitió realizar mediciones para establecer la profundidad lograda durante el proceso de texturizado y así tener control sobre la calidad del proceso, adicionalmente, permitió establecer el estado inicial de las probetas, previo a los ensayos de cavitación. Posteriormente se realizaron mediciones, durante los ensayos, para la evaluación de las superficies desgastadas, para lo cual se tomaron varias medidas en diferentes zonas de las probetas, cada vez que se detenía el ensayo, para medir la pérdida de masa.

Además del perfilómetro, se utilizó también un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 5910LV para realizar parte del estudio de la topografía de las superficies desgastadas en las pruebas de cavitación. Las micrografías fueron obtenidas durante la realización de las pruebas de cavitación, para lo cual dichas pruebas fueron interrumpidas cuando se llevaban diferentes tiempos de ensayo.

4. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas para dar cumplimiento a los objetivos planteados, se presentan en cuatro bloques: caracterización inicial de los materiales, proceso de texturizado, pruebas de cavitación y análisis de la variación de la calidad superficial en el proceso de desgaste.

4.1 Microestructura y composición química de los materiales de estudio

A partir de las pruebas de composición química, realizadas en el espectrómetro de emisión óptica, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4-1, donde se muestra también la composición química de referencia para el acero AISI 304; se puede observar que para todos los elementos químicos analizados en las muestras, el porcentaje se encuentra dentro de los rangos recomendados por SAE International [61], por lo que se verificó que la placa corresponde al material esperado.

Se tomaron, aleatoriamente, dos muestras y se analizaron metalográficamente para determinar tamaño de grano. Previamente, todas las muestras fueron tratadas térmicamente con el fin de garantizar que no hubiese diferencias entre la microestructura que pudieran afectar el desempeño de las muestras en la realización de las pruebas de desgaste o el proceso de texturizado. En la Figura 4-1 se presenta la microestructura obtenida después de tratar térmicamente las muestras tomadas de acero AISI 304; en la Figura 4-1-a) se observan los límites de grano de la austenita sin revelar maclas, mientras que en la Figura 4-1-b) se pueden apreciar las maclas, gracias al ataque químico utilizado. El origen de dichas maclas pudo deberse tanto al tratamiento térmico realizado como al proceso de deformación durante

el pulido de las muestras. Las diferentes tonalidades de los granos se deben, entre otras cosas, a la textura cristalográfica que presenta el material. Adicionalmente, se observaron bandas de deformación que marcan la dirección de laminado de la placa (Figura 4-1-b). Las muestras obtenidas tienen un tamaño de grano promedio de 20 μm .

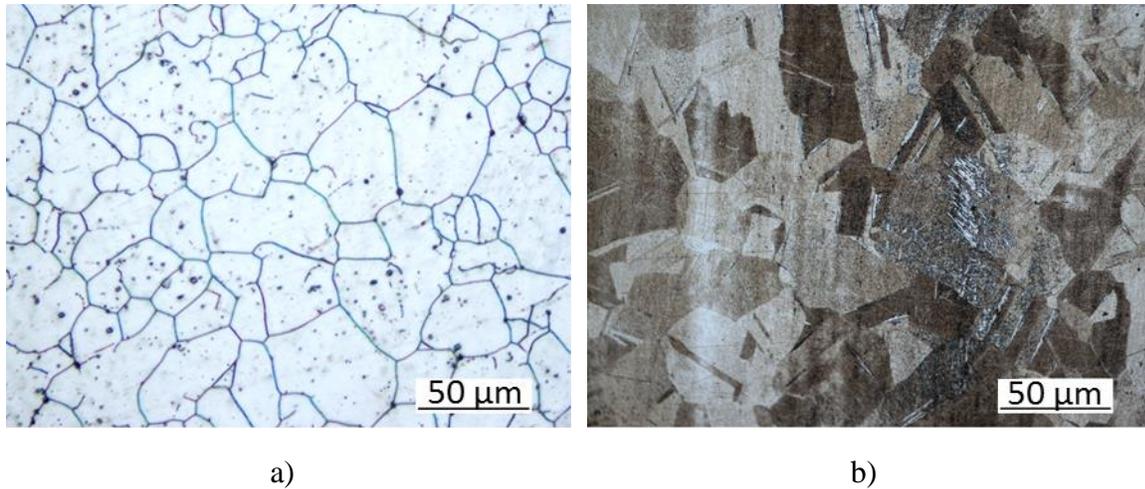
Tabla 4-1. Composición química nominal y medida en las muestras por espectrometría de emisión óptica.

	C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si	Otros**	Fe
AISI 304	0.08*	18.00-20.00	2.00*	8.00-10.50	0.045*	0.030*	1.00*	-	Bal.
304C	0.026	18.278	1.500	8.146	0.033	0.009	0.406	0.284	Bal.

*Los valores no especificados como un rango corresponden a cantidades máximas del componente

**Otros elementos: Mo, Al, Cu, Ti V

Figura 4-1. Micrografía de las muestras correspondientes al acero AISI 304. a) Muestra atacada con HNO_3 60 % v/v + H_2O , ataque electrofítico, 1.1 voltios – 0.075-0.14 A/cm^2 , b) Muestra atacada con *Beraha's II*.



4.2 Texturizado electroquímico

Se generaron texturas sobre las muestras de acero AISI 304 en las cuales se produjeron agujeros de diferente diámetro, profundidad y espaciado. En la puesta a punto del procedimiento, se encontró que el menor diámetro que era posible obtener de manera

sistemática era 0.1 mm, pero para las pruebas de cavitación se seleccionaron solamente agujeros con diámetros de 0.5 mm y 1 mm.

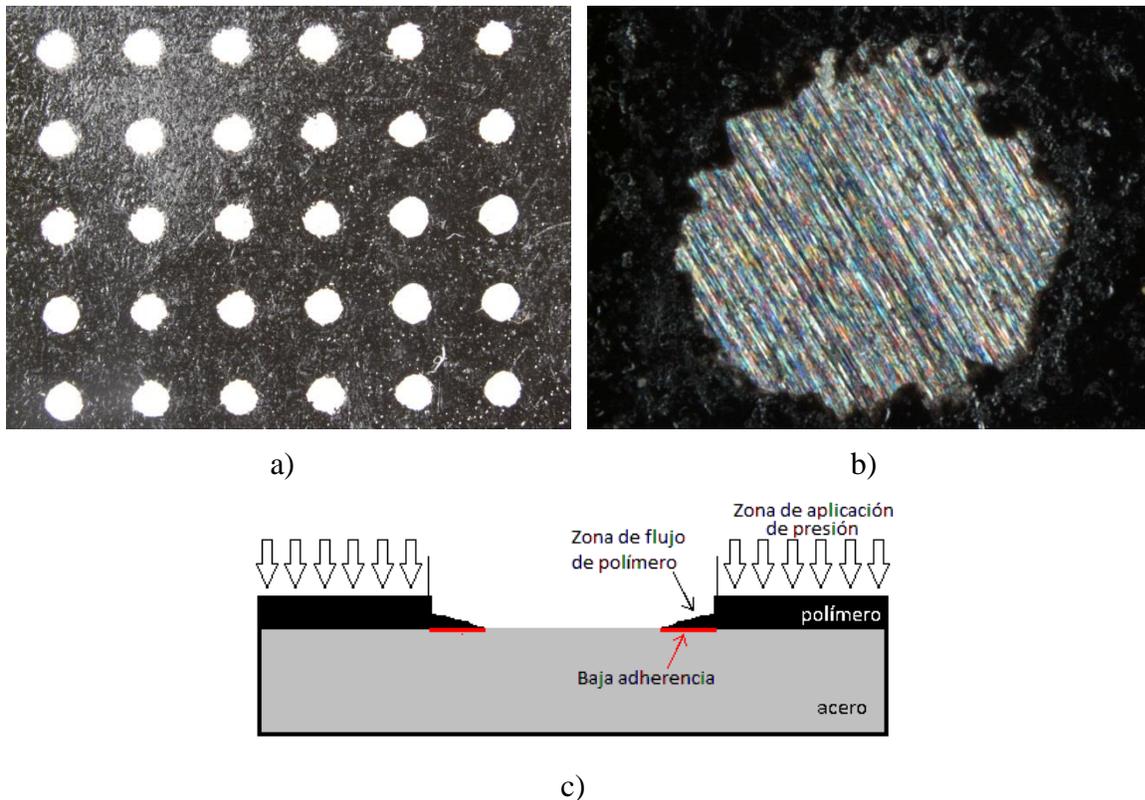
Inicialmente, se establecieron las condiciones más adecuadas para adherir la máscara polimérica a la superficie metálica teniendo en cuenta la precisión de las formas que podrían ser impresas sobre la superficie metálica. Se evaluó la temperatura mínima y el tiempo de sostenimiento requerido para que la tinta lograra una buena adherencia que garantizara que no se cayera en la etapa de remoción de material por vía electrolítica, esto se evaluó mediante inspección visual de las máscaras impresas.

La Figura 4-2-a) muestra como la máscara cubre bien las zonas diferentes a los agujeros, sin embargo existen pequeñas regiones que se desprendieron o quedaron mal cubiertas debido probablemente a que la presión o la temperatura locales no fueron suficientes para lograr una transferencia completa del polímero del papel al metal. También se espera un efecto del movimiento relativo entre el papel y el metal, haciendo que el polímero se deslice durante la aplicación de la presión, o incluso que en el proceso de impresión sobre el papel no se transfiera todo el polímero. En la Figura 4-2-b) se observa como al fluir la tinta hacia el interior de los agujeros genera pérdida de suavidad del borde de los agujeros en las máscaras de protección; sin embargo, como se mostrará más adelante, este efecto no parece afectar significativamente la forma final de los agujeros en la superficie de las muestras, dado que en la mayoría de las superficies finalizadas se observó una circularidad aceptable, lo cual puede atribuirse a que el polímero que fluye hacia el interior del círculo, al momento de pegarlo, no está sometido a la misma presión que el resto de la máscara, haciendo que su adherencia sea menor y por tanto permita el ingreso de electrolito. En la Figura 4-2-c) se puede observar esquemáticamente esta situación. Este comportamiento puede ser causado por el tipo de montaje utilizado, en el cual la presión no es la misma sobre toda la superficie a texturizar debido a la configuración propia de la prensa en "C" utilizada (ver Figura 3-4 en el capítulo de metodología).

Después de determinar las condiciones adecuadas para la protección de la superficie metálica se probaron dos métodos para la remoción de material, el primero fue usando un

compuesto químico que ataca el acero, el segundo fue usar un procedimiento de electropulido.

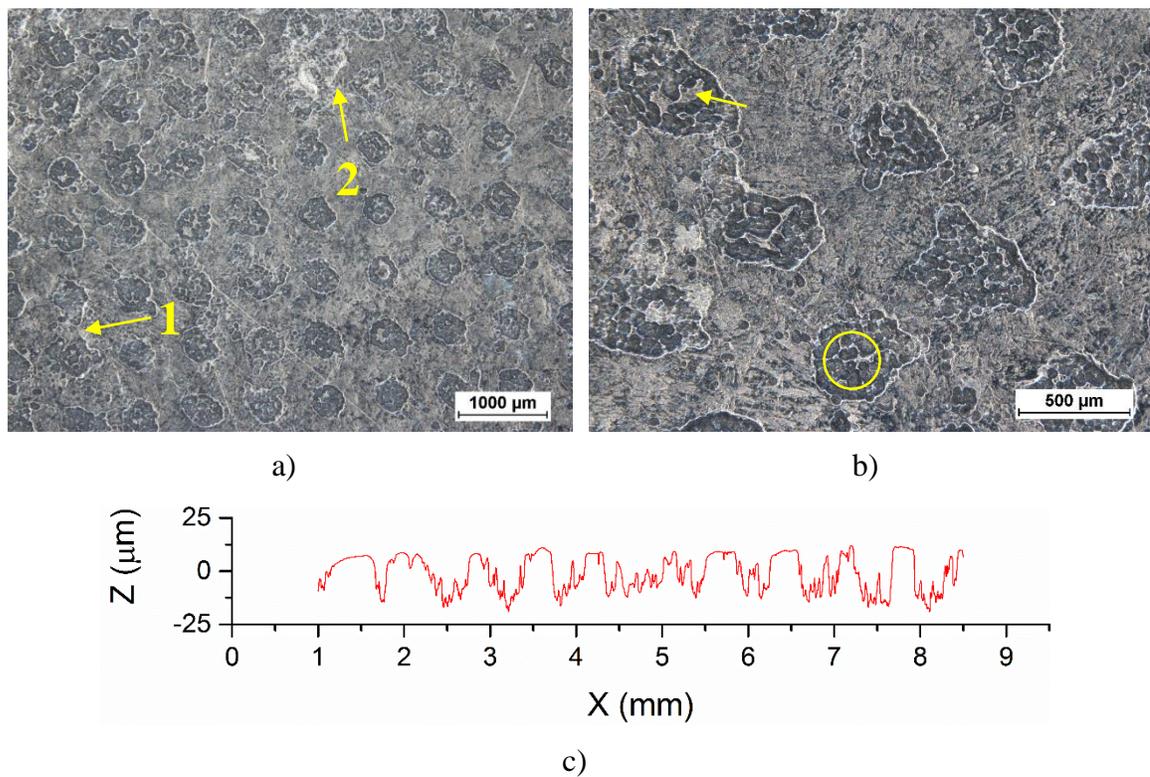
Figura 4-2. Máscaras poliméricas aplicadas sobre el acero AISI 304 observadas en un microscopio estereoscópico. a) Círculos de 1 mm de diámetro espaciados 1.5 mm entre sí (10X), b) Detalle de un círculo de 0.5 mm de diámetro (100X), c) Representación esquemática del flujo de polímero que produce cambios en la geometría diseñada.



