



**Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura
Carrera de Ingeniería en Mecánica Naval**


**Proyecto de titulación
Modalidad Proyecto de Investigación**

ESTUDIO DE UN MODELO DE ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE
LA VIDA ÚTIL DE LOS EJES DE PROPULSIÓN DE BARCOS DE
ALTA VELOCIDAD CONSIDERANDO LA CORROSIÓN Y
FALLA POR FATIGA

Autor:
RODRIGUEZ MOSQUERA DIXON RONALDO

Tutor: Ing. Xavier Guillen

Manta – Ecuador
DICIEMBRE 2023

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-01-F-010
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO.	REVISIÓN: 1, Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de director del proyecto titulado: **“ESTUDIO DE UN MODELO DE ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE LA VIDA ÚTIL DE LOS EJES DE PROPULSIÓN DE BARCOS DE ALTA VELOCIDAD CONSIDERANDO LA CORROSIÓN Y FALLA POR FATIGA”** de modalidad proyecto de investigación, elaborado por el señor: **Dixon Ronaldo Rodríguez Mosquera**, egresados de la carrera de Ingeniería en Mecánica Naval, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación del jurado examinador que el honorable Consejo Directivo designe.

ING. Xavier Guillen
Tutor

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

Los suscritos, integrantes del tribunal correspondiente, declaramos que hemos **APROBADO** la tesis titulada "**ESTUDIO DE UN MODELO DE ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE LA VIDA ÚTIL DE LOS EJES DE PROPULSIÓN DE BARCOS DE ALTA VELOCIDAD CONSIDERANDO LA CORROSIÓN Y FALLA POR FATIGA**", que ha sido propuesta, desarrollada y sustentada por **RODRÍGUEZ MOSQUERA DIXON RONALDO**, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecánica Naval, de acuerdo a la GUÍA DE PROYECTO INVESTIGACIÓN de la FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA ULEAM.

Ing. Jonathan García

MIEMBRO

Ing. Anderson Buitrón

MIEMBRO

CERTIFICADO DE AUTOR

Los derechos de título y redacción, corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución al sr. DIXON RONALDO RODRIGUEZ MOSQUERA damos consentimiento para que la universidad laica Eloy Alfaro de Manabí, ejecute la comunicación publica de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual.



Dixon Ronaldo Rodríguez Mosquera

AUTOR



ING. Xavier Guillen

TUTOR

DEDICATORIA

El presente proyecto de titulación, se lo dedico a mis padres, Dixon Rodríguez Bone y Zoraima Mosquera Caicedo, por haber estado en la buenas y malas en toda mi carrera profesional, para culminar mi objetivo de ser ingeniero. A mis abuelos, mi hermano y sobre todo a los docentes que no dejaron decaer en todo mi proceso estudiantil, todos ellos aportaron un granito de arena para poder terminar mis estudios con altas y bajas. Gracias por su dedicación de enseñar con y sobre todo el trabajo arduo que fue de llegar al último punto que es el proceso de titulación. Me siento con mucha emoción de lograr mi meta y poder disfrutarlo con mi familia.

Rodríguez Mosquera Dixon Ronaldo

AGRADECIMIENTO

Primordialmente a Dios por haberme permitido estar con vida y salud, a mis padres, hermano, familia en general, y amigos, por el apoyo incondicional y consejos dados en todo el transcurso como estudiante de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Agradecer también a mi tutor el Ingeniero, Xavier Guillen por sus tutorías y asesorías, ya que con sus conocimientos y capacidad pudimos culminar con el proyecto planteado. A los docentes y personal administrativo de la carrera de Ingeniería en Mecánica Naval, todo mi agradecimiento por la compañía brindada durante la carrera.

Rodríguez Mosquera Dixon Ronaldo

RESUMEN

En Ecuador, el acero inoxidable SUS630 se usa generalmente en el sistema de ejes de propulsión para embarcaciones de alta velocidad. Desafortunadamente, la corrosión por picaduras es el factor principal que afecta la vida útil de la aleación de acero inoxidable SUS630. En este estudio, se evaluó el ciclo de vida en por fatiga residual y confiabilidad, se prevé establecer, bajo la condición de corrosión por picadura en sistema de ejes de propulsión de embarcaciones de alta velocidad un modelo de análisis de confiabilidad de la vida útil de los ejes de propulsión de barcos de alta velocidad considerando la corrosión y falla por fatiga mediante el método de inmersión química de pruebas aceleradas y ambientales respectivamente. A partir de los resultados de la experimentación, se logró establecer que la tendencia de crecimiento de la tasa de corrosión por picaduras del acero inoxidable SUS630 es exponencial; a partir de los resultados de la prueba de fatiga rotacional, se concluyó que cuando se produce este tipo de corrosión, su vida de fatiga residual es solo 10 veces mayor de la vida normal a fatiga ~20%.

Se logró establecer que la vibración torsional es el principal factor que causa daños en los ejes; además, a partir de los resultados del análisis de ejemplos de confiabilidad de los ejes, se encontró que para ejes fabricados del material SUS 630, la vibración de torsión tiene un impacto significativo en la confiabilidad.

Palabras Clave: *Corrosión, fatiga, vida útil, propulsión marina.*

ABSTRACT

In Ecuador, SUS630 stainless steel material is generally used in the propulsion shaft system for high-speed vessels. Unfortunately, pitting corrosion is a major factor in affecting the fatigue life cycle of SUS630 stainless steel alloy. In this study, through a life cycle prediction model of residual fatigue and reliability, a life reliability analysis model is planned to be established under the condition of pitting corrosion for the propulsion shaft system of high-speed vessels. usefulness of high-speed ship propulsion shafts considering corrosion and fatigue failure using the chemical immersion method of accelerated testing and environmental testing respectively. From the results of the pitting corrosion test, it was established that the growth trend of the pitting corrosion rate of SUS630 stainless steel is exponential; From the results of the rotational fatigue test, it was concluded that when pitting corrosion occurs, its residual fatigue life is only 10 times greater than the normal fatigue life ~20%.

It was established that torsional vibration is the main factor that causes damage to the axles; In addition, from the results of the analysis of shaft reliability examples, it was found that for shafts made of SUS 630 material, torsional vibration has a significant impact on reliability.

Keywords: *Corrosion, fatigue, useful life, marine propulsion.*

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	2
CERTIFICADO DE AUTOR.....	3
APROBACIÓN DE TRIBUNAL.....	4
DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTO.....	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
ÍNDICE	9
ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABLAS	12
INTRODUCCIÓN	14
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	15
OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN.....	16
HIPÓTESIS	16
OBJETIVO GENERAL	16
TAREAS DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
1. CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	18
1.1. ANTECEDENTES	18
1.2. DISEÑO TRADICIONAL Y EL DISEÑO DE CONFIABILIDAD	19
1.3. MATERIALES DE EJE	22
1.3.1. Ciencia de materiales y análisis de fases de cristales de fractura.	23
1.3.2. Teoría de la corrosión por fatiga	24
1.4. EVOLUCIÓN DE LOS REQUISITOS DE EJES DE PROPULSIÓN Y ANÁLISIS DE DAÑOS	26
1.4.1. Consideraciones típicas de daños en ejes.....	28
1.4.2. Requisitos de resistencia para sistemas de ejes de propulsión de buques	

2. CAPÍTULO II: CONSIDERACIONES BASICAS DE DISEÑOS DE EJE DE ALTA VELOCIDAD.....	32
2.1. DISEÑO MATEMÁTICO	32
2.2. CLASIFICACIÓN	33
2.3. ESPECIFICACIÓN PARA EL DIÁMETRO DEL EJE.....	35
2.4. EJEMPLOS REALES DE CORROSIÓN POR PICADURAS.....	36
3. CAPÍTULO III. VIDA ÚTIL DE LOS EJES DE PROPULSIÓN	39
3.1. DISEÑO DE PRUEBA DE CORROSIÓN POR PICADURAS	41
1.4.3. Métodos	41
1.4.4. Método de prueba de picadura acelerada.....	42
1.4.5. Métodos de prueba del entorno real.....	47
1.4.6. Tasa de corrosión por picaduras.....	48
3.2. ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL Y LA TASA DE PICADURAS	52
1.4.7. Métodos de prueba y resultados	52
1.4.8. Resultados del cálculo de la tasa de corrosión por picaduras.....	55
1.4.9. DISCUSIÓN: Análisis de la confiabilidad de la vida a fatiga	62
CONCLUSIONES.....	64
RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de diseño de ejes de sistemas de propulsión.	21
Figura 2. Corrosión por picaduras en el actual sistema de ejes de una embarcación de 100 toneladas.....	37
Figura 3. Corrosión por picaduras en el actual sistema de ejes de una patrullera de 50 toneladas.....	37
Figura 4. Fenómenos de picaduras del actual sistema de eje barco de 35 toneladas	38
Figura 5. Corrosión por picadura del eje en el lado de babor y estribor de un barco de 30 toneladas.....	38
Figura 6. Fotos de medición de profundidad de corrosión por picaduras.....	46
Figura 7. Foto del sitio de prueba del entorno dinámico.....	47
Figura 8. Foto de método de prueba en entornos estáticos.	47
Figura 9. Curvas de profundidad de corrosión por picaduras para ensayos ambientales dinámicos y estáticos.	51
Figura 10. Curvas de velocidad de corrosión por picaduras para pruebas ambientales estáticas y dinámicas	52
Figura 11. Fotos de muestra de sección delgada	54
Figura 12. Tasa de corrosión de sección delgada.....	54
Figura 13. Muestra de barra redonda de 10 mm de diámetro	54
Figura 14. Tasa de corrosión de una varilla redonda de 10 mm de diámetro	54
Figura 15. Muestra cilíndrica de 50 mm de diámetro	54
Figura 16. Tasa de corrosión del cilindro de 50 mm de diámetro.....	54
Figura 17. Muestra de placa circular de 63 mm de diámetro	55
Figura 18. Tasa de corrosión de una placa circular de 63 mm de diámetro.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos de resistencia para sistemas de ejes de propulsión de buques	30
Tabla 2. Tipos de barcos de alta velocidad	34
Tabla 3. Método de prueba de picadura acelerada	43
Tabla 4. Estándar de prueba ASTM G 48-76	44
Tabla 5. Programa de pruebas acelerada	45
Tabla 6. Plan de pruebas ambientales	48
Tabla 7. Resultados promedio de la profundidad de picaduras y la velocidad de corrosión de las pruebas aceleradas	49
Tabla 8. Valor estimado de la tasa de corrosión por picaduras (mm/100/día) en prueba ambiental dinámica (basado en 30 días por mes)	50
Tabla 9. Valor estimado de la tasa de corrosión por picaduras (mm/100/día) en pruebas ambientales estáticas (basado en 30 días por mes)	50
Tabla 10. Velocidad de corrosión prevista y precisión de la muestra A en prueba acelerada	56
Tabla 11. Velocidad de corrosión prevista y precisión de la muestra B en prueba acelerada	56
Tabla 12. Valor previsto de la profundidad de las picaduras a partir de la prueba dinámica de la teoría <i>moho gris GM</i> (unidad: mm/100)	57
Tabla 13. Valor previsto de la profundidad de las picaduras a partir de la prueba estática de la teoría gris (unidad: mm/100)	57
Tabla 14. Valor previsto de la velocidad de corrosión por picaduras a partir de la prueba dinámica de la teoría gris (unidad: mm/100/h)	58

Tabla 15. Valores previstos de la velocidad de corrosión por picaduras a partir de la prueba estática de la teoría gris (unidad: mm/100/h)	58
Tabla 16. Valor previsto de la profundidad de las picaduras mediante prueba dinámica utilizando el método estadístico (unidad: mm/100)	59
Tabla 17. Valor previsto de la profundidad de las picaduras a partir de una prueba estática utilizando el método estadístico (unidad: mm/100)	60
Tabla 18. Valor predictivo de la tasa de corrosión por picaduras mediante prueba dinámica utilizando el método estadístico (unidad: mm/100)	60
Tabla 19. Valor previsto de la tasa de corrosión por picaduras a partir de una prueba estática utilizando el método estadístico (unidad: mm/100)	61

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los amplios objetivos formulados por la OMI, la Asociación Internacional de Inspectores de Buques (IACS) propuso el concepto de diseño de Normas basadas en objetivos (GBS). El plan de mantenimiento del barco hace que tenga un cierto nivel de confiabilidad dentro de la vida útil establecida; mientras que la Asociación Naviera Alemana (GL) propone una metodología basada en el riesgo (OMI, 2019). El método se basa en estándares de riesgo aceptables en todos los niveles de seguridad del buque, y debe ser medible y verificable, no solo para la resistencia del buque, sino también para áreas generadas por marcos de factores de riesgo (Romero, 2017).

Este estudio analizará un método de evaluación y análisis para la vida útil de los ejes de propulsión de barcos de alta velocidad. Actualmente, los ejes de propulsión de las embarcaciones de alta velocidad utilizan principalmente material SUS 630.

Los ejes de propulsión de los barcos de alta velocidad utilizan aleaciones de alta resistencia. Los diseñadores o usuarios de barcos a menudo tienen ciertos mitos e ilusiones sobre los materiales, pensando que mientras elijan los materiales correctos, el problema se resolverá. Debido a ello, este estudio analizará la vida útil de los ejes SUS630 considerando la corrosión y falla por fatiga (González, 2020).

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En la década de 1950, el diseño de ejes de propulsión de barcos se basaba en el cálculo de la resistencia estática. El eje se consideraba como una viga continua, y su carga se simplificó a carga estática para el cálculo. Esta suposición es muy diferente de la situación real, por lo que se debe usar un factor de seguridad mayor, pero este método rara vez se usa en la actualidad. La fractura, destrucción y falla del eje se ven afectadas principalmente por cargas alternas periódicas, y el daño por fatiga es el principal modo de falla del eje (Bilalis, et al, 2022).

