

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA

DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE POTENCIA DE
UN BUQUE EN FUNCIÓN DEL AUMENTO DE LA CORROSIÓN EN SU CASCO

Alumno: Marçal Castells Mur

*Director: Juan Francisco Sánchez Pérez
Manuel Conesa Valverde*

Cartagena, 26 de Abril de 2016

Agradecimientos

Quisiera agradecer al Dr. Juan Francisco Sánchez Pérez y al Dr. Manuel Conesa Valverde, tutores en este proyecto, por el buen criterio a la hora de orientarme y todo el esfuerzo depositado en la elaboración del proyecto. De forma especial quisiera resaltar la motivación que me ha transmitido junto con el tiempo que me ha dedicado.

Asimismo, quisiera agradecer a todas las personas que de manera indirecta han estado conmigo para realizar dicho proyecto, ya que sin los ensayos, estudios, artículos académicos e investigaciones de campo no hubiese sido factible la realización de esta memoria.

Finalmente, agradecer a mi familia todo su apoyo incondicional, quiero destacar a mis padres y mi pareja Inés por estar a mi lado.

Resumen

Uno de los problemas más importantes que se presenta en el proyecto de un buque es la determinación de su potencia para que el buque navegue a una determinada velocidad. Existen estudios para predeterminar la resistencia total en aguas tranquilas. Mientras que en mar abierto y al cabo de un cierto tiempo ésta resistencia es mayor.

En este proyecto se va a desarrollar un software para calcular el incremento de resistencia del buque en función de la rugosidad adquirida a lo largo del tiempo. El estudio se centrará en la rugosidad debida a la corrosión en el casco de acero producido por el deterioro de la capa de pintura anticorrosiva y antiincrustante y las incrustaciones biológicas de origen animal o vegetal en el casco.

El procedimiento que se pretende utilizar para evaluar la rugosidad del casco será las regresiones lineales entre la velocidad de corrosión y la rugosidad añadiendo un coeficiente de correlación debidos a los errores cometidos al utilizar un procedimiento de extrapolación de métodos experimentales.

Una vez obtenida la influencia de la rugosidad en el incremento de resistencia al avance del buque, se procederá al cálculo de la pérdida de potencia del buque en función de la velocidad de avance.

Índice

Agradecimientos	B
Resumen	D
1. Introducción	1
2. Objetivos	2
3. Especificaciones del proyecto.....	3
3.1 Fundamentos teóricos de los procesos de corrosión	3
3.1.1 Formas de la corrosión.....	4
3.1.1.1 Corrosión uniforme.....	5
3.1.1.2 Corrosión galvánica.....	6
3.1.1.3 Corrosión por erosión (freeting).....	8
3.1.1.4 Corrosión por agrietamiento	9
3.1.1.5 Corrosión por picadura (pitting)	10
3.1.1.6 Corrosión por exfoliación.....	11
3.1.1.7 Corrosión selectiva	11
3.1.1.8 Corrosión intergranular	12
3.1.1.9 Fractura por corrosión bajo tensión	14
3.1.1.10 Corrosión por fatiga.....	15
3.1.2 Elección de la corrosión a analizar	16
3.2 Efecto de las variables ambientales	17
3.2.1 Rangos de temperatura.....	19
3.2.2 Propiedades del agua de mar.....	21
3.3 Fundamentos teóricos de la rugosidad.....	23
3.3.1 Tipos de rugosidad	25
3.3.2 Procedimiento para evaluar la rugosidad del casco.....	26
3.3.2.1 Variación de la rugosidad con el tiempo	27
3.3.3 Protección contra la rugosidad adquirida	28
3.4 Fundamentos teóricos de la resistencia al avance	30
3.4.1 Las componentes de la resistencia.....	32
3.4.2 Procedimiento para evaluar la resistencia mediante coeficientes	34
3.4.3 Variables de las que depende la resistencia.....	36
4. Metodología.....	37
4.1 Ecuaciones de condiciones iniciales de la oxidación por picadura.....	37
4.2 Influencia de la corrosión sobre la morfología de la superficie	47
4.2.1 Relación corrosión vs rugosidad independiente a la salinidad	49
4.2.2 Relación corrosión vs rugosidad dependiente a la salinidad	51
4.2.2.1 Relación con una salinidad de 80g/kg	55
4.2.2.2 Relación con una salinidad de 60g/kg	57
4.2.2.3 Relación con una salinidad de 40g/kg	58

4.3 Influencia de la rugosidad en la resistencia al avance.....	60
5. Desarrollo del software Matlab.....	65
5.1 Creación y estructura del fichero de función.....	67
5.2 Variables de entrada.....	69
6. Conclusiones.....	71
7. Bibliografía.....	75
Referencias bibliográficas.....	75
Referencia Imágenes.....	79
Anexos.....	81

1. Introducción

Uno de los problemas más importantes que se presenta en el proyecto de un buque es la determinación de su potencia para que el buque navegue a una determinada velocidad.

Aunque existen estudios para predeterminar la resistencia total en aguas tranquilas, esta no será la misma en mar abierto, y al cabo de un cierto tiempo ésta resistencia será mayor.

En esta etapa del proyecto, se recurrirá a métodos analíticos para hacer las primeras aproximaciones de la resistencia al avance. Estos métodos analíticos se dividen en dos grupos: series sistemáticas de formas y métodos numéricos estadísticos.

Por otro lado, se estudiará la velocidad de corrosión que sufre la carena del buque. La corrosión en un barco es un problema de vital importancia, puesto que esta causa desgastes en la estructura así como grietas en el casco.

Por este motivo, es necesario realizar un estudio de la velocidad de corrosión, no solo para evitar la rotura del casco sino para evitar la pérdida de material del casco que produce la modificación de las formas de la carena, alterando así la rugosidad del propio material del casco.

De este modo se pondrá de manifiesto la necesidad de prevenir, en la medida de lo posible, este fenómeno.

En la siguiente fase, se procederá al cálculo de la rugosidad adquirida a lo largo de la vida del buque debida a la corrosión del casco de acero. Así se podrá obtener la influencia de la rugosidad en la resistencia al avance y el cálculo de la pérdida de potencia del buque.

2. Objetivos

El objetivo global de este trabajo es el estudio de la pérdida de potencia de un barco ocasionada debida al efecto de la corrosión generalizada y la alteración de la rugosidad de la obra viva del mismo que afectará a la disminución de velocidad de avance.

En este proyecto se va a desarrollar un software para calcular el incremento de resistencia del buque en función de la rugosidad adquirida a lo largo del tiempo. El estudio se centrará en la rugosidad debida a la corrosión en el casco de acero producido por el deterioro de la capa de pintura anticorrosiva y antiincrustante y las incrustaciones biológicas de origen animal o vegetal en el casco.

Para ello, será necesario realizar el estudio de la composición química del agua del mar (el océano en el que el programa será válido), así se podrá analizar el efecto de la corrosión generalizada en el casco debida a la variación temperatura y la salinidad del mar.

El procedimiento que se pretende utilizar para evaluar la rugosidad del casco será las regresiones lineales entre la velocidad de corrosión y la rugosidad añadiendo un coeficiente de correlación debidos a los errores cometidos al utilizar un procedimiento de extrapolación de métodos experimentales.

Una vez obtenida la influencia de la rugosidad en el incremento de resistencia al avance del buque, se procederá al cálculo de la pérdida de potencia del buque en función de la velocidad de avance.

3. Especificaciones del proyecto

En este capítulo se darán a conocer y se estudiarán, por una parte, los distintos procesos de corrosión haciendo especial hincapié en el proceso de corrosión por picadura; y por otra, la rugosidad adquirida propia del material y la variación de rugosidad dependiendo del tratamiento superficial aplicado en el casco.

3.1 Fundamentos teóricos de los procesos de corrosión

A fin de analizar los problemas de corrosión, es necesario un sólido conocimiento para reconocer la corrosión, cómo se produce y donde se origina, cómo impedir su severidad, qué herramientas son necesarias, técnicas de inspección, variables de diseño que afectan a la corrosión, selección de materiales y la forma de interpretar y aplicar la información del problema corrosivo, así como saber dónde obtener ayuda.

En este capítulo se pretende mostrar qué es la corrosión junto con sus diversas formas de aplicación y como afectan las variables de temperatura y salinidad en este fenómeno, para poder dar respuesta a dichas preguntas.

En términos técnicos simplificados, la corrosión ha sido definida como la destrucción de un metal por reacción química o electroquímica por el medio ambiente y representa la diferencia entre una operación libre de problemas con gastos de operación muy elevados.

Todos los metales y aleaciones son susceptibles de sufrir el fenómeno de corrosión, de modo que es casi imposible eliminar la corrosión y el secreto efectivo de la ingeniería en este campo radica más en su control, que en su eliminación siendo necesario tomar en cuenta el fenómeno corrosivo desde el diseño del buque y no después de ponerlo en operación.

3.1.1 Formas de la corrosión

La corrosión ocurre de numerosas y variadas formas, pero su clasificación generalmente se basa en uno de los tres siguientes factores:

- Naturaleza de la sustancia corrosiva. La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca, para la primera se requiere un líquido o humedad mientras que para la segunda, las reacciones se desarrollan con gases a alta temperatura.
- Apariencia del metal corroído. La corrosión puede ser uniforme y entonces el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas áreas pequeña
- Mecanismo de corrosión. Este comprende las reacciones electroquímicas o bien, las reacciones químicas.

Los diferentes tipos de corrosión se esquematizan en la siguiente tabla donde se enuncian cada una de estas formas.



Tabla 1. Clasificación de la corrosión

En este proyecto se van a realizar los estudios de las diferentes formas de corrosión por apariencia, para posteriormente usar uno de ellos en el análisis del efecto de la corrosión generalizada en el casco debida a la variación temperatura y la salinidad del mar.

La clasificación por apariencia, uniforme o localizada, es muy útil para una discusión preliminar que en caso de requerirse en forma más completa, necesita del establecimiento de las diferencias entre la corrosión localizada de tipo macroscópico y el ataque microscópico local.

Según la apariencia, las distintas formas de corrosión se pueden clasificar según se detallan a continuación.

3.1.1.1 Corrosión uniforme

El ataque uniforme sobre grandes áreas de una superficie metálica es la forma más común de la corrosión y puede ser húmeda o seca, electroquímica o química, siendo necesario seleccionar los materiales de construcción y los métodos de protección como pintura, para controlarla.

El ataque se distribuye a lo largo de la superficie, y consecuentemente conduce a una reducción relativamente uniforme del grosor de la superficie. De modo que, el medio corrosivo debe tener el mismo acceso a todas partes de la superficie del metal.

La corrosión uniforme es la más común y la que genera mayores pérdidas de material. Sin embargo, al ser de tipo superficial es también la más fácil de controlar y por tanto la que menos accidentes provoca, Sevilla, C. [2012].

Por otra parte, la corrosión uniforme es la forma más fácil de medir, por lo que las fallas inesperadas pueden ser evitadas simplemente por inspección regular.

La corrosión atmosférica es el mejor ejemplo de la corrosión uniforme, otro ejemplo es el ataque de un acero por una solución ácida.



Figura 1. Ejemplo corrosión uniforme, Mantenimiento Industrial [2015]

3.1.1.2 Corrosión galvánica

La corrosión galvánica se presenta por el contacto entre dos metales con potenciales de oxidación diferentes o entre metales conectados por medio de un conductor eléctrico, son expuestos a una solución conductora. En este caso, existe una diferencia en potencial eléctrico entre los metales diferentes y sirve como fuerza directriz para el paso de la corriente eléctrica a través del agente corrosivo, de tal forma que el flujo de corriente corroe uno de los metales del par formado.

Mientras más grande es la diferencia de potencial entre los metales, mayor es la probabilidad de que se presente la corrosión galvánica debiéndose notar que éste tipo de corrosión sólo causa deterioro en uno de los metales, mientras que el otro metal del par casi no sufre daño.

El metal que se corroe recibe el nombre de metal activo siendo el material menos noble con menor potencial de oxidación, mientras que el que no sufre daño se le denomina metal más noble.

La relación de áreas entre los dos metales es muy importante, ya que un área muy grande de metal noble comparada con el metal activo, acelerará la corrosión, y por el contrario, una mayor área del metal activo comparada con el metal noble disminuye el ataque del primero.

La corrosión galvánica a menudo puede ser reconocida por el incremento del ataque junto a la unión de los metales y puede ser controlado por el uso de aislamientos o restringiendo el uso de uniones de metales cuando ellos forman diferencias de potencial muy grandes en el medio ambiente en el que se encuentran. La diferencia de potencial puede ser medida, utilizando como referencia la serie galvánica de los metales y aleaciones que se presentan más adelante, en la serie de los potenciales tipo (standard) de óxido de reducción, Publicaciones UDLAP [2012].

Otro método para reducir la corrosión galvánica, es evitar la presencia de grandes áreas de metal noble con respecto a las de metal activo.

Un ejemplo de la corrosión galvánica es representativo en algunos tornillos que remachan estructuras bastante más nobles que estas.

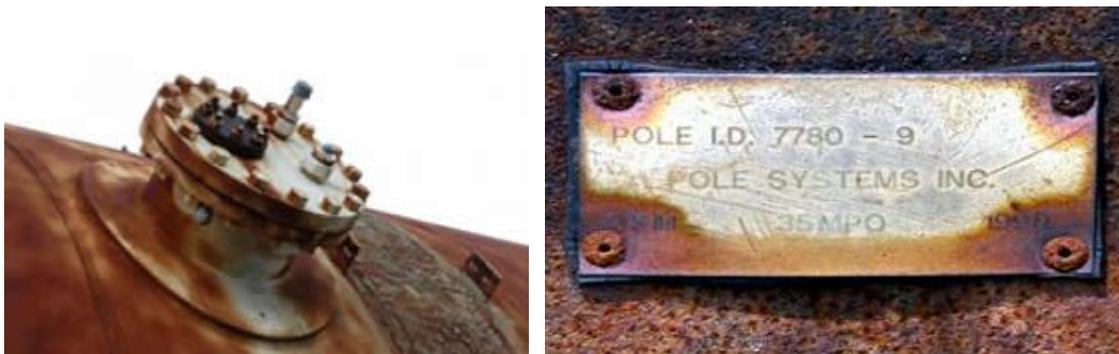


Figura 2. Ejemplo corrosión galvánica, Corrosión en arandelas Belleville [2015] y Todoproductividad [2010]

3.1.1.3 Corrosión por erosión (freeting)

Es una aceleración en la velocidad de ataque corrosivo, debido al movimiento relativo entre un fluido y una superficie metálica. Ocurre cuando el movimiento del medio corrosivo sobre la superficie metálica incrementa la velocidad de ataque debido a desgaste mecánico, este recibe el nombre de corrosión por erosión. La importancia relativa del desgaste mecánico y la corrosión, es a menudo difícil de establecer y varía grandemente de una situación a otra, y el mecanismo de la erosión generalmente se atribuye a la remoción de películas superficiales protectoras, como por ejemplo, películas de óxido formadas por el aire, o bien, productos adherentes de la corrosión.

La corrosión por erosión, generalmente tiene la apariencia de hoyos pequeños lisos o de picaduras poco profundas de fondo terso. El ataque puede presentar también una distribución direccional debido al camino seguido por el agente agresivo cuando se mueve sobre la superficie del metal, Publicaciones UDLAP [2012].

La corrosión por erosión prospera en condiciones de alta velocidad, turbulencia, choque, etc., y frecuentemente se observa en impulsores de bombas, agitadores y en codos y cambios de dirección de tuberías. Los líquidos con suspensión conteniendo partículas sólidas duras pueden igualmente causar este tipo de problema.

La corrosión por erosión puede ser evitada por cambios de diseño o por selección de materiales más resistentes.



Figura 3. Ejemplo corrosión por erosión, Widman International SRL [2015].

3.1.1.4 Corrosión por agrietamiento

El proceso corrosivo comienza cuando la película de óxido que actúa como medio de protección del metal, se rompe en una determinada zona puntual, dando lugar a la aparición de los primeros deterioros, los cuales, dada su dificultad de observación pueden desembocar en la rotura de las estructuras, Mogollon, J. [2015].

Las condiciones ambientales en una grieta, pueden con el tiempo volverse muy diferentes de las existentes en una superficie limpia y abierta, por lo que un medio ambiente muy agresivo puede desarrollar y causar corrosión en las grietas.

La corrosión por agrietamiento, generalmente se atribuye a los siguientes factores, Alfaro, A. [2011]:

- Cambios de acidez en la grieta o hendidura.
- Escasez de oxígeno en la grieta.
- Desarrollo de iones diferentes en la hendidura.
- Agotamiento de Inhibidor en la grieta.

La corrosión por agrietamiento no ocurre en todas las combinaciones metal-agente corrosivo, y algunos materiales son más susceptibles para producirla que como por ejemplo aquéllos que dependen de las películas protectoras de óxido formadas por el aire para adquirir su resistencia a la corrosión, como el acero inoxidable y el titanio.

Las grietas o hendiduras generalmente se encuentran en los empaques, traslapes, tornillos, remaches, etc., y también pueden formarse por depósitos de suciedad, productos de la corrosión y raspaduras en las películas de recubrimiento.



Figura 4. Ejemplo corrosión por agrietamiento, JN Aceros Blog y Trytech [2015].

