

Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

ESTUDIO DE LAS SOLUCIONES DE PINTURA EN ESTRUCTURAS OFFSHORE PARA EÓLICA Y DE LAS POSIBLES NUEVAS VARIANTES DE PROTECCIÓN SUPERFICIAL

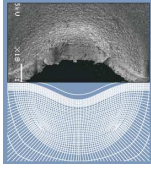
***Entidad colaboradora: IDESA Ingeniería y Diseño Europeo S .A.
Integra Desarrollo***

Tutor industrial: Jorge Villarrica Viñes

Tutor académico: Ricardo García Castañón

Departamento: Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica

***Universidad de Oviedo
Julio de 2014***



***Master interuniversitario en integridad estructural y
durabilidad de materiales, componentes y estructuras***

TRABAJO FIN DE MASTER

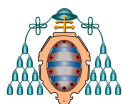
***ESTUDIO DE LAS SOLUCIONES DE PINTURA EN ESTRUCTURAS OFFSHORE
PARA EÓLICA Y DE LAS POSIBLES NUEVAS VARIANTES DE PROTECCIÓN
SUPERFICIAL***

Jorge Villarrica Viñes

*Ricardo García
Castañón*

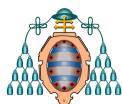
*Carolina Huerta
Fernández*

***Universidad de Oviedo
Julio de 2014***

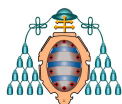


ÍNDICE

1	OBJETO	3
2	ANTECEDENTES.....	3
3	TEORÍA DE LA CORROSIÓN	7
3.1	CORROSIÓN. CONCEPTO.....	8
3.2	ELECTROQUÍMICA DE LA CORROSIÓN.....	11
3.3	CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE CORROSIÓN	13
3.4	CORROSIÓN EN AGUA MARINA DE UN ACERO AL CARBONO.....	15
4	MÉTODOS DE PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN.....	21
4.1	ADECUACIÓN DE LOS MATERIALES.....	22
4.2	MODIFICACIÓN EN EL DISEÑO.....	22
4.3	MODIFICACIÓN DEL MEDIO AGRESIVO	23
4.4	PROTECCIÓN CATÓDICA.....	25
4.4.1	PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS GALVÁNICOS O DE SACRIFICIO.....	26
4.4.1.1	FUNCIONAMIENTO.....	26
4.4.1.2	CLASIFICACION DE LOS ANODOS DE SACRIFICIO.....	27
4.4.1.3	CARACTERISTICAS DEL MATERIAL ANODICO	27
4.4.1.4	MATERIALES FRECUENTEMENTE USADOS	28
4.4.1.5	FIJACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS ÁNODOS	28
4.4.1.6	VENTAJAS DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO.....	29
4.4.1.7	DESVENTAJAS DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO	29
4.4.2	PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA	29
4.4.2.1	FUNCIONAMIENTO.....	29
4.4.2.2	VENTAJAS DE LA CORRIENTE IMPRESA	30
4.4.2.3	DESVENTAJAS DE LA CORRIENTE IMPRESA.....	30
4.4.3	ACERO GALVANIZADO	31
4.5	PROTECCIÓN ANÓDICA	31
4.6	RECUBRIMIENTOS	32
4.6.1	PREPARACIÓN DE SUPERFICIES.....	33
4.6.2	RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS	40
4.6.2.1	VEHÍCULO FIJO O LIGANTE	41
4.6.2.2	VEHÍCULO VOLÁTIL	42
4.6.2.3	PIGMENTOS.....	43
4.6.2.4	ADITIVOS	45
4.6.3	TIPOS DE PINTURAS.....	46
4.6.3.1	PROPIEDADES DE LOS DIFERENTES TIPOS DE PINTURAS.....	47
5	PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN DE UNA PIEZA DE TRANSICIÓN EN UNA ESTRUCTURA OFFSHORE	50
5.1	CARACTERÍSTICAS Y UBICACIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	50
5.1.1	ESQUEMA DE PINTADO.....	53



5.1.1.1	PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LA ESTRUCTURA.....	54
5.1.1.2	ESQUEMA DE PINTADO DE LA ESTRUCTURA.....	54
5.1.1.3	SISTEMA DE PINTADO.....	55
5.2	DETERMINACIÓN DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO PARA LA ESTRUCTURA OBJETO	59
5.2.1	ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC EN EL CASO DE UN ACERO DESNUDO	60
5.2.1.1	ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC. ZONA SUMERGIDA. ACERO DESNUDO	60
5.2.1.2	ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC. ZONA DE MAREAS. ACERO DESNUDO	68
5.2.2	ANODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO EN EL CASO DE UN ACERO DESNUDO	76
5.2.2.1	ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO. ZONA SUMERGIDA. ACERO DESNUDO	76
5.2.2.2	ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO. ZONA DE MAREAS. ACERO DESNUDO	84
5.2.3	ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC EN EL CASO DE UN ACERO PINTADO	92
5.2.3.1	ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC. ZONA SUMERGIDA ACERO PINTADO..	92
5.2.3.2	ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC. ZONA DE MAREAS. ACERO PINTADO .	99
5.2.4	ANODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO EN EL CASO DE UN ACERO PINTADO	106
5.2.4.1	ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO. ZONA SUMERGIDA. ACERO PINTADO	106
5.2.4.2	ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO PARA LA ZONA DE MAREAS.....	113
6	DISTRIBUCIÓN DE LOS ÁNODOS	120
7	NORMATIVA DE APLICACIÓN.....	120
8	PRESUPUESTO.....	123
	ANEXO.....	128



1 OBJETO

El presente trabajo fin de master tiene como objeto la protección de una estructura de acero en un medio marino. Dicha protección implica conocer la corrosión y sus efectos. El fenómeno de la corrosión hace necesario el estudio de los medios para combatirla y más cuando su actividad pone en riesgo importantes inversiones económicas. Todo ello implica un conocimiento y estudio del problema desde varias disciplinas para poder eliminar sus efectos y si ello no fuera posible minimizarlos lo máximo posible con el fin de garantizar la vida útil y segura de las estructuras.

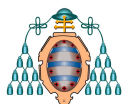
De todos los medios corrosivos, el medio marino es de los más agresivos por lo que el estudio de las posibles soluciones para proteger una estructura de acero en un medio así resulta una tarea que ha de ser desarrollada en detalle y que dadas las diferentes zonas a las que están expuestas las estructuras en este medio, es necesario la utilización de diferentes medios protectores de las mismas.

Por ello este trabajo está dividido en varios apartados en los cuales se desarrolla el concepto de la corrosión, los tipos de corrosión que existen, así como las diferentes formas de proteger una estructura frente a la misma. Finalmente se desarrolla el caso concreto de una pieza de transición de una estructura offshore, en la que se ha diseñado la forma de protección más conveniente de la misma para el tiempo de vida estimado de la estructura. Se concluye este trabajo con un presupuesto en el que se indican los costes que conlleva proteger la estructura.

2 ANTECEDENTES¹

El problema de los gases efecto invernadero es un tema conocido por todos. El Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, y otros compromisos comunitarios e internacionales de la Unión Europea establecen la necesidad y el compromiso de reducir las emisiones de gases efecto invernadero más allá del año 2012.

¹Fuente: <http://www.ewea.org/> <http://www.lorc.dk/> <http://www.cne.es/cne/Home> <http://energiasrenovadas.com/>
<http://www.un.org/> <http://www.aeeolica.org/>



Una de las formas de cumplir estos objetivos es la mayor utilización de energía procedente de fuentes renovables, existiendo normativa comunitaria como la DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009, relativa al fomento de uso de energía procedente de fuentes renovables. Por estos motivos la Unión Europea ha realizado una importante apuesta por las energías renovables, como una solución no sólo a las elevadas emisiones de gases de efecto invernadero sino también como una medida necesaria para reducir la dependencia energética.

En el conjunto de las energías renovables podemos señalar la energía eólica, la cuál es de las energías renovables la más madura y desarrollada. Genera electricidad a través de la fuerza del viento, mediante la utilización de la energía cinética producida por efecto de las corrientes de aire. Se trata de una fuente de energía limpia e inagotable, que reduce la emisión de gases de efecto invernadero y preserva el medioambiente.

La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos o hacer funcionar la maquinaria de molinos. Desde principios del siglo XX, produce energía a través de los aerogeneradores. La energía eólica mueve una hélice y, mediante un sistema mecánico, hace girar el rotor de un generador que produce energía eléctrica.

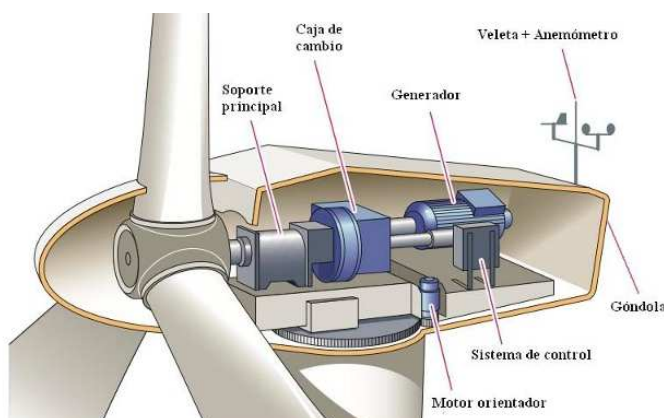
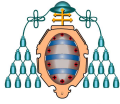


Fig. 1 Partes de un aerogenerador



Los aerogeneradores suelen agruparse en concentraciones denominadas parques eólicos, los cuales pueden ser terrestres o marinos, con el fin de lograr un mejor aprovechamiento de la energía, lo que reduce su impacto ambiental, teniendo las máquinas una vida útil de veinte años.



Fig. 2 Mapa de los parques eólicos marinos en Europa

En el caso de Europa la energía eólica marina tiene un gran potencial pudiendo ser capaz de satisfacer siete veces la demanda europea, según las estimaciones de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). Por este motivo en la actualidad están desarrollando proyectos de generación de importantes parques eólicos marinos, que se estima que serán capaces de satisfacer el 4% de la demanda eléctrica de la Unión Europea. De esta forma la industria eólica marina brinda la posibilidad de reducir la dependencia de las importaciones eléctricas de Europa y refuerza su seguridad de abastecimiento, cumpliéndose de esta forma los objetivos comunitarios europeos.

Uno de los puntos de interés que tiene los parques eólicos marinos con respecto a los parques eólicos terrestres se sitúa en la mayor capacidad productiva de las turbinas que pueden llegar a triplicar la potencia de los actuales generadores terrestres.

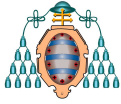


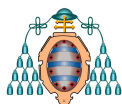
Fig. 3 Parque eólico marino

No obstante la energía eólica marina representa ya un 2% de la capacidad mundial instalada de producción eólica, según el Consejo Global de Energía Eólica (GWEC), que agrupa a empresas e instituciones del sector. Situándose más del 90% de los parques en el norte de Europa, donde hay unos 2.000 aerogeneradores en funcionamiento.



Fig. 4 Torre eólica marina

A este respecto el presente proyecto desarrolla el proceso protección de una pieza de transición de una torre eólica que se ubicará en el Mar del Norte.



3 TEORÍA DE LA CORROSIÓN²

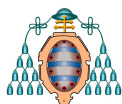
La corrosión es la causa general de la destrucción de gran parte de los materiales. La composición de la atmósfera ha cambiado como consecuencia del desarrollo industrial y el uso de combustibles (sobre todo aquellos derivados del petróleo) transformándose en más corrosiva. Por ello la atmósfera es más o menos corrosiva según las zonas, de este modo se establece una clasificación de ambientes corrosivos: industrial, tropical marino, marino templado, urbano y rural, si bien y como se desarrolla más adelante existen diferentes clasificaciones de los procesos corrosivos según diferentes criterios.

Medio	Velocidad de la corrosión ($\text{mg dm}^{-2} \text{ día}^{-1}$)		
	Acero	Zinc	Cobre
Atmósfera rural	---	0,17	0,14
Atmósfera marina	2,9	0,31	0,32
Atmósfera industrial	1,5	1	0,29
Agua de mar	25	10	8
Tierras	5	3	0,7

Fig. 5 Comparación de las velocidades de corrosión atmosférica con velocidades medias en agua de mar y tierra.

El conocimiento adecuado de los procesos corrosivos resulta necesario para la detección y prevención de este proceso, ya que sus efectos generan importantes costes tanto a nivel económico como social. A nivel económico la corrosión origina un aumento de los costes directos de los bienes y equipos, implicando según el caso el reemplazo o reposición de maquinarias, equipos e instalaciones corroídas o sus componentes, incluyendo además los costes de prevención y de protección. Entre los costes indirectos asociados a la corrosión podemos indicar a modo de ejemplo los siguientes: tiempos de paralización de plantas durante la reparación, pérdidas de eficiencia, contaminación, gastos de sobrediseño, etc. A nivel social la corrosión

² Fuente: Manual básico de corrosión para ingenieros. Félix C. Gómez de León Hijes, Diego J. Alcaraz Lorente. Universidad de Murcia; Uhlig's Corrosion Handbook. R. Winston Revie. ELECTROCHEMICAL SOCIETY SERIES; Corrosion Engineering. Mars G. Fontana. MCGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS. Materials Science and Engineering Series.



también conlleva importantes costes como puede ser aspectos relacionados con la seguridad y la salud de las personas y/o trabajadores ya que la corrosión puede generar incendios, explosiones, escape de productos tóxicos, contaminación ambiental, etc.

Finalmente indicar que la corrosión implica también un mayor uso de los recursos naturales ya que los metales proceden de minerales en los cuales el metal no se encuentra en estado puro en la mayoría de los casos.

3.1 CORROSIÓN. CONCEPTO

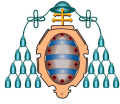
Se denomina corrosión al ataque destructivo que sufre un material, generalmente metálico, por reacción química o electroquímica con su medio ambiente (atmósfera, suelo, agua, etc.)

Esta reacción depende del entorno, la temperatura y de la concentración de las especies reactivas. Como consecuencia de la corrosión las propiedades de los materiales afectados se ven alteradas y suele haber asociada una pérdida de material.

En la definición de corrosión nos referimos a la que es sufrida por los materiales que pueden ser metálicos o no metálicos, no obstante generalmente suele definirse con el término corrosión al proceso corrosivo sufrido por los metales, utilizando para el caso de los cerámicos y los polímeros el término de degradación.



Fig. 6 Corrosión estructura offshore



Los metales se corroen ya que pocos se encuentran de forma nativa en la corteza terrestre; estos pueden encontrarse químicamente combinados formando diversos compuestos minerales, tales como óxidos, carbonatos, sulfuros, etc. Para transformar estos minerales en metales se requiere energía y mientras más energía demanda el proceso metalúrgico, mayor es la tendencia del metal a volver a su condición original. Por lo tanto el acero, el cuál está constituido por hierro y otros metales en diferente proporción los cuales les confieren unas características especiales, no es ajeno a esta situación y está expuesto a la corrosión u oxidación.

A continuación se muestran algunos ejemplos de minerales que están constituidos por óxidos de metales.



HEMATITES ROJA



Óxido de hierro.

Principal mena de hierro.



MAGNETITA

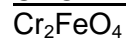


(Óxido ferroso-férrico)

Junto con la hematites es una de las menas férricas más importantes ya que contiene un 72% de hierro (es el mineral con más contenido en hierro).

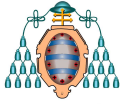


CROMITA



Mena de cromo.

El cromo es un componente del acero inoxidable y se emplea en diversas aleaciones.



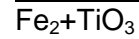
CASITERITA



Mena de estaño. Metal base de algunas aleaciones como latón y bronce.



ILMENITA



Principal mena de titanio. El titanio es utilizado como biomaterial en prótesis.



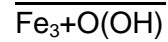
PIROLUSITA



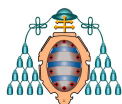
Mena más importante del manganeso. Se emplea en aleaciones del acero, cobre, zinc, aluminio, estaño y plomo. También como oxidante en la obtención del cloro, bromo y oxígeno.



GOETHITA



Mena de hierro.

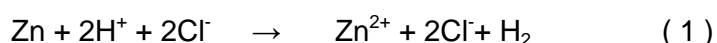


BAUXITA
 FeO(OH) y $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Principal mena de aluminio (Al_2O_3).

3.2 ELECTROQUÍMICA DE LA CORROSIÓN

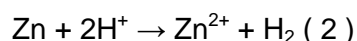
En los materiales metálicos el proceso de corrosión es normalmente electroquímico, es decir, una reacción química en la cual hay una transferencia, es decir, es una reacción química que comprende el fenómeno de oxidación y reducción.

La definición anterior de reacción electroquímica puede ser mejor comprendida observando en detalle una reacción típica de corrosión, así por ejemplo la reacción del zinc con el ácido clorhídrico, queda mejor expresada recordando que el ácido clorhídrico y el cloruro de zinc están ionizados en soluciones acuosas, por lo que podemos escribir:



Cuando la reacción se escribe en esta forma es obvio que el ión cloruro no participa en forma directa en la reacción puesto que el ión cloruro aparece en ambos miembros de la ecuación y no es alterado por la reacción de corrosión, es decir, la valencia del ión cloruro permanece sin cambio.

De acuerdo a lo anterior, la ecuación 1 se puede escribir en forma simplificada como:



Esta última ecuación indica que la corrosión del zinc en ácido clorhídrico consiste simplemente en la reacción entre el zinc y los iones hidrógeno que producen iones zinc y gas hidrógeno.