Después de la década de 1960, se agregó el cálculo de vibración torsional al diseño de ejes; a principios de la década de 1980, se agregó el cálculo de vibración circular, vibración longitudinal y centrado. La adición de este tipo de cálculo es principalmente para considerar la carga soportada por los ejes durante la operación, especialmente la influencia de las cargas alternas en la resistencia de los ejes, lo cual es una mejora en el método de diseño de ejes. Sin embargo, no tiene en cuenta el estado de trabajo de estrés de múltiples condiciones del eje y la influencia de la corrosión en la resistencia y la vida de fatiga del eje (Xiao y Zhi, 2021).

En 1980, la Asociación Internacional de Clasificación de Barcos (IACS) formuló las reglas claras a seguir para los requisitos de resistencia de los ejes de propulsión de acero de los barcos.

Desde la Organización Marítima Internacional (OMI), se han formulado muchas reglas. La Convención sobre la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS) ha sido revisada y actualizada muchas veces, y los requisitos de seguridad son cada vez más estrictos. Aunque estos requisitos han jugado un papel importante en la seguridad de los barcos, la implementación no es satisfactoria y los accidentes marítimos continúan ocurriendo. En 1994, el Código internacional de seguridad para

embarcaciones de alta velocidad (International Code of Safety for High Speed Craft 1994) promulgado por la Organización Marítima Internacional (OMI) ya no adopta requisitos obligatorios para la especificación de la resistencia de los ejes de propulsión de naves de alta velocidad, pero es una explicación basada en principios, por lo tanto, no se puede seguir ninguna fórmula de cálculo obligatoria, lo que da lugar a diferentes opiniones entre las principales astilleros de cualquier medio (OMI, 2019; Vizentin et al., 2020 y Adaby et al, 2022).

OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación compara el proceso de diseño tradicional y el proceso de diseño de confiabilidad de los ejes de propulsión de barcos. La principal diferencia es estudiar los principios estimación de factores inciertos y estimación de confiabilidad al proceso de diseño de confiabilidad.

Factores inciertos en la navegación real de los ejes de propulsión de los barcos de alta velocidad, como la aleatoriedad del viento y las olas, la aleatoriedad de la vibración torsional, la aleatoriedad del estado excéntrico de los ejes y la aleatoriedad de la corrosión por picadura causada por los materiales y entornos, etc.

HIPÓTESIS

Es posible establecer un modelo de análisis de confiabilidad de la vida útil de los ejes de propulsión de barcos de alta velocidad considerando la corrosión y falla por fatiga

OBJETIVO GENERAL

- Presentar y discutir una metodología de análisis de fiabilidad de la vida útil calculada de los ejes de propulsión de barcos de alta velocidad bajo el fenómeno de corrosión y falla por fatiga.

TAREAS DE LA INVESTIGACIÓN

- **Tarea 1:** Conceptualizar e indagar mediante una investigación sistemática el diseño de ejes de propulsión con de acero, los modelos de confiabilidad, la corrosión y las variables mecánicas previstas a falla.
- **Tarea 2:** Analizar la influencia de la corrosión por picaduras en la vida útil de los ejes de propulsión para establecer una metodología de análisis de confiabilidad de los ejes de propulsión de barcos de alta velocidad.
- **Tarea 3:** Evaluar los resultados y analizar si es posible aplicarlos para determinar la fiabilidad de vida útil calculada de un eje de propulsión.

1. CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES

En Ecuador, el material de acero inoxidable SUS630 se usa generalmente en el sistema de ejes de propulsión para embarcaciones de alta velocidad. Desafortunadamente, la corrosión por picaduras es un factor principal para afectar el ciclo de vida de fatiga de la aleación de acero inoxidable SUS630.

En este estudio, mediante un modelo de predicción del ciclo de vida de fatiga residual y la confiabilidad se prevé establecer bajo la condición de corrosión por picadura para el sistema de ejes de propulsión de embarcaciones de alta velocidad. La tasa de crecimiento y la tendencia a la corrosión por picaduras ocurridas en el acero inoxidable SUS630 se estima mediante la teoría del sistema gris a través de la prueba de aceleración de la corrosión con cloruro férrico (Dzionk et al., 2020). Como consecuencia de estos procesos, se puede evaluar la vida útil en condiciones de fatiga residual y la confiabilidad de ejes de acero inoxidable corroído por picaduras. El modelo establecido se puede aplicar al diseño preliminar para el eje de propulsión bajo el índice de confiabilidad prescrito y estimar la limitación permisible de profundidad de corrosión por picaduras y la vida de fatiga residual (Vizentin, et al., 2020).

Mientras tanto, en la etapa de mantenimiento, este modelo de confiabilidad también se puede aplicar para determinar si el eje debe repararse o no, una vez que se mide la profundidad de la corrosión por picadura. Por lo tanto, se puede prever la fiabilidad y seguridad del ciclo de vida del sistema del eje de propulsión.

1.2. DISEÑO TRADICIONAL Y EL DISEÑO DE CONFIABILIDAD

Debido al cálculo del diámetro del eje de propulsión de los barcos de alta velocidad, no existe una fórmula de cálculo fija que se pueda aplicar en el código de los barcos de acero, y el entorno especial y la lógica de pensamiento de cada país son diferentes, como las diferencias en la cultura comercial marítima, por lo tanto, existen puntos de vista y discusiones completamente diferentes sobre los estándares de seguridad del casco (Adaby, et al., 2022).

Unos enfatizan el mantenimiento y la buena gestión de la operación, mientras que otros se preocupan por los márgenes reservados en el diseño preliminar, como los márgenes de corrosión de los barcos, el consumo y los márgenes, para garantizar una larga vida útil de los barcos.

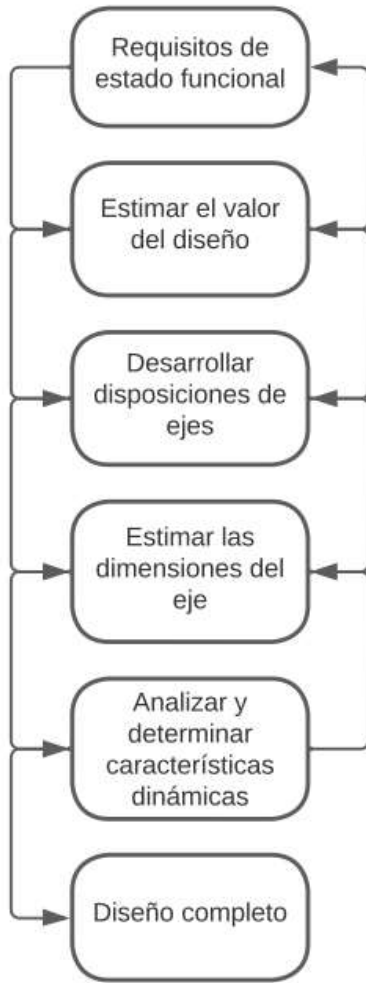
Por lo tanto, se necesita un nuevo método y pensamiento lógico para evaluar las reglas de seguridad existentes y formular nuevas reglas de seguridad en el futuro. Este es el método de análisis y evaluación de riesgos que se ha utilizado ampliamente en otros campos industriales. Por ejemplo, los países miembros de la IACS utilizan la teoría de la confiabilidad para analizar la estructura del casco de los buques graneleros; Payer (2019) afirma que la importancia y la indispensabilidad de la confiabilidad para el desarrollo futuro de los buques “Para el análisis y evaluación del riesgo, es necesario predecir su confiabilidad”.

El método de diseño tradicional se basa principalmente en el factor de seguridad. Para dominar y aplicar el método de diseño de confiabilidad, se introduce el concepto de coeficiente de confiabilidad en el diseño. El factor de confiabilidad no solo conserva las características del factor de seguridad de diseño tradicional original, sino que también permite a los diseñadores usar el factor de confiabilidad para diseñar, al igual que usar el concepto tradicional de factor de seguridad. Al mismo tiempo, también

tiene en cuenta la variabilidad de tensión y resistencia y la fiabilidad de la estructura requisitos imprescindibles para el diseño (González, 2020).

Este estudio introducirá este concepto para el diseño de sistemas de ejes de propulsión de barcos de alta velocidad. El proceso de diseño se muestra en Figura 1, que compara el proceso de diseño tradicional y el proceso de diseño de confiabilidad del sistema de ejes de propulsión de barcos.

DISEÑO TRADICIONAL



DISEÑO A CONFIABILIDAD

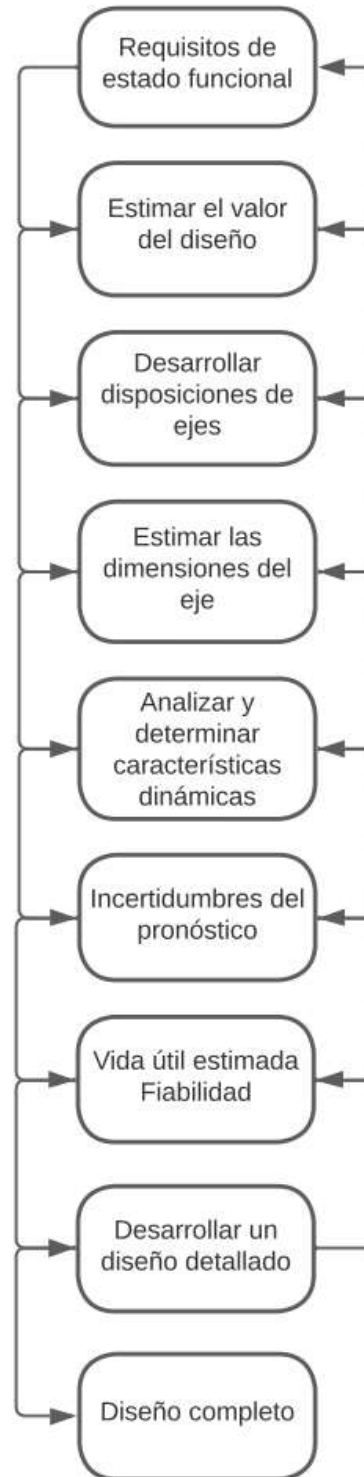


Figura 1. Proceso de diseño de ejes de sistemas de propulsión.
Fuente: Elaboración Propia

Factores inciertos en la navegación real de los sistemas de ejes de propulsión de barcos de alta velocidad causan estos problemas, como la aleatoriedad del viento, las olas, la aleatoriedad de la vibración torsional, la aleatoriedad del estado excéntrico del sistema de ejes y la aleatoriedad de la corrosión por picaduras causada por los materiales en conjunto con los factores medioambientales, etc (Vukelic y Vizentin, 2017). Este estudio establecerá un modelo de análisis de confiabilidad para el impacto de estos factores en el sistema de eje de propulsión de barcos de alta velocidad.

1.3. MATERIALES DE EJE

El acero inoxidable de las series SUS304 o SUS316 pertenece al tipo Worthfield, también conocido como acero inoxidable al cromo-níquel. Aunque el acero inoxidable Worthfield es un acero resistente a la corrosión, el agrietamiento por corrosión bajo tensión ocurre a menudo en ciertos medios, especialmente en medios que contienen cloruro, bajo condiciones de tensión, por lo que se debe prestar especial atención al usarlo (Takashi et al., 2018).

Para fortalecer el acero inoxidable tipo Worthfield, el método normalizado es el endurecimiento por trabajo. Sin embargo, es difícil lograr el propósito para piezas de sección grande que requieren alta resistencia para ensamblar piezas con formas complejas, especialmente el sistema de eje de propulsión, debido a los diferentes grados de deformación en todas partes, lo que provocará un fortalecimiento desigual. Para resolver este problema, se debe utilizar acero inoxidable endurecido por precipitación, y el acero inoxidable de la serie SUS630 es la mejor opción (YunLong et al., 2020).

Este estudio evaluará la vida útil residual y la confiabilidad del material de acero inoxidable SUS630 cuando ocurre corrosión por picaduras. Para discutir este tema, se involucra una amplia gama de disciplinas y se requiere una amplia variedad de

referencias. La literatura y la información relevantes se enumerarán a continuación según las diferentes disciplinas.

1.3.1. Ciencia de materiales y análisis de fases de cristales de fractura.

Diversos autores han propuesto estudios experimentales sobre el mecanismo de recuperación del daño por fatiga y el tratamiento térmico del acero con bajo contenido de carbono donde la recuperación del daño por fatiga de los materiales metálicos es una cuestión apremiante. Muchos científicos y técnicos han invertido mucho trabajo en la reparación de daños por fatiga de materiales metálicos, por lo que también han confirmado la teoría de la reparación de daños por fatiga y han propuesto muchos modelos y métodos de cálculo para restaurar este fenómeno.

Tang et al, (2021) propusieron en un artículo sobre fractura por fatiga tridimensional de piezas metálicas en entornos complejos que en materiales dúctiles reales, las grietas se embotan debido a una gran deformación plástica y no hay tensión singular. En ambientes corrosivos, las grietas también serán pasivadas por la corrosión y los defectos geométricos en los materiales y estructuras reales son inevitables. Por lo tanto, la descripción de los campos de grietas y entalladuras es más importante para la predicción de daños por fatiga de materiales y estructuras. De hecho, los límites entre grietas y entallas son difíciles de distinguir.