3.1.1.5 Corrosión por picadura (pitting)

La corrosión por picadura es un fenómeno localizado que se manifiesta por anomalías, por agentes químicos, que crecen rápidamente hacia el interior del material hasta generar daños catastróficos, Mogollon, J. [2015].

El ataque se presenta por la formación de orificios en el metal. Estos huecos suelen ser de tamaño pequeño y aparecen pegados unos con otros dando la impresión de poros. Las cavidades que se forman pueden variar en cantidad, tamaño y forma.

La corrosión por picadura es un proceso lento que puede llevar meses y años antes de ser visible, pero que naturalmente, causará fallas inesperadas. El pequeño tamaño de la picadura y las minúsculas cantidades de metal que se disuelven al formarla, hacen que la detección de ésta sea muy difícil en las etapas iniciales.

Para reducir la corrosión por picadura se necesita una superficie limpia y homogénea, por ejemplo, un metal homogéneo y puro con una superficie muy pulida deberá ser generalmente, mucho más resistente que una superficie que tenga incrustaciones, defectos o rugosidad, Publicaciones UDLAP [2012].

La limpieza de la superficie y la selección de materiales conocidos, resistentes a la formación de picaduras en un medio ambiente determinado, es generalmente el camino más seguro para evitar este tipo de corrosión.



Figura 5. Ejemplo corrosión por picadura, High Seas Hydraulics [2014].

3.1.1.6 Corrosión por exfoliación

La corrosión por exfoliación es una corrosión intersticial que comienza sobre una superficie limpia, pero va penetrando hacia el interior del metal y difiere de la corrosión por picadura en que el ataque tiene una apariencia laminar.

Capas completas de material son corroídas y el ataque es generalmente reconocido por el aspecto escamoso y en ocasiones ampollado de la superficie, Alfaro, A. [2011].

Al final del ataque, una muestra tiene la apariencia de un mazo de barajas en el cual algunas de las cartas han sido extraídas. Este mecanismo es bien conocido en las aleaciones de aluminio y se combate utilizando aleaciones y tratamientos térmico.



Figura 6. Ejemplo corrosión por exfoliación, Duber, R. [2014].

3.1.1.7 Corrosión selectiva

Se denomina selectiva porque actúa sólo sobre metales nobles como la unión de plata-cobre o cobre - oro. La parte más nociva de esta clase de ataques está en que la corrosión del metal genera una capa que recubre las picaduras y hace parecer al metal corroído facilitando la producción de daños en el metal al someterse a una fuerza mecánica.

La corrosión selectiva es causada debida a las aleaciones que tienen diferentes tipos de metales aleantes que a su vez tienen distintos potenciales electroquímicos en un mismo medio. La diferencia de potencial genera un ataque en el elemento más activo de la aleación.

La corrosión por disolución selectiva se produce al efectuarse la remoción de uno de los elementos de una aleación siendo el ejemplo más común la eliminación del zinc en aleaciones de cobre - zinc, conocido con el nombre de deszincificación. Este fenómeno corrosivo produce un metal poroso que tiene propiedades mecánicas muy pobres y obviamente el remedio a este caso es el empleo de aleaciones que no sean susceptibles a este proceso, Salvador, G [2010].



Figura 7. Ejemplo corrosión selectiva por deszincificación del latón, UPV [2004]

3.1.1.8 Corrosión intergranular

La corrosión intergranular se encuentra localizada en los límites de grano, esto origina pérdidas en la resistencia que desintegran los bordes de granos, Mogollon, J. [2015].

Los límites de grano son a veces atacados preferencialmente por un agente corrosivo y el ataque se relaciona con la segregación de elementos específicos o por la formación de un compuesto en el límite. La corrosión generalmente ocurre, porque el agente corrosivo ataca preferencialmente el límite de grano o una zona adyacente a él, que ha perdido un elemento necesario para tener una resistencia a la corrosión adecuada.

En un caso severo de corrosión, los granos enteros se desprenden debido a la deterioración completa de sus límites, en cuyo caso, la superficie aparecerá rugosa al ojo desnudo y se sentirá rasposa debido a la pérdida de los granos.

El fenómeno de límite de grano que causa la corrosión, es sensible al calor por lo que la corrosión de este tipo, es un subproducto de un tratamiento térmico como la soldadura o el relevado de esfuerzos y puede ser corregido por otro tipo de tratamiento térmico o por el uso de una aleación modificada, Publicaciones UDLAP [2012].

Cuando el acero es sometido a inadecuados tratamientos térmicos, los átomos de carbono tienden a precipitar en la frontera reticular como carburos de cromo. Esta situación hace que la concentración de carburo de cromo sea mayor en la frontera reticular que en zonas contiguas a los mismos, generando una difusión de material entre ambas zonas. Este fenómeno se llama sensibilización y da el resultado de la disminución a la resistencia a la corrosión.

La sensibilización provoca que el acero inoxidable quede expuesto a la corrosión intergranular cuando está en ambientes corrosivos. En algunos casos también se reduce la resistencia a los fenómenos de corrosión por picadura, bajo tensión o grieta.



Figura 8. Ejemplo corrosión intergranular, G2MT Labs [2014].

3.1.1.9 Fractura por corrosión bajo tensión

Se define fractura por corrosión, o corrosión bajo esfuerzos de tensión, al proceso físico-químico a través del cual los metales, cuando están sometidos a esfuerzos mecánicos y de manera simultánea expuestos a ambientes corrosivos, presentan una fatiga estructural que desemboca en la aparición de fisuras y grietas con resultado de una disminución de su resistencia intrínseca.

En la corrosión bajo esfuerzos no se suelen observar grandes extensiones afectadas, lo cual resulta bastante engañoso, y consecuentemente peligroso, debido a que las grietas formadas, aparentemente superficiales, tienen la particularidad de ser de textura fina pero profunda, lo cual redundo en un elevado riesgo de fractura.

Los esfuerzos que causan las fracturas provienen de trabajos en frío, soldadura, tratamiento térmicos, o bien, pueden ser aplicados en forma externa durante la operación del equipo.

Las fisuras por tenso-corrosión se identifican por medios ópticos, observándose una extensa ramificación de las mismas a lo largo de los perfiles del grano metalográfico. También es posible apreciar el lugar en el que se inician las grietas por la aparición de filamentos de óxido, Publicación CCI [2014].

El riesgo máximo de rotura se acentúa cuando, al avanzar el crecimiento de las grietas, se imprime un esfuerzo mecánico sobre los puntos críticos del material.



Figura 9. Ejemplo de fractura por corrosión bajo tensión, Labtesa [2.010]

3.1.1.10 Corrosión por fatiga

Las fracturas por fatiga tienen como causa principal el verse sometidas a un esfuerzo mecánico repetitivo de forma periódica. También se presentan en ausencia de medios corrosivos de manera indirecta por ciclos de tensión repetitivos térmicamente inducidos en el componente. La geometría de éste es de gran importancia dado que como más tensionada esté más favorece a la aparición de la corrosión por fatiga.

Cuanto más baja sea la resistencia mecánica del material, más pequeñas serán las tensiones necesarias para conducir a un proceso de fractura por fatiga. Los puntos de inicio de la fractura serán los más débiles estructuralmente, normalmente límites de grano expuestos, producidos por una muesca, o en parte corroídos a nivel microscópico. El efecto combinado entre ataque químico y esfuerzo mecánico lleva hacia el desarrollo de fisuras. Los recubrimientos con carácter frágil y facilidad para el resquebrajamiento, como los galvánicos, son frecuentemente la causa de una fractura por fatiga.

La corrosión por fatiga, se incrementa naturalmente con la presencia de un medio agresivo, de tal forma que el esfuerzo necesario para producir la corrosión por fatiga, se reduce en algunas ocasiones hasta la mitad del necesario, para producir la falla en aire seco, Publicaciones UDLAP [2012].

Los métodos para evitar la corrosión por fatiga, necesitan prevenir la fractura producida por ésta desde el principio, ya que es muy difícil detener la propagación de las fracturas, una vez que se inician.

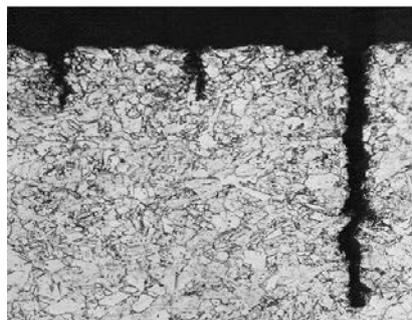


Figura 10. Ejemplo corrosión por fatiga, Cimsa [2.006]

3.1.2 Elección de la corrosión a analizar

De las distintas formas de oxidación, se ve la necesidad de reconocer en primer lugar, las diferentes formas en las que se presenta la corrosión para así tomar medidas pertinentes que permitan establecer los métodos correctivos para atenuarla, los cuales son mejor comprendidos si se conoce la teoría de la corrosión.

En esta tesis se estudia la corrosión generalizada, para incluir todas las corrosiones. Se observa que principalmente predomina la corrosión por picadura por ello se realiza el modelo de la oxidación por picadura debido a los siguientes fundamentos:

- La corrosión por picaduras es uno de los tipos de corrosión localizada más comunes y peligrosas, de entre aquellos que se dan en medios acuosos.
- La corrosión por picaduras se caracteriza por un ataque corrosivo extremadamente localizado.
- La corrosión por picaduras se presenta en los metales y aleaciones más comúnmente utilizados. El acero se corroe con formación de picaduras superficiales, en tanto que los aceros inoxidables en agua presentan picaduras profundas, el aluminio tiende a picarse en disoluciones acuosas con cloruros.

La corrosión por picaduras constituye un tipo de daño especialmente grave, a causa de la rapidez con la que puede llegar a provocar la perforación de la sección metálica afectada en la zona correspondiente del casco.

Se han desarrollado varios modelos para el análisis de la corrosión por CO_2 , estos modelos de predicción se pueden clasificar en tres categorías: mecanicista, semi-empírico y empírico. El modelo mecanicista será el propuesto para diseñar el software debido a que este modelo nos indica los diferentes procesos electroquímicos que se desarrollan en la interface metal-líquido en ausencia de películas protectoras.

3.2 Efecto de las variables ambientales

La corrosión implica la interacción entre un metal o aleación y el ambiente que lo rodea. Las variables ambientales más importantes por las que la corrosión se ve afectada son, ASM [1992]:

➤ **El efecto del pH (acidez)**

El concepto del pH está relacionado con la concentración de hidrógeno o cantidad de ácido. La importancia del ion hidrógeno recae en su capacidad para interactuar con la superficie del metal o aleación. Muchas aleaciones de interés comercial forman una capa oxidada que contiene especies del tipo hidróxido cuando se encuentran en presencia de agua. Esta estructura tiende a tener dependencia de la concentración del ion hidrógeno, posiblemente a través de una reacción del tipo, Molina, L. [2011]:



En el caso del acero, la velocidad de corrosión es elevada a pH muy bajo, es independiente del pH en un rango de pH neutro, decrece con el aumento del pH, y finalmente se incrementa nuevamente a pH muy elevado.

➤ **La fuerza oxidante (potencial)**

El potencial se relaciona con la capacidad para añadir o retirar electrones del metal en reducir u oxidar su superficie. Algunas aplicaciones prácticas incluyen el incremento de la pasividad alterando la superficie oxidada (protección anódica); o la prevención de la corrosión con la provisión de electrones al metal que está afectado por la corrosión (protección catódica).

➤ **La temperatura** (transferencia de calor)

La temperatura puede afectar a la corrosión de diversas maneras. Si la velocidad de corrosión está gobernada completamente por el proceso elemental de la oxidación del metal, la velocidad de corrosión crece exponencialmente con un incremento de la temperatura. La relación queda reflejada en la siguiente expresión de Arrhenius, Molina, L. [2011]:

$$r = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde r es la velocidad de corrosión, A es un factor pre-exponencial, E es la energía de activación, R es la constante de los gases, y T es la temperatura absoluta.

➤ **La concentración** (constituyentes en disolución)

La concentración de distintos constituyentes puede influenciar en el comportamiento de la corrosión. La presencia de cloruros aumenta la velocidad de corrosión de forma proporcional a su concentración, mientras los bromuros y yoduros pueden inhibir la corrosión.

➤ **Los organismos biológicos**

Los organismos biológicos se encuentran presentes en todos los ambientes acuosos naturales. La tendencia de estos organismos es atacar y crecer en la superficie del material, dando lugar a la formación de películas biológicas. Estas películas influyen en la corrosión de los metales ya que los organismos tienen la capacidad de modificar las variables ambientales dando como resultado el inicio de la corrosión bajo condiciones en las que no se hubieran iniciado, sin la presencia de la película, ASM [1992].

3.2.1 Rangos de temperatura

En los océanos hay una capa superficial de agua templada (12º a 30ºC), que llega hasta una profundidad variable según las zonas, de entre unas decenas y 400 o 500 metros. Por debajo de esta capa el agua está fría con temperaturas de entre 5º y -1ºC. Al límite entre estas dos capas se lo conoce como termoclina.

El Mediterráneo supone una excepción a esta distribución de temperaturas porque sus aguas profundas se encuentran a unos 13ºC. La causa hay que buscarla en que está casi aislado al comunicar con el Atlántico sólo por el estrecho de Gibraltar motivo por el que se acaba calentando todo la masa de agua.

A continuación, se representan las diferentes temperaturas del mar Mediterráneo a lo largo de lo año 2014. Estas muestras han sido tomadas en las zonas costeras próximas a Barcelona siendo representativas de la costa Española.

MESES DEL 2014	PROFUNDIDAD			
	0 M	-20 M	-50 M	-80 M
ENERO	14 °C	14 °C	14 °C	13,9 °C
FEBRERO	12,8 °C	12,7 °C	12,6 °C	12,4 °C
MARZO	13,2 °C	12,9 °C	12,8 °C	12,6 °C
ABRIL	14,1 °C	13,9 °C	13,5 °C	13,3 °C
MAYO	16,4 °C	15,2 °C	14,4 °C	13,7 °C
JUNIO	20 °C	18 °C	14,4 °C	13,5 °C
JULIO	21,5 °C	20,2 °C	15,7 °C	13,5 °C
AGOSTO	23,9 °C	21,6 °C	15,1 °C	13,7 °C
SEPTIEMBRE	20,3 °C	19,7 °C	17,4 °C	13,9 °C
OCTUBRE	18,9 °C	18,6 °C	27,7 °C	14,8 °C
NOVIEMBRE	16,1 °C	16,1 °C	16 °C	15,8 °C
DICIEMBRE	14,2 °C	14,2 °C	14,1 °C	13,9 °C
MEDIA ANUAL	17,1 °C	16,4 °C	14,8 °C	13,8 °C

Tabla 2. Temperatura del mar Mediterráneo en función de la profundidad, AEMET [2014]

Las temperaturas representativas para utilizar en el desarrollo matemático serán aquellas con una cierta profundidad debido a que el casco del buque está sumergido. No obstante, dicho calado no tiene un exceso de profundidad, por esta razón se consideran más apropiadas las muestras obtenidas a cero metros de profundidad.

De modo que la temperatura relativa del mar Mediterráneo es de $17,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la mínima se produce en febrero y la máxima en agosto, como se pueden ver representados en las siguientes ilustraciones.

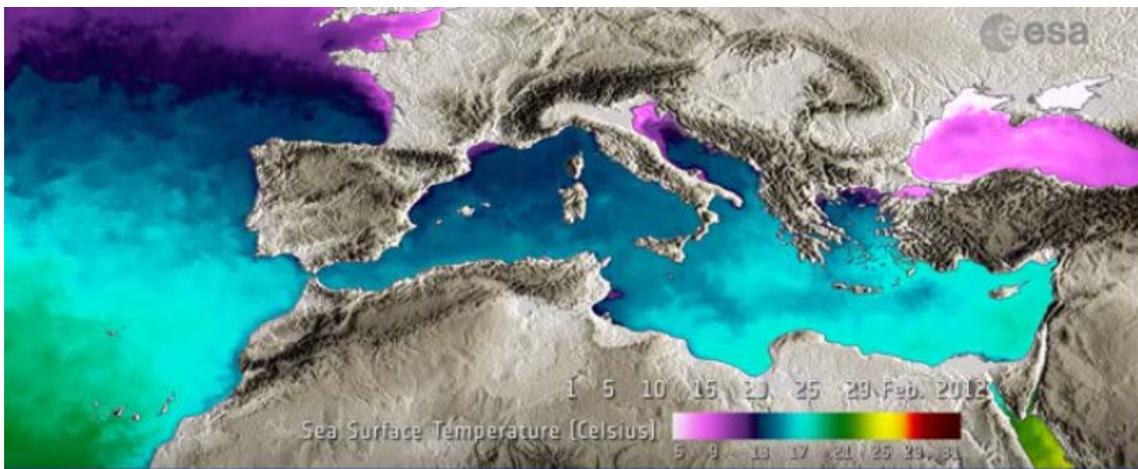


Figura 11. Temperatura del mar Mediterráneo en el mes de Febrero, Agencia Estatal de Meteorología [2012]

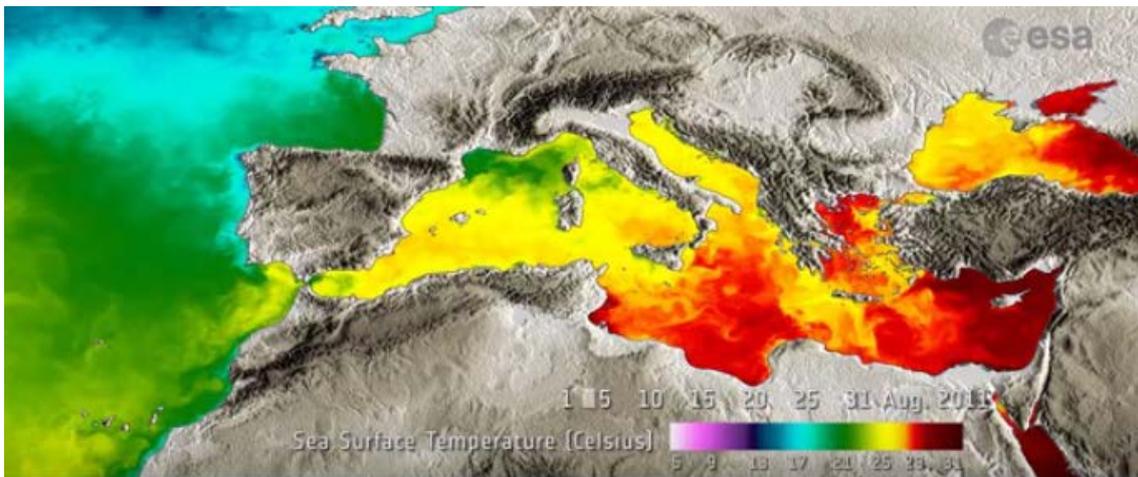


Figura 12. Temperatura del mar Mediterráneo en el mes de Agosto, Agencia Estatal de Meteorología [2012]

3.2.2 Propiedades del agua de mar

El agua de mar o agua salada es una solución hecha o basada en agua que compone los océanos y mares de la Tierra. Es salada por la concentración de sales minerales disueltas que contiene.