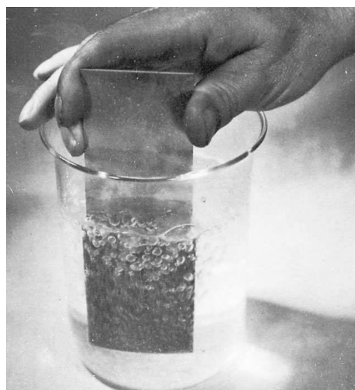
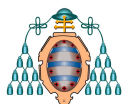


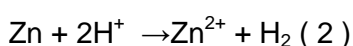
Fig. 7 Reacción de ácido clorhídrico diluido con Zn para producir gas hidrógeno

Durante esta reacción el zinc es oxidado a iones zinc es decir, la valencia del zinc se incrementa y simultáneamente los iones hidrógeno son reducidos a gas hidrógeno disminuyendo su valencia.

Por lo anterior, la reacción 2 puede ser simplificado aún más al dividirla en una reacción de oxidación y una reacción de reducción.



Cuya suma es:



Una reacción de oxidación tal como la ecuación 3, significa un incremento en el estado de oxidación o valencia con producción de electrones y en forma similar, la reacción de reducción representa una disminución en el estado de oxidación o valencia y el consumo de electrones tal y como se ve en la ecuación 4.

La suma de las reacciones 3 y 4 nos dan la reacción total (reacción 2).

En términos de corrosión, una reacción de oxidación recibe el nombre de reacción anódica, mientras que a la reacción de reducción se le denomina reacción catódica.

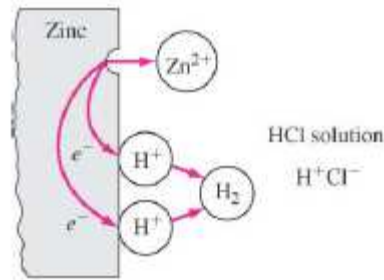
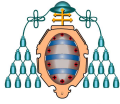


Fig. 8 Reacción electroquímica producida durante la corrosión del zinc en ácido clorhídrico

Todo proceso de corrosión necesita por lo menos una reacción de oxidación y una reacción de reducción, por lo que podemos resumir que las reacciones de corrosión son electroquímicas en naturaleza y debido a esto es posible dividir el proceso de corrosión, en reacciones anódicas y reacciones catódicas que permiten simplificar la presentación de la mayoría de los procesos.

3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE CORROSIÓN

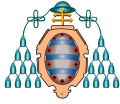
Los procesos de corrosión se pueden clasificar según criterios muy variados: por el mecanismo de ataque, según el medio corrosivo, en función de la morfología, de acuerdo con los factores mecánicos que inciden en el proceso, etc. A continuación una clasificación de la corrosión según diferentes criterios.

Por su mecanismo:

- Oxidación directa (corrosión química o seca)
- Corrosión electroquímica o húmeda

Por su medio agresivo

- Atmosférica
- De estructuras sumergidas
- De estructuras enterradas
- Por gases calientes



- Por sales fundidas
- Por ácidos, etc.

Por su morfología

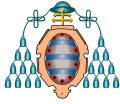
- Uniforme
- Galvánica
- Selectiva
- Por picaduras
- Intergranular
- Fisurante bajo tensión

Por las acciones físicas que suceden simultáneamente

- Erosión corrosión
- Corrosión bajo tensión
- Corrosión por cavitación
- Corrosión por frotamiento
- Corrosión-Fatiga

Por sectores industriales

- Transporte
- Aplicaciones marinas
- Construcción
- Petroquímica



- Generación de energía
- Industria alimentaria

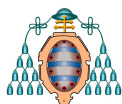
3.4 CORROSIÓN EN AGUA MARINA DE UN ACERO AL CARBONO

Teniendo en cuenta que la pieza objeto de estudio forma parte de una estructura que se situará en el mar del Norte es necesario conocer el comportamiento del acero al carbono en un medio marino. Para ello hay que tener en cuenta que una estructura puede estar expuesta a cinco diferentes zonas corrosivas dependiendo de la posición de sus partes en relación con el nivel del mar. Las cinco zonas son:

- Zona atmosférica: aquella zona que no está en contacto con el mar.
- Zona de salpicaduras: zona de alcance de las olas al romper.
- Zona de mareas: zona que está sumergida parte del tiempo por el efecto de subida y bajada de la marea.
- Zona sumergida: zona que se encuentra siempre por debajo del nivel del mar.
- Zona enterrada en el lecho marino: zona que se encuentra bajo la superficie del fondo del mar.

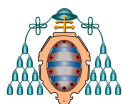
Las características de la corrosión y el comportamiento corrosivo del acero son diferentes en cada zona. Existen métodos para prevenir la corrosión marina, no obstante los sistemas de protección en los ambientes marinos son particularmente susceptibles de daño y deterioro, dejando un considerable tiempo de exposición a la corrosión antes de su detección y reparación.

La velocidad de corrosión de un acero en agua marina se ve afectada por varias variables que son la salinidad, la concentración de oxígeno disuelto, la temperatura, el pH, el contenido en carbono, la contaminación y la presencia de organismos biológicos. Las características del agua del mar con relación a estas variables se muestran en la tabla 1:



<p><u>Salinidad</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • En mar abierto: variación pequeña 32-36 ppt • Cerca de las desembocadura de ríos: variación pequeña • Con la profundidad: variación muy pequeña
<p><u>Concentración de oxígeno disuelto</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aguas superficiales: cerca del equilibrio de saturación del oxígeno atmosférico a una temperatura dada (6ppm en los Trópicos -11ppm en el Ártico. Puede estar supersaturada por la fotosíntesis de las plantas marinas llegando a alcanzar el 200% y por la concentración de burbujas de aire (10%) • Variación con la profundidad: tiende a estar poco saturada debido o al consumo por la oxidación bioquímica de la materia orgánica, pasando por un mínimo a profundidades intermedias, es decir a unos 400 o 2400 m de profundidad
<p><u>Temperatura</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aguas superficiales: En el océano abierto, las variaciones son del rango de -2 a 35°C dependiendo de la latitud, estación y las corrientes marinas. • Variación con la profundidad: depende de la localización la variación que puede experimentar la temperatura con respecto a la profundidad y a la estación.
<p><u>pH</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aguas superficiales: Se encuentra entre 7,5 y 8,3 en el océano abierto, dependiendo de la concentración de CO₂ disuelto. Está determinado por el intercambio de aire de mar y de la fotosíntesis de las plantas. La actividad microbiológica afecta el valor de pH; así se tendrán valores de pH bajos por la formación de CO₂ a través del proceso de oxidación bioquímica y valores altos de pH por la reducción de CO₂ a través del proceso de fotosíntesis afectada por los contaminantes en las aguas costeras. • Variación con la profundidad: tiende a mostrar un perfil similar que el del oxígeno disuelto (la oxidación biomecánica consume el oxígeno disuelto y genera CO₂ reduciendo los niveles de pH.)
<p><u>Carbono</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aguas superficiales. Casi siempre supersaturada con respecto a CaCO₃ (200-500%) favorecida por los altos valores de pH y las temperaturas moderadas. • Variación con la profundidad: El estado de saturación con respecto a CaCO₃ decrece como resultado de las bajas temperaturas y el pH. Poca saturación en aguas profundas (200-300m)
<p><u>Contaminación</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • H₂S: puede llegar a 50ppm o más en aguas contaminadas en estuarios, desembocadura de ríos, puertos, etc. • Amoniaco: puede ser alta en las aguas costeras y puertos.
<p><u>Organismos biológicos</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de películas bacterianas por las bacterias. • Crecimiento de vegetación a partir de esporas. • Adhesión de animales (gusanos, percebes, etc.)

Tabla 1 Características del agua del mar con relación a diferentes variables



La temperatura de las aguas superficiales de los océanos varía principalmente con la latitud. La concentración de oxígeno en equilibrio en agua en función de la temperatura y la salinidad se muestra a continuación.

Temperatura °C	Solubilidad del oxígeno (ppm)					
	0	8	16	24	31	36
0	14,6	13,9	13,1	12,4	11,8	11,4
5	12,5	11,9	11,3	10,7	10,2	9,9
10	10,9	10,4	9,8	9,4	8,9	8,7
15	9,5	9,1	8,7	8,2	7,9	7,7
20	8,5	8,1	7,7	7,3	7,0	6,8
25	7,6	7,2	6,9	6,6	6,3	6,2
30	6,8	6,5	6,2	6,0	5,7	5,6

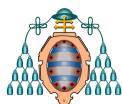
Tabla 2 Concentración de oxígeno en equilibrio en agua en función de la temperatura y la salinidad

El coeficiente de difusión del oxígeno, aumenta con el incremento de la temperatura y velocidad de corrosión del acero a una concentración de oxígeno dado se duplica aproximadamente por cada 30°C de incremento de temperatura. Debido a los efectos de compensación de la temperatura con respecto a la solubilidad de oxígeno y el coeficiente de difusión, la velocidad de corrosión del acero en agua de mar es relativamente independiente de la temperatura.

La película formada por los productos de corrosión sobre la superficie del acero puede servir en mayor o menor medida como barrera a la difusión del oxígeno y disminuir la velocidad de corrosión del acero.

Las diferencias en la velocidad de corrosión del acero en condiciones de inmersión continua en agua de mar en diferentes lugares de todo el mundo son relativamente pequeñas. Esto se debe a que los factores de control se compensan de algún modo.

No obstante hay casos en los que los valores de la velocidad de corrosión pueden ser altos o bajos. Por ejemplo, la velocidad de corrosión puede ser muy baja debido a que la superficie es cubierta completamente por la incrustación de organismos marinos.



Las variaciones de la salinidad, (desembocadura de los ríos o la alta evaporación) afectan a la concentración de oxígeno en el agua de mar, y por lo tanto, la velocidad global de la corrosión. Los contaminantes en el agua cerca de la costa afectan a la corrosión por el cambio de la concentración de oxígeno y/o las características de la película protectora de productos formada.

En la figura 8 se muestra la velocidad de corrosión del acero en estado de inmersión continua en agua de mar. En el eje abscisas se muestra el tiempo de exposición del acero en las condiciones de inmersión para un periodo de uno a cuarenta años y en el eje de ordenadas la velocidad de corrosión en mm/año.

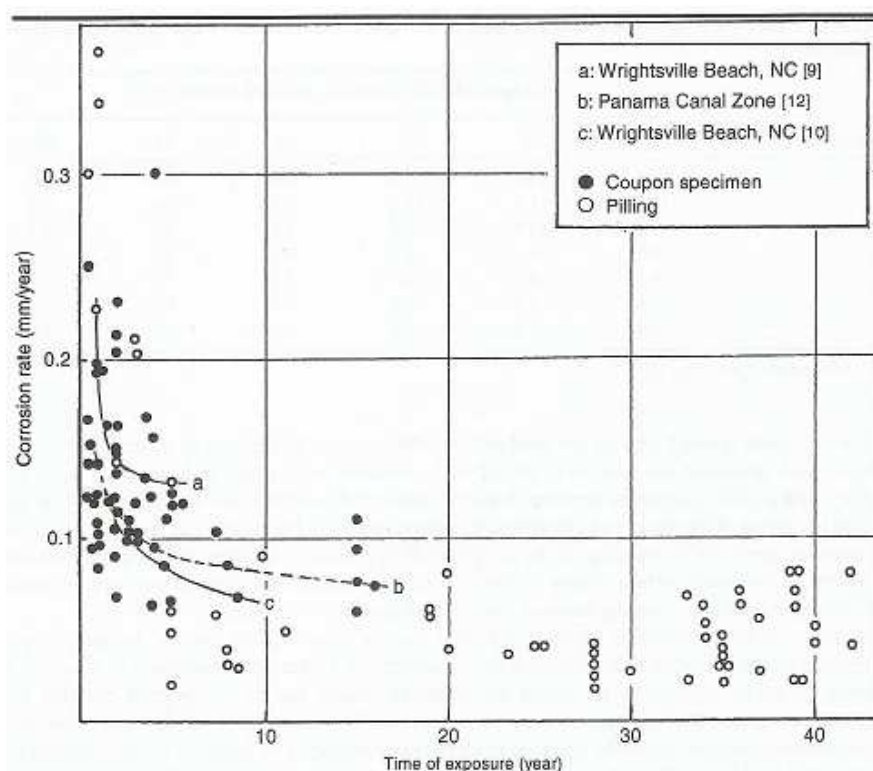
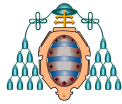


Fig. 9 Velocidad de corrosión del acero en estado de inmersión continua en agua marina

Las velocidades de corrosión van desde 0,02 a 0,37 mm/año, siendo la velocidad media de 0,1mm/año. Como se puede observar la velocidad media de las velocidades de corrosión en los primeros cinco años es de 0,14 mm/año. Observando las velocidades de corrosión por periodos de tiempo, se observa que los valores más elevados se sitúan al principio y van disminuyendo a mediada que transcurre el tiempo.



La corrosión por picaduras en una estructura de acero sumergida es una es producida por las células de aireación diferencial que se forman debido a la falta de uniformidad de las películas de productos de corrosión o la cobertura irregular de organismos incrustantes en la superficie. Las cascarillas de laminación, que no se hayan eliminado antes de la exposición al agua de mar, aceleran la corrosión en áreas descubiertas a través de la acción galvánica, produciéndose picaduras. La acción galvánica tiende a disminuir con el tiempo debido al desarrollo de depósitos calcáreos aislantes como resultado de la reacción catódica en la superficie y también porque la cascarilla de laminación es socavada por los productos de corrosión que hacen que se resquebraje por fuera. Por esta razón, el efecto de la cascarilla de laminación es más pronunciado durante los primeros tiempos de exposición. La velocidad de corrosión por picaduras es de 0,25-0,38 mm / año pasando a un valor de 0,5 mm / año debido a la presencia de la cascarilla de laminación, la velocidad de corrosión por picaduras desciende con el tiempo.

Las velocidades de corrosión en la zona correspondiente a las mareas que pasa por periodos de inmersión y periodos de exposición a la atmósfera y la zona de salpicaduras poseen unos valores elevados debido a la humectación constante.

En el caso de la zona de mareas el ataque de la corrosión se produce principalmente durante los periodos de exposición a la atmósfera, debido a la presencia de la película de agua de mar fina y un abundante suministro de oxígeno, estando la zona de salpicaduras bajo estas condiciones todo el tiempo.

En la siguiente figura se expone la velocidad de corrosión correspondiente a las cinco zonas en relación con el nivel del mar:

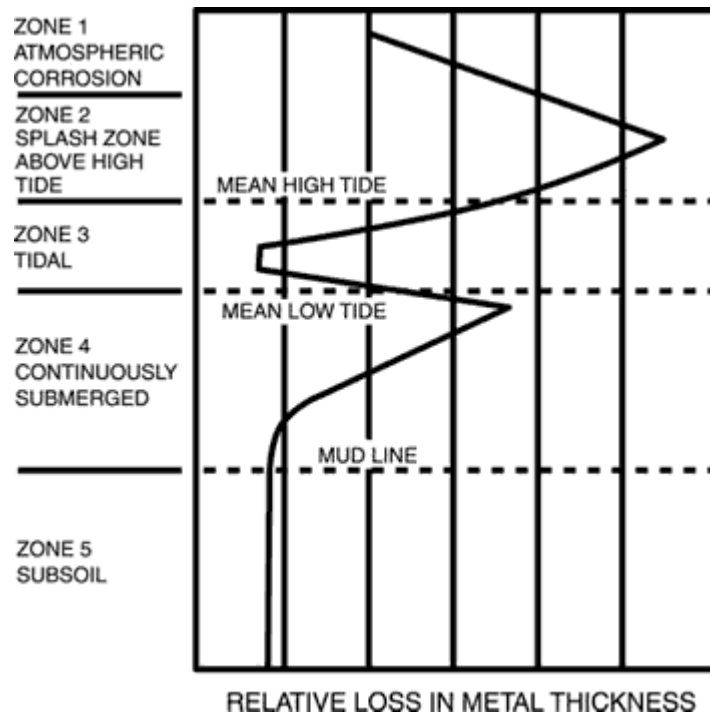
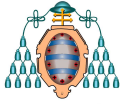
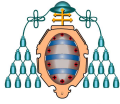


Fig. 10 Velocidad de corrosión en función de las zonas marinas

Se observa en la zona de salpicaduras la velocidad de corrosión es elevada. No obstante la velocidad de corrosión de la zona de mareas es baja. Se considera que la baja velocidad de corrosión en la zona de mareas es el resultado de protección galvánica que ejerce la parte superior de la zona sumergida, la cual muestra un pico a la corrosión. La parte en la zona de mareas actúa como el cátodo probablemente porque los productos de corrosión (óxidos de hierro) se oxidan a estados de oxidación más altos durante los períodos de exposición a la atmósfera, lo que resulta en un potencial de corrosión más noble. Entonces, cuando la parte en la zona de marea se sumerge durante los períodos de marea alta, actúa como cátodo, con la reducción de los óxidos en su superficie. Si la pila está recubierta con sustancias aislantes eléctricas, tales como recubrimientos orgánicos, el acero expuesto a defectos de recubrimiento en la zona de mareas sólo corroe tan severamente como en la zona de salpicaduras.

