

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“FENÓMENO DE CORROSIÓN CAVITACIÓN EN
METALES UTILIZADOS EN INFRAESTRUCTURA
HIDRAULICA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA

NAVOR ROSAS GONZALEZ

DIRECTOR

DR. BENJAMÍN VALDEZ SALAS

CO-DIRECTOR

DR. GUILLERMO HERNANDEZ-DUQUE DELGADILLO

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA.

JUNIO DE 2005.

RESUMEN

El objetivo de esta tesis fue estudiar los mecanismos de la cavitación para aumentar el conocimiento de este fenómeno, que nos permita controlarlo para evitar el deterioro de la infraestructura hidráulica. La cavitación es un fenómeno frecuentemente investigado y el deterioro que causa en la infraestructura industrial. De este modo, se ha identificado el proceso a nivel de implosión de la burbuja considerando factores hidráulicos y mecánicos, permitiendo validar los modelos teóricos de disipación de energía y de masa a través de la aplicación de técnicas opto electrónicas. En este trabajo se desarrolló un sistema de herramientas, basado en técnicas de microscopía óptica de campo claro para analizar en laboratorio la deformación plástica producida por cavitación e inducida por vibraciones mecánicas. La superficie de los metales se preparó con una rugosidad promedio de 0.07 micrones. Se midió conjuntamente el efecto mecánico de la cavitación y el proceso electroquímico de corrosión en agua del Río Colorado. Se encontró un aumento de aproximadamente dos órdenes de magnitud de la velocidad de corrosión como consecuencia de la ruptura de la capa de pasivación por la cavitación. Y para hacer las mediciones propuestas, se diseñó un modelo experimental basado en la simulación estandarizada de la cavitación a temperatura ambiente midiendo simultáneamente la corrosión por métodos electroquímicos. La deformación que apareció sobre el metal, indica un corrimiento plástico muy acelerado en los bordes de los huecos de la cavitación. Se concluyó que el uso de técnicas de microscopía óptica ayuda a comprender mejor la deformación plástica y el comportamiento de la capa de pasivación, con lo que se pueden encontrar formas específicas de minimizar el fenómeno de cavitación-corrosión. Además se incluyen los productos académicos que se obtuvieron a lo largo de cinco años de investigación y una lista de bibliografía internacional actualizada sobre el tema.

PALABRAS CLAVE: Corrosión, Erosión-Cavitación, Pasividad, Elasto-plasticidad.

ÍNDICE

	Página
AGRADECIMIENTOS	I
LISTA DE FIGURAS	II
LISTA DE TABLAS	VI
 Capítulo 1	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Hipótesis	2
1.3. Objetivo general	3
1.4. Alcance	3
1.5. Limitaciones	3
1.6. Justificación	4
 Capítulo 2	
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
2.1. Origen del fenómeno de cavitación	5
2.2. El Fenómeno cavitación.	6
2.3. Bombas rotodinámicas	10
2.3.1. El fenómeno de cavitación en bombas centrífugas	11
2.3.2. Definiciones y terminología en bombas centrífugas	13
2.3.3. Variables más importantes de operación de bombas	14
2.4. Metales y aleaciones	24
2.4.1. Acero al carbono de baja aleación.	24
2.4.2. Aceros inoxidable AISI-316	25
2.4.3. Aceros inoxidable AISI-416	25
2.4.4. Aleaciones de cobre.	26
2.4.5. Aleación de titanio.	26
PROCESOS DE CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA Y SUS VARIABLES	27

Capítulo 3

3. MÉTODOS EXPERIMENTALES RESULTADOS Y DISCUSIONES	....	55
3.1. Análisis químico del medio ambiente corrosivo	.....	55
3.2. Ensayos de vibración inducida y electroquímicos de corrosión	.....	55
3.2.1. Procedimientos experimentales	.....	57
3.2.2. Corrosión cavitación inducida	.....	59
3.3. Resultado de análisis de superficies, microscopía electrónica de electrones ...		61
3.4. Resultados de microscopía óptica	.....	67
3.5. Resultados electroquímicos	.....	70
3.6. Discusión de resultados	.....	72
3.6.1. Observaciones in situ del fenómeno de cavitación utilizando la herramienta diseñada.	.....	76
3.7. Propuesta de investigaciones a futuro	.....	78

Capítulo 4

4. CONCLUSIONES	81
-----------------	-------	----

BIBLIOGRAFÍA	83
---------------------	-------	----

ANEXOS

Anexo A: “Curvas de ensayos electroquímicos”	.....	92
Anexo B: Productos académicos	.....	99

AGRADECIMIENTOS

Con respeto y reconocimiento a la

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

A la Facultad de Ingeniería, a sus Directivos, por el apoyo a este trabajo y por la oportunidad que me han brindado para seguir siendo maestro.

Al Instituto de Ingeniería, a sus directivos, sus investigadores y su personal, quienes confiaron en todo momento y mostraron especial interés por la realización de este trabajo, y que sin su apoyo no hubiera sido posible la realización del mismo.

Al Maestro José Antonio Sampedro García, de quien sigo aprendiendo.

Al Dr. Benjamín Valdez Salas, Coordinador de la Red Nacional de Corrosión, por su continua orientación y apoyo, sus invaluable aportaciones y enseñanzas, su entusiasmo y entrega para la realización de este trabajo. Gracias por su amistad.

Al grupo de corrosión y materiales, Benjamín, Mónica, Miguel, Juan, ..., gracias por su ayuda.

A mi familia: Carmen, Navor Alejandro y Katya, quienes con su paciencia y apoyo ayudaron a la finalización de este trabajo. Gracias por su cariño.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1. Esquema de un líquido, que en las condiciones de A de presión constante y con el aumento de la temperatura, se presenta la <u>ebullición</u> del agua rompiendo las burbujas formadas por agrupación de ellas entre sí, en tanto que en B, a temperatura constante e inicialmente bajo un descenso de presión, la formación de burbujas grandes aparece por la agrupación entre sí de las más pequeñas, cuando ocurre un aumento de presión ΔP , las burbujas grandes implotan, apareciendo el fenómeno de <u>cavitación</u> .	6
Figura 2.1.1 Esquema del gradiente de fricción del líquido en la pared que lo contiene. Este gradiente puede originar micro vacíos desde P1 hasta P4, la burbuja formada implota finalmente con las condiciones de $P1 > P2 > P3 > P4$, originando la cavitación, trayendo consigo, un conjunto de afectaciones de eficiencia, carga hidráulica, capacidad, vibraciones, roturas y desgastes anormales.	7
Figura. 2.1.2 Esquema de un líquido, que bajo las condiciones del punto A, corresponderían típicamente al agua, a T y P de 20 °C y 1.0 Atm, respectivamente. Se entiende que un flujo de fluidos está lleno de pequeños cambios de presión (ΔP).	7
Figura 2.2 En un líquido a nivel de capa límite, se forma una onda de choque por vibraciones y que produce cavitación. En “1” corresponde a la periferia del cuenco cavitado y en “4” hacia el centro del sitio cavitado, esto corresponde a lo observado en la práctica. Nótese como existe un aumento de la compresibilidad de la onda de choque, intensificando la acción sobre la superficie afectada	8
Figura 2.3. Diagrama que muestra en general, el estado del conocimiento respecto al fenómeno de cavitación desde la inepción-nucleación hasta el aspecto aparente de la corrosión que muestran los materiales.	
Figura 2.4. Las bombas pueden variar, pero los problemas que se pueden presentar son siempre los mismos.	14
Figura 2.5. Definición de los términos más importantes de una bomba rotodinámica con carga de succión positiva.	17
Figura 2.6. Corrosión uniforme controlada por pH.	28
Figura 2.7. Corrosión uniforme controlada por pH y oxígeno disuelto.	29

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.8. Corrosión uniforme con productos sólidos depositados.	30
Figura 2.9. Proceso básico de corrosión.	31
Figura 2.10. Circuito elemental de corrosión electroquímica	34
Figura 2.11. . Relación existente entre áreas anódica, catódica, densidades de corriente y potenciales.	36
Figura 2.12. Rangos de potencial de media celda en algunas reacciones electroquímicas de importancia en corrosión.	39
Figura 2.13. Efecto del incremento en el poder oxidante del medio sobre la corrosión de una aleación activa – pasiva.	40
Figura 2.14. Celda de corrosión	41
Figura 2.15. Corrosión de zinc metálico en una solución acuosa de ácido clorhídrico	45
Figura 2.16. Polarización por concentración durante la reacción de reducción de hidrógeno	46
Figura 2.17. Arreglo potenciométrico para la medición del potencial de corrosión.	48
Figura 2.18. Diagrama de Pourbaix para el sistema fierro agua.	50
Figura 3.1. Se muestra la formación de burbujas, liberando los gases disueltos en el agua, y junto al metal se pudieron observar burbujas que se forman e implotan.	56
Figura 3.2. Se muestran los equipos que se emplearon para los experimentos, se observan las conexiones a los tres electrodos empleados en la celda electroquímica de cavitación.	57
Figura 3.3. Arreglo experimental de la figura anterior, donde se muestra la colocación de los equipos que se emplearon para las pruebas, se observan las conexiones a los tres electrodos empleados en la celda electroquímica de cavitación en el baño ultrasónico.	57
Figura 3.4. Morfología de la muestra de bronce de impelente cavitado, se observan las zonas más claras en donde el material ha sido desprendido dejando al metal desnudo y acelerando la corrosión general. La muestra se observó sin preparación superficial.	61

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.5. La muestra anterior se observa a unas 8 veces más amplia, en el fondo de la huella de corrosión, se observan los apilamientos cristalinos del metal con geometría regular en los que continúa la corrosión general.	61
Figura 3.6. Se observa otro detalle, en el fondo de las huellas de corrosión - cavitación, nótese los apilamientos cristalinos de metal corroído y la deformación mecánica originada por la cavitación.	62
Figura 3.7. Morfología a mayor detalle de la figura anterior, se observan los productos de corrosión y los escalonamientos de las capas de productos formados.	62
Figura 3.8 Morfología de cavitación en el acero al carbono de baja aleación, cada hueco equivale en diámetro a unas 20 000 celdas cristalinas del metal.	63
Figura 3.9. Morfología de cavitación en el acero al carbono de baja aleación de la figura anterior. Se pueden observar detalles a nivel de unas 1 000 celdas cristalinas del metal. Las partículas de color claro son óxidos del metal que no son conductores de la electricidad.	63
Figura 3.10. Morfología de cavitación en el acero inoxidable austenítico, el hueco que se señala equivale en diámetro a unas 40000 celdas cristalinas del metal y está parcialmente cubierto con óxidos no conductores, nótese la deformación plástica en los bordes, ocasionada por la cavitación. En el extremo izquierdo se observa la destrucción del límite de grano austenítico	64
Figura 3.11. Detalle de la figura anterior en que se observa la destrucción masiva de los límites de grano, donde existe siempre un descenso de energía libre que favorece la corrosión. El fenómeno se acelera por la cavitación que remueve los productos formados dejando el metal desnudo.	64
Figura 3.12. Morfología de cavitación en el acero martensítico inoxidable 416. Se observan los límites granulares del metal en una estructura aparentemente frágil.	65
Figura 3.13. Morfología de cavitación en el acero martensítico inoxidable 416. Nótese que ahora los límites granulares se definen con mayor claridad en el metal. La deformación plástica ocurrió fundamentalmente por clivaje en una estructura aparentemente frágil, debido a la naturaleza de la martensita. La corrosión general se ve favorecida fuertemente por este fenómeno.	65
Figura 3.14. Estado final de la prueba en titanio cavitado, se notan pequeñas deformaciones plásticas en la periferia de los huecos producidos por la cavitación.	66

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.15. De la figura anterior, se muestra a detalle en la parte inferior, el desprendimiento mecánico del metal y en la parte superior se muestra el acumulamiento del mismo por deformación plástica, ambos fenómenos son originados por la cavitación, favoreciendo la corrosión general.	66
Figura 3.16. Morfología de corrosión cavitación en el bronce, se señalan los sitios donde es más evidente el daño superficial, en el borde de la muestra se alcanzan a distinguir algunos huecos característicos de la cavitación, favoreciendo la corrosión general.	67
Figura 3.17. Morfología de corrosión cavitación en el acero al carbono, nótese los sitios donde es más evidente el daño superficial, se observan huecos característicos de la cavitación. Los acumulamientos semiesféricos oscuros, son productos de la corrosión inducida al metal.	68
Figura 3.18. Morfología de corrosión cavitación en el acero inoxidable austenítico AISI 316, se muestran las cavidades originadas por la vibración inducida. La superficie interior de las mismas es brillante, debido a la fatiga del material que removió la oscilación en la celda de prueba a 20 kHz.	68
Figura 3.20. En el acero martensítico AISI 416 también se presentó la cavitación, señalada en color blanco y con flecha negra se muestran los productos de la corrosión que eventualmente serán removidos por la vibración inducida al metal.	69
Figura 3.21. El titanio muestra evidencias del avance de la cavitación, encontrando pequeños huecos señalados con flechas pequeñas. Nótese que existen otros huecos con textura interior brillante y el avance del daño muestra al centro de la figura una cavidad más grande con superficie interior brillante por el daño mecánico originado por la vibración inducida.	69
Figura 3.22. Curva de polarización potenciodinámica del acero al carbono durante el proceso de corrosión y cavitación inducida por vibración.	70
Figura 3.23. Curva de polarización potenciodinámica del acero inoxidable AISI 416 durante el proceso de corrosión y cavitación inducida por vibración.	70
Figura 3.24. Velocidad de corrosión promedio producida por la cavitación inducida por vibración.	72

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.25 Modelo experimental para observar la corrosión cavitación en tiempo real. En la figura inferior, a la izquierda se ve el cilindro que contiene los lentes enfocados hacia el electrodo de trabajo al centro, conectado a la punta verde del potencióstato y a la derecha, la fuente de luz, iluminando la superficie del metal de prueba.	76
Figura 3.27 Con la herramienta diseñada en el laboratorio, se identificó la formación de burbujas por cavitación en la superficie del electrodo de trabajo durante la prueba de medición de la corrosión electroquímica y cavitación inducida por vibraciones de alta frecuencia. En distintas etapas durante el experimento se observa la evolución de la cavitación en tiempo real, que consiste en, a la izquierda la nucleación y crecimiento, y en las fotografías a la derecha se ve el colapso de las burbujas parecido a una explosión. La línea vertical al centro de cada figura, es la separación del montaje plástico y a la izquierda el electrodo de trabajo. 100X	77

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1. Resistencia de materiales de construcción de partes de bombas rotodinámicas (4, 5, 7).	10
Tabla 2.2. Tipos de bombas rotodinámicas (ANSI/HI-1.1-1.5-1994).	23
Tabla 2.3. Propiedades mecánicas de las aleaciones de prueba.	24
Tabla 2.4. Procesos, terminología y variables asociadas con la corrosión acuosa.	33
Tabla 2.5. Potenciales estándar de oxidación reducción (Redox) a 25 C.	49
Tabla .3.1. Calidad del agua utilizada para los ensayos de cavitación.	55
Tabla 3.2. Resumen de resultados electroquímicos en las muestras ensayadas induciendo cavitación corrosión, Anexo A.	71

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

El uso eficiente del agua, requiere de la ingeniería moderna para desarrollar la infraestructura hidráulica en el desarrollo de las comunidades. Esos sistemas se usan para conducir el líquido y están constituidos por estructuras esenciales como acueductos, estaciones de bombeo, plantas de tratamiento, sistemas de tuberías de enfriamiento en centrales nucleares y grandes redes de distribución hidráulica. En general, la protección exterior de esas estructuras se ha logrado con éxito mediante la aplicación de sistemas de recubrimientos y protección catódica, siguiendo métodos estandarizados. La preservación interna de esa infraestructura requiere del conocimiento más detallado de las variables físicas, químicas y biológicas del medio acuoso y que pueden originar el aumento de la velocidad de corrosión electroquímica. Por otro lado, las variables mecánicas se presentan por la aplicación de la cantidad de energía que sirve para impulsar el líquido y moverlo con eficiencia a través de esa infraestructura. En esta etapa se requiere aumentar la energía cinética de la corriente del agua y pueden aparecer algunos fenómenos mecano químicos debidos la vibración de los equipos y estructuras que están en contacto con el agua en movimiento. De esta forma, se presentarán esfuerzos cíclicos sobre el material, alcanzando, en ocasiones, las frecuencias típicas de 15 a 25 kHz. Bajo estas circunstancias, se desarrolla el fenómeno de cavitación en zonas superficiales y microscópicas de los materiales. El sinergismo de la corrosión electroquímica y de la cavitación producirá un aumento considerable de la velocidad de corrosión, disminuyendo la vida media útil de las partes metálicas afectadas con ambos fenómenos. La corrosión electroquímica ha sido comprendida en gran medida y existe mucho conocimiento y metodologías para evaluarla, por ejemplo, a partir de las Leyes de Faraday, se pudo establecer cuantitativamente la conversión de masa en energía y viceversa en una celda electroquímica, sin duda, esto constituyó una base para desarrollar los métodos y herramientas modernas de mediciones electroquímicas. Sin embargo, la *cavitación*, aun sigue siendo un fenómeno muy poco conocido y por lo mismo, es difícil poder controlarla ya que por ser un fenómeno mecánico asociado a la erosión, no es un

proceso espontáneo por lo que en teoría si es posible eliminarlo, en tanto que la corrosión electroquímica solamente se puede inhibir. A la fecha, se han llevado a cabo numerosas investigaciones en el mundo acerca de la cavitación, y aun habiendo definido con mucha precisión este fenómeno, en la opinión de los especialistas más reconocidos en el campo de la hidráulica queda mucho por hacer (1). Aquí se hará un enfoque a partir del deterioro natural que las propiedades del agua pueden ocasionar en las partes metálicas del interior de una bomba rotodinámica, este fenómeno fisicoquímico es conocido como *corrosión*, y como se mencionó anteriormente, este proceso se sinergiza con la agitación del líquido que produce la cavitación, aumentando considerablemente los problemas de deterioro en aquellas partes de las estructuras donde se incrementan la energía cinética del agua como en las estaciones de bombeo.

1.1 Planteamiento del problema

En la práctica, el fenómeno de la cavitación continúa siendo priorizado en el análisis de la operación de las bombas rotodinámicas, la tendencia actual es aceptar este problema en estaciones de bombeo y operar con él cuando no resulta económico el evitarlo. Las vibraciones de alta frecuencia en las estructuras donde se incrementa la velocidad del agua aun no se han considerado como factores que incrementan la cavitación. Por esta razón, es muy importante conocer con mayor detalle, la naturaleza de la cavitación, las razones por la que ocurre este fenómeno y diseñar las herramientas y métodos que ayuden a definir alternativas hidráulicas y de materiales para combinarlos y controlar la corrosión cavitación.

1.2 Hipótesis

El proceso de cavitación acelera el desgaste por corrosión en materiales utilizados en estructuras que están sometidas a vibraciones de alta frecuencia. El fenómeno se puede simular en el laboratorio utilizando un sistema inductor con la generación de ultrasonido y medir utilizando técnicas electroquímicas estandarizadas.

1.3 Objetivo general

Diseñar un sistema experimental que permita inducir la corrosión electroquímica por cavitación producida por ultrasonido.

1.4 Alcance

Se reproducirá el fenómeno de cavitación inducida por la vibración de alta frecuencia en los equipos de bombeo. El fluido de trabajo será agua corriente a temperatura y presión ambientales. Se diseñará una celda electroquímica para medir el efecto de la cavitación en la corrosión, mediante el uso de mediciones electroquímicas y así mismo, se diseñará una herramienta que permita visualizar en tiempo real la formación de burbujas de cavitación. Y se podrá medir el efecto total de la velocidad de corrosión cavitación.

1.5 Limitaciones

Además de alcances el presente trabajo puede tener limitaciones durante su desarrollo. Estas consisten principalmente en el control de la frecuencia de la vibración emitida por el generador piezoeléctrico, lo cual me llevará a trabajar en un rango inicial correspondiente a equipos de ultrasonido comerciales menores. Sin embargo, los resultados preliminares auguran un buen desempeño del sistema de simulación a desarrollar debido a que la mayoría de los metales comerciales son susceptibles a la cavitación inducida por vibración generada en los equipos antes mencionados.

Otra limitante será el ruido generado durante las mediciones electroquímicas el cual puede generar dispersión en los resultados.

1.6 Justificación.

El fenómeno de cavitación corrosión es poco conocido. Se ha reportado que la velocidad de corrosión se incrementa con la inducción de vibraciones de alta frecuencia. A la fecha, las investigaciones más reconocidas, se han enfocado a diseñar y validar modelos teóricos, mientras que los modelos físicos que reproducen la corrosión afectada por vibraciones de alta frecuencia son aun escasos. La propuesta de este trabajo es el desarrollo de una metodología para medir la corrosión electroquímica asistida por vibraciones y que se basa en la aplicación de métodos estandarizados para medir la velocidad de corrosión de un sistema y la observación óptica en tiempo real del fenómeno en la superficie del metal.

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Origen del fenómeno de cavitación.

La palabra *cavitación* se deriva de la palabra latina *cavus* – hoyo – y significa la formación de burbujas de vapor en un fluido. Este proceso puede ser causado por un incremento de la temperatura a presión constante o por la caída de presión a temperatura constante. Ambos procesos dependen del tiempo para producir el cambio de fase líquida a vapor. El primer caso es la simple vaporización por ebullición del agua y el segundo, es causado por la caída de presión, cuyo resultado se le llama cavitación (2, 3, 8). Figuras 2.1 y 2.2.

Un fluido en movimiento tiene menos presión, P , que uno estacionario. De esta manera, esas pequeñas variaciones de presión, ΔP , en los lados opuestos de un impelente de una bomba son las que se combinan con el movimiento del impelente y modifican el empuje al líquido y bajo condiciones favorables la cavitación se puede presentar. Fig. 2.3.

La cavitación ha aparecido en diversos campos del manejo de fluidos como son: en los impelentes de bombas rotodinámicas, rotores de turbinas, transportadores de tornillo, y en todos aquellos equipos que impulsen o conduzcan fluidos para elevar su energía cinética, lo que trae consigo la formación de caudas junto a las paredes donde se da el empuje del líquido, en las cuales se presenta la formación de vacíos aun en pequeñas zonas junto a las paredes sólidas de los equipos. Se ha llegado a definir que la cavitación ocurre en pequeñas áreas, donde la presión localizada se deprime, esto en sí mismo no representa un riesgo importante. Entonces los problemas de la cavitación en el metal comenzarán cuando el fluido de baja presión se traslada a una zona de presión más alta, en donde las burbujas colapsarán y el efecto mecánico de la implosión arrastrará al material adyacente a la burbuja. Entonces, el efecto de máximo desgaste se presentará en el centro de cada burbuja, originando las cavidades en la pared de los equipos o estructuras y apareciendo la morfología superficial característica de la corrosión cavitación. Este problema se da en

virtud de la gran cantidad de energía que se libera en forma violenta en cada burbuja que colapsa.

2.2 El fenómeno de cavitación

Es un conjunto complejo de mecanismos dinámicos que se presenta en los líquidos, cuyo proceso fundamental es (1):



Las dos formas de aparición de burbujas en una masa líquida se presentan en la figura 2.1 (8):

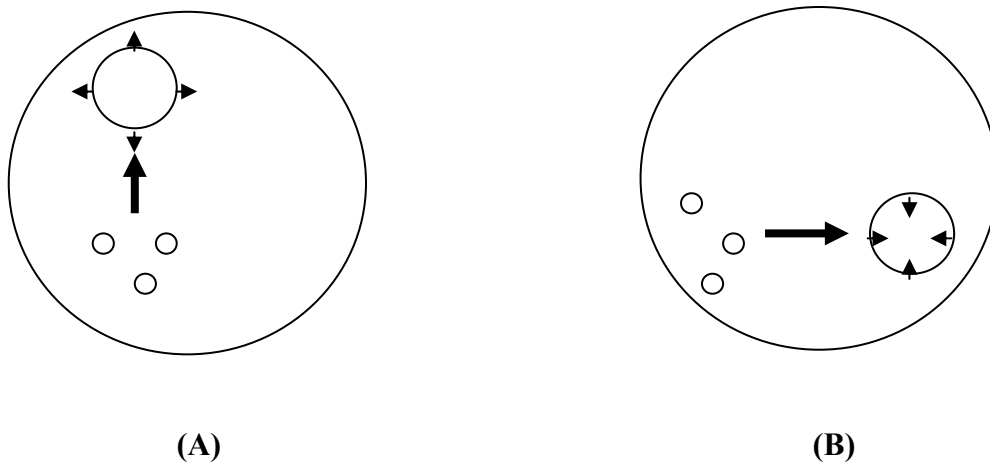


Fig. 2.1. Esquema de un líquido, que en las condiciones de A de presión constante y con el aumento de la temperatura, se presenta la ebullición del agua rompiendo las burbujas formadas por agrupación de ellas entre sí, en tanto que en B, a temperatura constante e inicialmente bajo un descenso de presión, la formación de burbujas grandes aparece por la agrupación entre sí de las más pequeñas, cuando ocurre un aumento de presión ΔP , las burbujas grandes implotan, apareciendo el fenómeno de cavitación.

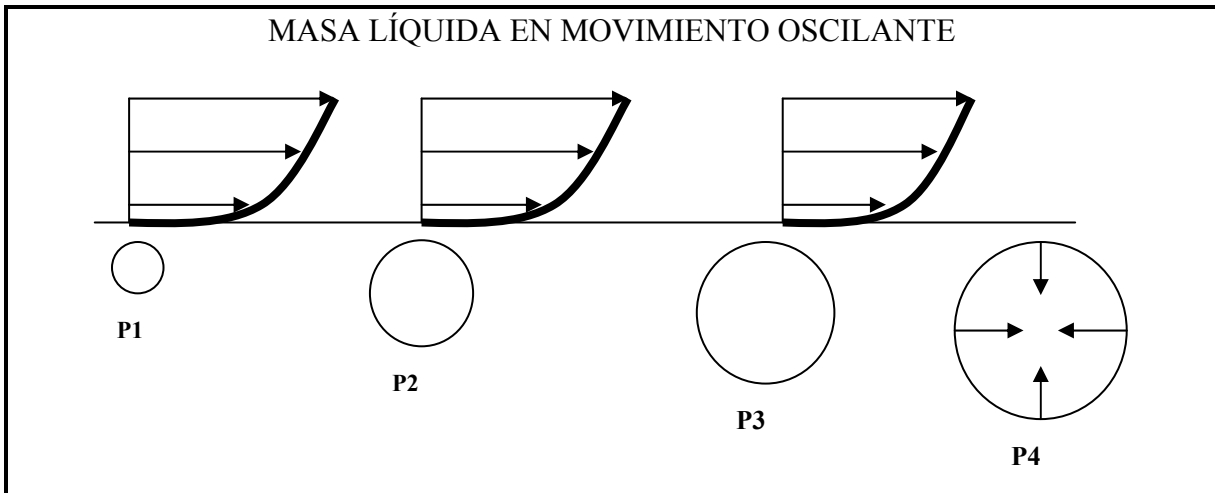


Fig. 2.1.1. Esquema del gradiente de fricción del líquido en la pared que lo contiene. Este gradiente puede originar micro vacíos desde P1 hasta P4, la burbuja formada implota finalmente con las condiciones de $P1 > P2 > P3 > P4$, originando la cavitación, trayendo consigo, un conjunto de afectaciones de eficiencia, carga hidráulica, capacidad, vibraciones, roturas y desgastes anormales.

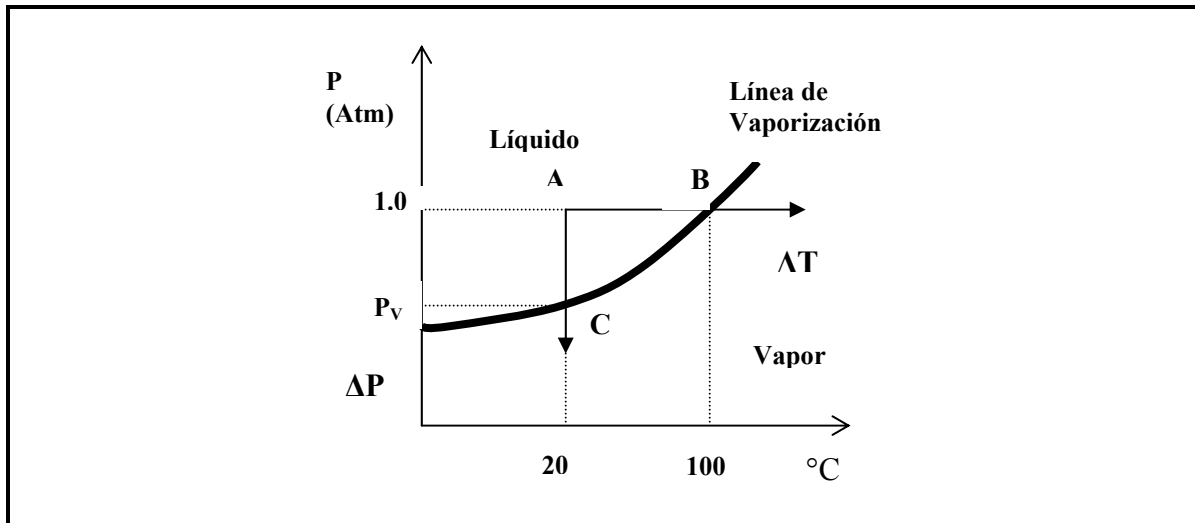


Fig. 2.1.2. Esquema de un líquido, que bajo las condiciones del punto A, corresponderían típicamente al agua, a T y P de 20 °C y 1.0 atmósferas, respectivamente. Se entiende que un flujo de fluidos está lleno de pequeños cambios de presión (ΔP).

La vibración induce una onda de choque, debido a la implosión de la burbuja, con una velocidad según la siguiente ecuación:

$$c^2 = \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_S. \quad (2.1)$$

Donde c es la velocidad de la onda de ultrasonido actuando en la superficie de la muestra ensayada, p es la presión ejercida, ρ es la densidad del medio y S la entropía, la cual permanece constante durante el choque. Cualitativamente se puede decir que la velocidad de la onda se incrementa conforme decrece la compresibilidad del medio, y esto se orienta desde la periferia de la cavitación hacia el centro de la misma.

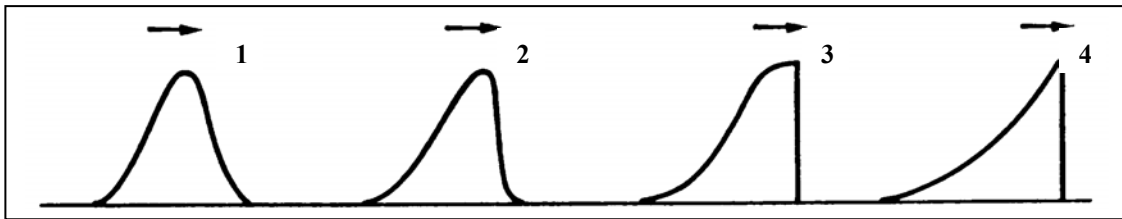


Fig. 2.2. En un líquido a nivel de capa límite, se forma una onda de choque por vibraciones y que produce cavitación. En “1” corresponde a la periferia del cuenco cavitado y en “4” hacia el centro del sitio cavitado, esto corresponde a lo observado en la práctica. Nótese como existe un aumento de la compresibilidad de la onda de choque, intensificando la acción sobre la superficie afectada.