La composición del agua del mar varía según su origen o según las características marinas, siendo de mayor concentración de sales en lugares cálidos con poca renovación de agua como es el caso del Mediterráneo, y en menor en lugares semicerrados con abundantes aportes continentales como el mar Báltico.

La siguiente tabla, resume las concentraciones medias de los constituyentes químicos mayoritarios del agua marina, comprobándose que se trata de una solución con una gran cantidad de sales disueltas, pero muy pobre en nutrientes (nitrógeno, fósforo y carbono).

PARÁMETROS	INTERVALOS DE REFERENCIA	PARÁMETROS	INTERVALOS DE REFERENCIA
TEMPERATURA	15 – 35 °C	BORO	4 – 6 mg/L
PH	7,9 – 8,1	AMONIO	0,005 – 0,05 mg/L
SALES DISUELTAS	30.000 – 45.000 mg/L	SODIO	11.800 mg/L
CONDUCTIVIDAD	44.000 – 58.000 $\mu\text{s/cm}$	POTASIO	463 mg/L
BICARBONATOS	120 – 170 mg/L	CALCIO	423 mg/L
SULFATOS	2.950 mg/L	MAGNESIO	1.403 mg/L
CLORUROS	21.200 mg/L	ESTRONCIO	12 – 14 mg/L
BROMUROS	155 mg/L	SÍLICE	0.01 – 7,4 mg/L
NITRATOS	0,001 – 4 mg/L	CARBONO ORG.	1,2 – 3 mg/L
FLUORUROS	1 mg/L	NITRÓGENO ORG.	0,005 – 0,03 mg/L

Tabla 3. Composición típica del agua de mar Mediterráneo, Consultora de Aguas [2015]

Debido a procesos químicos reguladores por su estructura molecular, el agua de mar posee poder de disolución de las sustancias iónicas, los principales elementos se mantienen en proporciones constantes (intercambio de cationes y aniones). Así, la composición química del agua de mar es constante debido a:

- Factores de solubilidad que hacen precipitar algunas sales que aparecen en exceso y las incorporan a los sedimentos.
- A la circulación general de las masas de agua oceánicas ya que este fenómeno continuo en el tiempo y en el espacio, asegura una agitación y mezcla constante del agua.
- La actividad biológica de seres vivos que fijan selectivamente ciertas sales solubles (particularmente carbonatos y silicatos) y las transforman en sales insolubles (como parte de sus cuerpos, conchas) y que a su muerte, se incorporan a los sedimentos.

Desde el punto de vista físico, la principal consecuencia de la presencia de sales disueltas en el agua de mar es el descenso del punto de congelación. Para $35^{\circ}/\infty$ de salinidad el agua de mar tiene un punto de congelación de -1.91°C .

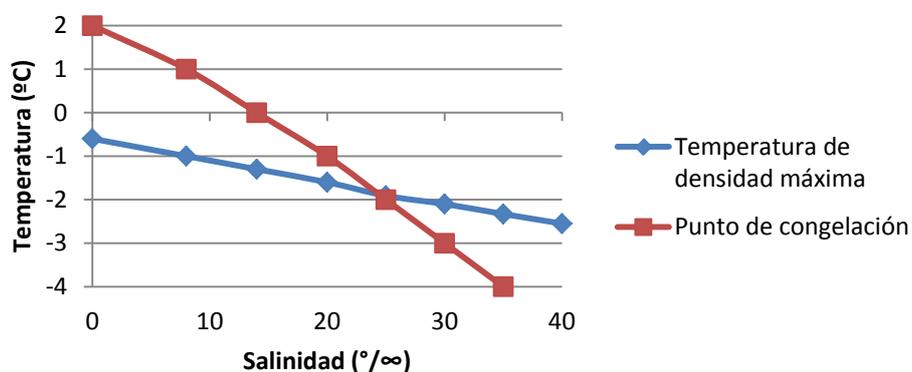


Gráfico 1. Relación temperatura - salinidad para punto de congelación, Pontificia Universidad Católica de Chile [2012]

3.3 Fundamentos teóricos de la rugosidad

El casco de las embarcaciones de acero es el que más se deteriora con el tiempo. Aunque la rugosidad del casco de las embarcaciones de madera e incluso hasta cierto punto las de fibra de vidrio aumenta con el tiempo, principalmente por daño físico y acumulación de pintura deteriorada. El efecto es más importante en los cascos de acero porque se ven afectados por la corrosión.

La rugosidad inherente al buque recién construido tiene un valor permanente y constante y por tanto debe añadirse a la resistencia viscosa más la de formación de olas correspondiente a la carena lisa.

Esta corrección suele incluirse, como un coeficiente aditivo, al calcular el coeficiente de resistencia del buque, en forma del llamado coeficiente de correlación o coeficiente incremental de resistencia por rugosidad, que se denomina C_A o ΔC_F .

Este coeficiente engloba, además del efecto de la rugosidad, otros efectos de escala que aparecen, y por lo tanto se trata de un coeficiente que engloba los errores cometidos y no controlados. Su valor se obtiene a partir del análisis de los resultados de las pruebas de mar realizadas con el buque y su comparación con las predicciones realizadas a partir de los ensayos con modelos.

Pasado un cierto periodo de tiempo, después de salir el buque recién pintado, la protección de la pintura va debilitándose y, a partir de un cierto momento, empieza a aumentar la rugosidad del casco, debido a la fijación en él de distintos organismos, primero microscópicos y luego perfectamente visibles como algas, moluscos, etc. Si el proceso continúa sin que se le ponga freno, llegará la corrosión del acero que afectará de una forma permanente a la rugosidad del casco, con lo que se producirá un notable incremento de la resistencia de fricción del buque.

La velocidad con la que se produce esta adherencia de organismos y, por lo tanto, el aumento de rugosidad del casco depende, principalmente, de la falta de mantenimiento de la carena que hace aumentar la resistencia de fricción.

Si hay alguna circunstancia que influye en gran medida sobre la resistencia hidrodinámica, esta es la suciedad del casco. Una embarcación tiene que entrar periódicamente en dique seco o varadero para efectuar la limpieza del casco.

Esta resistencia puede llegar a reducir una décima parte la velocidad del buque al año de haberse carenado.

A continuación, se enumeran los principales factores que determinan la rugosidad del casco:

- Corrosión de las superficies de acero, causado por:
 - Fallas de los sistemas de protección catódica.
 - Pinturas antiincrustantes inadecuadas o deterioradas.

- Mal acabado de la pintura, producido por:
 - Una limpieza insuficiente del casco antes de la aplicación.
 - Una aplicación deficiente.
 - Condiciones meteorológicas adversas en el momento de la aplicación.

- Separación de la pintura, debido por:
 - Acumulación de antiincrustante viejo.
 - Mala calidad de la pintura.
 - Mala preparación de la superficie antes de aplicar la pintura.

- Daño mecánico de la superficie del casco ocasionado por los amarres, el roce de los cabos, las encalladuras, los desembarques o por contacto del hielo.

3.3.1 Tipos de rugosidad

La rugosidad se puede clasificar de distintos procedimientos como los parámetros de las medidas de rugosidad, las irregularidades de la superficie, clase de la naturaleza de la pared, no obstante, se establece la clasificación como una componente de la resistencia en el medio marino.

- **Rugosidad inherente al buque recién construido.** Debida entre otras causas a:
 - Rugosidad debida a la propia disposición estructural del buque, soldaduras, remaches, rejillas de las tomas de mar, ánodos de sacrificio y otros cuerpos asociados al casco.
 - Rugosidad propia del material del casco: chapa de acero laminada, madera, fibra de vidrio, materiales compuestos.
 - Rugosidad de la pintura de protección: pintura anticorrosiva o antiincrustante.

- **Rugosidad adquirida a lo largo de la vida del buque.** Debida por estas causas:
 - Corrosión en el casco de acero.
 - Deterioro de la chapa de pintura.
 - Deformaciones locales del casco.
 - Incrustaciones biológicas del casco de origen animal o vegetal.



Figura 13. Rugosidad adquirida a lo largo de la vida del buque, Civantos, D. [2011]

3.3.2 Procedimiento para evaluar la rugosidad del casco

El procedimiento que se ha utilizado con mayor profusión hasta el momento presente fue ideado por la BSRA, hace aproximadamente treinta años.

Dicho procedimiento se caracteriza por adoptar como parámetro representativo de la rugosidad de una cierta zona de la superficie del casco, la diferencia valorada en micras entre los desplazamientos máximo y mínimo con respecto a la superficie del casco que experimenta una bola de acero de 1.56 mm de diámetro, cuando se la obliga a seguir una trayectoria rectilínea de 50 mm de longitud.

Dicha bola de acero pertenece a un instrumento que se llama rugosímetro. Dicho aparato se construye en la actualidad de manera un tanto diferente a cuando se concibió, de forma que su manejo y los resultados y la obtención y análisis de los resultados de las mediciones sean prácticamente automáticos.

Para definir la rugosidad del casco, éste se suele subdividir entre 80 y 150 zonas diferentes. En cada una de estas zonas se debe medir la rugosidad en por lo menos 12 tramos de 50 mm cada uno.

El valor medio obtenido de la muestra de los 12 o más tramos pertenecientes a una misma región se denomina MHR (rugosidad media del casco en la región estudiada).

El promedio de los valores (MHR) de todas las zonas analizadas se denomina AHR. El valor de AHR correspondiente a un buque recién construido, de excelente calidad de pintura, puede ser próximo a 100 μm , mientras que su valor normal suele estar próximo a 130 μm .

3.3.2.1 Variación de la rugosidad con el tiempo

La rugosidad media del casco depende en tanto de la pintura y rugosidad adicional debido a incrustaciones (fouling). Un casco con problemas severos de incrustaciones puede requerir hasta el doble de la potencia que un casco de superficie lisa.

Pinturas basadas en siliconas crean una superficie no adherente de un modo similar a las conocidas ollas de Teflón.

Una superficie lisa, además de prevenir efectivamente el fouling, puede resultar en un ahorro significativo de combustible, hasta un 6% de ahorro según los estudios por algunas compañías navieras. Una rugosidad media del casco de $65 \mu\text{m}$ es muy bueno, $150 \mu\text{m}$ normal, y mayor de $200 \mu\text{m}$ deficiente.

Si se supone que la pintura antiincrustante es la convencional, se puede suponer que el incremento medio de la rugosidad entre varadas oscila entre $30 \mu\text{m/año}$ y $60 \mu\text{m/año}$.

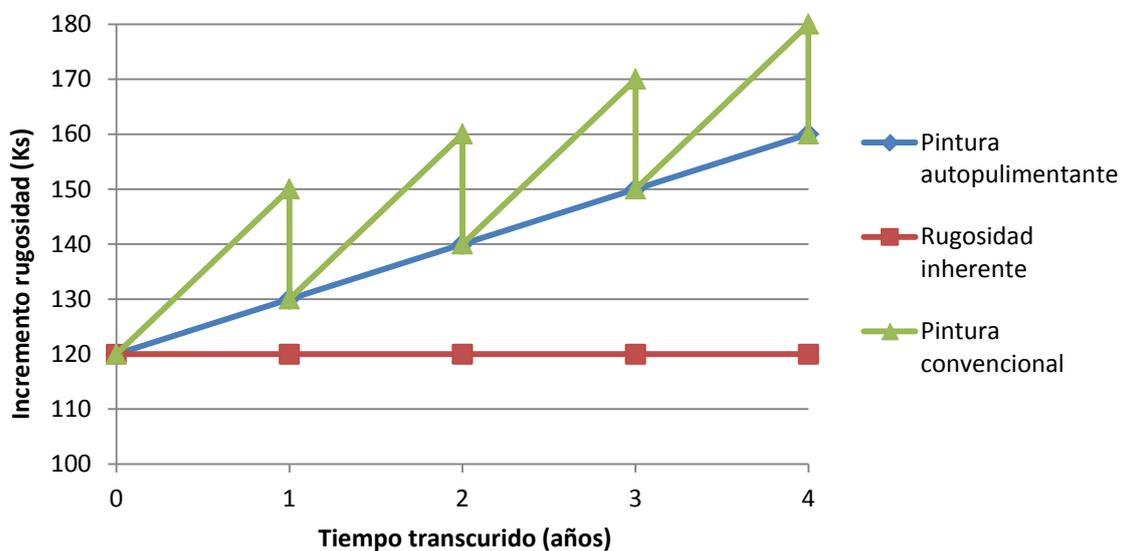


Gráfico 2. Variación de rugosidad con el tiempo, Alonso, B. [2012]

Tratándose de pinturas autopulimentantes se puede suponer que dicho incremento es nulo. El incremento de rugosidad progresivo se puede suponer en ambos casos lineal con una ordenada en el origen de $120 \mu\text{m}$ y una pendiente de $10 \mu\text{m/año}$.

3.3.3 Protección contra la rugosidad adquirida

La búsqueda de nuevos antiincrustantes inocuos para el medio ambiente ha dado su fruto con el desarrollo de recubrimientos cuyas formulaciones no contienen ningún tipo de biocida transferible al mar al mismo tiempo que no interaccionan químicamente con él, es decir no están sometidos a consumo por hidrólisis o pulimentación.

Su principio de actuación está basado en la baja tensión superficial de las siliconas, componente principal de estos recubrimientos, que impide un anclaje efectivo de la incrustación de tal forma que ésta se libera por el rozamiento provocado por el avance del buque. Una mayor velocidad de avance dará como resultado una más fácil liberación de la incrustación.

Los avances más recientes en tecnología sobre recubrimientos no han supuesto cambios radicales, pero han mejorado considerablemente las propiedades de los ya existentes.

Para disminuir el efecto de la rugosidad adquirida suelen seguirse los siguientes procedimientos:

- Utilización de una adecuada protección de la chapa para evitar la corrosión utilizando una eficaz protección catódica por ánodos de sacrificio o corrientes impresas, y una eficiente pintura anticorrosiva.
- Utilización de una protección antiincrustante mediante la aplicación de una adecuada pintura antiincrustante. Estas pinturas están dotadas de sustancias tóxicas que actúan sobre los organismos marinos.

Podemos distinguir tres tipos de pinturas antiincrustantes, Alonso [2012]:

➤ **Pinturas convencionales.**

Son poco solubles en el agua salada. Tienen una estructura esponjosa, a través de la cual progresan los elementos tóxicos hasta la superficie en contacto con el agua. La parte tóxica termina por bloquear los caminos perdiendo su eficacia. Una vez extinguida su capacidad antiincrustante deben ser eliminadas del casco. Su único atractivo consiste en su bajo coste.

➤ **Pinturas tradicionales de alta calidad.**

Se caracterizan por tener componentes que le proporcionan una estructura insoluble. Permiten el recurso de aplicarlas en capas más gruesas de lo normal para posteriormente eliminar la subcapa extinguida mediante una limpieza submarina. La vida de las pinturas suelen oscilar de 16 a 24 meses, dependiendo de la explotación del buque.

➤ **Pinturas autopulimentantes.**

Este tipo de pinturas se caracteriza porque la componente que sirve de soporte a la capa de pintura reacciona químicamente con la componente bioactiva, con lo que se produce un desgaste progresivo y simultáneo de ambas componentes por la erosión progresiva producida por el movimiento relativo del agua. De este modo se consigue que posea una superficie en contacto con el agua, que prácticamente mantenga las propiedades que tenía la superficie primitiva. La vida de una capa de estas pinturas puede oscilar entre dos y tres años.