No siempre se observan altas tasas de corrosión cerca de la parte superior de la zona sumergida. Existen estudios que indican que la corrosión por debajo del nivel del mar se puede reorganizar en tres tipos:



- Tipo 1: pico agudo de corrosión dentro de varias décimas de metros por debajo del nivel del agua baja (velocidad de corrosión; 0,5-1,0 mm/año) y corrosión leve debajo de este nivel (velocidad de corrosión; $\leq 0,1$ mm/año)
- Tipo 2: velocidad de corrosión más alta justo por debajo del nivel del agua baja (0,1-0,2 mm/año) y disminuye gradualmente con la profundidad.
- Tipo 3: velocidad de corrosión baja por debajo del nivel de agua ($\leq 0,1$ mm/año)

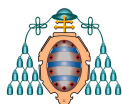
4 MÉTODOS DE PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN³

El estudio de la corrosión y las medidas de protección frente a ella comienzan a estudiarse a finales del siglo XVIII y comienzos del XIX. Los métodos de protección frente a la corrosión pueden clasificarse según los siguientes aspectos:

- Adecuación de materiales
- Modificación del diseño
- Modificación del medio
- Protección catódica
- Protección anódica
- Recubrimientos

A continuación se desarrolla cada uno de los puntos expuestos.

³ Fuente: Manual básico de corrosión para ingenieros. Félix C. Gómez de León Hijes, Diego J. Alcaraz Lorente. Universidad de Murcia; Uhlig's Corrosion Handbook. R. Winston Revie. ELECTROCHEMICAL SOCIETY SERIES; Corrosion Engineering. Mars G. Fontana. MCGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS. Materials Science and Engineering Series. <http://www.hempel.es/> <http://www.zinetti.com/>



4.1 ADECUACIÓN DE LOS MATERIALES

El primer paso para prevenir la corrosión es seleccionar el metal o aleación más adecuada para un medio corrosivo específico. Por lo que es importante determinar los agentes corrosivos que actuarán para minimizar los efectos de la corrosión.

Aparte de la selección del material hay que tener en cuenta los procesos que sufrirá este durante la fabricación de la estructura o componente, como pueden ser los tratamientos térmicos, las uniones, juntas o soldaduras que tendrá ya que pueden originar zonas más sensibles a los procesos corrosivos. En general para seleccionar un metal o aleación:

- Utilización de aleaciones de níquel y cromo en los medios reductores como son los ácidos y las soluciones acuosas libres de aire.
- Utilización de aleaciones que contengan cromo en los medios oxidantes.
- Utilización de titanio y sus aleaciones en los medios muy oxidantes.

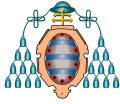
Otro punto a tener en cuenta son las características de la capa superficial de productos formada.

Para un determinado medio, se puede formar sobre el metal una capa superficial de productos de reacción, la cuál inhibe las reacciones posteriores, o éstas tienen lugar a una velocidad muy lenta, este fenómeno se denomina pasivación. El metal se comporta como si tuviese un potencial electroquímico más noble, es decir mucho menos reactivo y entonces se dice que el metal es pasivo.

4.2 MODIFICACIÓN EN EL DISEÑO

El diseño de la estructura es frecuentemente tan importante como la elección de los materiales de construcción. En la fase de diseño hay que satisfacer no sólo los aspectos mecánicos, térmicos, etc. del componente o estructura sino también todos los factores que intervienen en un proceso corrosivo como son el acabado superficial, la ausencia de huecos, la exposición a la humedad, los gradientes térmicos, etc.

Aspectos a tener en cuenta en el diseño son:



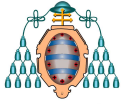
1. En uniones de carácter permanente, utilizar preferiblemente soldaduras en lugar de remaches ya que las uniones remachadas facilitan los procesos de corrosión por grieta.
2. Diseñar, teniendo en cuenta que aquellos componentes que se conoce que fallarán antes, de tal forma que dichos componentes sean accesibles de forma fácil y segura pudiendo ser éstos reparados o sustituidos.
3. Evitar la concentración de tensiones, sobre todo cuando se utilicen materiales susceptibles al agrietamiento por corrosión bajo tensión.
4. Evitar el contacto eléctrico entre metales disimilares para evitar procesos de corrosión galvánica. Si es posible, utilizar materiales similares a través de toda la estructura, o aislar diferentes materiales entre sí.
5. Especificar los procedimientos de control de calidad en su caso.
6. Asegúrese de que se cumplan todos los códigos y normas pertinentes.
7. Especificar los procedimientos de ensayo y almacenamiento de piezas y equipos.

La regla más general de diseño es: evitar la heterogeneidad. Metales disimilares, gradientes térmicos, tensiones desiguales, y otras diferencias son los puntos que favorecen los daños por corrosión. Por lo tanto, en el diseño hay que tratar de hacer que todas las condiciones sean lo más uniformes posibles en todo el sistema.

4.3 MODIFICACIÓN DEL MEDIO AGRESIVO

Para proteger a los metales o aleaciones en un determinado medio agresivo hay que tener en cuenta la naturaleza del medio agresivo y el estado en el que se encuentra dicho medio (gaseoso, líquido o sólido.)

Medio gaseoso: tiene importancia la temperatura, según sea ésta estaremos en corrosión seca o húmeda. Si existiese condensación del medio (se forma un electrolito líquido sobre la superficie del material) hay que tener en cuenta los siguientes factores:

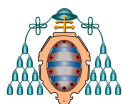


la temperatura, la humedad relativa, los componentes volátiles del proceso y los agentes volátiles contaminantes.

Por otro lado si el medio es líquido se puede proceder de varias formas como es disminuyendo la conductividad, modificando el pH, consiguiendo la pasivación del metal o eliminando o disminuyendo el oxígeno disuelto.

A continuación se muestran algunas formas de reducir los efectos del medio sobre la corrosión:

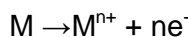
1. Bajando la temperatura del medio disminuye la velocidad de corrosión. Una de las excepciones sucede con el agua de mar, que en ebullición es menos corrosiva que cuando está fría. Esto es debido a que la solubilidad del oxígeno disminuye al aumentar la temperatura.
2. La velocidad de los fluidos aumentan la velocidad de la corrosión, por lo que disminuyendo la velocidad del fluido disminuye la velocidad de corrosión. Excepción a este caso sucede con los metales o aleaciones que pasivan.
3. Disminuir o eliminar el oxígeno en las disoluciones ya que a mayor concentración de oxígeno mayor velocidad de corrosión en las disoluciones acuosas. Excepción sucede en los metales y aleaciones que pasivan.
4. Disminuyendo la concentración de iones agresivos. En el caso de los aceros inoxidable disminuyendo la concentración del ión Cl^- en una solución salina, implica una disminución de la corrosión.
5. Adicionando al electrolito agentes que retarden o inhiban las reacciones, estos agentes reciben el nombre de inhibidores de la corrosión. Los inhibidores de la corrosión se aplican en su mayoría a metales y aleaciones expuestas a soluciones acuosas. Cuando el medio corrosivo es aire húmedo, especialmente en ambientes marinos, los inhibidores suelen utilizarse en fase vapor que deberán mantener el contacto con la superficie metálica para ejercer su acción protectora. En materiales expuestos a la intemperie, éste deberá encontrarse en fase sólida, en forma de grasas, pinturas u otro tipo de recubrimientos.



4.4 PROTECCIÓN CATÓDICA

La utilización de la protección catódica es anterior al desarrollo de la ciencia de la electroquímica. Humphry Davy utilizó protección catódica en buques de guerra británicos en 1824. Los principios de protección catódica se pueden explicar considerando la corrosión de un metal M típico en un ambiente ácido.

La corrosión electroquímica sólo se produce en el ánodo de una pila de corrosión. Para evitar la corrosión de un metal hay que hacer que éste se comporte como si fuese un cátodo ya que el cátodo no se corroe. Dada una reacción de oxidación:



Es preciso aportar la cantidad suficiente de carga negativa para que el equilibrio de la reacción se desplace netamente hacia la izquierda. Por tanto, si mediante una fuente exterior se suministra corriente eléctrica a través de un ánodo auxiliar, se conseguirá polarizar catódicamente el metal a proteger.

La corriente suministrada, partiendo del ánodo auxiliar, entra en el metal polarizándolo catódicamente.

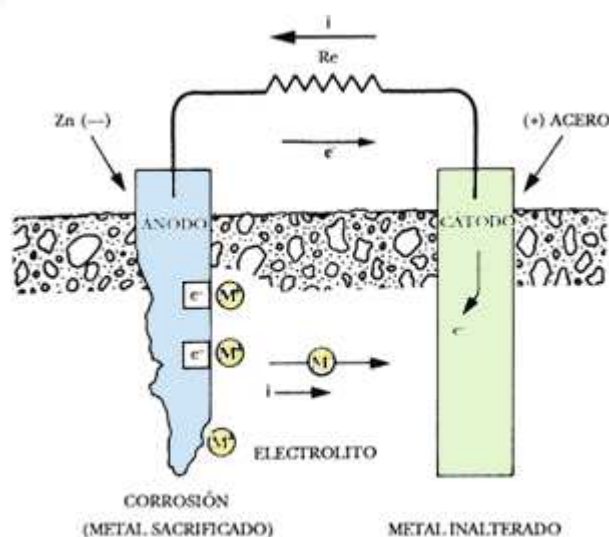
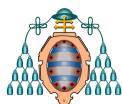


Fig. 11 Esquema de sistema de protección por ánodo de sacrificio



Mientras el potencial catódico alcanzado sea distinto del potencial anódico a circuito abierto, seguirán habiendo pilas locales de corrosión, es decir unas zonas se comportan anódicamente respecto de otras que lo hacen catóticamente. Por lo que seguirá habiendo un cierto grado de corrosión.

Cuando la corriente suministrada es capaz de polarizar las áreas catódicas hasta alcanzar el valor del potencial en circuito abierto de las áreas anódicas, entonces se consigue mantener una superficie equipotencial en todo el metal y, en consecuencia, cesa la corriente de acción local y con ello la corrosión.

Los sistemas de protección catódica pueden ser mediante ánodos de sacrificio, mediante corrientes impresas o mediante acero galvanizado.

4.4.1 PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS GALVÁNICOS O DE SACRIFICIO

4.4.1.1 FUNCIONAMIENTO

Teniendo en cuenta la serie electroquímica de los metales, un metal tendrá carácter anódico con relación a otro, si se encuentra por encima de él en esta serie, así por ejemplo, el hierro será anódico respecto al cobre y catódico respecto al zinc. En este método se conecta el metal que se trata de proteger a otro menos noble que él, de manera que el metal que actúa como ánodo se sacrifica a favor del que actúa de cátodo.

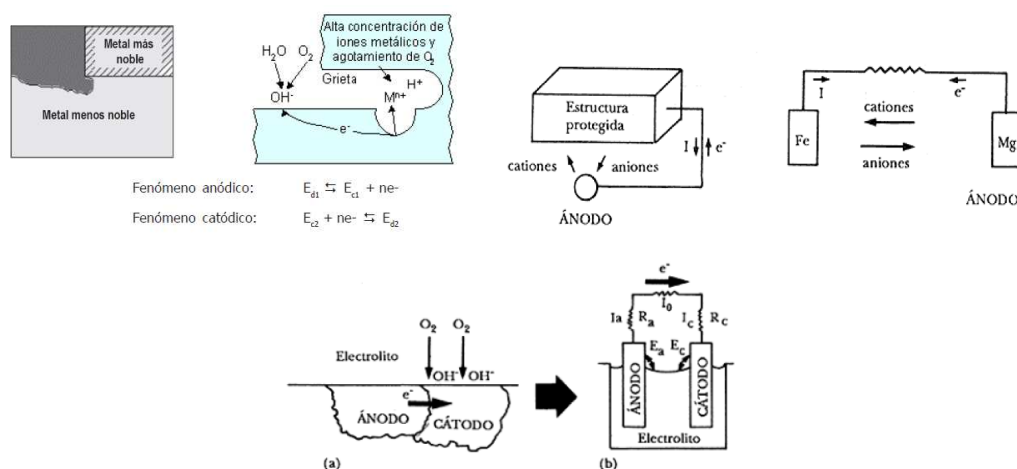
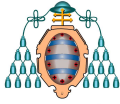


Fig. 12 Corrosión y Mecanismo de la corrosión



4.4.1.2 CLASIFICACION DE LOS ANODOS DE SACRIFICIO

Los ánodos de sacrificio se pueden clasificar en función del material con que se fabrican, su forma, y el sistema de fijación al elemento que ha de ser protegido.

4.4.1.3 CARACTERISTICAS DEL MATERIAL ANODICO

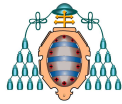
Las propiedades que debe presentar un material anódico son las siguientes:

- Un potencial de disolución lo suficientemente negativo como para polarizar la estructura del material a proteger, en el caso del acero -0,8V. Sin embargo, el potencial no debe ser excesivamente negativo ya que eso motivaría un gasto innecesario de corriente.

Iones en solución	Potencial (voltios)	Iones en solución	Potencial (voltios)
Li+	- 3022	Co++	- 0,29
Rb+	- 2924	Ni++	- 0,22
K+	- 2925	Sn++	- 0,136
Ca++	- 2,87	Pb++	- 0,129
Na+	- 2715	H+	0,000
Mg++	- 1866	Bi+++	+ 0,226
Al+++	- 1,67	Cu++	+ 0,344
Zn++	- 0,762	Te++++	+ 0,558
Cr++	- 0,71	Hg++	+ 0,798
Fe++	- 0,441	Ag+	+ 0,799
Cd++	- 0,397	Pt++	+ 1,2
Ti+	- 0,336	Au+++	+ 1,12

Tabla 3 Serie electroquímica de los metales

- Una tendencia pequeña a la polarización, el material no debe desarrollar películas pasivantes protectoras y debe tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.
- Un elevado rendimiento eléctrico, es decir, cantidad de intensidad en amperios desprendida durante una hora por hora por kilogramo de material.
- Un proceso de corrosión uniforme.
- Fácil adquisición.
- Facilidad para ser fundido en diferentes formas y tamaños.



- Coste razonable, de modo que pueda lograrse una protección a un coste bajo.

4.4.1.4 MATERIALES FRECUENTEMENTE USADOS

Los metales utilizados comúnmente son el magnesio, el aluminio y el zinc.

Ánodo de zinc

Es el material anódico mas frecuentemente utilizado. Los ánodos de zinc llevan siempre una pequeña cantidad de cadmio, para que se pueda producir la activación del ánodo, si la aleación no llevase cadmio serian inservibles.

Ánodo de magnesio

Principalmente se emplean para la protección de estructuras que requieren de una polarización rápida, o en medios agresivos de resistividad elevada, como los suelos.

Tienen el inconveniente de volverse muy activos en agua salada, por lo que se consumen muy rápidamente.

Ánodo de aluminio

Si bien es un material que dispone de características electroquímicas interesantes, su uso ha sido posterior, debido a la dificultad de obtener aleaciones adecuadas.

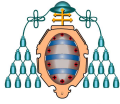
Una de las ventajas de su instalación es que seria necesario utilizar un tercio del peso que se usaría en una instalación con zinc.

Tiene la desventaja de pasivarse en condiciones de agua dulce o baja salinidad.

4.4.1.5 FIJACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS ÁNODOS

Los ánodos son normalmente instalados después de la aplicación del recubrimiento a las estructuras. Los ánodos se fijan en la estructura a proteger por distintos procedimientos, con la ayuda del alma que los atraviesa, tipo platina, varilla o barra de acero que se suelda o con grapas, espárragos o simplemente atornillados; en este caso la corriente calculada disminuirá en un 20 ó 25% aproximadamente.

Su distribución está en función del área que protege cada ánodo, en batería o agrupados, dependiendo de las condiciones particulares de la zona. Para tuberías



submarinas se suelen soldar a ellas a lo largo de las mismas, sobre su parte superior. En los casos de estructuras donde el agua tenga poco movimiento se pueden dejar colgados de un cable de acero que además de soportarlos sirve para conectarlos a la estructura a proteger en una parte aérea (más fácil de cambiar cuando se gastan).

4.4.1.6 VENTAJAS DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO

- No se necesita una fuente de corriente externa.
- Fácil de instalar.
- No necesita control durante el funcionamiento.
- No suelen haber problemas de sobreprotección.
- Fácil obtener una distribución homogénea de corriente sobre toda la estructura.

4.4.1.7 DESVENTAJAS DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO

- No permite vencer una fuerte caída ohmica.
- Uso restringido a medios conductores y a estructuras recubiertas.

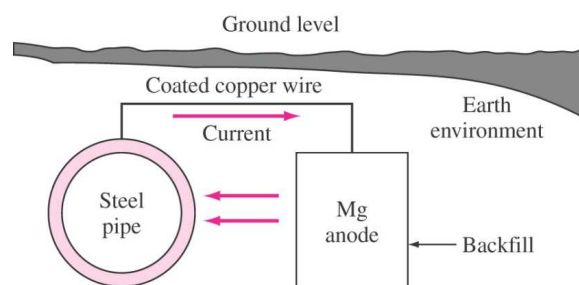
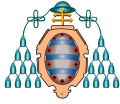


Fig. 13 Protección catódica mediante ánodos de sacrificio

4.4.2 PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA

4.4.2.1 FUNCIONAMIENTO

En este sistema de protección catódica se utiliza la corriente suministrada por una fuente continua para imprimir la corriente necesaria para la protección de la estructura.



Consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua y el positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito.