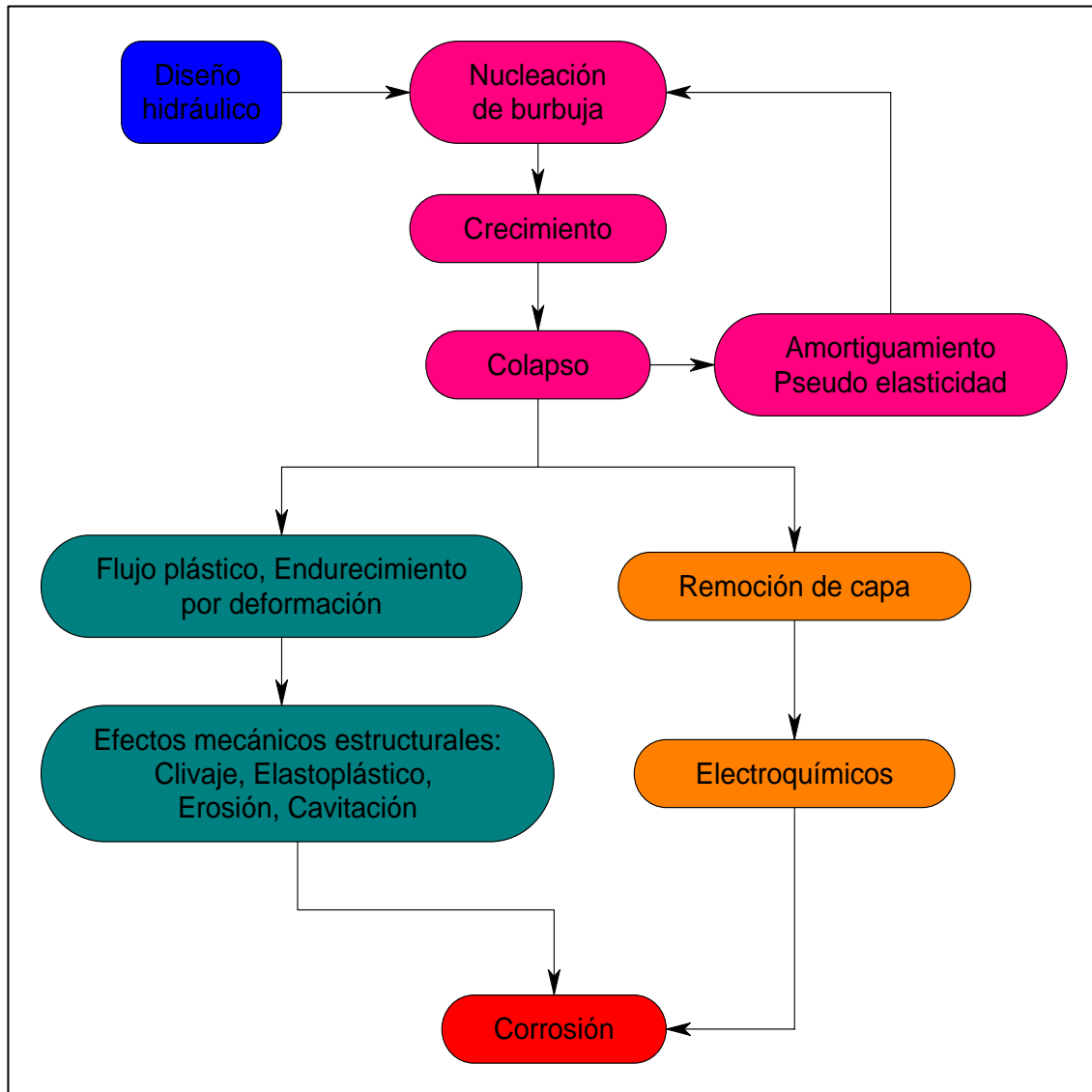


Figura 2.3. Diagrama que muestra en general, el estado del conocimiento respecto al fenómeno de cavitación desde la inceptión-nucleación hasta el aspecto aparente de la corrosión que muestran los materiales.

2.3. Bombas rotodinámicas.

Algunos efectos electroquímicos, abrasivos y factores inherentes al líquido que se bombea, pueden acelerar el deterioro de las superficies expuestas. Se han logrado clasificar los resultados obtenidos durante pruebas efectuadas con ultrasonido, Tabla 2.1.

La protección contra la cavitación debe comenzar con un diseño hidráulico adecuado del sistema, de modo que se eviten en lo posible las presiones bajas. Cuando sea inevitable la presencia de la cavitación, el efecto sobre las superficies se puede reducir mediante el recubrimiento de materiales especiales de alta resistencia como los que se muestran en la Tabla 2.1. El empleo de pequeñas cantidades de aire introducidas en el agua reduce notablemente el daño causado por la cavitación; y también se ha comprobado que la protección catódica puede ser de utilidad contra los efectos de la cavitación (4, 5, 6, 8).

TABLA 2.1. Resistencia de materiales de construcción de partes de bombas rotodinámicas (4, 5, 7).

MATERIAL	Pérdida de peso mg/2-horas
WC	0.6
83Cu 10.3Al 5.8Fe	3.2
83.1Cu 12.4Al 4.1Fe	5.8
17Cr 7Ni Bal Fe	6.0
26Cr 13Ni Bal Fe	8.0
12Cr Bal Fe, Templado	9.0
18Cr 8Ni Bal Fe	13.0
12Cr Bal Fe, Vaciado	20.0
85Cu 15Mn, Vaciado	80.0
Fe-C 1010	97.0
Fe-C 1010 Niquelado	98.0
Fe-C 1095	105.0
Al	124.0
Latón	156.0
Fundición gris	224.0

La formación de burbujas de vapor disminuye el espacio disponible para la conducción del líquido, dando como resultado la disminución de la eficiencia en la máquina. El fenómeno de la cavitación ocasiona tres efectos nocivos en la operación, por ejemplo en una bomba; es decir, disminuye la eficiencia, daña los conductos para el flujo produciendo ruido y vibraciones características molestas. El ruido producido durante la cavitación es similar al correr de canicas a través de un conducto, de aquí que algunos ingenieros realicen ensayos de campo para detectar la cavitación en sistemas de bombeo, que consisten en simples pruebas auditivas. Los álabes curvos son particularmente susceptibles a la cavitación en su cara convexa, donde pueden tener áreas sujetas a un picado fuerte e incluso a falla total. La presión mínima en una bomba se presenta a lo largo del lado convexo de los álabes, cerca del lado de la succión del impulsor (1, 2, 3, 6, 8).

2.3.1 El fenómeno de cavitación en bombas centrífugas.

Este fenómeno es muy complejo y se ha definido en diferentes formas, coincidiendo los especialistas en que la cavitación es la formación parcial de burbujas en un líquido en movimiento, como resultado de la separación de sus partes. En el caso de las bombas rotodinámicas, existen dos tipos principales de cavitación, la que se presenta en el lado de la succión en un sistema de bombeo, que es aproximadamente el 90% de los casos conocidos y la que se presenta después del orificio de descarga que representaría el 10% restante de todos los eventos de cavitación registrados en este tipo de equipos (1,2,3,7),.

Cuando un líquido fluye por una región donde la presión es menor que su presión de vapor, el líquido ebulle y forma burbujas de vapor. Estas burbujas son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de mayor presión, donde el vapor se regresa al estado líquido de manera súbita, debido a la implosión brusca de las burbujas (Figuras 2.2.1-2.2.3). Este fenómeno se llama cavitación. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida al momento del cambio de estado, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, del orden de 414 MPa ó mayores, ocasionando pequeñas picaduras sobre la superficie sólida

Capítulo 2.- Fundamentos teóricos

con superficies totalmente limpias de óxidos u otros productos adheridos, con lo que se favorece a otras formas de la corrosión (4,5). El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones, dando la impresión de que se trata de grava que golpea en las diferentes partes de la máquina (6). La presión mínima en una bomba o turbina se presenta a lo largo del lado convexo de los álabes, cerca del lado de la succión del impulsor (1).

Un criterio muy aceptado para medir la susceptibilidad a la cavitación de un sistema de bombeo, es determinar el *parámetro de cavitación* σ , que se define por:

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

Donde p es la presión absoluta en el punto de interés, p_v la presión de vapor del líquido, ρ la densidad del líquido y V una velocidad de referencia. Obsérvese que el parámetro de cavitación es una especie de coeficiente de presión. En dos sistemas geométricos semejantes, ambos tienen el mismo grado de cavitación o son igualmente susceptibles de cavitación si tienen el mismo valor de σ . Cuando $\sigma = 0$, la presión se reduce hasta la presión de vapor y en ese momento ocurre la ebullición (6,7).

En pruebas hechas en líquidos químicamente puros indican que tales sustancias pueden resistir esfuerzos de tensión muy altos, de varios cientos de megapascales, lo cual contradice el hecho de formación de cavidades cuando la presión se reduce a la presión de vapor. Como generalmente existe ebullición espontánea cuando se alcanza la presión de vapor con líquidos comerciales o técnicos, se acepta que la formación de las burbujas se lleva a cabo por el proceso de nucleación, cuyo mecanismo aun no se conoce completamente hasta la fecha. Cabe suponer que en este tipo de líquidos siempre se encuentran presentes partículas microscópicas de polvo o de otros contaminantes ampliamente dispersos en el fluido llamados “nucleidos” (1). Las burbujas de cavitación se forman alrededor de los núcleos para ser transportadas a la región de más alta presión e

implotar en unas cuantas milésimas de segundo dentro de una turbomáquina. En agua que contiene aire disuelto, se han tomado fotografías de las burbujas y se ha observado que presentan oscilaciones en su movimiento; sin embargo, parece que el fenómeno no se presenta en líquidos sin airear. Respecto a los pulsos de alta presión que acompañan el colapso de una burbuja, parece que la tensión superficial de la burbuja desempeña un papel importante. En experimentos recientes indican presiones del orden de 690 a 1 370 MPa durante la cavitación, basadas en el análisis de las ondas de deformación de especímenes fotoelásticos expuestos al fenómeno. Las presiones de este orden de magnitud parecen razonables en virtud de los daños mecánicos observados en los materiales por efecto de la cavitación. Las aleaciones industriales que actualmente se utilizan en la construcción de las partes de bombas rotodinámicas, tienen resistencia mecánica de entre 345 a 690 MPa, lo que las hace susceptibles a todas ellas al daño por cavitación aun en superficies que no hayan sufrido corrosión (3,4,6,7).

La formación e implosión de un gran número de burbujas en una superficie dan lugar a esfuerzos locales muy intensos, mismos que parecen dañar la superficie por fatiga (1,5). Algunos materiales dúctiles (Tabla 2.1) pueden resistir el bombardeo por un periodo llamado *periodo de incubación*, mientras que los materiales frágiles pueden perder parte de su espesor inmediatamente (figura 2.1-2.3), con la consecuente pérdida de capacidad.

2.3.2. Definiciones y terminología en bombas centrífugas rotodinámicas.

Algunos de los problemas identificados en la operación de las bombas se muestran en la figura 2.4. Estos problemas pueden ser minimizados haciendo un buen cálculo de ingeniería, basado en el conocimiento de las variables que contribuyen al buen funcionamiento de los equipos. Por ello, se considera importante hacer una breve revisión de la terminología más común y que sirve para apreciar con más exactitud el funcionamiento hidráulico de una bomba y su influencia en la aparición de la cavitación.

La definición más aceptada de una bomba centrífuga se ha dado para equipos que esencialmente bombean agua. En algunos casos, se presentan algunas diferencias de

nomenclatura en la clasificación de las mismas con respecto a las definiciones comunes (9).
Dicha definición es:

Una bomba centrífuga es una máquina cinética, que es capaz de convertir la energía mecánica en energía hidráulica mediante el movimiento centrífugo.

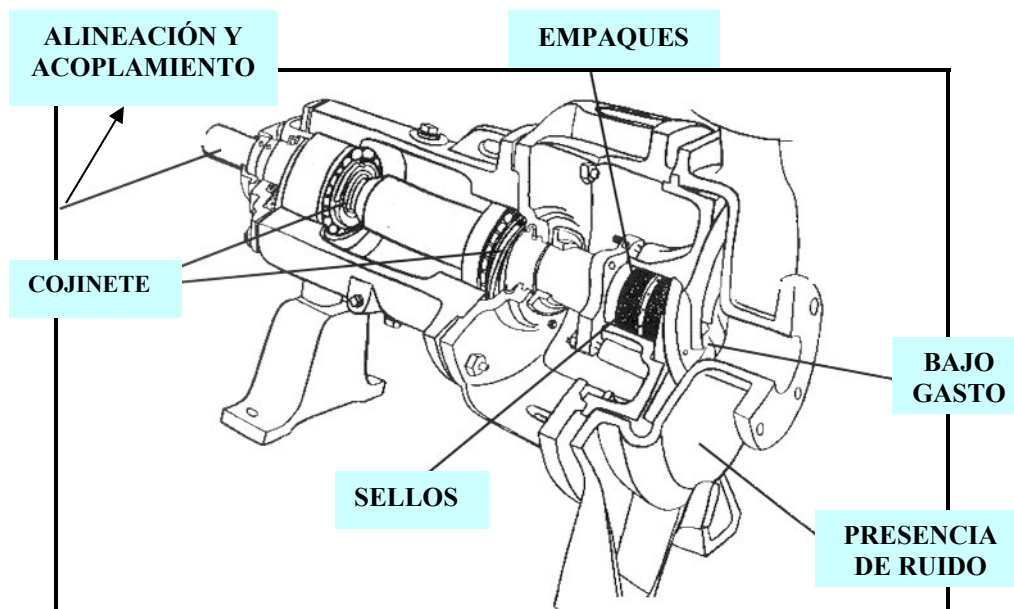


Fig. 2.4 Las bombas pueden variar, pero los problemas que se pueden presentar son siempre los mismos.

2.3.3. Variables más importantes de operación de bombas.

Rango de operación permisible.

Esto corresponde al flujo de líquido a las velocidades especificadas para el impelente suministrado con la bomba, este flujo es limitado por la cavitación, calentamiento, vibración, ruido, deflexión de la flecha, fatiga y otros criterios similares. Este rango de flujos, normalmente los define el fabricante de la bomba.

Carga atmosférica.

Es la presión atmosférica en la zona geográfica donde se prueba o instala la bomba. Se expresa en metros de columna del líquido que se bombea (h_{atm}).

Capacidad

La capacidad de una bomba es el volumen total de líquido bombeado por unidad de tiempo bajo las condiciones particulares de succión, asumiendo que no hay entrada de gases durante toda la operación de la bomba.

Puntos condicionantes.

- Punto de mejor eficiencia. Este punto corresponde a la capacidad y carga en la cual la bomba tiene una máxima eficiencia.
- Punto de condiciones normales. Este punto corresponde a la posición en la curva de la bomba en operación normal. Y puede ser el mismo punto que el de operación especificada.
- Punto de operación especificada. Este corresponde a la capacidad, carga, carga neta de succión positiva y velocidad especificadas en la orden de fabricación conforme al proyecto de bombeo.

Datum

Es un plano horizontal que sirve como referencia para las mediciones de carga durante las pruebas de la bomba. Las bombas verticales se prueban en pozo abierto con el lado de succión inundado y el datum se posiciona en el ojo de la primera etapa de bombeo.

Carga a elevación (Z)

Es la energía potencial del líquido causada por la elevación del mismo, relativa al datum, medida desde el centro del medidor de presión hasta la superficie del líquido.

Carga por fricción

Esta carga es la energía hidráulica requerida para vencer la resistencia a la fricción del líquido que fluye por un sistema de tuberías, se expresa en metros de columna.

Carga manométrica.

Es la energía del líquido debida a su propia presión, se mide con manómetro u otro dispositivo.

Carga

Es la expresión del contenido de energía del líquido, referida a un datum arbitrario. Se expresa en unidades de energía por unidad de peso del líquido. La unidad de medida es metros de columna del líquido.

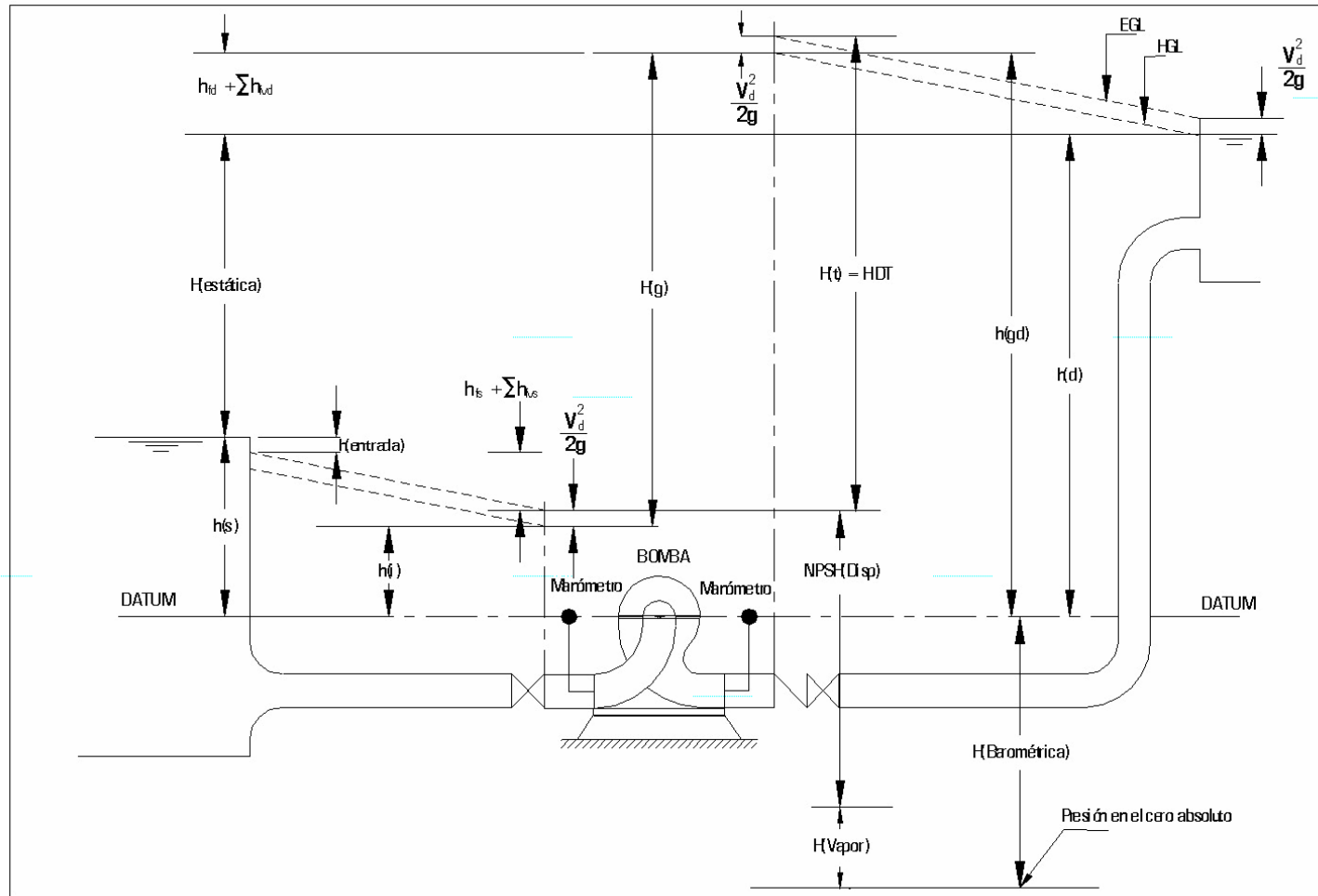


Fig. 2.5 Definición de los términos más importantes de una bomba rotodinámica con carga de succión positiva.

Bombas de potencia

Corresponde arbitrariamente a bombas que vencen cargas mayores de 200 m por etapa y requieren motores con más de 225 kW de potencia.

Balanceo del impelente

- Balanceo en un plano simple. También llamado balanceo estático, y se refiere a la corrección del desbalanceo residual a un límite máximo especificado. Esta operación se realiza mediante la adición o remoción de peso en un solo plano.
- Balanceo en dos planos. También llamado balanceo dinámico, y corresponde a la corrección del desbalanceo residual hasta un límite especificado, añadiendo o quitando peso en dos planos de corrección y montando las piezas en una máquina de balanceo.

Eficiencia total (η_{OA})

Es la relación de la energía suministrada al líquido (P_w) por la bomba con respecto a la energía eléctrica o mecánica suministrada al motor (P_{mot}), esto normalmente se expresa en por ciento.

Potencia

- Es la energía eléctrica o mecánica suministrada al motor (P_{mot}). Es el suministro de la potencia eléctrica o mecánica de acuerdo con los datos de placa del motor.
 - Potencia entregada por el motor a la bomba (P_p). Es la potencia entregada directamente en la flecha de la bomba o a través del acoplamiento. A esto se le llama también potencia al freno.

- Potencia entregada por la bomba (P_w). Es la potencia transmitida por la bomba al líquido, también llamada potencia de agua, y se define como:

$$P_w = \frac{Q * H * S}{366} \dots\dots\dots (2.3)$$

Donde

Q = Gasto en m³/h

H = Carga a vencer en metros

S = Gravedad específica

P_w = Potencia expresada en kW.

Eficiencia de la bomba (η_p).

Este valor es simplemente la relación entre la energía entregada al líquido y la que se entrega a la bomba en el acoplamiento.

$$\eta_p = (P_p/P_w)*100 \dots\dots\dots (2.4)$$

Presiones en la bomba

- Presión de prueba en campo. Es la máxima presión estática para pruebas de fuga, manteniendo la bomba cerrada completamente. Esta presión casi siempre es del 125% respecto a la presión de trabajo, o bien limitada por las características de los sellos.
- Máxima presión permisible en la caja de la bomba. Es la h_{caja} y otros tipos de bombas. Es la máxima presión de diseño que soporta la carcasa de la bomba a la temperatura de trabajo. Esta presión deberá de ser igual o mayor a la presión de descarga. En el caso de bombas tipo doble succión de turbina vertical, axial de

carcasa dividida o de multietapas, la máxima presión permitida en la carcasa en el lado de succión, puede ser diferente a la del lado de descarga.

- Máxima presión de succión. Corresponde a la máxima presión en una sección a la cual la bomba deberá estar sujeta durante la operación.
- Presión de trabajo (P_d). Es la máxima presión de descarga que puede suceder en la bomba, cuando es operada a velocidad y presión de succión dadas.
- Condición de totalmente cerrada. Corresponde a las condiciones nulas totalmente de flujo en la bomba cebada y operando.
- Velocidad. Es el número de revoluciones de la flecha por unidad de tiempo. Usualmente se expresa en *rpm*.

Condiciones de succión.

- Máxima presión de succión. Es la presión más alta a la cual debe operar la bomba en el lado de succión.
- Carga neta de succión positiva disponible ($NPSH_A$). Es la carga neta de succión positiva absoluta total, determinada en la primera etapa de bombeo o datum, menos la presión de vapor absoluta del líquido a la capacidad específica:

$$NPSH_A = h_{sa} - h_{vp} \dots\dots\dots (2.5)$$

h_{sa} = carga absoluta de succión total

$h_{sa} = h_{atm} + h_s$, y por lo tanto,

$$NPSH_A = h_{atm} + h_s - h_{vp} \dots\dots\dots (2.5a)$$

- Carga neta de succión positiva requerida ($NPSH_R$). Es la cantidad de carga de succión por encima de la presión de vapor requerida para prevenir al menos el 3% de pérdida en carga desde el primer impelente de la bomba a las condiciones específicas de trabajo.
- Succión estática de elevación (I_S). Es una presión menor a la atmosférica y que resulta del vacío que produce la bomba en la entrada de la misma.
- Succión sumergida. Esta se presenta cuando el centro del ojo del impelente se encuentra por debajo del nivel del líquido como en el caso del bombeo desde un tanque elevado.
- Carga total a la descarga (h_d). Viene siendo la suma de la carga manométrica (h_{gd}) más la carga a velocidad (h_{vd}) en el punto de medición con el manómetro, más la carga a elevación (Z_d), medido desde el datum hasta el centro del tubo de descarga.
- Carga total (H). Corresponde al incremento de la energía por unidad de peso del líquido, el cual es impartido por la bomba, y es la diferencia entre la carga total a la descarga y la carga total de succión. Esta es la carga normalmente especificada para la aplicación de las operaciones de bombeo especificadas, en vista de que las características completas del sistema determinan la carga total requerida.

$$h_d = h_{gd} + h_{vd} + Z_d \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

- Carga total de succión en pozo cerrado (h_S). Para pruebas de bombeo en instalaciones cerradas, el tubo de succión puede ser localizado por encima o por debajo del nivel alcanzado de líquido.
- Carga total de succión en pozo abierto (h_S). En instalaciones de pozo abierto, la primera etapa del impelente debe estar completamente sumergida en el pozo de

bombeo (cárcamo), por lo que h_s al datum, corresponde a la sumergencia (Z_w). En este caso, si el promedio de la carga a velocidad del flujo en el pozo de bombeo, es tan pequeña que puede ser despreciable para los efectos prácticos, entonces:

$$h_s = Z_w \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Siendo Z_w = la distancia vertical en metros desde la superficie del agua hasta el datum.

Y también se tiene que, referido al nivel del ojo de la primera etapa del impelente, hasta el punto de ubicación del manómetro en la succión y al datum de la bomba:

$$h_s = h_{gs} + h_{vs} + Z_s \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

La presión de succión (h_s) es positiva cuando la lectura del manómetro registra más presión que la atmosférica, de lo contrario es negativo este valor. Y corresponde a una cantidad que excede la suma de la carga a elevación y la carga a velocidad.

- Carga a velocidad (h_v). Es la energía cinética de un líquido en una sección transversal dada. Y se expresa por la siguiente ecuación:

$$h_v = \frac{v^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

Donde v se mide dividiendo el flujo que atraviesa una sección transversal en el punto de medición.

Tipos de bombas centrífugas

Para esto se considerará una de las clasificaciones más difundidas en América. El *Hydraulic Institute* (HI) clasifica las bombas en dos tipos, las de impelente suspendido por un extremo y las de impelente soportado entre cojinetes. Tabla 2.2

En las normas API, se dividen los tipos de bombas en tres categorías, las de impelente suspendido por un extremo, las de impelente soportado entre cojinetes y las suspendidas verticalmente. Para el HI, las bombas suspendidas horizontales, son una subclase del tipo impelente suspendido por un extremo.

Tabla 2.2. Tipos de bombas rotodinámicas (ANSI/HI-1.1-1.5-1994)

BOMBAS TIPO CINÉTICAS RODINÁ- MICAS	Centrífugas	De impelente suspendido en un extremo	Acoplamiento cerrado simple o en dos etapas	Succión al extremo incluidas las sumergibles
			Acoplamiento separado de etapa simple o doble	En línea
				En línea ANSI B73.2
				Montada en marco
				Soportada en la línea de centro API-610
				Montada en marco ANSI B73.1
				Voluta húmeda
			Sin sellos	Impelente de flujo axial tipo propela, tipo voluta, horizontal o vertical
				Motor sellado
			Impelentes apoyados en cojinetes	Acopladas por separado de etapa simple	Accionada magnéticamente
	Axial (horiz.), caja dividida.			
	Acopladas por separado de multietapas	Radial (Vert.), caja dividida.		
		Axial (horiz.), caja dividida.		
	Turbina regenerativa	Periférica	Radial (Vert.), caja dividida	
			Etapa simple	
De efecto especial	Canal lateral	Multietapas		
		Centrífuga reversible		
		Carcasa rotatoria (pitot)		

2.4. Metales de prueba

Se seleccionaron 5 aleaciones comerciales típicas que se emplean para construir partes en sistemas de bombeo o en bombas rotodinámicas y en los que se realizaron las pruebas de cavitación – corrosión, las propiedades se enuncian a continuación (14,15).

Tabla 2.3. Propiedades mecánicas de las aleaciones de prueba.

ALEACIÓN	σ_0 (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
Acero al carbono AISI-SAE 1010	310	414
Acero inoxidable AISI-316	280	560
Acero inoxidable AISI-416	305	615
Bronce comercial	276	496
Titanio comercial	827	862

2.4.1 Acero al carbono de baja aleación.

El hierro es un metal de estructura electrónica [Ar] 3d⁶ 4s²; su número atómico es 26 y su peso es 55.847. Sus electrones 4s² lo hace un metal maleable. Puede formar aleaciones intersticiales con el carbono, lo que constituye las aleaciones hierro-carbono.

Estas aleaciones comprenden una gama muy amplia de composiciones, el metal seleccionado fue el tipo ferrítico, de composición típica en % peso: 0.1 Carbono-0.4 Manganeso-0.09 Silicio-0.04 Azufre-0.04 Fósforo-Balance Fe. El hierro es el metal base, y debido a que es un metal comercial muy sensible a la corrosión en medio acuoso, constituye un material que se puede usar como comparación en las pruebas de cavitación. Sus propiedades se dan en la tabla 2.3.

2.4.2 Acero inoxidable AISI-316 (austenítico).

Consiste de una aleación ternaria de hierro-cromo-níquel. La propiedad de resistencia a la oxidación se la da el cromo, por lo que este elemento debe estar en aleación en 12% en peso como mínimo, para asegurar que termodinámicamente el cromo va a proteger a la aleación. El níquel le asegura mejores propiedades mecánicas a la aleación, que junto con el hierro mejora estas propiedades. En estas aleaciones es muy complejo explicar la función de cada elemento, por lo que estos metales fueron diseñados por prueba y error, encontrando las diversas variedades comerciales que actualmente se conocen. La aleación escogida de este grupo, cuyo contenido en % peso es: 0.03 Carbono-18 Cromo-12 Níquel-2 Mn-1 Si-0.045 Fósforo-0.030 Azufre-2.5 Molibdeno. El comportamiento de esta aleación frente a la deformación mecánica es de rápido endurecimiento superficial, por lo que al presentarse la corrosión - cavitación, se esperaría una alta resistencia a la misma.

2.4.3 Acero inoxidable AISI-416 (martensítico).

Consiste de una aleación ternaria de hierro-cromo-silicio. La propiedad de resistencia a la oxidación se la da el cromo, por lo que este elemento debe estar en aleación en 12% en peso como mínimo, para asegurar que termodinámicamente el cromo va a proteger a la aleación. El silicio le asegura la estabilidad de las fases metálicas en la aleación, que junto con el hierro mejora estas propiedades. En estas aleaciones es muy complejo explicar la función de cada elemento, por lo que, como en el caso anterior, estos metales fueron diseñados por prueba y error, encontrando las diversas variedades comerciales que actualmente se conocen. La aleación escogida de este grupo, cuyo contenido en % peso es (en contenidos máximos): 0.15 Carbono-13 Cromo-1 Silicio-1.25 Manganeso-1 Si- 0.06 Fósforo-0.030 Azufre-0.60 Molibdeno. El comportamiento de esta aleación frente a la deformación mecánica es de aparente fragilidad, aunque se endurece superficialmente por deformación, por lo que al presentarse la corrosión - cavitación, se esperaría una alta resistencia a la misma.

2.4.4 Bronce

Los bronce son aleaciones de cobre (Cu) como metal base combinado con estaño, por lo que sus propiedades serán dominantes en estas aleaciones. El Cu es un elemento químico con estructura $3d^{10} 4s^1$, Número Atómico. 29, y peso atómico = 63.546, es un metal de color rojizo, tenaz, muy dúctil, maleable y uno de los mejores conductores de la electricidad; entra en muchas aleaciones de bronce y latón; se encuentra nativo, pero con mayor frecuencia combinado en forma de óxidos o sulfuros minerales. La energía de enlace de este metal es semejante a la de Ge, Ni, Co, Fe, Mn, Cr. Por tener electrones de espacio tipo esférico $4s^1$, su comportamiento predecible es dúctil, por lo que la resistencia del mismo se da por la combinación de otros elementos tales como el estaño o silicio que presentan estructuras cristalinas diferentes.

Estas aleaciones se emplean para construir partes de bombas como los impelentes. Por esta razón se seleccionó este metal para las pruebas. La composición típica de esta aleación en % peso es: 58.5 Cobre-39 Zinc-1 Estaño-0.1 Manganeso. Sus propiedades se dan en la Tabla 2.3.

2.4.5 Aleación de titanio.

El titanio, de símbolo Ti, es un elemento metálico color blanco plateado que se usa principalmente para preparar aleaciones ligeras y fuertes. Su número atómico es 22 y es uno de los elementos de transición del sistema periódico, su estructura electrónica es $[Ar] 3d^2 4s^2$ y es similar al zirconio, escandio, itrio y el niobio. Sus electrones de espacio esférico $4s^2$, lo hacen un metal maleable; su número atómico es 22, y peso atómico = 47.88. Este tipo de aleaciones se emplea con éxito donde la demanda de resistencia química o mecánica, en relación peso resistencia, deben de ser muy altas.

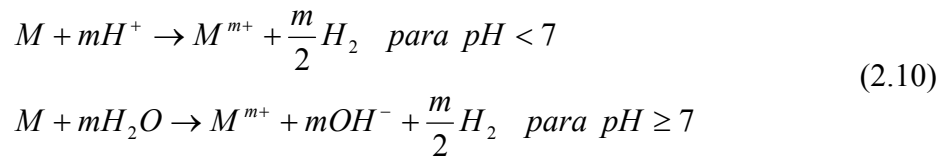
La aleación comercial de titanio que se empleó expresada en % peso de aleantes fue: Titanio-5Aluminio-2.5Estaño y sus propiedades se muestran en la Tabla 2.3. Este metal se seleccionó por ser uno de los más resistentes en utilidades industriales y puede servir como extremo de comparación de la resistencia a la cavitación.

PROCESOS DE CORROSION ELECTROQUIMICA Y SUS VARIABLES.

Antes de examinar con detalle las teorías de los procesos de corrosión acuosa y las bases para realizar cálculos cuantitativos de velocidades de corrosión, es útil desarrollar cuantitativamente el fenómeno más importante involucrado.

CORROSION UNIFORME CON pH COMO LA VARIABLE PRINCIPAL.