Las características de durabilidad, flexibilidad y resistencia frente a la abrasión de estas pinturas y la ausencia de biocidas proporcionarán ahorros en las entradas en dique ya que el tratamiento de residuos y de las aguas de lavado del casco será más barato y sencillo compensando su mayor coste inicial y sus requisitos de aplicación.

3.4 Fundamentos teóricos de la resistencia al avance

Uno de los problemas más importantes que se presenta en el proyecto de un buque es la determinación de la potencia de la maquinaria propulsora y de las características del propulsor para que el buque navegue a una determinada velocidad. Este problema es estudiado por la hidrodinámica del buque a través de dos de sus ramas: la resistencia y la propulsión; la primera estudia la resistencia que experimenta la carena de un buque al moverse en el agua y la segunda el comportamiento de una hélice funcionando a popa de un buque.

A pesar de los avances experimentados en la hidrodinámica en los últimos tiempos, en la actualidad, y en el estado actual de los conocimientos sobre el tema, es absolutamente imposible predecir por medios exclusivamente teóricos, y con un mediano grado de aproximación, la resistencia al avance de la carena de un buque y el comportamiento de una hélice funcionando a popa del mismo. La forma más correcta consiste en recurrir a la experimentación con modelos físicos.

La experimentación en hidrodinámica del buque consiste en construir unos modelos de la carena y de la hélice a escala reducida y realizar con ellos una serie de ensayos en unas instalaciones denominadas canales de experiencias hidrodinámicas en los que se miden un conjunto de magnitudes físicas (resistencia al avance de la carena, par, empuje y revoluciones de la hélice, etc.) extrapoliéndolas después al campo del buque.

En las etapas iniciales del proyecto se suele recurrir a métodos analíticos para hacer las primeras aproximaciones de la resistencia al avance. Estos métodos analíticos se dividen en dos grupos: series sistemáticas de formas y métodos numéricos estadísticos.

Por tanto, es necesario saber que se entiende por resistencia al avance, las distintas partes en que puede dividirse y las variables de las que depende.

Cuando un buque se desplaza, con un movimiento de traslación uniforme, en aguas tranquilas, está sometido a una resistencia al avance.

Se llama resistencia al avance de un buque, a una determinada velocidad, a la fuerza necesaria para remolcar al buque a esa velocidad en aguas tranquilas, suponiendo que no existe interferencia con el buque remolcador.

La potencia necesaria para vencer esta resistencia se llama potencia de remolque o potencia efectiva (EHP = Effective Horse Power), Alonso [2012]. Su expresión es:

$$EHP = \frac{R_T \cdot V}{75} \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:

- R_T → resistencia al avance.
- V → velocidad del buque.

Dependiendo del modo de calcular la resistencia de remolque, ésta deberá ser eventualmente corregida para tener en cuenta:

- La rugosidad de la carena.
- La resistencia aerodinámica de la obra muerta.
- La resistencia hidrodinámica de los apéndices.
- El estado de la mar.
- La profundidad del agua.

3.4.1 Las componentes de la resistencia

La resistencia al avance puede descomponerse de diversas formas, la descomposición es modificada, con mayor o menor acierto, ya que cada autor tiene descomposiciones distintas. De modo que la resistencia total de un buque se divide en diferentes partidas que se integran de manera aditiva.

Hace algo más de un siglo W. Froude supuso que la resistencia de un buque estaba compuesta por dos partes separadas e independientes:

- **Resistencia de fricción**, igual a la resistencia de una placa plana equivalente de la misma longitud y superficie mojada que el buque.
- **Resistencia residuo**, igual a la diferencia entre la resistencia total y la resistencia de fricción

Posteriormente se ha ido separando la resistencia residuo en sus componentes y aun cuando estas componentes se influyen entre sí de un modo muy complicado, así pues, se puede considerar la resistencia total compuesta por los términos siguientes:

- **Resistencia de fricción**, debida al movimiento del casco en un fluido viscoso y que hace que las partículas de agua sean aceleradas tangencialmente a la superficie del cuerpo. Esta resistencia coincide con la del mismo nombre descrita anteriormente.
- **Resistencia por formación de olas**, debida a la energía que ha de ser suministrada por el sistema de olas creado en la superficie del agua. Esta energía se emplea en acelerar las partículas de agua verticalmente contra la acción de la gravedad.
- **Resistencia de forma**, es generalmente muy pequeña y se agrupa con la resistencia por formación de olas para formar la resistencia residuo.

La resistencia de forma está compuesta a su vez por:

- ✓ La originada por no ser el buque una placa plana, sino que tiene curvatura transversal y longitudinal. Corresponde a la energía gastada en acelerar lateralmente las partículas de agua.
- ✓ La resistencia de presión de origen viscoso debida a la alteración del campo de presiones producido por la capa límite, y al desprendimiento de ésta, caso de presentarse este fenómeno.

A la suma de la resistencia de fricción y la resistencia de forma se la conoce con el nombre de resistencia viscosa.

Existe aún otra forma de descomponer la resistencia total de un buque basándonos en lo siguiente; la resistencia total es la integración sobre la superficie mojada del casco de las fuerzas que el fluido ejerce sobre cada elemento de superficie; como el fluido tiene densidad y viscosidad, las fuerzas elementales se pueden descomponer en sus componentes normal y tangencial al elemento de superficie del casco, con lo que se puede descomponer la resistencia total en dos partes:

- **Resistencia de presión**, la que se obtiene por la integración de las componentes normales.
- **Resistencia de fricción**, la que se obtiene por la integración de las componentes tangenciales. Esta componente no coincide con la del mismo nombre reseñada anteriormente, pues aquí se tiene en cuenta el efecto de la curvatura del casco.

3.4.2 Procedimiento para evaluar la resistencia mediante coeficientes

Para calcular la resistencia de fricción de un buque, Froude arrastró una placa plana sumergida totalmente en un canal de experiencias. Observando que la resistencia total de un buque era distinta a la resistencia de fricción de dicha placa plana le añadió una partida más, la resistencia residual. Dicha resistencia se debe a que el buque no es una placa plana, pues tiene unas formas no planas y produce olas a su paso por el agua.

Lo que al final W. Froude propuso es el cálculo de la resistencia al avance mediante los coeficientes adimensionales.

$$C_T = C_V(Rn) + C_R(Fn) = C_f(Rn) + C_w(Fn) + C_{form}(Fn)^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

La hipótesis de Froude incorpora un notable error, una parte de la resistencia residual depende realmente de Rn en lugar de hacerlo únicamente de Fn . Entonces Hughes, hizo la siguiente descomposición basada en la de Froude.

$$C_T = C_V(Rn) + C_R(Fn) = C_f(Rn) + C_w(Fn) + C_{form}(Rn) \quad (\text{Ec. 5})$$

Finalmente Hughes rectifica la anterior ecuación, en que las partidas de los coeficientes adimensionales de forma dependen del parámetro de Reynolds.

$$C_T = C_V(Rn) + C_R(Fn) = r \cdot C_f(Rn) + C_w(Fn) = (1 + k) \cdot C_f(Rn) + C_w(Fn) \quad (\text{Ec. 6})$$

El problema de dicha suposición es que el factor de formas (r) es distinto para el buque que para el modelo. En el modelo el factor de formas, es fácilmente calculable, pero imposible el del buque de forma preliminar.

El coeficiente (r) representa el aumento de resistencia viscosa debido a que el buque no es una placa plana. Su valor siempre será mayor que 1.

El método de Froude ha sido usado durante muchas décadas aun llevar un error inherente, que con una adecuada elección de un coeficiente C_A donde se pueden obtener valores correctos de la resistencia al avance del buque real. Además este coeficiente incluye otras componentes de menor cuantía como la rugosidad del casco, influencia de pequeñas olas, viento asociado al buque, efecto del timón, etc.

Al final, Hughes hace la suposición que (r) es constante y asegura que aunque esto es una imprecisión el error cometido es menor que con Froude. Finalmente con Hughes se obtiene el coeficiente de resistencia al avance total:

$$C_{T_B} = C_{T_M} + r \cdot (C_{F_B} - C_{F_M}) + \Delta C_F \quad (\text{Ec. 7})$$

Es muy importante tener en cuenta que el coeficiente de forma del buque que más influye en la resistencia viscosa es el coeficiente prismático (C_p). A medida que aumenta, más llenas son las formas del casco y en particular las de popa, influyendo en el aumento de resistencia de presión por fricción.

A su vez el coeficiente de resistencia al avance total, se puede descomponer de la siguiente manera.

$$C_{T_B} = C_{R_B} + C_{F_B} \cdot (r) + \Delta C_F = C_{R_B} + C_{F_B} \cdot (1 + k) + \Delta C_F \quad (\text{Ec. 8})$$

Dónde:

- C_{R_B} → coeficiente adimensional de resistencia residual del barco.
- C_{F_B} → coeficiente adimensional de resistencia de fricción del barco.
- k → factor de forma obtenido habitualmente por el método de Prohaska.
- ΔC_F → coeficiente adimensional de resistencia de rugosidad del barco.

3.4.3 Variables de las que depende la resistencia

La resistencia al avance de un buque, que en lo sucesivo se llamará simplemente resistencia, depende, principalmente: de las formas de la carena, de las propiedades del fluido, del campo gravitatorio y de la velocidad de avance. Las formas de la carena se definen a través de una serie de parámetros y relaciones, de las cuales se considera que son de mayor influencia, Alonso [2012]:

- Relación eslora-manga (L/B) y manga-calado (B/T).
- Forma de la cuaderna maestra determinada por el coeficiente de la maestra (C_M).
- Distribución del volumen de carena a lo largo de la eslora, que suele representarse a través de la curva de área de secciones. De esta curva se deducen el volumen de carena, el coeficiente de bloque, el coeficiente prismático y la posición longitudinal del centro de carena.

Las propiedades del fluido a estos efectos son:

- Densidad (ρ).
- Viscosidad cinemática (ν).

Existen otras variables secundarias como el caso de la capilaridad, que no se consideran, pues para el agua sus efectos son despreciables a las velocidades normales en este campo.

Por último la influencia del campo gravitatorio viene representada por la fuerza de la gravedad y está representada por la aceleración de la gravedad (g).

4. Metodología

En este apartado, se desarrollan de manera detallada todas las expresiones matemáticas desde la aparición corrosión por picadura, desglosando las diferentes ecuaciones para obtener la velocidad de corrosión y extraer la relación con la rugosidad para operar la pérdida de potencia ocasionada por dicho efecto.

De este modo, se procede a desglosar las distintas ecuaciones de manera cronológica para posteriormente desarrollar el software en código C++ y Matlab.

4.1 Ecuaciones de condiciones iniciales de la oxidación por picadura

Se han desarrollado varios modelos para el análisis de la corrosión por picadura, estos modelos de predicción se pueden clasificar en tres categorías: mecanicista, semi-empírico y empírico. Solo algunos de los modelos más recientes se han basado en una descripción mecanicista de los procesos subyacentes de la corrosión por picadura, como Sharland y Tasker [1988], Sharland [1988], Walton [1990] y Engelhard [2008].

Este tipo de modelo describe ampliamente los procesos electroquímicos que ocurren en la interfase metal-líquido en ausencia de películas protectoras. El efecto de estas capas supone una ralentización de los procesos de transporte y químicos en la capa límite. El ambiente químico dentro de una cavidad donde tiene lugar la corrosión localizada es a menudo muy diferente del que se produce en el exterior de la misma.

El objetivo común de los modelos mecanicistas es expresar las concentraciones de especies en la solución atrapada en la cavidad como función de los parámetros físicos y químicos del sistema, tales como las dimensiones de la grieta, la composición en el seno de la disolución, las velocidades de las reacciones electroquímicas, la migración de los iones y gradientes de potencial, y el efecto de la forma y dimensión de la grieta.

A su vez la velocidad de las reacciones electroquímicas depende de parámetros tales como el potencial electrostático y el pH de la solución.

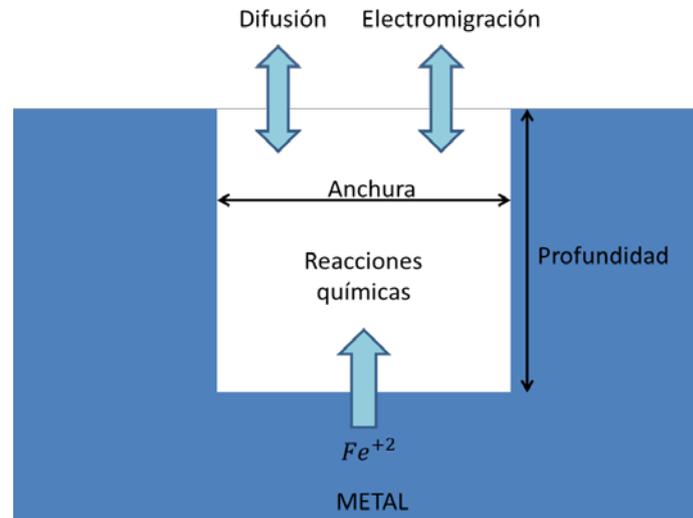


Figura 14. Esquema del proceso de corrosión por picadura

La corrosión se subdivide en procesos electroquímicos, reacciones químicas, flujo, difusión y electromigración. A continuación se muestran las reacciones electroquímicas junto las respectivas ecuaciones de las reacciones, ASM [1992]:

- Oxidación del F_e



- Reducción del H^+



- Reducción del oxígeno



- Reducción del H_2O



El proceso de transferencia es de tipo mixto. Para las especies donde se produce la reducción, especies catódicas, la densidad de corriente, j_c , la densidad de corriente límite por la ecuación, $j_{c\lim}$, y la densidad de corriente de transferencia de carga pura, $j_{c_{tc}}$, son representadas mediante las siguientes ecuaciones, Costa [1981].

$$\frac{1}{j_c} = \frac{1}{j_{c\lim}} + \frac{1}{j_{c_{tc}}} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$j_{c\lim} = -n_j F D^{m \frac{c_j}{\delta}} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$j \approx j_c = -j_0 \left[e^{\frac{-(1-\alpha)nF\eta}{RT}} \right] \quad (\text{Ec. 15})$$

Mientras que para la especie donde se produce la oxidación, especie anódica, la densidad de corriente, j_a , la densidad de corriente límite, $j_{a\lim}$, y la densidad de corriente de transferencia de carga pura, $j_{a_{tc}}$, vienen representadas por dichas ecuaciones.

$$\frac{1}{j_a} = \frac{1}{j_{a\lim}} + \frac{1}{j_{a_{tc}}} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$j_{a\lim} = -n_j F D^{m \frac{c_j}{\delta}} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$j \approx j_a = -j_0 \left[e^{\frac{\alpha n F \eta}{RT}} \right] \quad (\text{Ec. 18})$$

El potencial de corrosión, potencial eléctrico en la interfase, E , se puede determinar a partir de la ecuación de equilibrio de carga en dicha interfase.

$$\sum j_c = \sum j_a \quad (\text{Ec. 19})$$

Debido a la dificultad experimental para obtener los parámetros necesarios en las ecuaciones anteriores, éstas se combinan y los parámetros se agrupan.

Finalmente, las especies catódicas y anódicas vienen definidas por las ecuaciones siguientes:

$$j_c = -j_0 \left[e^{\frac{-a_3(E_{met}-\varphi)}{RT}} \right] \quad (\text{Ec. 20})$$

$$j_a = -j_0 \left[e^{\frac{a_3(E_{met}-\varphi)}{RT}} \right] \quad (\text{Ec. 21})$$

$$j_0 = j_{0Ref} \cdot (C_{H^+})^{a_1} \cdot (C_{O_2})^{a_2} \quad (\text{Ec. 22})$$

Dónde:

- E_{met} → potencial en el metal lejos de la apertura de la cavidad.
- j_0 → densidad de corriente límite.
- a_x → parámetros experimentales.
- φ → potencial de corrosión o electrostático en el fondo de la grieta.
- T → temperatura.
- R → constante de los gases ideales.
- C → concentración indicada.

De modo que la densidad de la corriente tiene la función de medir el movimiento de las cargas de un material. Esta aumentará cuando lo hagan la velocidad de movimiento o las cargas.

Además, las reacciones electroquímicas constituyen las condiciones de contorno, y la resolución del proceso de transporte determina la concentración de estas especies en el interior de la picadura, lo que permite una predicción de la corrosión del hierro.

Según la ecuación (Ec. 24), las condiciones de contorno en la superficie del metal pueden ser convenientemente expresadas como velocidades en las cuales los electrones son consumidos o emitidos en términos de densidad de corriente, j , tal y como se expresa en la siguiente ecuación, ASM Handbook [2003]:

$$\phi_j = -D_j^{ef} \cdot \frac{\partial c_j}{\partial x} = \frac{1}{F} \cdot \frac{j_j \cdot a_j}{n_j} \quad (\text{Ec. 23})$$

Dónde:

- a_j → coeficiente estequiométrico de la semireacción.
- n_j → número de transferencia de carga.

En estado estacionario, el flujo asociado a la difusión molecular de cada especie electroactiva, ϕ_j^m , cerca de la interfase metal-líquido, va en sentido opuesto al gradiente de concentración y, si éste es débil, podrá aproximarse por el primer término de la serie de Taylor. Esta expresión constituye la primera ley de Fick, mediante la dependencia lineal, Sánchez Pérez [2012].