Jingjing et al., (2022) propusieron en un artículo sobre la influencia de la matriz en la tenacidad a la fractura del hierro fundido maleable que contiene hierro plenum y hierro graso con una estructura cúbica centrada en el cuerpo. Esta estructura tiene buena tenacidad y plasticidad, pero baja resistencia y dureza; la perlita es una estructura en capas de hierro graso y cementita dispuestas alternativamente. Esta estructura tiene buena resistencia y dureza, pero baja tenacidad y plasticidad. A partir del análisis de microestructura, la morfología microscópica de la superficie de fractura de la matriz

de hierro de grano grueso son hoyuelos; la morfología microscópica de la superficie de fractura de la matriz de perlita tiene características de cuasi escisión. A medida que aumenta la cantidad de hierro ondulado, la tenacidad a la fractura del hierro fundido maleable disminuye, lo que también refleja los cambios en la matriz del hierro fundido maleable.

Cuando las piezas estructurales se someten a cargas cíclicas de baja frecuencia, para materiales policristalinos, en un determinado punto de concentración de tensiones local, debido al movimiento diferencial de los granos, se generan líneas de deslizamiento, formando zonas de deslizamiento y se inician microfisuras. Las grietas se expanden aún más, es decir, se forman pequeñas grietas y macrogrietas, y esta primera etapa se denomina etapa de formación de grietas (Youghne, 2019). En esta etapa, según Basim et al., (2020) el tamaño de las pequeñas grietas es sólo de unas pocas décimas de milímetro y su tamaño es de aproximadamente 2 a 5 granos. La dirección de propagación de pequeñas grietas forma un ángulo de 45° con respecto a la tensión de tracción.

1.3.2. Teoría de la corrosión por fatiga

El proceso de fatiga se divide en tres etapas: formación de grietas por fatiga, propagación de grietas y fractura instantánea final. En la etapa final de fractura instantánea, el componente ha perdido su capacidad de carga, por lo que la investigación sobre fatiga se centra principalmente en las dos etapas de formación de grietas por fatiga y propagación de grietas. Sin embargo, debido a las diferentes áreas temáticas, ángulos de investigación y puntos de partida de la investigación de los investigadores, existen grandes diferencias en la definición y división de estas dos etapas, y hasta el momento todavía faltan estándares unificados (Zhang et al., 2019).

Behvar y Haghshenas, (2023) propusieron en su artículo sobre las condiciones y los efectos de las grietas cortas por fatiga que se transforman en grietas largas que el inicio y el desarrollo de las grietas cortas por fatiga en materiales de aleación muestran las características de la evolución del grupo, es decir, el número de Las grietas cortas por fatiga aumentan con el ciclo de carga, el número de daños aumenta con cada ciclo y el grado de acumulación de daños depende del número de grietas cortas. En la etapa de daño por fisura corta, la longitud de la fisura es equivalente al tamaño de los granos relevantes; al mismo tiempo, las orientaciones de los granos adyacentes son diferentes. Por lo tanto, el tamaño del grano y el grado en que la periferia del grano obstaculiza el crecimiento de las grietas afectan significativamente el proceso de acumulación de daños en los grupos de grietas cortas.

Dong et al. (2023) discutieron el método de análisis de la vida por fatiga de la raíz de la entalla y señalaron que ya sea la formación de grietas por fatiga o la expansión de las grietas por fatiga, se debe a la acumulación continua de daños en un área local determinada, lo que en última instancia conduce al fracaso del proceso.

Leishear, (2023) propuso utilizar el método de intensidad del campo de tensión bajo cargas complejas para estimar la vida a fatiga. Su argumento principal es que el daño por fatiga siempre ha sido uno de los principales modos de daño y falla de piezas mecánicas y componentes de ingeniería. Por lo tanto, para el diseño de varios tipos, es de gran importancia para maquinaria e ingeniería sometidas a cargas cíclicas.

Xiao y Zhi, (2021) estudiaron los parámetros de daño por fatiga basándose en el comportamiento evolutivo de las grietas cortas y concluyó que el proceso de formación y expansión de las grietas cortas puede representar la mayor parte de la vida a fatiga de las muestras sin entalladuras. Por lo tanto, es de gran importancia práctica estudiar las características de evolución de las grietas cortas y utilizar

parámetros basados en la evolución de los grupos de grietas cortas como parámetros de daño por fatiga. Algunos estudios sobre las características de evolución de grupos de fisuras cortas han propuesto utilizar como parámetro de daño la longitud total de las fisuras por unidad de área al nivel de densidad de fisuras, sin embargo, en este estudio no se utilizó un método de medición unificado ni se analizó la discreción de este parámetro, por lo que de los resultados obtenidos las conclusiones varían (González, 2020).

Concluyendo, la etapa de formación de grietas por fatiga consiste principalmente en el proceso de formación y expansión de grietas cortas por fatiga. La investigación sobre el comportamiento de formación y expansión de las grietas cortas por fatiga proporciona un posible medio para resolver finalmente este problema.

1.4. EVOLUCIÓN DE LOS REQUISITOS DE EJES DE PROPULSIÓN Y ANÁLISIS DE DAÑOS

El sistema de eje de propulsión del barco está sujeto a diversas fuerzas y momentos durante el funcionamiento, lo que produce tensiones de torsión, tensiones de compresión y tensiones de flexión. Estas fuerzas y momentos tienen características alternas, especialmente cuando la frecuencia de interferencia del motor diesel o de la hélice es la misma que la frecuencia natural del sistema de eje, donde se producirán fuertes vibraciones, como vibración torsional, vibración longitudinal y vibración cicloidal, junto con la corrosión de la superficie del sistema de eje. La concentración de tensión resultante es a menudo el factor principal que causa daños al sistema de eje (Bilalis et al., 2022).

Una proporción muy alta de daños en los ejes de propulsión se debe a vibraciones de torsión, y las causas de las vibraciones de torsión son muy complejas. A partir de la teoría y las especificaciones de cálculo proporcionadas por varias sociedades de

clasificación, se puede saber que la consideración se centra en la composición del material en los factores estructurales y los factores materiales, mientras que la estructura y el rendimiento del material en los factores de procesamiento, los factores ambientales de uso real y se ignoran los factores materiales (Leishear, 2023).

Cuando se calcula teóricamente la vibración torsional, solo es posible basarse en los datos de los planos de diseño, sin embargo, en la construcción real, a menudo es imposible confiar completamente en los planos de diseño, como los valores de desviación generados durante la instalación del sistema de eje (Shifler, 2022). Por lo tanto, según Youghune, (2019) los valores de cálculo teórico no pueden cumplir completamente con los requisitos de análisis dinámico de dispositivos y estructuras reales, y aún deben depender de experimentos, mediciones reales y otros métodos de análisis para una verificación complementaria. Por lo tanto, cuando un nuevo barco se pone a prueba en el mar, se deben realizar mediciones reales para compararlas y verificarlas con cálculos teóricos.

Los daños causados por la vibración torsional se pueden dividir principalmente en tres categorías: la primera categoría son las fracturas por fatiga o grietas del eje intermedio, el cigüeñal, el eje de popa y el eje de la hélice; la segunda categoría son los componentes de la transmisión y los componentes de conexión, como los acoplamientos elásticos a la brida; la tercera categoría es el desgaste de las palas de la hélice y el aflojamiento de la tuerca de fijación de la hélice (Vizentin et al., 2020).

Los ejes de propulsión de los buques de pesca generalmente están hechos de acero forjado con bajo contenido de carbono o acero aleado, mientras que los barcos de alta velocidad utilizan series de acero inoxidable. El daño de los dos es diferente: el primero se daña principalmente debido a la fatiga (Lee et al., 2017), el segundo se daña debido a la fatiga por corrosión (Esquivel y Cuevas, 2020).

1.4.1. Consideraciones típicas de daños en ejes

En los sistemas de propulsión de los barcos pesqueros, por su condición de trabajo aligerado, otras veces cargados de pesca, las contramarchas que se dan durante las maniobras de faenas y malas ejecuciones en el arte de pesca; se producen daños típicos en los ejes. Adicional se tiene los daños por mantenimiento normal, es decir las reparaciones por el desgaste anual de la propulsión, sea por fricción, corrosión y desbalanceo de la hélice (González, 2020).

De tal forma, que, en base a la experiencia, los daños en los ejes propulsores se pueden clasificar de las siguientes maneras:

- **Corrosión normal.** Por efecto de la salinidad y el medio agresivo como lo es el túnel de propulsión y el túnel húmedo del eje de cola, la corrosión se presenta normalmente en los acoples o bridas de los ejes y contrajes. Suele ocurrir que las bridas pierden su ajuste con los ejes y permiten que ingrese el agua salada en pequeñas cantidades, generando corrosión continua que desmorona el acero y modifica su capacidad mecánica.
- **Por corrientes focalizadas.** En los ejes se observa picaduras por corrientes focalizadas, debido a que se encuentran dentro de una cámara o túnel que está expuesto al agua de mar, residuos de pescado y otros contaminantes. El eje actúa como un ánodo de sacrificio entre el agua de mar y el acero de la embarcación, generalmente comenzando en la zona cerca de discontinuidades.
- **Fricción por trabajo.** El eje por ser un transmisor de potencia mecánica, gira a ciertas revoluciones durante todo su trabajo. En el caso de los ejes de propulsión de buques pesqueros, las revoluciones están siempre entre 250 a 350 RPM, pues los buques usan cajas reductoras para aumentar la potencia.

Son muy pocos los casos de pesqueros que no tengan caja reductora, como lo es el caso de los buques mercantes. De tal forma que en los puntos de apoyo o descansos de los ejes, va a existir desgaste por fricción, este tipo de desgaste persigue formas circunferenciales y paralelas entre sí. Esto se debe a los contaminantes que se introducen en la lubricación del descanso, sea por aceite o por grasa, y se alojan en las paredes del material de sacrificio (Lin et al., 2014).

- **Sobreesfuerzos.** Por su condición de trabajo, el buque pesquero en ocasiones debe dar marcha adelante, marcha atrás, acelerarse a todas las RPM del motor principal y en ocasiones cuando se enreda la red o los cabos en la hélice, detenerse violentamente su marcha produciendo esfuerzos adicionales sobre el sistema propulsor sobrepasando sus condiciones de funcionamiento.

1.4.2. Requisitos de resistencia para sistemas de ejes de propulsión de buques

El sistema de eje de propulsión está ubicado entre el motor principal y la hélice, es el encargado de transmitir el torque del motor principal a la hélice, al mismo tiempo transmite el empuje de la hélice al casco a través del cojinete del eje de empuje en el sistema de eje, para que el barco pueda navegar según las instrucciones de conducción.

Los ejes de propulsión de barcos se refieren al nombre general de los componentes de transmisión de potencia desde el extremo de salida del motor principal o dispositivo de transmisión hasta la hélice. Los componentes del sistema del eje de propulsión incluyen el eje de la hélice, el eje intermedio, el eje de empuje, los prensaestopas del compartimiento, el cojinete del eje intermedio, el cojinete del eje de empuje, la bocina, etc (Carlton, 2012). La configuración de los componentes del sistema de eje de propulsión se determina basándose en la ubicación de la góndola.

Dado que el sistema de eje de propulsión está situado por debajo de la línea de flotación, ha estado sumergido en agua durante mucho tiempo, lo que genera duras condiciones de trabajo y tensiones complejas. También se ve afectado por la deformación y la carga del casco (Vukelic y Vizentin, 2017). Si el diseño, disposición o instalación del eje es inadecuado, a menudo provocará generación de calor o daños graves por moho en las partes de fricción del eje, e incluso accidentes por rotura del eje. Una vez que ocurre un accidente en el sistema de ejes, el barco será detenido para mantenimiento o atraque, lo que afectará los beneficios económicos (Barquero, 2011). El diseño del sistema de ejes debe cumplir requisitos estrictos. Generalmente se persiguen los siguientes aspectos:

Tabla 1. Requisitos de resistencia para sistemas de ejes de propulsión de buques

REQUISITO	CONCEPTO
Operación confiable y larga vida útil	Cada eje de transmisión y las partes de soporte del sistema de eje deben tener suficiente resistencia y rigidez. Los componentes principales deben cumplir con los requisitos de las normas de clasificación de buques y someterse a una verificación de resistencia para garantizar que el sistema de eje no se deforme o rompa permanentemente bajo diversas condiciones de carga duras, lo que hace que su funcionamiento sea seguro y confiable y tenga una larga vida útil.
Utilice estructuras estandarizadas siempre que sea posible.	El eje de transmisión y los accesorios del eje deben adoptar estructuras estandarizadas en la medida de lo posible en función de las necesidades de trabajo. Esto no sólo aporta comodidad a la fabricación y la instalación, acorta el período de construcción naval, reduce los costos de fabricación y mejora los beneficios económicos, sino que también proporciona una garantía confiable para la calidad del producto.

Pequeña pérdida de transmisión	En el diseño del sistema de eje, se debe seleccionar correctamente el número, disposición y método de lubricación de los cojinetes para minimizar las pérdidas de transmisión y mejorar la eficiencia de la propulsión.
Buena resistencia a las vibraciones	Para garantizar que el sistema de eje de propulsión no produzca resonancia torsional y resonancia lateral dentro del rango de velocidad de funcionamiento, algunos sistemas de eje también tienen resonancia longitudinal, por lo que los cálculos de vibración y de velocidad crítica deben realizarse durante la etapa de diseño.
Baja sensibilidad a la deformación del casco.	Durante la navegación, el casco inevitablemente se deformará debido a la influencia de la carga, el viento, las olas, las corrientes, etc. Debido a la deformación del casco, los soportes del sistema de ejes se desplazan, lo que genera tensiones y cargas adicionales en el sistema de ejes. Al diseñar y distribuir el eje, se debe considerar hacer que este impacto sea lo más pequeño posible para reducir las pérdidas de transmisión y extender la vida útil del eje.
Buen sellado	La elección de un dispositivo de sellado con buen rendimiento no sólo debe prevenir la corrosión del agua de mar, sino también evitar que el aceite lubricante se filtre y contamine el medio marino.
Más pequeño en peso y tamaño.	Para las embarcaciones de alta velocidad, el peso y el tamaño son indicadores importantes porque afectan directamente la maniobrabilidad de la embarcación de alta velocidad. Para los buques mercantes, aunque no existen requisitos tan estrictos como los de los buques de alta velocidad, reducir el peso y el tamaño del sistema de ejes para ahorrar costos y reservar más espacio carga o para otros fines también es beneficioso para mejorar la economía de operación del buque.