Para metales M, que son termodinámicamente inestables en agua, las reacciones más simples de corrosión son:



De esta manera, el metal se transforma de su estado metálico a iones de valencia m en solución con la evolución de hidrógeno. La reacción se considera directamente con iones hidrógeno en solución ácida y progresivamente con moléculas de agua conforme el pH se incrementa a condiciones de neutral hacia alcalina. Los dos procesos involucrados en la reacción, en donde cada uno implica un cambio de carga: M a M^{m+} y mH⁺ a m/2H₂ (en solución ácida). Los cambios en la carga están acompañados por la transferencia de electrones desde M a H⁺. Debido a que la fase metálica es un conductor electrónico, se lleva a cabo en esta la transferencia de electrones permitiendo que los dos procesos ocurran en sitios separados en la superficie del metal. En casos limitantes, estos procesos ocurren en unos pocos diámetros atómicos sobre la superficie del metal que cambia constantemente en el tiempo. De esta manera, se produce la corrosión uniforme. De forma contraria, ocurre la corrosión no uniforme. La corrosión uniforme dependiente del pH se representa esquemáticamente en la Figura 2.6. En este ejemplo, el oxígeno es excluido por el burbujeo de nitrógeno y sobre-cubierto.

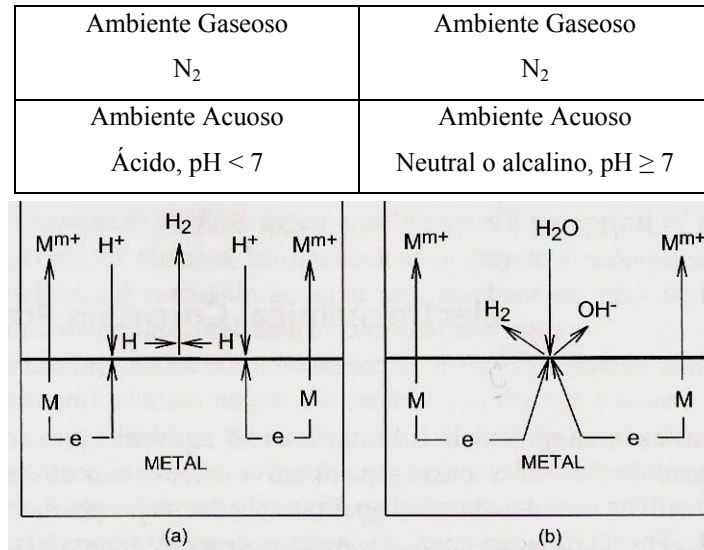
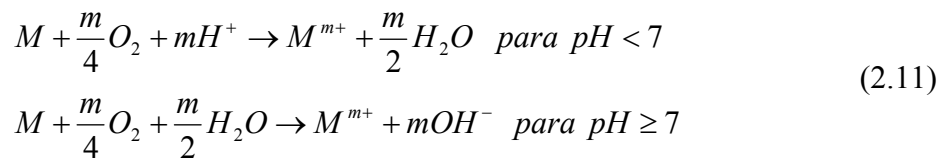


Figura 2.6. Corrosión uniforme controlada por pH.

CORROSION UNIFORME CON pH Y OXIGENO DISUELTO COMO VARIABLES.

Cuando el oxígeno disuelto esta presente en la solución, normalmente por contacto con aire (medio aireado), las siguientes reacciones se aplican adicionalmente a las consideradas:



La corrosión uniforme dependiente del oxígeno disuelto y el pH, se representan esquemáticamente en la Figura 2.7. Donde los electrones son consumidos por las dos reacciones y origina que la velocidad de la corrosión en el metal se incremente. En el caso del hierro, el oxígeno disuelto es el factor mas importante de la corrosión que la presencia de iones hidrogeno cuando el pH es mayor en aproximadamente 4. Esto es una ilustración inicial del papel del oxígeno disuelto en soluciones aireadas frente a la corrosión.

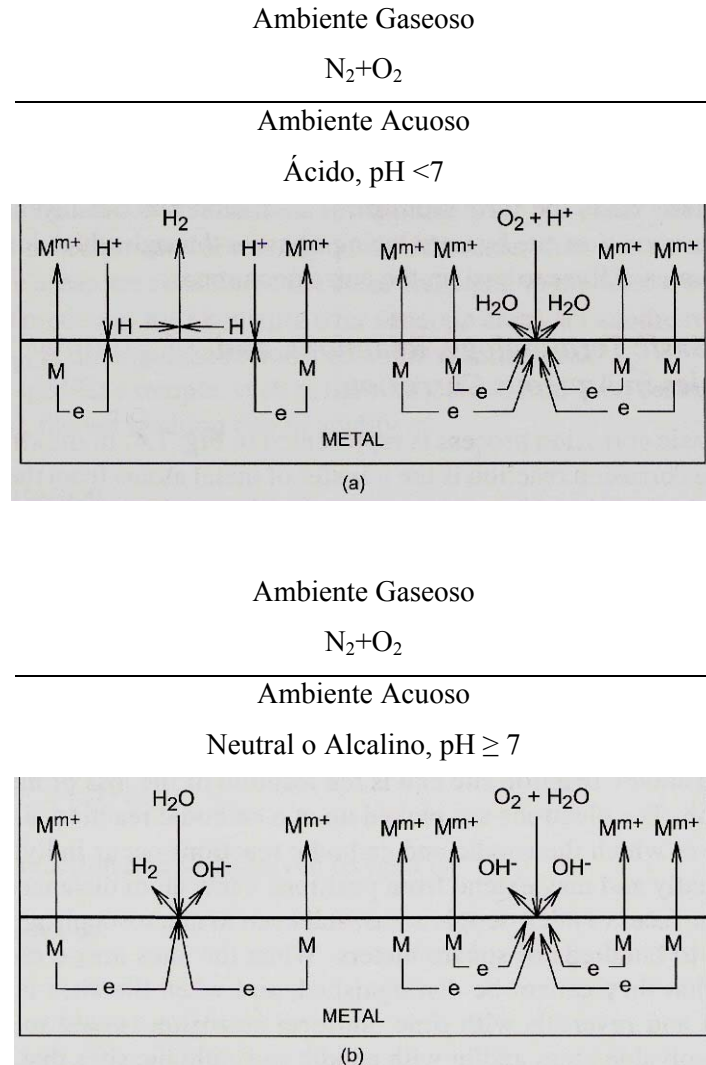


Figura 2.7. Corrosión uniforme controlada por pH y oxígeno disuelto.

CORROSION UNIFORME CON FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION.

Un ejemplo de la formación de productos de corrosión es la oxidación del hierro ilustrado en la Figura 2.8. Cuando el pH es más grande en aproximadamente 4, y bajo condiciones aireadas, se forma una capa negra de Fe_3O_4 , y posiblemente $Fe(OH)_2$, ambas capas en contacto con el sustrato de hierro. En presencia del oxígeno disuelto, se forma una capa

exterior de color rojo Fe_2O_3 o FeOOH . La adherencia y porosidad de esas capas cambian con el tiempo, y pueden influenciarse por otras especies químicas presentes en el medio ambiente, tales como iones cloruro y sulfato. En cualquier caso, la formación de la capa de productos de corrosión influye en la velocidad de corrosión, introduciendo una barrera a través de tales iones y el oxígeno deberá difundir para mantener el proceso de corrosión.

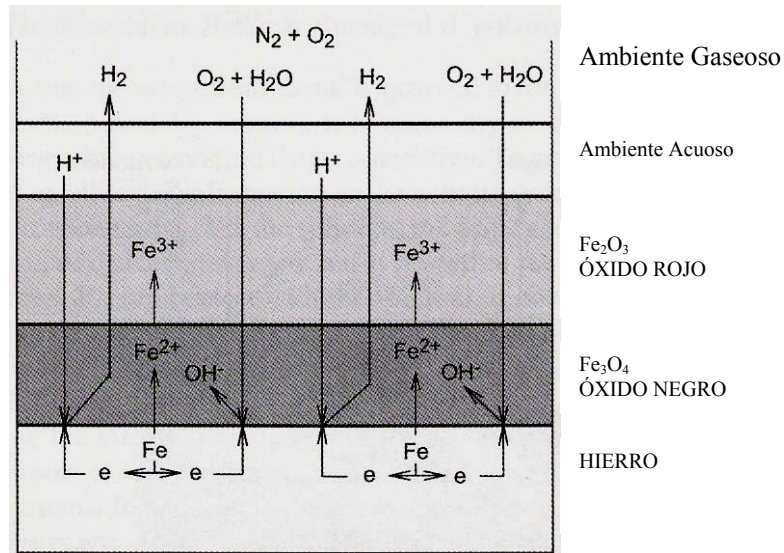


Figura 2.8. Corrosión uniforme con productos sólidos depositados.

TERMINOLOGÍA BÁSICA, REACCIONES Y VARIABLES EN CORROSIÓN ACUOSA.

El proceso básico de corrosión se representa en la Figura 2.9. En el caso más simple, la reacción de corrosión es la transferencia de átomos metálicos desde el sólido a la solución donde pueden existir como iones (ejemplo, $\text{M} \rightarrow \text{M}^{m+} + m\text{e}$). Esto es debido a que existe una pérdida de electrones de los átomos metálicos en esta transferencia, y el metal se consume por oxidación. Esta se mantiene por el consumo de electrones de otra reacción, generalizando en este caso, $\text{X} \rightarrow \text{X}^{x+} + x\text{e}$. La oxidación ocurre en un sitio en la superficie del metal referido como el sitio de la reacción anódica y este es la región de pérdida de metal por corrosión. Los electrones son transportados hasta el sitio de la reacción catódica. Las áreas en las que ocurren ambas reacciones son individuales, y varían mucho y pueden

modificar sus posiciones de unos pocos diámetros atómicos de separación sobre la superficie de áreas microscópicas, y la suma de todos estos microefectos, se transformará eventualmente hasta cientos de metros cuadrados. Cuando esos sitios microscópicos son muy cercanos entre sí, así como los cambios en un sentido y otro en el tiempo, se dice que la corrosión uniforme esta ocurriendo. Con áreas resueltas y/o con sitios anódicos y catódicos estables en el tiempo, la corrosión será identificada por áreas anódicas solamente, y se dice que ocurre la corrosión localizada. Obviamente, existe una gran diferencia en la interpretación de que es la corrosión uniforme y que es la corrosión localizada. Frecuentemente dependerá sobre la escala de observación o la magnitud de la diferencia en la velocidad de corrosión entre áreas que son predominantemente anódicas y otras que son predominantemente catódicas, puesto que ambas reacciones casi siempre ocurren sobre la superficie total. Si los dos procesos ocurren a microescala, entonces las áreas anódicas y catódicas se consideran las mismas e iguales al área total, A. Si los dos procesos ocurren en áreas separadas se distinguirá el área anódica A_a del área de reacción catódica A_c . Como ejemplo, la corrosión del hierro en una solución ácida aireada. La reacción neta debida a la acidez es:

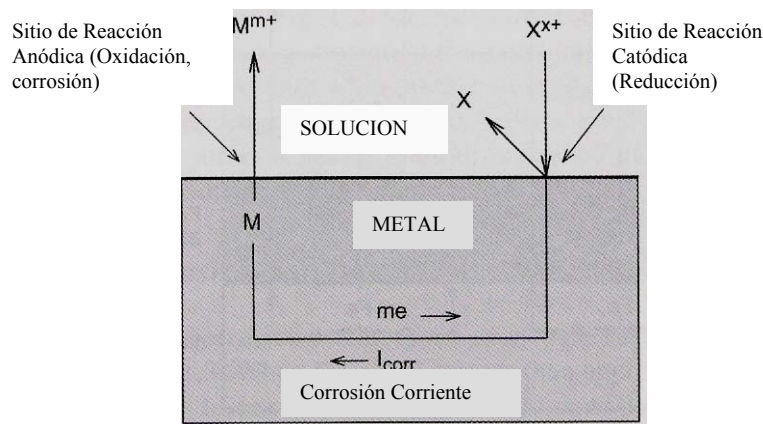
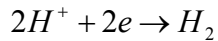


Figura 2.9. Proceso básico de corrosión

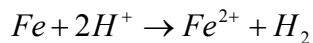
Reacción anódica



Reacción catódica

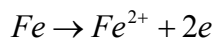


Reacción total

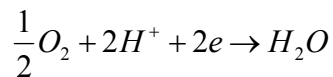


Y la reacción debido al oxígeno disuelto es:

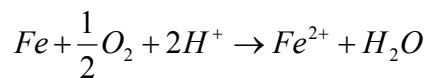
Reacción anódica



Reacción catódica



Reacción total



Para demostrar que las reacciones anteriores ocurren, es necesario calcular la energía de Gibbs y encontrar que esta es negativa. Para hacer estos cálculos se requiere información cuantitativa sobre la actividad o concentración efectiva de iones hierro ($a_{Fe^{2+}}$) en la solución, la acidez o pH y la concentración de oxígeno disuelto que se relaciona con la presión parcial de este gas (P_{O_2}), en contacto con la solución. Se ha demostrado que la energía libre de Gibbs es negativa para esas reacciones bajo todos los valores de pH, de aquí que el hierro tiende a corroerse a todos los valores de pH. La velocidad de corrosión, sin embargo, dependerá de otros factores que afectan los mecanismos cinéticos de los diferentes procesos involucrados en el transporte de iones desde el metal a la solución y el soporte de las reacciones catódicas. En adición a las especies en solución relacionadas directamente a las reacciones anteriores (Fe^{2+} , H^+ y O_2), otras especies en solución pueden afectar la tendencia a la corrosión en términos de la energía impulsora termodinámica y la cinética de las distintas etapas involucradas. Por ejemplo, el acomplejamiento de agentes que reaccionan con los iones metálicos en solución, reducen la concentración de iones metálicos libres y favorecen termodinámicamente el paso de los iones metálicos a la solución, por lo que se

incrementa la velocidad de corrosión. De forma contraria, si las especies en solución pueden formar precipitados con iones metálicos, y formar barreras protectoras de difusión, la velocidad de corrosión se puede disminuir significativamente.

Tabla 2.4 Procesos, terminología y variables asociadas con la corrosión acuosa.

<p>Ánodo área, A_a Reacciones (oxidación) General, $M \rightarrow M^{m+} + me$ Estado reducido \rightarrow estado oxidado Ejemplo, $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$</p> <p>Cátodo área, A_c Reacciones (reducción) General, $X^{x+} + xe \rightarrow X$ Estado oxidado \rightarrow Estado reducido Ejemplos Desaireado Ácido, $2H^+ + 2e \rightarrow H_2$ Neutral o alcalino, $H_2O + e \rightarrow \frac{1}{2}H_2 + OH^-$ Aireada (adicional a la anterior) Ácido, $O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O$ Neutral o alcalino $O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$</p> <p>Variables en fase acuosa Acidez concentración de H^+ concentración molar, C_{H^+} Actividad, a_{H^+} $pH = -\log a_{H^+}$ $(a_{H^+})(a_{OH^-}) = 10^{-14}$</p> <p>Gases Disueltos $H_2, C_{H_2} \propto P_{H_2}$ $O_2, C_{O_2} \propto P_{O_2}$</p> <p>Otras especies disueltas Fe^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, etc., con actividades $a_{Fe^{2+}}$, etc.</p> <p>Nota: C_z = concentración molar de especies Z; a_z = actividad o concentración efectiva de especies Z; P_z = presión parcial de especies Z</p>

CIRCUITO ELEMENTAL DE CORROSION ELECTROQUIMICA.

La corrosión acuosa se entiende mas fácilmente en términos de una celda electroquímica, consistiendo de dos hemiceldas (Figura 2.10). En comparación con la batería, la solución o electrolito que corroee al metal es el fluido de la batería, y la conducción entre el sitio anódico (metal expuesto) y el catódico (por ejemplo, un área de oxido adherente conductor) es el circuito externo. En la región anódica, la reacción neta de oxidación es $M \rightarrow M^{m+} + me$, y en la catódica la reacción neta de reacción generalizada es $X^{x+} + xe \rightarrow X$. Como una consecuencia de la transferencia de iones y electrones en la interfase, se desarrollan diferencias de potencial eléctrico $\Delta\phi_a$ y $\Delta\phi_c$, entre el metal y la solución en las regiones anódicas y catódicas respectivamente, donde

$$\Delta\phi_a = \phi_{M,a} - \phi_{s,a}$$

$$\Delta\phi_c = \phi_{M,c} - \phi_{s,c}$$

a,c significan sitios anódicos y catódicos respectivamente

M, S significan las fases metal y solución respectivamente.

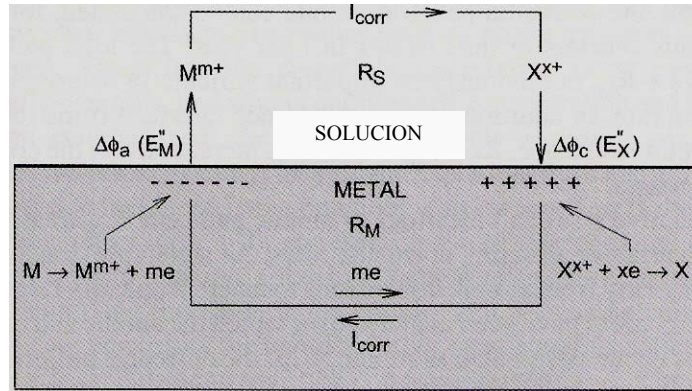


Figura 2.10. Circuito elemental de la corrosión electroquímica

Esas diferencias en potencial, constituyen la celda electroquímica, en la que los electrones se hacen fluir desde la región anódica a la catódica en el metal; la corriente eléctrica convencional (carga positiva) fluye en la dirección opuesta. En la solución, la corriente

fluye desde el ánodo al cátodo como una consecuencia del potencial, esto es $\phi_{S,a} > \phi_{S,c}$. Esta corriente se define como una cantidad positiva para el proceso de corrosión representada en la Figura 2.11. En la práctica, las interferencias individuales de diferencia de potencial, $\Delta\phi$, se le asignan valores relativos al electrodo estándar de hidrogeno. Esos valores están designados por E para el caso general, por E' para el caso de no paso de corriente, por E'' para el caso de una corriente de corrosión que atraviesa la interfase. Si el potencial del electrodo de referencia estándar es cero, entonces, para el caso general, $\Delta\phi_a = E_M$ y $\Delta\phi_c = E_X$. El potencial impulsor para la corriente en la solución $\Delta\phi_S$ es
$$\Delta\phi = \phi_{S,a} - \phi_{S,c} = (\phi_{M,a} - \Delta\phi_a) - (\phi_{M,c} - \Delta\phi_c).$$

Si se asume que la conducción en el metal es buena, entonces la diferencia de potencial en este deberá ser pequeña, y $\phi_{M,a} \approx \phi_{M,c}$. De esta manera, el potencial impulsor para la corriente en la solución será $\phi_S = \Delta\phi_c - \Delta\phi_a = E_X'' - E_M''$.

Donde las E'' enfatizan valores asociados con la corriente de corrosión. Por lo que se puede aplicar la ley de Ohm para definir la corriente de corrosión $I_{corr} = (E_X'' - E_M'') / (R_S + R_M)$.

Donde R_S y R_M son la resistencia de la solución y la del metal en el flujo de corriente. Esta es llamada o se llama corriente de corrosión, I_{corr} , y cuando el área anódica de flujo de corriente se toma en consideración, la velocidad de penetración por corrosión se puede calcular. La resistencia total, $R_S + R_M$, obviamente es una variante importante en la determinación de la velocidad de corrosión. Adicionalmente, si se forma una interfase con alta resistencia, la resistencia total del circuito es $R_S + R_M + R_{interfase}$, y la velocidad de corrosión disminuye.

El tamaño y localización de las zonas anódicas y catódicas, son variables importantes que afectan la velocidad de corrosión, como se dijo anteriormente, esas áreas pueden variar desde dimensiones atómicas a grandes áreas macroscópicas. En la Figura 2.11, las áreas se han señalado en donde ocurrirán las reacciones anódicas y catódicas, designándolas como A_a y A_c .

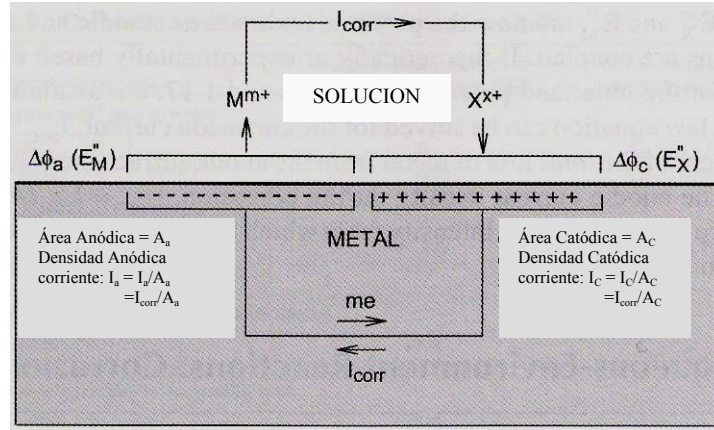


Figura 2.11. Relación existente entre áreas anódica, catódica, densidades de corriente y potenciales.

Si la corriente se distribuye uniformemente en esas áreas, entonces la velocidad de corriente, $i_a = I_a/A_a$, $i_c = I_c/A_c$. La densidad de corriente es fundamentalmente más importante que la corriente por dos razones. Primero, de la ley de Faraday, la densidad de corriente anódica i_a relaciona directamente la intensidad de corrosión o pérdida de masa por unidad de tiempo por unidad de área, o la velocidad de penetración por corrosión como una dimensión lineal de pérdida por unidad de tiempo. Segundo, se observa que los potenciales de interfase E , son funciones de la densidad de corriente, $E(i)$, de la forma:

$$\begin{aligned} E_X(i_c) &= E'_X + \eta_X(i_c) = E'_X + \eta_X(I_c / A_c) \\ E_M(i_a) &= E'_M + \eta_M(i_a) = E'_M + \eta_M(I_a / A_a) \end{aligned} \quad (2.13)$$

En esas expresiones, E_X y E_M se transforman en los potenciales E'_X y E'_M si la corriente es cero, y además, relaciona las diferencias de potencial a través de las interfases individuales en el equilibrio (por ejemplo, transporte neto nulo de iones o electrones). Esos potenciales limitantes, están referidos como potencial de equilibrio de media celda, y cuando las condiciones de concentración y temperatura se estandarizan, ellos caracterizan las reacciones estándar de equilibrio de media celda. La ecuación anterior además indica que el potencial existente con flujo de corriente esta en equilibrio mas un termino $\eta(i)$,

representando la elevación en el potencial como consecuencia de la densidad de corriente. Esta elevación se conoce como sobrepotencial o sobrevoltaje, y se incrementa en magnitud con el incremento de la densidad de corriente. Durante la corrosión, la corriente anódica debe ser igual a la catódica, $I_a = I_c$, y esta corriente es la corriente de corrosión, I_{corr} . De esta forma, la ley de Ohm se puede escribir de la siguiente manera:

$$I_{corr} = \frac{E_X'' - E_M''}{R_{total}} = \frac{[E_X' + \eta_X(I_{corr}/A_c)] - [E_M' + \eta_M(I_{corr}/A_a)]}{R_{total}} \quad (2.14)$$

Donde E_X'' y E_M'' son los potenciales de las reacciones catódicas y anódicas acopladas. Si se disponen teórica o experimentalmente las expresiones basadas para los potenciales de polarización, la ecuación de la ley de Ohm se puede resolver para la corriente de corrosión, I_{corr} . Esta es una medida de la pérdida total del metal de la superficie anódica durante la corrosión. La densidad de corriente anódica durante la corrosión, $i_{corr} = I_{corr}/A_a$, es una medida de la intensidad de corrosión de la cual, la velocidad de penetración de corrosión se puede calcular.

CRITERIO PARA REACCIONES METAL/AMBIENTE ACUOSO.

Para el flujo de corriente en la dirección mostrada en la Figura 2.12 correspondiendo a la corrosión de M, E_X'' debe ser mayor que E_M'' . Puesto que η_x es siempre negativa y η_m es siempre positiva, E_X'' debe ser mayor que E_M'' porque esos potenciales de equilibrio se pueden calcular de tablas de potenciales estándar de media celda, esas tablas son útiles para establecer cuando la corrosión puede ocurrir. La velocidad de corrosión, sin embargo, también es fuertemente dependiente de η_x η_m ; η_x es una función de la cinética de los mecanismos de los procesos físicos, químicos y electroquímicos que ocurren en la superficie catódica; η_m relaciona los procesos cinéticos en la superficie del ánodo. Es esencial, además para realizar tal proceso de corrosión, particularmente la velocidad de corrosión, que depende de las reacciones anódicas y catódicas. En algunos casos, el proceso anódico controla la reacción, y en otros, el proceso catódico, controla la velocidad de

corrosión. De forma contraria, al controlar la corrosión con inhibidores de corrosión, dicho control sobre los mecanismos cinéticos puede ser selectivo, ya sea para el lado anódico o catódico, o ambos. Obviamente, es importante entender las etapas en cada proceso tan completo como sea posible.

IMPORTANCIA DE LA FORMACION DE PRODUCTOS SÓLIDOS DE CORROSION: ACELERACION DE LA CORROSION VS PASIVACION.

La formación de productos sólidos de corrosión puede ser un factor dominante en controlar el proceso. Esos productos se forman cuando los iones del metal, pasan a la solución, y reaccionan a una concentración crítica (corrosión), causando precipitación con algunas especies en el ambiente. Ya que la concentración del ion metal es mucho mayor en la superficie donde ocurre la transferencia a través de la interfase metal-solución, el precipitado tiende a formarse en la superficie del metal. Los sólidos comunes de productos de corrosión son hidróxidos, óxidos, sulfuros o mezclas complejas de estos. Si el precipitado no se adhiere en la superficie, y la solubilidad es muy pequeña, el proceso de precipitación mantendrá la concentración metal-ion a valores bajos, y la velocidad de corrosión será alta debido a la continua remoción de iones metálicos de la solución, y la resultante fuerza impulsora para compensar por esta remoción debida a la transferencia de iones del metal a la solución. En contraste con lo anterior, los precipitados que se adhieren a la superficie del metal en forma continua y en capa no continua, reducen fuertemente la velocidad de corrosión, debido al control del mecanismo que viene de la baja difusión a través de las capas. De otra manera, si la capa es un conductor electrónico pobre, entonces, la reacción de oxidación (corrosión) se retarda debido a la dificultad de los electrones para atravesar la interfase en la reacción catódica.

Los metales se corroen como una consecuencia de especies en solución que soportan una reacción catódica, por ejemplo, la liberación de electrones en los sitios de corrosión donde los iones metálicos se descargan en la solución. El reactante catódico actúa como un agente oxidante del metal desde M^0 hasta M^{m+} con la transferencia de electrones al reactante

catódico, el cual se reduce. El más positivo, que es el potencial del reactante catódico de media celda (Figura 2.12) y el de mayor concentración, es el del poder oxidante más grande del ambiente, y la tendencia de corrosión ocurrirá.

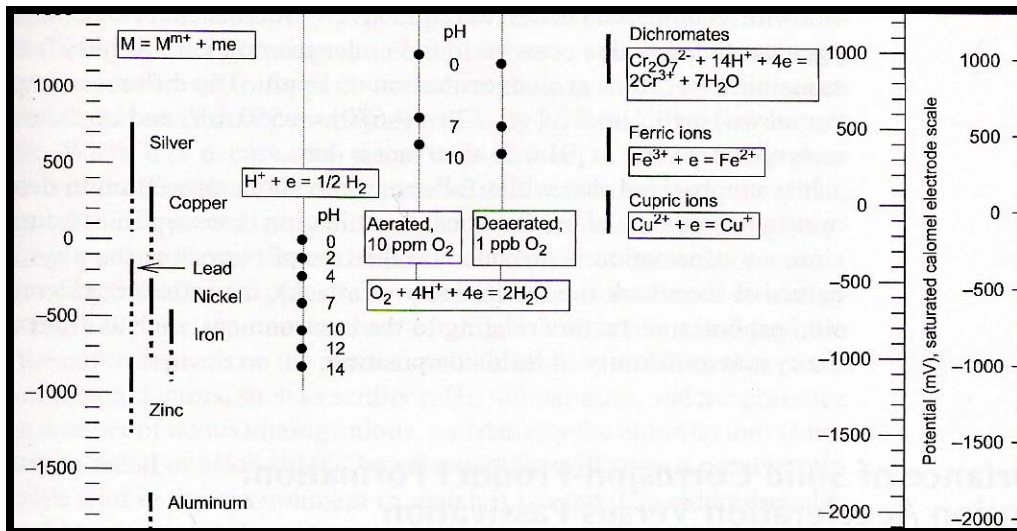


Figura 2.12. Rangos de potencial de media celda en algunas reacciones electroquímicas de importancia en corrosión.

Sin embargo, para esos metales capaces de formar capas protectoras de productos de corrosión, estas se observan que se forman bajo condiciones de oxidación crítica, y una vez formadas, la velocidad de corrosión puede disminuir en varios órdenes de magnitud. Cuando esto ocurre, se describe al metal bajo condiciones de pasivación. Esto es, se hará mas pasivo el ambiente en vez de un aumento progresivo del lado activo con el incremento esperado de las propiedades agresivas del medio. El fenómeno se puede representar por una gráfica esquemática de velocidad de corrosión como una función del poder oxidante del ambiente, (Figura 2.13). La forma y posición de la curva depende en particular de la aleación, a un cierto número de factores ambientales, tales como la acidez (pH), temperatura y la presencia de un número de aniones no oxidantes, particularmente, el ion cloruro. Obviamente, un metal o aleación debe ser seleccionado para formar una capa protectora pasiva en el ambiente en que se usará. Otras consideraciones tendrán que ver con

los ajustes a las consideraciones ambientales que provean condiciones oxidantes que formen la capa pasiva sobre la superficie del metal.

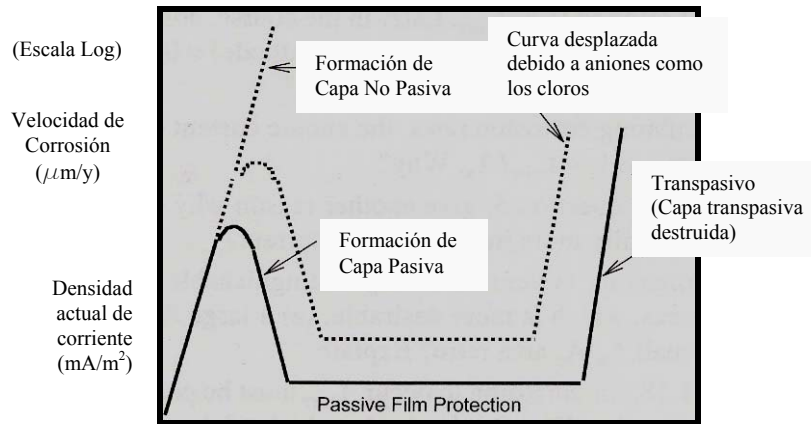


Figura 2.13. Efecto del incremento en el poder oxidante del medio sobre la corrosión de una aleación activa – pasiva.

Para algunos materiales en algunos ambientes, es posible formar capas pasivas de protección. En este caso, la velocidad de corrosión continua incrementándose con el incremento de las condiciones oxidantes, y los materiales satisfactorios para este tipo de demanda, dependen de la aceptabilidad de mantenimientos y bajas condiciones oxidantes, y de esta forma, baja aceptablemente velocidad de corrosión. El mejor ejemplo de control de corrosión basado en esas observaciones generales, es la deaireación de agua en circuitos de transferencia de calor, que reducen el oxígeno, el cual es, el reactante catódico principal.

El hierro no se pasiva en la mayoría de los ambientes, y por lo tanto, es mas eficiente cuando el poder oxidante del ambiente es lo mas bajo posible, por ejemplo, la deaireación mencionada arriba. En contraste, una gran cantidad de aleaciones industriales dependen de las condiciones oxidantes para producir capas pasivas protectoras. Esas aleaciones incluyen aceros inoxidables, aleaciones base níquel, titanio y sus aleaciones, y muchas otras.

ELECTROQUÍMICA DE LA CORROSIÓN.

Una reacción electroquímica se define como una reacción química en la cual existe una transferencia de electrones, es decir, es una reacción química que comprende el fenómeno de oxidación y reducción. Como la corrosión metálica es casi siempre un proceso electroquímico, es muy importante comprender la naturaleza básica de las reacciones electroquímicas.

Una reacción de oxidación significa un incremento en el estado de oxidación o valencia con producción de electrones y en forma similar, la reacción de reducción representa una disminución en el estado de oxidación o valencia.

En términos de corrosión, una reacción de oxidación recibe el nombre de reacción anódica, mientras que a la reacción de reducción se le denomina reacción catódica. Todo proceso de corrosión necesita por lo menos una reacción de oxidación y una reacción de reducción, por lo que podemos resumir que las reacciones de corrosión son electroquímicas en naturaleza y debido a esto es posible dividir el proceso de la corrosión, en reacciones anódicas y reacciones catódicas que permiten simplificar la presentación de la mayoría de los procesos (Figura 2.14).