En la Figura 4-3–a se puede observar una superficie texturizada con el primer método, allí se observa que el acabado final de la superficie en las zonas protegidas inicialmente por el polímero se vio afectada por el ataque. En la figura las flechas (1) y (2) muestran cómo se crearon canales que unen dos o más agujeros, esto se produjo luego que el reactivo comenzó a despegar el polímero después de 2 minutos de prueba. Adicionalmente, se observó que el acabado final de los agujeros que se buscó generar con el ataque fue muy irregular, como se muestra en la Figura 4-3–b, allí se señalan con flecha picaduras observadas en el fondo de los agujeros y se muestra con un círculo de 250 μm de diámetro la forma que deberían tener los agujeros, evidenciando la pérdida de forma que ocurrió. Con este proceso se obtuvieron

profundidades máximas de hasta $25\ \mu\text{m}$ antes de que se comenzara a desprender la capa protectora de polímero, sin embargo, debido a que se presentó picadura, los fondos no tuvieron un acabado suave, esto se puede evidenciar en el perfil topográfico de la Figura 4-3-c.

Figura 4-3. Superficie texturizada obtenida a partir de un ataque un reactivo compuesto por HCl, HNO₃, ácido acético [57]. a) Imagen estereoscópica de la muestra 10X, b) Detalle de los fondos de los agujeros con picadura, c) Perfil de rugosidad de la muestra

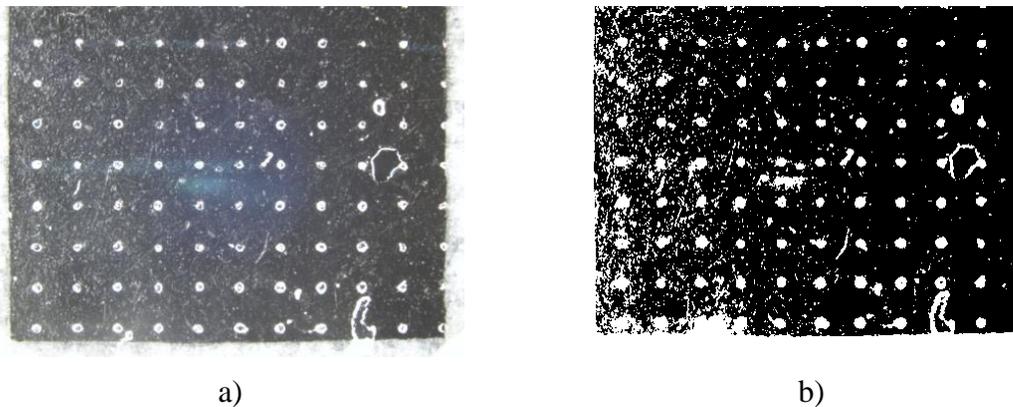


El segundo método para remover el material consistió en usar un ataque electrolítico, de manera que se pudiera disminuir el tiempo de remoción y generar agujeros con un buen acabado superficial en el fondo. En este proceso se tomaron como base los procedimientos recomendados por Van der Voort [56] para electropulido y ataque electroquímico. El proceso de electropulido presentó tasas de remoción de alrededor de $25\ \mu\text{m}/\text{min}$, y permitió obtener buenos acabados superficiales al fondo de los agujeros como se muestra en la Figura 4-5.

Inicialmente se presentaron problemas de borde durante la remoción del material, esto afectó negativamente la calidad de los agujeros ya que cambió las condiciones electroquímicas locales. Para solucionar estos problemas se cubrieron todas las caras que no eran de interés con resina epóxica para controlar bien el área expuesta, pero la resina se degradó durante el ataque electrolítico y empezó a desprenderse de las superficies laterales y posterior de la probeta, por lo que el electrolito se filtró a estas zonas afectando nuevamente el acabado superficial de los agujeros, por tal motivo se cubrió con cinta aislante la baquelita y los bordes de la probeta, lo cual generó resultados satisfactorios en el proceso de texturizado.

Para calcular las condiciones de voltaje y corriente que se aplicaron a cada probeta, se midió el área expuesta mediante análisis digital de imágenes, como se muestra en la Figura 4-4. Posteriormente se utilizó una densidad de corriente de 4 A/cm^2 .

Figura 4-4. Área de las muestras usadas para calcular las condiciones de corriente durante el proceso de remoción de material

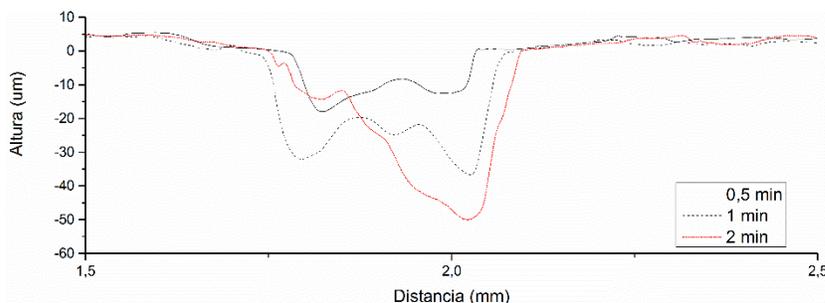


La muestra fue sumergida en el electrolito durante diferentes tiempos (entre 1 y 8 minutos), posteriormente fue analizada visualmente y se observó que se logró un cambio efectivo de profundidades con el tiempo de ataque, como se muestra en la Figura 4-5. Sin embargo, no se pudo observar una tasa constante de remoción de material.

Se utilizó un sistema en el que se mantuvo constante la densidad de corriente, y en el cual los valores de voltaje obtenidos fueron mucho más bajos a los recomendados por la literatura (15-45 V) para pruebas de voltaje constante; esto puede ser producto de las diferencias en los componentes del electrolito o a que el proceso final consiste en un ataque con el que se

remueve más material. Cabe resaltar que el procedimiento de pulido recomienda el uso de unos valores de voltaje, los cuales, si son reducidos alrededor del 10% con respecto al valor de referencia, pueden generar ataque químico.

Figura 4-5. Evaluación de la profundidad de los agujeros en función del tiempo de exposición en el proceso de texturizado.

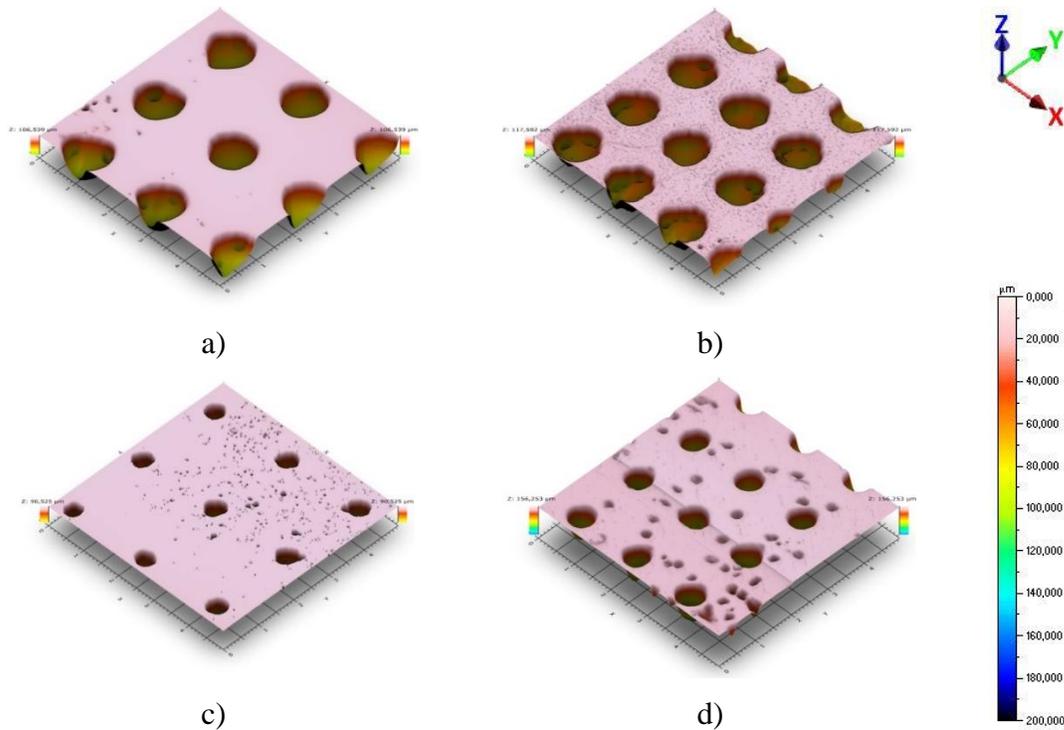


En la Figura 4-6 se muestra la reconstrucción 3D de las superficies después del proceso de texturizado, se observa que los agujeros creados en cada superficie son similares entre sí, y que las zonas planas se mantuvieron protegidas gracias al polímero utilizado, sin embargo, se observan algunos agujeros pequeños que no corresponden al diseño de la textura, esto pudo ser causado por desprendimiento localizado del polímero, producto de la manipulación de las muestras o falta de adhesión, estos agujeros fueron un fenómeno no recurrente que se presentó en zonas aisladas de algunas de las muestras. También se puede observar en los agujeros que existe una variación de alturas en el fondo (representado por el mapa de colores), se nota que las zonas más profundas se encuentran preferencialmente hacia algunos de los lados de los círculos que representan los agujeros, adicionalmente se observa que este fenómeno varía entre cada agujero de cada muestra.

Es posible que estos defectos aparecieran como producto de la falta de adhesión de la película polimérica, aunque también pudo influir el tiempo prolongado de la muestra sometida al proceso electroquímico. Sin embargo, en casos como el de la Figura 4-6-c, en el que la muestra tiene agujeros de baja profundidad, y por tanto menor tiempo de remoción de material, aun así se observaron agujeros extra en algunas zonas de la superficie. La falta de adhesión de la película pudo ser provocada por falta de presión localizada cuando ésta

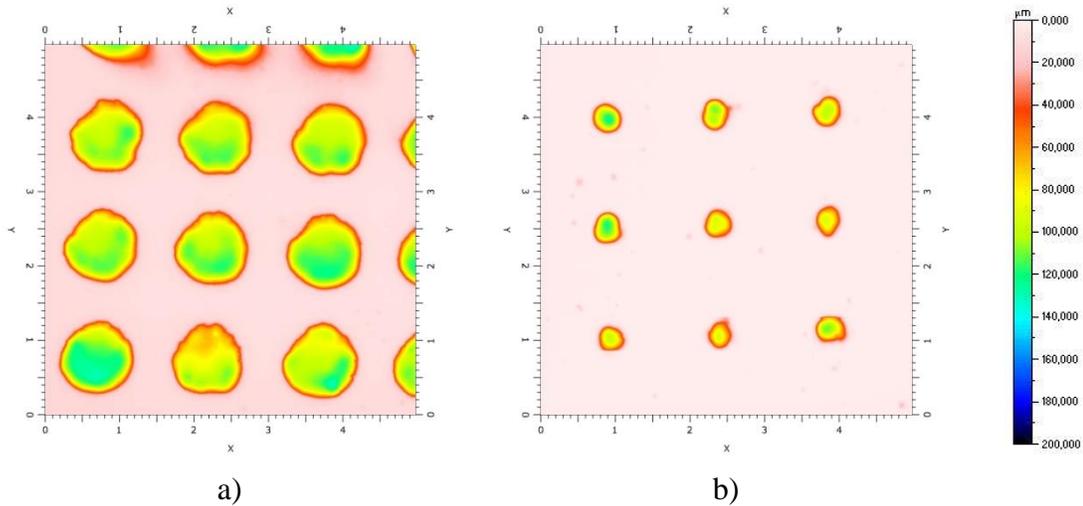
fue adherida, por presencia de contaminación en la superficie de la muestra, o desplazamiento relativo entre el papel encerado y la superficie de la muestra.