Los electrodos auxiliares se hacen de chatarra de hierro, aleación de ferro silicio, grafito, etc.

Es indispensable la existencia del electrolito que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico.

4.4.2.2 VENTAJAS DE LA CORRIENTE IMPRESA

- Permite vencer caídas de intensidad altas.
- Se pueden utilizar para proteger estructuras grandes, no recubiertas en medios poco conductores.
- Se necesitan pocos ánodos.
- El nivel de protección del sistema puede ser seguido en tiempo real.

4.4.2.3 DESVENTAJAS DE LA CORRIENTE IMPRESA

- Necesidad de una fuente de corriente externa.
- Peligro de sobreprotección si se producen fallos.
- Dificultad para conseguir niveles de protección homogéneos en estructuras complejas.
- Costos de instalación más elevados.

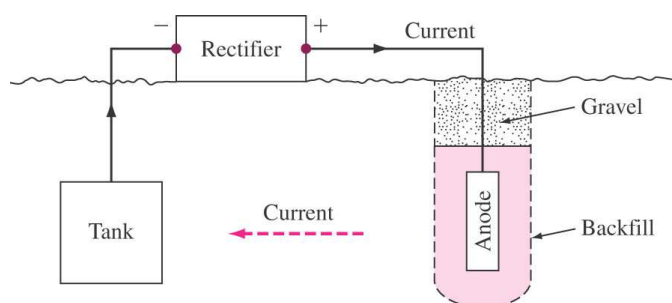
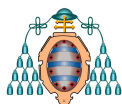


Fig. 14 Protección catódica mediante corrientes impresas



4.4.3 ACERO GALVANIZADO

Es una forma de recubrimiento del acero con una capa fina de zinc metálico. En este sistema se combinan las propiedades de barrera de una capa con algunos de los beneficios de la protección catódica. Si la capa de zinc está rayada o dañada a nivel local y el acero está expuesto, cerca del recubrimiento de zinc se forma una pila galvánica con el acero expuesto que lo protege de la corrosión, pudiéndose considerar como una forma de protección catódica localizada, en la que el zinc que recubre al acero actúa como un ánodo de sacrificio.

4.5 PROTECCIÓN ANÓDICA

La protección anódica consiste en la polarización de la pieza metálica hasta un potencial fijo más positivo que el de equilibrio metal/disolución. En estas condiciones, la velocidad de corrosión debería incrementarse notablemente pero en determinados materiales esta velocidad es prácticamente cero.

Esto es debido a que al aumentar el potencial aplicado a la pieza, se forma una capa superficial de óxidos metálicos que “impermeabilizan” al metal frente al medio agresivo en el que se encuentra. Esta capa de óxidos debe poseer ciertas características físicas y químicas para proteger al metal de forma efectiva.

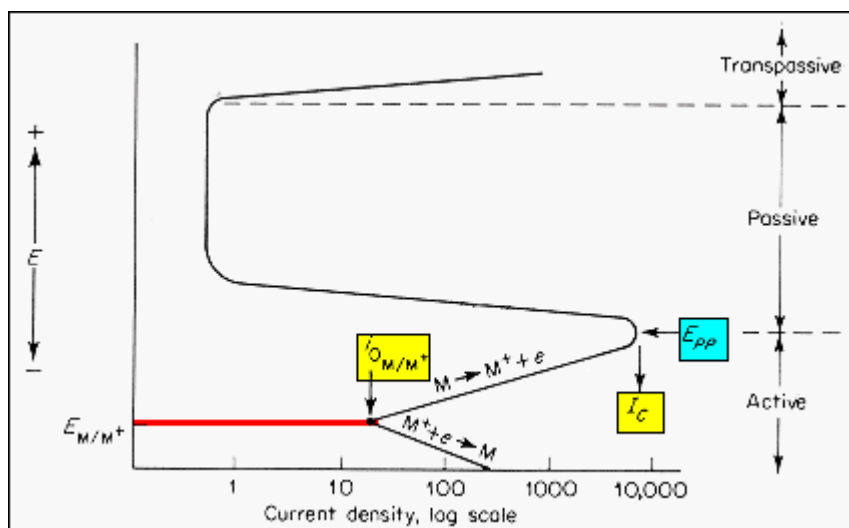
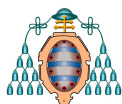


Fig. 15 Comportamiento frente a la corrosión del Fe, Cr, Ni, Ti y sus aleaciones



La curva de polarización del material que debe ser protegido puede usarse para decidir si es más conveniente una polarización anódica o catódica. Si el sistema presenta una región pasiva claramente distinguible se puede proteger anódicamente. La curva de polarización de un sistema que se pasiva se caracteriza por presentar tres dominios claramente distinguibles: para las tensiones más negativas la densidad de corriente crece con la polarización: se corresponde con la disolución anódica del metal. Para potenciales superiores a un valor bien definido (E_{pp} : potencial de pasivación primario) la densidad de corriente se convierte en despreciable.

Por encima de la tensión mínima de desprendimiento de oxígeno, la densidad de corriente crece de nuevo con la polarización.

Para que un metal esté protegido su potencial debe desplazarse a valores positivos hasta la zona de pasivación. Es imprescindible no exceder el potencial de transición entre las zonas pasiva y transpasiva o de descarga de oxígeno, por lo que normalmente se usa un potencióstato que hace a la vez de fuente de corriente.

Una característica típica de la protección anódica es que la fuente de corriente debe proporcionar corrientes altas para que ocurra el proceso de pasivación, mientras que sólo se requiere una pequeña corriente para mantener la protección. También es posible usar corrientes protectoras intermitentes si el sistema permanece pasivo durante un tiempo suficientemente largo.

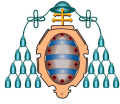
4.6 RECUBRIMIENTOS ⁴

Una de las formas de protección de los metales frente a la corrosión es la aplicación de un recubrimiento protector a los materiales. Estos se pueden clasificar en recubrimientos metálicos, recubrimientos inorgánicos (esmaltes vítreos, revestimientos de vidrio, esmaltes de porcelana, recubrimientos de cemento y recubrimientos obtenidos por transformaciones químicas) y recubrimientos orgánicos.

Los mecanismos generales de protección que ejerce un recubrimiento pueden ser:

- Como barrera impermeable (agentes atmosféricos, productos químicos, etc.)

⁴ <http://www.invertaresa.com/> <http://www.nervion.com>. <http://www.pce-iberica.es/>



- Como pasivador (inhibiendo los procesos corrosivos).
- Como protector catódico (actuando como ánodo de sacrificio).



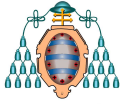
Fig. 16 Pérdida de recubrimiento protector en una estructura offshore

4.6.1 PREPARACIÓN DE SUPERFICIES

La preparación de la superficie tiene como objeto conseguir una superficie rugosa para obtener la unión mecánica de la pintura a la superficie a proteger; de esta forma habrá que subsanar los defectos de construcción: cantos vivos, grietas, cordones irregulares de soldadura, etc. así como eliminar de la superficie de cualquier elemento extraño como pueden ser suciedad, óxidos, aceite, grasas, ceras y otras impurezas; es decir la superficie ha de estar limpia y ser rugosa antes de proceder al pintado.

Existen diferentes métodos para conseguir estos objetivos.

- Lavado con agua dulce. Se realizará para eliminar las sales solubles (cloruros, sulfatos de hierro, etc.) que pueden producir ampollas.
- Los cantos vivos, cordones de soldadura y otros defectos se deben redondear mediante muelas de esmeril, discos abrasivos, etc.
- El óxido, subproductos de corrosión, como la calamina y los restos de pintura si los hubiese se eliminan por cepillado, rasqueteado ó picado manual ó mecánico o por chorreado con abrasivos.



- Otros productos como grasas, aceites, etc. que pueda haber sobre la superficie a pintar se eliminan mediante un lavado con detergentes.

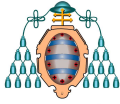
El chorreado abrasivo es uno de los métodos e más utilizados y se emplea para eliminar el óxido y obtener una superficie con una rugosidad que permita la correcta adherencia del recubrimiento.

El **chorreado** consiste en la proyección de materiales abrasivos a gran velocidad sobre la superficie de un sustrato, de tal forma que el impacto de dichos abrasivos limpia la superficie generando además cierta rugosidad favorable para la adherencia y el anclaje de las futuras capas de pintura. La forma de aplicación del chorreado puede ser de varios tipos: el chorreado con centrifugación, el chorreado por aire comprimido y el chorreado con aspiración.

Uno de los factores a considerar es escoger el abrasivo más apropiado, ya que utilizando uno u otro tipo se obtendrá un grado de rugosidad distinto, además de este resultado final de la superficie a tratar es necesario tener en cuenta las características del material a tratar que permitan o no el uso de un abrasivo en concreto. Entre los diferentes abrasivos podemos destacar los siguientes:

- Perdigones: las partículas son prácticamente esféricas y sólidas y no deben contener mas de la mínima cantidad de caras irregulares
- Granalla: las partículas muestran una buena granulometría y no deben tener “redondeces”. A menos que se especifique de otra forma, debe usarse granalla mineral.
- Arena de sílice: es el más utilizado de todos los abrasivos debido a su costo razonable y a su buen acabado, siendo necesario para esto usar una arena con un 90% o más de sílice, consiguiendo también una limpieza más efectiva.

Según el tipo de recubrimiento que se aplique a la superficie se exigirá un nivel de rugosidad determinado; Las siguientes normas que se ocupan del control de la rugosidad: DIN 4762, DIN 4768, DIN 4771, DIN 4775. Para conocer el nivel de rugosidad alcanzado será necesaria la utilización de unos instrumentos



denominados rugosímetros. Los rugosímetros indican en μm la profundidad de la rugosidad Rz y el promedio de rugosidad Ra.



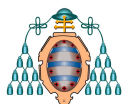
Fig. 17 Rugosímetro portátil PCE-RT1200

Las unidades de medida más utilizadas son Ra y Rz y definen lo siguiente:

- Ra: El valor promedio de rugosidad en μm es el valor promedio aritmético de los valores absolutos de las distancias del perfil de rugosidad de la línea intermedia de la longitud de medición. El valor promedio de rugosidad es idéntico a la altura de un rectángulo donde su longitud es igual a la longitud total y esto a su vez es idéntico con la superficie de la suma que existe entre el perfil de rugosidad y la línea intermedia.
- Rz: Promedio de la profundidad de la rugosidad en μm (promedio aritmético de cinco profundidades singulares consecutivas en la longitud de medición).

Los grados de limpieza de superficies metálicas, están especificados por varias normas, siendo la más extendida la norma SIS 055900 SWEDISH, transformada posteriormente en ISO 8501-1: 1988, considerando los grados de preparación de la superficie en relación con el estado inicial del acero a pintar. Estas normas se refieren a acero envejecido, pero que nunca ha sido tratado con pintura.

La norma ISO 8501-1 identifica cuatro condiciones iniciales para acero: A, B, C, D:





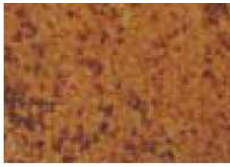

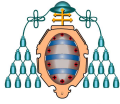
A		Superficies de acero completamente recubierto con cascarilla de laminación o calamina y con trazas de óxido. (El grado A es normalmente el que presenta el acero poco tiempo después de su laminación en caliente).
B		Superficies de acero que ha iniciado su corrosión y de la que ha empezado a desprenderse la cascarilla de laminación (El grado B es normalmente el estado de una superficie de acero laminado en caliente después de haber permanecido expuesta a la intemperie, sin protección, en una atmósfera medianamente corrosiva, durante 2 ó 3 meses).
C		Superficie de acero de la que la corrosión ha hecho saltar la totalidad de la cascarilla de laminación, pero que todavía no presenta picaduras detectables a simple vista. (El grado C es normalmente el estado de una superficie de acero que ha sido expuesta a la intemperie, sin protección, en una atmósfera medianamente corrosiva, durante 1 año, aproximadamente).
D		Superficie de acero de la que se ha desprendido la totalidad de la cascarilla de laminación y en la que se observan picaduras a simple vista. (El grado D corresponde al estado de una superficie de acero después de su exposición a la intemperie, sin protección, en una atmósfera medianamente corrosiva durante unos 3 años).

Tabla 4 Condiciones iniciales para acero según la norma ISO 8501-1

Los grados de preparación de la superficie se definen según varios tipos de preparación, denominados con las siglas St, Sa o Fl, con los números 1, 2, o 3.

- **St:** Rascado, cepillado, picado, etcétera, por medios manuales o mecánicos
- **Sa:** Chorreado abrasivo
- **Fl:** Limpieza a la llama (flameado)

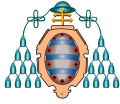


1. Malo (cepillado o rascado ligeros)
2. Calidad media (rascado con herramienta dura)
3. Rascado minucioso y cepillado hasta conseguir lustre en el metal, o chorreado hasta obtener el metal gris.

El estado inicial A sólo admite preparación por chorreado abrasivo (Sa), único método que permite eliminar la calamina. Solo se considerarán los grados St y Sa, ya que el flameado se utiliza muy poco en la práctica.

Los grados estándar de preparación primaria de la superficie de acero con métodos de chorreado abrasivo son:

- Sa 3: Eliminar la totalidad del óxido visible, cascarilla de laminación, pintura vieja y cualquier materia extraña. Limpieza por chorreado hasta metal blanco. El chorro se pasa sobre la superficie durante el tiempo necesario para eliminar la totalidad de la cascarilla de laminación, herrumbre y materias extrañas. Finalmente, la superficie se limpia con un aspirador, aire comprimido limpio y seco o con un cepillo limpio, para eliminar los residuos de polvo de abrasivo. Debe entonces quedar con un color metálico uniforme.
- Sa 2 ½ Chorreado abrasivo hasta metal casi blanco, a fin de conseguir que por lo menos el 95% de cada porción de la superficie total quede libre de cualquier residuo visible. Chorreado muy cuidadoso.
- El chorro se mantiene sobre la superficie el tiempo necesario para asegurar que la cascarilla de laminación, herrumbre y materias extrañas son eliminados de tal forma que cualquier residuo aparezca sólo como ligeras sombras o manchas en la superficie. Finalmente, se elimina el polvo de abrasivo con un aspirador, con aire comprimido limpio y seco o con un cepillo limpio.
- Sa 2 Chorreado hasta que al menos los 2/3 de cualquier porción de la superficie total estén libres de todo residuo visible. Chorreado cuidadoso. El chorro se pasa sobre la superficie durante el tiempo suficiente para eliminar la casi totalidad de cascarilla de laminación, herrumbre y materias extrañas. Finalmente, se elimina el polvo de abrasivo con un aspirador, con aire



comprimido limpio y seco o con un cepillo limpio. La superficie debe quedar de color grisáceo.

- Sa 1 Chorreado ligero. Se elimina la capa suelta de laminación, el óxido suelto y las partículas extrañas sueltas.

Los Grados estándar de preparación primaria de superficie con limpieza manual son:

- St 3 Rascado con rasquetas de metal duro y cepillado con cepillo de alambre, muy cuidadoso. El rascado y cepillado deben realizarse en primer lugar en una dirección y después en sentido perpendicular. Una vez eliminado el polvo, la superficie debe mostrar un pronunciado aspecto metálico.
- St 2 Rascado cuidadoso con rasqueta de metal duro y cepillado con cepillo de alambre. El rascado y cepillado deben realizarse en primer lugar en una dirección y después en sentido perpendicular. Una vez eliminado el polvo, la superficie debe mostrar aspecto metálico.
- St 1. No lo desarrollaremos ya que es un grado no apto para la pintura.

Norma sueca

ISO 8501-1

SIS 055900

Sa3

ISO 8501-1

SIS 055900

Sa2½

ISO 8501-1

SIS 055900

Sa2

ISO 8501-1

SIS 055900

St3

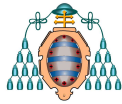
ISO 8501-1

SIS 055900

St2



Otra forma de preparación de la superficie es mediante la limpieza con agua a alta presión. Los grados de preparación de superficie mediante limpieza con agua a alta presión no deben sólo incluir el grado de limpieza, sino que también, se debe considerar el grado de oxidación que puede producirse en el acero limpio durante el



tiempo de secado. Hay varias maneras de clasificar el grado en que la superficie del acero está preparada después de la limpieza con agua a alta presión. Según la ISO 8501-4: Norma sobre los grados de preparación de superficie utilizando la limpieza mediante chorreado con agua a alta presión: “Las condiciones iniciales de la superficie, los grados de preparación y los grados de oxidación en relación con la limpieza mediante agua a alta presión”. La norma se refiere a la preparación de la superficie por limpieza con agua a alta presión para un recubrimiento de pintura. Se distinguen tres niveles de limpieza con referencia a contaminantes visibles (Wa 1 – Wa 2 ½) tales como óxido, cascarilla de laminación, capas anteriores de pintura y otras materias extrañas:

Superficie después de la limpieza:

Wa 1: Chorreado ligero con agua a alta presión

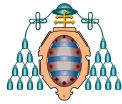
Cuando la superficie se observa sin ampliación, ésta deberá estar libre de aceite y grasa visible, pintura suelta o defectuosa, óxido suelto y otras materias extrañas. Cualquier contaminación residual tendrá que estar dispersa aleatoriamente y firmemente adherida.