Fuente: (Barquero, 2011; Adaby et al., 2022 y Javed et al., 2021)

2. CAPÍTULO II: CONSIDERACIONES BASICAS DE DISEÑOS DE EJE DE ALTA VELOCIDAD

2.1. DISEÑO MATEMÁTICO

Los dos factores principales en el diseño de resistencia del sistema de eje de propulsión son la velocidad de rotación y la potencia o potencia de la transmisión (González, 2020). La tarea principal del diseño es seleccionar el material del eje y determinar el tamaño del diámetro del eje para garantizar que no se exceda el esfuerzo cortante máximo permitido por el material cuando el eje de propulsión transmite la potencia requerida a una velocidad específica (Nova, 2022).

La fórmula de cálculo del diámetro mínimo del eje requerido para el sistema de eje de propulsión se basa en la resistencia estática del eje intermedio como diámetro básico del eje, y el esfuerzo de torsión (τ) generado por el par promedio (T) del eje que transmite la potencia del motor principal en condiciones nominales de trabajo debe ser menor o igual a la tensión de torsión permitida (τ_a) del material del eje y se obtiene considerando ciertos datos empíricos. Es decir, el esfuerzo de torsión (τ) en el eje debe ser menor que el esfuerzo de torsión permisible (τ_a) del material:

$$\tau \leq \tau_a = \frac{\tau_s}{n_s} \quad (1)$$

En la ecuación (1), τ_s es el límite elástico del material del eje; n_s es el factor de seguridad.

$$\tau = \frac{T}{\frac{\pi}{16} \cdot d^3} \quad (N/cm^2) \quad (2)$$

En la fórmula, T es el par generado por el host (N.cm); d es el diámetro del eje (cm).

El par está relacionado con la potencia de salida del host y las revoluciones, y su relación se puede expresar como:

$$T = C_1 \cdot \frac{P}{n} \quad (N * cm) \quad (3)$$

En la fórmula, P es la potencia de salida del host (kW); n es el número de rotación nominal del host, rpm.

Sustituyendo la fórmula (3) en la fórmula (2), después de clasificar, la fórmula básica para calcular el diámetro del eje intermedio es:

$$d \geq C \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n \cdot \tau_a}} \quad (4)$$

La ecuación (4) es la fórmula teórica básica de los requisitos de la asociación de clasificación (IACS) para la resistencia del diámetro del eje.

Después de determinar el diámetro del eje intermedio, teniendo en cuenta factores como el momento flector en voladizo que aumenta la gravedad de la hélice, el diámetro del eje de popa se puede obtener sumando un cierto porcentaje al diámetro del eje intermedio. Dado que la carga del eje intermedio es la más simple y el momento de flexión es pequeño en comparación con otros tipos de ejes, la norma utiliza el eje intermedio como el tipo básico para calcular el diámetro del eje y simplifica la fórmula de especificación.

2.2. CLASIFICACIÓN

Generalmente se cree que cuando el número de Froude es mayor o igual a 0,4, pertenece a la categoría de naves de alta velocidad, según la definición de nave de

alta velocidad del Código internacional de seguridad para embarcaciones de alta velocidad de la OMI de 1999, cualquier barco con una velocidad superior a $3.7\Delta^{0.1667}$ (m/seg) es una nave de gran velocidad, donde Δ es el volumen de drenaje (OMI, 2012).

Hay muchos tipos de embarcaciones de alta velocidad, incluidos los hidro alas; los aerodeslizadores basados en la teoría del colchón de aire; los hidro alas basados en la teoría de que las alas se mueven cerca del suelo o de la superficie del agua para producir un aumento o disminución de efecto de resistencia; hidroaviones basados en agua de planeo barcos de planeo basados en energía; pequeños barcos de superficie hidroplanos basados en la teoría del comportamiento en el mar, así como tipos de barcos de casco único, catamarán, de desplazamiento multicasco y tipos de barcos compuestos (Ahmet y Barlas, 2019).

Los barcos de alta velocidad se pueden dividir en tipo de desplazamiento, tipo de elevación hidrodinámica, tipo de presión de colchón de aire, tipo de elevación aerodinámica y tipo compuesto según el principio de soporte hidrodinámico.

Tabla 2. Tipos de barcos de alta velocidad

CLASIFICACIÓN	CONCEPTO
Tipo drenaje	Este tipo de barco es similar a un barco de desplazamiento tradicional, ya que utiliza la flotabilidad del agua para soportar el peso del barco, sin embargo, para reducir la resistencia del agua y la interferencia de las olas, su forma de casco es diferente a la de los barcos tradicionales. Los barcos de alta velocidad que pertenecen a este tipo incluyen barcos de paredes redondas, barcos en forma de V profunda, catamaranes de alta velocidad, catamaranes que perforan olas y catamaranes de superficie de flotación pequeña, etc.
De elevación hidrodinámica	La sustentación hidrodinámica generada por la superficie de planeo en movimiento a alta velocidad o hidroala se utiliza para soportar el peso del barco. Su ventaja es una alta relación elevación-arrastre. Los barcos de planeo y los hidroalas pertenecen a este tipo de embarcaciones de alta velocidad. .

Tipo de presión del colchón de aire	Basado en la presión estática del colchón de aire cerrado debajo del barco, el casco se levanta del agua para reducir la resistencia del barco. Este tipo de barco de alta velocidad se llama aerodeslizador y se puede dividir en dos tipos: lateral-aerodeslizadores de pared y aerodeslizadores de elevación con colchón completo.
Tipo de elevación aerodinámica	En virtud del efecto de superficie de agua que produce su casco alado cuando se acerca al agua a alta velocidad, obtiene una alta relación aerodinámica de sustentación y resistencia logrando navegar a velocidades ultra altas cerca del agua sin tocar el agua. Los barcos con alas volantes son este tipo de embarcaciones de alta velocidad.
Compuesto	Es un nuevo barco de alta velocidad desarrollado combinando los dos o más principios de soporte hidrodinámico mencionados anteriormente tiene las ventajas del prototipo pero sin las desventajas, como catamaranes de hidroala, embarcaciones sumergibles de hidroala y cojines de aire, catamaranes, etc.

Fuente: Elaboración propia

2.3. ESPECIFICACIÓN PARA EL DIÁMETRO DEL EJE

Según el Código internacional de seguridad para embarcaciones de gran velocidad de la OMI de 1994, los requisitos para la resistencia del sistema de ejes de propulsión de las embarcaciones de gran velocidad se basan en explicaciones de principios y no proponen fórmulas de cálculo obligatorias a seguir, pero se pueden establecer los siguientes lineamientos:

1. El sistema del eje de propulsión debe tener resistencia y rigidez suficientes para soportar las cargas compuestas más desfavorables que puedan ocurrir durante la operación sin exceder la tensión permitida del material.
2. El diseño del sistema del eje, los cojinetes y los sujetadores deben poder ser peligrosos. No se producirán rotación ni vibración excesiva a la velocidad del eje, hasta la velocidad de parada por sobrevelocidad diseñada del motor primario y a cualquier velocidad dentro del rango de velocidad del eje del 105%.

3. La resistencia y fabricación del sistema de eje de propulsión deberá ser tal que durante toda su vida útil, bajo la acción de cargas alternas que puedan producirse durante su uso, la posibilidad de roturas peligrosas por fatiga sea mínima.
4. El cumplimiento de los requisitos anteriores debería demostrarse mediante ensayos adecuados y un diseño con tensiones suficientemente bajas, combinado con el uso de materiales resistentes a la fatiga y un diseño detallado adecuado. Por lo tanto, algunas sociedades de clasificación todavía utilizan actualmente las fórmulas de cálculo formuladas por la Federación Internacional de Sociedades de Clasificación para las Reglas de Buques de Acero, pero solo relajan sus restricciones sobre la resistencia a la tracción de los materiales de los ejes.

2.4. EJEMPLOS REALES DE CORROSIÓN POR PICADURAS

Para reducir el peso del sistema de eje de propulsión de los barcos de alta velocidad, se utilizan materiales de aleación de alta resistencia. Actualmente, los materiales de acero inoxidable SUS630 se utilizan principalmente en el país.

El daño al acero inoxidable es causado principalmente por corrosión por picaduras, que generalmente comienza con corrosión debido a la aparición de corrosión, el área corroída se vuelve negra o marrón oscura, como se muestra en la Figura 2, en los ambientes más severamente corrosivos, el número y la profundidad de la corrosión por picaduras aumenta, dando a la superficie una apariencia corroída, como se muestra en la Figura 3; en condiciones de corrosión débil, la corrosión por picaduras en sí no se puede eliminar de la superficie.

La superficie obviamente se reduce, pero puede aparecer corrosión para producir una película delgada. Cuando las manchas de óxido se filtran, las áreas circundantes pueden perder su brillo, como se muestra en la Figura 4. Para las grietas por fatiga causadas por corrosión por picaduras en el sistema de ejes de propulsión de una lancha patrullera de 30 toneladas, se puede ver la falla a desgaste de eje de babor vs estribor como se logra divisar en la Figura 5.



Figura 2. Corrosión por picaduras en el actual sistema de ejes de una embarcación de 100 toneladas
Fuente: Elaboración propia



Figura 3. Corrosión por picaduras en el actual sistema de ejes de una patrullera de 50 toneladas
Fuente: Elaboración propia



Figura 4. Fenómenos de picaduras del actual sistema de eje barco de 35 toneladas
Fuente: Elaboración propia

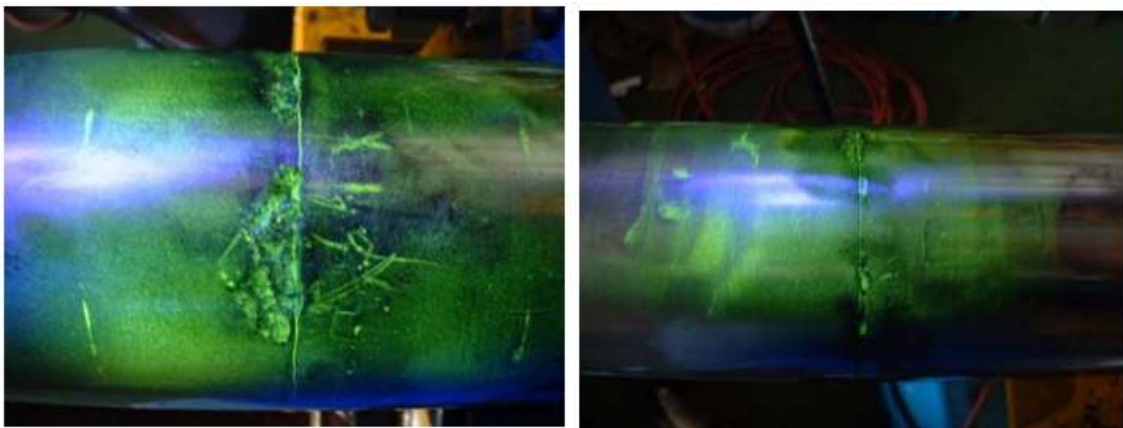


Figura 5. Corrosión por picadura del eje en el lado de babor y estribor de un barco de 30 toneladas
Fuente: Elaboración propia

3. CAPÍTULO III. VIDA ÚTIL DE LOS EJES DE PROPULSIÓN

Para reducir el peso de los barcos de alta velocidad, el material del sistema del eje de propulsión de los barcos de alta velocidad abandona el acero forjado tradicional o el acero de baja aleación y utiliza acero inoxidable con mayor resistencia a la tracción (Wladichuk y Hannay, 2019).

Para cumplir con los requisitos de alta velocidad, el material del sistema del eje de propulsión está hecho de acero inoxidable con mayor resistencia para reducir el diámetro del eje, lo que también reduce su peso. Cierta serie de barcos objetos de este estudio son lanchas rápidas de Guayaquil que desarrollaron una grave corrosión por picaduras después de haber sido utilizados durante un determinado período de tiempo, lo que redujo su vida útil.

En el entorno marino real, las condiciones de contacto entre el metal y el agua de mar son diferentes, y los fenómenos de corrosión del metal también son diferentes (Arroyo et al., 2021). Según la profundidad de inmersión en el agua de mar, el entorno marino se puede dividir en zona de atmósfera oceánica, zona de salpicadura, zona de amplitud de marea, zona de inmersión total y zona de lodo marino. Los lugares de corrosión no son aleatorios; siempre ocurren dentro de unos pocos cientos de nanómetros alrededor del sulfuro de manganeso (Nova, 2022).

La investigación bibliográfica realizada sugiere que durante el proceso de fabricación del acero inoxidable, el sulfuro de manganeso se acumula localmente en una alta concentración, lo que resulta en una reducción en la concentración de cromo en el área circundante. El cromo reacciona con el oxígeno para producir óxidos de cromo, que pueden prevenir la corrosión. La corrosión ocurre primero en áreas con baja concentración de cromo y luego se expande gradualmente a todo el acero inoxidable (Pelayo, 2018). En agua que contiene sal, este proceso se vuelve aún más rápido.