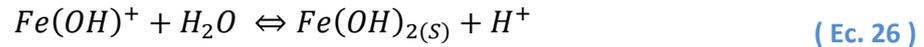
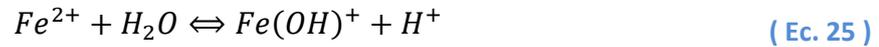
$$\phi_j^m = -D^m \left(\frac{\partial c_j}{\partial x} \right)_{x=0} \approx -D^m \frac{c_j - c_j(0)}{\delta} \quad (\text{Ec. 24})$$

Dónde:

- D^m → coeficiente de difusión molecular.
- c_j y $c_j(0)$ → concentraciones de la especie j en el seno de la disolución y en la interfase, respectivamente.
- δ → espesor de la capa porosa que las especies atraviesan por difusión.

Obviamente, el flujo de las especies no involucradas en la ecuación electroquímica y las velocidades netas de cambio en el seno de la disolución son cero, ya que están en equilibrio.

Las reacciones químicas principales que se producen en el seno de la disolución incluyen la hidrólisis del ión hierro (II), precipitación del hidróxido de hierro (II) y la disociación del agua. Las ecuaciones para las reacciones anteriores son:



La precipitación del hidróxido limita la concentración del hierro en la película y en la cavidad.

Suponiendo soluciones disueltas ideales, la velocidad de una reacción química homogénea se expresa de dicha manera:

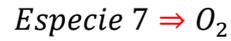
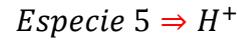
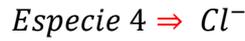
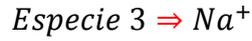
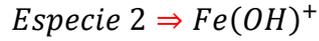
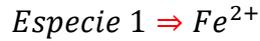
$$v = (-1)^p \cdot \frac{1}{a_j} \cdot \frac{dc_j}{dt} \Big|_{R \text{ química}} = k_f \prod_{i=1}^{n_r} c_{r,i} - k_b \prod_{i=1}^{n_p} c_{p,i} \quad (\text{Ec. 28})$$

Dónde:

- a_j → coeficiente estequiométrico para la especie j .
- k_f y k_b) → constantes de velocidad de la reacción directa e inversa.
- $c_{r,i}$ → concentración de la especie i de los reactivos.
- $c_{p,i}$ → concentración de la especie i de los productos.
- p → toma valor cero cuando la especie j es un producto, y la unidad cuando es reactivo.

La conductividad en el seno de la disolución puede ser controlada incluyendo iones sodio y cloruro. Además, debe tenerse en cuenta el oxígeno disuelto necesario en las reacciones electroquímicas.

Las diferentes especies pertenecientes a este proceso de corrosión son las siguientes:



Las especies 3,4 y 7 únicamente sufren procesos de difusión y electromigración pero no reaccionan químicamente. Para el resto de especies según la ecuación (Ec. 28), las velocidades netas de cambio de las concentraciones quedan definidas por las siguientes ecuaciones, Sánchez Pérez [2012]:

$$\frac{dc_{R,1}}{dt} = -k_{fhy} \cdot c_1 + k_{bhy} \cdot c_2 c_5 \quad (\text{Ec. 29})$$

$$\frac{dc_{R,2}}{dt} = k_{fhy} \cdot c_1 - k_{bhy} \cdot c_2 c_5 - k_{fpr} \cdot c_2 + k_{bpr} \cdot c_5 \quad (\text{Ec. 30})$$

$$\frac{dc_{R,5}}{dt} = k_{fhy} \cdot c_1 - k_{bhy} \cdot c_2 c_5 + k_{fpr} \cdot c_2 - k_{bpr} \cdot c_5 + k_{fw} - k_{bw} \cdot c_5 c_6 \quad (\text{Ec. 31})$$

$$\frac{dc_{R,6}}{dt} = k_{fw} - k_{bw} \cdot c_5 c_6 \quad (\text{Ec. 32})$$

En este proceso de corrosión, las reacciones químicas en el interior de la picadura se producen muy rápidamente, alcanzándose casi instantáneamente el estado de equilibrio. Esto dificulta la obtención de las constantes de velocidad de las reacciones anteriores.

Teniendo en cuenta que se alcanza rápidamente el estado de equilibrio, dichas ecuaciones pueden reescribirse de la siguiente forma, Sánchez Pérez [2012]:

$$\frac{d_{c_{R,1}}}{dt} \approx -k_{hy} \cdot c_1 + c_2 c_5 \quad (\text{Ec. 33})$$

$$\frac{d_{c_{R,2}}}{dt} = k_{hy} \cdot c_1 - c_2 c_5 - k_{pr} \cdot c_2 + c_5 \quad (\text{Ec. 34})$$

$$\frac{d_{c_{R,5}}}{dt} = k_{hy} \cdot c_1 - c_2 c_5 + k_{pr} \cdot c_2 - c_5 + k_w - c_5 c_6 \quad (\text{Ec. 35})$$

$$\frac{d_{c_{R,6}}}{dt} = k_w - c_5 c_6 \quad (\text{Ec. 36})$$

Donde las velocidades netas de cambio de las concentraciones de las especies quedan expresadas en función de sus constantes de equilibrio, K .

En un primer lugar todas las especies en contacto con la superficie metálica están en equilibrio químico, es decir, la velocidad neta de cambio de las concentraciones es nula. En el seno de la disolución se tiene como condición inicial y concentración de contorno concentraciones constantes.

La variación de las concentraciones en la interfase, gobernadas por las reacciones químicas mencionadas, también debe cumplir la ecuación de conservación de masa, que incluye el transporte de especies. Este proceso se puede considerar unidimensional.

La ecuación que describe el transporte de la especie j , incluyendo la contribución de las reacciones químicas y el efecto del potencial electrostático es la siguiente, donde el primer término representa la acumulación; el segundo el flujo neto, mientras que el último término representa la variación de la especie j debido a las reacciones químicas, Sharland y Tasker [1988].

$$\frac{\partial c_j}{\partial t} = wD_j^m \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial c_j}{\partial x} + \frac{nF}{RT} c_j \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + w \frac{dc_j}{dt} \Big|_{R \text{ química}} \quad (\text{Ec. 37})$$

Dónde:

- w → anchura de la picadura.
- D_j^m → coeficiente de difusión molecular.
- $c_{r,i}$ → coordenada espacial que representa la distancia desde el borde de la grieta.

A partir de la siguiente ecuación se obtiene el coeficiente de difusión molecular, D_j^m . Este valor se aproxima a partir de un valor de referencia obtenido a 25°C, $D_{j,ref}^m$. Esta aproximación tiene en cuenta la relación lineal de este coeficiente con la temperatura, T , con el producto de la viscosidad dinámica a la temperatura de referencia de 20°C, μ_{ref} , e inversa con la viscosidad dinámica, μ , Handbook of Chemistry and Physics [1995].

$$D_j^m = \frac{T}{293,15} \cdot \frac{\mu_{ref}}{\mu} \cdot D_{j,ref}^m \quad (\text{Ec. 38})$$

El potencial eléctrico en el interior de la cavidad puede ser calculado a través de la siguiente expresión, Nesic et Lee [2003].

$$\xi \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + F \sum_j n_j \cdot c_j = 0 \quad (\text{Ec. 39})$$

La constante dieléctrica del agua, ξ , se aproxima a partir de la función de la temperatura, T , y de cada uno de los coeficientes de ajuste, a_j , como se representa en la siguiente ecuación, Handbook of Chemistry and Physics [1995].

$$\xi = a_1 \cdot (a_2 + a_3 \cdot T + a_4 \cdot T^2) \quad (\text{Ec. 40})$$

A partir de la anterior ecuación se obtiene que la relación F/ξ es enorme. Según la ecuación del potencial eléctrico en el interior de la cavidad cualquier separación significativa de la carga, $\sum n_j \cdot c_j$, originaría una variación del gradiente de potencial apreciable, $d\phi/dx$, que es improbable. Por tanto, es frecuente aplicar la condición de electroneutralidad, de la ecuación siguiente:

$$\sum_j n_j \cdot c_j = 0 \quad (\text{Ec. 41})$$

En el caso del oxígeno, se supone que la densidad de flujo en un punto de la picadura es proporcional a la diferencia entre su concentración en el seno de la disolución, $c_{7,bulk}$, y su concentración en ese punto, c_7 . Así, en el caso del oxígeno la ecuación (Ec. 37), se reescribe de la siguiente forma:

$$\frac{\partial c_7}{\partial t} = wD_7^m \frac{\partial^2 c_7}{\partial x^2} + k_{perm}(c_{7,bulk} - c_7) \quad (\text{Ec. 42})$$

Dónde:

➤ k_{perm} → coeficiente de permeabilidad.

Una vez resueltas estas ecuaciones se obtiene la densidad de corriente del Fe^{2+} , que está relacionada con la velocidad de corrosión, CR, según la siguiente ecuación donde M_1 es la masa molecular del hierro.

$$CR = \frac{j_1 \cdot a_1 \cdot M_1}{n_1 \cdot F \cdot \rho_1} \quad (\text{Ec. 43})$$

4.2 Influencia de la corrosión sobre la morfología de la superficie

El comportamiento electroquímico o mecanoquímica de una superficie, tal como la corrosión o el desgaste corrosivo, es extremadamente complicado e implica diversos factores químicos, físicos y mecánicos, como se ha podido comprobar en el apartado anterior. Para obtener una visión exhaustiva sobre un fenómeno tan complejo, es necesario entender el papel de cada factor.

Por ejemplo, el desgaste de la superficie de un material depende en gran medida de las propiedades del material, fuerza externa, las condiciones de la superficie, y las condiciones ambientales, como la temperatura y la salinidad. La participación de diferentes parámetros hace que sea difícil investigar el mecanismo de desgaste. En particular, cuando un material se usa en un medio corrosivo, es decir, el desgaste corrosivo, el proceso de fallo se hace mucho más complicado. En tales casos, el efecto combinado de desgaste y la corrosión puede hacer que la pérdida de material total sea mucho mayor que el causado por la corrosión o desgaste solo.

Durante un proceso de corrosión, la pérdida de material se produce a través de reacciones electroquímicas en las superficies. Las reacciones electroquímicas localizadas pueden causar picaduras, corrosión intergranular e intragranular.

Desde el punto de vista de la termodinámica, el intercambio de electrones entre un metal y el medio ambiente constituye una corriente eléctrica en la superficie de metal. Es, por lo tanto, esencial para investigar la relación entre el comportamiento electrónico y el desgaste corrosivo a fin de comprender la sinergia de la corrosión y el desgaste. Como una característica fundamental de una superficie sólida, la función de trabajo de electrones (EWF) generalmente se refiere a la energía mínima requerida para quitar un electrón desde el interior de un sólido a una posición justo fuera de la sólida. El EWF de una superficie metálica refleja el nivel de energía electrónica y es, por tanto, relacionada con su potencial de electrodo.

El EWF puede determinarse utilizando una sonda de Kelvin, que se ha aplicado para estudiar la corrosión y el comportamiento electroquímico correspondiente de los metales. La sonda Kelvin también se utiliza para estudiar la cinética y el mecanismo de los procesos de delaminación de corrosión impulsada.

Recientemente, se han hecho intentos para investigar diversos comportamientos de material utilizando el método de sondeo Kelvin. Como un modo de desgaste complicado, el desgaste corrosivo implica tanto procesos mecánicos como químicos. En general, el uso de la fuerza sobre una superficie conduce a cambios en la rugosidad superficial y la deformación (distorsión de celosía y dislocaciones). Estos cambios podrían desempeñar un papel crucial en la determinación del comportamiento a la corrosión de la superficie y por lo tanto pueden acelerar el daño de desgaste a la superficie.

Es, por lo tanto, de importancia para el estudio de la interacción entre la corrosión y la deformación y para establecer relaciones entre comportamiento electrónico, la actividad química, la corrosión y la tensión, y morfología de la superficie para la comprensión a fondo del mecanismo responsable de desgaste corrosivo.

De modo que en este apartado se investiga usando un microscopio de fuerza atómica y una sonda de Kelvin de exploración para poder estudiar la influencia de la corrosión frente la morfología de la superficie, representada por la rugosidad, mientras que el comportamiento electrónico está representado por la función de trabajo de electrones (EWF).



Figura 15. Equipo de la sonda Kelvin, KP Technology [2005].

El principio de funcionamiento y el procedimiento experimental del sistema de SKP para medir EWF se describe en pocas palabras; el principio para este sistema Kelvin es exquisitamente simple.

La formación de un condensador para permitir la conducción electrónica y para detectar la transferencia de carga. En operaciones prácticas, el condensador Kelvin consta de las dos placas de cara a cara. Por vibrar una placa (punta de la sonda Kelvin) con respecto al otro (superficie de la muestra) a una frecuencia determinada, el flujo de corriente se genera en el circuito externo.

Anulando la corriente con una tensión de respaldo en serie con la sonda Kelvin vibratoria, la EWF muestra se puede determinar. El sistema tiene una alta resolución ($< 50 \mu eV$) y la separación de la sonda es controlada dentro de 40 nm . En el presente estudio, se utiliza una punta de oro con un diámetro igual a $0,1 \text{ mm}$, y el área de exploración de $0,2 \times 0,2 \text{ mm}$; con una frecuencia de la sonda Kelvin de 173 Hz .

4.2.1 Relación corrosión vs rugosidad independiente a la salinidad

Los resultados experimentales muestran que el aumento de la rugosidad de la superficie aumenta con la velocidad de corrosión, e inversamente, mientras que la función de trabajo de electrones superficie disminuye.

Estudios teóricos han demostrado que la rugosidad está afectada no sólo la EWF general de una superficie, sino también su fluctuación EWF local. Por lo tanto, es más fácil que los electrones escapen de las proximidades de un pico de a los de un valle, de modo que el pico se corroe preferentemente. La fluctuación EWF aumenta con un aumento de la rugosidad y también puede promover la formación de célula de corrosión que puede acelerar aún más la corrosión de una superficie rugosa. Desde un punto de vista termodinámico, la EWF está estrechamente relacionada a la superficie potencial y puede ser utilizada para evaluar el comportamiento de la corrosión.

Los resultados experimentales para una rugosidad de 0 a 0,2 nm muestran que el aumento de la rugosidad de la superficie aumenta con la velocidad de corrosión, como se puede observar en el siguiente gráfico, Li [2005].

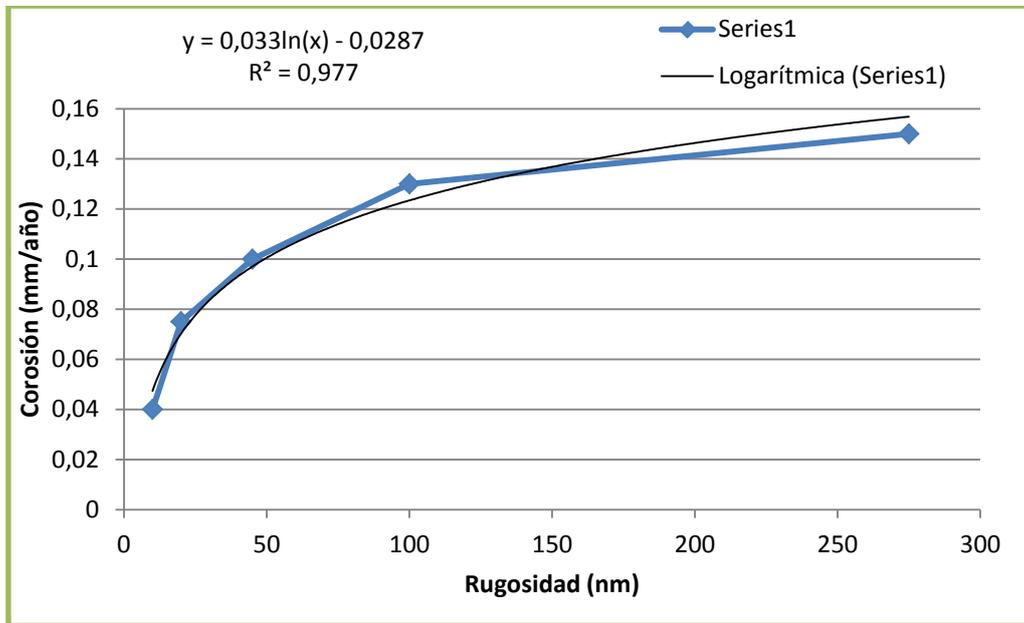


Gráfico 3. Relación corrosión y rugosidad independiente de la salinidad

A partir de los diferentes muestreos se realizan las primeras estimaciones de la curva dando lugar a dicho gráfico, entrando en esta primera, se obtiene la línea de tendencia que responde a las características principales del comportamiento de la corrosión sobre la rugosidad mediante una función logarítmica.

Como se puede observar en el (*Gráfico 3*), la correlación es buena con un valor de $R^2 = 0,977$ y se considera bastante aproximada para realizar un dimensionamiento preliminar en esta fase del proyecto.

Esta regresión es el punto de partida para obtener la ecuación de la relación de corrosión sobre una rugosidad de 0 a 0,2 nm sin tener en cuenta en la expresión la salinidad como parámetro principal.

$$CR = 0,033 \ln(Ks) - 0,0287 \quad (\text{Ec. 44})$$

4.2.2 Relación corrosión vs rugosidad dependiente a la salinidad

En este apartado, se estudia mediante trabajos experimentales y modelados de redes el efecto del agua de mar sobre la relación de la tasa de corrosión por picadura en la rugosidad superficial de distintos materiales de acero.