Figura 4-6. Perfiles 3D de las superficies texturizadas, a) P1,0-100-2,0-00, b) P1,0-100-1,5-00, c) P0,5-050-2,0-00, d) P0,5-100-1,5-00



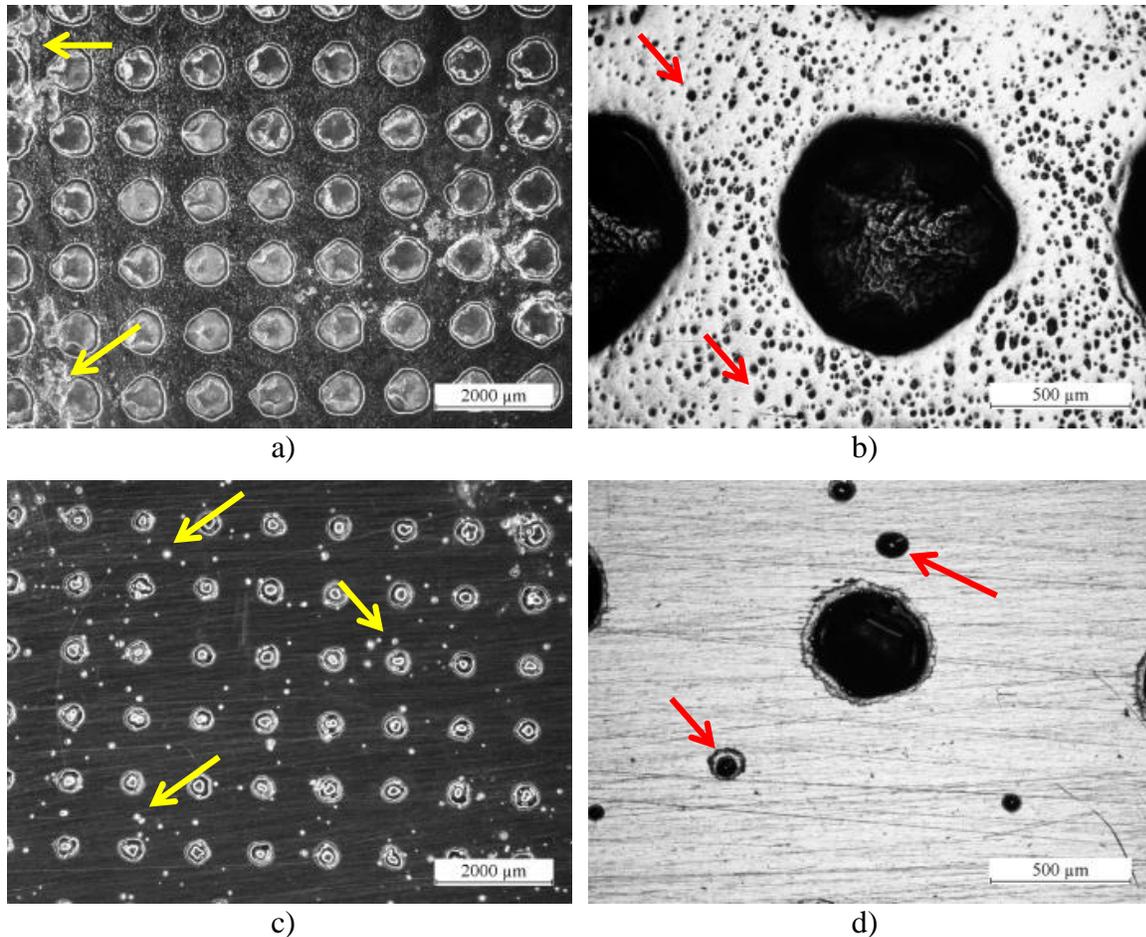
En la Figura 4-7, se muestra otro tipo de defecto observado en las texturas obtenidas, consistente en la variación de la circularidad de los agujeros, puesto que en algunos casos se observan formas ovoides.

Figura 4-7. Vista superior de las superficies texturizadas, a) P1,0-050-1,5, b) P0,5-050-1,5



La Figura 4-8 muestra imágenes tomadas en un estereomicroscopio de algunas de las superficies obtenidas mediante el proceso de texturizado. En la Figura 4-8–a) se observan algunos defectos formados durante la obtención de la textura; la aparición de estos defectos fue causada por pequeños espacios en los cuales la capa polimérica no estuvo bien adherida y por tanto estuvieron sometidos permanentemente a la acción del electrolito, esto se evidenció, durante el proceso de remoción de material en la celda electrolítica, con la aparición de pequeñas laminillas pertenecientes a la capa polimérica que se desprendieron; en las muestras que se prepararon se observó que esto puede ocurrir en zonas diferentes, ya sea concentrados cerca de los bordes de la muestra o aparecer aisladamente cerca de la zona central de la superficie, por lo que se consideró que dependen de la manipulación individual de las muestras durante el proceso de pegado de la capa protectora o durante su montaje en la celda electrolítica.

Figura 4-8. Imagen estereoscópica de las superficies texturizadas obtenidas a partir del proceso electroquímico. a) P1,0-100-1,5 a 10X, b) P1,0-100-1,5 a 50X, c) P0,5-050-1,5 a 10X, d) P0,5-050-1,5 a 50X

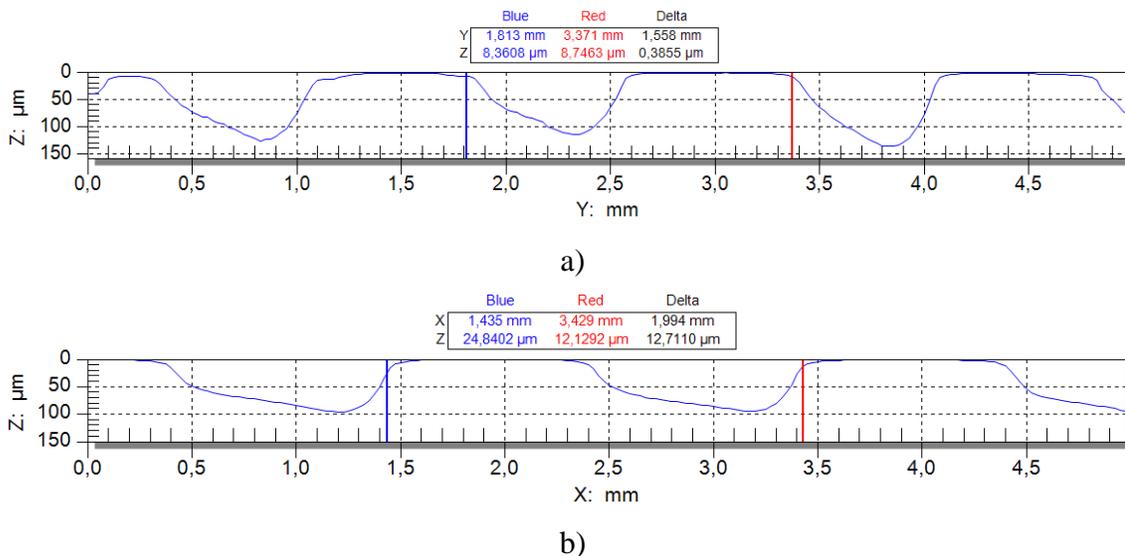


En la Figura 4-8-b) se muestran picaduras por corrosión en la superficie, estos se produjeron durante el proceso de texturizado por el desprendimiento de la capa polimérica protectora, a diferencia de los defectos anteriores, esto ocurrió después de que la muestra llevaba varios minutos sumergida en el electrolito mientras se removía material; la causa de este desprendimiento, entre otras cosas, pudo ser producto de que el polímero no estuviera bien adherido a la superficie metálica y el flujo que se forma cerca a la superficie durante la remoción de material lo pudiera desprender. La Figura 4-8-c) muestra este mismo tipo de defectos, pero se ve que hay una menor cantidad de ellos en la superficie, esto se debe a que el tiempo que estuvo la muestra sumergida después que la capa polimérica se desprendiera fue menor, por tanto la manera enfrentar este problema fue un monitoreo constante del proceso de remoción en el cual se interrumpía el proceso cada cierto tiempo para revisar que

la capa no se desprendiera; la Figura 4-8-d) muestra en detalle un agujero de la textura al lado de uno de los defectos mencionados.

En la Figura 4-9 se ve más claramente que las texturas tienen un lado más profundo en los fondos de los agujeros; esa morfología de los fondos de los agujeros pueden ser influenciada por dos fenómenos: el primero puede ser la disposición de las muestras en la celda electrolítica, ya que durante el proceso de remoción de material se observó que las muestras ubicadas verticalmente en la celda tenían la tendencia a formar un flujo de electrolito ascendente que pudo afectar localmente la morfología de los agujeros; el segundo puede ser debido a la variación del área expuesta de los agujeros, ya que se observó que en los agujeros de mayor diámetro (~ 1 mm), se presentó una morfología particular en la cual los fondos son planos con una zona de mayor profundidad en la periferia, causado posiblemente por efectos de borde dejando una forma de *W*. Para los diámetros más pequeños (hasta ~ 750 μm), se observaron fondos cuya sección transversal tiene forma de *U*.

Figura 4-9. Perfil transversal de las superficies texturizadas. a) Perfil transversal de una muestra de agujeros de 500 μm de diámetro y espaciamento entre ellos de 1,5 mm, b) Perfil transversal de una muestra de agujeros de 1 mm de diámetro y espaciamento entre ellos de 2 mm.



En la Figura 4-10 se observa un perfil transversal de una muestra texturizada, el cual fue utilizado para determinar la profundidad alcanzada mediante este proceso. Como se mencionó anteriormente, los fondos de los agujeros no tienen una superficie plana ni son

todos de la misma profundidad, por tal motivo, para determinar la profundidad de las texturas se optó por tomar los valores de mayor profundidad de cada agujero en el perfil, de esta manera, se tomaron varios perfiles para cada muestra y el promedio se asumió como el valor de profundidad; en la Figura 4-10 se muestra que para el perfil se identificaron cinco puntos que corresponden a los puntos de mayor profundidad local, para estos se determinó la distancia respecto a la línea roja, que representa la superficie como si no tuviera textura y se promedió el valor de profundidades. En la Tabla 4-2 se presenta el valor de profundidad promedio obtenido para cada condición de texturizado.