Las características del agua de mar incluyen un alto contenido de sal, una gran cantidad de sales de fácil descomposición, gases disueltos contenidos en la atmósfera, sustancias orgánicas e inorgánicas complejas y la proliferación de diversos organismos y microorganismos, tiene una alta conductividad y el contenido de oxígeno es un factor importante en la corrosión del agua de mar. Por tanto, el agua de mar es una solución electrolítica óptima (Leishear, 2023).

El acero inoxidable y otros metales que dependen de la pasivación para su resistencia a la corrosión formarán una película pasiva sobre la superficie del metal para lograr su efecto protector. Sin embargo, cuando se coloca en una solución que contiene aniones específicos como iones cloruro, iones bromuro, iones hipoclorito o iones tiosulfato, se producirá corrosión por picaduras siempre que el potencial de corrosión exceda el potencial de corrosión por picaduras. La película pasiva en sí tiene la función de metabolismo y autorreparación, de modo que la película pasiva está en un equilibrio dinámico y se disuelve y se forma constantemente en cualquier momento en la solución (Zhang et al, 2019).

Además del tiempo, los factores que afectan la corrosión por picaduras incluyen cationes oxidantes, concentración de iones cloruro, valor ácido-base (valor de pH), temperatura y defectos del material en la solución. Excepto por el factor tiempo, que es relativamente seguro a la hora de predecir la tendencia de la velocidad de corrosión por picaduras, se puede establecer que otros factores tienen un impacto, pero el alcance de su impacto no se puede controlar de manera confiable. La tendencia de la velocidad de corrosión por picaduras del acero inoxidable pertenece a una serie de tiempo, y en el proceso de cambio de corrosión, además de los parámetros conocidos, también existen parámetros desconocidos, lo que se ajusta a las condiciones de la teoría del sistema gris. La teoría de sistemas grises es adecuada para resolver

sistemas en los que existen tanto parámetros conocidos como desconocidos (Roberge, 2019).

3.1. DISEÑO DE PRUEBA DE CORROSIÓN POR PICADURAS

La resistencia a la corrosión del acero inoxidable se debe a la formación de una película de óxido de cromo extremadamente delgada, de buena adherencia y translúcida en la superficie del acero inoxidable. Si la solución contiene iones cloruro, este equilibrio se destruirá. En la superficie local del metal se producen pequeñas picaduras de corrosión que se pueden reparar más tarde, es decir, se vuelven a pasivar para que no se expandan más, y generalmente están abiertas.

Las áreas de formación de pequeñas picaduras de corrosión se distribuyen aleatoriamente en la superficie del metal. Si la superficie del acero inoxidable contiene inclusiones de sulfuro, carburos de límite de grano u otros puntos débiles, las pequeñas picaduras de corrosión se generarán allí preferentemente.

1.4.3. Métodos

Desde que Smith propuso un método de prueba para la resistencia a la corrosión por picaduras del acero inoxidable en 1938, se han desarrollado muchos métodos de evaluación y prueba. Generalmente se puede dividir en dos categorías, una es el método de inmersión química y la otra es el método de medición electroquímica (González, 2020).

- El método de inmersión química consiste en sumergir la muestra en ciertos ambientes de corrosión natural o acelerada para determinar la resistencia a la corrosión por picaduras de metales o aleaciones midiendo la pérdida de peso, el número, la profundidad y el tamaño de los orificios de corrosión, o midiendo los orificios críticos, la concentración mínima de iones cloruro requerida para

la nucleación de picaduras de corrosión y la determinación de la susceptibilidad a la corrosión por picaduras de metales y aleaciones. La mayor ventaja de utilizar este método para la medición es que tanto el proceso del ánodo como del cátodo se llevan a cabo en una muestra donde se produce corrosión por picaduras.

- El método de medición electroquímica consiste en determinar la tendencia a las picaduras de un metal o aleación midiendo su voltaje característico de picaduras (potencial crítico de picaduras y potencial de protección contra picaduras). Después de los esfuerzos de Brenner y Pourbaix (2023) y muchos otros, este método ha sido ampliamente utilizado. Aunque este método tiene la ventaja única de una medición electroquímica rápida, solo ocurre la reacción anódica en el electrodo de prueba en estudio.

Este estudio planea utilizar el método de inmersión química y utilizar dos métodos, pruebas aceleradas y pruebas ambientales respectivamente. Los métodos de prueba y el análisis de resultados se describen a continuación.

1.4.4. Método de prueba de picadura acelerada

Este método de prueba adopta el método de inmersión química. Este método se basa en la norma de prueba estadounidense ASTM G 48-76 y utiliza la prueba de asiento de solución de cloruro férrico. El principio básico es el siguiente: Cloruro férrico ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) La oxidación depende de:



El potencial redox de la reacción es de aproximadamente 1,02 ~ 1,06 V (para electrodo de hidrógeno estándar) cuando se mide. Este potencial sólo es mayor que

el potencial de corrosión del acero inoxidable en agua de mar y muchos otros medios químicos, y su propiedad oxidante es bastante fuerte. Y esta solución contiene una gran cantidad de iones de cloruro (Cl-) que pueden destruir la película pasiva. Tiene un valor de pH bajo, acidez fuerte y una fuerte tendencia a la corrosión por picaduras. Por lo tanto, la solución de cloruro férrico se usa generalmente como solución acelerada de prueba para corrosión por picaduras.

En una solución de cloruro férrico, la cantidad de corrosión causada por la corrosión por picaduras es en realidad muy grande en comparación con la cantidad total de corrosión. Por lo tanto, la pérdida de peso después de la prueba, el número, la distribución y el tamaño de los orificios de corrosión se pueden utilizar para evaluar la calidad de materiales metálicos con resistencia a la corrosión por picaduras.

Tabla 3. Método de prueba de picadura acelerada

Estándar de prueba	De acuerdo con la norma de prueba estadounidense ASTM G 48-76, las regulaciones estándar se muestran en la Tabla 4.
Especificaciones de muestra	<p>Al realizar muestras, se deben hacer de acuerdo con las siguientes normas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El material utilizado en esta prueba es acero inoxidable SUS 630. • El tamaño de la muestra de esta prueba se basa en la norma americana ASTM y el tamaño de la muestra es 50 (L) * 25 (B) * 5 (T) mm. • Las muestras para esta prueba se dividen en dos grupos, A y B: el grupo A no tiene orificios de inducción para simular el estado libre de defectos del material; el grupo B tiene orificios de inducción perforados de 2 mm para simular el estado defectuoso del material. • Reducir el área de la sección transversal, lo que puede reducir el impacto de la sección transversal en la corrosión por picaduras. Según su recomendación, el área de la sección transversal es 0,1 ~ 0,3 del área total. Por tanto, el espesor de la muestra para este ensayo es de 5 mm.

	<ul style="list-style-type: none"> • Cuando se complete la preparación de la muestra, limpie la superficie con alcohol.
Solución de prueba	La solución de prueba es 6% FeCl ₃ y la pureza del cloruro férrico (FeCl ₃ .6H ₂ O) tiene poco efecto en los resultados de la prueba. El método de preparación consiste en disolver 100 g de cloruro férrico en 900 ml de agua destilada o desionizada y filtrarlo con un filtro de papel para reducir las impurezas y la materia insoluble para obtener una solución de FeCl ₃ al 6% con un pH de aproximadamente 1,3.
Ciclo de remojo de prueba	La duración del período de prueba está relacionada con el tamaño y la tendencia de desarrollo de la velocidad de corrosión. El ciclo de inmersión de prueba de la solución de cloruro férrico es de 72 horas según la norma. Para comprender mejor la relación entre la corrosión y el ciclo de inmersión de prueba, esta prueba se divide en cuatro ciclos de inmersión de 24, 48, 72 y 96 horas.
Plan de prueba	Las pruebas en este estudio se dividen en seis planes, principalmente para la misma temperatura de prueba y diferentes valores de pH, como los planes de prueba 1, 3 y 4; el otro es para el mismo valor de pH de prueba y diferentes temperaturas de prueba, como los planes de prueba. 5 y 6. El plan de prueba 2 es una solución que se probó utilizando el plan de prueba 1. Dado que la concentración de iones cloruro se redujo, se repite otra prueba. Los detalles se muestran en la Tabla 5.

Fuente: ASTM

Tabla 4. Estándar de prueba ASTM G 48-76

CONCEPTO	CARACTERÍSTICAS
Solución de prueba	6% FeCl ₃
Temperatura (°C)	22 y 50
Tiempo de prueba (h)	72
Tamaño de la muestra	50(L)*25(B)*5(T) mm

Acabado de la superficie de la muestra	Moler con papel de lija de grano 120
Relación cara a cara (mL/cm ²)	Más de 20
Colocación de la muestra	Pendiente
Índice de rendimiento de resistencia a la corrosión por picaduras	Tasa de corrosión, número de picaduras, profundidad de las picaduras.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Programa de pruebas acelerada

MATERIAL: SUS630												
Tamaño de la muestra: 50 mm * 25 mm * 5 mm												
Plan de prueba	1		2		3		4		5		6	
Temperatura de prueba	25°C		22°C		25°C		25°C		32°C		26°C	
pH	1.3		1.2		1.5		1.4		0.8		0.8	
Agrupación de muestras	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Tiempo de remojo	Número de muestra											
24 horas	1A1	AB1	2A1	2B1	3A1	3B1	4A1	4B1	5A1	5B1	6A1	6B1
48 horas	1A2	1B2	2A2	2B2	3A2	3B2	4A2	4B2	5A2	5B2	6A2	6B2
72 horas	1A3	1B3	2A3	2B3	3A3	3B3	4A3	4B3	5A3	5B3	6A3	6B3
96 horas	1A4	1B4	2A4	2B4	3A4	4B3	4A5	4B4	5A4	5B4	6A4	5B4

Fuente: Elaboración propia

Después de la prueba, se debe medir la profundidad de la corrosión por picaduras. El método de medición se muestra en la Figura 6 y los resultados de la medición se muestran en la Tabla 7.



Figura 6. Fotos de medición de profundidad de corrosión por picaduras
Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos de los resultados de las pruebas anteriores, se puede saber que, además del tiempo, los factores que afectan la corrosión por picaduras incluyen cationes oxidantes, concentración de iones cloruro, valor ácido-base (valor de pH), temperatura y defectos del material en la solución.

Cuanto mayor es la concentración de iones cloruro, cuanto menor es el valor del pH, cuanto mayor es la temperatura o si el material tiene defectos, más significativo será el fenómeno de corrosión por picaduras.

1.4.5. Métodos de prueba del entorno real.



Figura 7. Foto del sitio de prueba del entorno dinámico.
Fuente: Elaboración propia



Figura 8. Foto de método de prueba en entornos estáticos.
Fuente: Elaboración propia

El material de esta prueba es acero inoxidable SUS 630. El tamaño de la muestra de la prueba se basa en la norma ASTM estadounidense. El tamaño de la muestra es 50(L)*25(B)*5(T) mm. Se seleccionaron cuatro grupos para la prueba, y las muestras

se fijaron y colocaron en el muelle de la ATM de Manta (prueba de entorno dinámico). Debido a la erosión del agua de mar, sólo quedaron dos grupos. Para obtener datos más precisos, se utilizaron otros cuatro.

Para el ambiente estático, la muestra se colocó en un balde de plástico que contenga agua de mar donde se cambió el agua de mar cada semana. Se retiró la muestra cada mes para medir los cambios en la profundidad de las picaduras y registrar los datos obtenidos y el plan de prueba, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Plan de pruebas ambientales

MATERIAL: SUS630						
Tamaño de la muestra: 50 mm * 25 mm * 5 mm						
Plan de prueba	Prueba de entorno dinámico		Prueba de entorno estático			
Número de muestra	1SP	2SP	1SA	2SA	3SA	4SA

1.4.6. Tasa de corrosión por picaduras

La velocidad de corrosión indica la resistencia a la corrosión del material y, como sugiere el nombre, también indica la pérdida de peso o espesor del material debido a la corrosión. Cuanto menor sea la velocidad de corrosión, mejor será la resistencia a la corrosión; por el contrario, peor será la resistencia a la corrosión. El cálculo de la velocidad de corrosión se basa en el peso perdido debido a la corrosión (Basim et al., 2020).

La unidad estándar de velocidad de corrosión es mpy (milímetros de penetración por año). 1 mil es 0,001 pulgadas. Por lo tanto, $1 \text{ mpy} = 0,0254 \text{ mm/año} = 2,90 \text{ nm/h}$ (Googan, 2022).

Cuando el diámetro del eje se reduzca por corrosión o picaduras, y sea inferior al tamaño permitido por la normativa de la sociedad de clasificación, ésta requerirá la desclasificación o incluso la sustitución del eje. Por lo tanto, para la corrosión de los ejes de los barcos, el impacto de la profundidad es mayor que la pérdida de peso. Por

lo tanto, este artículo utiliza la profundidad promedio de la corrosión por picadura como punto de referencia para el cálculo. Cuando la profundidad máxima del orificio de corrosión es mayor que el valor permitido, significa que el diámetro del eje es menor que el tamaño permitido de las reglas de clasificación del barco (Martínez, 2019).

Esta prueba tiene como objetivo medir la corrosión por picaduras del acero inoxidable y es una prueba acelerada. Se medirá diez agujeros de corrosión con más profundidad en mm, se encontrará el valor promedio y luego se dividirá el valor promedio por el tiempo de prueba siendo esta la velocidad de corrosión en mm/h, que es aproximadamente 106 veces la unidad estándar. Los resultados de la prueba acelerada y de la prueba ambiental se muestran en la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 respectivamente. Las curvas de profundidad de picadura y tasa de picadura de la prueba ambiental dinámica y la prueba ambiental estática se muestran en la Figura 9 y la Figura 10 respectivamente.