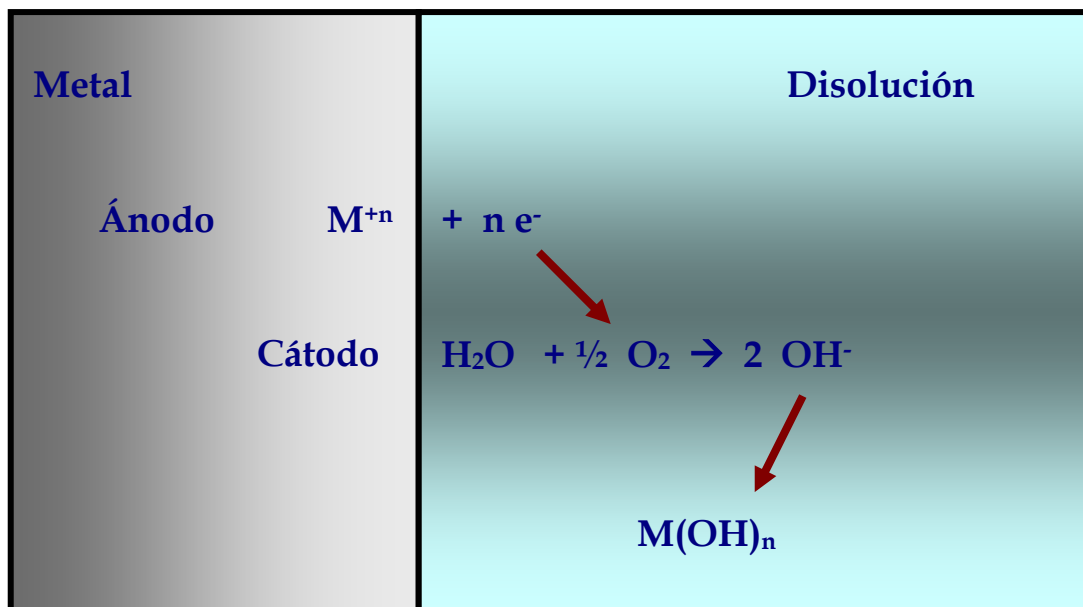
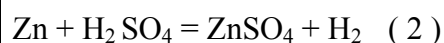


Figura 2.14. Celda de corrosión

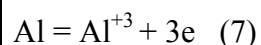
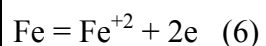
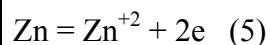
REACCIONES ANÓDICAS.

Durante el ataque corrosivo la reacción anódica siempre es la oxidación de un metal a un estado superior de valencia, por ejemplo las reacciones 1, 2, 3, y 4.



Todas ellas, representan la reducción de los iones hidrógeno a gas hidrógeno y la única diferencia entre ellas, es la naturaleza de sus procesos anódicos de oxidación. Lo anterior permite ver que la reacción por ácidos es muy simple ya que en cada caso, la reacción catódica es simplemente el desprendimiento de gas hidrógeno.

Este desprendimiento de hidrógeno ocurre con una gran variedad de metales y de ácidos, tales como el clorhídrico, sulfúrico, fluorhídrico, acético, fórmico y otros ácidos orgánicos solubles en agua. Separando las reacciones 1, 2, 3 y 4 en reacciones anódicas y catódicas, vemos que las ecuaciones 1 y 2 representan la oxidación del zinc a sus iones, tal como se indica en las siguientes reacciones anódicas:



De acuerdo con estas reacciones, la reacción anódica se puede representar en forma general como sigue:

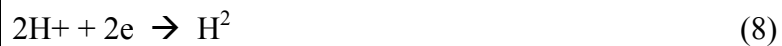


Es decir, la corrosión del metal **M** da por resultado su oxidación para formar iones con valencia **+n** y la liberación de **n** electrones. El valor de **n** depende de la naturaleza del metal, así por ejemplo, la plata es monovalente mientras que otros metales como el fierro, titanio y uranio son polivalentes.

REACCIONES CATÓDICAS.

Hay varias reacciones catódicas que se encuentran durante la corrosión de los metales, tales como las que se enlistan a continuación:

Desprendimiento de hidrógeno



Reducción de oxígeno (en soluciones ácidas)



Reducción de oxígeno (en soluciones neutras o alcalinas)



Reducción de iones metálicos



Depósito de metal



La reducción de iones hidrógeno con desprendimiento de hidrógeno ya fue considerada y no se discutirá más. La reducción del oxígeno, ecuaciones 9 y 10, es una reacción catódica muy común ya que el oxígeno está presente en la atmósfera y las soluciones están expuestas a la misma. La reducción de iones metálicos y el depósito de metales aunque es menos frecuente, causan problemas de corrosión muy severos.

Todas estas reacciones tienen en común que consumen electrones y todas las reacciones de corrosión son simplemente combinaciones de una o más de las reacciones catódicas indicadas, unidas con una reacción anódica.

Durante la corrosión pueden ocurrir más de una reacción de oxidación y de reducción, así por ejemplo, durante el ataque de una aleación, los átomos de los componentes metálicos pasan a la solución en forma de iones, como sucede con la aleación de cromo fierro en donde tanto el cromo como el fierro son oxidados a iones. Al considerar la corrosión del zinc en una solución de ácido clorhídrico conteniendo oxígeno disuelto, (figura 2.15), hay la posibilidad de dos reacciones catódicas; el desprendimiento del hidrógeno y la reducción del oxígeno, por lo que la velocidad de corrosión del zinc se incrementa. Lo anterior indica que las soluciones ácidas conteniendo oxígeno disuelto o expuestas al aire, son generalmente más corrosivas que los ácidos exentos de aire y como conclusión se puede establecer que la remoción del oxígeno de las soluciones ácidas las hace menos corrosivas. Este es un método común para reducir la corrosividad de muchos medios ambientes en los que la remoción del oxígeno puede hacerse por medios químicos o mecánicos.

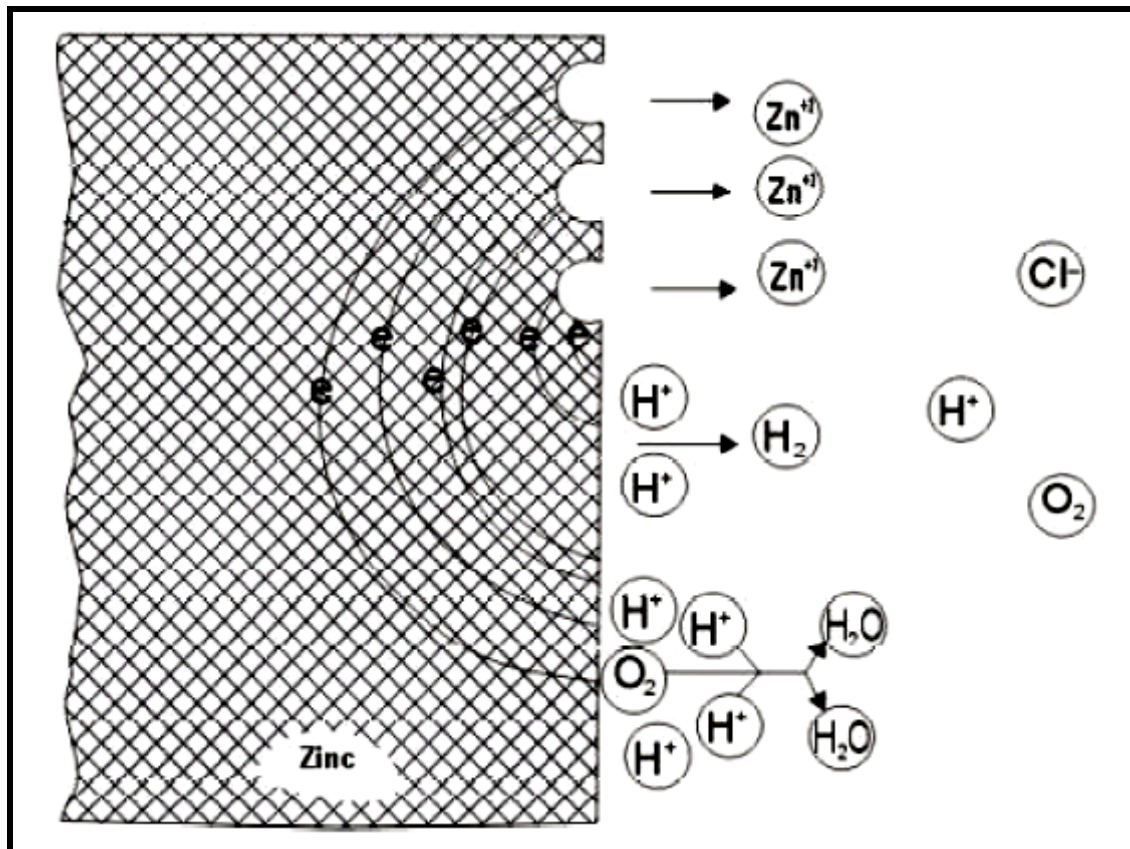


Figura 2.15. Corrosión de zinc metálico en una solución acuosa de ácido clorhídrico

POLARIZACIÓN ELECTROQUÍMICA

La velocidad a la cual se desarrollan las reacciones catódicas y anódicas puede ser determinada por varios métodos físicos y químicos. Cuando una reacción electroquímica se retarda, se dice que esta polarizada y hay dos tipos diferentes de polarización que son: *polarización de activación* y *polarización por concentración*.

La polarización por activación se refiere a aquellos factores retardadores de la reacción que son inherentes a la reacción misma como por ejemplo, la velocidad a la cual los iones hidrógeno se reducen a gas hidrógeno. La polarización por activación, es función de varios factores que incluyen la velocidad de transporte del electrón al ion hidrógeno en la superficie metálica, que naturalmente es inherente de un metal en especial y depende de la

concentración de iones hidrógeno y de la temperatura del sistema, por lo que la velocidad de desprendimiento del hidrógeno es muy diferente para cada metal.

Por otra parte, la polarización por concentración (figura 2.16) se refiere al retardo de la reacción electroquímica como un resultado de los cambios de concentración en la solución adyacente a la superficie metálica.

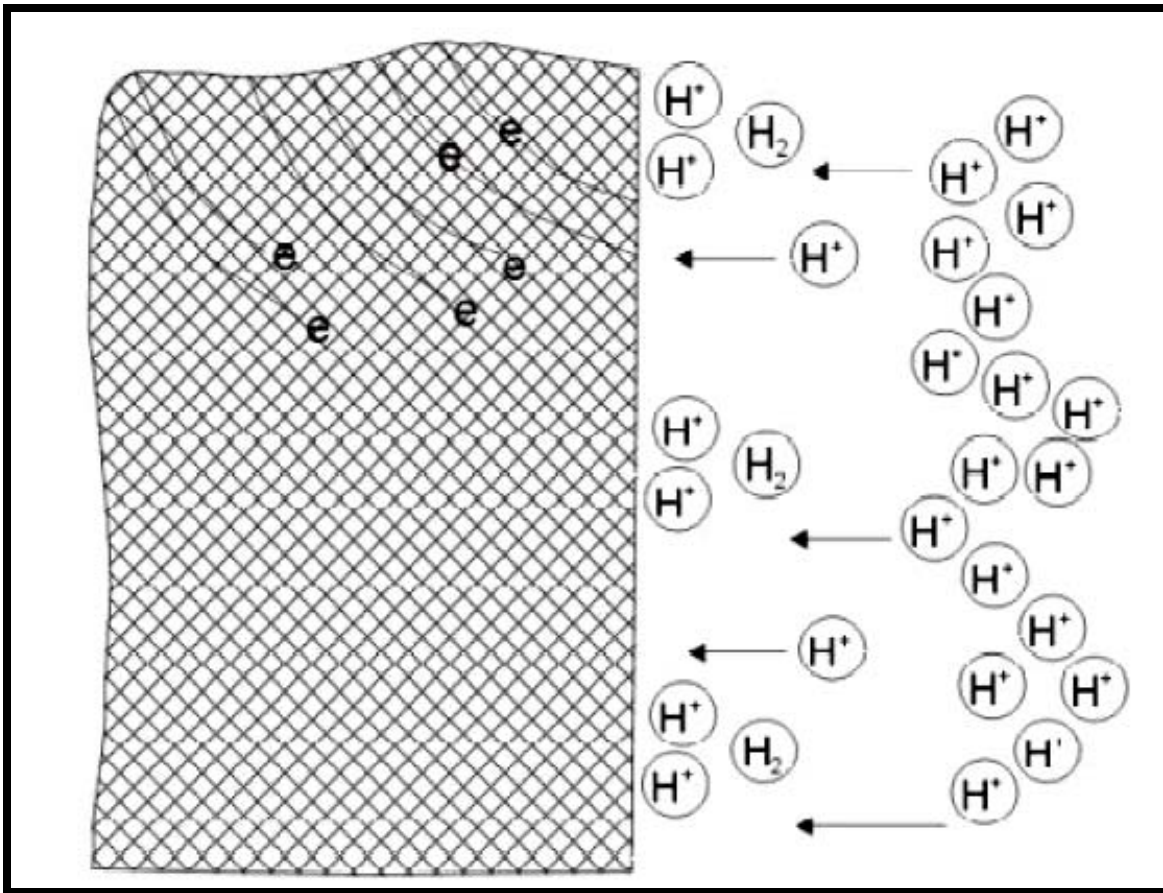


Figura 2.16. Polarización por concentración durante la reacción de reducción de hidrógeno.

Si la reacción procede a muy alta velocidad y la concentración de iones hidrógeno de la solución es baja, se puede ver que la región cercana a la superficie metálica se agota en sus iones hidrógeno puesto que son consumidos en la reacción química. Bajo estas condiciones,

la reacción es controlada por la velocidad de difusión de los iones hidrógeno a la superficie metálica.

La polarización por activación es generalmente el factor que controla la corrosión en ácidos fuertes, mientras que la polarización por concentración predomina cuando la concentración de las especies activas es baja, por ejemplo, en ácidos diluidos o en soluciones salinas y agua con oxígeno, ya que la solubilidad del oxígeno es muy baja en soluciones acuosas y en agua.

El conocimiento del tipo de polarización que se presenta es muy útil ya que permite predecir las características del sistema corrosivo, por ejemplo, entonces cualquier incremento en la velocidad de difusión de las especies activas como H^+ deberá incrementar la velocidad de corrosión y en un sistema de esta naturaleza, la agitación del líquido tiende a incrementar la velocidad de corrosión del metal. Por otra parte, si la reacción catódica se controla por polarización por activación, entonces la agitación no tendrá ningún efecto en la velocidad de corrosión, lo cual confirma que el conocimiento del tipo de polarización presente permite hacer predicciones muy útiles concernientes al efecto relativo que sobre la velocidad de corrosión puede ser producida por el aumento de velocidad de flujo de un líquido en los sistemas objeto de estudio de esta tesis.

POTENCIAL DE CORROSIÓN.

El potencial de un metal que se corroe se determina midiendo la diferencia de potencial existente entre el metal sumergido en un medio corrosivo y un electrodo de referencia apropiado. Este potencial representa el estado termodinámico al cual el proceso de corrosión de un determinado metal se lleva a cabo de manera natural y espontánea.

Los electrodos de referencia más utilizados son el electrodo de calomelanos saturado (ECS), electrodo de cobre – sulfato de cobre ($Cu/CUSO_4$), plata – cloruro de plata ($Ag/AgCl$) y el electrodo normal de hidrógeno (ENH).

La medición de la diferencia de potencial entre el metal que se corroe y el electrodo de referencia se lleva a cabo con la ayuda de un potenciómetro (figura 2.17)

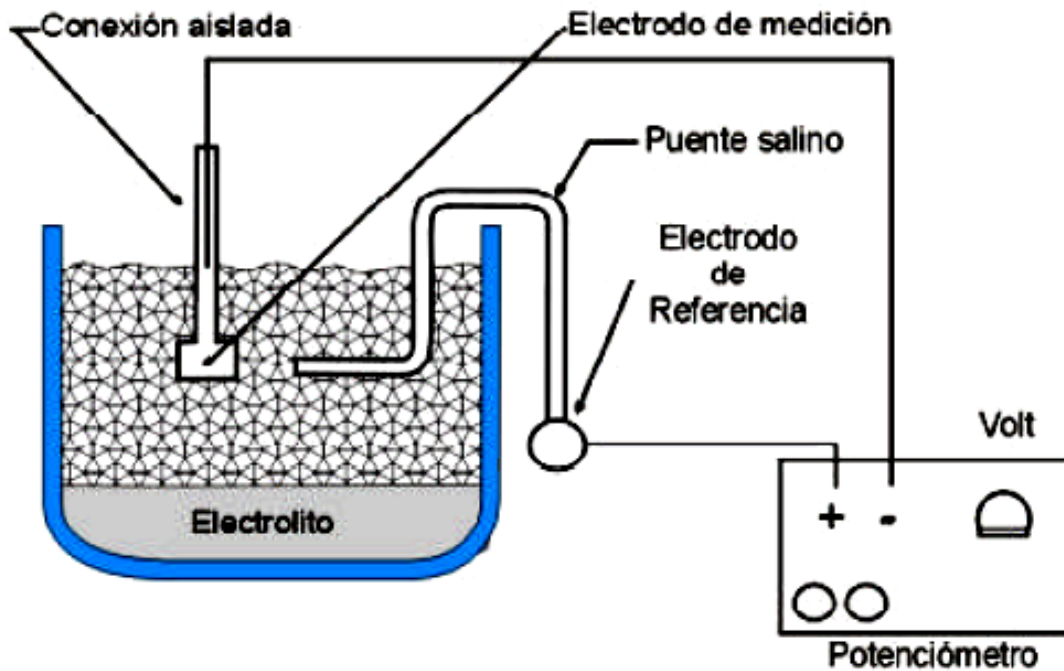


Figura 2.17. Arreglo potenciométrico para la medición del potencial de corrosión.

Al medir y reportar los potenciales de corrosión es necesario indicar la magnitud y el signo de voltaje obtenido. La magnitud y el signo del potencial de corrosión es una función del metal, composición del electrolito y temperatura y agitación del mismo.

POTENCIALES DE OXIDO REDUCCIÓN.

El potencial de óxido reducción se refiere al potencial relativo de una reacción electroquímica en condiciones de equilibrio por lo que las reacciones deben proceder a la misma velocidad en ambas direcciones. Estos potenciales también son conocidos con el nombre de potenciales **Redox**, potencial de media celda y serie de fuerzas electromotrices. En la Tabla 2.5 se muestran algunos de los potenciales Redox a 25 C.

$\text{Au} = \text{Au}^{+3} + 3\text{e}$	1.42	Noble
$\text{Pt} = \text{Pt}^{+2} + 2\text{e}$	1.2	
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e} = 2\text{H}_2\text{O}$	1.23	
$\text{Pd} = \text{Pd}^{++} + 2\text{e}$	0.83	
$\text{Ag} = \text{Ag}^+ + \text{e}$	0.799	
$2\text{Hg} = \text{Hg}_2^{++} + 2\text{e}$	0.798	
$\text{Fe}^{+3} + \text{e} = \text{Fe}^{+2}$	0.771	
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} = 4\text{OH}$	0.401	Referencia
$\text{Cu} = \text{Cu}^{+2} + 2\text{e}$	0.34	
$\text{Sn}^{+4} + 2\text{e} = \text{Sn}^{+2}$	0.154	
$2\text{H}^+ + 2\text{e} = \text{H}_2$	0.000	
$\text{Pb} = \text{Pb}^{+2} + 2\text{e}$	-0.126	
$\text{Sn} = \text{Sn}^{+2} + 2\text{e}$	-0.140	
$\text{Ni} = \text{Ni}^{+2} + 2\text{e}$	-0.23	
$\text{Co} = \text{Co}^{+2} + 2\text{e}$	-0.27	
$\text{Cd} = \text{Cd}^{+2} + 2\text{e}$	-0.402	
$\text{Fe} = \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}$	-0.44	
$\text{Cr} = \text{Cr}^{+3} + 3\text{e}$	-0.71	
$\text{Zn} = \text{Zn}^{+2} + 2\text{e}$	-0.763	
$\text{Al} = \text{Al}^{+3} + 3\text{e}$	-1.66	Activo
$\text{Mg} = \text{Mg}^{+2} + 2\text{e}$	-2.38	
$\text{Na} = \text{Na}^+ + \text{e}$	-0.71	
$\text{K} = \text{K}^+ + \text{e}$	-2.92	

Tabla 2.5. Potenciales estándar de oxidación reducción (Redox) a 25 C.

DIAGRAMAS DE POTENCIAL ION pH.

El uso de los potenciales **Redox** puede ser extendido, graficando los potenciales **Redox** como función del pH de la solución. Estos diagramas se conocen como *Diagramas de Pourbaix* y se elaboran utilizando cálculos electroquímicos, datos de solubilidad y constantes de equilibrio. Es necesario recordar que el pH es simplemente el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno de tal manera que un pH de 7 indica que se tiene 10^{-7} iones gramo de hidrógeno por litro de solución y corresponde a una solución neutra, mientras que un pH = 0 representa una solución muy ácida y un pH = 14, es una solución muy alcalina.

El diagrama de Pourbaix para el sistema Fe – H₂O (figura 2.18) permite ver que a potenciales más positivos que -0.6 volts y pH menor que nueve, los iones ferrosos son la sustancia estable por lo que el hierro deberá corroerse en estas condiciones suministrando iones Fe⁺².

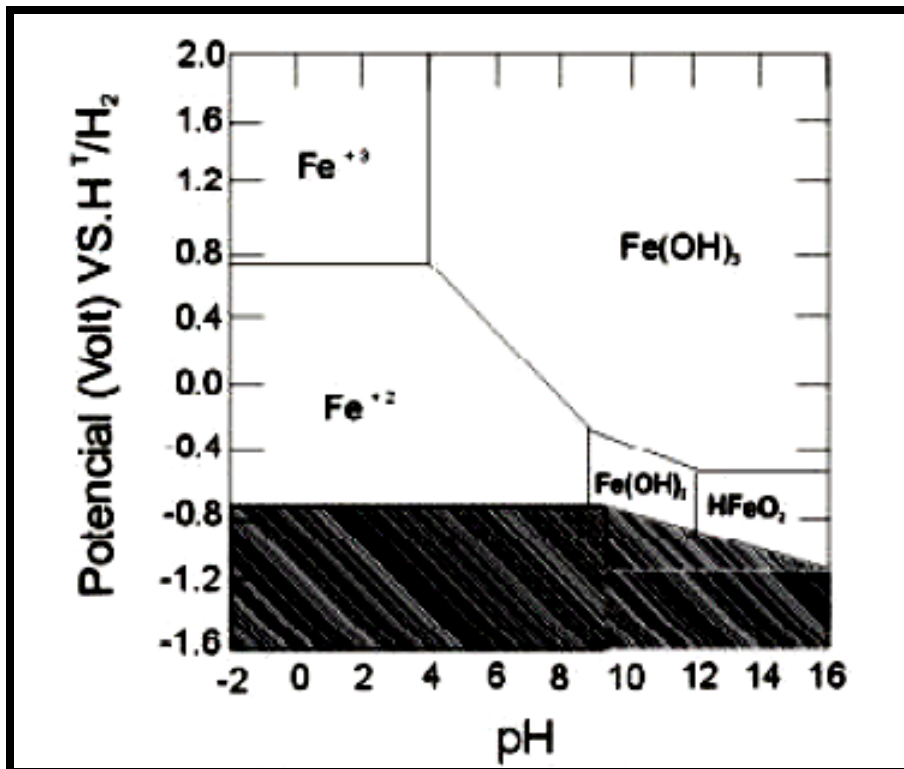


Figura 2.18. Diagrama de Pourbaix para el sistema hierro agua

En otras regiones del diagrama se puede ver que la corrosión del hierro produce iones férricos, hidróxido ferroso y en condiciones muy alcalinas iones complejos de hierro. El principal uso de los diagramas de Pourbaix, que pueden ser constituidos para todos los metales son:

- Predecir si hay o no corrosión.
- Estimar la composición de los productos de la corrosión.
- Predecir cambios del medio ambiente que ayuden a prevenir o reducir el ataque corrosivo.

En el diagrama de Pourbaix en el sistema hierro agua, la región oscura indica que el hierro no se corroe bajo estas condiciones de potencial y pH, es decir si el potencial de corrosión del hierro se hace suficientemente negativo, por ejemplo -1.2 volts, el hierro no se corroerá en ningún sistema que varíe desde pH muy ácido hasta pH muy básico.

PASIVIDAD DE METALES

La pasividad de los metales es un fenómeno conocido desde hace más de siglo y medio. Se estudió principalmente en hierro, teniéndoselo por un fenómeno curioso, porque el metal se comporta como si fuera noble en condiciones en que cabría esperar fuera atacado muy severamente. En 1836 Faraday atribuye el fenómeno a la formación de una fina película de óxido sobre la superficie metálica, y tal explicación sigue aún vigente.-

Además del hierro, muchos otros metales presentar este fenómeno de la pasividad. En todos los casos se observa una característica común: la pasividad aparece por encima de un cierto potencial, llamado potencial de Flade. La pasivación puede lograrse aplicando una corriente exterior o usando un oxidante lo bastante enérgico para hacer que el metal adquiera un potencial superior al de Flade.

MECANISMOS DE PASIVACIÓN

En la mayoría de los casos prácticos parece bien establecido que la pasividad se mantiene por una película superficial, probablemente de óxido, o tal vez de algún otro compuesto. En todos estos casos parece tratarse de una película tridimensional de espesor definido.-

Lo que no parece totalmente aclarado es el mecanismo de transición del estado activo al estado pasivo. En ciertos casos (Ag en Cl⁻, Pb en SO₄⁼), se sabe que se forman núcleos del producto pasivante que se extienden y llegan a recubrir por completo la superficie metálica. Sin embargo, en un gran número de casos, en particular los del hierro y el acero inoxidable, la explicación de la pasivación como proceso de nucleación y crecimiento de óxido no parece suficiente por la rapidez del proceso; se cree que en tales casos la pasivación aparece por formación de una monocapa de óxido o hidróxido del metal en disolución.-

POTENCIAL DE PASIVACIÓN

La pasivación aparece a un potencial determinado, el potencial de Flade, que varía según el metal y el medio corrosivo considerado. Se han hecho muchos estudios para relacionar el valor de este potencial con el mecanismo de pasivación. Se cree que el potencial de Flade varía con el pH de las soluciones. El hecho de obtener la misma dependencia del potencial de Flade con un pH en diferentes metales sugiere estar en presencia de un electrodo del tipo metal / óxido. La reacción que se supone ocurre en dicho electrodo puede ser:



ESTRUCTURA DE LA PELÍCULA PASIVANTE

La estructura de la película pasivante es en general la más estable desde el punto de vista termodinámico del sistema. Pero suele ocurrir también que de las formas posibles de material anódico, la que compone la película no sea precisamente estable. Tal es el caso cuando se forman óxidos amorfos o cuando se forma el óxido en condiciones en las que el

hidróxido es termodinámicamente más estable. El hecho de que el producto anódico sea el óxido y no el hidróxido se puede explicar mediante una reacción del tipo:



Que podría llevar a la deshidratación del hidróxido. La película pasivante puede ser compleja y tener varios compuestos de distinta distribución.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS EXPERIMENTALES, RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Análisis Químico del Ambiente Corrosivo.

Los resultados que arrojaron los análisis practicados al agua cruda del Río Colorado muestran que se trata de un ambiente corrosivo, debido a su alto contenido de materia orgánica, sulfatos y cloruros principalmente. Las concentraciones de estos aniones activos favorecen que las películas de productos de corrosión no muestren comportamientos pasivos estables y con ello el proceso de corrosión se mantiene continuo y activo.

Tabla .3.1 Calidad del agua utilizada para los ensayos de cavitación.

Determinación	Resultado	Unidad
Alcalinidad por bicarbonatos	204.75	mg/L
Alcalinidad por carbonatos	0.0	mg/L
Cloruros	202.35	mg/L
Conductividad	1.353	mmho/cm
Dureza total	380	mg/L
Hierro total	1.21	mg/L
pH	7.41	---
Silicio	10.0	mg/L
Sólidos sedimentables	5.0	mg/L
Sólidos totales disueltos	6,880	mg/L
Turbidez	225	NTU

FUENTE: Laboratorio Químico y Ambiental, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. Dic./ 2000.

Estos resultados indican que se trata de agua corrosiva, debido a su contenido de cloruros y a al pH casi neutro, con tendencia a formar picaduras en los metales, aun en aceros inoxidable del tipo AISI-304.

3.2. Ensayos de electroquímicos de corrosión asistidos por vibración inducida.

El dispositivo experimental diseñado para este trabajo tiene un buen comportamiento y dio resultados confiables sin presentar fallas mecánicas durante su operación y manteniendo un buen control de las condiciones de los experimentos.

Todos los metales y aleaciones ensayados fallaron por cavitación inducida por vibración. La frecuencia de trabajo tuvo un valor de aproximadamente de 20 kHz, lo cual es cerca de tres veces respecto el valor estándar que es de 7 kHz (17). Con esta frecuencia se pudo inducir una vibración lo suficientemente fuerte como para ocasionar daño por cavitación en los metales ensayados.

La formación de burbujas y las implosiones de las mismas sobre la superficie de los metales, es observable a simple vista, esto debido a que la alta frecuencia de vibración utilizada generó un patrón de flujo turbulento, desde los primeros instantes del ensayo. Esto indica que en 60 minutos de ensayo, ya se puede tener un deterioro por cavitación sobre la superficie metálica de trabajo. Lo cual es congruente también con los resultados obtenidos en los ensayos electroquímicos de corrosión practicados ya que la remoción constante de la capa superficial en el metal, durante el experimento, favoreció a otras formas de corrosión en ese mismo medio ambiente, acelerando la velocidad de la misma.

En la Figura 3.1 se puede observar físicamente la formación de burbujas promoviendo el proceso de cavitación durante un ensayo de laboratorio.

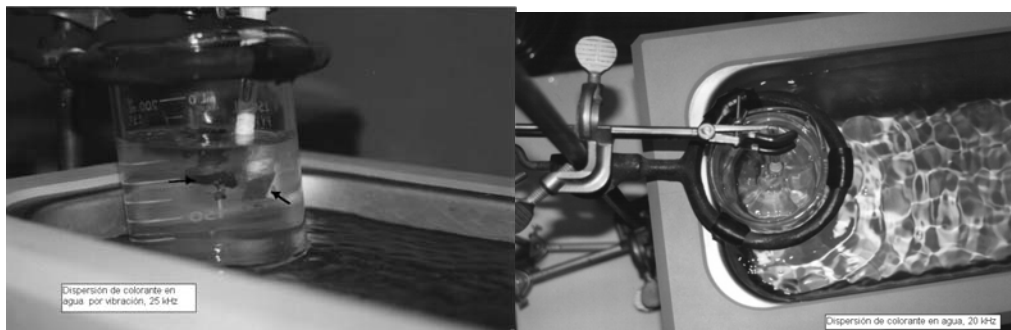


Figura 3.1. Se muestra la formación de burbujas, liberando los gases disueltos en el agua, y junto al metal se observan burbujas que se forman e implotan.

Los arreglos instrumentales se hicieron acoplando la interfase electroquímica, la microcomputadora y la celda de experimentación, y el lenguaje de comunicación y control del experimento fue el programa Gamry-CMS 105®.



Figura 3.2 Equipos que se emplearon para los experimentos, se observan las conexiones a los tres electrodos empleados en la celda electroquímica de cavitación.

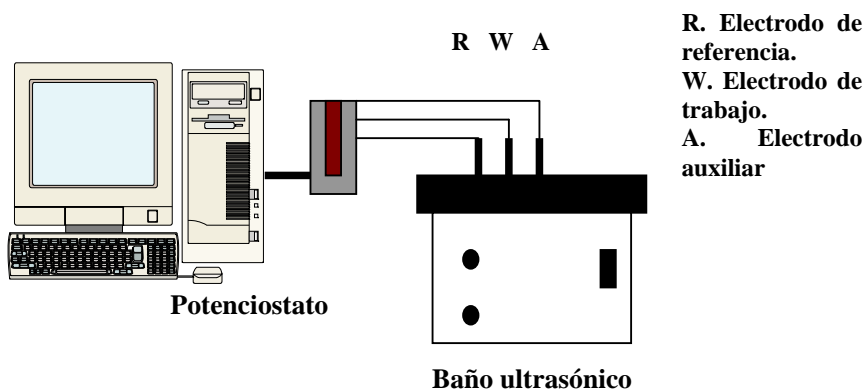


Figura 3.3 Arreglo experimental de la figura anterior, donde se indica la colocación de los equipos que se emplearon para las pruebas y las conexiones a los tres electrodos empleados en la celda electroquímica de cavitación en el baño ultrasónico.

3.2.1. Procedimientos experimentales

Todos los procedimientos de inducción de la cavitación se hicieron siguiendo recomendaciones normalizadas en el estándar ASTM G 32-85 (17), el que se basa en la

generación y colapso de burbujas de cavitación, sobre una superficie vibrando a alta frecuencia. Y se utiliza para evaluar la resistencia relativa de diferentes materiales frente a la erosión-cavitación, Figuras 3.1 a la 3.3.