Figura 4-10. Perfiles para la medición de la profundidad de la textura

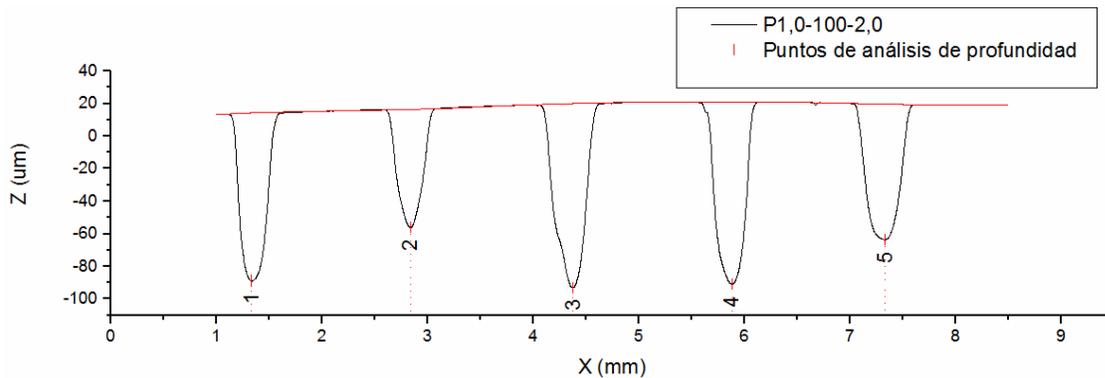


Tabla 4-2. Valores de profundidad obtenidos para cada condición de texturizado

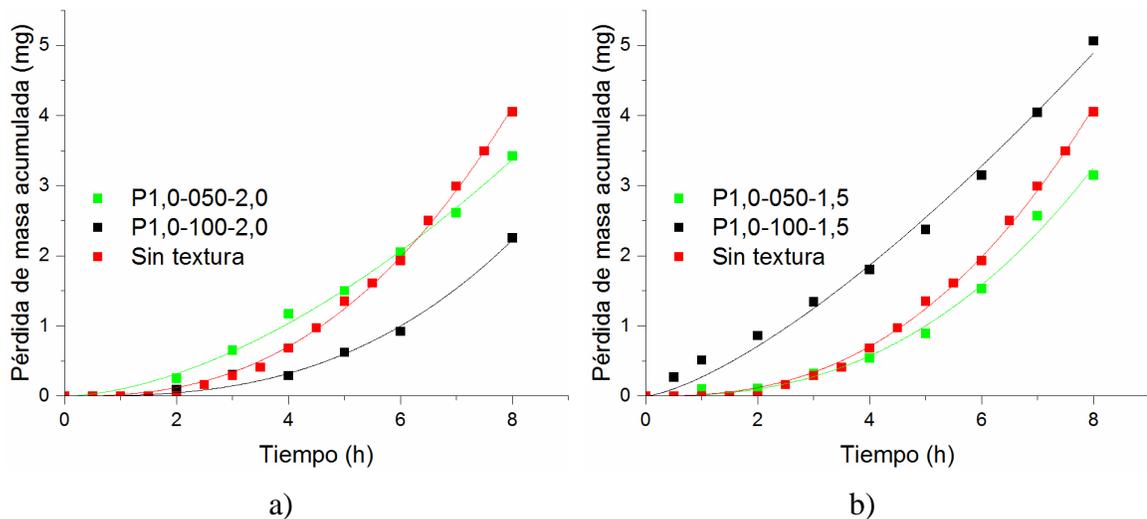
Muestra	Profundidad (μm)
P1,0-100-2,0	96 ± 18
P1,0-050-2,0	75 ± 9
P1,0-100-1,5	114 ± 21
P1,0-050-1,5	52 ± 9
P0,5-100-2,0	$103 \pm$
P0,5-050-2,0	77 ± 14
P0,5-100-1,5	118 ± 8
P0,5-050-1,5	47 ± 6

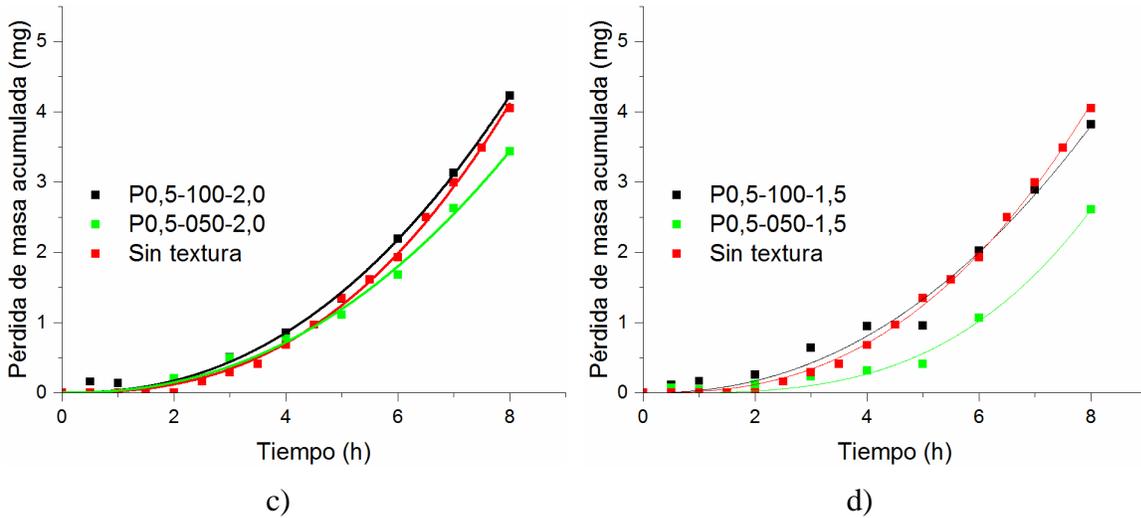
4.3 Resistencia al desgaste por cavitación

4.3.1 Pérdida de masa

Después de realizar los ensayos de cavitación de las muestras se graficó la curva de pérdida de masa en función del tiempo de ensayo que se observa en la Figura 4-11, ésta curva muestra la comparación de la resistencia de una superficie sin texturizar con cada uno de los diseños geométricos de la textura: M1, M2, M3, y M4, descritos en la Figura 3-3. La condición “sin textura” se tomó como referencia para evaluar el efecto que causó cada condición de texturizado sobre el material; se observa que todas las curvas de desgaste de las muestras texturizadas tienen una forma similar a la de referencia, lo cual indica que el texturizado no afectó significativamente el comportamiento global de las muestras durante el proceso de desgaste, sin embargo se puede ver que el periodo de incubación y la tasa de desgaste tienen pequeñas variaciones.

Figura 4-11. Pérdida de masa acumulada en función del tiempo ensayo en las pruebas de erosión por cavitación, a) M1, b) M2, c) M3, d) M4





La condición de texturizado con geometría M1 (P1,0-050-2,0 y P1,0-100-2,0) (Figura 4-11-a), es decir, con diámetros y espaciamientos grandes, presentó un desgaste mayor para los agujeros de menor profundidad. Para las geometrías M2, M3 y M4, que se muestran en las Figura 4-11-b), -c) y -d) respectivamente, se observa que la condición que presentó mayor desgaste fue la de los agujeros de mayor profundidad. Es posible observar que las condiciones que aparentemente tuvieron un mejor desempeño en las pruebas de desgaste fueron P1,0-100-2,0 y P0,5-050-1,5, esto si se considera la masa total perdida al final de la prueba como factor de comparación.

Para analizar las curvas de erosión por cavitación se utilizaron como descriptores el tiempo de incubación nominal (**TI**) y la tasa de desgaste en estado estable (**TD**), definidos previamente en el capítulo 1.1.3. La Figura 4-12 ilustra cómo fueron definidos **TI** y **TD** para la curva de desgaste de la muestras. La curva de la imagen corresponde a la muestra no texturizada, allí se ajustó una recta a los datos de pérdida de masa que presentaron una tendencia lineal, la pendiente de dicha recta representa la **TD** y el intercepto de la recta con el eje x representa el **TI**, en la Tabla 4-3 se presentan los valores calculados para las diferentes condiciones de texturizado.

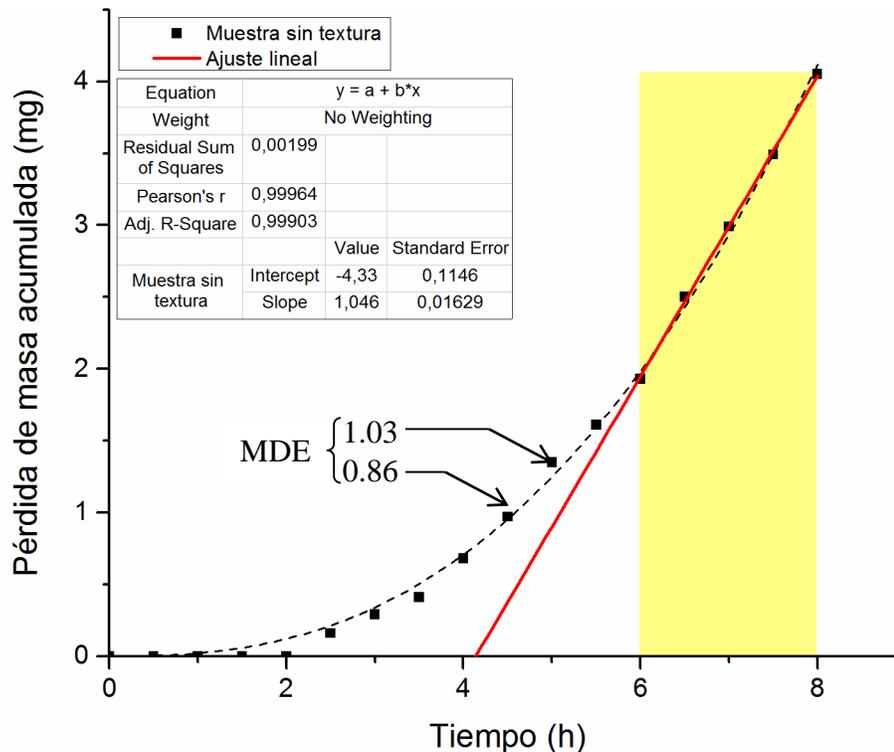
Tabla 4-3. Tiempo de incubación (**TI**) y tasa de desgaste en estado estable (**TD**) para las pruebas de desgaste de las muestras con y sin textura

Muestra	TI (h)	TD (mg/h)
---------	--------	-----------

	Sin textura	4.14	1.05
M1	P1,0-050-2,0	3.04	0.69
	P1,0-100-2,0	4.58	0.67
M2	P1,0-050-1,5	4.01	0.81
	P1,0-100-1,5	2.71	0.96
M3	P0,5-050-2,0	4.06	0.88
	P0,5-100-2,0	3.88	1.02
M4	P0,5-050-1,5	4.61	0.77
	P0,5-100-1,5	3.76	0.90

El **TI** estimado para la muestra sin textura es de 4,14 horas, que es mayor al tiempo en el cual la curva empieza a crecer (aprox. 2 horas) dato que debería ser tomado como el **TI**, ya que es el periodo en el que no se registra pérdida de masa. Sin embargo, dado que esta forma de determinar el TI es altamente dependiente de la resolución de la balanza con que son medidas las pérdidas de masa y donde pueden obtenerse variaciones relativas de más del 50%, se optó por utilizar un indicador recomendado por la norma ASTM G32 para verificar si los valores de pérdida de masa son significativos [31], este es el tiempo umbral de erosión **ETT** (*Erosion Threshold Time*), el cual representa el tiempo requerido para alcanzar en la muestra una profundidad media de erosión **MDE** (*Mean Depth Erosion*) de 1 μm ; se puede ver en la Figura 4-12 que los puntos correspondientes a los tiempos 4,5 y 5 horas tienen valores de **MDE** que indican que en este rango de tiempo se alcanzó el **ETT**.

Figura 4-12. Estimación de la tasa de desgaste en estado estable y el tiempo de incubación

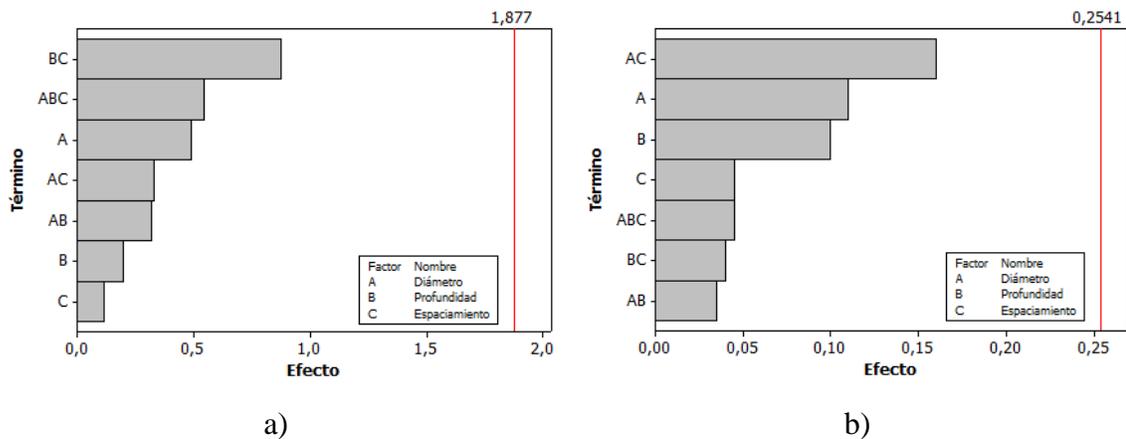


Si se compara el **ETT** (entre 4.5 y 5 horas) con el **TI** para la muestra de la figura, se puede ver que el último es más cercano que el tiempo de 2 horas en el que aparentemente no hay pérdida de masa; este criterio permitió determinar que los **TI** para las muestras eran consistentes, ya que en casos como el de la curva de desgaste de la muestra P1,0-100-1,5 (Figura 4-11-b) no hay un periodo de incubación aparente.