Wa 2 Chorreado completo con agua a alta presión

Cuando la superficie se observa sin ampliación, ésta deberá estar libre de aceite visible, grasa y suciedad, la mayoría de óxido, recubrimiento de pintura anterior y otras materias extrañas. Cualquier contaminación residual tendrá que estar dispersa aleatoriamente y puede consistir de recubrimientos firmemente adheridos, materias extrañas firmemente adheridas y manchas de óxido previamente existentes

Wa 2½ Chorreado muy completo con agua a alta presión

Cuando la superficie se observa sin ampliación, ésta deberá estar exenta de todo el óxido visible, grasa, suciedad, recubrimientos de pintura anterior y, a excepción de ligeras huellas, todas las otras materias extrañas. La decoloración de la superficie puede estar presente donde la capa original no estuviera intacta. La decoloración gris o marrón/negra observada en el acero picado y corroído no puede ser eliminada mediante chorreado de agua.



Descripción de apariencia de la superficie en relación con tres grados de oxidación superficial:

L Oxidación superficial ligera

Una superficie que, cuando se observa sin ampliación, presenta pequeñas cantidades de una capa de óxido amarillo/marrón en la que el sustrato de acero puede ser visto. El óxido (visto como decoloración) puede estar distribuido de manera uniforme o presente en los parches, pero estará firmemente adherido y no se elimina fácilmente por una suave limpieza con un trapo.

M Oxidación superficial media

Una superficie que, cuando se observa sin ampliación, presenta una capa de óxido amarillo/ marrón que oculta/oscorece la superficie original de acero. El óxido puede estar distribuido de manera uniforme o presente en los parches, pero estará razonablemente bien adherido y va a marcar ligeramente un trapo suavemente pasado por la superficie.

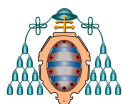
S Oxidación superficial fuerte

Una superficie que, cuando se observe sin ampliación, presenta una capa de óxido amarillo/ marrón que oscurece la superficie original de acero y es poco adherente. La capa de puede ser distribuida de manera uniforme o presente en los parches, y va a marcar fácilmente un trapo suavemente pasado por la superficie.

4.6.2 RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS

La aplicación de las capas de pintura sobre metal es uno de los medios más antiguos de control de la corrosión. Los recubrimientos orgánicos los podemos dividir en pinturas, barnices y lacas. Como norma general este tipo de recubrimientos no debería usarse cuando el medioambiente ataca rápidamente el sustrato del material.

Los componentes de una pintura son: el vehículo fijo ó ligante, el vehículo volátil ó disolvente ó diluyente, los pigmentos y los aditivos. Por tanto la pintura en estado líquido está constituida por estos cuatro componentes, en los que el ligante y disolvente constituirán el líquido llamado vehículo y los pigmentos que son polvos insolubles se dispersarán en dicho vehículo al que se añadirán los aditivos. Cuando la



pintura se seca el disolvente se evapora permaneciendo el resto de componentes en la película de pintura.

4.6.2.1 VEHÍCULO FIJO O LIGANTE

El vehículo fijo o ligante, también es denominado con el nombre de resina, es el componente fundamental de las pinturas. Existen de forma general dos tipos de ligantes los termoplásticos y los termoestables:

Termoplásticos

Son aquellos ligantes que forman películas por simple evaporación del disolvente. Se le suele añadir plastificantes para darle flexibilidad a la película formada ya que la pintura al secarse forma una capa dura.

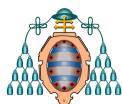
Al utilizar estos ligantes se tienen una serie de ventajas e inconvenientes. Como ventajas son un buen acabado, un secado rápido y la estabilidad de la película formada, como inconvenientes son que necesita disolventes caros, son difíciles de emplear con brocha y la película formada tiene mala resistencia a los disolventes en que viene disuelto el ligante.

RESINAS TERMOPLÁSTICAS
CLOROCAUCHO
POLIOLEFINAS
VINILICO
ACRÍLICO

Fig. 18 Resinas termoplásticas más utilizadas en la formulación de pinturas

Termoestables

Son aquellos que forman películas por la transformación del producto durante el proceso de secado y por reacción con el oxígeno del aire o consigo mismo en el caso de pinturas de dos componentes, formándose un polímero diferente del polímero que constituía el ligante.



Al igual que los termoplásticos tienen una serie de ventajas e inconvenientes. Como ventajas son baratos y la película formada es brillante. Como inconvenientes se puede decir que la pintura envejece ya que las transformaciones químicas continúan en el tiempo y el proceso de secado depende de las condiciones de empleo.

Entre los ligantes que se utilizan en la fabricación de pinturas, podemos citar:

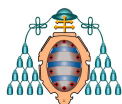
- Aceites.
- Resinas gliceroftálicas y fenólicas modificadas.
- Resinas de clorocaucho.
- Resinas vinílicas y acrílicas.
- Alquitranes y breas.
- Resinas epoxi, poliuretanos.
- Silicatos inorgánicos.
- Resinas de silicona.

RESINAS TERMOESTABLES
EPOXIDICA
POLIURETANO
SILICONA
AMINICA

Fig. 19 Resinas termoestables más utilizadas en la formulación de pinturas

4.6.2.2 VEHÍCULO VOLÁTIL

El vehículo volátil es la parte volátil del vehículo (resina+disolvente) y se evapora durante la aplicación de la pintura y el secado de la película. Su función es disolver las resinas o aglutinantes proporcionar a la pintura líquida una viscosidad apropiada.



Normalmente el disolvente está constituido por una mezcla de diferentes disolventes que proporcionarán la flexibilidad, dureza, resistencia al exterior, etc.

Los grupos a los que pertenecen los disolventes más utilizados son los siguientes:

Hidrocarburos
Aromáticos
Naftalenos
Alifáticos
Compuestos orgánicos
Alcoholes
Esteres
Cetonas
Éteres
Nitroparafinas
Compuestos clorados

4.6.2.3 PIGMENTOS

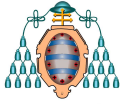
Son unos polvos finos sólidos que dan a la pintura propiedades anticorrosivas, color, poder cubriente, etc. Los pigmentos confieren color, opacidad y mejoran la resistencia mecánica. Una pintura sin pigmento recibe el nombre de barniz, laca o esmalte. Estos pigmentos van incorporados íntimamente al ligante.

Los pigmentos se clasifican en cuatro grupos: los anticorrosivos, los cubrientes, los de acción específica y los de cargas o extendedores.

Pigmentos anticorrosivos

Son unos compuestos químicos en forma de polvos, que evitan e inhiben la corrosión del hierro. Los pigmentos anticorrosivos se pueden clasificar según su tipo de acción:

- Pigmentos que actúan por pasivación anódica ó catódica de la pila electroquímica que se origina en el proceso de corrosión. También se les conoce como pigmentos pasivadores. Entre ellos podemos citar el minio de plomo, cromato de zinc, plumbato cálcico, etc. Actúan formando óxidos ó compuestos férricos rodeando el metal e impidiendo la acción del oxígeno ó pasivando el cátodo de la pila de corrosión por la formación de productos insolubles inorgánicos.



- Pigmentos que actúan protegiendo catódicamente. Son unos pigmentos metálicos, tales como el zinc ó magnesio, que en la escala electroquímica, están debajo del hierro, comunicándole a éste un carácter catódico y protegiéndolo. Ambos tipos de pigmentos anticorrosivos se transforman en compuestos insolubles que producen la impermeabilización del acero, aislándolo del medio ambiente.

Pigmentos cubrientes

Son productos químicos opacos, que dispersos en un vehículo apropiado, cubren el fondo por opacidad. Existe una gran variedad de pigmentos dentro de este grupo que se podría clasificar según su color, su composición química, su origen, etc. Así para el color blanco se utiliza el óxido de titanio, rojos y amarillos utilizarán óxidos de hierro, los azules óxidos de cobalto, etc.

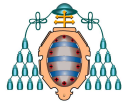
Pigmentos de acción específica

Son aquellos que proporcionan protección contra un determinado agente. Se utilizan para pinturas de fondo y acabado siendo capaces de cubrir un fondo por opacidad. Podemos mencionar dentro de este grupo los siguientes:

- Fungicidas: Protegen la película contra la acción de hongos y bacterias. El pigmento más utilizado es el óxido de antimonio.
- Ignífugos: Protegen contra el fuego o retardan la acción del mismo. Generalmente estarán compuestos de elementos órgano - metálicos.
- Antiincrustantes: Protegen contra el crecimiento de organismos en los fondos de las embarcaciones. Suelen ser tóxicos y se desprenden poco a poco de la película, impidiendo la adherencia de los organismos vivos al casco de los barcos. El tóxico más empleado es el óxido de cobre.

Cargas o extendedores

Son pigmentos no cubrientes, que no dan opacidad a la pintura y se emplean para enmatecer ó rellenar las imprimaciones y capas de fondo. Son más baratos que los pigmentos cubrientes.

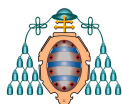


4.6.2.4 ADITIVOS

Los aditivos constituyen la parte fija de la pintura junto con los pigmentos y el ligante, y son utilizados en pequeñas cantidades ya que no suelen exceder el 5% del peso total de la pintura. La función de los aditivos es mejorar la vida en el almacén de las pinturas, mejorar la estabilidad, reducir el tiempo de secado, etc.

Los aditivos más importantes son los siguientes:

- **Secantes:** Actúan como catalizadores del proceso de oxidación. aceleran el secado, curado o endurecimiento de los ligantes. Los secantes de plomo producen un secado en profundidad, mientras que los secantes de cobre lo hacen en superficie.
- **Agentes tensoactivos:** Tienen una gran variedad de aplicaciones, pudiendo destacar:
 - ❖ Modifican las características superficiales de los pigmentos.
 - ❖ Facilitan la humectación y dispersión de los pigmentos.
 - ❖ Previenen la formación de sedimentos duros.
 - ❖ Previenen la formación excesiva de espuma.
 - ❖ Previenen las alteraciones de color por sangrado o flotación en algunos tipos de pinturas.
- **Plastificantes:** Proporcionan flexibilidad a la película de pintura. Dentro de los plastificantes se encuentran: ftalatos, cloroparafinas, ceras, etc.



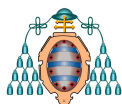
A continuación se muestra un resumen de los componentes de las pinturas.

Vehículo fijo o ligante	termoplásticos	
	termoestables	
Vehículo volátil	hidrocarburos	Aromáticos Naftalenos Alifáticos
	Compuestos orgánicos	Alcoholes Esteres Cetonas Éteres
	Nitroparafinas	
	Compuestos clorados	
pigmentos	Anticorrosivos	Pasivación anódica o catódica Protegiendo catódicamente
	Cubrientes	
	Acción específica	Fungicidas Ignífugos Antiincrustantes
	Cargas o extendedores	
aditivos	Secantes	
	Tensioactivos	
	Plastificantes	

Fig. 20 Clasificación de los componentes de las pinturas

4.6.3 TIPOS DE PINTURAS

Las pinturas se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios: por el proceso de secado, por el vehículo fijo, por su finalidad, por su aplicación, etc. La más comúnmente utilizada es por el proceso de secado. Hay que tener en cuenta que cada tipo de pintura tiene unas características que están determinadas por las resistencias físicas y químicas del vehículo fijo.



CLASIFICACIÓN DE PINTURAS POR EL PROCESO DE SECADO O FORMACIÓN DE LA PELÍCULA	
PELÍCULA	VEHÍCULO
TERMOPLÁSTICA	Por evaporación del disolvente.
	Por cambio de fase o flujo en caliente.
	Por emulsión en agua.
TERMOESTABLE	Por reacción con el oxígeno.
	Por acción del calor.
	Por efecto de un catalizador.
	Por reacción con un agente de curado.

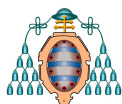
Fig. 21 Clasificación de pinturas por el proceso de secado o formación de la película

4.6.3.1 PROPIEDADES DE LOS DIFERENTES TIPOS DE PINTURAS

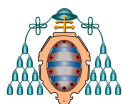
El comportamiento de una pintura en estado líquido y sólido es diferente por lo que para determinar las propiedades físicas y químicas de una pintura hay que tener en cuenta estos dos estados. Dichas propiedades vienen determinadas por las resistencias químicas y físicas el vehículo fijo, es decir, en la facilidad de ataque que el medio ambiente pueda ejercer sobre la naturaleza química del vehículo fijo.

Las propiedades químicas se pueden clasificar según el proceso de secado o formación de película.

Propiedades químicas (según el proceso de secado)		
Resistencia a los disolventes	Las pinturas de secado exclusivo por evaporación del disolvente	Será posible atacar o disolver una película de la pintura ya endurecida, con disolvente procedente incluso de otra nueva capa del mismo producto. Esta facilidad de ataque por los disolventes, marca las propiedades de adherencia entre capas que, para este tipo de productos se realiza sin dificultad.
	Las pinturas de secado por reacción con el oxígeno del aire	No muestran una buena resistencia a los disolventes, salvo en el caso de que un endurecimiento excesivo, conseguido durante un largo período de tiempo, modifique la naturaleza del aceite: resina gliceroftálica o fenólica modificada hasta producir un producto muy distinto del de partida.



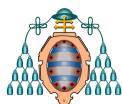
Propiedades químicas (según el proceso de secado)		
	Las pinturas que secan por acción de la temperatura	No muestran una buena resistencia a los disolventes, salvo en el caso de que un endurecimiento excesivo, conseguido con los esmaltes gliceroftálicos de secado al aire y el estado final se alcanza en períodos de tiempo muy cortos, dadas las condiciones forzadas de secado a que se someten las pinturas
	Secado por reacción química entre dos componentes	Este tipo de pinturas que se suministran en envases separados y se mezclan momentos antes de su aplicación. El producto químico se forma por reacción de los dos componentes, reacción que no es posible detener, no tiene no se parece a los productos de los que se partió. Debido a las insolubilidades y resistencias a los disolventes que muestran este tipo de productos se pueden crear graves problemas en la adherencia entre capas.
Adherencia entre capas	Secado exclusivo por evaporación	Procedimiento fundamentalmente de anclaje químico. , la unión o fusión de las capas, es total y completa. El reblandecimiento de la capa anterior, motiva que las propiedades de aplicación de estos productos no sean tan correctas como en otros tipos de pinturas.
	Endurecen por reacción con el oxígeno del aire	La insolubilidad en los disolventes propios del ligante, va creciendo con el tiempo. A partir de un determinado período de endurecimiento hay que recurrir a procedimientos físicos o mecánicos, para conseguir una buena adherencia entre capas.
	Productos de secado por reacción química entre sus componentes	El nuevo compuesto químico creado es totalmente inafectado por los disolventes de cada componente reactivo. Es preciso recurrir, aquí también, al enmatecimiento de la película para que la nueva capa pueda tener anclaje físico sobre la superficie.
Resistencia al agua	Pinturas de secado exclusivo por evaporación,	Muestran una extraordinaria estabilidad a cualquier tipo de agente degradante.
	Pinturas que secan por reacción con el oxígeno del aire	Son fácilmente atacables por el agua en un medio básico o ácido, creando una saponificación o reacción inversa a la esterificación que regenera los productos originales de alcohol y ácidos de los que se partió. No son resistentes a la inmersión en agua.
	Pinturas de secado por acción de la temperatura	Tienen grupos ésteres y éteres capaces de ser atacados por el agua, y, por tanto, son saponificables. No cabe duda que la resistencia al agua es mayor en este tipo de productos, pero nunca pueden ser considerados totalmente aptos para la protección de objetos sumergidos.
	Pinturas que se secan por reacción química de sus componentes	Tienen resistencia a un gran número de agentes químicos y al agua.



Propiedades químicas (según el proceso de secado)		
Resistencia a productos inorgánicos	Productos de secado por evaporación del disolvente (vinílicos, clorocaucho, breas y alquitranes)	Son adecuados para ser utilizados en la protección contra productos químicos inorgánicos. Hay que especificar el espesor de película a aplicar, cuanto mayor sea éste mayor será la impermeabilidad y resistencia conseguida.
	Productos de secado por reacción con el oxígeno del aire,	Estos productos no son aptos para estar sometidos a ambientes de productos químicos inorgánicos, y su utilización ha de ser enfocada hacia una exposición normal a la intemperie.
	Productos de secado por acción de la temperatura	Estos recubrimientos son adecuados para estar permanentemente sometidos a la acción de productos químicamente inorgánicos.
	Productos de secado por reacción química entre sus componentes	En general las pinturas epoxi y poliuretanos son bien estables a la acción de los ácidos diluidos, a álcalis y a la acción de las sales.
Resistencia a productos químicos orgánicos	Pinturas de secado por reacción química entre dos componentes	Pueden poseer adecuada resistencia a un elevado número de productos orgánicos

Las propiedades físicas más importantes son las siguientes:

<u>Propiedades físicas de las películas secas</u>	<u>Propiedades físicas de las películas líquidas</u>
Brillo	Aspecto y estabilidad
Opacidad	Porosidad
Espesor	Densidad
Secado	Finura
Dureza	Materia fija
Descolgamiento	Temperatura de inflamación
Abrasión	
Resistencia a la niebla e intemperie	
Inmersión	



<u>Propiedades físicas de las películas secas</u>	<u>Propiedades físicas de las películas líquidas</u>
Inflamación	
Resistencia a los microorganismos	
Permeabilidad	

5 PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN DE UNA PIEZA DE TRANSICIÓN EN UNA ESTRUCTURA OFFSHORE

La pieza objeto de estudio es protegida mediante un recubrimiento protector, no obstante y debido a que el medio marino resulta especialmente agresivo por sus características, además que el tiempo de vida estimado para la estructura (20 años) imposibilita la utilización exclusiva de este método de protección. Por tanto se desarrolla un método de protección complementario mediante protección catódica mediante ánodos de sacrificio, si bien otra posibilidad de protección complementaria a la aplicación del recubrimiento protector es la aplicación de corrientes impresas.