Muestras de prueba.

Se prepararon 3 muestras de cada metal, con dimensiones mínimas de 15.9 mm de diámetro y no menos de 3.2 mm de espesor, el acabado superficial se estandarizó con lija de carburo de silicio No. 120 y pulido metalográfico con alúmina de 0.05 micras.

Aparato de prueba.

Se usó un aparato que genera ultrasonido, el cual cuenta con un sistema piezoeléctrico para producir las vibraciones de hasta 20 kHz. La amplitud de onda fue de aproximadamente $0.05 \text{ mm} \pm 5\%$, con lo que produce una oscilación axial en la superficie de las muestras. Estas fueron sumergidas en el medio de prueba y conectadas con alambre conductor cubierto por un tubo de vidrio *Pyrex*® de 6.4 mm de diámetro, sellando los aislamientos con plastilina. La superficie máxima de prueba fue de 200 mm^2 .

Condiciones de prueba

El líquido empleado fue agua natural del Río Colorado, ya que esta agua es la que se maneja en las principales estaciones de bombeo de Baja California, México. Este medio se mantuvo a una temperatura constante de $27 \text{ }^\circ\text{C}$.

Las muestras fueron limpiadas con acetona para desengrasar cualquier vestigio de contaminación, después de la preparación superficial a lija grado 120, siguiendo el procedimiento estandarizados para la preparación metalográfica. Las muestras metálicas se introdujeron en el agua, hasta una profundidad de 4 a 12 mm por debajo de la superficie líquida.

Este procedimiento se repitió por separado en cada metal de prueba, con el objeto de no contaminar con productos de corrosión a los demás metales. El tiempo de prueba fue de 2 horas en todos los casos, ya que se buscó encontrar el efecto de la vibración en la aparición de daños por cavitación, y los períodos de inmersión totales fueron de aproximadamente 200 horas en cada caso.

Para registrar los resultados de los ensayos, se tomó la siguiente información en cada prueba:

- Tipo de aleación, condición metalúrgica, composición y propiedades mecánicas.
- La rugosidad inicial corresponde al acabado metalográfico con lija grado 120 y pulido metalográfico en alúmina de 0.05 micras, por lo que se tuvo una rugosidad aproximada de 10^{-6} a 10^{-7} metros.
- El número de muestras en todos los casos fueron 3.
- Se realizó la observación microscópica a bajos y altos aumentos, utilizando respectivamente técnicas de campo claro con microscopía óptica y microscopía de electrones en microsonda.
- La velocidad de corrosión se estimó por medio de curvas de polarización electroquímica, usando las técnicas de Tafel y Polarización por Resistencia.

3.2.2 Corrosión cavitación inducida

Las muestras metálicas se colocaron en un baño de ultrasonido (250 NEY), se escogió la frecuencia de 20 kHz constantes, de manera que la vibración producida sobre las superficies fue capaz de inducir cavitación, lo que favoreció a la velocidad de corrosión. Las pruebas se hicieron bajo las recomendaciones estándar ASTM G32-85 (17).

El área de las muestras fue de 1 cm^2 , las que se conectaron por medio de un alambre de cobre aislado y protegido en un tubo de vidrio, el cual sirvió como el electrodo de trabajo durante las pruebas de polarización potenciodinámicas. La celda electroquímica utilizada para las mediciones consistió de un recipiente de vidrio *Pyrex*, usando una barra de grafito y platino como electrodo auxiliar y un electrodo de calomel saturado con KCl (SCE) sirvió de electrodo de referencia. La velocidad de barrido fue de 5 mV/s,

y el equipo usado para hacer las mediciones electroquímicas fue un Potenciostato Gamry PC4, para calcular el registro de resistencia de polarización y la velocidad de corrosión. Los datos fueron tratados y analizados con el programa CMS 105. La temperatura fue constante de 27 °C, bajo el control de temperatura en el laboratorio.

El rango de polarización eléctrica de cada muestra varió entre -1.0 a 1.0 V y también de -0.5 a 0.5 V vs E_{ref} , dependiendo del material a evaluar. La solución usada para llenar la celda fue agua cruda obtenida de un canal de irrigación que deriva del Río Colorado. El arreglo experimental se muestra en la Figura 3.2.3.

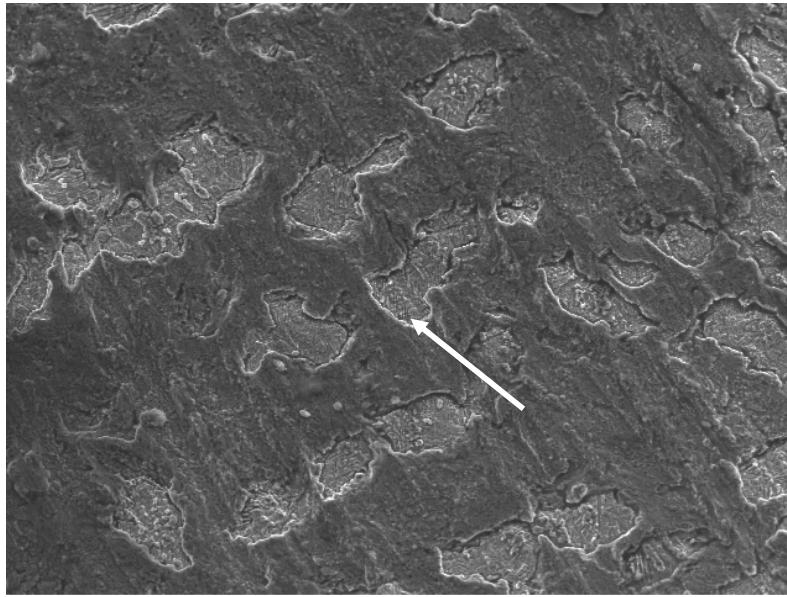
Microscopía Óptica.

Después de los experimentos de corrosión, cada muestra fue recuperada y separada del alambre de cobre, enjuagada con agua destilada y secada con aire caliente. Se montó usando en un porta-objetos de vidrio para poder observar cada muestra en el microscopio. El equipo usado en esta fase fue un microscopio metalográfico de platina invertida marca Swift Instruments, Modelo MT-1021. Las observaciones se hicieron en campo claro, desde 100X hasta 400X, con el objeto de encontrar las evidencias del deterioro. Las imágenes de interés se capturaron con cámara *reflex* de 35 mm y cámara digital.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

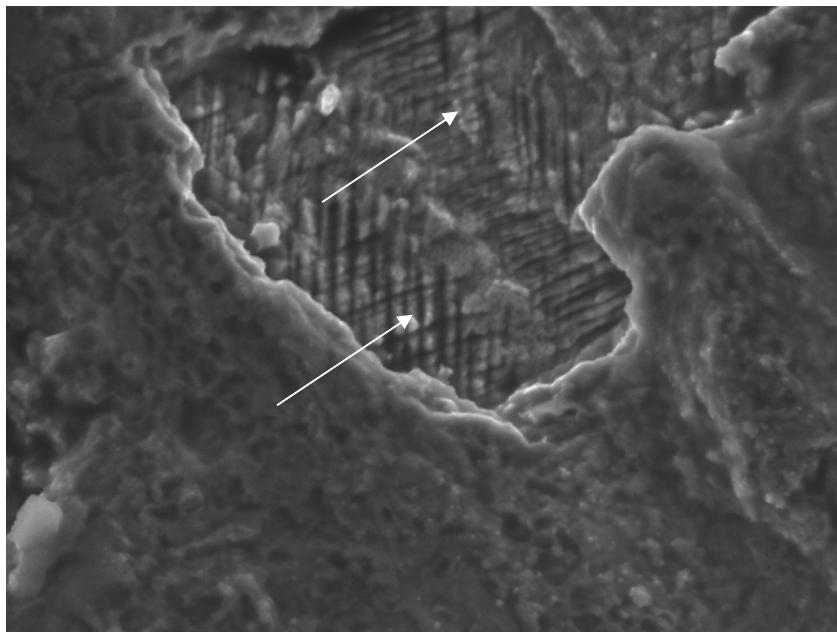
Las muestras se guardaron en un desecador con cloruro de calcio y así se transportaron para su inspección bajo el microscopio electrónico de barrido, las muestras no se les dio ningún tipo de preparación superficial. El equipo utilizado consistió de un SEM marca JEOL 4100, capaz de analizar con electrones secundarios o bien realizar análisis elemental con Rayos X. Las muestras fueron observadas hasta detalles en campo claro de menos de 10 micras.

3.3. Resultados del análisis de superficies por microscopía de electrones.



60 μ m

Fig. 3.4. Morfología de la muestra de bronce de impelente cavitado, se observan las zonas más claras en donde el material ha sido desprendido dejando al metal desnudo y acelerando la corrosión general. La muestra se observó sin preparación superficial.



8 μ m

Fig. 3.5. La muestra anterior se observa a unas 8 veces más amplia, en el fondo de la huella de corrosión, se observan los apilamientos cristalinos del metal con geometría regular en los que continúa la corrosión general.

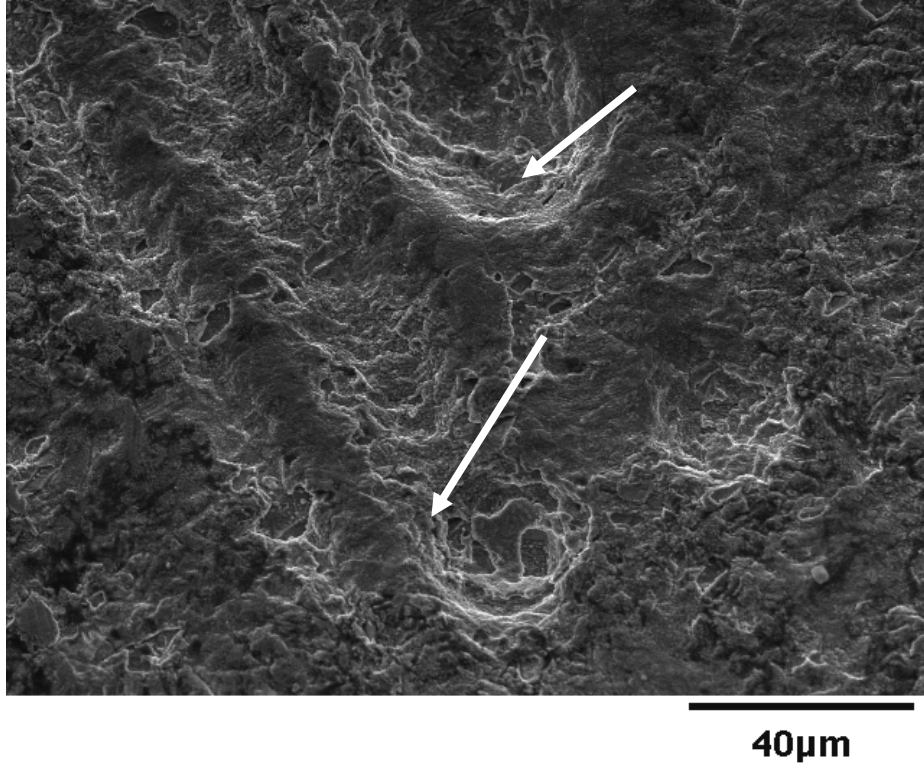


Fig. 3.6. Se observa otro detalle, en el fondo de las huellas de corrosión - cavitación, nótese los apilamientos cristalinos de metal corroído y la deformación mecánica originada por la cavitación.

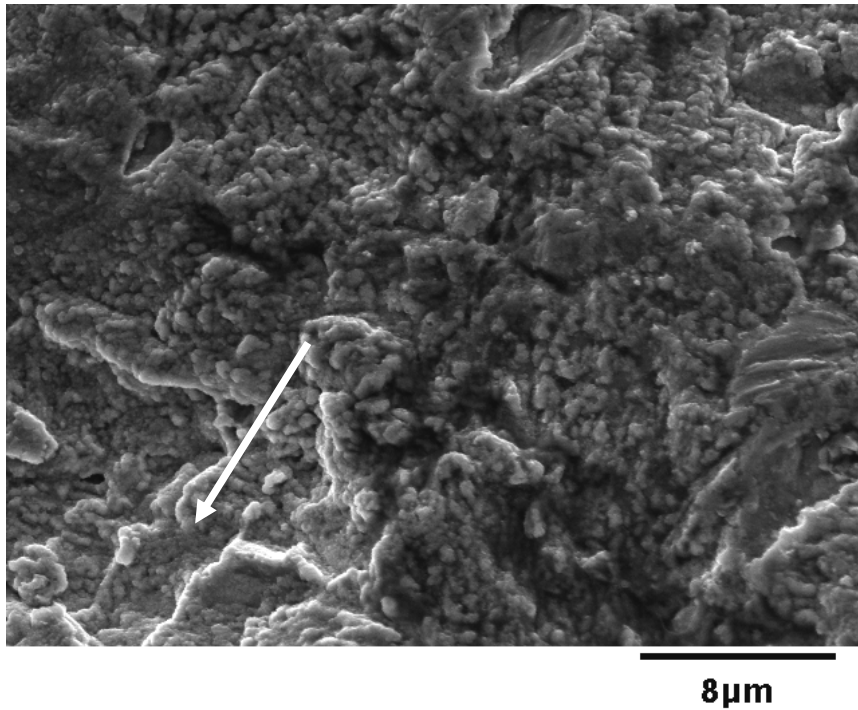


Fig. 3.7. Morfología a mayor detalle de la figura anterior, se observan los productos de corrosión y los escalonamientos de las capas de productos formados.

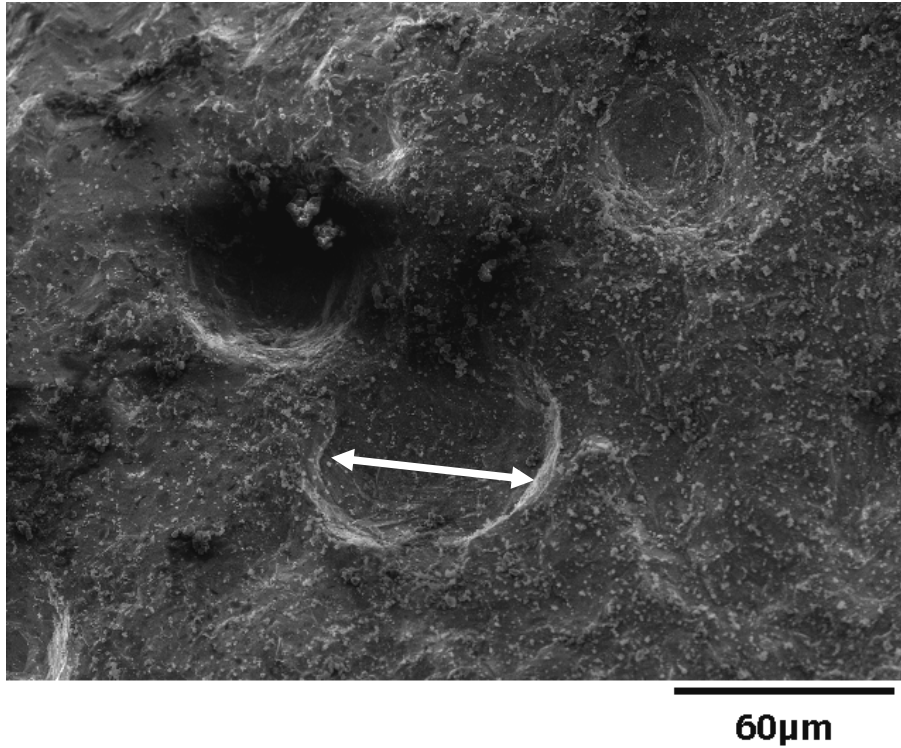


Fig. 3.8 Morfología de cavitación en el acero al carbono de baja aleación, cada hueco equivale en diámetro a unas 20 000 celdas cristalinas del metal.

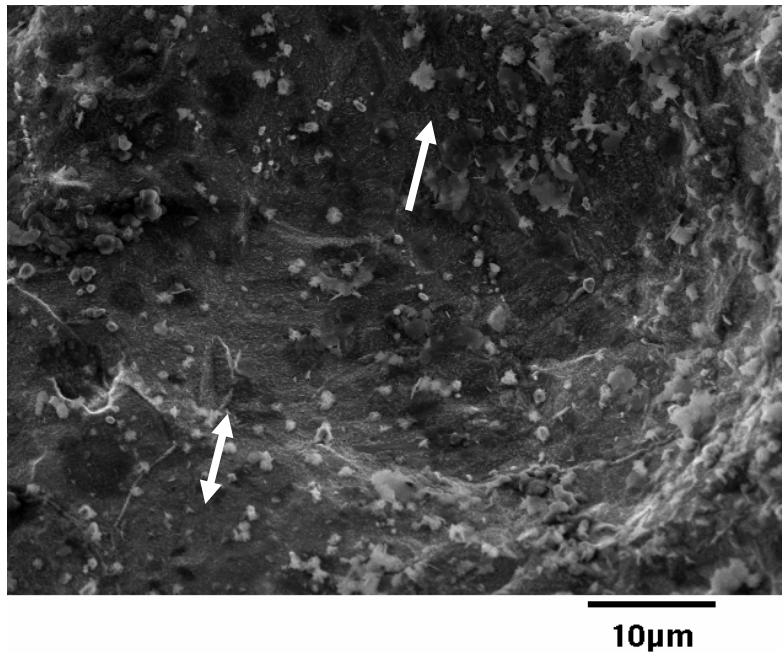
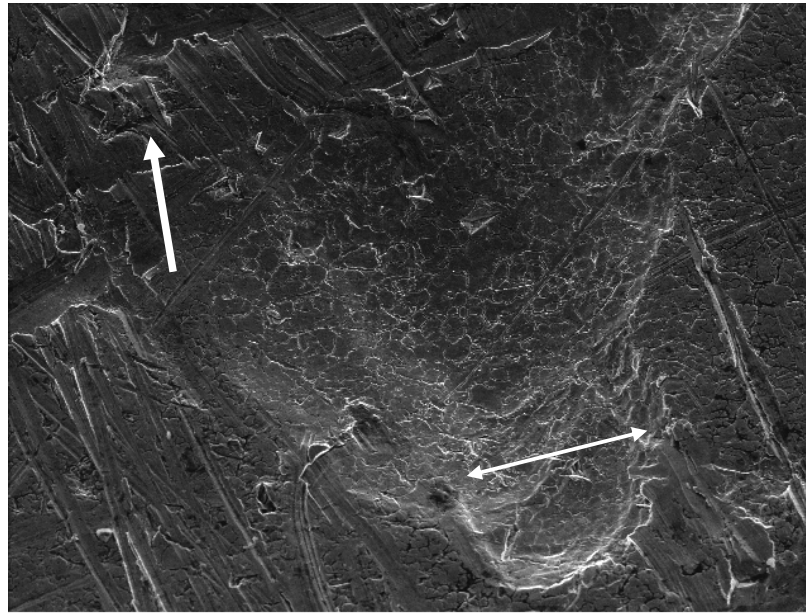
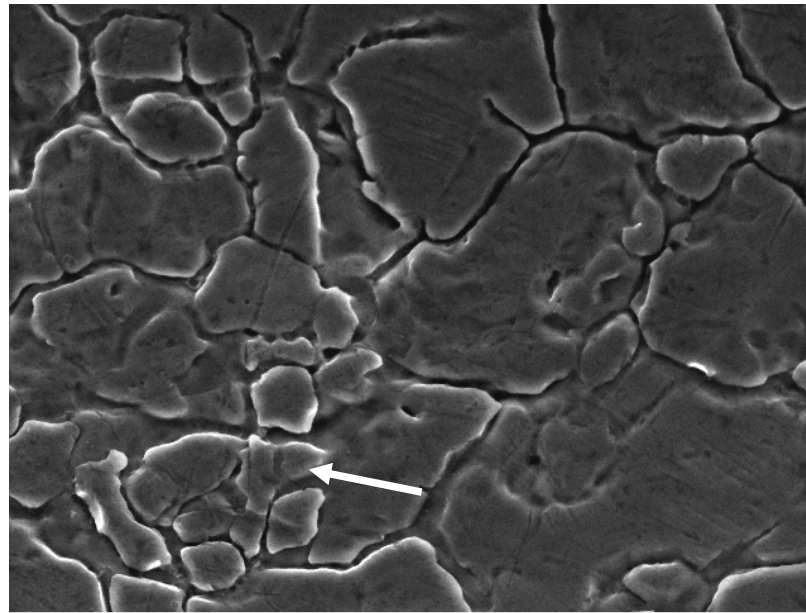


Fig. 3.9 Morfología de cavitación en el acero al carbono de baja aleación de la figura anterior. Se pueden observar detalles a nivel de unas 1 000 celdas cristalinas del metal. Las partículas de color claro son óxidos del metal que no son conductores de la electricidad



80 μ m

Fig. 3.10. Morfología de cavitación en el acero inoxidable austenítico, el hueco que se señala equivale en diámetro a unas 40000 celdas cristalinas del metal y está parcialmente cubierto con óxidos no conductores, nótese la deformación plástica en los bordes, ocasionada por la cavitación. En el extremo izquierdo se observa la destrucción del límite de grano austenítico



8 μ m

Fig. 3.11. Detalle de la figura anterior en que se observa la destrucción masiva de los límites de grano, donde existe siempre un descenso de energía libre que favorece la corrosión. El fenómeno se acelera por la cavitación que remueve los productos formados dejando el metal desnudo.

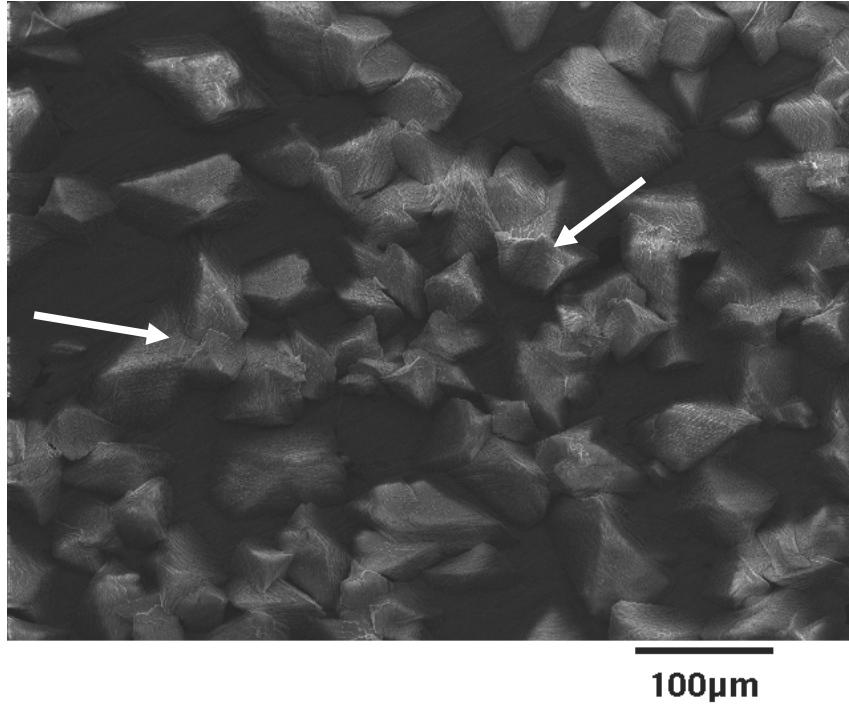


Fig. 3.12. Morfología de cavitación en el acero martensítico inoxidable 416. Se observan los límites granulares del metal en una estructura aparentemente frágil

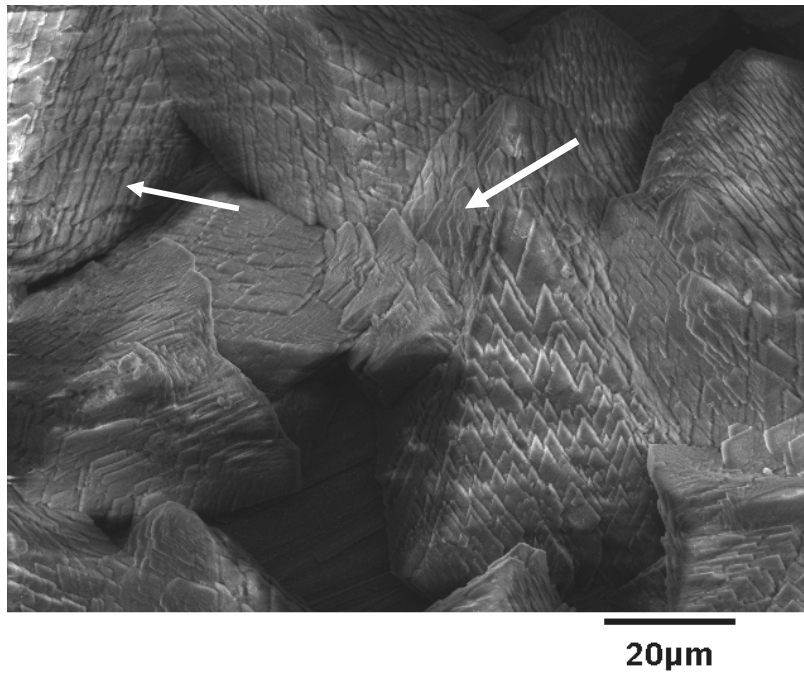
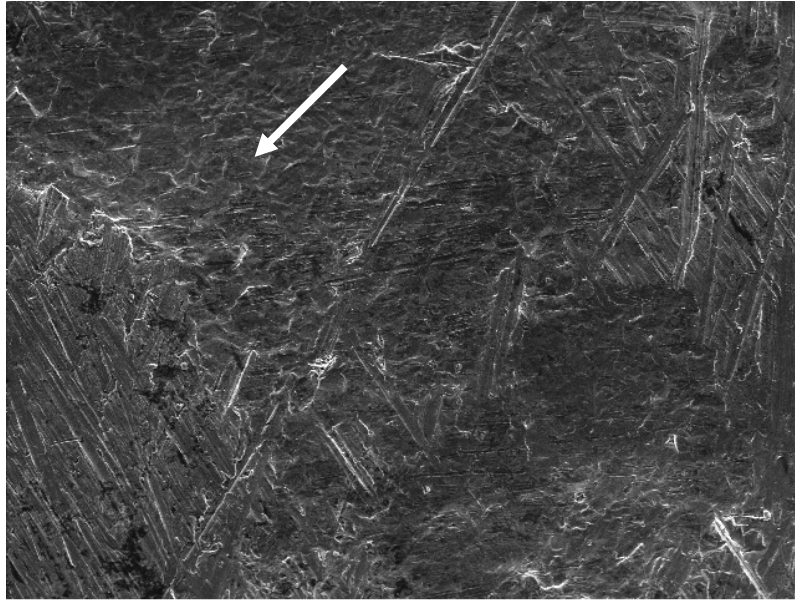
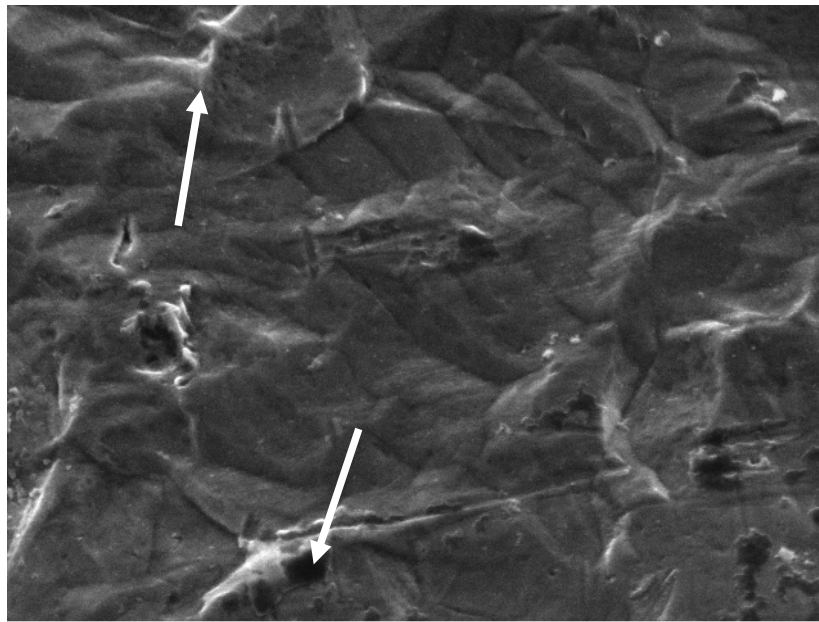


Fig. 3.13. Morfología de cavitación en el acero martensítico inoxidable 416. Nótese que ahora los límites granulares se definen con mayor claridad en el metal. La deformación plástica ocurrió fundamentalmente por clivaje en una estructura aparentemente frágil, debido a la naturaleza de la martensita. La corrosión general se ve favorecida fuertemente por este fenómeno.



80 μ m

Fig. 3.14. Estado final de la prueba en titanio cavitado, se notan pequeñas deformaciones plásticas en la periferia de los huecos producidos por la cavitación.



8 μ m

Fig. 3.15. De la figura anterior, se muestra a detalle en la parte inferior, el desprendimiento mecánico del metal y en la parte superior se muestra el acumulamiento del mismo por deformación plástica, ambos fenómenos son originados por la cavitación, favoreciendo la corrosión general.

3.4. Resultados de microscopía óptica

Se utilizó un microscopio metalográfico convencional de platina invertida para la observación en campo claro de los metales ensayados, a las superficies no se les dio ningún tratamiento. Las observaciones se auxiliaron de una fuente de luz blanca con movimiento rotacional para encontrar los contrastes topográficos de las superficies dañadas por la vibración inducida en la celda de cavitación y corrosión electroquímica.

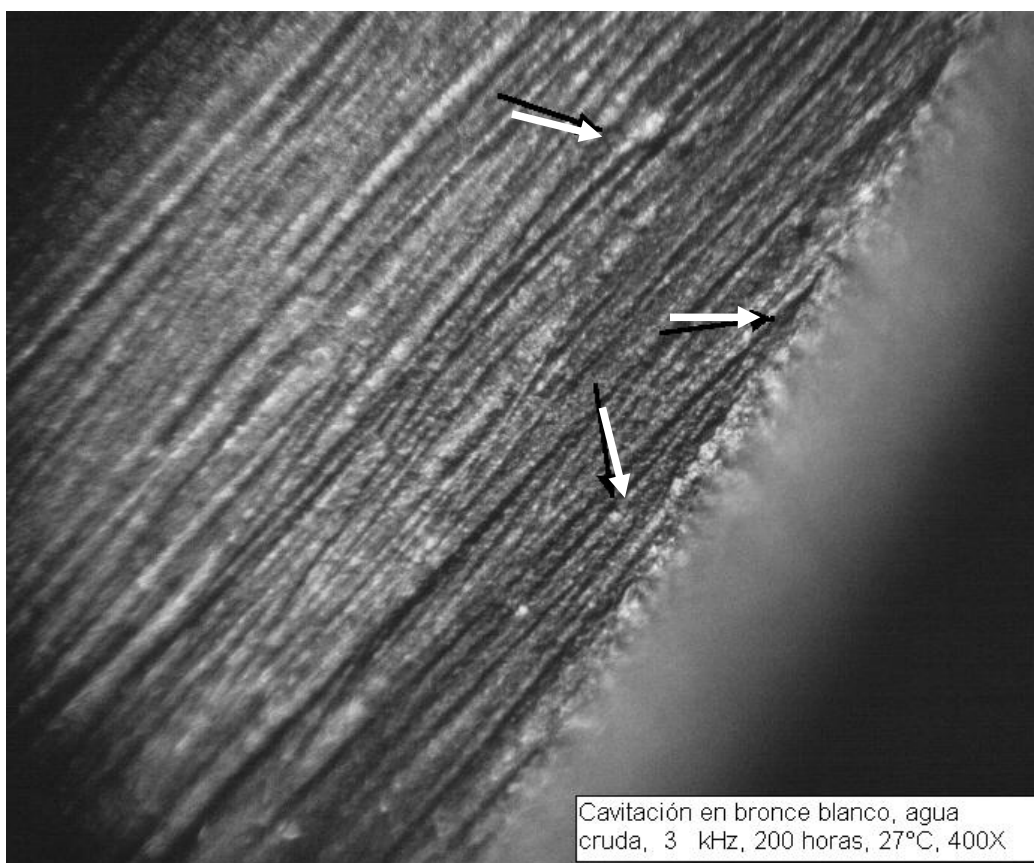


Fig. 3.16. Morfología de corrosión cavitación en el bronce, se señalan los sitios donde es más evidente el daño superficial, en el borde de la muestra se alcanzan a distinguir algunos huecos característicos de la cavitación, favoreciendo la corrosión general.