Utilizando los datos mostrados en la Tabla 4-3 se realizó el análisis estadístico del experimento diseñado (véase capítulo 3.3.1), se obtuvo el análisis de varianzas y se utilizó el diagrama de Pareto que se muestra en la Figura 4-13 para determinar la magnitud y la importancia de los efectos de los factores y sus interacciones. La Figura 4-13-a) corresponde al análisis del **TI**, donde se puede observar que la interacción entre la profundidad y el espaciamiento fue quien más influencia tuvo en los valores de **TI** obtenidos. La Figura 4-13-b), que presenta el análisis de la **TD**, muestra que la interacción entre los factores diámetro y espaciamiento fue quien tuvo mayor efecto; en ambas figuras se observa que el diámetro de los agujeros fue el efecto principal más influyente y que el espaciamiento fue el de menor

influencia. En los diagramas de Pareto se puede observar, para ambas variables respuesta, que ninguno de los efectos puede considerarse significativo, ya que no superaron el umbral de referencia (1,877 para **TI** y de 0,2541 para **TD**, determinado con el método de Lenth [62], que sirve para referenciar cuando un efecto se considera significativo. Lo anterior no indica que los procesos de texturizado no tengan efecto sobre la erosión, sino que los valores de los niveles de cada factor y el número de réplicas no fue suficiente para determinar con claridad cuál fue el factor más influyente, para esto se requerirían corridas experimentales adicionales o el uso de otros valores para los factores tenidos en cuenta.

Figura 4-13. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados, a) Variable respuesta TI, b) Variable respuesta RD



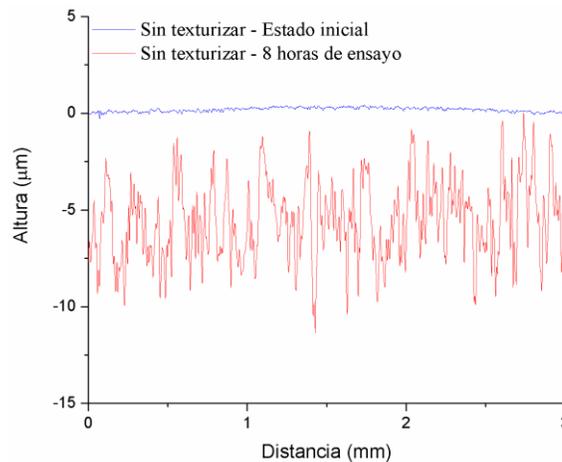
Debido a que el experimento está en una fase exploratoria, es difícil determinar cuáles son los valores que se deben asignar a cada nivel, sin embargo, a partir de los resultados obtenidos en esta investigación es posible afirmar que el diseño de experimentos puede hacerse fijando el factor espaciamiento y realizando una exploración más amplia con el diámetro y la profundidad de los agujeros, los cuales fueron aparentemente más influyentes.

4.3.2 Evolución de la topografía de las superficies

La evolución de la topografía superficial de las muestras fue analizada durante las pruebas de erosión. La Figura 4-14 muestra el cambio que sufre la superficie de una muestra sin texturizar producto de la erosión por cavitación, en la figura se observa que en el perfil

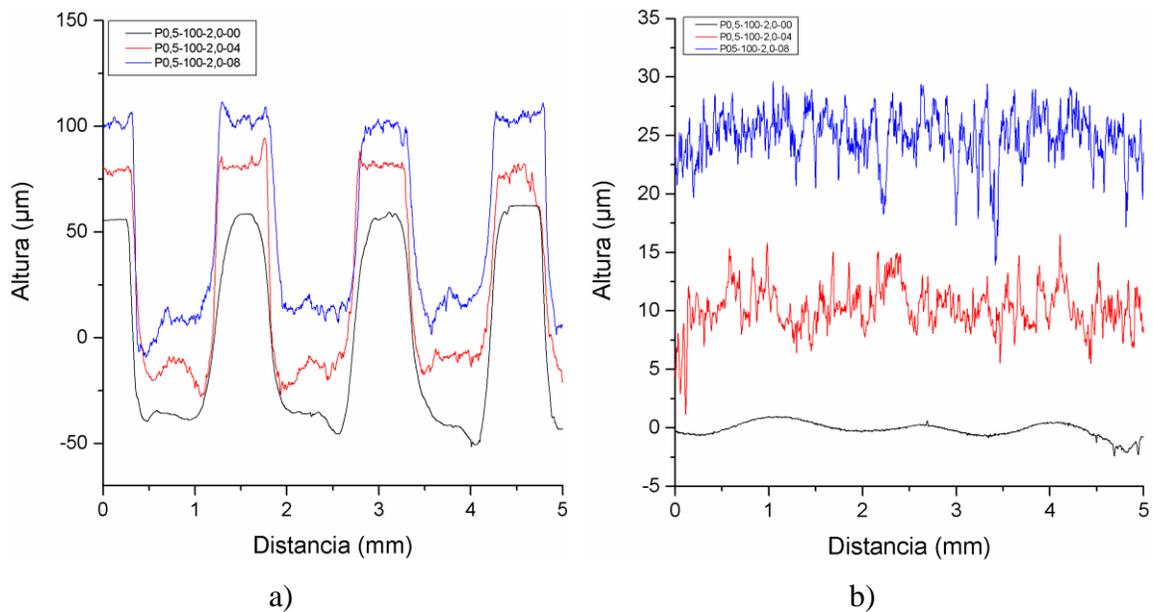
aparecen picos y valles más profundos, esto es causado por la remoción de material que empieza a sufrir la superficie.

Figura 4-14. Comparación entre el estado inicial y final de las superficies de la muestra sin texturizar

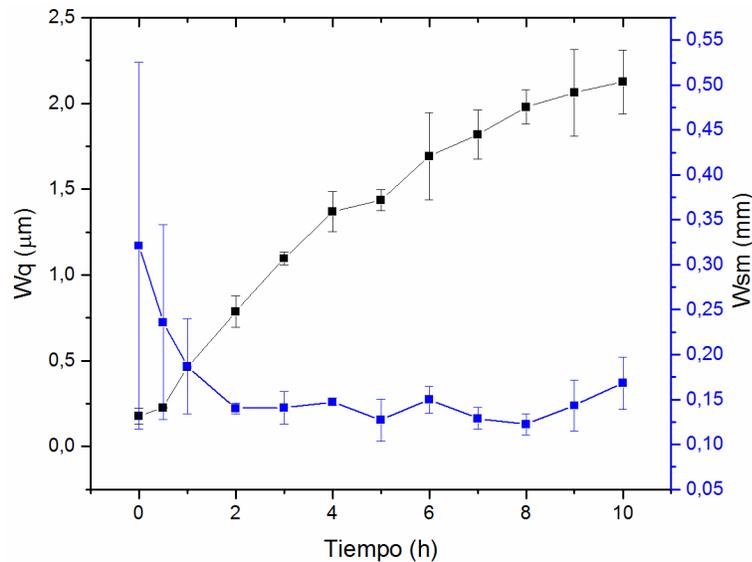


En la Figura 4-15 se muestra la evolución del perfil de una muestra texturizada (P0,5-100-2,0) sometida a desgaste por cavitación. Debido a que las muestras texturizadas tienen una zona en la cual no hubo agujeros, fue necesario analizar dos tipos de perfiles para evaluar el comportamiento de la superficie. En la Figura 4-15-a) se muestran perfiles característicos en una zona texturizada, la cual se obtuvo realizando un barrido con el perfilómetro de manera que pasara por el centro de los agujeros, allí se puede observar cómo, tanto en los valles como en las mesetas de la textura, comienza a perderse la suavidad de la superficie, dicho cambio se da a una escala mucho más pequeña (alrededor de 10 μm) que la del tamaño de los agujeros de la textura evaluada (100 μm). La Figura 4-15-b) muestra la medición en una zona no texturizada, para propósitos de comparación.

Figura 4-15. Evolución del perfil de rugosidad durante la prueba de desgaste en una muestra texturizada. a) Perfiles medidos en la zona de los agujeros de la textura, b) Perfiles tomados en la zona no afectada por el proceso electrofítico

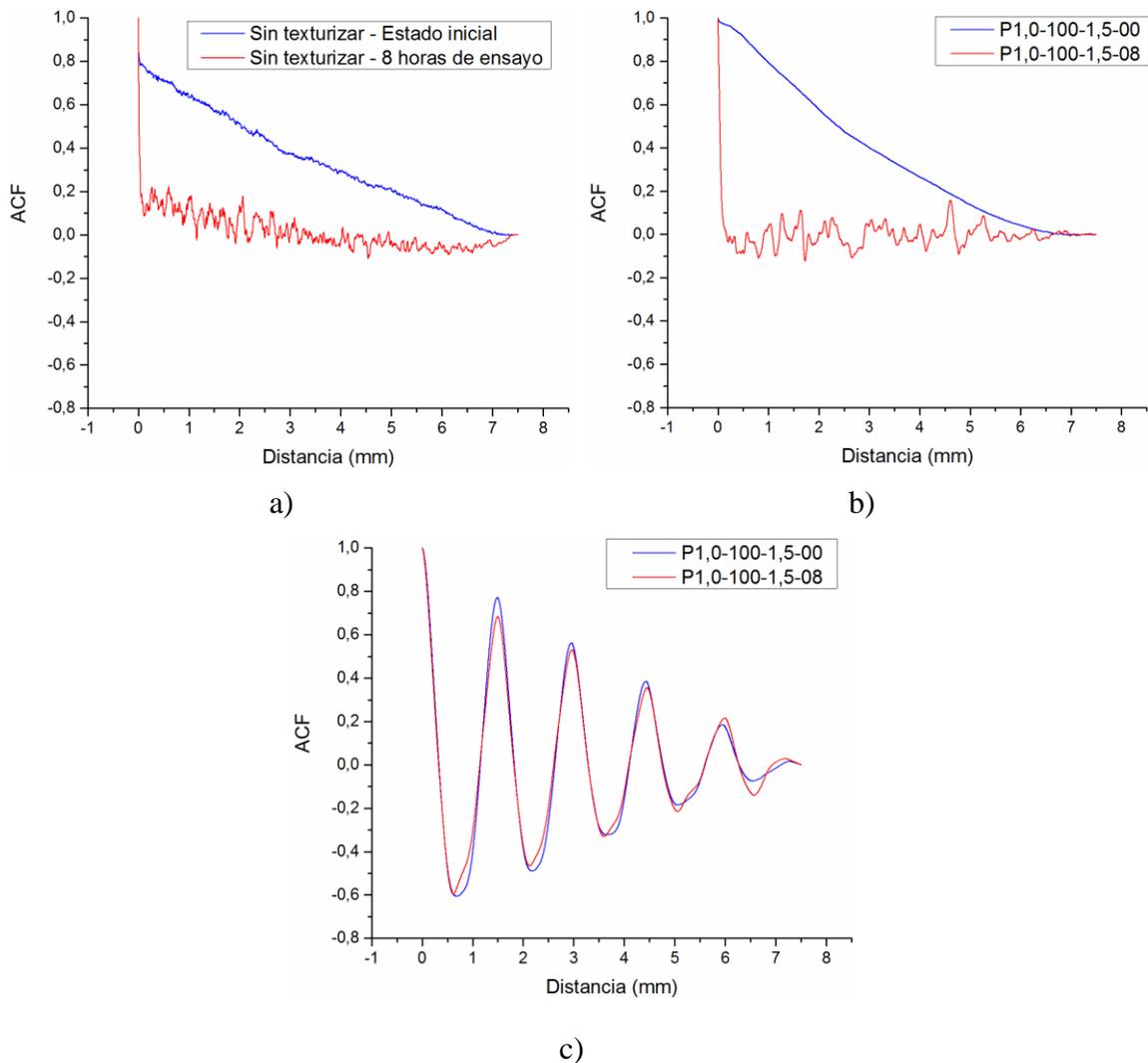


En la Figura 4-16 se muestra la evolución de dos parámetros de rugosidad comúnmente utilizados para caracterizar superficies: la rugosidad media cuadrática Rq y el espaciamiento medio Rsm (en el caso de los datos analizados en este trabajo, los cuales son no filtrados, se trata de Wq y Wsm respectivamente); se puede observar que el Wq tiene un crecimiento constante y a diferencia de la curva de pérdida de masa, no tiene que tener un periodo de incubación ya que durante las etapas tempranas del ensayo de cavitación se pueden producir cambios en la topografía de la superficie aún sin pérdida de masa; la curva de Wsm presenta una caída durante las primeras etapas del proceso y se mantiene estable, este comportamiento puede asociarse a que la remoción de material genera defectos que pueden tener tamaños y distancias de ocurrencia similares.