5.1 CARACTERÍSTICAS Y UBICACIÓN DE LA ESTRUCTURA⁵

El primer factor a tener en cuenta es la ubicación de la pieza objeto de estudio, ya que según se sitúe esta las condiciones ambientales variarán y con ella el medio corrosivo al que esté expuesta la misma. Por tanto, las estructuras pertenecen a un parque eólico marino, el cuál se sitúa en el Mar del Norte a una latitud de 51.619° y a una longitud de 2.900°, ocupando una extensión de 14km², estando a una distancia de la costa de Bélgica de unos 37km; y el lecho marino a una profundidad entre los 15 y los 23 m.

⁵ <http://www.fomento.gob.es/> <http://fce.arcelormittal.com/>

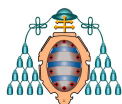


Fig. 22 Mapa ubicación parque eólico marino

La salinidad de esta agua se encuentra entre 34 y 35 gramos de sal por litro de agua y la temperatura varía entre los 6°C y los 13°C. Las mareas pueden llegar a los 8m, la velocidad de las corrientes marinas van desde un mínimo de 20cm/s a 100cm/s como máximo.

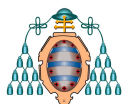
El segundo aspecto a tener en cuenta es el material con el que se fabrica las piezas. Estas piezas se fabrican con un acero S355ML. Esta denominación se encuentra definida por la norma UNE EN 10027-1 que establece las reglas para la designación simbólica de los aceros mediante símbolos numéricos y letras que expresan ciertas características básicas, por ejemplo, mecánicas, químicas, físicas, de aplicación, necesarias para establecer una designación abreviada de los aceros.

En nuestro caso la pieza de transición es fabricada con un acero S355ML. Se trata de un acero soldable de grano fino, laminado termodinámicamente con un contenido máximo de fósforo de 0,030% y un contenido máximo de azufre de 0,025%, estando definido por la norma UNE-EN 10025-4.

A continuación se muestra la equivalencia entre normas y marcas del acero S355ML:

S355ML EN 10025-4	EU 113-72	SEW 083	UN	EN 10113-3:1993
S355ML	FeE355 KT TM	T StE 355 TM	FeE355 KT TM	S355ML

Fig. 23 Denominación del acero S355ML según otras normas



El valor de carbono equivalente (CEV) para este acero basado en el análisis de la colada se sitúa entre los siguientes valores

Tipo	Espesor nominal t (mm)			
	t≤16	16<t≤40	40<t≤63	63<t
S355ML	0,39	0,39	0,40	0,45

Fig. 24 Porcentaje de carbono en función del espesor nominal

A continuación se recogen las especificaciones correspondientes a límite elástico f_y y resistencia a tracción f_u del acero:

Tipo	Espesor nominal t (mm)			
	t≤40		40<t≤80	
	f_y	f_u	f_y	f_u
S355ML	355	470< f_u <630	335	450< f_u <610

Fig. 25 Límite elástico mínimo y resistencia a tracción (N/mm²)

En la siguiente tabla se detallan las especificaciones de resiliencia de este acero:

Grado	Dirección	Temperatura de ensayo (°C)						
		20	0	-10	-20	-30	-40	-50
ML	L	63	55	51	47	40	31	27
ML	T	40	34	30	27	23	20	16

Fig. 26 Resiliencia (J) según la dirección, longitudinal (L) o transversal (T), de ensayo

La empresa tiene el cometido de fabricar 32 unidades; la pieza de transición tendrá un espesor de 50-65mm, con un diámetro de 4500mm y una longitud de 22m, pesando 200 toneladas cada unidad.

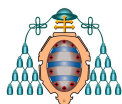
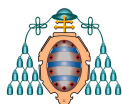


Fig. 27 Piezas de transición

Después del proceso de fabricación, la última etapa a realizar antes de la entrega del pedido es proceder a la protección de la pieza. Dicha pieza se le aplicará un recubrimiento protector; para lo cual resulta necesario definir cada una de las partes de este proceso. El pintado tiene como objeto proteger la estructura, no obstante y debido a las condiciones del medio donde se ubicará la pieza, será necesaria la aplicación de otros medios de protección de la estructura para garantizar el tiempo de vida estimado de la misma.

5.1.1 ESQUEMA DE PINTADO

Como se ha comentado anteriormente la estructura esta expuesta a diferentes zonas: zona sumergida que corresponde a los 5 m inferiores de la pieza de transición, zona de mareas que corresponde a la zona entre los 5 m y 13 m, zona de salpicaduras que corresponde al último tramo, esto es entre los 13 y los 22 m. Teniendo en cuenta que la estructura tiene un tiempo de vida estimado de unos 20 años y que las actuales pinturas antiincrustantes tienen un tiempo de vida muy inferior al tiempo de vida total de la estructura no se ha optado por la aplicación de un recubrimiento antiincrustante. Por lo que a pesar de la estructura estar expuesta a diferentes zonas se ha optado por un único sistema para todas ellas que garantiza la protección de toda la pieza.



5.1.1.1 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LA ESTRUCTURA

Previa a la aplicación del recubrimiento protector hay que preparar adecuadamente la superficie. En este caso se alisarán o redondearán todos los bordes afilados y soldaduras. También se procederá a la eliminación de aceites, grasas y residuos mediante el lavado con detergentes y posterior aclarado con agua dulce. Después de realizar estas operaciones se procederá al chorreado abrasivo de la pieza grado Sa 2 ½ dejando una rugosidad Grado Medio G, según ISO 8503 (50 µm a 85 µm, Ry5)

El contenido máximo de impurezas solubles en la superficie no podrá exceder de una conductividad medida de acuerdo con ISO 8502-9 correspondiente a un contenido de NaCl de 20 mg/m².

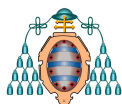
5.1.1.2 ESQUEMA DE PINTADO DE LA ESTRUCTURA

Se ha procedido a diseñar diferentes sistemas de pintado, para ello se ha tenido en cuenta lo indicado por la norma NORSOK STANDARD M-501.

Se han diseñado varios esquemas de pintado, que se exponen a continuación:

Esquema de pintado 1

ESQUEMA DE PINTADO 1	
0.	SUPERFICIE. ACERO
1ª CAPA DE IMPRIMACIÓN 200 micras	Pintura de tipo epoxi puro pigmentada con aluminio, autoimprimante, de dos componentes y de alto espesor.
2ª CAPA DE RECUBRIMIENTO 200 micras	Recubrimiento epoxi de capa gruesa de dos componentes con aducto de poliamida y de elevado contenido en sólidos.
3ª CAPA DE RECUBRIMIENTO 200 micras	Recubrimiento epoxi de capa gruesa de dos componentes con aducto de poliamida y de elevado contenido en sólidos.
3ª CAPA DE ESMALTE 60 micras	Esmalte de poliuretano brillante de dos componentes a base de isocianato alifático.
ESPESOR TOTAL : 660 micras	



Esquema de pintado 2

ESQUEMA DE PINTADO 2	
0.	SUPERFICIE. ACERO
1ª CAPA DE IMPRIMACIÓN 60 micras	Silicato inorgánico de zinc autocurable de dos componentes, que contiene disolventes.
2ª CAPA DE RECUBRIMIENTO 200 micras	Recubrimiento epoxi de capa gruesa de dos componentes con aducto de poliamida y de elevado contenido en sólidos.
2ª CAPA DE RECUBRIMIENTO 200 micras	Recubrimiento epoxi de capa gruesa de dos componentes con aducto de poliamida y de elevado contenido en sólidos.
3ª CAPA DE ESMALTE 60 micras	Esmalte de poliuretano brillante de dos componentes a base de isocianato alifático.
ESPESOR TOTAL : 520 micras	

Esquema de pintado 3

ESQUEMA DE PINTADO 3	
0.	SUPERFICIE. ACERO
1ª CAPA DE IMPRIMACIÓN 200 micras	Pintura de tipo epoxi puro pigmentada con aluminio, autoimprimante, de dos componentes y de alto espesor.
2ª CAPA DE RECUBRIMIENTO 200 micras	Autoimprimante epoxi de dos componentes, de capa gruesa, curado con aminas y poliamidas.
2ª CAPA DE RECUBRIMIENTO 200 micras	Autoimprimante epoxi de dos componentes, de capa gruesa, curado con aminas y poliamidas.
3ª CAPA DE ESMALTE 70 micras	Esmalte de poliuretano brillante de dos componentes a base de isocianato alifático.
ESPESOR TOTAL : 670 micras	

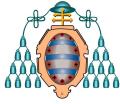
De los esquemas expuestos se ha optado por el esquema 1. A continuación se desarrolla el sistema de pintado de dicho esquema.

5.1.1.3 SISTEMA DE PINTADO

El sistema de pintado consiste en seleccionar cada una de las pinturas que forma parte del esquema de pintado. Según lo dispuesto en el apartado anterior las pinturas utilizadas siguiendo el sistema 1 son las siguientes:

Primera capa

A continuación se procede a aplicar la primera capa de imprimación que será una autoimprimante epoxi de dos componentes, de alto espesor, pigmentada con



aluminio. Este tipo de imprimación es resistente a la abrasión y a la corrosión y está formulada para su aplicación en condiciones de inmersión y zona de salpicaduras, zonas a la que estará expuesta la pieza de transición.

Hay que tener en cuenta durante el pintado lo siguiente:

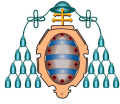
- La pintura ha de tener una temperatura por encima de los 20°C para lograr una buena aplicación.
- La humedad relativa máxima ha de ser del 90%.
- Aplicarla únicamente sobre una superficie limpia y seca con una temperatura superior al punto de rocío para evitar condensación.
- La aplicación y el curado puede tener lugar a temperaturas superiores a -10°C
- El tiempo de repintado variará en función de la temperatura, siendo como mínimo a las 4 horas a 20°C.
- Si se sobrepasa el intervalo máximo de repintado, hay que conferir rugosidad a la superficie para asegurar la adherencia entre capas.
- Si la superficie ha estado expuesta a ambientes contaminados, se debe limpiar adecuadamente con agua dulce a alta presión y dejar secar antes de repintar
- La pintura se aplica con un equipo sin a una presión de 250 bar y con un tamaño de boquilla de 0.021 - 0.023"

Se aplicará un espesor de 200 micras secas de este recubrimiento

Segunda capa

Aplicación de un recubrimiento epoxi de capa gruesa de dos componentes con aducto de poliamida y de elevado contenido en sólidos. Este recubrimiento forma una película dura y tenaz con excelentes propiedades humectantes.

Hay que tener en cuenta durante el pintado lo siguiente:



- La aplicación y el curado puede tener lugar a temperaturas superiores a -5°C , no obstante la temperatura mínima recomendada es de 0°C
- La pintura ha de encontrarse a una temperatura entre 15°C o superior.
- Aplicación de la pintura con un equipo sin aire a una presión de 250bar y con una boquilla: de 0.017 - 0.023 "
- Aplicarlo e sobre una superficie limpia y seca con una temperatura superior al punto de rocío para evitar condensación.
- El tiempo de repintado variará en función de la temperatura, siendo como mínimo a las 63 horas a 0°C , mínimo de 21 horas a 10°C y mínimo de 7 horas a 20°C .

Se aplicará un espesor de 200 micras secas de este recubrimiento

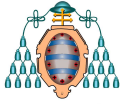
Tercera capa

Se aplicará una segunda capa idéntica a la capa segunda y por tanto siguiendo los mismos pasos en su aplicación.

Se aplicará un espesor de 200 micras secas de este recubrimiento



Fig. 28 Cabina de Pintura



Cuarta capa

Aplicación de un esmalte de poliuretano brillante de dos componentes a base de isocianato alifático, con buena retención de brillo y color y que contiene fosfato de zinc.

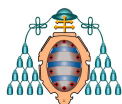
Hay que tener en cuenta durante el pintado lo siguiente:

- Aplicar sobre una superficie limpia y seca con una temperatura superior al punto de rocío para evitar condensación.
- La temperatura mínima para el curado es de -10°C
- En el punto de congelación y por debajo de éste, hay que tener en cuenta el riesgo de la presencia de hielo en la superficie, que puede afectar a la capacidad de adherencia.
- En espacios confinados, proporcionar una ventilación adecuada durante la aplicación y el secado.
- El tiempo de repintado variará en función de la temperatura, siendo como mínimo a las 18 horas a 0°C , mínimo de 9 horas a 10°C y mínimo de 6 horas a 20°C .
- La superficie ha de estar completamente limpia para garantizar la adhesión de las capas, especialmente a intervalos de repintado largos.

Se aplicará un espesor de 60 micras secas de este recubrimiento

Después de la aplicación de todas las capas de pintura obtendremos un espesor final de 660 micras, no obstante el inspector de pintura medirá los espesores de cada capa en diferentes zonas de la pieza para asegurar que los espesores son los establecidos por el esquema de pintado.

No hay que olvidar que la temperatura del sustrato en todo proceso de pintado tiene que estar por encima del punto de rocío, (se recomienda sobre unos 5°C y como mínimo 3°C por encima) para evitar condensaciones en la superficie durante la aplicación.



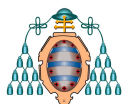
	TEMPERATURA DE ROCÍO										
Tª ambiente	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
HR %											
90	-1	3	8	13	18	23	28	33	38	43	48
85	-2	3	7	12	17	22	27	32	37	42	46
80	-3	2	7	12	16	21	26	31	36	40	44
75	-3	1	6	11	16	20	25	30	35	39	43
70	-5	0	4	9	14	19	23	28	33	37	41
65	-6	-1	3	8	13	17	22	27	31	36	40
60	-6	-2	2	7	12	16	21	26	30	35	39
55	-7	-3	1	6	11	15	19	24	29	33	38
50	-8	-5	-1	4	9	14	18	22	27	31	35
45	-10	-6	-2	2	7	12	16	20	25	29	34
40	-11	-7	-3	1	5	10	14	18	23	27	31
35	-12	-8	-5	-1	3	8	12	16	20	25	29
30	-14	-10	-7	-3	1	5	9	14	18	22	26

Tabla 5 Cálculo de la temperatura de rocío a 1 atmósfera de presión.

5.2 DETERMINACIÓN DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO PARA LA ESTRUCTURA OBJETO

A continuación se van a determinar las variables necesarias a considerar para establecer una protección catódica de la pieza de transición utilizando el sistema de ánodos de sacrificio. Se van a calcular los ánodos necesarios para la estructura objeto del proyecto, se determinará la cantidad de material anódico necesario, así como su duración.

Los cálculos se han dividido de tal forma que por un lado se calcula el número de ánodos requeridos para la zona sumergida y por otro lado el número de ánodos para la zona sometida al efecto de las mareas. Asimismo se ha calculado la protección utilizando dos tipos de materiales para los ánodos: aluminio y zinc. Otra variable que se ha tenido en cuenta es considerar el acero desnudo y el acero pintado ya que



según se consideren unos factores u otros, la masa y número de ánodos resultante variará y ello influirá en el presupuesto final.

Superficie del acero	Zona en la que se encuentra la estructura	Material de los ánodos
Acero desnudo	Zona sumergida	Zinc
		Aluminio
	Zona de mareas	Zinc
		Aluminio
Acero pintura epoxi	Zona sumergida	Zinc
		Aluminio
	Zona de mareas	Zinc
		Aluminio

Tabla 6 Esquema del cálculo de los ánodos de sacrificio

5.2.1 ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC EN EL CASO DE UN ACERO DESNUDO

5.2.1.1 ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC. ZONA SUMERGIDA. ACERO DESNUDO

ÁREA A PROTEGER

Se calcula a partir de los planos facilitados por la empresa colaboradora, siendo en este apartado la superficie que se encuentra en contacto directo con el agua siempre.

$$A = p \times h$$

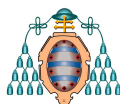
Siendo,

A, área.

p, perímetro exterior de la estructura, 13.665,928 mm

h, longitud desde el borde inferior hasta el punto máximo de bajamar, 5.000 mm

$$A = 13.665,928 \times 5.000$$



$A = 68.329.640 \text{ mm}^2$

TIEMPO DE PROTECCIÓN

Es el tiempo previsto de vida útil de la pieza.

Tiempo de protección = 20 años

MATERIAL DE LOS ÁNODOS

Se van a utilizar ánodos de zinc conforme a las especificaciones de la norma americana MIL-A 18001-H, en la que se definen la composición para ánodos de aleación de zinc, magnesio y aluminio.

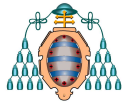
Material = aleación de zinc (norma MIL-A 18001-H)

CAPACIDAD ELÉCTRICA REAL DEL MATERIAL

Se obtiene de las especificaciones de la norma americana MIL-A 18001-H.