Tabla 7. Resultados promedio de la profundidad de picaduras y la velocidad de corrosión de las pruebas aceleradas

NÚMERO DE MUESTRA	1A1	1A2	1A3	1A4	1B1	1B2	1B3	1B4
Profundidad media (mm)	0.352	0.509	1.116	0.945	0.48	0.762	1.04	0.997
Tasa de corrosión (mm/h)	0.0146	0.0106	0.0155	0.0098	0.0200	0.0158	0.0144	0.0104
Número de muestra	2A1	2A2	2A3	2A4	2B1	2B2	2B3	2B4
Profundidad media (mm)	0.00	0.678	0.00	0.785	0.38	0.518	0.55	0.35
Tasa de corrosión (mm/h)	0.0000	0.0141	0.0000	0.0082	0.0158	0.0108	0.0076	0.0036
Número de muestra	3A1	3A2	3A3	3A4	3B1	3B2	3B3	3B4
Profundidad media (mm)	0.399	0.725	0.643	0.763	0.545	0.776	1.024	0.779
Tasa de corrosión (mm/h)	0.0166	0.0151	0.0089	0.0079	0.0227	0.0162	0.0142	0.0081
Número de muestra	4A1	4A2	4A3	4A4	4B1	4B2	4B3	4B4
Profundidad media (mm)	0.441	0.684	0.774	0.908	0.555	0.549	1.025	1.09
Tasa de corrosión (mm/h)	0.0184	0.0143	0.0108	0.0095	0.0231	0.0114	0.0142	0.0114
Número de muestra	5A1	5A2	5A3	5A4	5B1	5B2	5B3	5B4

Profundidad media (mm)	0.654	0.567	0.919	0.934	0.665	115	091	1.228
Tasa de corrosión (mm/h)	0.0273	0.0118	0.0128	0.0098	0.0278	0.0240	0.0126	0.0128
Número de muestra	6A1	6A2	6A3	6A4	6B1	6B2	6B3	6B4
Profundidad media (mm)	0.384	0.503	0.675	0.702	0.52	0.69	0.736	0.798
Tasa de corrosión (mm/h)	0.0160	0.0105	0.0094	0.0074	0.0216	0.0144	0.0102	0.0083

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Valor estimado de la tasa de corrosión por picaduras (mm/100/día) en prueba ambiental dinámica (basado en 30 días por mes)

Número de muestra	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
SP1	1.2500	1.1667	1.1111	1.0417	0.9000	0.7778	0.7000
SP2	1.2167	1.0833	0.8889	0.8167	0.7333	0.6944	0.6524
Tasa de corrosión promedio	1.2333	1.1250	1.0000	0.9292	0.8167	0.7361	0.6762
Número de muestra	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
SP1	0.6333	0.5630	0.5100	0.4667	0.4292	0.3974	0.3702
SP2	0.6167	0.5611	0.5083	0.4636	0.4264	0.3949	0.3679
Tasa de corrosión promedio	0,6250	0.5620	0.5092	0.4652	0.4278	0.3962	0.3690

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Valor estimado de la tasa de corrosión por picaduras (mm/100/día) en pruebas ambientales estáticas (basado en 30 días por mes)

Número de muestra	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
ES UN	1.1667	1.1333	0.9444	0.8167	0.7933	0.6667
2SA	1.1500	1.0833	0.9889	0.8000	0.7200	0.6333
3SA	1.1167	1.0667	0.9778	0.8083	0.7333	0.6167
4SA	1.1000	1.0000		0.7917	0.6867	0.6444

Tasa de corrosión promedio	1.1333	1.0708	0.9556	0.8042	0.7333	0.6403
Número de muestra	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	
ES UN	0.5857	0.5167	0.4630	0.4200	0.3833	
2SA	0.5619	0.5000	0.4519	0.4100	0.3742	
3SA	0.5429	0.4813	0.4333	0.3933	0.3591	
4SA	0.5738	0.5104	0.4574	0.4167	0.3788	
Tasa de corrosión promedio	0.5661	0.5021	0.4514	0.4100	0.3739	

Fuente: Elaboración propia

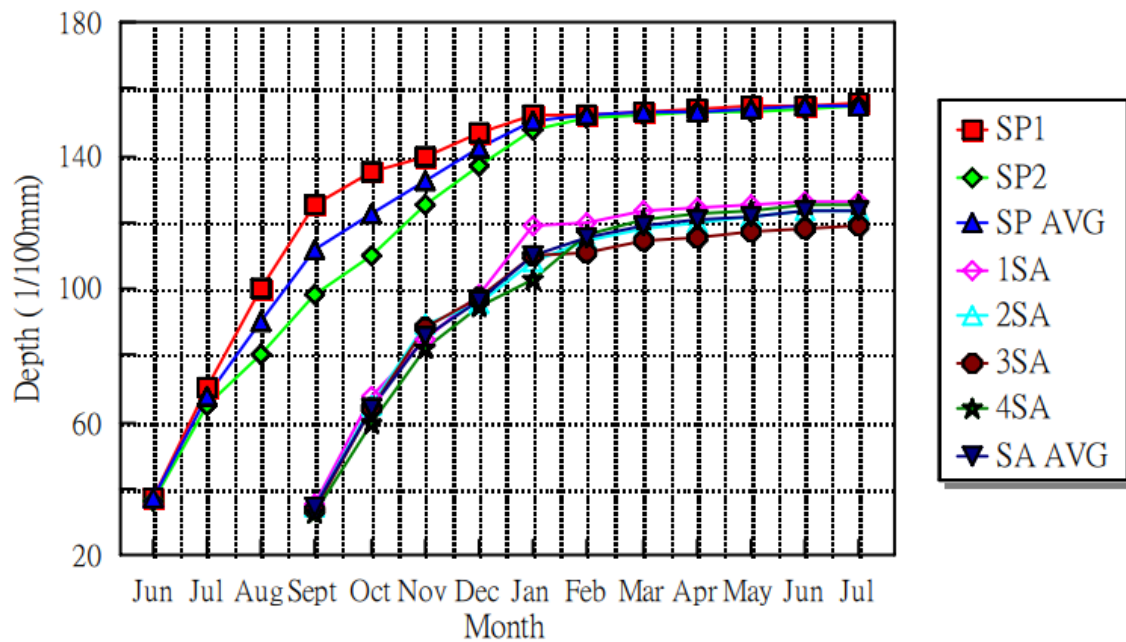


Figura 9. Curvas de profundidad de corrosión por picaduras para ensayos ambientales dinámicos y estáticos.
Fuente: Elaboración propia

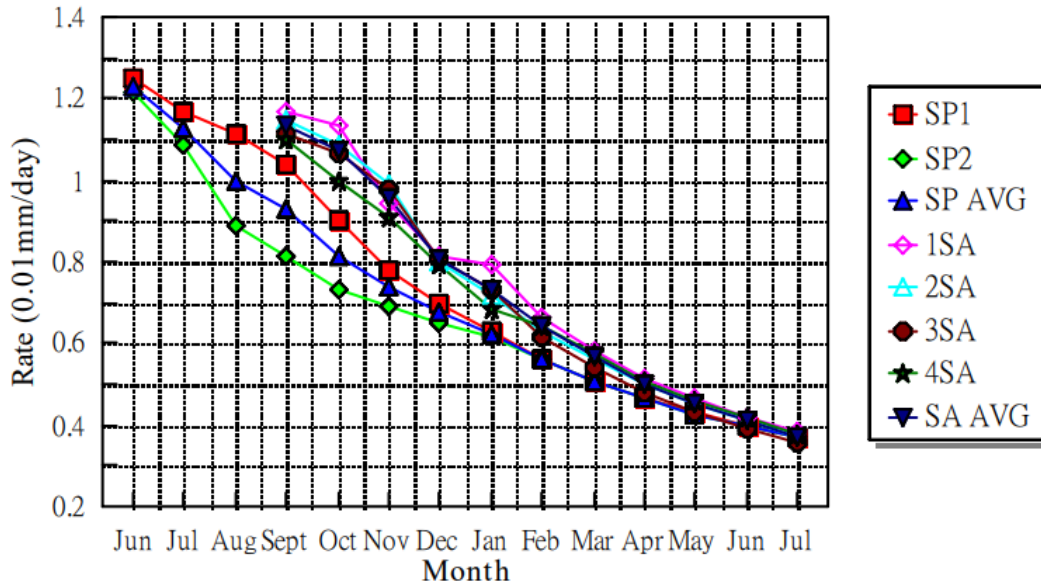


Figura 10. Curvas de velocidad de corrosión por picaduras para pruebas ambientales estáticas y dinámicas
Fuente: Elaboración propia

3.2. ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL Y LA TASA DE PICADURAS

El tamaño real del diámetro del eje de la hélice del barco de alta velocidad es mayor que el tamaño de la prueba. Este estudio utiliza el mismo grado de materiales y realiza pruebas de picaduras aceleradas en diferentes áreas de la sección transversal para comprender la correlación entre el área de la sección transversal. y corrosión por picaduras.

1.4.7. Métodos de prueba y resultados

El diámetro del eje del sistema de eje de propulsión se calcula en función de las normas de clasificación de barcos y su valor tiene un límite mínimo.

- El eje de propulsión se daña debido a la corrosión donde primero forma muchos hoyos en la superficie del eje. Luego, los hoyos se profundizan gradualmente debido a la corrosión. Cuando la profundidad alcanza un cierto límite, el eje no se puede utilizar. Por lo tanto, esta prueba se centra en la medición de la profundidad de las picaduras.

- Esta prueba está dirigida a cuatro tipos de muestras: hoja de 50 (L) * 25 (B) * 5 (T) mm, varilla redonda de 10 mm de diámetro, superficie cilíndrica de 50 mm de diámetro y área circular de 63 mm de diámetro.
- Las imágenes de muestra se dividen en Como se muestra en la Figura 11 a la Figura 15. Utilizando el método de remojo químico, y los ciclos de remojo son de 24 horas, 48 horas y 72 horas.
- Cuando se completa la inmersión, se toma las 5 profundidades más grandes para medir y encontrar el valor promedio. Los resultados de la prueba se muestran en la Figura 12, que es la curva de velocidad de corrosión de la delgada muestra de corte. La Figura 14 es la curva de velocidad de corrosión de una varilla redonda con un diámetro de 10 mm, la Figura 16 es una curva de velocidad de corrosión de una superficie cilíndrica con un diámetro de 50 mm y la Figura 17 es una curva de velocidad de corrosión de una superficie cilíndrica con un diámetro de 50 mm. Curva de velocidad de un área circular con un diámetro de 63 mm.



Figura 11. Fotos de muestra de sección delgada
Fuente: Elaboración propia

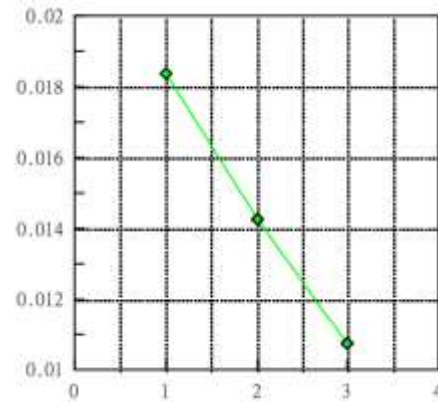


Figura 12. Tasa de corrosión de sección delgada
Fuente: Elaboración propia



Figura 13. Muestra de barra redonda de 10 mm de diámetro
Fuente: Elaboración propia

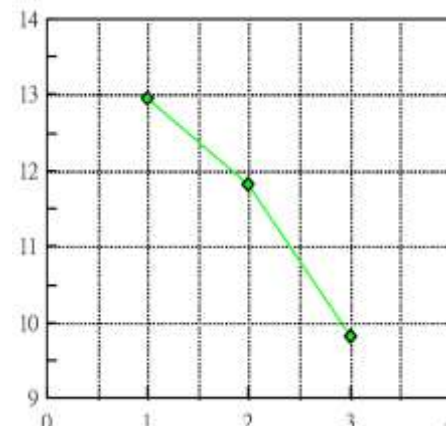


Figura 14. Tasa de corrosión de una varilla redonda de 10 mm de diámetro
Fuente: Elaboración propia



Figura 15. Muestra cilíndrica de 50 mm de diámetro
Fuente: Elaboración propia

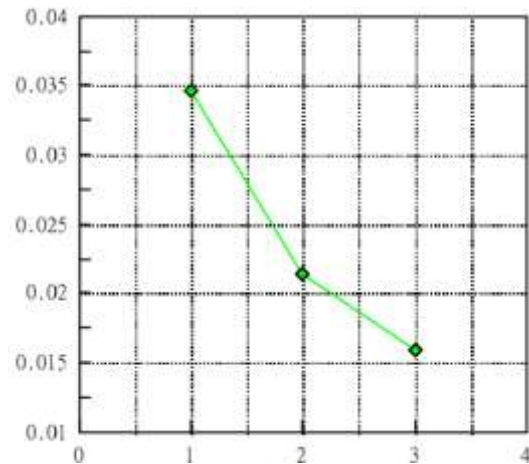


Figura 16. Tasa de corrosión del cilindro de 50 mm de diámetro.
Fuente: Elaboración propia



Figura 17. Muestra de placa circular de 63 mm de diámetro

Fuente: Elaboración propia

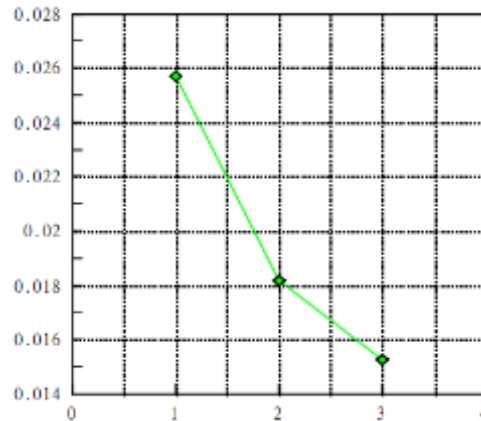


Figura 18. Tasa de corrosión de una placa circular de 63 mm de diámetro

Fuente: Elaboración propia

1.4.8. Resultados del cálculo de la tasa de corrosión por picaduras.

Hay cinco conjuntos de datos obtenidos de la prueba de corrosión por picaduras acelerada realizada por este instituto. Por lo tanto, el método *moho gris GM* se utiliza como predicción de la velocidad de corrosión. Los cinco conjuntos de datos se promedian antes del cálculo y el valor promedio se utiliza como predicción. Los resultados calculados se muestran en la Tabla 10 y la Tabla 11. Los resultados calculados de las muestras del Grupo A muestran que la precisión es del 97,10%; mientras que los resultados calculados de las muestras del Grupo B muestran que la precisión es del 99,44%.