Figura 4-16. Cambio de los parámetros de rugosidad Wq y Wsm en función del tiempo de ensayo de cavitación

De la misma manera en que se hizo un seguimiento a la evolución de los parámetros de rugosidad, se evaluó el cambio de las funciones de autocorrelación **ACF** (*Auto-Correlation Function*) y la densidad espectral de potencia **PSD** (*Power Spectral Density*). En la Figura 4-17 se muestran las **ACF** representativas del comportamiento observado en las muestras analizadas. Se observa en las Figura 4-17-a) y b), correspondientes a una superficie sin texturizar y a una zona sin agujeros en una superficie texturizada respectivamente, el cambio notorio entre el estado inicial y después del desgaste; el estado inicial, en ambos casos, muestra que la superficie es muy similar cuando se compara con sí misma en diferentes puntos a lo largo de un perfil de datos. Por otro lado, una vez las superficies se someten a desgaste, su autocorrelación se reduce drásticamente como consecuencia de la generación de múltiples variaciones locales en la rugosidad. La Figura 4-17-c) representa la evolución de las superficies texturizadas en una zona con agujeros, se puede observar que para la curva de 8 horas de ensayo la **ACF** tiene valores de menor magnitud lo cual puede ser causado por la aparición de defectos que le quitan similitud a la superficie al ser comparada con ella misma, pero la forma general se mantiene, mostrando que la textura inducida inicialmente permanece.

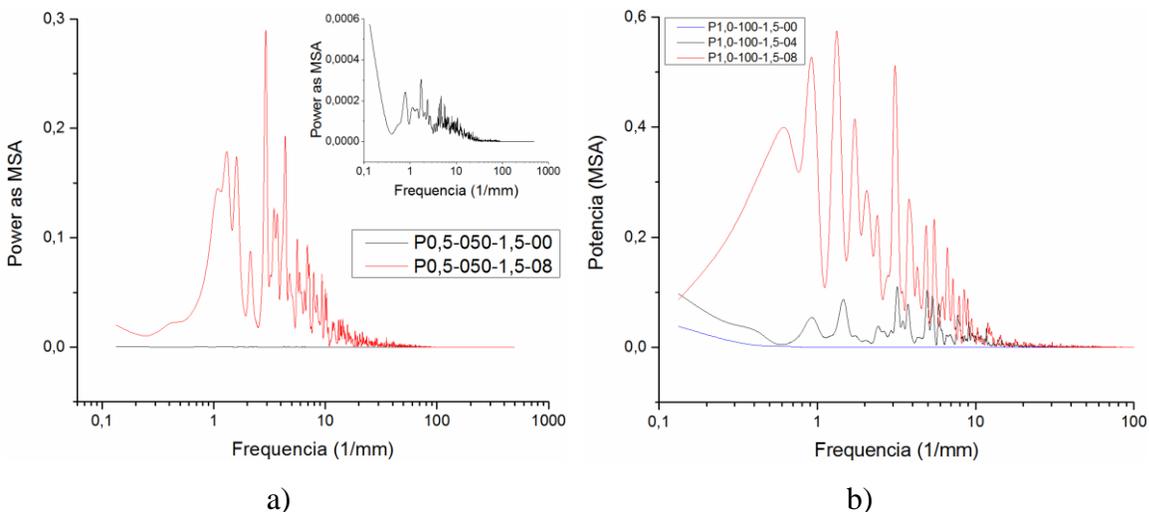
Figura 4-17. Curvas de ACF medidas en las muestras sometidas a erosión por cavitación. a) Cambio de la ACF de una superficie sin texturizar, b) Cambio de la ACF de una zona sin agujeros en una superficie texturizada, c) Cambio de la ACF de una zona con agujeros en una superficie texturizada.



En la Figura 4-18 se muestra el análisis de la **PSD** durante los ensayos de cavitación para la zona sin agujeros de las muestras texturizadas, la cual representa el comportamiento que tuvo la superficie no texturizada. En la Figura 4-18-a) se pueden observar dos curvas: una corresponde al estado inicial de la superficie (P,05-050-1,5-00) y la otra a una superficie que ha sido expuesta a la cavitación durante 8 horas, se puede observar que, en general, la potencia es mayor para los diferentes picos para la muestra después del ensayo, con un aumento de la amplitud en la densidad espectral de hasta 3 órdenes de magnitud. Se puede observar que aparecen algunos picos de mayor potencia para frecuencias entre 1 y 10 mm^{-1} ,

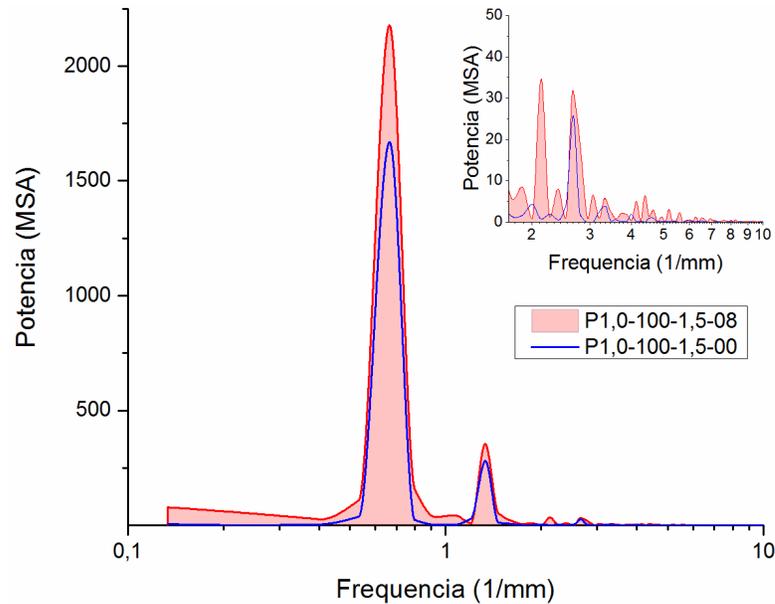
esto podría considerarse como una respuesta característica de la superficie al proceso de erosión, es decir, que los defectos que se generan en la superficie, a pesar de no generar una topografía uniforme, pueden ser caracterizados espacialmente mediante **PSD** y ser identificados en este rango de frecuencias : Al observar la Figura 4-18-b) se puede notar que durante una etapa intermedia de 4 horas (curva P1,0-100-1,5-04), que corresponde cercanamente al período de incubación de acuerdo a lo mencionado en la Tabla 4-3, empiezan a aparecer los picos en el rango mencionado, y que después de 8 horas de ensayo aumenta la amplitud de dichos picos pero manteniéndose el mismo rango de frecuencias característico.

Figura 4-18. Curvas de **PSD** de las superficie texturizada en la zona sin agujeros. a) Muestra con geometría M4 durante los ensayos de cavitación, b) Muestra con geometría M2 durante los ensayos de cavitación.



En la Figura 4-19 se presenta el análisis de **PSD** para la zona con agujeros en las superficies texturizadas. Se puede observar que los valores de potencia de algunos de los picos son mucho mayores que los encontrados en la superficie no texturizada, tales valores representan el espaciamento promedio de las cavidades generadas intencionalmente en las muestras. Por ejemplo, en el caso de la curva de la Figura 4-19 se muestra el análisis para la muestra P1,0-100-1,5, la cual tiene agujeros de 1 mm de diámetro espaciados 1,5 mm, como se puede observar en la figura Figura 4-8-a); la aparición del pico en valores de frecuencia entre 0,6 y 0,7 mm^{-1} representa justamente el espaciamento medio entre agujeros.

Figura 4-19. Curvas de PSD de las superficie texturizada en la zona con agujeros



Si se comparan los valores de la Figura 4-19 con los de la Figura 4-18, se puede apreciar que la potencia del pico del texturizado ($0.6-0.7 \text{ mm}^{-1}$) tiene una magnitud mucho mayor en la superficie texturizada (hasta 3 órdenes de magnitud de diferencia relativa), por lo que no se pueden ver claramente los picos que aparecen durante el proceso de erosión, los cuales se representan con frecuencias entre 1 y 10 mm^{-1} como se mencionó anteriormente; si se analiza el espectro de la superficie texturizada solamente, a partir de frecuencias superiores a 1 mm^{-1} , como se muestra en el recuadro de la Figura 4-19, se ve como los picos de menor potencia siguen existiendo y pueden ser correlacionados con el daño de la superficie. A partir de este análisis es recomendable implementar un proceso de filtrado de la amplitud de la señal en el cual se pueda diferenciar en superficies texturizadas la **PSD** generada por el proceso de erosión de la **PSD** propia del texturizado.

Al observar la ubicación de los picos de la Figura 4-19 se puede notar que la zona, en términos del rango de frecuencias, en que las texturas pudieron afectar el proceso erosivo estuvo cerca al rango en el cual se produjeron la mayoría de picos producto de la cavitación, por tanto, si se evaluaran texturas cuyos picos característicos en la curva de **PSD** estén

ubicados en el rango entre 1 y 10 mm^{-1} podría obtenerse una respuesta a la erosión por cavitación de mayor peso, esto quiere decir que se requerirían texturas que tengan características que le permitan tener longitudes de onda (en el perfil de rugosidad) entre 1 mm y 0,1 mm.

4.3.3 Consideraciones sobre los mecanismos de desgaste

En la Figura 4-20 se puede observar, antes y durante las pruebas de desgaste, la superficie al interior de los agujeros generados en el texturizado de una de las muestras, también se pueden observar las zonas no afectadas por el proceso electrolítico. La Figura 4-20-a muestra el estado inicial de la superficie de la muestra, el lado izquierdo de la imagen corresponde al acabado inicial de la superficie pulida con lija, donde se pueden identificar algunas líneas o rayones paralelos que corresponden a las marcas de deformación plástica producto de la abrasión; en la parte derecha de la imagen se encuentra uno de los agujeros hechos por medio del proceso electrolítico, es posible observar la diferencia en el acabado superficial entre la zona izquierda y derecha de la imagen, ya que en la zona electropulida no se observan marcas de deformación plástica y esta superficie es más lisa. En la Figura 4-20-b se muestra una zona de la misma muestra sometida al proceso de desgaste durante 30 minutos, allí no se observa remoción de material en el fondo del agujero, sin embargo se observan algunas maclas y bandas de deformación, las cuales aparecen comúnmente como mecanismo de disipación de energía en el acero austenítico.