En esta investigación, el efecto de los ambientes de agua de mar, es representado por los factores de temperatura y salinidad frente la rugosidad de la superficie en la velocidad de corrosión uniforme.

El trabajo experimental implica la composición química, las muestras de mecanizado, medidas de rugosidad (para muestras de acero), la conductividad y mediciones de salinidad (por el agua de mar), y la prueba de corrosión uniforme. Estos datos se utilizarán en la formación y las pruebas del modelo de redes para predecir la rugosidad sobre la tasa de corrosión uniforme para acero a diferentes valores de salinidad de las aguas marinas.

La conductividad es una medida del material conductor en la muestra líquida. Mide la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica. Es dependiente de la concentración y tipo (estado de oxidación y la movilidad) de los iones en el agua y la temperatura del agua. Si bien, la salinidad es una medida de la concentración de sal del agua; mayor salinidad significa más sales disueltas.

Procedimiento de Operación Estándar (SOP) para mediciones de campo de conductividad/salinidad con un medidor de conductividad YSI y Sonda. Este SOP es que debe seguirse para todas las mediciones de campo de conductividad o salinidad utilizando el YSI de 30 metros y la sonda.

El proceso de corrosión uniforme implica la inmersión de las muestras en el agua de mar de diferente salinidad a temperatura de $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$, dentro de un período de tiempo especificado, de 24, 48, 72 y 96 *horas* en cada una.

Después se realiza el análisis de la corrosión uniforme, donde las muestras se vuelven a pesar de nuevo para calcular la masa de pérdida de cada muestra.

Las tasas de corrosión uniforme se representan como la pérdida de grosor del metal en función del tiempo. Estos valores se miden a partir de los datos de pérdida de masa. La pérdida de masa es la medida de la diferencia entre la masa original de la muestra y la masa cuando se toman muestras después de la exposición a diferentes valores de salinidad de las aguas marinas.

Al controlar la pérdida de masa, se calcula la reducción de espesor como una función del tiempo. Las tasas de corrosión uniforme suelen expresarse en milímetros por año ($mm/año$), milésimas de pulgada por año ($mils/año$), o pulgadas por año ($in./año$).

Para realizar este estudio es indispensable el modelado de redes que se utiliza para predecir la variación de rugosidad sobre la velocidad de corrosión uniforme en acero bajo el efecto de entornos de agua de mar. Las entradas son la conductividad (S/m), la salinidad (g/kg), y el factor de rugosidad (m) y la tasa de corrosión de salida ($mm/año$).

Un factor crítico en el desarrollo de un modelo sólido es la técnica de optimización numérica aplicada para reducir al mínimo el error, las funciones de redes dependen de forma no lineal en sus pesos y por lo que la reducción al mínimo de la función de error correspondiente requiere el uso de algoritmos de optimización no lineales iterativos. Estos algoritmos hacen uso de los derivados de la función de error con respecto a los pesos de la red. Los algoritmos de retropropagación elástica es la técnica de optimización empleada en la construcción de las actuales redes neuronales artificiales.

Después de completar el proceso de formación, el modelo se prueba utilizando otro lote de datos que no se ha utilizado en el conjunto de entrenamiento.

Los siguientes parámetros estadísticos de significación se calculan al final de los cálculos de formación y pruebas:

- Coeficiente de correlación (R): es una medida de cómo los valores reales y predichos se correlacionan entre sí. El objetivo es maximizar el valor de $R \sim 1$.
- La media de error cuadrático (MSE): es una medida estadística de las diferencias entre los valores de las salidas en el conjunto de entrenamiento y los valores de salida de la red es la predicción. El objetivo es reducir al mínimo el valor de $MSE \sim 0$.

El número de nodos en la capa oculta se selecciona de acuerdo con las siguientes reglas:

- El error máximo de los parámetros de red de salida debe ser lo más pequeño posible para ambos patrones de entrenamiento y los patrones de prueba.
- El cuadrado medio del error debe ser pequeño, tanto como sea posible.

Las configuraciones óptimas en dos redes de capas ocultas con mínimo error cuadrático medio (MSE) y el coeficiente de correlación máximo para la red son 17:8 (17 nodos de la primera capa oculta y 8 en la segunda capa oculta).

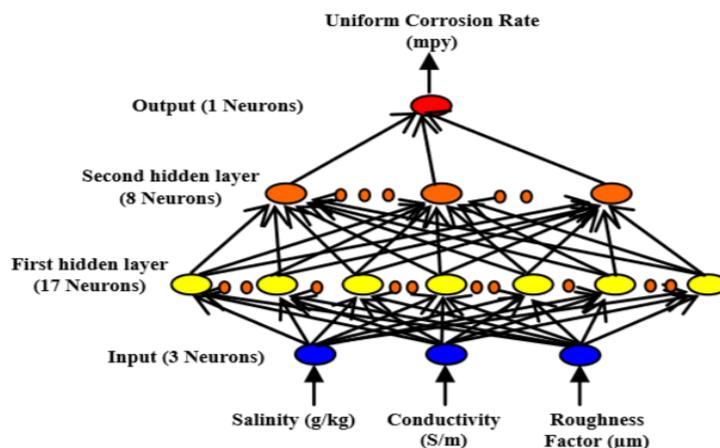


Figura 16. Estructura del sistema de redes, Haider [2012]

La arquitectura de red neuronal para este modelo se da en la figura anterior. Se compone de tres nodos en la capa de entrada, dos capas ocultas se eligen para el error mínimo cuadrado medio (MSE) y el coeficiente de correlación máxima, la primera capa oculta tiene (17) nodos, y la segunda capa oculta tiene (8) nodos. La capa de salida tiene un solo nodo que es representado por la tasa de corrosión uniforme.

La función de decisión se utiliza tanto para la primera capa oculta como la segunda (tansig), y para la capa de salida (purelin). Estas funciones son elegidas para obtener la salida por ensayo y error con el mejor rendimiento óptimo que se logra por acercarse a los valores mínimos de error cuadrático medio y el coeficiente de correlación máxima después de realizar numerosas iteraciones.

Finalmente, se obtienen los resultados de la velocidad de corrosión uniforme por parte de la predicción de red neuronal artificial, donde se otorgan de manera fiable la rugosidad sobre la tasa de corrosión uniforme para acero a diferentes valores de salinidad de las aguas marinas. Al demostrar que dichos resultados son los acordados de los valores experimentales, teniendo el coeficiente de correlación, $R = 0,9974$, como se muestra en la siguiente figura, Haider [2012].

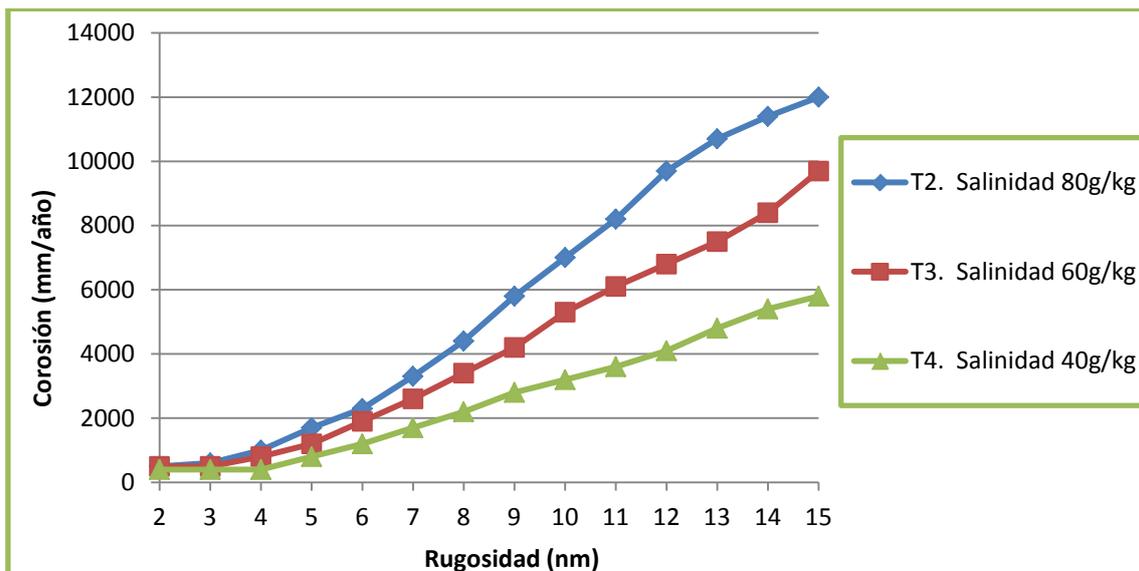


Gráfico 4. Relación corrosión y rugosidad en función de la salinidad

En el *gráfico 4* se muestra el efecto del factor de rugosidad de la superficie sobre la tasa de corrosión uniforme en diferente peso salinidad.

Se puede extraer que los aumentos de las tasas de corrosión uniforme son directamente proporcionales al aumento tanto del factor de rugosidad como el peso de la salinidad. Por ejemplo, la superficie rugosa se corroe y facilita la corrosión general más fácilmente que la superficie lisa.

Además, el factor de rugosidad baja con diferente peso salinidad mientras no muestra un notable aumento en la tasa de corrosión uniforme. En general, las muestras preparadas con un acabado de superficie suave (bajo factor de rugosidad) no son susceptibles a la corrosión y exhiben un potencial de corrosión más alta (es decir, disminuir la velocidad de corrosión uniforme).

Por otro lado, se obtiene otra relación importante que es el efecto de la salinidad sobre la velocidad de corrosión uniforme de acero en diferente factor de rugosidad. Está claro que el aumento de salinidad aumentará la velocidad de corrosión uniforme. De modo que aumentando la cantidad de sal en el agua de mar va a aumentar la velocidad de corrosión del hierro. Este aumento se divulga para ser proporcional al aumento de la concentración de sal.

4.2.2.1 Relación con una salinidad de 80g/kg

Los resultados mediante trabajos experimentales y modelados de redes con una salinidad de 80g/kg de agua de mar sobre la relación de la tasa de corrosión por picadura en la rugosidad superficial de distintos materiales de acero muestran que el aumento de la rugosidad de la superficie aumenta con la velocidad de corrosión, como se puede observar en el siguiente gráfico.

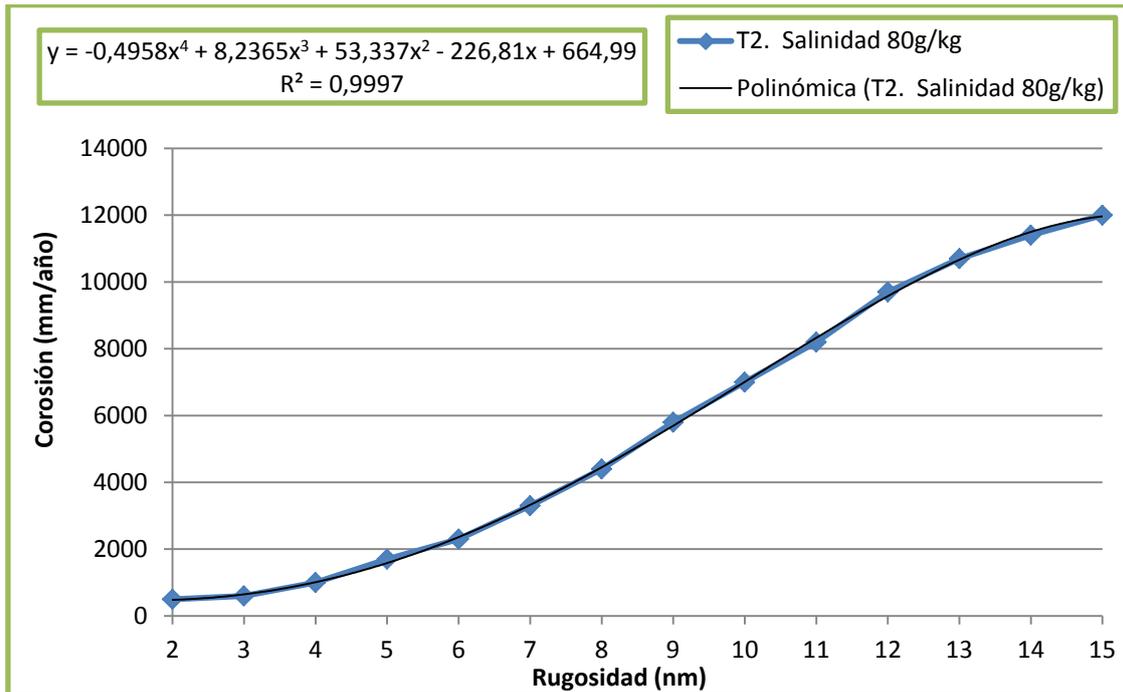


Gráfico 5. Relación corrosión y rugosidad con salinidad de 80g/kg

A partir de los diferentes muestreos se realizan las primeras estimaciones de la curva dando lugar a dicho gráfico, entrando en esta primera, se obtiene la línea de tendencia que responde a las características principales del comportamiento de la corrosión sobre la rugosidad mediante una función polinómica de cuarto orden.

Como se puede observar en el (*Gráfico 5*), la correlación es buena, con un valor de $R^2 = 0,9997$, y se considera realmente aproximada para realizar un dimensionamiento preliminar en esta fase del proyecto.

Esta regresión es el punto de partida para obtener la ecuación de la relación de corrosión sobre una rugosidad teniendo en cuenta en la expresión la salinidad como parámetro principal.

$$CR = -0,4958Ks^4 + 8,2365Ks^3 + 53,337Ks^2 - 226,81ks + 664,99 \quad (\text{Ec. 45})$$

4.2.2.2 Relación con una salinidad de 60g/kg

Los resultados mediante trabajos experimentales y modelados de redes con una salinidad de 60g/kg de agua de mar sobre la relación de la tasa de corrosión por picadura en la rugosidad superficial de distintos materiales de acero muestran que el aumento de la rugosidad de la superficie aumenta con la velocidad de corrosión, como se puede observar en el siguiente gráfico.

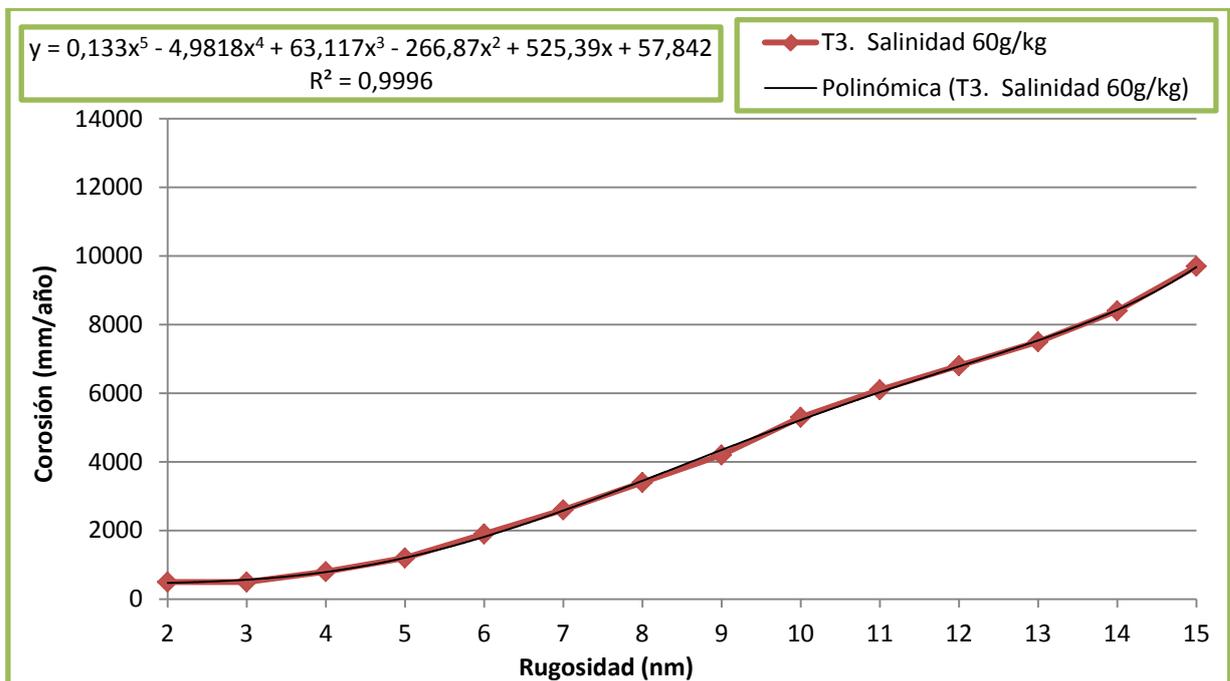


Gráfico 6. Relación corrosión y rugosidad con salinidad de 60g/kg

A partir de los diferentes muestreos se realizan las primeras estimaciones de la curva dando lugar a dicho gráfico, entrando en esta primera, se obtiene la línea de tendencia que responde a las características principales del comportamiento de la corrosión sobre la rugosidad mediante una función polinómica de quinto orden.

Como se puede observar en el (*Gráfico 6*), la correlación es buena con un valor de $R^2 = 0,9996$ y se considera realmente aproximada para realizar un dimensionamiento preliminar en esta fase del proyecto.