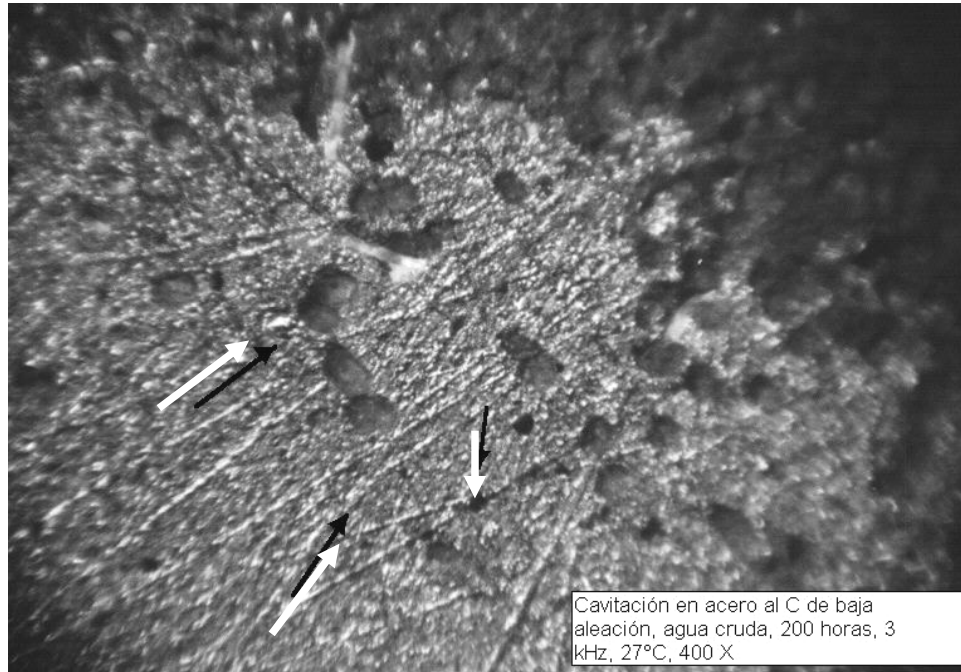


Fig. 3.17. Morfología de corrosión cavitación en el acero al carbono, nótese los sitios donde es más evidente el daño superficial, se observan huecos característicos de la cavitación. Los acumulamientos semiesféricos oscuros, son productos de la corrosión inducida al metal

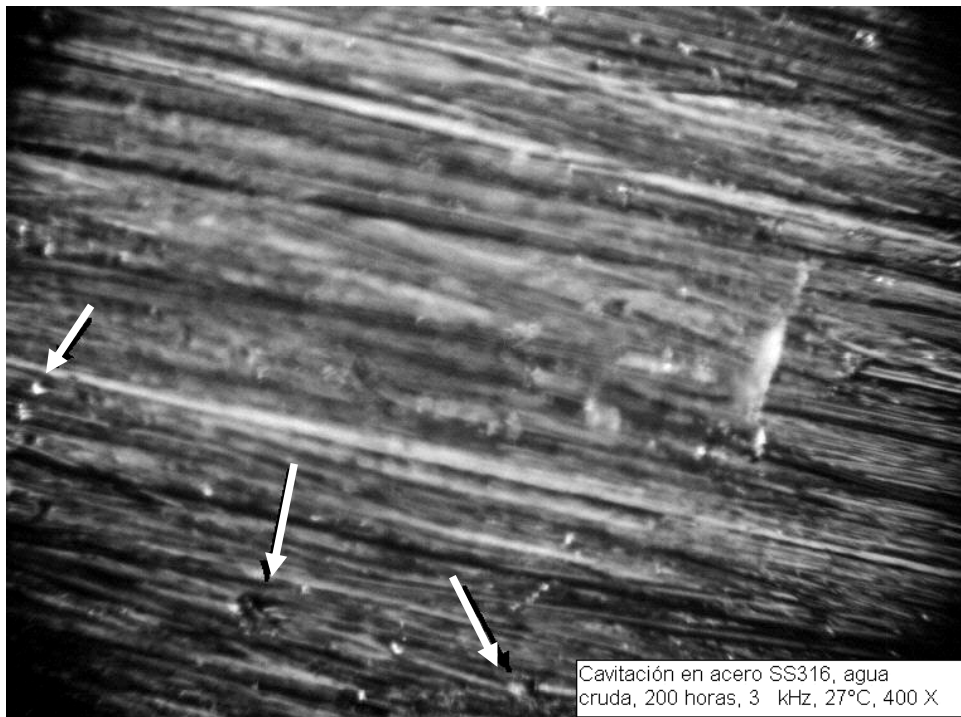


Fig. 3.18. Morfología de corrosión cavitación en acero inoxidable austenítico AISI 316, se muestran las cavidades originadas por la vibración inducida. La superficie interior de las mismas es brillante, debido a la fatiga del material que removió la oscilación en la celda de prueba a 20 kHz.

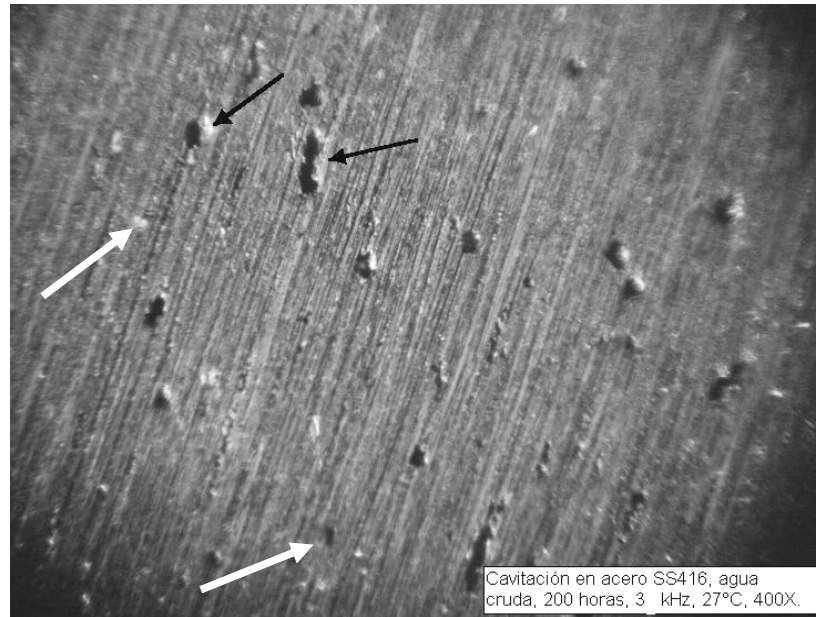


Fig. 3.20. En el acero martensítico AISI 416 también se presentó la cavitación, señalada en color blanco y con flecha negra se muestran los productos de la corrosión que eventualmente serán removidos por la vibración inducida al metal.

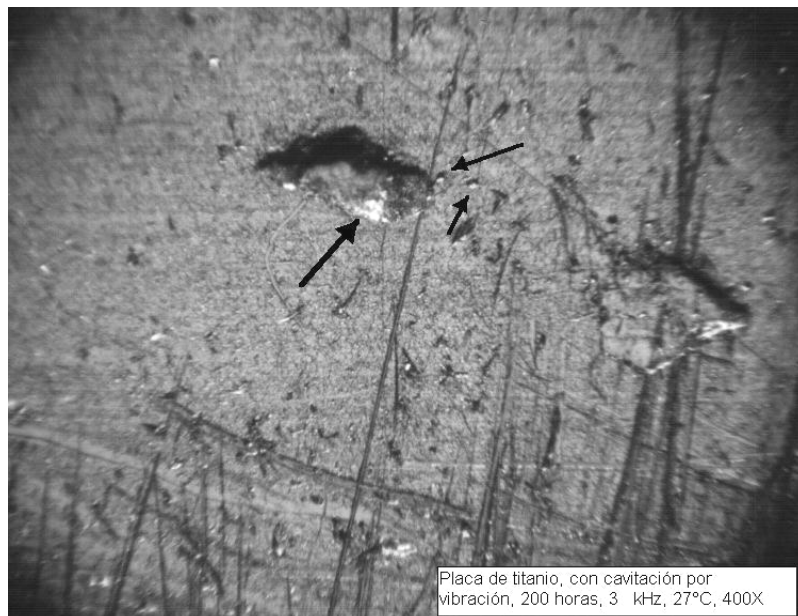


Fig. 3.21. El titanio muestra evidencias del avance de la cavitación, encontrando pequeños huecos señalados con flechas pequeñas. Nótese que existen otros huecos con textura interior brillante y el avance del daño muestra al centro de la figura una cavidad más grande con superficie interior brillante por el daño mecánico originado por la vibración inducida.

3.5 Resultados electroquímicos

En el Anexo “A” se reportan las graficas obtenidas de los ensayos electroquímicos, y los resultados de velocidad de corrosión se muestran en la Tabla 3.1.

Las curvas de corrosión características con el correspondiente ajuste matemático se presentan como ejemplo en las Figuras 3.22. y 3.23.

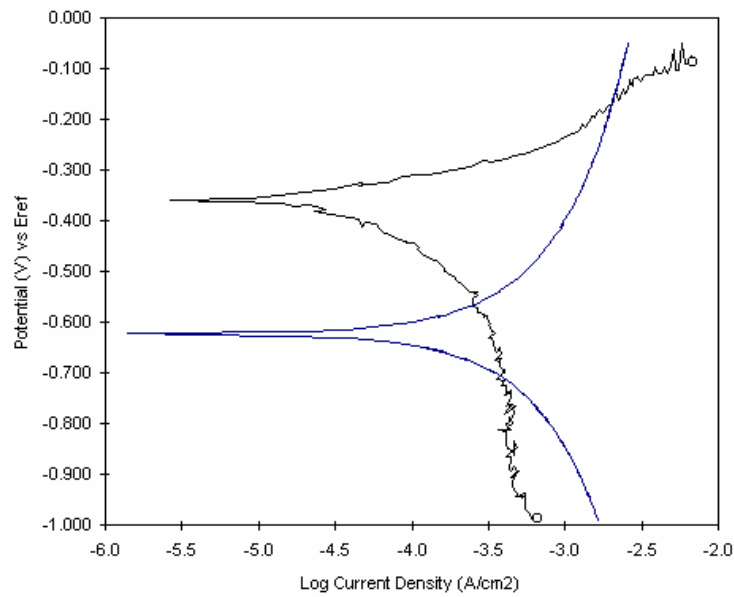


Fig. 3.22. Curva de polarización potenciodinámica del acero al carbono durante el proceso de corrosión y cavitación inducida por vibración.

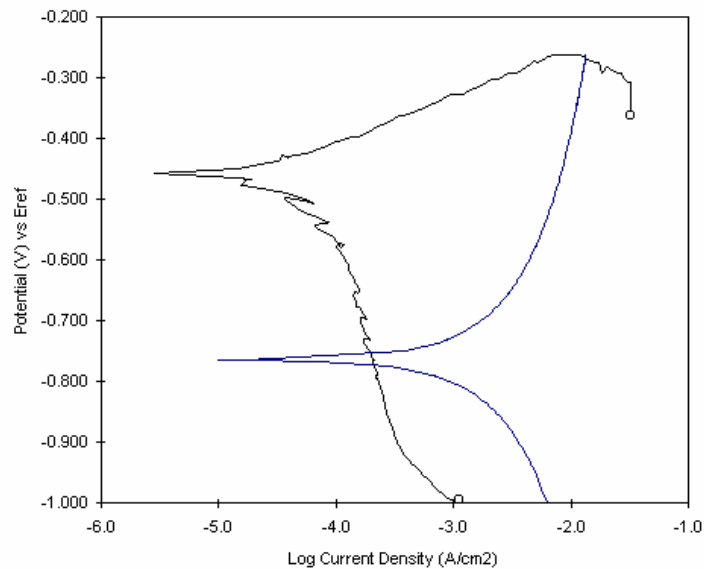


Fig. 3.23. Curva de polarización potenciodinámica del acero inoxidable AISI 416 durante el proceso de corrosión y cavitación inducida por vibración.

Tabla 3.1. Resumen de resultados electroquímicos en las muestras ensayadas induciendo cavitación corrosión, Anexo A.

METAL	E_{CORR} (mV)	I_{CORR} (A/cm ²)	R_p (Ohm-cm ²)	Vel.Corr (mm/año)	Promedio Vel.Corr (mm/año)
Bronce	-638.2	2.657E-04	0.981	3.083	3.71
	-302.5	5.380E-04	0.484	6.242	
	-290.7	1.545E-04	0.017	1.793	
Acero al Carbono	-764.9	6.942E-04	37.540	8.058	3.77
	-622.9	1.162E-04	224.300	1.348	
	-512.5	1.645E-04	158.400	1.909	
Titanio	-396.1	3.404E-06	7656.000	0.030	0.02
	-229.9	2.723E-06	9570.000	0.024	
	-293.8	2.293E-06	11360.000	0.020	
	-46.0	1.229E-06	21210.000	0.011	
AISI-416	-700.7	1.132E-04	230.100	1.314	1.46
	-727.4	1.385E-04	188.200	1.607	
AISI-316	-211.0	1.020E-04	255.600	1.183	1.08
	-235.2	8.348E-05	312.100	0.969	

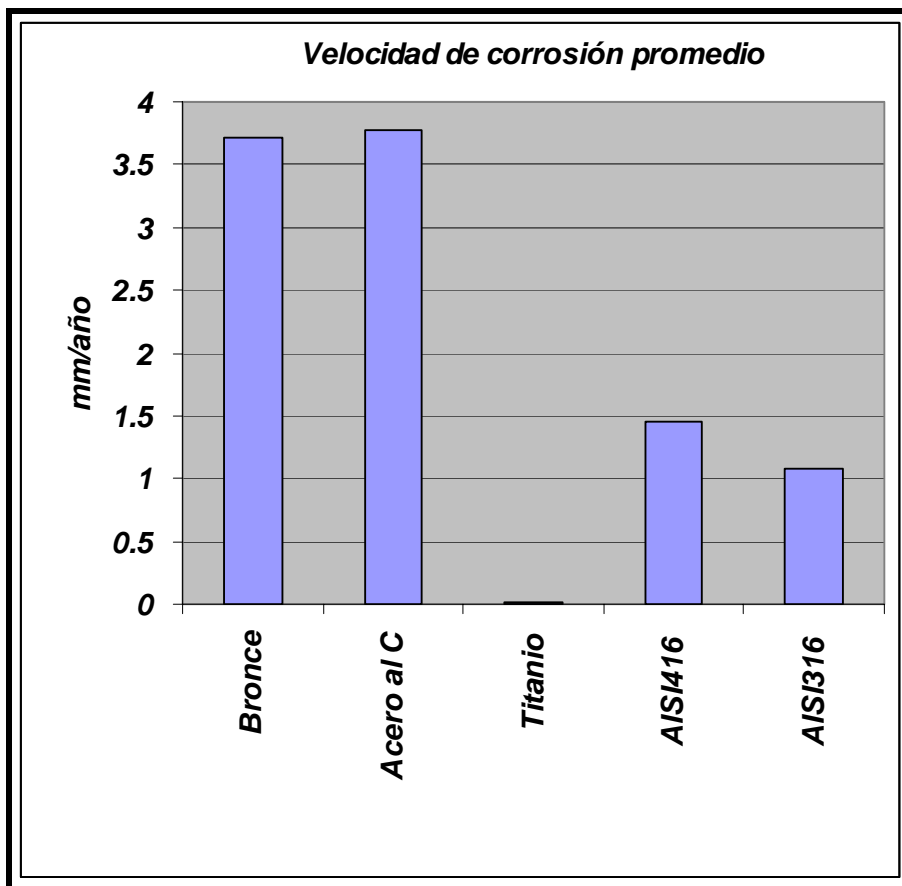


Fig. 3.24. Velocidad de corrosión promedio producida por la cavitación inducida por vibración.

3.6. Discusión de resultados

Según los recientes estudios de cavitación, el proceso de cavitación ocurre por nucleación, y el mecanismo aun es desconocido. Por lo que hay que suponer que el líquido, aun de muy alta pureza contiene partículas microscópicas u otros contaminantes muy dispersos que sirven como formadores de “nucleidos” (1).

Las altas presiones provocadas por la implosión de las burbujas, que son del orden de 1 500 MPa se han deducido por métodos fotoelásticos de muestras sometidas a pruebas de cavitación (18-26). Es por esto, que los daños observados en cada uno de los cinco metales aquí ensayados, y que se utilizan para la construcción de bombas, es razonable que caviten, ya que en promedio la resistencia mecánica de estos metales es de 350 a 700 MPa, de esta manera, las aleaciones industriales son susceptibles al daño por

cavitación. Este problema se inducirá entonces en cualquier equipo de bombeo que presenten vibraciones de 1 a 3 kHz, además, se sumará al problema de la $NPSH_{REQUERIDA}$, Como se muestra gráficamente en la Figura 2.13.

La cavitación inducida por vibraciones en las cinco aleaciones industriales, mostradas en el párrafo 3.3 y 3.4 muestran que efectivamente se produjo en la superficie de los metales los efectos de la deformación plástica localizada, acompañada del fenómeno de fatiga en cada una de las cavidades formadas. Esto es evidente por la superficie tersa y brillante observada, después de los ensayos, según los resultados mostrados en las figuras presentadas en el párrafo 3.4. En tanto que de la información que se encontró en las figuras mostradas en el párrafo 3.3, se observa que la cavitación es capaz de afectar a los metales desde los planos cristalinos. Es decir, que los impactos mecánicos de las ondas de las implosiones son tan pequeños y fuertes, que son capaces de separar por deformación plástica y fatiga a los planos cristalinos o las microfases de las aleaciones, con el consiguiente debilitamiento del material expuesto. Esto se evidenció con el corrimiento plástico en las cavidades y en el caso del acero inoxidable martensítico tipo 416, se encontró el deslizamiento por clivaje de los planos atómicos compactos del metal, venciendo la cohesión de los enlaces cristalinos.

En otras palabras, al menos, la cavitación inducida por vibraciones tiene un efecto microscópico de deformación que impide por cualquier aspecto, ya sea el endurecimiento por deformación o por la resistencia mecánica o dureza o tenacidad del metal, que este se dañe por cavitación.

Por otro lado, el medio ambiente corrosivo crea un factor de desgaste adicional, ya que cuando una burbuja de cavitación se forma sobre la superficie protectora, formada por compuestos del mismo metal, puede ocurrir un mecanismo de deterioro secuencial:

- ✚ La burbuja colapsa y destruye la película protectora.
- ✚ La nueva superficie se corroe y la película se restablece.
- ✚ Una nueva burbuja de cavitación se forma sobre el mismo punto.
- ✚ La burbuja colapsa y destruye nuevamente la película.
- ✚ Las áreas expuestas se corroen nuevamente y las películas se reforman.

Y esto puede ocurrir a la velocidad de la frecuencia de la vibración inducida, más los factores hidráulicos mencionados en el Capítulo 2, ya que no es necesario que existan películas protectoras en el metal para que la cavitación ocurra. Y la implosión de una burbuja tendrá la fuerza suficiente para remover una partícula de metal favoreciendo la formación de nuevos puntos de nucleación para nuevas burbujas de cavitación y así sucesivamente. Por esto, la cavitación puede inducir un daño acelerado, especialmente en los metales menos resistentes a la corrosión electroquímica.

Como era de esperarse, el acero al carbono presentó la más alta velocidad de corrosión electroquímica, según los resultados mostrados en el párrafo 3.5. Esto es debido a que el acero estructural es activo con las condiciones del agua de pruebas, con pH casi neutro y presencia de cloruros, lo que colocan al metal en la zona de corrosión debido a su naturaleza activa, según la serie electroquímica de los metales. Aunado a ello, la estabilidad de sus óxidos es muy baja, y son formadores de alto volumen específico e inestables con respecto a la estructura cristalina del metal base, por lo que además se desprenden del mismo con facilidad, dejando casi permanentemente desnudo al metal bajo los efectos de la cavitación.

En tanto que los demás metales son más resistentes a la corrosión general o electroquímica en agua natural. Esto queda de manifiesto por la baja corriente de corrosión encontrada en los resultados mostrados en el párrafo 3.5. Sin embargo, esta resistencia no fue suficiente para anular los efectos de la cavitación, debido a la enorme cantidad de energía que liberan las burbujas que implotan arrastrando consigo al metal desde unos cuantos diámetros atómicos, párrafo 3.3.

En tanto que el bronce presentó una velocidad de corrosión promedio casi igual a la del acero al C, debido a que el contenido de sólidos totales disueltos es muy alto, haciendo un ambiente corrosivo para los efectos de corrosión cavitación. Tabla 3.1. Por lo que los sistemas de bombeo de agua del Río Colorado, son muy susceptibles a este tipo de daño, en donde se hace importante el diseño hidráulico combinado con la selección de materiales.

El comportamiento electroquímico mostrado en la Figuras 3.22 y 3.23, donde la curva se corrió a bajos potenciales como en el acero al carbono. Se puede decir que este acero, después de unas seis horas de exposición para este ensayo, mostró una tendencia hacia el proceso activo o de disolución, según la rama anódica de la curva de polarización. El análisis de Tafel y resistencia de polarización y su correspondiente ajuste (curva suave), indica un potencial aproximado de corrosión $E_{cor} = -650$ mV vs ECS, y la velocidad de corrosión promedio es $V_{cor} = 3.77$ mm/año. Por el comportamiento activo de corrosión y los evidentes daños de cavitación, están limitadas para su uso en bombas, y por lo tanto, se usan con mayor éxito las aleaciones Fe-C, más allá del 2.5% en peso de C (fundiciones) y en ocasiones acompañado con otros elementos de aleación.

Sin embargo, las dos curvas, catódica y anódica, de la gráfica de polarización por resistencia en el acero inoxidable martensítico AISI 416, son similares y exhiben un proceso anódico de corrosión en el acero inoxidable martensítico 416.

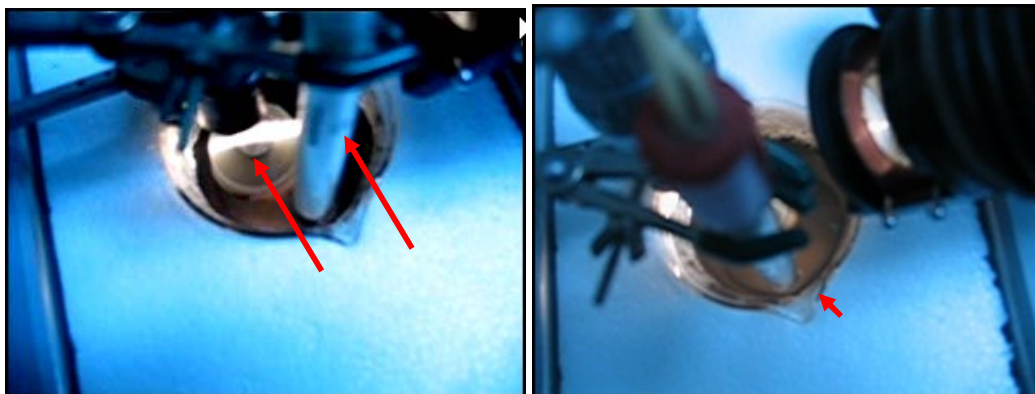
La curva de contornos suaves, es la de ajuste matemático e indica un potencial aproximado de corrosión $E_{cor} = -710$ vs ECS y una velocidad de corrosión de $V_{cor} = 1.46$ mm/año.

El electrodo de titanio mostró una velocidad de corrosión baja, Figura 3.24, debido a que la disolución electroquímica inicial es alta y forma una película dura y estable de productos de corrosión, que le permite adquirir un estado pasivo, sin embargo, es susceptible a daño mecánico a nivel cristalino al igual que los demás materiales, según las Figuras 3.14 y 3.15, donde se muestran los daños causados por la cavitación. Además, este metal es más costoso con relación a las demás aleaciones ensayadas, por lo que su uso para el bombeo de agua quedaría limitado por factores económicos.

Por lo anterior, es recomendable evitar la vibración en una bomba rotodinámica para poder eliminar, al menos, una de las posibilidades de cavitación corrosión. Esto puede mejorarse dentro de un buen programa de mantenimiento durante la vida útil de los equipos.

3.6.1 Observaciones in situ del fenómeno de cavitación utilizando la herramienta diseñada.

La observación en tiempo real del fenómeno de corrosión cavitación inducido en los metales ensayados fue posible con la adaptación de un juego de lentes que permiten observar en campo claro la formación de burbujas en la superficie de los metales durante los ensayos electroquímicos.



A) Electrodo de trabajo, y contra electrodo de Pt.

B) Celda electroquímica y fuente de luz

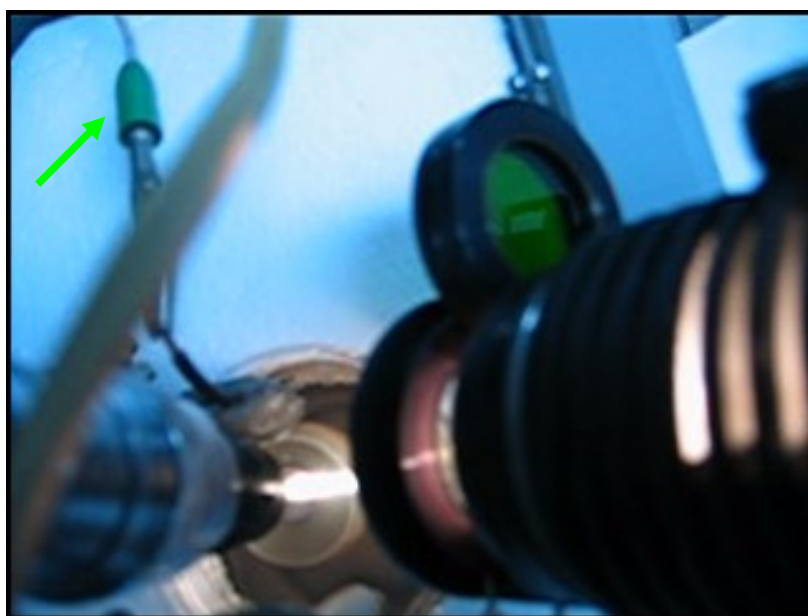
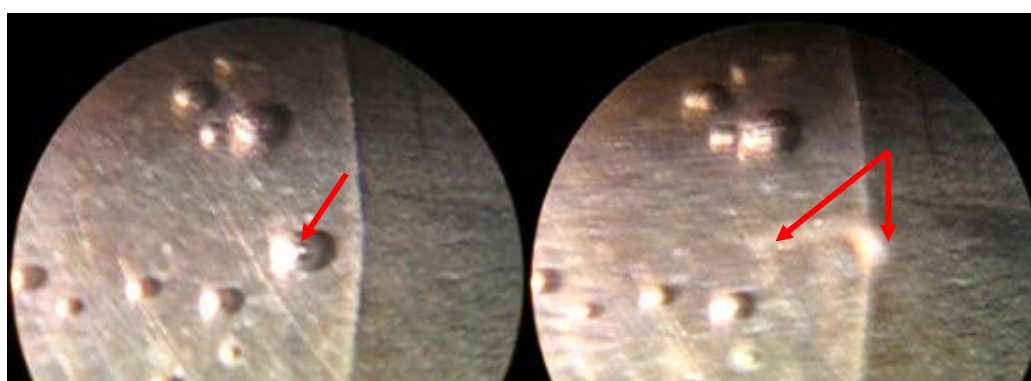


Figura 3.25 Modelo experimental para observar la corrosión cavitación en tiempo real. En la figura inferior, a la izquierda se ve el cilindro que contiene los lentes enfocados hacia el electrodo de trabajo al centro, conectado a la punta verde del potencióstato y a la derecha, la fuente de luz, iluminando la superficie del metal de prueba.



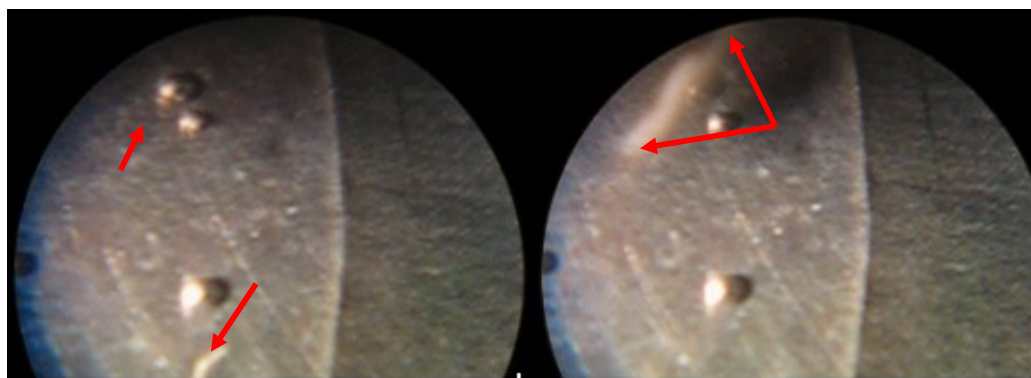
A) Formación de burbujas por cavitación

B) Implosiones originadas por esfuerzo cíclico



C) Formación de burbujas por cavitación

D) Implosiones originadas por esfuerzo cíclico



E) Formación de burbujas por cavitación

F) Implosiones originadas por esfuerzo cíclico

Figura 3.27 Con la herramienta diseñada en el laboratorio, se identificó la formación de burbujas por cavitación en la superficie del electrodo de trabajo durante la prueba de medición de la corrosión electroquímica y cavitación inducida por vibraciones de alta frecuencia. En distintas etapas durante el experimento se observa la evolución de la cavitación en tiempo real, que consiste en, a la izquierda la nucleación y crecimiento, y en las fotografías a la derecha se ve el colapso de las burbujas parecido a una explosión. La línea vertical al centro de cada figura, es la separación del montaje plástico y a la izquierda el electrodo de trabajo. 100X

3.7 Propuesta de investigaciones a futuro.

La erosión de superficies metálicas por medio de la cavitación no solo ocurre como un proceso acoplado a la corrosión de un metal, sino que también tiene importantes aplicaciones prácticas que van, desde la limpieza de superficies metálicas utilizando ultrasonido hasta la selección de materiales a utilizar en sistemas de flujo.

La observación microscópica del efecto de la cavitación permite entender mejor el fenómeno, y por lo tanto, el prototipo aquí presentado, se puede modificar incorporando un sistema de precisión para el control de enfoque óptico, cámara digital de alta velocidad (mayor de 100,000 cuadros/segundo) con sistema de iluminación integrado y se puede considerar el control automático computarizado del nuevo prototipo. El prototipo diseñado y construido puede ser modificado para tener un mayor control de la imagen durante el proceso de cavitación. También se puede adaptar un microscopio acústico a un sistema de adquisición de datos para la celda electroquímica capaz de registrar corrientes traza en el rango de tiempo de 1 a 100 μ s acoplado con un sistema de captura de imagen de video de alta velocidad.

Debido a que es importante caracterizar sistemas que sufren de manera simultánea el fenómeno de corrosión – cavitación, las investigaciones futuras estarán enfocados en la obtención de datos de la actividad de la superficie del electrodo de trabajo inmerso en la celda sono-electroquímica y su relación con las imágenes de video capturadas en tiempo real.

Para evaluar el efecto superficial en la mecánica de fractura, se puede inducir un efecto mecánico cíclico de alta frecuencia en la superficie de materiales con rugosidad de 10^{-6} m, para minimizar los efectos mecánicos de la capa superficial deformada por la manufactura. Estas superficies se pueden obtener usando la técnica metalográfica estándar. La cavitación controlada puede inducir esfuerzos residuales en metales y aleaciones que son susceptibles de endurecimiento por deformación superficial, como las aleaciones de níquel-cromo. Con este tratamiento, se puede mejorar la resistencia a la fractura y/o la fatiga de estos metales.

Induciendo la cavitación, se puede evaluar las características microestructurales y de adhesión de superficies endurecidas o recubiertas con materiales rígidos, ya que los métodos de rayado o de indentación estandarizados no dan una información precisa en este tipo de materiales de recubrimiento.

Para otros trabajos de investigación, se pueden combinar experimentos controlando el efecto de las vibraciones de alta frecuencia y la cavitación desarrollada por deficiencias de $NPSH_{REQUERIDA}$, por ejemplo en una bomba rotodinámica vibrando durante cientos de horas de operación y midiendo la velocidad de corrosión.

El tratamiento de agua residual se puede mejorar por la acción de la cavitación o vibración de alta frecuencia, ya que se esperaría que las reacciones químicas se aceleren, también la oxidación de compuestos indeseables en el agua y el control de microorganismos.

La modulación y ajuste preciso de la limpieza por vibraciones de alta frecuencia en superficies delicadas, como en la manufactura de microcircuitos integrados o nano tecnología, requiere una revisión de las variables del fenómeno de limpieza por la cavitación, entre ellas, se puede incluir el control de la implosión total o parcial de las burbujas formadas en la superficie, diámetro de ellas, amplitud y frecuencia de vibración con respecto a las características fisicoquímicas del medio líquido de limpieza.

La limpieza por cavitación de muestras de corrosión, deberá revisarse para evitar inducir desgastes que desvíen los resultados reales en los materiales ensayados. Ya que se ha demostrado aquí que el efecto cíclico es a nivel de la microestructura de los metales.