En los intervalos de pesaje de las pruebas de cavitación se recolectó material removido de la superficie, utilizando un proceso de filtrado en vacío. En la Figura 4-21 se pueden observar algunas partículas recolectadas luego de 30 minutos de ensayo. Se observa en la Figura 4-21-a) que las partículas tienen una morfología irregular con tamaños entre 30 y 50 μm . La partícula que se muestra en la Figura 4-21-b) posee forma predominantemente laminar, este tipo de partículas fue recolectada principalmente en las primeras etapas de las pruebas de desgaste, por lo cual puede asociarse a la remoción de material con alta deformación plástica de las zonas pulidas mecánicamente, especialmente en las regiones de

los bordes de los agujeros como se muestra en la Figura 4-20-a), en donde puede notarse como sobresale el material deformado en el borde, esto fue producido durante el pulido final de las muestras posterior al proceso de texturizado. El material del borde tiene una morfología que se asemeja a las partículas laminares de la Figura 4-21-b) y representa zonas altamente deformadas, las cuales pudieron removerse fácilmente durante los primeros instantes de las pruebas de cavitación, alterando así las características típicas de la curva de desgaste (Figura 1-6) puesto que se registraron, en algunos casos, pérdidas de masa en anómalas para este tipo de material. No obstante, tales pérdidas de masa no fueron suficientemente altas para considerar que el fenómeno de desgaste ya había superado el tiempo de incubación. En etapas posteriores de la prueba de desgaste, Figura 4-22, se observa cómo los bordes de los agujeros se van haciendo menos filosos y presentan mayores signos de deformación, pues facilitan el proceso de desgaste.

Figura 4-20. Superficie de una muestra sometida a la prueba de desgaste. (a) Estado inicial y (b) después de 30 minutos de ensayo.

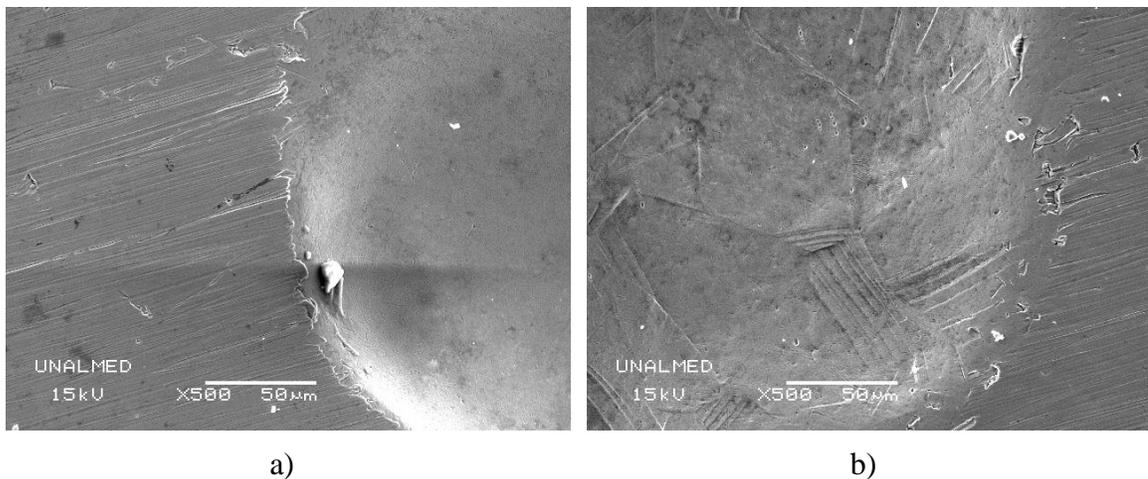


Figura 4-21. Partículas removidas de la superficie durante el proceso de desgaste

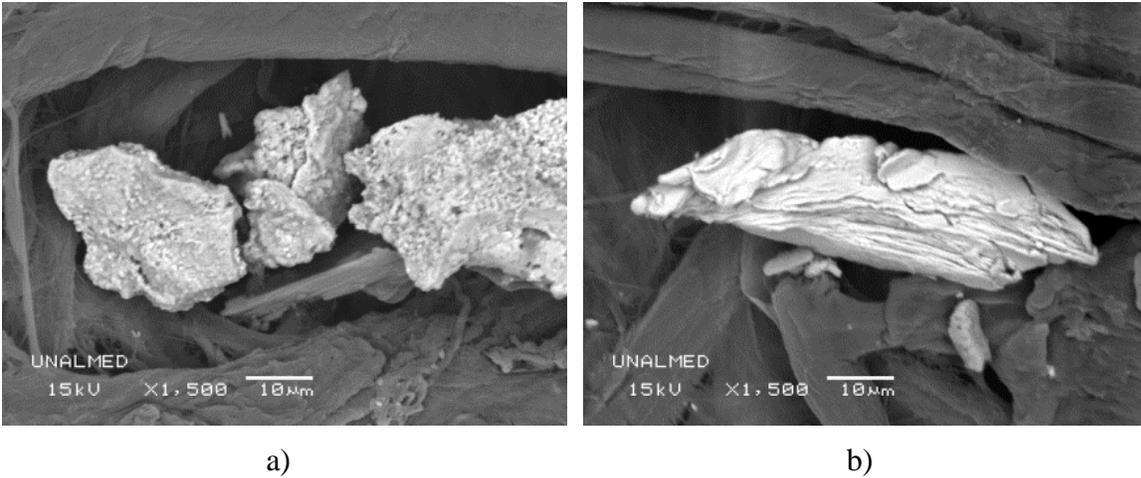
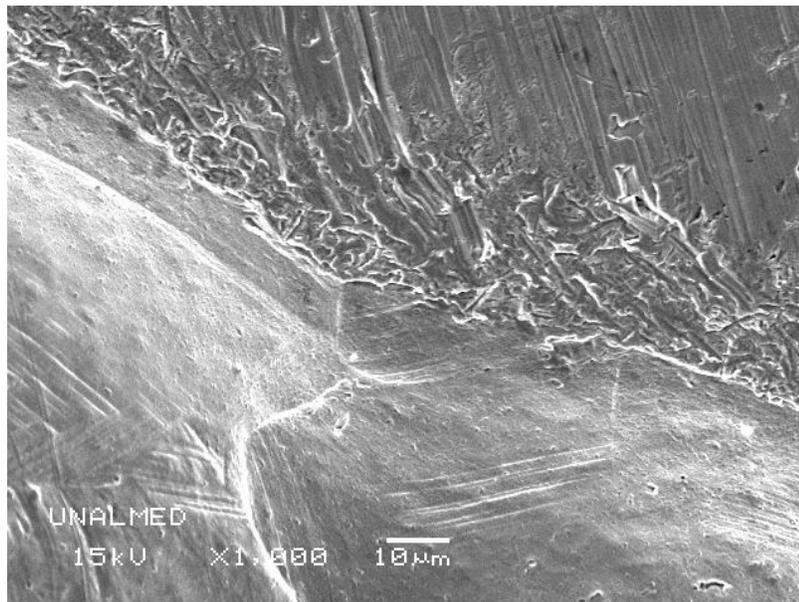


Figura 4-22. Bordes de agujeros altamente deformados por el proceso de pulido. Pueden apreciarse bandas de deformación causadas por la cavitación.



En la Figura 4-23 se observa la superficie, después de la prueba de desgaste, de la zona que no tiene agujeros en una muestra texturizada, allí se pueden observar cómo cambia la severidad del desgaste al pasar de una zona central de la huella de desgaste hacia el borde de la misma. En la Figura 4-23–a) se muestra una zona central de la huella de desgaste, después de 8 horas de ensayo en donde se presenta desgaste más severo. En la Figura 4-23–b se muestra una zona hacia las afueras de la huella de erosión, en donde se observa que la

superficie aún conserva zonas con marcas de deformación por el pulido inicial de la superficie, es decir, que a pesar de que la muestra se encuentra en la etapa de tasa de erosión en estado estable, la remoción del materia aún no se presenta en toda la superficie. La Figura 4-23-c) muestra una zona aledaña a la huella de desgaste, se observa como en los alrededores el desgaste también se presentó deformación de las líneas de pulido.

En la Figura 4-24 se puede ver una superficie desgastada después de un ensayo de cavitación llevado hasta la etapa de desgaste en estado estable. En la Figura 4-24-a) se muestra en la parte derecha una zona de la superficie que estuvo por fuera de la zona expuesta a cavitación, y en la parte izquierda se observa la pared interna de uno de los agujeros del texturizado, el cual fue desgastado durante la prueba, se ve como la superficie interna del agujero tiene marcas de deformación plástica producto de la remoción continua de material.

La etapa de remoción de material, con una tasa de erosión constante, parece tener correspondencia con la remoción de las zonas que fueron acumulando esfuerzos y deformación durante el proceso de desgaste, y en la medida que queda expuesta la superficie.

Figura 4-23. Vista superior de las zonas pulidas de las muestras después del ensayo de cavitación.

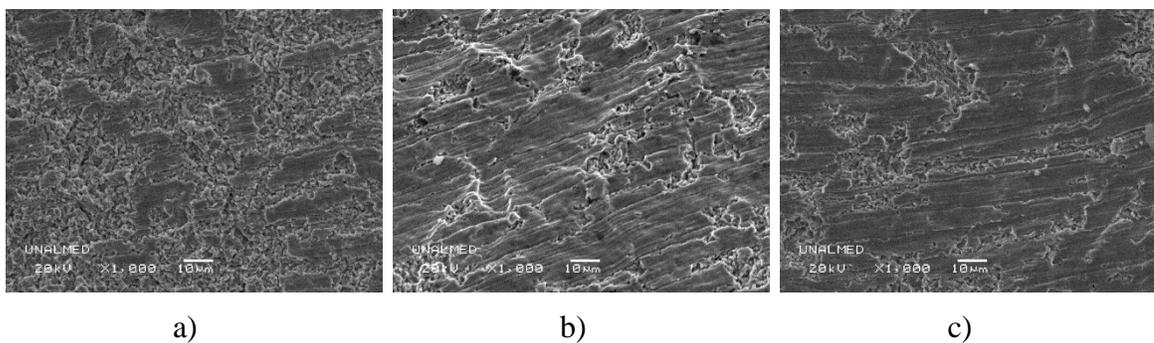
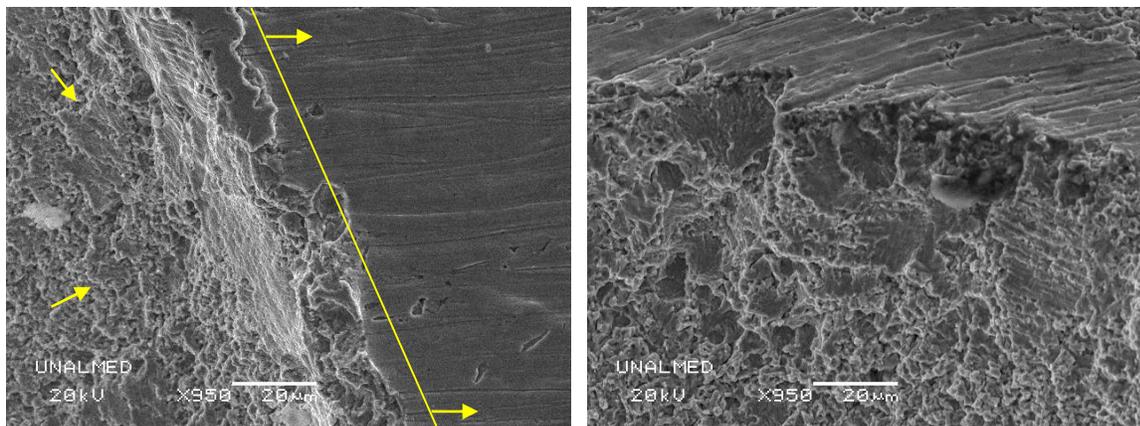


Figura 4-24. Borde de un agujero de muestras texturizadas en el período de tasa de desgaste estable en un ensayo de cavitación.



5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

1. Se desarrolló un procedimiento de texturización mediante el cual se producen superficies con topografía controlada, dicho procedimiento permitió utilizar materiales de bajo costo y rápida producción, lo cual permitiría una fácil implementación en procesos industriales. Se pudo verificar que la técnica permite obtener
2. Se definió la utilidad de diversos descriptores de superficie para evaluar la efectividad del procedimiento de texturizado, y se pudo establecer que estos descriptores pueden servir como indicadores indirectos de las diferentes etapas en el proceso de desgaste por cavitación. Se verificó que descriptores de amplitud, como R_q o W_q , muestran una tendencia creciente a medida que el proceso de desgaste avanza, esto es conforme a lo que se encontró en la literatura respecto a la evolución de la morfología para superficies erosionadas por cavitación. Adicionalmente, el uso de un descriptor de espaciamiento, como R_{sm} o R_{sm} , permite concluir que esta evolución de la morfología genera picos y valles más pequeños, lo que da cuenta de la naturaleza localizada del fenómeno.
3. Durante la realización de las pruebas de cavitación fue posible describir el comportamiento diferencial de las zonas intervenidas por la texturización con respecto a las no afectadas. Se identificaron como factores principales para este comportamiento las diferencias en el acabado inicial de la superficie y se notó que pudo existir un efecto de disminución en la resistencia producto de la microestructura.