Esta regresión es el punto de partida para obtener la ecuación de la relación de corrosión sobre una rugosidad teniendo en cuenta en la expresión la salinidad como parámetro principal.

$$CR = 0,133Ks^5 - 4,9818Ks^4 + 63,117Ks^3 - 266,87Ks^2 + 525,39ks + 57,842 \quad (\text{Ec. 46})$$

4.2.2.3 Relación con una salinidad de 40g/kg

Los resultados mediante trabajos experimentales y modelados de redes con una salinidad de 40g/kg de agua de mar sobre la relación de la tasa de corrosión por picadura en la rugosidad superficial de distintos materiales de acero muestran que el aumento de la rugosidad de la superficie aumenta con la velocidad de corrosión, como se puede observar en el siguiente gráfico.

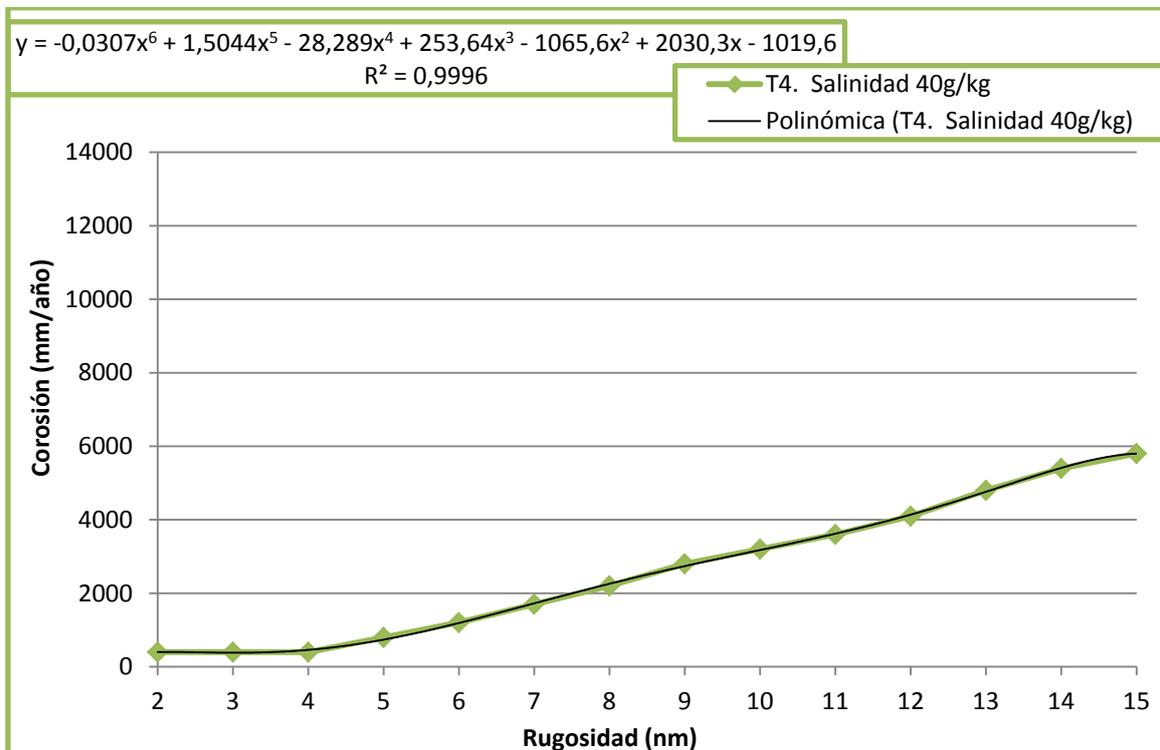


Gráfico 7. Relación corrosión y rugosidad con salinidad de 40g/kg

A partir de los diferentes muestreos se realizan las primeras estimaciones de la curva dando lugar a dicho gráfico, entrando en esta primera, se obtiene la línea de tendencia que responde a las características principales del comportamiento de la corrosión sobre la rugosidad mediante una función polinómica de sexto orden.

Como se puede observar en el (*Gráfico 7*), la correlación es buena, con un valor de $R^2 = 0,9996$, y se considera realmente aproximada para realizar un dimensionamiento preliminar en esta fase del proyecto.

Esta regresión es el punto de partida para obtener la ecuación de la relación de corrosión sobre una rugosidad teniendo en cuenta en la expresión la salinidad como parámetro principal.

$$CR = -0,0307Ks^6 + 1,5044Ks^5 - 28,289Ks^4 + 253,64Ks^3 - 1.065,6Ks^2 + 2.030,3ks - 1.019,6 \quad (\text{Ec. 47})$$

4.3 Influencia de la rugosidad en la resistencia al avance

En esta fase de proyecto, una vez obtenido los datos del incremento de la rugosidad se procede a calcular los coeficientes de correlación que tiene en cuenta el efecto de la rugosidad en el buque o modelo.

Primeramente, se calcula el coeficiente de correlación del modelo o buque recién construido a partir de una rugosidad superficial estándar $k_{S_0} = 120 - 150 \mu m$. El ΔC_F es el coeficiente de correlación que tiene en cuenta el efecto de la rugosidad y otros efectos de escala (cuando se usa el modelo) debidos a las circunstancias experimentales y a la inexactitud de los supuestos básicos en que se basa el procedimiento de extrapolación. Dicho coeficiente se expresa con la posterior ecuación, Alonso [2012].

$$\Delta C_F = 10^{-3} \cdot \left(105 \cdot \left(\frac{k_{S_0}}{L_F} \right)^{\frac{1}{3}} - 0,64 \right) \quad (\text{Ec. 48})$$

Seguidamente, es preciso introducir la corrección al coeficiente ΔC_F , cuando el buque o modelo deja de ser recién construido, a medida que el modelo o buque navega va a aumentar la rugosidad del casco con el tiempo, como se puede comprobar en el (Gráfico 2). Variación de rugosidad con el tiempo.

$$\Delta(\Delta C_F) = \frac{105 \cdot 10^{-3}}{L^{1/3}} \cdot \left(k_S^{1/3} - \left(\frac{150}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \quad (\text{Ec. 49})$$

A continuación, se calcularía la resistencia al avance, mediante los coeficientes adimensionales de la resistencia como muestra la siguiente fórmula.

$$C_T = C_{T_0} + \Delta(\Delta C_F) = C_F(1 + k) + C_R + \Delta C_F + \Delta(\Delta C_F) \quad (\text{Ec. 50})$$

Suponiendo que el cálculo de la resistencia al avance se realice en el mismo buque sin usar ningún otro buque modelo o similar, el factor de forma será la unidad, debido que es el mismo buque a estudiar, de modo que el factor de forma que se obtendría mediante Prohaska será nulo. De este modo, se modifica el desglose del coeficiente de la resistencia total en la siguiente expresión.

$$C_T = C_{T_0} + \Delta(\Delta C_F) = C_F + C_R + \Delta C_F + \Delta(\Delta C_F) \quad (\text{Ec. 51})$$

Para poder proseguir con el procedimiento de cálculo se requiere una serie de parámetros del buque, estos son las variables de entrada del programa de cálculo, siendo descritas en el siguiente capítulo.

De acuerdo con la ITTC (International Towing Tank Conference) la resistencia total al avance de un buque se puede dividir en dos componentes, una de ellas debida a la fricción y otra, denominada residual, debida principalmente a la formación de olas.

Siguiendo la nomenclatura de la ITTC con la extrapolación de la resistencia mediante el método de Hughes y la línea de correlación según la ITTC-57 se puede obtener el coeficiente adimensional de resistencia al avance total (C_{T_0}); conociendo la densidad del fluido, la superficie mojada del buque y su velocidad inicial, mediante la siguiente ecuación.

$$C_{T_0} = \frac{2 \cdot R_{T_0}}{\rho \cdot S \cdot V_0^2} \quad (\text{Ec. 52})$$

El coeficiente adimensional de resistencia de fricción se calcula a partir de la línea de fricción ITTC-57 cuya expresión es dependiente al número de Reynolds que rige los fenómenos viscosos que se producen en el fluido, Carrillo y Valle [2006].

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (\text{Ec. 53})$$

El número de Reynolds (Re) es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido. El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional. Para un fluido el número de Reynolds viene dado por:

$$Re = \frac{V_0 \cdot L}{\nu} \quad (\text{Ec. 54})$$

Dicho número adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande).

El coeficiente adimensional de resistencia residual se calcula a partir diferencia del coeficiente adimensional de resistencia total inicial con los otros coeficientes adimensionales obtenidos anteriormente.

$$C_R = C_{T_0} - C_F - \Delta C_F - \Delta(\Delta C_F) \quad (\text{Ec. 55})$$

Una vez resueltas estas ecuaciones se obtienen todos los coeficientes adimensionales de resistencia, que lógicamente están relacionados con los distintos términos de resistencia del buque. De modo que dichas ecuaciones pueden reescribirse de la siguiente forma.

$$R_{T_0} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^2 \cdot C_{T_0} \quad (\text{Ec. 56})$$

$$R_R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^2 \cdot C_R \quad (\text{Ec. 57})$$

$$R_F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^2 \cdot C_F \quad (\text{Ec. 58})$$

$$R_{\Delta(\Delta C_F)} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^2 \cdot \Delta(\Delta C_F) \quad (\text{Ec. 59})$$

A continuación, se calcula el coeficiente de la resistencia al avance total, mediante los coeficientes adimensionales de la resistencia como muestra la siguiente fórmula.

$$C_T = C_{T_0} + \Delta(\Delta C_F) = C_F + C_R + \Delta C_F + \Delta(\Delta C_F) \quad (\text{Ec. 60})$$

Seguidamente, se puede obtener la resistencia al avance total inicial mediante la siguiente ecuación.

$$R_{T_0} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^2 \cdot C_{T_0} \quad (\text{Ec. 61})$$

Asimismo, una vez resueltas las ecuaciones de los términos de resistencia se puede calcular la resistencia al avance total sumando cada parámetro que compone la resistencia al avance total inicial.

$$R_T = R_{T_0} + R_{\Delta(\Delta C_F)} = R_F + R_R + R_{\Delta C_F} + R_{\Delta(\Delta C_F)} \quad (\text{Ec. 62})$$

Posteriormente, se puede obtener el incremento de resistencia al avance que es debido al coeficiente de corrección de la rugosidad no inicial mediante la siguiente ecuación.

$$\Delta R_T = R_T - R_{T_0} \quad (\text{Ec. 63})$$

Consecutivamente, se obtiene el incremento de la resistencia en tanto por ciento.

$$\Delta R_T = 100 \cdot \frac{R_T - R_{T_0}}{R_{T_0}} \quad (\text{Ec. 64})$$

Por último, para poder obtener la pérdida de potencia es necesario calcular anteriormente la velocidad del buque actual, asumiendo un aumento de resistencia debida al incremento de rugosidad del casco.

$$V_f = \frac{75 \cdot EHP}{R_T} \quad (\text{Ec. 65})$$

Del mismo modo, se obtiene la pérdida de velocidad del buque asumiendo que la potencia efectiva es la misma, esta no puede variar sin modificación de motor.

$$V_{per} = V_0 - V_f = V_0 - \frac{75 \cdot EHP}{R_T} \quad (\text{Ec. 66})$$

Finalmente, se puede calcular la pérdida de potencia efectiva debido al incremento de resistencia como muestra la siguiente fórmula.

$$P_{EHP} = \frac{\Delta R_T \cdot V_0}{75} \quad (\text{Ec. 67})$$

5. Desarrollo del software Matlab

Matlab es la abreviatura de Matrix Laboratory (laboratorio de matrices). Creado en 1.984 por The MathWorks, es un software de cálculo muy usado en universidades, centros de investigación y por ingenieros.

Entre sus prestaciones básicas se encuentran: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. En los últimos años ha incluido muchas más utilidades, como la de programar directamente procesadores digitales de señal, crear código, etc.

En el presente capítulo, se realiza una iniciación en la utilización de la herramienta Matlab para posteriormente utilizar dicho software como programa de cálculo y visualizar los resultados obtenidos.

Matlab puede utilizarse como un lenguaje de programación que incluye todos los elementos necesarios. Añade la gran ventaja de poder incorporar a los programas propios del usuario todas las aplicaciones que ya tiene implementadas, lo cual facilita y simplifica en muchos casos la programación.

Los programas en Matlab suelen escribirse en los ficheros .m (M-ficheros). Generalmente se utilizan ficheros Scripts que resultan más sencillos. A menudo, no tienen argumentos de entrada ni salida y están formados por un conjunto de instrucciones que se ejecutan secuencialmente.

La estructura general de un programa MATLAB es la siguiente:

- **Comentarios:** inicialmente, pueden aparecer líneas comentadas en las que se da un título al programa y se realiza una breve descripción del mismo. Esta parte es opcional, pero es útil introducirla ya que se nos permite acceder directamente desde la ventana de comandos a la información comentada mediante la utilización del comando help, en la forma:
`>> help (nombre del programa).`
- **Entrada de datos:** los datos necesarios para la resolución del problema deben suministrarse al programa mediante la lectura de sus valores por teclado o desde un fichero de datos.
- **Algoritmo:** desarrollo del procedimiento que permite obtener la solución del problema en función de los datos de entrada.
- **Salida de datos:** los datos obtenidos como solución del algoritmo se deben ofrecer al usuario mediante escritura en pantalla o en un fichero de dato.

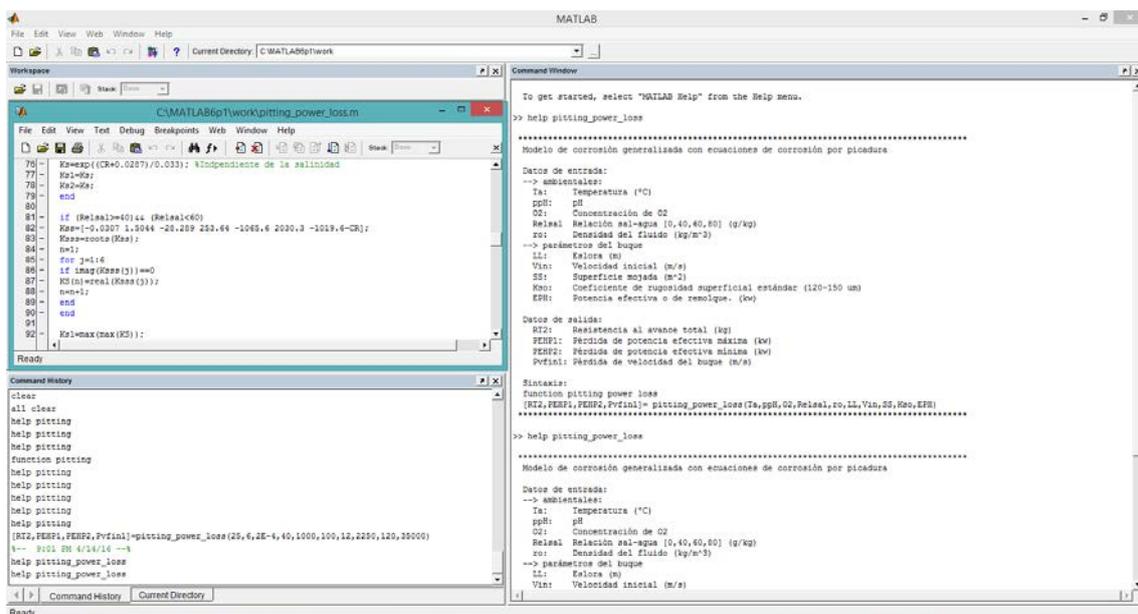


Figura 17. Ejemplo de la interfaz del Matlab

5.1 Creación y estructura del fichero de función

Cuando se introduce un valor x de entrada en la expresión de la función, se obtiene un valor y una salida. Existen muchas funciones que están ya programadas en Matlab, son funciones predefinidas, que pueden ser utilizadas en expresiones simplemente tecleando su nombre junto con el argumento de entrada.

A la hora de programar, existe la necesidad de operar con funciones distintas que no están predefinidas. Como es en dicho proyecto, en crear una función definida por el usuario llamada *function [variables salida]= pitting_power_loss (variables entrada)*.

Una vez creada la función y almacenada en el disco, ésta podrá ser utilizada de la misma forma que una función predefinida de Matlab, de modo que la función puede evaluar distintas veces para diferentes tipos de argumentos, independiente de que la función contenga expresiones matemáticas simples o códigos que impliquen cálculos más complejos.

Dicha función es un programa Matlab que está almacenada en el disco en forma de un fichero .m (M-fichero) que contiene la definición de la propia función, de forma que pueda ser utilizada al igual que el resto de las funciones del sistema.

La principal característica de los ficheros de función es que tienen una entrada y una salida. Esto implica que los cálculos que se realizan dentro de los ficheros se desarrollan utilizando datos de entrada, y que los resultados de estos cálculos son transferidos fuera del fichero como datos de salida.

Un ejemplo esquemático del funcionamiento del fichero de función, es independiente de las distintas variables que forman la entrada y la salida, como se muestra seguidamente.



Figura 18. Ejemplo del funcionamiento del fichero de función

Además del uso que se le pueda dar a las funciones desde la perspectiva matemática, los ficheros se pueden utilizar como subprogramas dentro de otros programas de mayor tamaño. De esta forma se pueden construir programas grandes uniendo bloques más pequeños que se pueden evaluar y validar de manera independiente.