Propiedad	Ánodo de zinc	Ánodo de Magnesio	Ánodo de aluminio		
	MIL-A 18001-H	MIL-A 24412-A	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Composición %	Cd= 0,025 – 0,15 Al= 0,10 – 0,50 Fe= 0,005 máx. Pb= 0,006 máx. Cu= 0,005 máx. Si= 0,125 máx.	Cu= 0,1 máx. Al= 5 – 7 Si= 0,3 máx. Fe= 0,003 máx. Mn= 0,15 mín. Ni= 0,003 máx. Zn=2 – 4 Otros= 0,3 máx.	Si= 0,11 – 0,21 Fe= 0,10 máx. Zn= 0,3 – 0,5 Sn= --- Mg= --- Hg= 0,02 – 0,05 In= --- Cu= 0,006 máx. Otros= 0,002 máx.	Si= 0,10 máx. Fe= 0,13 máx. Zn= 3,5 – 5,0 Sn= --- Mg= 0,3 – 0,8 Hg= --- In= 0,02 – 0,05 Cu= 0,006 máx. Otros= 0,02 máx.	0,10 máx. Fe= 0,13 máx. Zn= 4 – 5 Sn= 0,08 – 0,16 Mg= --- Hg= --- In= --- Cu= 0,01 máx. Otros= 0,02 máx.
Rendimiento	0.95	0.5	0.95	0.9	0.5
Potencial de Trabajo mV vs Ag / AgCl	-1050	-1550	-1050	-1100	-1100
Potencial vs acero protegido	-250	-700	-250	-350	-350
Capacidad eléctrica teórica A-h / kg (A-h / lb)	820 (368)	2210 (1100)	2830 (1290)	2700 (1231)	variable
Capacidad eléctrica real A-h / kg (A-h / lb)	780 (356)	1100 (503)	2689 (1226)	2430 (1110)	variable
Consumo ánodo Kg / A-año lb / A-año	11,00 23,8	8,00 17,5	3,00 6,8	10,00 21,9	5,50 12
Densidad Kg / dm ³ lb / pulg. ³	7,3 0,258	1,77 0,063	2,75 0,098	2,81 0,10	2,81 0,10

$C = \text{capacidad eléctrica real} = 780 \text{ amperios a la hora por cada kilogramo}$



CORRIENTE DE PROTECCIÓN O DENSIDAD DE CORRIENTE

Viene expresado en intensidad por unidad de superficie y hora.

Mantenimiento

La densidad de corriente de mantenimiento se obtiene mediante la Norma EN 12495 tabla A.1

$$\text{Densidad de corriente mantenimiento} = 90 \text{ mA/m}^2$$

Inicial

La densidad de corriente inicial se obtiene mediante la Norma EN 12495 tabla A.1

$$\text{Densidad de corriente inicial} = 150 \text{ mA/m}^2$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCIÓN DE MANTENIMIENTO

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura durante todo el tiempo.

$$I_{\text{mant}} = A \times D$$

I_{mant} , intensidad necesaria, A

A, área a proteger, m².

D, densidad de corriente, A/m²

$$I_{\text{mant}} = 68,330 \times 0,090$$

$$I_{\text{mant}} = 6,150 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE TOTAL DE PROTECCIÓN DE ACTIVACIÓN

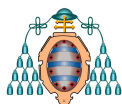
Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura para activar.

$$I_{\text{actv}} = A \times D$$

I_{actv} , intensidad necesaria, A

A, área a proteger, m².

D, densidad de corriente, A/m



$$I_{\text{actv}} = 68,330 \times 0,150$$

$$I_{\text{actv}} = 10,249 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE MANTENIMIENTO PARA 20 AÑOS

$$I_{\text{mant, total}} = I_{\text{mant}} \times 365 \times 24 \times n^{\circ} \text{ años}$$

$$I_{\text{mant, total}} = 6,150 \times 365 \times 24 \times 20$$

$$I_{\text{mant, total}} = 1.077.480 \text{ Ah}$$

MASA DE ZINC A INSTALAR PARA 20 AÑOS

$$M = \frac{I_{\text{mant, total}}}{C \cdot u}$$

Siendo,

M, masa de zinc, Kg.

$I_{\text{mant, total}}$, Intensidad de corriente en n° años, Ah.

C, capacidad eléctrica real, Ah/Kg.

u, factor de utilización, 0,85.

$$M = \frac{1.077.480}{780 \cdot 0,85}$$

$$M = 1.625,158 \text{ Kg.}$$

NUMERO TOTAL DE ANODOS A INSTALAR Z-50

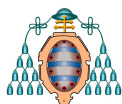
Dividiendo la masa total necesaria entre la masa del ánodo comercial a utilizar.

$$N = \frac{M}{m}$$

Siendo,

N, número de ánodos, adimensional.

M, masa de zinc, Kg.



m, masa del ánodo comercial, Kg, 120.

$$N = \frac{M}{m}$$

$$N = \frac{1.625,158}{120}$$

$$N = 13,543$$

Se redondea al entero superior.

$$N = 14$$

RESISTIVIDAD ESPECÍFICA DEL ELECTROLITO

El valor de la resistividad va en función de la temperatura y clorinidad, y sus unidades son ohm-cm. En este caso el electrolito es agua de mar, cuyo valor lo obtenemos a través de tablas.

Lugar	Resistividad (ρ) Ohm-cm	Temperatura °C	Densidad de corriente típica para diseño	
			mA / m ²	mA / ft ²
Golfo de México	20	22	54 – 65	5,0 – 6,0
Costa oeste U.S.	24	15	76 – 106	7,0 – 10
Mar del norte	26 – 33	0 – 12	86 – 216	8,0 – 20
Golfo Pérsico	15	30	54 – 86	5,0 – 8,0
Indonesia	19	24	54 – 65	5,0 – 6,0
Perú – Costa Sur	24	18	54 – 65	5,0 – 6,0

En el caso objeto del proyecto la estructura esta localizada en el Mar del Norte.

Resistividad específica del electrolito = 33 ohm-cm

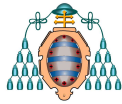
RADIO EQUIVALENTE ANODO Z-50

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 145 \cdot 175}{\pi}}$$

$$d = 179,746\text{mm}$$

$$r = 89,873\text{mm} = 0,09\text{m}$$



INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO INICIAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{inicial}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{inicial}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{inicial}}}{r_{\text{inicial}}} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,762} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,762}{0,09} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = 0,174 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{E}{R}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{0,250}{0,174}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = 1,437 \text{ A}$$

INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS INICIAL

Esta debe ser superior a la intensidad inicial de activación necesaria.

$$I_{\text{anodo, inicial}} \times N = 1,437 \times 14 = 20,118 \text{ A}$$

Comprobación que la intensidad inicial de los ánodos cumple con intensidad de activación.

$$N \times I_{\text{anodo, inicial}} \geq I_{\text{actv}}$$

$$20,118 \text{ A} \geq 10,249 \text{ A CUMPLE}$$

LONGITUD FINAL DEL ANODO

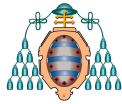
$$L_{\text{final}} = L_{\text{inicial}} - 0,1 \times u \times L_{\text{inicial}}$$

L_{final} , longitud final del ánodo, cm.

L_{inicial} , longitud inicial del ánodo, cm, 76,2

u , factor de utilización, 0,85.

$$L_{\text{final}} = 76,2 - 0,1 \times 0,85 \times 76,2$$



$$L_{\text{final}} = 69,723 \text{ cm}$$

RADIO EQUIVALENTE FINAL DEL ANODO

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{W \times (1 - u)}{\pi \cdot \text{densidad} \cdot L_{\text{final}}} + (r_{\text{nucleo}})^2 \right]}$$

W, masa del ánodo, Kg, 120

u, factor de utilización, 0,85

densidad, densidad de la aleación del ánodo, Kg/cm³, 0,0073

r_{nucleo}, radio exterior del núcleo de acero, cm, 1,382

L_{final}, longitud final del ánodo, cm, 69,723

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{120 \times (1 - 0,85)}{\pi \cdot 0,0073 \cdot 69,723} + (1,382)^2 \right]}$$

$$r_{\text{final}} = 3,629 \text{ cm}$$

INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO FINAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{final}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{final}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{final}}}{r_{\text{final}}} \right) - 1 \right]$$

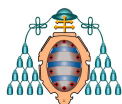
$$R_{\text{final}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,697} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,697}{0,0363} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{final}} = 0,252 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{E}{R_{\text{final}}}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{0,250}{0,252}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = 1 \text{ A}$$



INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS FINAL

Esta debe ser superior a la intensidad de mantenimiento necesaria.

$$I_{\text{anodo, final}} \times N = 1 \times 14 = 14 \text{ A}$$

Comprobación intensidad final del ánodo cumple con intensidad de mantenimiento

$$N \times I_{\text{anodo, final}} \geq I_{\text{mant}}$$

$$14 \text{ A} > 6,150 \text{ A CUMPLE}$$

COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CORRIENTE DEL ANODO

Capacidad de corriente de un ánodo

$$C = m \times e \times u$$

C, capacidad de corriente de un ánodo, Ah

m, masa del ánodo, Kg, 120

e, capacidad eléctrica real, 780 Ah/Kg

u, factor de utilización, 0,85

$$C = 120 \times 780 \times 0,85$$

$$C = 79.560 \text{ Ah}$$

Comprobación

$$N \times C \geq I_{\text{mant, total}}$$

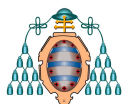
N, número de ánodos, 14

C, capacidad de corriente del ánodo, Ah.

$I_{\text{mant, total}}$, intensidad de corriente de mantenimiento para 20 años.

$$14 \times 79.560 = 1.113.840 \text{ Ah}$$

$$1.113.840 \text{ Ah} \geq -.077.480 \text{ Ah CUMPLE}$$



VIDA DE LOS ANODOS

$$V = \frac{N \cdot M \cdot u}{I_{\text{mant}} \cdot c}$$

V, vida del ánodo, años

N, número de ánodos

M, masa de los ánodos, Kg

u, factor de utilización

c, consumo ánodo, obtenido de tabla norma americana MIL-A 18001-H, Kg/Año, 11

I_{mant} , intensidad de mantenimiento necesaria, A

$$V = \frac{14 \cdot 120 \cdot 0,85}{6,150 \cdot 11}$$

V = 21,109 años CUMPLE

5.2.1.2 ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC. ZONA DE MAREAS. ACERO DESNUDO

ÁREA A PROTEGER

Se calcula a partir de los planos facilitados por la empresa colaboradora, siendo en este apartado la tercera parte inferior de la zona que se encuentra sometida al efecto de las mareas.

$$A = p \times h$$

Siendo,

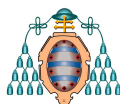
A, área.

p, perímetro exterior de la estructura, 13.665,928 mm

h, longitud desde el la parte inferior de la zona de mareas hasta el tercio inferior de esta zona, 2666,667 mm

$$A = 13.665,928 \times 2.666,667$$

A = 36.442.475 mm²



TIEMPO DE PROTECCIÓN

Es el tiempo previsto de vida útil de la pieza.

Tiempo de protección = 20 años

MATERIAL DE LOS ÁNODOS

Se van a utilizar ánodos de zinc conforme a las especificaciones de la norma americana MIL-A 18001-H, en la que se definen la composición para ánodos de aleación de zinc, magnesio y aluminio.

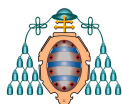
Material = aleación de zinc (norma MIL-A 18001-H)

CAPACIDAD ELÉCTRICA REAL DEL MATERIAL

Se obtiene de las especificaciones de la norma americana MIL-A 18001-H.

Propiedad	Ánodo de zinc	Ánodo de Magnesio	Ánodo de aluminio		
	MIL-A 18001-H	MIL-A 24412-A	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Composición %	Cd= 0,025 – 0,15 Al= 0,10 – 0,50 Fe= 0,005 máx. Pb= 0,006 máx. Cu= 0,005 máx. Si= 0,125 máx.	Cu= 0,1 máx. Al= 5 – 7 Si= 0,3 máx. Fe= 0,003 máx. Mn= 0,15 min. Ni= 0,003 máx. Zn= 2 – 4 Otros= 0,3 máx.	Si= 0,11 – 0,21 Fe= 0,10 máx. Zn= 0,3 – 0,5 Sn= --- Mg= --- Hg= 0,02 – 0,05 In= --- Cu= 0,006 máx. Otros= 0,002 máx.	Si= 0,10 máx. Fe= 0,13 máx. Zn= 3,5 – 5,0 Sn= --- Mg= 0,3 – 0,8 Hg= --- In= 0,02 – 0,05 Cu= 0,006 máx. Otros= 0,02 máx.	0,10 máx. Fe= 0,13 máx. Zn= 4 – 5 Sn= 0,08 – 0,16 Mg= --- Hg= --- In= --- Cu= 0,01 máx. Otros= 0,02 máx.
Rendimiento	0.95	0.5	0.95	0.9	0.5
Potencial de Trabajo mV vs Ag / AgCl	-1050	-1550	-1050	-1100	-1100
Potencial vs acero protegido	-250	-700	-250	-350	-350
Capacidad eléctrica teórica A-h / kg (A-h / lb)	820 (368)	2210 (1100)	2830 (1290)	2700 (1231)	variable
Capacidad eléctrica real A-h / kg (A-h / lb)	780 (356)	1100 (503)	2689 (1226)	2430 (1110)	variable
Consumo ánodo Kg / A-año lb / A-año	11,00 23,8	8,00 17,5	3,00 6,8	10,00 21,9	5,50 12
Densidad Kg / dm ³ lb / pulg. ³	7,3 0,258	1,77 0,063	2,75 0,098	2,81 0,10	2,81 0,10

C = capacidad eléctrica real = 780 amperios a la hora por cada kilogramo



CORRIENTE DE PROTECCIÓN O DENSIDAD DE CORRIENTE

Viene expresado en intensidad por unidad de superficie y hora.

Mantenimiento

La densidad de corriente de mantenimiento para la zona de mareas es un 20% más de la indicada en la Norma EN 12495 tabla A.1

$$\text{Densidad de corriente mantenimiento} = 108 \text{ mA/m}^2$$

Inicial

La densidad de corriente de mantenimiento para la zona de mareas es un 20% más de la indicada en la Norma EN 12495 tabla A.1

$$\text{Densidad de corriente inicial} = 180 \text{ mA/m}^2$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCIÓN DE MANTENIMIENTO

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura durante todo el tiempo.

$$I_{\text{mant}} = A \times D$$

I_{mant} , intensidad necesaria, A

A, área a proteger, m².

D, densidad de corriente, A/m²

$$I_{\text{mant}} = 36,442 \times 0,108$$

$$I_{\text{mant}} = 3,936 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE TOTAL DE PROTECCIÓN DE ACTIVACIÓN

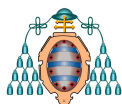
Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura para activar.

$$I_{\text{actv}} = A \times D$$

I_{actv} , intensidad necesaria, A

A, área a proteger, m²

D, densidad de corriente, A/m



$$I_{\text{actv}} = 36,442 \times 0,180$$

$$I_{\text{actv}} = 6,559 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE MANTENIMIENTO PARA 20 AÑOS

$$I_{\text{mant, total}} = I_{\text{mant}} \times 365 \times 24 \times n^{\circ} \text{ años}$$

$$I_{\text{mant, total}} = 3,936 \times 365 \times 24 \times 20$$

$$I_{\text{mant, total}} = 689.587 \text{ Ah}$$

MASA DE ZINC A INSTALAR PARA 20 AÑOS

$$M = \frac{I_{\text{mant, total}}}{C \cdot u}$$

Siendo,

M, masa de zinc, Kg.

$I_{\text{mant, total}}$, Intensidad de corriente en n° años, Ah.

C, capacidad eléctrica real, Ah/Kg.

u, factor de utilización, 0,85

$$M = \frac{689.587}{780 \cdot 0,85}$$

$$M = 1.040,10 \text{ Kg}$$

NUMERO TOTAL DE ANODOS A INSTALAR Z-50

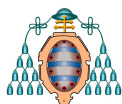
Dividiendo la masa total necesaria entre la masa del ánodo comercial a utilizar.

$$N = \frac{M}{m}$$

Siendo,

N, número de ánodos, adimensional.

M, masa de zinc, Kg.



m, masa del ánodo comercial, Kg, 120

$$N = \frac{M}{m}$$

$$N = \frac{1.040,10}{120}$$

$$N = 8,668$$

Se redondea al entero superior

$$N = 9$$

RESISTIVIDAD ESPECÍFICA DEL ELECTROLITO

El valor de la resistividad va en función de la temperatura y clorinidad, y sus unidades son ohm-cm. En este caso el electrolito es agua de mar, cuyo valor lo obtenemos a través de tablas.

Lugar	Resistividad (ρ) Ohm-cm	Temperatura °C	Densidad de corriente típica para diseño	
			mA / m ²	mA / ft ²
Golfo de México	20	22	54 – 65	5,0 – 6,0
Costa oeste U.S.	24	15	76 – 106	7,0 – 10
Mar del norte	26 – 33	0 – 12	86 – 216	8,0 – 20
Golfo Pérsico	15	30	54 – 86	5,0 – 8,0
Indonesia	19	24	54 – 65	5,0 – 6,0
Perú – Costa Sur	24	18	54 – 65	5,0 – 6,0

En el caso objeto del proyecto la estructura esta localizada en el Mar del Norte.