Estudiar el efecto de recuperación microestructural de metales y aleaciones con memoria, como es el caso de las aleaciones de titanio. Ya que este mecanismo puede ayudar a diseñar partes de alta tecnología resistentes a la cavitación.

Es claro que la caracterización del comportamiento hidrodinámico de las burbujas puede ser estudiada con el mismo diseño de equipo e inclusive se pueden caracterizar los procesos químicos en las cercanías o interior de las burbujas empleando los métodos electroquímicos.

La cavitación es el fenómeno más eficiente que amplifica la densidad de energía disipada en cada implosión. Se ha deducido que cada burbuja que colapsa se acompaña de una gran elevación local de la temperatura, algunos investigadores opinan que es de cientos o miles de grados centígrados y presiones que exceden cientos de atmósferas. Y durante cerca de un siglo, los especialistas no han podido establecer una descripción más completa del final del colapso de las burbujas, y la dinámica al final de la implosión también constituye un campo desconocido y por lo tanto, los prototipos como el que aquí se ha desarrollado, puede ayudar a entender mejor esta etapa de la cavitación.

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES

- ✚ En condiciones de 1 a 3 kHz de frecuencia de vibración, la cavitación se puede combinar con los procesos electroquímicos elevando la velocidad de corrosión. Esta condición se presentará cuando exista algún grado de desbalanceo en las partes que giran a más de 1000 rpm para elevar la energía cinética del agua. Por lo que es de esperarse que el desgaste más común en los impelentes de una bomba rotodinámica reside en el efecto combinado de corrosión y cavitación erosión.
- ✚ Con el prototipo aquí desarrollado se pueden aplicar hasta 20 kHz de frecuencia de vibración, y en estas condiciones, se puede acelerar el proceso de cavitación en los metales ensayados, pudiendo hacer mediciones simultáneas de velocidad de corrosión con técnicas estandarizadas, para cuantificar el efecto de la cavitación en la corrosión electroquímica.
- ✚ El sistema óptico que se propone, permite observar adecuadamente las etapas iniciales de la formación de burbujas de cavitación. Sin embargo, el mecanismo al final del colapso de las mismas, es demasiado rápido y por lo tanto se requiere elevar la velocidad de la adquisición de imágenes durante la generación de la cavitación.
- ✚ La cavitación por vibraciones de alta frecuencia, se puede combinar con la cavitación de un sistema hidráulico, donde la $NPSH_{REQUERIDA}$ es afectada por comportamiento del flujo en bombas con operación normal, y las líneas de corriente presentan fricción y desarreglos en las mismas. Esta es la causa de la presencia de diferente presión y velocidad a la entrada del impelente. Esto requiere atención y análisis por el lado de succión, donde se puede uniformar dicha corriente de entrada a los impelentes. El desgaste excesivo puede demandar más velocidad del impelente para mantener el gasto o la carga, por lo que se

Capítulo 4 - Conclusiones

modificará el punto de operación del sistema, y aumentó del riesgo de cavitación. Por otro lado, la cavitación por vibraciones de alta frecuencia se debe atender evitando el desbalanceo de las piezas que impulsan el agua.

- ✚ No existe una correlación directa entre propiedades de los materiales y resistencia a la cavitación. El presente estudio demostró que el deterioro que induce la cavitación ocurre a nivel atómico y es necesario evaluarlo con esa consideración.
- ✚ Se puede reproducir el fenómeno en pruebas de laboratorio, comprobando el efecto del deterioro del metal a nivel celdas cristalinas del metal. El rango de frecuencia adecuado para inducir la cavitación es de 3 a 7 kHz. Entre 7 y 20 kHz, se presentan daños muy severos en la superficie del metal que se ensaye.
- ✚ La velocidad de corrosión electroquímica se puede estimar en un ambiente que cavita por medio de la técnica de resistencia de polarización, puesto que ocupa un rango limitado y constante de voltaje en donde las reacciones anódicas y catódicas están más cerca del equilibrio, por ejemplo, de unos 20 mV para calcular la velocidad de corrosión general, ya que estas fluctuaciones estarían más cerca de la magnitud de la deformación metálica causada por la cavitación.
- ✚ La técnica de Tafel muestra más incertidumbre debido a la remoción constante de productos de corrosión en la superficie del metal, y al requerir rangos más amplios de voltaje para poder hacer los ajustes, el promedio de la velocidad instantánea de corrosión calculada se dispersa aun más, lo que se explica por el alto valor de las pendientes anódica y catódica. Es decir, las velocidades de corrosión son calculadas con la mínima perturbación al sistema mediante la técnica de la resistencia de polarización.
- ✚ La técnica de limpieza con baño de ultrasonido en muestras de corrosión general por pérdida de peso, se deben modular en la frecuencia y amplitud de onda para no afectar el material base, ya que los resultados de pérdida de peso se modifican

por pérdida de metal, ya que la cavitación se lleva a cabo en la microestructura cristalina.

- ✚ Por la razón anterior, en la evaluación frente a la cavitación de materiales usados en nanotecnología, se debe preparar la superficie de prueba, siguiendo técnicas metalográficas estándar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pérez Franco, Diosdado, D. Sc., Profr. Ing. “La cavitación y la succión posibles de la bombas rotodinámicas”. ISPJAE, Cuba, 1996.
2. J. Hawks, Buckey Pumps Inc., “Pumps Operation”. California, USA, 2000.
3. Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Aachen University of Technology (RWTH Aachen), Alemania, junio de 2001.
4. Fontana, Mars G. “Corrosion Engineering” Mc Graw-Hill, México, 1986.
5. American Society for Metals (ASM), Vol. 13 ASM “Corrosion”, USA, 2000. pp 142, 311.
6. Streeter, V. L., Mecánica de los Fluidos, Octava Edición, Mc Graw-Hill, México, 1988.
7. The Mc Nally Institute, “Cavitation Report”, Florida, USA, Julio, 2000
8. Pérez Monteagudo, Diosdado, “Apuntes de máquinas hidráulicas”, Mexicali, B.C. México, 1997.
9. Jean B. Umland/Jon Bellama “Química General” International Thomson Editores, S.A. de C.V., México, 2000.
10. Dean, J.A. Lange’s “Handbook of Chemistry”, 14a. Ed: McGraw-Hill, 1992.
11. Hydraulic Institute “Centrifugal Nomenclature” Vol. ANSI / HI 1.1-1.2, USA, 2000.
12. Mays, Larry W., “Hydraulic Design Handbook”, Mc Graw Hill, 1999.
13. Potter, Merle C. / Wiggert, David C. “Mecánica de Fluidos” Segunda Edición, Prentice Hall, México, 1998.
14. Smith, William F. “Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales”, Segunda Edición, Mc-Graw Hill, México, 1990.
15. ASM Vol. 7, “Atlas of Microstructures of Industrial Alloys”, Eighth Ed. American Society for Metals, USA, 1972.
16. Brubaker, George, Beverley, P. Phipps, “Corrosion Chemistry”, ACS Symposium Series, USA, 1979, pp 386-390
17. ASTM STD, G32-85, Vibratory Cavitation Erosion Test, PA, ASTM, 1985.

18. G.A. Schmitt, W. Bücken, R. Fanebust, Corrosion-Vol. 48 No. 5, NACE, USA, 1992.
19. T.Y. Chen, A. A. Moccari, D.D. Macdonald, Corrosion-Vol. 48 No. 3, NACE, USA, 1992.
20. S. Nešić, J. Postlethwaite, Corrosion-Vol. 47 No. 8, NACE, USA, 1991.
21. H. Nanjo, Y. Kurata O.Asano, N. Sanada, J. Ikeuchi, Corrosion-Vol. 46 No. 10, NACE, USA, 1990.
22. G.N. Blount, R.T. Moule, W.J. Tomlinson, Corrosion-Vol. 46 No. 4, NACE, USA, 1990.
23. Al-Hashem, P.G. Caceres, A. Abdullah, H.M. Shalaby, Corrosion-Vol. 53 No. 2, NACE, USA 1997.
24. J.R. Shadley, S.A. Shirazi, E. Dayalan, M. Ismail, E.F. Rybicki, Corrosion-Vol. 52 No. 9, NACE, USA, 1996.
25. G. Liu, D.A. Tree, M.S. High, Corrosion-Vol. 50 No. 8, NACE, USA, 1994.
26. K.D. Efird, E.j. Wriqth, J.A. Boros, T.G. Halley, Corrosion- Vol. 49, No. 12, 1993.

REFERENCIAS GENERALES

1. P. R. Birkin, R. O'Connor, C. Rapple, S. Silva-Martinez, Electrochemical Measurement Of Erosion From Individual Cavitation Events Generated From Continuous Ultrasound., *J. Faraday Trans.* 94, 1998, 3365-3371.
2. P. R. Birkin, Y. E. Watson, T. G. Leighton, Efficient Mass Transfer From An Acoustically Oscillated Gas Bubble, *J. Chem. Soc. Chem. Comm.*, 2001, 2650-2651.
3. P. R. Birkin, J. F. Power, T. G. Leighton, Electrochemical Evidence Of H₂ Produced By Ultrasound, *J. Chem. Soc. Chem. Comm.*, 2001, 2230-2231.
4. P. R. Birkin, Y. E. Watson, T. G. Leighton, K. L. Smith, Electrochemical Detection of Faraday Waves on the Surface of a Gas Bubble, *Langmuir*, 2002, 18, 2135-2140.

5. P. R. Birkin, J. F. Power, T. G. Leighton, A. M. L. Vinçotte, Cathodic Electrochemical Detection Of Sonochemical Radical Production, *Anal. Chem.* 2002, 74, 2584-2590.
6. P. R. Birkin, T. G. Leighton, J. F. Power, M. D. Simpson, A. M. L. Vinçotte, Experimental and Theoretical Characterisation of Sonochemical Cells. Part 1 Cylindrical reactors. , *J. Phys. Chem. A*, 2003, 107, 306-320.
7. L. Rayleigh, On the Pressure Developed in a Liquid During the Collapse, *Phil Mag* 34 (1917) 94-98
8. T.G. Leighton, *The Acoustic Bubble*, Academic Press Inc, San Diego, CA (1994)
9. G.L. Goberman, *Ultrasonics Theory and Application*, Hart Publishing Company Inc, New York, NY (1969)
10. J.R. Blake, et al., *Philosophical Transactions of the Royal Soc.* Vol. 357 Num. 1751, (1999) 251
11. L.E. Kinsler, et al., *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York, NY (1982)
12. J.R. Frederick, *Ultrasonic Engineering*, J. Wiley, New York, NY (1965)
13. S.A. Neduzhii, *Soviet Physics-Acoustics*, 7 (1961) 221
14. R. Esche, *Akust. Beih.*, *Ultrasonic Technique* (1952) AB208
15. L.A. Crum. *Ultrasonics* Vol. 22, (1984) 215-223
16. C. Genet, *A2C2* Vol. 1 No. 5, Vicon Publishing, (1998) 7-10
17. K. Maeda/F. Shuji /H.Fukui/T. Thamma/K. Mongkut, Formulation Of Cavitation Erosion Behavior Based On Logistic Analysis Fukui University Fifth International Symposium on Cavitation Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
18. S. Hattori/R. Ishikura/Q. Zhang, Construction Of Database On Cavitation Erosion And Analyses Of Carbon Steel Data Fukui University, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003
19. N. Berchiche/ M. Grekula/ G. Bark, Concept Of Focusing Of Collapse Energy – Application To Cavitation Observations, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering of Chalmers University SE- 412 96 Göteborg, Sweden, 2001.
20. Y. Saito /K. Sato, Cavitation Bubble Collapse And Impact In The Wake Of A Circular Cylinder Department of Mechanical Engineering, Kanazawa Institute of

- Technology, Japan, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003
21. B. Bachert et al, Experimental Investigations Concerning Aggressiveness Of Cavitation In A Radial Test Pump With The Aid Of Adhesive Copper Films, Darmstadt University of Technology, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003
 22. M. Futakawa et al, Cavitation Erosion In Mercury Target Of Spallation Neutron Source, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
 23. T. Choffat / L. Egi-CNRS-INPG, A Procedure To Account For Overlapping In Pitting Tests, Electricité de France, 2003.
 24. N. Sherykhalina, A. Zaitsev, A. Kamashev, Cavitation Model Of Macrodefects Formation Mechanism During Electrochemical Machining. Ufa State Aviation Technical University, Russia. Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003
 25. C. E. Brennen Cavitation In Biological And Bioengineering Contexts, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003
 26. G. Alexey /T. Chuvash, Mathematical Modeling Of Cavitating Flows. National Academy of Science and Art 33 Leningradskaya Str., 428003 Cheboksary, Russia, 2003
 27. J.L. Reboud, et al, Numerical Simulation Of Unsteady Cavitating Flows: Some Applications And Open Problems, LEGI, Grenoble, France, CNRS-LEMD, University of Grenoble, France, 2002.
 28. R. M. Bailey/L. A. Crum et al, Cavitation In Shock Wave Lithotripsy. Center for Industrial and Medical Ultrasound, Applied Physics Laboratory, Seattle, Washington, 98105 USA, 2000. Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003
 29. Ch. Nicolet, F. Avellan, J. Rossell, New Technology For High Disinfection Level Of Flexible Endoscopes, Laboratory for Hydraulic Machines, EPFL Swiss

- Federal Institute of Technology Lausanne, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003
30. D. Lohse, Fourteen Years Of Single Bubble Sonoluminescence: A Review, Department of Applied Physics, Twente University, 7500 AE Enschede, The Netherlands, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003
 31. M. P. Tulin, On the Theory and Modeling of Real Cavity Flows, Ocean Engineering Laboratory, University of California, Santa Barbara, Santa Barbara, CA 93106, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
 32. J. S. Allen, et al, Development And Application Of Contrast Agent Models. Department of Mechanical Engineering, University of Tokyo, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
 33. Michel Tanguay/Tim Colonius, Progress In Modeling And Simulation Of Shock Wave Lithotripsy (SWL) California Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering Pasadena, California, 91125, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
 34. H. Kato, Cavitation, As A Tool Of Environmental Protection. Department of Computational Science and Engineering, Faculty of Engineering, Toyo University, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003
 35. H. Takahira/E. Okura, Influence Of Gas Diffusion On The Stability And Merger Of Microbubbles. Department of Energy Systems Engineering Osaka Prefecture University Fifth International Symposium on Cavitation (cav2003) Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
 36. V. Serebryakov. Supercavitation Flows With Gas Injection- Prediction And Drag Redaction Problems Institute of Hydromechanics of NASU, 8/4 Sheliabov Str., 03057 Kiev, Ukraine, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003.

37. A. Korobkin, Cavitation In Liquid Impact Problems, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Novosibirsk 630090, Russia, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
38. V. Serebryakov, Some Problems Of Hydrodynamics For Sub- And Supersonic Motion In Water With Supercavitation Institute Of Hydromechanics. National Academy of Sciences of Ukraine, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
39. V. A. Frolov, High-Speed Compressible Flows About Axisymmetric Bodies, Department of Aerohydrodynamics, Samara State Aerospace University, 34, Moscovskoe shosse, 443086 Samara, Russia, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
40. Y. L. Young/ S. A. Kinnas, Fluid and Structural Modeling of Cavitating Propeller Flows, Princeton University, Fifth International Symposium on Cavitation Osaka, Japan, November 1-4, 2003
41. M. Prychodiko, Development Of Outlooks Of Gas-Water Jet Enrgy- Propulsion Complexes For High Speed Water Vechicles, Institute Of Hydromechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
42. I. N. Kirschner/B. J. Rosenthal, Simplified Dynamical Systems Analysis Of Supercavitating High-Speed Bodies, Anteon Corporation, Middletown, RI USA, Fifth International Symposium on Cavitation Osaka, Japan, November 1-4, 2003
43. L. Zhiyong, Y. Shuqun, Y. Kai, X. Sheng, W. Baoshou, Numerical Simulation Of Water-Exit Cavity. China Ship Scientific Research Center, Fifth International Symposium on Cavitation Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
44. X. L. Michihiro N. Kyushu, Cavitation Performance Of A Centrifugal Impeller Suitable For A Mini Turbo-Pump Institute of Technology, Kitakyushu, Fifth International Symposium on Cavitation Osaka, Japan, November 1-4, 2003
45. T. Nagahara, T. Sato, T. Okamura, Measurement Of The Flow Around The Submerged Vortex Cavitation In A Pump, Research & Development Laboratory, Hitachi Industries Co., Ltd, Fifth International Symposium on Cavitation Osaka, Japan, November 1-4, 2003.

46. Z. Ridha, Numerical Approach To The Prediction Of Cavitation In Pumps. Laboratoire d'Hydraulique, Ecole Nacional, France. Fifth International Symposium on Cavitation Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
47. X. Escaler, Vibration Cavitation Detection Using Onboard Measurements, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain. Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003
48. M. Fukaya/T. Okamura, Prediction of Cavitation Performance of Axial Flow Pump by Using Numerical Cavitating Flow Simulation with Bubble Flow Model Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd, Fifth International Symposium on Cavitation Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
49. H. Nakai/ H. Horiguchi, Cavitating Flows In Centrifugal Impellers And Their Stability Analysis. Graduate School of Engineering Science Osaka University, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
50. Y. A. Bouziad, M. Farhat, F. Guennoun, J. -Louis Kueny, F. Avellan, K. Miyagawa, Physical Modeling And Simulation Of Leading Edge Cavitation, Application To An Industrial Inducer. Laboratory for Hydraulic Machines, EPFL, Lausanne, Switzerland, Fifth International Symposium on Cavitation. Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
51. S. Takahashi/S. Washio, Experimental Study On Cavitation Starting At And Flow Characteristics Close To The Point Of Separation. Okayama University, Fifth International Symposium on Cavitation Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
52. J. -Pierre Franc/C. Rebattet/A. Coulon, An Experimental Investigation Of Thermal Effects In A Cavitating Inducer. LEGI/CREMHYG/SNECMA, Grenoble, France, Fifth International Symposium on Cavitation Osaka, Japan, November 1-4, 2003
53. C. F. Delale/K. Okita and Y. Matsumoto, Steady-State Cavitating Nozzle Flows With Nucleation. Department of Aeronautics and Astronautics, Istanbul Technical University/The University of Tokyo, Fifth International Symposium on Cavitation Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
54. K.S. Tan, J.A. Wharton, R.J.K. Wood. Solid Particle Erosion–Corrosion Behaviour Of A Novel HVOF Nickel Aluminium Bronze Coating For Marine

- Applications—Correlation Between Mass Loss And Electrochemical Measurements. Surface Engineering and Tribology Group, School of Engineering Sciences, University of Southampton, Highfield, Southampton SO17 1BJ, UK, 2004. *Wear* 258 (2005) 629–640. ELSEVIER.
55. C.H. Tang a, F.T. Chenga,, H.C. Manb, Effect Of Laser Surface Melting On The Corrosion And Cavitation Erosion Behaviors Of A Manganese–Nickel–Aluminium Bronze. Department of Applied Physics, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, PR China Department of Industrial and Systems Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, PR China, 2004. *Materials Science and Engineering A* 373 (2004) 195–203. ELSEVIER.
56. S.K. Bhaumik, R. Rangaraju, M.A. Parameswara, T.A. Bhaskaran, M.A. Venkataswamy, A.C. Raghuram, R.V. Krishnan. Failure Of Reformer Tube Of An Ammonia Plant. Failure Analysis Group, Materials Science Division, National Aerospace Laboratories, PO Box 1997, Bangalore 560 017, India, 2001. *Engineering Failure Analysis* 9 (2002) 553–561
57. M.-L. Doche *, J.-Y. Hihn, A. Mandroyan, R. Viennet, F. Touyeras. Influence Of Ultrasound Power And Frequency Upon Corrosion Kinetics Of Zinc In Saline Media. Laboratoire de Chimie des Materiaux et Interfaces—Equipe de l’IUT, BP 1559, 30 av. de l’Observatoire, 25009 Besanc_on Cedex, France, 2003. *Ultrasonics Sonochemistry* 10 (2003) 357–362, ELSEVIER.
58. C A. Al-Hashem*, A. Abdullah, W. Riad. Cavitation Corrosion of Nodular Cast Iron (NCI) In Seawater Microstructural Effects. Petroleum Research and Studies Center, Kuwait Institute for Scientific Research, P.O. Box 24885, Safat 13109, Kuwait. Received 15 August 2001; received in revised form 29 November 2001; accepted 16 December 2001. *Materials Characterization* 47 (2001) 383– 388 ELSEVIER
59. The role of microstructure of nickel–aluminium–bronze alloy on its cavitation corrosion behavior in natural seawater. A. Al-Hashem, W. Riad, Petroleum Research and Studies Center, Kuwait Institute for Scientific Research, PO Box

- 24885, 13109 Safat, Kuwait. Received 1 August 2001; accepted 1 December 2001
Materials Characterization 48 (2002) 37– 41, ELSEVIER.
60. S. Han , J.H. Lin , J.J. Kuo , J.L. He , H.C. Shih, The Cavitation-Erosion Phenomenon Of Chromium Nitride Coatings Deposited Using Cathodic Arc Plasma Deposition On Steel. National Taichung Institute of Technology, 129 Sam-min Rd., Sec. 3, Taichung, Taiwan, 404 ROC. Department of Materials Science and Engineering, National Tsing Hua University, 101 Kuang Fu Rd., Sec 2, Hsinchu, Taiwan, 300 ROC. Department of Materials Engineering, National Chung Hsing University, 250 Kuo Kuang Rd., Taichung, Taiwan, 402 ROC. Department of Materials Science, Feng Chia University, 100 Wen Hua Rd., Taichung, Taiwan, 407 ROC. Received 15 May 2001; accepted in revised form 10 June 2002, Surface and Coatings Technology 161 (2002) 20–25. ELSEVIER.
61. H.C. ManU, C.T. Kwok, T.M. Yue, Cavitation Erosion And Corrosion Behaviour Of Laser Surface Alloyed MMC of SiC and Si N on Al Alloy AA6061 3 4. Department of Manufacturing Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, PR China. Received 7 November 1999; accepted in revised form 5 June 2000. Surface and Coatings Technology 132 (2000) 11-20. ELSEVIER.

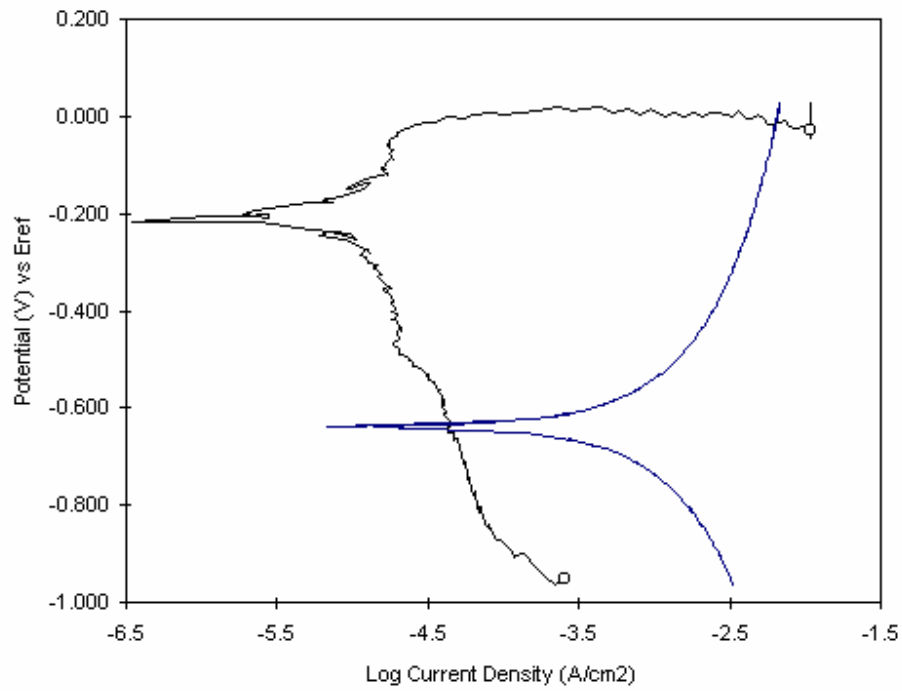


Fig. A-1. Polarización electroquímica del bronce bajo cavitación inducida.

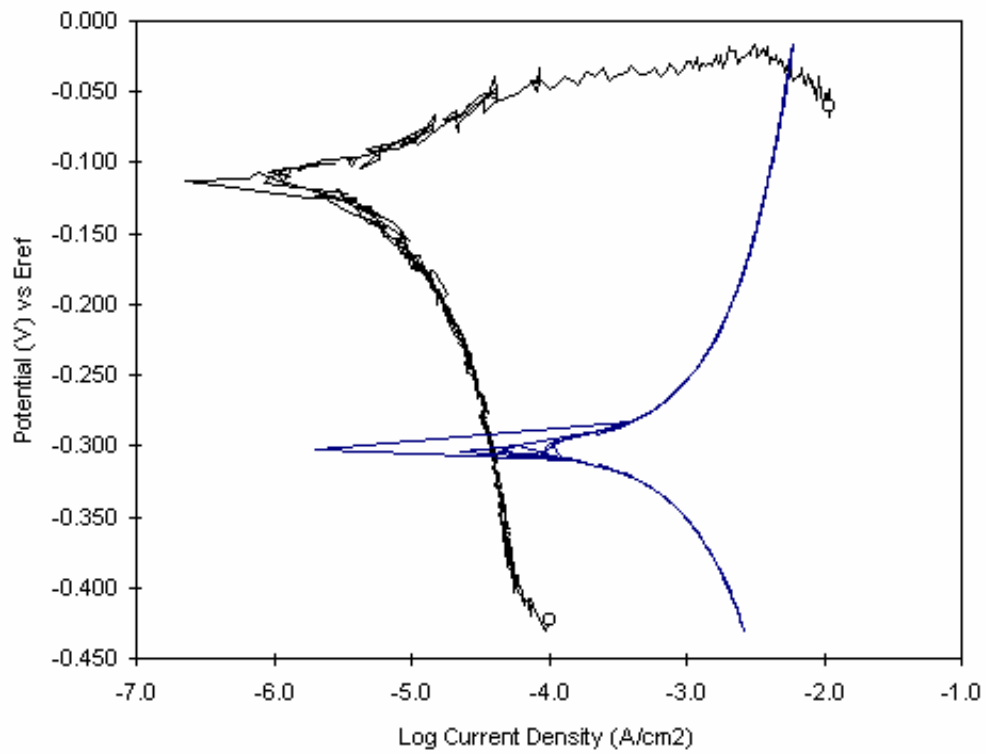


Fig. A-2. Polarización electroquímica del bronce bajo cavitación inducida.

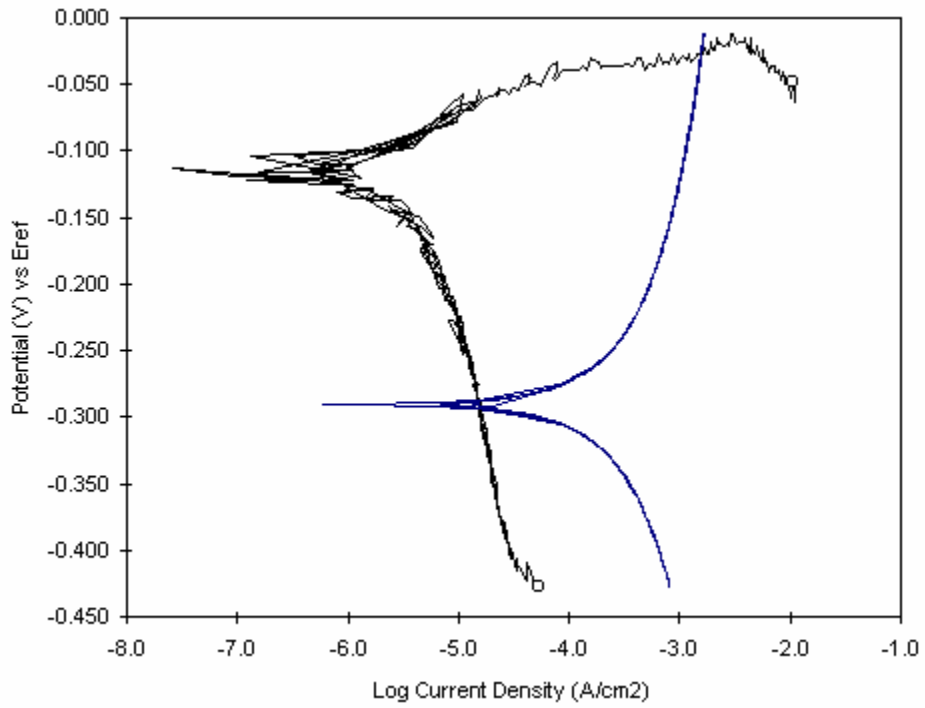


Fig. A-3. Polarización electroquímica del bronce bajo cavitación inducida.

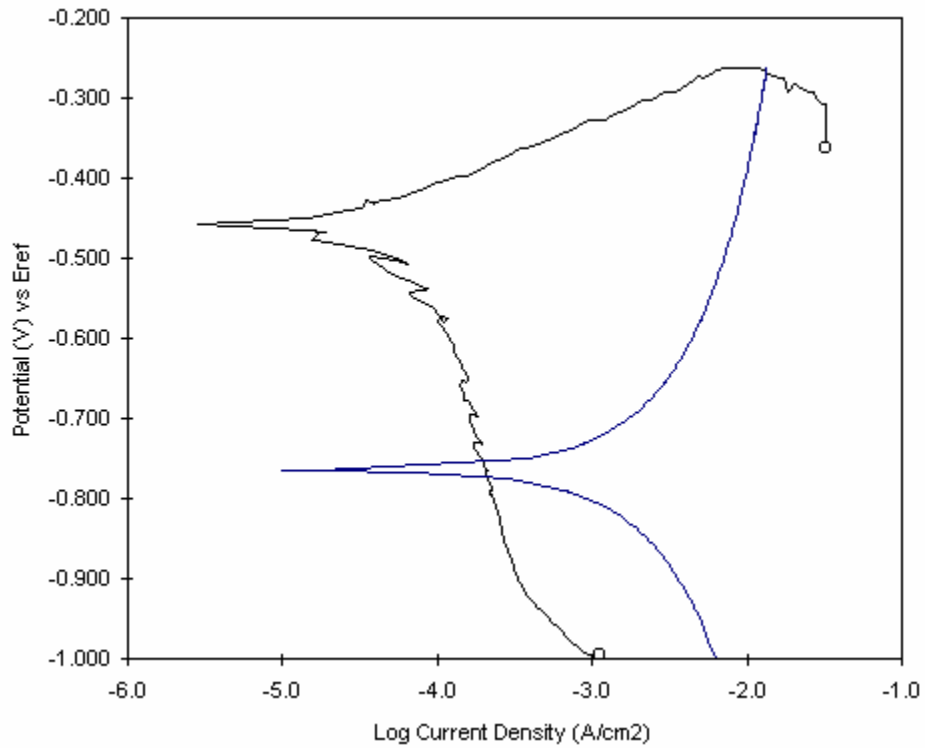


Fig. A-4. Polarización electroquímica del acero al C bajo cavitación inducida.

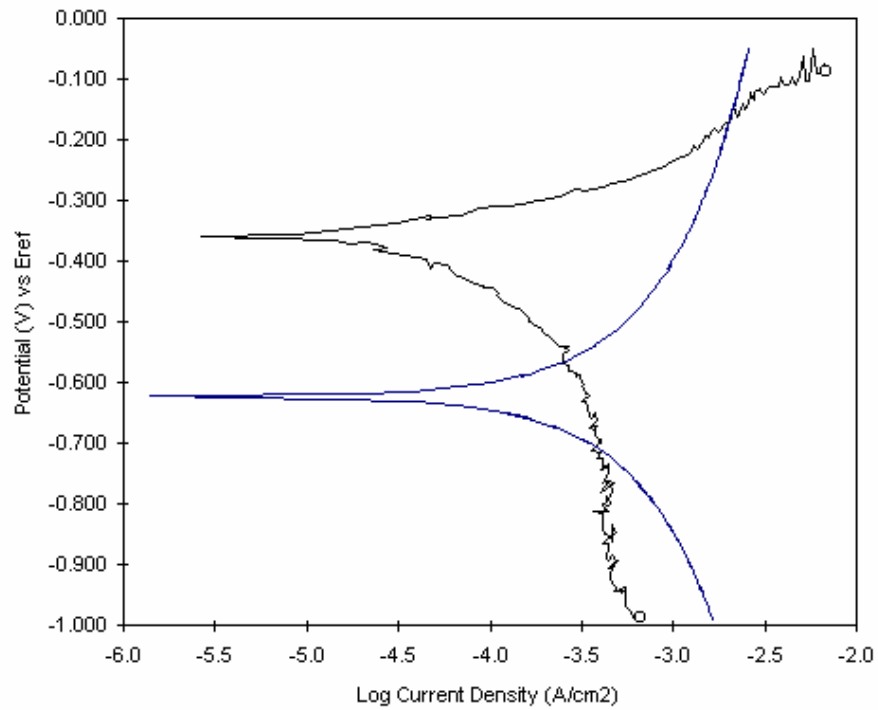


Fig. A-5. Polarización electroquímica del acero al C bajo cavitación inducida.