Tabla 10. Velocidad de corrosión prevista y precisión de la muestra A en prueba acelerada

	24 horas	48 horas	72 horas	96 horas
Tasa de corrosión promedio	0.01858	0.01245	0.01245	0.00886
Predecir la tasa de corrosión	0.01858	0.01269	0.01082	0.0092
Tasa de error (%)	0	-1.95942	5.61137	-4.034689
Tasa de error promedio (%)	2.90137			
Exactitud (%)	97.099			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Velocidad de corrosión prevista y precisión de la muestra B en prueba acelerada

	24 horas	48 horas	72 horas	96 horas
Tasa de corrosión promedio	0.02304	0.01636	0.01315	0.01019
Predecir la tasa de corrosión	0.02304	0.01635	0.01296	0.01027
Tasa de error (%)	0	0.02672	1.45443	-0.75909
Tasa de error promedio (%)	0.56006			
Exactitud (%)	99.440			

Fuente: Elaboración propia

Las pruebas ambientales realizadas se dividen en pruebas dinámicas y estáticas. Los datos obtenidos de la prueba de corrosión por picaduras se utilizan para predecir la velocidad de corrosión utilizando el método *moho gris GM*. Los dos y cuatro grupos de datos se promedian antes la estimación. Usando este valor promedio como predicción, los resultados calculados son como se muestran en la Tabla 12 a la Tabla 15. Los resultados calculados muestran que la tasa de error promedio es aproximadamente 4%; la precisión relativa es 96%.

Tabla 12. Valor previsto de la profundidad de las picaduras a partir de la prueba dinámica de la teoría *moho gris GM* (unidad: mm/100)

Mes de medición	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad promedio	37	67.5	90	111.5	122.5	132.5	142
Valor predictivo	37	68.469	87.363	111.47	142.23	143.82	144.58
Tasa de error (%)	0	0.0144	0.0293	0.0003	0.1610	0.0854	0.0181
Mes de medición	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad promedio	150	151.75	152.75	153.5	154	154.5	155
Valor predictivo	152.97	159.83	157.85	154.27	154.42	154.67	155.00
Tasa de error (%)	0.0197	0.0532	0.0334	0.0050	0.0027	0.0011	0.0001
Tasa de error promedio (%)				3.56			
Exactitud (%)				96.44			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Valor previsto de la profundidad de las picaduras a partir de la prueba estática de la teoría gris (unidad: mm/100)

Mes de medición	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad promedio	34	64.25	86	96.5	110	115.25
Valor predictivo	34	66.9271	81.0106	98.0656	118.711	124.004
Tasa de error (%)	0.0000	0.0417	0.0580	0.0162	0.0792	0.0760
Mes de medición	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad promedio	118.875	120.5	121.875	123	123.375	
Valor predictivo	127.047	123.659	123.496	123.531	124.311	
Tasa de error (%)	0.0687	0.0262	0.0133	0.0043	0.0076	
Tasa de error promedio (%)				3.03		
Exactitud (%)				96.97		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Valor previsto de la velocidad de corrosión por picaduras a partir de la prueba dinámica de la teoría gris (unidad: mm/100/h)

Mes de medición	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Tasa de corrosión promedio	1.2333	1.1250	1.0000	0.9292	0.8167	0.7361	0.6762
Predecir la tasa de corrosión	1.2333	1.1412	0.9707	0.9289	0.9482	0.7990	0.6885
Tasa de error (%)	0.0000	0.0144	0.0293	0.0003	0.1610	0.0854	0.0181
Mes de medición	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Tasa de corrosión promedio	0.6250	0.5620	0.5092	0.4652	0.4278	0.3962	0.3690
Predecir la tasa de corrosión	0.6374	0.5920	0.5262	0.4675	0.4290	0.3966	0.3691
Tasa de error (%)	0.0198	0.0532	0.0334	0.0050	0.0028	0.0011	0.0000
Tasa de error promedio (%)				3.56			
Exactitud (%)				96.44			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Valores previstos de la velocidad de corrosión por picaduras a partir de la prueba estática de la teoría gris (unidad: mm/100/h)

Mes de medición	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad promedio	1.1333	1.0708	0.9556	0.8042	0.7333	0.6403
Valor predictivo	1.1333	1.1155	0.9001	0.8172	0.7914	0.6889
Tasa de error (%)	0.0000	0.0417	0.0580	0.0162	0.0792	0.0760
Mes de medición	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad promedio	0.5661	0.5021	0.4514	0.4100	0.3739	

Valor predictivo	0.6050	0.5152	0.4574	0.4118	0.3767	
Tasa de error (%)	0.0687	0.0262	0.0133	0.0043	0.0076	
Tasa de error promedio (%)			3.03			
Exactitud (%)			96.97			

Fuente: Elaboración propia

Para comparar los resultados de predicción de la teoría gris y los métodos estadísticos tradicionales, también se utiliza el método de análisis de regresión curvilínea para la predicción. Los resultados de la predicción se muestran en la Tabla 16 a la Tabla 19. Los resultados del cálculo muestran que la tasa de error promedio de la profundidad de la corrosión es de aproximadamente el 10% y la precisión relativa es del 90%; la tasa de error promedio de la tasa de corrosión por picaduras es de aproximadamente el 2% y la precisión relativa es del 98%.

Tabla 16. Valor previsto de la profundidad de las picaduras mediante prueba dinámica utilizando el método estadístico (unidad: mm/100)

Mes de medición	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad promedio	37	67.5	90	111.5	122.5	132.5	142
Predecir la tasa de corrosión	47.118	67.318	82.940	96.177	107.88	118.49	128.28
Tasa de error (%)	0.273	0.002	0.078	0.137	0.119	0.105	0.096
Mes de medición	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad promedio	150	151.7	152.7	153.5	154	154.5	155
Valor predictivo	137.40	145.99	154.13	161.88	169.29	176.41	183.27
Tasa de error (%)	0.083	0.037	0.009	0.054	0.099	0.141	0.182
Tasa de error promedio (%)				10.16			
Exactitud (%)				89.84			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Valor previsto de la profundidad de las picaduras a partir de una prueba estática utilizando el método estadístico (unidad: mm/100)

Mes de medición	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad promedio	34	64.25	86	96.5	110	115.25
Valor predictivo	42.667	60.630	74.464	86.154	96.472	105.81
Tasa de error (%)	0.2549	0.0563	0.1341	0.1072	0.1230	0.0819
Mes de medición	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	
Profundidad promedio	118.87	120.5	121.87	123	123.37	
Valor predictivo	114.413	122.425	129.957	137.086	143.872	
Tasa de error (%)	0.0375	0.0160	0.0663	0.1145	0.1661	
Tasa de error promedio (%)			10.53			
Exactitud (%)			89.47			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Valor predictivo de la tasa de corrosión por picaduras mediante prueba dinámica utilizando el método estadístico (unidad: mm/100)

Mes de medición	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Tasa de corrosión promedio	1.233	1.125	1.000	0.929	0.816	0.736	0.676
Predecir la tasa de corrosión	1.210	1.101	1.002	0.912	0.830	0.755	0.687
Tasa de error (%)	0.018	0.020	0.002	0.018	0.016	0.026	0.016
Mes de medición	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Tasa de corrosión promedio	0.625	0.562	0.509	0.465	0.427	0.396	0.369
Predecir la tasa de corrosión	0.625	0.569	0.518	0.471	0.429	0.390	0.355
Tasa de error (%)	0.001	0.013	0.017	0.013	0.003	0.014	0.037

Tasa de error promedio (%)	1.57
Exactitud (%)	98.43

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Valor previsto de la tasa de corrosión por picaduras a partir de una prueba estática utilizando el método estadístico (unidad: mm/100)

Mes de medición	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Tasa de corrosión promedio	1.1333	1.0708	0.9556	0.8042	0.7333	0.6403
Predecir la tasa de corrosión	1.1632	1.0351	0.9211	0.8196	0.7293	0.6490
Tasa de error (%)	0.0263	0.0334	0.0361	0.0192	0.0055	0.0136
Mes de medición	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	
Tasa de corrosión promedio	0.5661	0.5021	0.4514	0.4100	0.3739	
Predecir la tasa de corrosión	0.5775	0.5139	0.4573	0.4069	0.3621	
Tasa de error (%)	0.0202	0.0235	0.0131	0.0075	0.0315	
Tasa de error promedio (%)			2.09			
Exactitud (%)			97.91			

Fuente: Elaboración propia

1.4.9. DISCUSIÓN: Análisis de la confiabilidad de la vida a fatiga

El propósito fundamental de la investigación sobre la fatiga es estimar de manera razonable, precisa y confiable la vida útil de los materiales y estructuras para prevenir y reducir la ocurrencia de accidentes catastróficos por fatiga.

El proceso de fatiga se divide en tres etapas: formación de grietas por fatiga, propagación de grietas y fractura instantánea final. En la etapa final de fractura instantánea, el componente ha perdido su capacidad de carga, por lo que la investigación sobre fatiga se centra principalmente en las dos etapas de formación de grietas por fatiga y propagación de grietas.

Este estudio se centró principalmente en SUS630, un material comúnmente utilizado para sistemas de ejes de propulsión de barcos de alta velocidad, con el fin de utilizar la etapa de expansión de grietas para estimar su constante de crecimiento de fatiga por corrosión y luego obtener la vida útil de la fatiga por corrosión. Para obtener con precisión el número de ciclos de fatiga en la etapa de expansión de la grieta para facilitar la investigación y la estimación, se utiliza la prueba de aceleración por picaduras para simular la etapa de formación de la grieta por fatiga.

Con el desarrollo y la aplicación del diseño mecánico y la tecnología de confiabilidad, las fallas por carga estática de los componentes mecánicos son cada vez menos comunes. Incluso si ocurre una falla por carga estática, generalmente está relacionada con el medio ambiente. A partir de aplicaciones de ingeniería reales, se puede establecer que la fractura por fatiga es el principal modo de falla por fractura de piezas mecánicas. Dado que la mayoría de los accidentes importantes causados por fallas por fractura de piezas mecánicas están relacionados con fallas por fractura por fatiga.

A partir del análisis experimental se logró establecer que la fractura por fatiga se divide en tres etapas, etapa inicial de grieta por fatiga, etapa de crecimiento de grieta por fatiga y etapa de fractura instantánea por fatiga. Es importante saber que cuando no se produce corrosión por picadura, se sigue el principio de fractura por fatiga por encima de las tres etapas; si se produce corrosión por picaduras, no hay etapa inicial de grieta por fatiga en la etapa de fractura, y entra directamente en la etapa de crecimiento de grieta por fatiga y la etapa de fractura instantánea por fatiga. Por lo tanto, al juzgar los factores de fractura basándose en la observación de la fractura, se debe prestar especial atención. La ausencia de grietas por fatiga no puede utilizarse para concluir que se trata de una falla sin fatiga.

A partir del estudio experimental a través del tiempo se logró establecer que cuando se forma una macrogrieta, esta continúa expandiéndose de manera constante hasta que se produce una rápida expansión y se produce la fractura. Esta segunda etapa se llama etapa de expansión de la grieta. En esta etapa, cuando las grietas macroscópicas se expanden de manera estable, la dirección de expansión de la macrogrieta forma un ángulo de 90° con respecto a la tensión de tracción. Observando que la dirección de expansión de la superficie de la grieta entre estas dos etapas sólo cambia en un ángulo de 45° .

Para el material de acero inoxidable SUS630, cuando el valor ΔK está entre 26 y 46, cuando la amplitud de la tensión es incierta, se recomienda que el valor n constante del material metálico sea 3 y el valor C constante del material metálico sea $4,40E-15$, y luego con la fórmula establecidas en el modelo matemático se calcula el valor de la constante de crecimiento de grietas por fatiga (da/dN) y se estima la vida útil del eje de propulsión.

CONCLUSIONES

- El acero inoxidable tiene mejor resistencia a la corrosión en la zona de la atmósfera oceánica y en la zona de salpicaduras, pero tiene sus limitaciones en la zona de inmersión total. El acero inoxidable sufrirá corrosión por picaduras o corrosión por grietas en agua de mar tranquila, cuando hay organismos marinos adheridos a él y cuando hay huecos en la estructura. En un entorno de agua de mar con un determinado caudal, proporcionará el oxígeno necesario para que el acero inoxidable mantenga la pasivación y evite el crecimiento de organismos marinos. Por lo tanto, cuando se utilizan materiales para ejes de propulsión de acero inoxidable, el barco no debe permanecer atracado durante demasiado tiempo para crear condiciones ambientales favorables para la corrosión por picaduras o grietas.
- A partir de los resultados de la prueba de corrosión por picaduras, se establece que la tendencia de crecimiento de la tasa de corrosión por picaduras del acero inoxidable SUS630 es exponencial; a partir de los resultados de la prueba de fatiga rotacional se logra encontrar que cuando se produce corrosión por picaduras, su vida de fatiga residual incrementa 10 veces la vida normal a fatiga ~20%.
- Se logró establecer que la vibración torsional es el principal factor que causa daños en los ejes; además, a partir de los resultados del análisis de ejemplos de confiabilidad de los ejes, donde para ejes fabricados del material SUS 630, la vibración de torsión tiene un impacto significativo en la confiabilidad. Especialmente cuando se producen picaduras y el sistema de eje opera en un estado de resonancia torsional, su confiabilidad se reduce significativamente

en comparación con la operación en condiciones de viento y olas y condiciones excéntricas.