5.2 Recomendaciones

Es necesario establecer si el comportamiento frente a la erosión por cavitación de las superficies tiene una respuesta diferente cuando esta es sometida a pruebas de erosión por cavitación con flujo, esto basándose en las posibles diferencias en los tamaños de las cavidades y los clúster que se forman, así como en las diferencias que se pueden presentar en las condiciones hidrodinámicas cercanas a la superficie texturizada

La generación de superficies texturizadas requeriría la evaluación del uso de técnicas litográficas que permitan obtener geometrías de tamaños más pequeños, mediante los cuales se pueda evaluar el comportamiento a erosión de las superficies con texturas más “finas”.

Bibliografía

- [1] A. Society, F.O.R. Testing, Sixty-fourth Annual Meeting Papers Symposium on EROSION AND CAVITATION, Race. 3 (2010).
- [2] P. Kumar, R.P. Saini, Study of cavitation in hydro turbines—A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 374–383.
- [3] S. Hattori, N. Mikami, Cavitation erosion resistance of stellite alloy weld overlays, *Wear.* 267 (2009) 1954–1960.
- [4] D. Dub, M. Fiset, R. Lalibertk, R. Simoneau, D. Dube, Cavitation resistance improvement of IRECA steel via laser processing, *Mater. Lett.* 28 (1996) 93–99.
- [5] D.H. Mesa Grajales, C.M. Garzón Ospina, A.P. Tschiptschin, Mesoscale plasticity anisotropy at the earliest stages of cavitation-erosion damage of a high nitrogen austenitic stainless steel, *Wear.* 267 (2009) 99–103.
- [6] ASM International, Friction, Lubrication and Wear Technology, in: *ASM Handb.*, 1992.
- [7] S.M. Ahnted, K. Hokkirigawa, Y. Itob, R. Obab, Scanning electron microscopy observation on the incubation period of vibratory cavitation erosion, 142 (1991).
- [8] K.. Chiu, F.T. Cheng, H.. Man, Evolution of surface roughness of some metallic materials in cavitation erosion, *Ultrasonics.* 43 (2005) 713–6.
- [9] L.A. Espitia, A. Toro, Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components, *Tribol. Int.* 43 (2010) 2037–2045.

- [10] L. Feng, Z. Hui-chen, G. Yu-zhou, P. Lian-yun, Effects of surface texture manufacturing by laser on cavitation characteristics of Ti6Al4V alloy, *Chinese J. Nonferrous Met.* 20 (2010) 03.
- [11] M. Pohl, J. Stella, Quantitative CLSM roughness study on early cavitation-erosion damage, *Wear.* 252 (2002) 501–511.
- [12] A.S. Rao, Influence of Surface Finish on Cavitation Erosion, in: P. Brookshier (Ed.), *Waterpower “99 Hydro”s Futur. Technol. Mark. Policy*, American Society of Civil Engineers, Las Vegas, Nevada, United States, 1999: pp. 78–78.
- [13] R.J.K. Wood, Use of profilometric measurements in cavitation erosion and corrosion studies, *Arch. Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 1989-1996 (vols 203-210). 204 (1990) 63–65.
- [14] Y. Li, Z. Xu, H. Chen, J. Wang, D. Chen, Effect of Transverse Surface Topography on Cavitation Erosion, *Adv. Tribol.* 3 (2010) 356–360.
- [15] L.A.J. Procopiak, L.N.C. De Souza, L.A.S.C. Oliveira, Z. Xiaojun, P. Ufpr, Efeito dos Processos de Modificação Superficial na Resistência à Erosão de Cavitação, *J. Mater.* (2000).
- [16] D.H. Mesa Grajales, C.M. Garzón Ospina, A.P. Tschiptschin, Influence of cold-work on the cavitation erosion resistance and on the damage mechanisms in high-nitrogen austenitic stainless steels, *Wear.* 271 (2011) 1372–1377.
- [17] A. Kumar, J.H. Boy, R. Zatorski, L. Stephenson, Thermal Spray and Weld Repair Alloys for the Repair of Cavitation Damage in Turbines and Pumps: A Technical Note, *J. Therm. Spray Technol.* 14 (2005) 177–182.
- [18] G. Stachowiak, A. Batchelor, *Engineering Tribology*, Third, Elsevier Inc, 2005.
- [19] ASTM International, ASTM G40 - 12: Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, in: *Annu. B. ASTM Stand.*, American Society for Testing and Materials, 2012: pp. 1–8.
- [20] K.H. Zum Gahr, *Microstructure and Wear of Materials*, Elsevier, 1987.

-
- [21] G. Stachowiak, A. Batchelor, *Engineering Tribology*, Third, Elsevier Inc, 2005.
- [22] Lock stock general trading, (n.d.).
- [23] F. Hammitt, Cavitation erosion: the state-of-the-art and predicting capability, *Appl. Mech. Rev.* 32 (1979) 665–675.
- [24] R. Knapp, J. Daily, F. Hammitt, Roughness effects, in: *Cavitation*, McGraw-Hill, New York, 1970: pp. 241–251.
- [25] I. Hutchings, *Tribology: friction and wear of engineering materials SE - Metallurgy and materials science*, Edward Arnold, 1992.
- [26] T. Okada, F. Hammitt, Cavitation erosion in vibratory and venturi facilities, *Wear.* 69 (1981) 55–69.
- [27] V. Exponent, C. Number, F.O.R. Venturi, C.E. Of, VELOCITY EXPONENT AND CAVITATION NUMBER FOR VENTURI CAVITATION EROSION OF 1100-O ALUMINUM AND 1018 CARBON Pd -p ., (1981).
- [28] ASTM International, ASTM G134 - 95(2010)e1: Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by a Cavitating Liquid Jet, in: *Annu. B. ASTM Stand.*, American Society for Testing and Materials, 2010: pp. 1–14.
- [29] S. Hattori, T. Ogiso, Y. Minami, I. Yamada, Formation and progression of cavitation erosion surface for long exposure, *Wear.* 265 (2008) 1619–1625.
- [30] P.V. Rao, Cavitation erosion characteristics of poly (methyl methacrylate) in a rotating disk device, *Wear.* 86 (1983) 119 – 131.
- [31] ASTM International, ASTM G32 - 10: Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, in: *Annu. B. ASTM Stand.*, American Society for Testing and Materials, 2010: pp. 1–19.

- [32] C. Preece, S. Vaidya, S. Dakshinamoorthy, Influence of crystal structure on the failure mode of metals by cavitation erosion, in: W.F. Adler (Ed.), ASTM STP 664 - Eros. Preevention Useful Appl., American Society for Testing and Materials, 1979: pp. 409–433.
- [33] H. Feller, Y. Kharrazi, Cavitation erosion of metals and alloys, *Wear*. 93 (1984) 249–260.
- [34] G. Bregliozzi, A. Di Schino, S.-U. Ahmed, J. Kenny, H. Haefke, Cavitation wear behaviour of austenitic stainless steels with different grain sizes, *Wear*. 258 (2007) 503–510.
- [35] W. Bu-Qian, H. Herman, B. Wang, W. Buqian, Cavitation erosion of TiN films produced by ion-beam-enhanced deposition at room temperature, *Wear*. 134 (1989) 311–319.
- [36] C. Haosheng, L. Jiang, C. Darong, W. Jiadao, Damages on steel surface at the incubation stage of the vibration cavitation erosion in water, *Wear*. 265 (2008) 692–698.
- [37] T.J.C. van Terwisga, Types of Cavitation: Artificial Roughness and Inception of Sheet Cavitation, in: Course Cavitation Sh. Propellers, Delft University of Technology, n.d.
- [38] R. Wood, The sand erosion performance of coatings, *Mater. Des.* 20 (1999) 179–191.
- [39] S.M. Ahmed, H. Kazuo, R. Oba, Y. Matsudaira, Developing stages of ultrasonically produced cavitation erosion and corresponding surface roughness, *JSME Int. J. - Ser. II - Fluids Eng. Heat Transf. Power, Combust. Thermophys. Prop.* 33 (1990) 11–16.
- [40] S.M. Ahmed, K. Hokkirigawa, R. Oba, K. Kikuchi, SEM observation of the vibratory cavitation-fracture mode during the incubation period and the small roughness effect, *JSME Int. J. - Ser. II - Fluids Eng. Heat Transf. Power, Combust. Thermophys. Prop.* 34 (1991) 298–303.
- [41] L. Boccanera, S. Rodrigues, A.J. Almeida Buschinelli, C.R. Rodrigues De Freitas, J. Valença dos Santos, Influência do acabamento superficial, porosidade e diluição sobre a resistência à cavitação de revestimentos soldados, *XXIV ENTS, Fortaleza*. 15 (1998) 1–14.
- [42] M. Mathias, The residual stress , texture induced by cavitation and surface changes in steel, 150 (1991) 11–20.

-
- [43] A. Bruzzone, H.L. Costa, P. Lonardo, D. Lucca, Advances in engineered surfaces for functional performance, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 57 (2008) 750–769.
- [44] C.J. Evans, J.B. Bryan, “Structured”, “Textured” or “Engineered” Surfaces, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 48 (1999) 541–556.
- [45] E. Gadelmawla, M. Koura, T. Maksoud, I. Elewa, H. Soliman, Roughness parameters, *J. Mater. Process. Technol.* 123 (2002) 133–145.
- [46] H.L. Costa, I. Hutchings, Development of a maskless electrochemical texturing method, 9 (2008) 3869–3878.
- [47] B. Michel, A. Bernard, A. Bietsch, E. Delamarche, M. Geissler, D. Juncker, et al., Printing Meets Lithography: Soft Approaches to High-Resolution Patterning, *Chim. Int. J. Chem.* 56 (2002) 527–542.
- [48] K. Mitzner, *Complete PCB Design Using OrCad Capture and Layout*, Elsevier Inc, 2007.
- [49] H.L. Costa, I. Hutchings, Effects of die surface patterning on lubrication in strip drawing, *J. Mater. Process. Technol.* 9 (2008) 1175–1180.
- [50] H.L. Costa, I. Hutchings, Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions, *Image (Rochester, N.Y.)*. 40 (2007) 1227–1238.
- [51] U. Pettersson, S. Jacobson, Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts, *Tribol. Int.* 36 (2003) 857–864.
- [52] M.G. Di Vernieri Cuppari, F. Wischnowski, D.K. Tanaka, A. Sinatora, Correlation between microstructure and cavitation–erosion resistance of high-chromium cast steel—preliminary results, *Wear*. 225-229 (1999) 517–522.
- [53] J.R. Laguna-Camacho, R. Lewis, M. Vite-Torres, J.V. Méndez-Méndez, A study of cavitation erosion on engineering materials, *Wear*. 301 (2013) 467–476.

- [54] S.M. Ahmed, K. Hokkirigawa, R. Oba, Fatigue failure of SUS 304 caused by vibratory cavitation erosion, *Wear*. 177 (1994) 129–137.
- [55] ASM International, Heat treating, in: *ASM Handb.*, 1991: pp. 769–793.
- [56] G.F. Vander Voort, *Metallography, principles and practice*, McGraw-Hill, 1999.
- [57] ASM International, *Stainless Steel Casting Alloys: Metallographic Techniques and Microstructures*, in: *ASM Handb. - Vol. 9 - Metallogr. Microstructures*, 1992.
- [58] ASTM International, ASTM E1558 - 09: Standard Guide for Electrolytic Polishing of Metallographic Specimens, in: *Annu. B. ASTM Stand.*, American Society for Testing and Materials, 2009: pp. 1–13.
- [59] ASTM International, ASTM E3 - 11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, in: *Annu. B. ASTM Stand.*, 2011: pp. 1–13.
- [60] G.F. Vander Voort, *Metallography, principles and practice*, McGraw-Hill, 1999.
- [61] SAE International, SAE HS-1086 - ASTM DS-56 G: *Metals & Alloys in the Unified Numbering System*, 8th Ed., 1999.
- [62] R. V. Lenth, Quick and Easy Analysis of Unreplicated Factorials, *Technometrics*. 31 (1989) 469–473.