El fichero de función llamado *pitting_power_loss* se ha creado y editado como un fichero scripts, se puede observar en el anexo 4 (función del programa), donde se detalla todos los comandos de la estructura del propio fichero.

Lógicamente la primera línea ejecutable en el fichero es la definición de la propia función. La cual ejecutará el programa con el nombre de la función y pedirá introducir al usuario los argumentos de entrada. Para facilitar el uso del fichero de la función se introduce en programa líneas de texto de ayuda, son líneas que empiezan por el carácter % que aparecen en color verde para que aparezca en pantalla como *help*.

El help son líneas de comentarios del programa que son muy útiles para proporcionar información sobre la propia función. Estas líneas contienen una explicación de la función y la descripción relacionada con sus argumentos de entrada y salida.

De este modo el usuario podrá ver la ayuda del fichero de la función por pantalla cuando teclee el comando *help pitting_power_loss* en la ventana de comandos.

5.2 Variables de entrada

Los argumentos de entrada y salida se utilizan para transferir datos dentro y fuera de la función. Los argumentos de entrada se han introducido entre paréntesis a continuación del nombre de la función. Debido que la función está considerada para tener más de un único parámetro de entrada, los argumentos están separados por comas.

El código interno que contiene la propia función está pensado para operar sobre los argumentos de entrada, teniendo en cuenta las unidades respectivas de dichas variables, y por tanto se presupone que los valores introducidos por el usuario son los apropiados.

Esto implica que las expresiones matemáticas que forman la estructura de la función han sido descritas según las dimensiones de las variables.

Los argumentos de entrada necesarios de la función para su correcto funcionamiento requiere de una serie de parámetros del buque, estos son los siguientes.

- EHP → potencia efectiva o de remolque. (kw)
- R_{T_0} → resistencia al avance inicial del buque. (kg)
- V_o → velocidad inicial del buque. (m/s)
- L → eslora del buque. (m)
- S → superficie mojada. (m^2)
- ks_o → Coeficiente de rugosidad superficial estándar (120-150 μm)

Las variables necesarias del ambiente son las siguientes.

- ρ → densidad del fluido. (kg/m^3)
- ν → viscosidad cinemática del fluido. (m^2/s)
- g → gravedad (m/s^2)
- s → concentración de salinidad (g/kg)
- T → temperatura ($^{\circ}C$)
- O_2 → concentración de O_2 (m/s^2)
- pH → potencial hidrógeno ($A \cdot cm/mol$)

Los argumentos de salida que se encuentran entre corchetes en la parte izquierda del operador de asignación transfieren la salida desde la función. Esta función tiene más de un argumento de salida motivo por el cual estos están separados por comas.

Para que funcione correctamente la función, a los argumentos de salida se les han asignado valores durante la ejecución del código al cuerpo de la función.

Todas las variables de entradas y salidas de la función se transfieren a través de argumentos. Esto significa que cualquier variable a la que se ha asignado un valor en el fichero de la función será visualizada en la pantalla por el usuario. Por este motivo, a las variables que no es necesario mostrar por pantalla se ha escrito un punto y coma al final del comando de asignación.

Lógicamente todas las variables de salida podrán ser visualizadas por pantalla por el usuario, principalmente la pérdida de potencia del barco que ha sido el objetivo global de este trabajo.

6. Conclusiones

Las conclusiones más relevantes que se extraen del proyecto se citan a continuación.

➤ ***En relación con la recopilación de las ecuaciones requeridas en los distintos procesos de cálculo.***

Después de analizar otros trabajos realizados en la propia facultad dentro del mismo campo de investigación, se observa la monopolización de la corrosión en todos ellos, de aquí nace el interés de ampliar las miras y estudiar no solo el fenómeno de corrosión en un medio marino sino investigar el efecto provocado en los cascos de los buques.

Tras una revisión exhaustiva se encuentra un vínculo de unión del efecto de la corrosión con el incremento de resistencia al avance del buque mediante la variación de las formas lisas de la obra viva del buque con el incremento de rugosidad de la propia superficie.

La realización de esta memoria ha requerido una profunda investigación de ambas materias, para ello se han utilizado numerosas fuentes de información: libros, reglamentos y diversas publicaciones como estudios, ensayos, investigaciones, tesis, artículos académicos y páginas web.

➤ ***En relación al diseño y la organización del programa.***

Hay que resaltar la gran dificultad para recopilar y determinar todas y cada una de las ecuaciones necesarias del programa para poder operar el proceso analizado, dado que anteriormente ha sido tratada de forma separada o incompleta en la mayoría de las publicaciones.

La complejidad no radica solamente en programar el software con Matlab sino en encontrar todas las variables y parámetros que afectan en ambos procesos en un medio acuoso, en este caso medio marino. Resulta sencillo caer en el error de realizar un programa, que compile correctamente, pero que no sea útil científicamente hablando puesto que en el momento de formularlo se hayan obviado ciertas variables que juegan un papel esencial para el fenómeno objeto del cálculo.

Otro aspecto durante la elaboración del propio programa ha sido el correcto orden correlativo de cada una de las ecuaciones dentro del fichero de función y el adecuado orden de magnitudes e unidades en cada ecuación dentro de cada comando.

➤ ***En relación con el programa Matlab.***

Se ha elaborado un fichero de función en Matlab que permite simular los diversos problemas de corrosión producidos por picadura en un medio marino, obteniendo como principal resultado la pérdida de potencia del buque en función del aumento de la corrosión. El programa contiene diferentes rutinas asociadas a distintos modelos dependiendo de si se desea operar un caso u otro de tal manera que el usuario puede obtener la simulación y representación de resultados correspondiente al caso a estudiar. Asimismo, incorpora opciones que facilitan al usuario el acceso a los resultados durante la simulación con Matlab y la posibilidad de extrapolación de los resultados finales por pantalla.

La realización del programa facilita la rapidez de resolución matemática durante dicho proceso, la obtención de pérdida de potencia de un barco en función del incremento de corrosión en el casco del barco.

Además, permite calcular la pérdida de velocidad del buque, como el incremento de resistencia al avance del buque, y otros parámetros relevantes.

La elaboración de dicho software específico para la simulación numérica directa de los problemas de corrosión por picadura ocasionando la pérdida de potencia, sin necesidad de entrar en el núcleo de cálculo, dota a la comunidad científica de una herramienta potente de cálculo y predicción en problemas de índole similar.

➤ ***En relación con la aplicación, se ha estudiado y simulado para poder lograr las siguientes afirmaciones.***

El examen visual del programa durante estos meses en un medio de pruebas y simulaciones para verificar el correcto funcionamiento del mismo, revela una serie de fenómenos que se han podido extraer de las propias ecuaciones que forman el fichero de la función, estas son las siguientes.

- ✓ Sobre la velocidad de corrosión por picadura del acero, en función de la temperatura se concluye que la velocidad de corrosión aumenta a medida que disminuye el pH. Del mismo modo que un incremento de temperatura produce un ligero aumento de la velocidad de corrosión. Aunque la temperatura influye en diferentes aspectos del sistema, su efecto global es muy bajo.
- ✓ Los resultados experimentales muestran que el aumento de la rugosidad de la superficie aumenta con la velocidad de corrosión, e inversamente, mientras que la función de trabajo de electrones superficie disminuye. Los aumentos de las tasas de corrosión uniforme son directamente proporcionales al aumento tanto del factor de rugosidad como el peso de la salinidad. Por ejemplo, la superficie rugosa

se corroe y facilita la corrosión general más fácilmente que la superficie lisa.

- ✓ Por otro lado, se obtiene otra relación importante que es el efecto de la salinidad sobre la velocidad de corrosión uniforme de acero en diferente factor de rugosidad. Está claro que el aumento de salinidad aumentará la velocidad de corrosión uniforme. De modo que aumentando la cantidad de sal en el agua de mar va a aumentar la velocidad de corrosión del hierro. Este aumento se divulga para ser proporcional al aumento de la concentración de sal.
- ✓ Sobre la resistencia al avance, es directamente proporcional a la rugosidad del casco, el incremento de resistencia al avance es debido al incremento del coeficiente de corrección de la rugosidad no inicial, exclusivamente cuando los otros componentes de resistencia permanecen constantes, como es el tema estudiado.
- ✓ Sobre la pérdida de velocidad del buque, es directamente proporcional al aumento de resistencia, asumiendo que la potencia efectiva es la misma, esta no puede variar sin la substitución del motor.
- ✓ Por último, la pérdida de potencia sigue la misma tendencia que la pérdida de velocidad del buque, de modo que para mantener la misma velocidad de crucero es necesario un aumento de potencia, ocasionando un consumo extra debido al aumento de la resistencia al avance.

7. Bibliografía

Para la elaboración de este proyecto se ha utilizado numerosas fuentes de información: libros, reglamentos y diversas publicaciones como estudios, ensayos, investigaciones, tesis, artículos académicos y páginas web, que se enumeran a continuación.

Referencias bibliográficas

- ALEMÁN, C., OCAMPO, C., ARMELIN, E., CURCÓ, D., CASANOVAS, J. y LIESA, F. (2006). *Polímeros conductores: Influencia sobre las propiedades anticorrosivas de las pinturas marinas*. Ciencias Marinas, Vol. 32, pp. 361.
- ALONSO, B. (2012). *Hidrodinámica, resistencia y propulsión*. Tecnología Naval. Curso de ETSINO. Cartagena.
- ALVARIÑO, R., AZPIROZ, J. y MEIZOSO, M. (2007). *El Proyecto Básico del Buque Mercante*, 2ª edición. Madrid.
- ASM International Handbook Committee (1992). ASM Handbook. Vol. 13, *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, pp. 16-97.
- ASM International Handbook Committee (1993). ASM Handbook. Vol. 1, *Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys*, pp. 233-241.
- ASM International Handbook Committee (1998). ASM Handbook. Vol. 19, *Metallography and Microstructures*, pp. 273-357.

- BAQUERO MAYOR, A. (1989). *Obtención de las características hidrodinámicas de resistencia y propulsión de un buque a partir de ensayos con modelos*. Ingeniería Naval. Madrid.
- BILURBINA, L y LIESA, F. (1996). *Fonaments de la corrosió i mesures de protecció*. Edicions UPC. Barcelona.
- BILURBINA, L. y LIESA, F. y IRIBARREN, J.I. (1996). *Corrosión y protección*. Edicions UPC. Barcelona.
- BLESA, J. y ROMERO, S. (2009). *Modelat i simulació de sistemes amb Matlab*. Tecnología Naval. Curso de FNB. Barcelona.
- BORENSTEIN, S. W. (1994). *Microbiologically influenced corrosion handbook*, Woodhead Publishing Limited. Cambridge.
- CALVO, J. (2009). *Pinturas y recubrimientos. Introducción a su tecnología*. Ediciones Díaz de Santos. Madrid.
- CARRILLO, E., y VALLE, J. (2006). Reducción de la resistencia de fricción en buques: un problema antiguo actualizado por la crisis del petróleo. Canal de Experiencias Hidrodinámicas, nº 200. Madrid.
- COSTA, J.M. (1981). *Fundamentos de electródica: cinética electroquímica y sus aplicaciones*, Editorial Alhambra S.A. Madrid.
- GARCÍA, J. (2010). *Projectes*. Tecnología Naval. Curso de FNB. Barcelona.
- GILAT, A. (2006). *Matlab: una introducción con ejemplos prácticos*. Editorial Recerté. Barcelona.
- HAIDER, M. (2012). *Study the Effect of Seawater Environments and Surface Roughness on Uniform Corrosion Rate of Carbon Steel Using Neural Network Modeling*. Basrah Journal for Engineering Science. Basora (Iraq).

- HARVALD, SV. AA. (1983). *Resistance and propulsion of ships*. John Wiley & Sons. New York.
- HERNÁNDEZ, J. J. (2011). *Ingeniería de la soldadura en la construcción naval*. Curso de ETSINO. Cartagena.
- LI, W. y LI, D. Y. (2005). Influence of surface morphology on corrosion and electronic behaviour. *Corrosion Science*. Department of Mechanical Engineering, University of Alberta. Edmonton (Canada).
- LIDE, D.R. (1995). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 75th edition, Editorial CRC Press. New York.
- MARCUS, P. (2011). *Corrosion Mechanisms in theory and Practice*, third edition, Editorial CRC Press. Florida.
- MARCUS, P. (2003). *Introduction to the Fundamentals of Corrosion*. In: ASM Handbook. Vol. 13A. ASM International, pp. 3.
- MOLINA PÉREZ, L. (2011). *Estudio avanzado de corrosión: Análisis del estado de corrosión de un edificio modernista de Barcelona y estudio de mecanismos de protección basados en recubrimientos orgánicos*. Tesis carrera, ETSEIB. Barcelona.
- NESIC, S., POSTLETHWAITE, J. y OLSEN, S. (1995). *An Electrochemical Model for Prediction of Corrosion of Mild Steel in Aqueous Carbon Dioxide Solutions*. Houston.
- NESIC, S., NORDSVEEN, M., NYBORG, R. y STANGELAND, A. (2001). *A mechanistic model for CO₂ corrosion with protective iron carbonate films*. Houston.

- PÉREZ, L., IZAGUIRRE, P., ZAMORA, R., PÉREZ, F., BOTIA, E., NÚÑEZ, J. F. y DÍAZ, J. C. (2008). *Reducción de la resistencia al avance de un buque mediante la aplicación de pinturas especiales al casco*. Canal de ensayos. Madrid.
- PRATO, M^a. R., GONZÁLEZ, A. y REYES, R. (1987). *Estudio Cinético de la Corrosión del Acero por Aguas Agrias Alcalinas*. LatinAmerican Journal of Metallurgy and Materials, Vol. 7, nº 1-2.
- SÁNCHEZ, J.F. (2012). *Solución numérica de problemas de oxidación mediante el método de simulación por redes*. Tesis doctoral, UPCT. Cartagena.
- SEGARRA, P. (2015). *Estudio de los cambios producidos en la corrosión por picadura en el casco de acero de un barco con la temperatura del mar utilizando el programa Oxipsis_12*. Tesis carrera, UPCT. Cartagena.
- SHARLAND, S.M. y TASKER, P. W. (1988). *A mathematical model of crevice and pitting corrosion I. The physical model*. Corrosion Science, Vol. 28, 6, pp. 603. Oxford.
- SHARLAND, S.M. (1988). *A mathematical model of crevice and pitting corrosion II. The mathematical solution*. Corrosion Science, Vol. 28, 6, pp. 621. Oxford.
- WALTON, J.C. (1990). *Mathematical modeling of mass transport and chemical reaction in crevice and pitting corrosion*. Corrosion Science, Vol. 30, 8/9, pp. 915.

Referencia Imágenes

- **Figura 1.** Mantenimiento Industrial [on line]. 23 de abril de 2015 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://mantenimiento.1minutefree.es/>
- **Figura 2.** CORROSIÓN EN ARANDELAS BELLEVILLE [on line]. 12 de abril de 2015 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://www.arandelas-belleville.com/>
TODOPRODUCTIVIDAD [on line]. 10 de septiembre de 2011 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://todoproductividad.blogspot.com.es/>
- **Figura 3.** Widman International SRL [on line]. 3 de abril de 2015 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://www.widman.biz/Seleccion/refrigerante.html>
- **Figura 4.** JN Aceros Blog [on line]. 18 de marzo de 2015 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://www.widman.biz/Seleccion/refrigerante.html>
Trytech [on line]. 21 de mayo de 2015 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://www.trytech.com.ar/images/logo.png>
- **Figura 5.** High Seas Hydraulics [on line]. 2 de julio de 2014 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://highseashydraulics.com/category/pitting/>
- **Figura 6.** Duber, R. [on line]. 1 de noviembre de 2014 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://es.slideshare.net/duberramirez73/tipos-de-corrosion-clase-rapida-dr>
- **Figura 7.** Universitat Politècnica de València. [on line]. 4 de febrero de 2004 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://es.slideshare.net/duberramirez73/tipos-de-corrosion-clase-rapida-dr>
- **Figura 8.** G2MT Labs [on line]. 4 de abril de 2014 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://www.g2mtlabs.com/corrosion/astm-a262-testing/>

- **Figura 9.** Labtesa [on line]. 5 de abril de 2010 (citado 2015). Disponible en World Web: http://www.labtesa.com.ar/causa_fallas6.htm

- **Figura 10.** Cimsa [on line]. 6 de marzo de 2006 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://www.cimsaww.com/>

- **Figura 11.** Agencia Estatal de Meteorología [on line]. 1 de febrero de 2012 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://www.aemet.es/es/>

- **Figura 12.** Agencia Estatal de Meteorología [on line]. 1 de agosto de 2012 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://www.aemet.es/es/>

- **Figura 13.** Civantos, D. [on line]. 11 de octubre de 2011 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/10/11/los-percebes-se-pegan-al-casco-de-mi-barco-%C2%A1una-solucion-quiero/>

- **Figura 14.** Castells, M. [2016].

- **Figura 15.** KP Technology [on line]. 1 de noviembre de 2005 (citado 2015). Disponible en World Web: <http://www.airphotoemission.com/publications.html>

- **Figura 16.** HAIDER, M. (2012). Study the Effect of Seawater Environments and Surface Roughness on Uniform Corrosion Rate of Carbon Steel Using Neural Network Modeling. Basrah Journal for Engineering Science. Basora (Iraq).

- **Figura 17.** Castells, M. [2016].

Anexos