RECOMENDACIONES

- Aunque este estudio analiza los materiales de los ejes de propulsión de barcos de alta velocidad desde diferentes ángulos, los materiales en sí tienen peligros y riesgos potenciales, son desconocidos, aleatorios y probabilísticos, y a menudo no son fáciles de controlar por completo. El problema del sistema de eje de propulsión de los barcos de alta velocidad es algo que se puede ver, pero todavía hay cosas en las que nadie ha pensado nunca y que merecen consideración y discusión.
- Cuando el sistema de ejes de propulsión de un barco de alta velocidad está hecho de acero inoxidable SUS630, si se produce corrosión por picaduras, se espera que el posprocesamiento mejore la vida a fatiga. No sólo no se obtendrán beneficios, sino que será perjudicial. La pulverización de superficies metálicas puede proteger contra las picaduras o la corrosión, pero no puede mejorar el material y el precalentamiento a baja temperatura no es adecuado para sistemas de eje giratorio de alta velocidad.
- Según los resultados del análisis de los factores que afectan la corrosión por picaduras, cuando el valor del pH cambia muy poco, se puede ignorar su impacto en la corrosión por picaduras. Según los resultados de las pruebas experimentales, la velocidad de corrosión por picaduras es proporcional al área de corrosión. Por lo tanto, para los sistemas de ejes de propulsión de barcos de alta velocidad fabricados con material SUS630, al estimar la tasa de corrosión por picaduras, sólo es necesario tener en cuenta el área de corrosión, mientras que otros factores como el entorno de uso y defectos menores en el material puede ignorarse.

BIBLIOGRAFÍA

- Adaby, I., Lintang, A., & Syafrie, D. (2022). Analisis Fatigue Failure pada Shaft Propeller sebagai Instrumen Utama Penggerak Kapal - Review. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 54-58. <http://ojs.unud.ac.id/index.php/jem>
- Ahmed, A., Franzosi, G., Bartetta, D., & Delucchi, M. (2022). Model Scale Investigation of Blade Root Cavitation Erosion on a Set of Marine Propellers. *International Symposium of Marine Propulsors*, 17(21). <https://www.marinepropulsors.com/proceedings/2022/2-2-3.pdf>
- Ahmet, G., & Barlas, B. (2019). An experimental investigation of interceptors for a high speed hull. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(1), 256-23. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2018.05.001>
- Ahola, A., Lipiäinen, K., Lindroos, J., Koskimäki, M., Laukia, K., & Björk, T. (2023). On the Fatigue Strength of Welded High-Strength Steel Joints in the As-Welded, Post-Weld-Treated and Repaired Conditions in a Typical Ship Structural Detail. *Mar. Sci. Eng.*, 11(3), 644. <https://doi.org/10.3390/jmse11030644>
- Altosole, M., Bagnasco, A., Figari, M., & Maffioletti, L. (2007). *Desing and test of the propulsion control of the aircraft carrier Cavour usin real time hadware*. Genoa: Eurosiw.
- Arroyo, B., Lacalle, R., Álvarez, J., Cicero, S., & Moreno, X. (2021). Análisis de fallo por corrosión inducida microbiológicamente de un sistema de tubería soldada de acero inoxidable en una zona portuaria. *Rev Inesco Ingenieros*. https://www.researchgate.net/profile/Sergio-Cicero/publication/369383711_Analisis_de_fallo_por_corrosion_inducida_microbiologicamente_de_un_sistema_de_tuberia_soldada_de_acero_inoxidable_en_una_zona_portuaria/links/64198ddf315dfb4cce97d687/Analisis-de-fal

- Barquero, A. (2011). *Introducción a la resistencia y propulsión del buque*. (U. P. Madrid, Ed.)
- Basim, R., Basim, S., & Murtadua, A. (2020). Study of the Effects of Welding Process on the Microstructure of Worn Carbon Steel Shaft. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671, 012161. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012161>
- Behvar, A., & Haghshenas, M. (2023). A critical review on very high cycle corrosion fatigue: Mechanisms, methods, materials, and models. *Journal of Space Safety Engineering*, 10(3), 284-323. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2023.05.002>
- Berghout, T., Hayet, L., Bentrchia, T., Elbouchikhi, E., & Benbouzod, M. (2021). A deep supervised learning approach for condition-based maintenance of naval propulsion systems. *Ocean Engineering*, 221, 108525. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108525>
- Bilalis, E., Keramidis, M., & Tsouvals. (2022). Structural design optimization of composite materials drive shafts. *Revista Marine Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103194>
- Carlton, J. (2012). *Hélices Marinas y Propulsión*. Butterworth-Heinemann.
- Clemente, A. (2019). *Corrosión por fatiga en un álabe de turbina de vapor de baja presión expuesta en agua de mar sintética*. Uacj : <http://cathi.uacj.mx/20.500.11961/9193>
- Dong, H., Wang, H., & Zhenwei, C. (2023). Corrosion fatigue crack growth in stainless steels: A peridynamic study. *International Journal of Mechanical Sciences*, 254, 108445. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108445>

- Dzionk, S., Przybylski, W., & Ścibiorski, B. (2020). The Possibilities of Improving the Fatigue Durability of the Ship Propeller Shaft by Burnishing Process. *Rev Machines*, 10.3390/machines8040063.
- Esquivel, A., & Cuevas, C. (2020). Study of corrosion inhibition of copper in synthetic seawater by *Equisetum arvense* as green corrosion inhibitor. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 603-601.
- González, C. (2020). *Comprobación estructural del sistema de propulsión debido al cambio de las condiciones operativas del ferry boat gran cacique ii*. [Tesis de pregrado publicada] Universidad del Oriente: <http://ri2.bib.udo.edu.ve:8080/jspui/handle/123456789/1123>
- Googan, C. (2022). *Marine Corrosion and Cathodic Protection*. CRC Press.
- Javed, M., Ang, A., Bhadra, C., Piola, R., Neil, W., & Berndt, C. (2021). Corrosion and mechanical performance of HVOF WC-based coatings with alloyed nickel binder for use in marine hydraulic applications. *Surface and Coatings Technology*, 418, 127239. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127239>
- Jiangmin, X., Zhuying, L., Jingchao, J., Xiaoqiang, W., & Xiaodong, Z. (2021). Effect of Flow Rates on erosion corrosion behavior of hull steel in real seawater. *International Journal of Electrochemical Science*, 16(5), 210532. <https://doi.org/0.20964/2021.05.60>
- Jingjing, H., Xiaohui, F., Xiyan, W., & Xuefei, G. (2022). Fatigue performance and acoustic emission behavior of remanufactured low-carbon steel made by wire and arc additive manufacturing. *International Journal of Fatigue*, 165, 107190. <https://doi.org/0.1016/j.ijfatigue.2022.107190>

- Lee, J., Kim, J., & Kang, S. (2017). Fatigue life analysis of steel tube member with T-shaped welded joint by FEM. *International Journal of Steel Structures*, 17, 833-841. <https://doi.org/10.1007/s13296-017-6035-3>
- Leishear, R. (2023). Water Hammer and Fatigue Corrosion - I - A Piping System Failure Analysis. *Leishear Engineering*, 1-19.
- Marine Protection Systems. (2022). *IDENTIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN*. Marine Protection Systems: https://propspeed.com/docs/default-source/marine-protection-systems/identifying-corrosion_mps_spa.pdf?sfvrsn=2a489f1f_27
- Martinelli, M. (2014). *Marine Propulsion Simulation*. DE GRUYTER OPEN.
- Martínez, I. (2019). *MARINE PROPULSION*. Isidoro Martínez UPM: <http://imartinez.etsiae.upm.es/~isidoro/bk3/c17/Marine%20propulsion.pdf>
- Nova, C. (2022). *MÉTODOS DE CONTROL DE CORROSIÓN, APLICADOS A NIVEL INDUSTRIAL EN LA PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS*. [Tesis de pregrado publicada] UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA: https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/handle/001/9083/Metodos_control_de_corrosion.pdf?sequence=1
- OMI. (2012). MEPC.1/Circ.796. OMI. *Zhang Haoqiong, Chen*.
- OMI. (2018). *Estrategia de Reducción de Emisiones de GEI de los Buques*. <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Pages/default.aspx>.
- OMI. (2019). *Las normas de construcción de buques avanzan hacia un nuevo modelo*. Organización Marítima Internacional: <https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/Paginas/13-GBS-.aspx>
- OMI. (2020). *El proyecto de enmiendas al Convenio MARPOL requeriría que los barcos combinen un enfoque técnico y operativo para reducir su intensidad de*

- carbono. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/42-MEPC-short-term-measure.aspx>.
- OMI. (2020). *Indice de Resoluciones y Directrices MEPC relacionadas con el Anexo VI de MARPOL*. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Index-of-MEPC-Resolutions-and-Guidelines-related-to-MARPOL-Annex-VI.aspx>.
- Pelayo, L. (2018). *Marine Corrosion in Offshore Structures*. [Tesis de pregrado publicada] Universidad de Cantabria: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/15457/Pelayo%20Ruiz%2C%20Laura.pdf?sequence=1>
- Rante, M., Syahid, M., & Sutresman, O. (2019). The Corrosion Erossion of Ship Propeller Al 7075 Produced by Gravity Sand Casting. *EPI International Journal of Engineering*, 2(2), 172-177. <https://doi.org/10.25042/epi-ije.082019.13>
- Roberge, P. (2019). *Handbook of Corrosion Engineering, 3rd Edition*. McGraw-Hill Education.
- Romero, D. (2017). *Metodología para la evaluación de Riesgo*. [Tesis doctoral publicada]: https://oa.upm.es/48680/1/David_Romero_Faz.pdf
- Shen, W., Qiu, Y., Xiaobin, L., Xinyu, H., Berto, F., & Hu, D. (2021). Stress magnification effect of initial deformation on the notch stress field and fatigue strength of thin plate welded joints. *Rev Marine Structures*, 78, 102999. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.102999>
- Shifler, D. (2022). *Design for Corrosion Control in Marine Environments*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119788867.ch13>
- Sridhar, K., & Balasubramanian, V. (2022). *A Treatise on Corrosion Science, Engineering and Technology*. Indian Institute of Metals Series. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9302-1_30

- Takashi, I., Hiritoshi, E., & Juninchi, B. (2018). Effect of High Pressure Gaseous Hydrogen on Fatigue Properties of SUS304 and SUS316 Austenitic Stainless Steel. *Pressure Vessels and Piping Conference*, 1-7. <https://doi.org/10.1115/PVP2018-84267>
- Tang, G., Xia, S., & Zhang, F. (2021). Effect of tempering temperature on monotonic and low-cycle fatigue properties of a new low-carbon martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 826, 141939. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141939>
- Vizentin, G., Vukelic, G., Murawki, L., Recho, N., & Orovic, J. (2020). Marine Propulsion System Failures—A Review. *Journal of Marina Science and Engeniering*. <https://doi.org/10.3390/jmse8090662>
- Vukelic, G., & Vizentin, G. (2017). Common failures of ship propulsion shafts. *Pomorstvo*, 31(2), 85-90. <https://doi.org/10.31217/p.31.2.1>
- Wladichuk, J., & Hannay, D. (2019). Systematic source level measurements of whale watching vessels and other small boats. *Journal of Ocean Technology*, 14(3), 110-126. <https://web.p.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=17183200&AN=139916090&h=Wa1%2fdVesVSvk0e62XKhBEZwUY0b%2bDDDQNP6ysjq4aLk%2fnTEpwB7Wa3GTItJw9F%2fOrbQ7vyCZ%2fCITBCUGuYeNw%3d%3d&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resu>
- Xiao, L., & Zhi, Y. (2021). Failure analysis of a marine intermediate shaft. *Rev Engineering Failure Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105464>

- Xu, Y., Zhang, Q., & Zhou, Q. (2021). Flow accelerated corrosion and erosion–corrosion behavior of marine carbon steel in natural seawater. *Npj Materials Degradation*, 5(56). <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00205-1>
- Yang, K., Chen, C., Guozheng, X., & Jiang, Z. (2022). HVOF sprayed Ni–Mo coatings improved by annealing treatment: microstructure characterization, corrosion resistance to HCl and corrosion mechanisms. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 1906-1921. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.181>
- Youghune, K. (2019). High-Cycle, Low-Cycle, Extremely Low-Cycle Fatigue and Monotonic Fracture Behaviors of Low-Carbon Steel and Its Welded Joint. *Materials*, 12(24), 4111. <https://doi.org/10.3390/ma12244111>
- YunLong, T., Xin, Y., & Ding, L. (2020). Microstructures and mechanical properties of Ni/Fe dissimilar butt joint welded using the cold metal transfer. *Materials Research Express*, 7, 046516. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab8843>
- Zhang, Y., Zheng, K., Heng, J., & Zhu, J. (2019). Corrosion-Fatigue Evaluation of Uncoated Weathering Steel Bridges. *Applied Sciences*, 9(17), 3461. <https://doi.org/10.3390/app9173461>