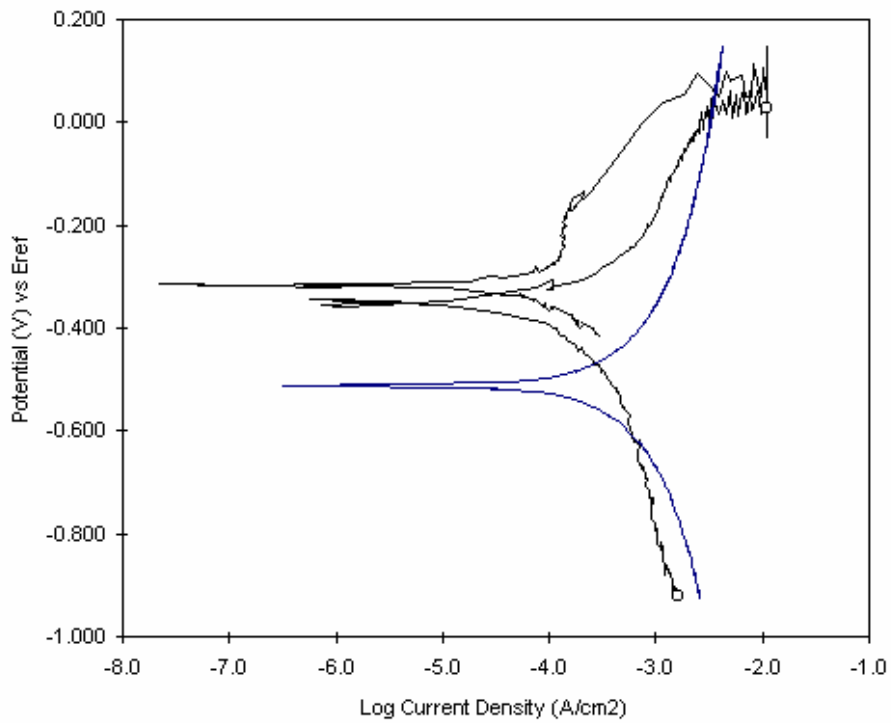


Fig. A-6. Polarización electroquímica del acero al C bajo cavitación inducida.

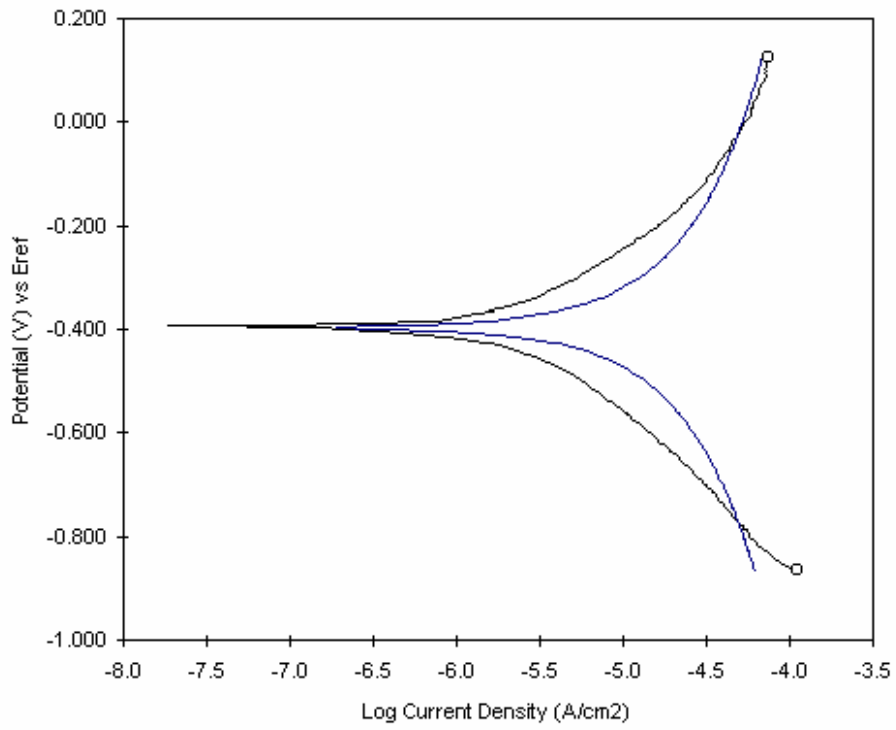


Fig. A-7. Polarización electroquímica del titanio bajo cavitación inducida.

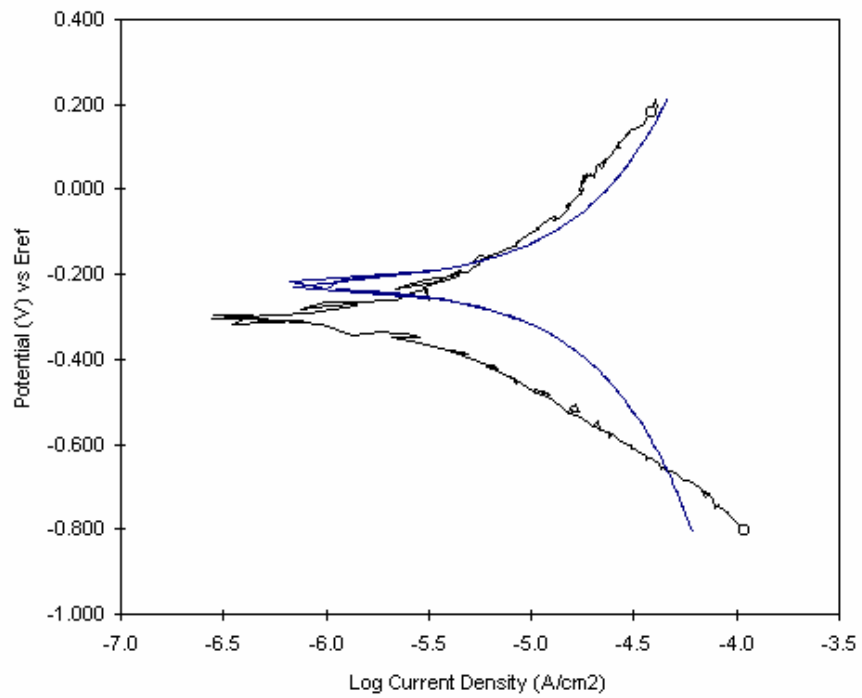


Fig. A-8. Polarización electroquímica del titanio bajo cavitación inducida.

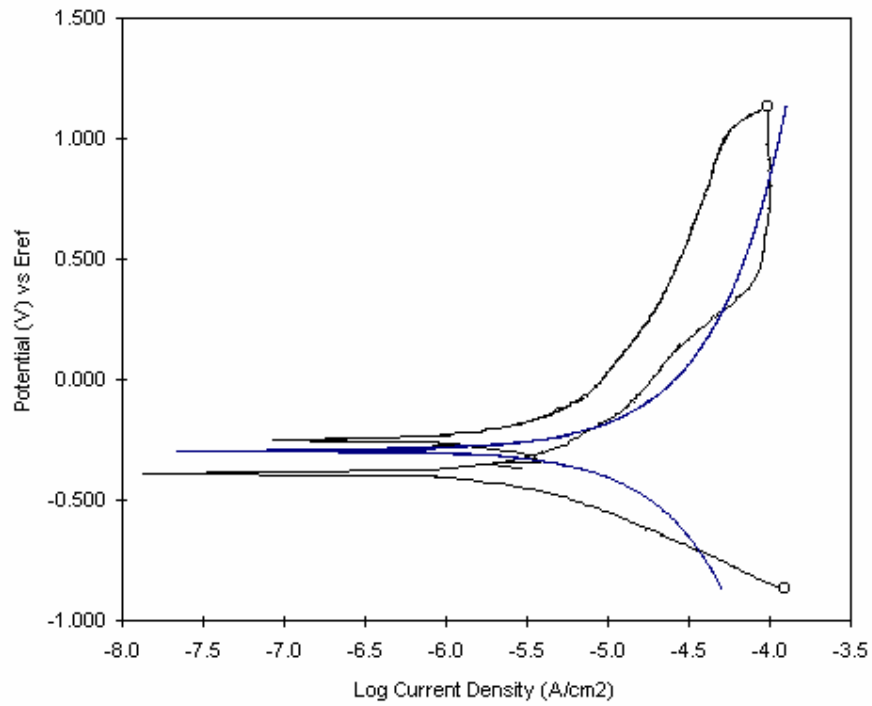


Fig. A-9. Polarización electroquímica del titanio bajo cavitación inducida.

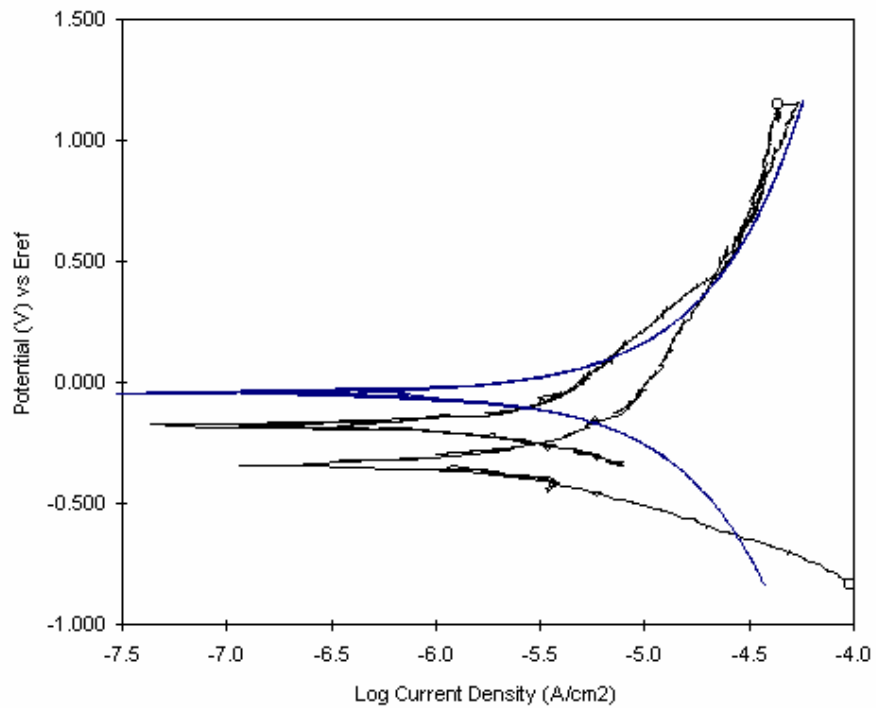


Fig. A-10. Polarización electroquímica del titanio bajo cavitación inducida.

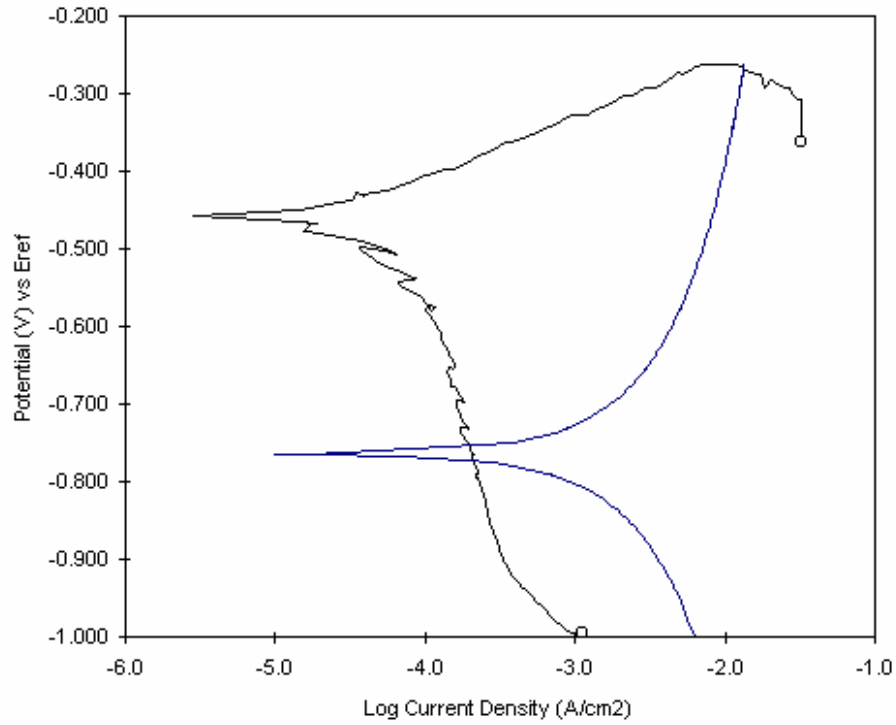


Fig. A-11. Polarización electroquímica del acero AISI 416 bajo cavitación inducida.

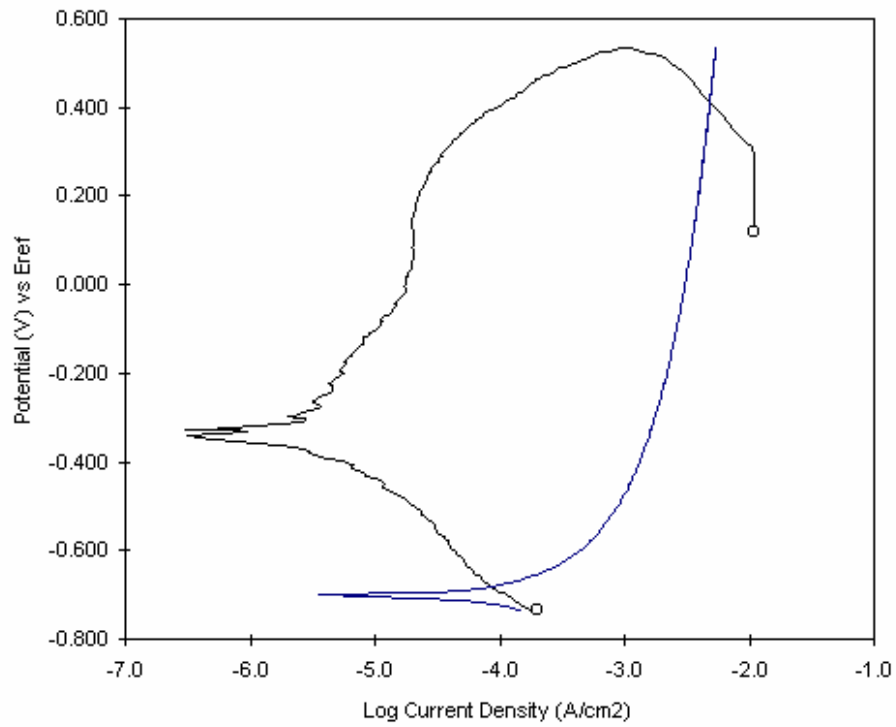


Fig. A-12. Polarización electroquímica del acero AISI 416 bajo cavitación inducida.

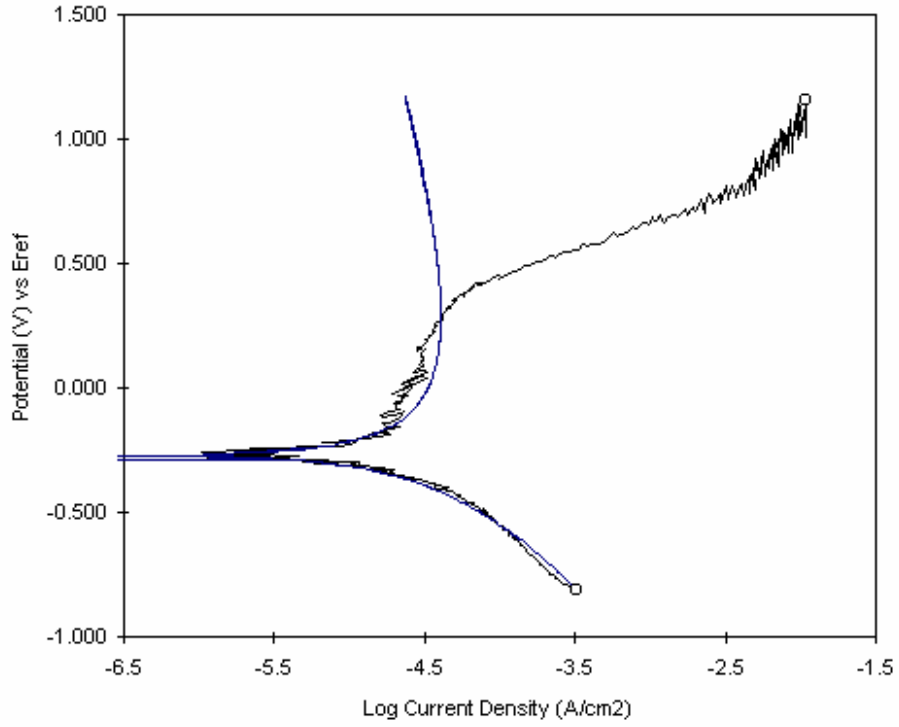


Fig. A-13. Polarización electroquímica del acero AISI 316 bajo cavitación inducida.

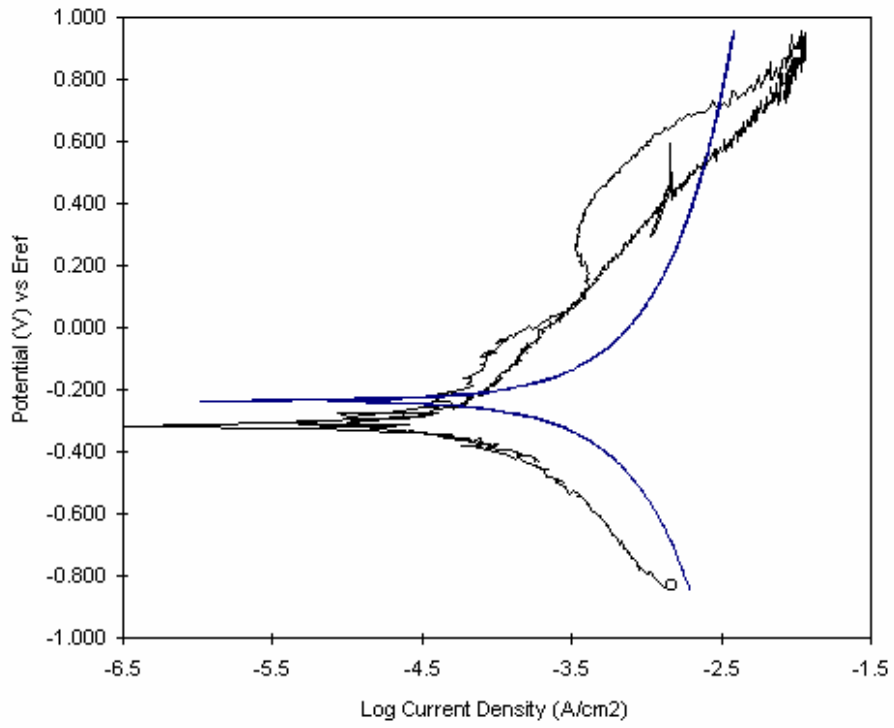


Fig. A-14. Polarización electroquímica del acero AISI 316 bajo cavitación inducida.

CAVITATION-CORROSION IN PUMPING EQUIPMENT

Navor Rosas González, Benjamin Valdez Salas

Red Nacional de Corrosión, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez s/n, 21280, Mexicali, Baja California, México. Tel y fax (6) 5664150, email: navor@telnor.net.

Abstract

Cavitation-corrosion phenomena is a priority factor in the operation analysis of rotodynamic pumps. The actual trend is to accept this problem in pumping stations during the operation if there is an economic convenience. A modern focusing of cavitation in metals is presented. Cavitation was induced in the laboratory mediated the construction of a physical model. Five different common metals used in the fabrication of water pumping equipment were analysed. It has been considered the water quality itself making reference to practical and real cavitation problem. The deterioration caused is analysed by clear field at low magnifications optical microscopy, and in detail by scanning electron microscopy. Corrosion rates were measured and compared within and without induced cavitation using potentiodynamic methods. Finally, alternatives are suggested combining hydraulic design with the appropriate use of metals and alloys.

Keywords: Electrochemical corrosion, cavitation-corrosion, localised corrosion, hydraulic design, vibration-cavitation.

Introduction

The cavitation phenomena occurs when a liquid flows by a region with pressure lower than the vapour pressure causing the liquid boiling with the consequent formation of vapour bubbles. These bubbles are transported by the liquid to a region with a higher pressure, where vapour come back to the liquid state suddenly, due to a fast implosion. If the bubbles are near or in touch with a solid wall at the stage change moment, the strength performed by the liquid to flatten the cavity leafed by the vapour, causing very high localised pressures around 415 MPa, promoting the pitting on the solid surface. The phenomena is generally accompanied by noise and vibrations.

Tests performed on pure liquids shown that such substances are capable to resist strength stress very high, around several hundreds of MPa. Generally exists spontaneous boiling when the vapour pressure is reached with commercial or technical liquids. It is accepted that the bubbles formation occurs by a nucleation process and the mechanism remain unknown today. It is necessary to suppose that this kind of liquids contains microscopic dust particles or another contaminants widely dispersed in the liquid.

In absence of dissolved air, bubbles can be formed by vibratory effects. Vibration is very common in unbalanced pump shafts in water wells where cavitation-corrosion occurs induced by this vibration. Recent studies report pressures in the order of 1000 to 1500 MPa during cavitation based on wave deformation analysis of photoelastic specimens [1-9]. These pressures are reasonable because mechanical damages observed in materials by cavitation. Industrial alloys used in the construction of components of rotodynamic pumps, have an

average mechanical resistance from 350 to 700 MPa, so, they are susceptible to cavitation-corrosion damage.

This study includes the evaluation of cavitation-corrosion induced by vibration in brass, UNS S31600, UNS S41600, low carbon steel and titanium specimens. Inductor vibration effect was obtained using an ultrasonic water bath to 35 kHz frequency.

Experimental Procedures

Cavitation-corrosion Induction

Metallic specimens were immersed in an ultrasonic water bath (250 NEY) settled to 35 kHz constant frequency. By doing so, the vibration produced on the specimens was capable to induce cavitation favouring corrosion. The tests were performed following some indications and recommendations of the Standard ASTM G32-85 [10].

The specimens were 2 cm² surface metallic rectangular pieces connected to the exterior by a copper isolated wire coupled to sealed glass tube, which serve as working electrode during the potentiodynamic polarisation tests. The electrochemical cell used for measurements was a three electrode cell using a graphite rod as auxiliary electrode and a saturated calomel electrode (SCE) as reference electrode. The scan rate was 5 mV/s and the equipment used to perform the electrochemical measurements was a Gamry PC 4 potentiostat and the data were analysed using the CMS 105 software. The assay temperature was maintained at 25 °C in a temperature controlled room.

The polarisation range was varied between -1.0 to 1.0 and -0.5 to 0.5 V vs E_{ref} depending of the material to evaluate. The solution used to fill the cell was raw water obtained from an irrigation canal derived from Colorado River. The experimental arrangement for electrochemical test performance is shown in Figure 1.

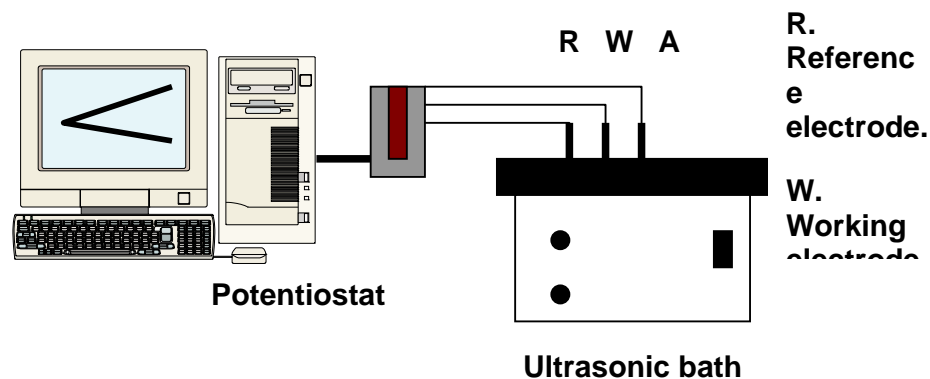


Figure 1.- Experimental arrangement for electrochemical test performance

Optical microscopy

After the corrosion experiments, each specimen was recovered and separated from the copper wire, dried with dry hot air and mounted on a glass hold sampler for its observation under

inverted optical microscope. The microscope used was a Swift Instruments model MT-1021 to yield a magnification of 100 X and coupled to a 35 mm camera to get images.

Scanning electron microscopy

The samples were kept in a dry closed place for subsequent observation under scanning electron microscope without any previous treatment. The SEM used was a JEOL 4100 coupled to a dry quantum device for X ray elemental analysis.

Results and Discussions

All the metallic alloys tested shown damage by cavitation due to the vibratory effect induced in the ultrasonic bath. SEM photomicrographs reveal a clear attack morphology by cavitation. Only steels will be discussed in this article because they are the most commonly used in the fabrication of pump components (casings, shafts, impellers, etc) for water.

Features of the mechanical behaviour are evidenced in the SEM photomicrographs. A severe plastic deformation occurs at the edge of holes made by the cavitation efforts on the metallic surface of low carbon steel (Figure 2). The attack in this material has an uniform distribution affecting all the surface, offering a new bare carbon steel surface that corrodes by the raw water used as corrosive environment. Formation, collapse and reformation of bubbles on the carbon steel surface were observed during the experiment and corroborated with the formation of deep cavities.

The electrochemical behaviour for low carbon steel after 6 hours exposition is showed in the Figure 3. A trend to remain as an active corrosion process can be observed in the anodic branch of the polarisation curve. A Tafel analysis performed to soft the curve yields a corrosion potential $E_{\text{cor}} = -270.6 \text{ mV vs SCE}$ and a corrosion rate $V_{\text{corr}} = 1.35 \text{ mm/year}$.

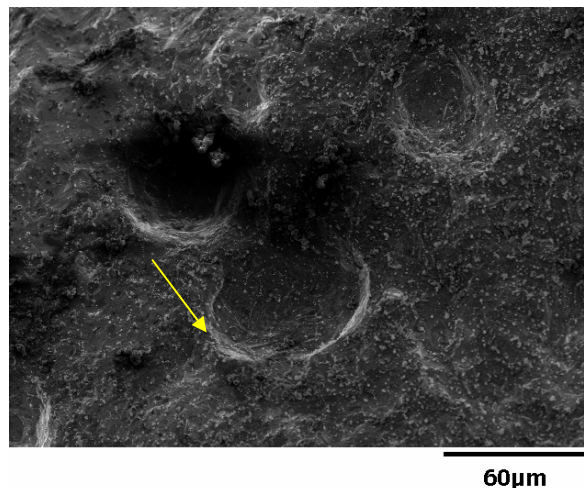


Figure 2. Photomicrograph of a Fe-C alloy showing plastic deformation at the edge of cavities produced during induced cavitation.

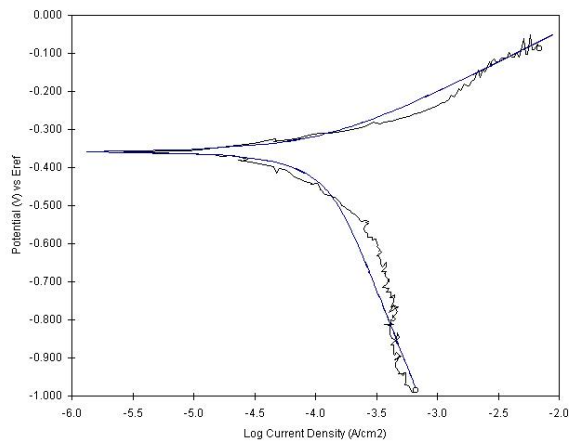


Figure3.- Potentiodynamic polarisation curve of low carbon steel during the process of induced cavitation-corrosion by vibration.

For the SS 416 cavitation-corrosion occurs attacking uniformly all the metallic surface (Figure 4). Plastic deformation is evident as same as deep cavities formation. Arrow in the Figure 4 indicates the possibility of cleavage at crystalline levels because material is detached undergoing severe damage by induced cavitation.

The electrochemical behaviour is showed in the Figure 5, where the curve was ran to lower potentials than low carbon steel. Nevertheless, response in both polarisation curve branches are similar and exhibit an active anodic process for corrosion of UNS 41600 stainless steel. The Tafel analysis represented by the soften curve yields a corrosion potential $E_{\text{cor}} = -357.9$ vs SCE and a corrosion rate $V_{\text{cor}} = 1.30$ mm/year.

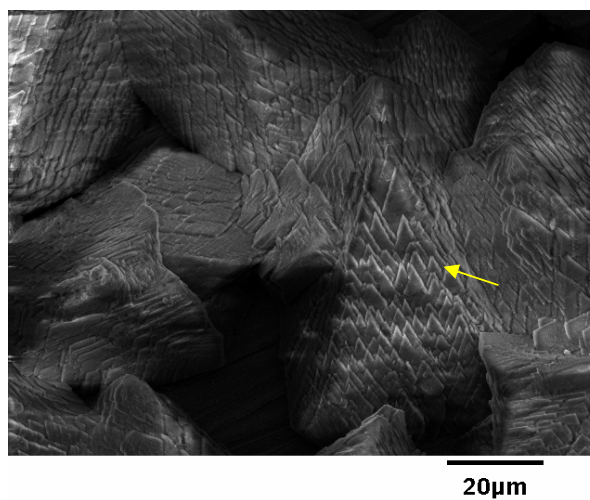


Figure 4. Photomicrograph of stainless steel UNS41600, metal undergone plastic deformation with apparent cleavage at crystalline levels revealing the severity of damages by induced cavitation.

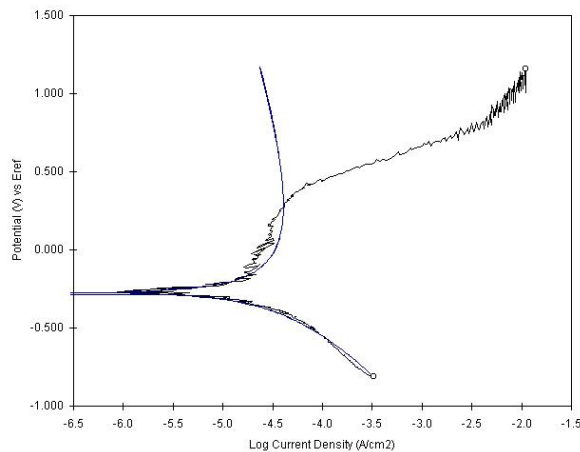


Figure 5.- Potentiodynamic polarisation curve of stainless steel UNS41600 during the process of induced cavitation-corrosion by vibration.

Conclusions

Vibratory effects caused by the application of 35 kHz frequency were sufficient to induce cavitation damage to all metals tested. Minor frequencies are required for iron alloys where damages by cavitation can occur with frequencies from 7000 to 12000 Hz. The combined effect of cavitation and the corrosivity of the Colorado River raw water are the main cause of failure in pumping equipment, which are fabricated with low carbon steel and stainless steel.

It is recommendable to avoid vibration in pumping systems to eliminate possibilities of cavitation-corrosion and further failures. Also, a well established maintenance program it is necessary for a longer useful life of the equipment.

Corrosivity of water handled by these equipment can not be chemically treated to diminish its aggressively, but cathodic protection could be a good option to protect the structure.

References

1. G.A. Schmitt, W. Bücken, R. Fanebust, Corrosion-Vol. 48 No. 5, NACE, USA, 1992.
2. T.Y. Chen, A. A. Moccari, D.D. Macdonald, Corrosion-Vol. 48 No. 3, NACE, USA, 1992.
3. S. Nešić, J. Postlethwaite, Corrosion-Vol. 47 No. 8, NACE, USA, 1991.
4. H. Nanjo, Y. Kurata O.Asano, N. Sanada, J. Ikeuchi, Corrosion-Vol. 46 No. 10, NACE, USA, 1990.
5. G.N. Blount, R.T. Moule, W.J. Tomlinson, Corrosion-Vol. 46 No. 4, NACE, USA, 1990.
6. Al-Hashem, P.G. Caceres, A. Abdullah, H.M. Shalaby, Corrosion-Vol. 53 No. 2, NACE, USA 1997.
7. J.R. Shadley, S.A. Shirazi, E. Dayalan, M. Ismail, E.F. Rybicki, Corrosion-Vol. 52 No. 9, NACE, USA, 1996.

8. G. Liu, D.A. Tree, M.S. High, Corrosion-Vol. 50 No. 8, NACE, USA, 1994.
9. K.D. Efird, E.j. Wriqth, J.A. Boros, T.G. Halley, Corrosion- Vol. 49, No. 12, 1993
10. ASTM STD, G32-85, Vibratory Cavitation Erosion Test, PA, ASTM, 1985.