Resistividad específica del electrolito = 33 ohm-cm

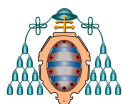
RADIO EQUIVALENTE ANODO Z-50

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 145 \cdot 175}{\pi}}$$

$$d = 179,746\text{mm}$$

$$r = 89,873\text{mm} = 0,09\text{m}$$



INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO INICIAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{inicial}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{inicial}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{inicial}}}{r_{\text{inicial}}} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,762} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,762}{0,09} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = 0,174 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{E}{R}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{0,250}{0,174}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = 1,437 \text{ A}$$

INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS INICIAL

Esta debe ser superior a la intensidad inicial de activación necesaria.

$$I_{\text{anodo, inicial}} \times N = 1,437 \times 9 = 12,933 \text{ A}$$

Comprobación que la intensidad inicial de los ánodos cumple con intensidad de activación.

$$N \times I_{\text{anodo, inicial}} \geq I_{\text{actv}}$$

$$12,933 \text{ A} \geq 6,559 \text{ A} \quad \text{CUMPLE}$$

LONGITUD FINAL DEL ANODO

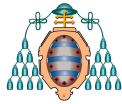
$$L_{\text{final}} = L_{\text{inicial}} - 0,1 \times u \times L_{\text{inicial}}$$

L_{final} , longitud final del ánodo, cm.

L_{inicial} , longitud inicial del ánodo, cm, 76,2

u , factor de utilización, 0,85.

$$L_{\text{final}} = 76,2 - 0,1 \times 0,85 \times 76,2$$



$$L_{\text{final}} = 69,723 \text{ cm}$$

RADIO EQUIVALENTE FINAL DEL ANODO

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{W \times (1 - u)}{\pi \cdot \text{densidad} \cdot L_{\text{final}}} + (r_{\text{nucleo}})^2 \right]}$$

W, masa del ánodo, Kg, 120

u, factor de utilización, 0,85

densidad, densidad de la aleación del ánodo, Kg/cm³, 0,0073

r_{nucleo}, radio exterior del núcleo de acero, cm, 1,382

L_{final}, longitud final del ánodo, cm, 69,723

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{120 \times (1 - 0,85)}{\pi \cdot 0,0073 \cdot 69,723} + (1,382)^2 \right]}$$

$$r_{\text{final}} = 3,629 \text{ cm}$$

INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO FINAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{final}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{final}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{final}}}{r_{\text{final}}} \right) - 1 \right]$$

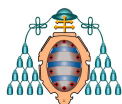
$$R_{\text{final}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,697} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,697}{0,0363} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{final}} = 0,252 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{E}{R_{\text{final}}}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{0,250}{0,252}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = 1 \text{ A}$$



INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS FINAL

Esta debe ser superior a la intensidad de mantenimiento necesaria.

$$I_{\text{anodo, final}} \times N = 1 \times 9 = 9 \text{ A}$$

Comprobación intensidad final del ánodo cumple con intensidad de mantenimiento

$$N \times I_{\text{anodo, final}} \geq I_{\text{mant}}$$

$$9 \text{ A} > 3,936 \text{ A CUMPLE}$$

COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CORRIENTE DEL ANODO

Capacidad de corriente de un ánodo

$$C = m \times e \times u$$

C, capacidad de corriente de un ánodo, Ah

m, masa del ánodo, Kg, 120

e, capacidad eléctrica real, 780 Ah/Kg

u, factor de utilización, 0,85

$$C = 120 \times 780 \times 0,85$$

$$C = 79.560 \text{ Ah}$$

Comprobación

$$N \times C \geq I_{\text{mant, total}}$$

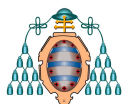
N, número de ánodos, 9

C, capacidad de corriente del ánodo, Ah.

$I_{\text{mant, total}}$, intensidad de corriente de mantenimiento para 20 años.

$$9 \times 79.560 = 716.040 \text{ Ah}$$

$$716.040 \text{ Ah} \geq 689.587 \text{ Ah CUMPLE}$$



VIDA DE LOS ANODOS

$$V = \frac{N \cdot M \cdot u}{I_{\text{mant}} \cdot c}$$

V, vida del ánodo, años

N, número de ánodos

M, masa de los ánodos, Kg

u, factor de utilización

c, consumo ánodo, obtenido de tabla norma americana MIL-A 18001-H, Kg/Año, 11

I_{mant} , intensidad de mantenimiento necesaria, A

$$V = \frac{9 \cdot 120 \cdot 0,85}{3,936 \cdot 11}$$

V = 21,203 años CUMPLE

5.2.2 ANODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO EN EL CASO DE UN ACERO DESNUDO

5.2.2.1 ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO. ZONA SUMERGIDA. ACERO DESNUDO

ÁREA A PROTEGER

La superficie a proteger es la misma que para el caso de los ánodos de zinc.

$$A = p \times h$$

Siendo,

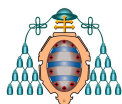
A, área.

p, perímetro exterior de la estructura, 13.665,928 mm

h, longitud desde el borde inferior hasta el punto máximo de bajamar, 5.000 mm

$$A = 13.665,928 \times 5.000$$

A = 68.329.640 mm²



TIEMPO DE PROTECCIÓN

Es el tiempo previsto de vida útil de la pieza.

Tiempo de protección = 20 años

MATERIAL DE LOS ÁNODOS

Se van a utilizar ánodos de aluminio conforme a las especificaciones de la norma Al-Zn-In en la que se definen la composición para ánodos de aleación de zinc, magnesio y aluminio.

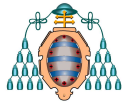
Material = aleación de aluminio tipo A

CAPACIDAD ELÉCTRICA REAL DEL MATERIAL

Se obtiene de las especificaciones de la siguiente tabla:

Propiedad	Ánodo de zinc	Ánodo de Magnesio	Ánodo de aluminio		
	MIL-A 18001-H	MIL-A 24412-A	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Composición %	Cd= 0,025 – 0,15 Al= 0,10 – 0,50 Fe= 0,006 máx. Pb= 0,006 máx. Cu= 0,005 máx. Si= 0,125 máx.	Cu= 0,1 máx. Al= 5 – 7 Si= 0,3 máx. Fe= 0,003 máx. Mn= 0,15 min. Ni= 0,003 máx. Zn=2 – 4 Otros= 0,3 máx.	Si= 0,11 – 0,21 Fe= 0,10 máx. Zn= 0,3 – 0,5 Sn= --- Mg= --- Hg= 0,02 – 0,05 In= --- Cu= 0,006 máx. Otros= 0,002 máx.	Si= 0,10 máx. Fe= 0,13 máx. Zn= 3,5 – 5,0 Sn= --- Mg= 0,3 – 0,8 Hg= --- In= 0,02 – 0,05 Cu= 0,006 máx. Otros= 0,02 máx.	0,10 máx. Fe= 0,13 máx. Zn= 4 – 5 Sn= 0,08 – 0,16 Mg= --- Hg= --- In= --- Cu= 0,01 máx. Otros= 0,02 máx.
Rendimiento	0.95	0.5	0.95	0.9	0.5
Potencial de Trabajo mV vs Ag / AgCl	-1050	-1550	-1050	-1100	-1100
Potencial vs acero protegido	-250	-700	-250	-350	-350
Capacidad eléctrica teórica A-h / kg (A-h / lb)	820 (368)	2210 (1100)	2830 (1290)	2700 (1231)	variable
Capacidad eléctrica real A-h / kg (A-h / lb)	780 (356)	1100 (503)	2689 (1226)	2430 (1110)	variable
Consumo ánodo Kg / A-año lb / A-año	11,00 23,8	8,00 17,5	3,00 6,8	10,00 21,9	5,50 12
Densidad Kg / dm3 lb / pulg.3	7,3 0,258	1,77 0,063	2,75 0,098	2,81 0,10	2,81 0,10

C = capacidad eléctrica real = 2689 amperios a la hora por cada kilogramo



CORRIENTE DE PROTECCIÓN O DENSIDAD DE CORRIENTE

Viene expresado en intensidad por unidad de superficie y hora.

Mantenimiento

La densidad de corriente de mantenimiento se obtiene mediante la Norma EN 12495 tabla A.1

$$\text{Densidad de corriente mantenimiento} = 90 \text{ mA/m}^2$$

Inicial

La densidad de corriente inicial se obtiene mediante la Norma EN 12495 tabla A.1

$$\text{Densidad de corriente inicial} = 150 \text{ mA/m}^2$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCIÓN DE MANTENIMIENTO

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura durante todo el tiempo.

$$I_{\text{mant}} = A \times D$$

I_{mant} , intensidad necesaria, A

A, área a proteger, m².

D, densidad de corriente, A/m²

$$I_{\text{mant}} = 68,330 \times 0,090$$

$$I_{\text{mant}} = - 6,150 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE TOTAL DE PROTECCIÓN DE ACTIVACIÓN

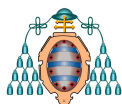
Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura para activar.

$$I_{\text{actv}} = A \times D$$

I_{actv} , intensidad necesaria, A

A, área a proteger, m².

D, densidad de corriente, A/m



$$I_{\text{actv}} = 68,330 \times 0,150$$

$$I_{\text{actv}} = - 10,249 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE MANTENIMIENTO PARA 20 AÑOS

$$I_{\text{mant, total}} = I_{\text{mant}} \times 365 \times 24 \times n^{\circ} \text{ años}$$

$$I_{\text{mant, total}} = 6,150 \times 365 \times 24 \times 20$$

$$I_{\text{mant, total}} = 1.077.480 \text{ Ah}$$

MASA DE ALUMINIO A INSTALAR PARA 20 AÑOS

$$M = \frac{I_{\text{mant, total}}}{C \cdot u}$$

Siendo,

M, masa de aluminio, Kg.

$I_{\text{mant, total}}$, Intensidad de corriente en n° años, Ah.

C, capacidad eléctrica real, Ah/Kg.

u, factor de utilización, 0,85.

$$M = \frac{1.077.480}{2689 \cdot 0,85}$$

$$M = 471,411 \text{ Kg}$$

NUMERO TOTAL DE ANODOS A INSTALAR A-50

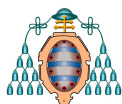
Dividiendo la masa total necesaria entre la masa del ánodo comercial a utilizar.

$$N = \frac{M}{m}$$

Siendo,

N, número de ánodos, adimensional.

M, masa de zinc, Kg.



m, masa del ánodo comercial, Kg, 50

$$N = \frac{M}{m}$$

$$N = \frac{471,411}{50}$$

$$N = 9,428$$

Se redondea al entero superior.

$$N = 10$$

RESISTIVIDAD ESPECÍFICA DEL ELECTROLITO

El valor de la resistividad va en función de la temperatura y clorinidad, y sus unidades son ohm-cm. En este caso el electrolito es agua de mar, cuyo valor lo obtenemos a través de tablas.

Lugar	Resistividad (ρ) Ohm-cm	Temperatura °C	Densidad de corriente típica para diseño	
			mA / m ²	mA / ft ²
Golfo de México	20	22	54 – 65	5,0 – 6,0
Costa oeste U.S.	24	15	76 – 106	7,0 – 10
Mar del norte	26 – 33	0 – 12	86 – 216	8,0 – 20
Golfo Pérsico	15	30	54 – 86	5,0 – 8,0
Indonesia	19	24	54 – 65	5,0 – 6,0
Perú – Costa Sur	24	18	54 – 65	5,0 – 6,0

En el caso objeto del proyecto la estructura esta localizada en el Mar del Norte.

Resistividad específica del electrolito = 33 ohm-cm

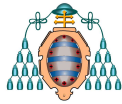
RADIO EQUIVALENTE ANODO A-50

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 145 \cdot 175}{\pi}}$$

$$d = 179,746\text{mm}$$

$$r = 89,873\text{mm} = 0,09\text{m}$$



INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO INICIAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{inicial}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{inicial}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{inicial}}}{r_{\text{inicial}}} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,762} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,762}{0,09} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = 0,174 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{E}{R}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{0,250}{0,174}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = 1,437 \text{ A}$$

INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS INICIAL

Esta debe ser superior a la intensidad inicial de activación necesaria.

$$I_{\text{anodo, inicial}} \times N = 1,437 \times 10 = 14,370 \text{ A}$$

Comprobación que la intensidad inicial de los ánodos cumple con intensidad de activación.

$$N \times I_{\text{anodo, inicial}} \geq I_{\text{actv}}$$

$$14,370 \text{ A} \geq 10,249 \text{ A CUMPLE}$$

LONGITUD FINAL DEL ANODO

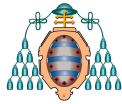
$$L_{\text{final}} = L_{\text{inicial}} - 0,1 \times u \times L_{\text{inicial}}$$

L_{final} , longitud final del ánodo, cm.

L_{inicial} , longitud inicial del ánodo, cm, 76,2

u , factor de utilización, 0,85.

$$L_{\text{final}} = 76,2 - 0,1 \times 0,85 \times 76,2$$



$$L_{\text{final}} = 69,723 \text{ cm}$$

RADIO EQUIVALENTE FINAL DEL ANODO

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{W \times (1 - u)}{\pi \cdot \text{densidad} \cdot L_{\text{final}}} + (r_{\text{nucleo}})^2 \right]}$$

W, masa del ánodo, Kg, 50

u, factor de utilización, 0,85

densidad, densidad de la aleación del ánodo, Kg/cm³, 0,00275

r_{nucleo}, radio exterior del núcleo de acero, cm, 1,382

L_{final}, longitud final del ánodo, cm, 69,723

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{50 \times (1 - 0,85)}{\pi \cdot 0,00275 \cdot 69,723} + (1,382)^2 \right]}$$

$$r_{\text{final}} = 3,789 \text{ cm}$$

INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO FINAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{final}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{final}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{final}}}{r_{\text{final}}} \right) - 1 \right]$$

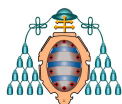
$$R_{\text{final}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,697} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,697}{0,0363} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{final}} = 0,252 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{E}{R_{\text{final}}}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{0,250}{0,252}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = 1 \text{ A}$$



INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS FINAL

Esta debe ser superior a la intensidad de mantenimiento necesaria.

$$I_{\text{anodo, final}} \times N = 1 \times 10 = 10 \text{ A}$$

Comprobación intensidad final del ánodo cumple con intensidad de mantenimiento

$$N \times I_{\text{anodo, final}} \geq I_{\text{mant}}$$

$$10 \text{ A} > 6,150 \text{ A CUMPLE}$$

COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CORRIENTE DEL ANODO

Capacidad de corriente de un ánodo

$$C = m \times e \times u$$

C, capacidad de corriente de un ánodo, Ah

m, masa del ánodo, Kg, 50

e, capacidad eléctrica real, 2689 Ah/Kg

u, factor de utilización, 0,85

$$C = 50 \times 2689 \times 0,85$$

$$C = 114.283 \text{ Ah}$$

Comprobación

$$N \times C \geq I_{\text{mant, total}}$$

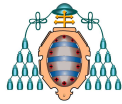
N, número de ánodos, 10

C, capacidad de corriente del ánodo, Ah.

$I_{\text{mant, total}}$, intensidad de corriente de mantenimiento para 20 años.

$$10 \times 114.283 = 1.142.830 \text{ Ah}$$

$$1.142.830 \text{ Ah} \geq 1.077.480 \text{ Ah CUMPLE}$$



VIDA DE LOS ANODOS

$$V = \frac{N \cdot M \cdot u}{I_{\text{mant}} \cdot c}$$

V, vida del ánodo, años

N, número de ánodos

M, masa de los ánodos, Kg

u, factor de utilización

c, consumo ánodo, obtenido de tabla norma americana MIL-A 18001-H, Kg/Año, 3

I_{mant} , intensidad de mantenimiento necesaria, A

$$V = \frac{10 \cdot 50 \cdot 0,85}{6,150 \cdot 3}$$

V = 23,035 años CUMPLE

5.2.2.2 ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO. ZONA DE MAREAS. ACERO DESNUDO

ÁREA A PROTEGER

Al igual que los cálculos realizados para los ánodos de zinc la zona a proteger es la tercera parte inferior de la zona que se encuentra sometida al efecto de las mareas.

$$A = p \times h$$

Siendo,

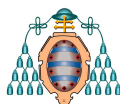
A, área.

p, perímetro exterior de la estructura, 13.665,928 mm

h, longitud desde el la parte inferior de la zona de mareas hasta el tercio inferior de esta zona, 2666,667 mm

$$A = 13.665,928 \times 2.666,667$$

A = 36.442.475 mm²



TIEMPO DE PROTECCIÓN

Es el tiempo previsto de vida útil de la pieza.

Tiempo de protección = 20 años

MATERIAL DE LOS ÁNODOS

Se van a utilizar ánodos de zinc conforme a las especificaciones de la norma Al-Zn-In, en la que se definen la composición para ánodos de aleación de zinc, magnesio y aluminio.

Material = aleación de aluminio tipo A

CAPACIDAD ELÉCTRICA REAL DEL MATERIAL

Se obtiene de las especificaciones de la siguiente tabla:

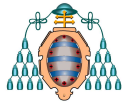
Propiedad	Ánodo de zinc	Ánodo de Magnesio	Ánodo de aluminio		
	MIL-A 18001-H	MIL-A 24412-A	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Composición %	Cd= 0,025 – 0,15 Al= 0,10 – 0,50 Fe= 0,005 máx. Pb= 0,006 máx. Cu= 0,005 máx. Si= 0,125 máx.	Cu= 0,1 máx. Al= 5 – 7 Si= 0,3 máx. Fe= 0,003 máx. Mn= 0,15 min. Ni= 0,003 máx. Zn= 2 – 4 Otros= 0,3 máx.	Si= 0,11 – 0,21 Fe= 0,10 máx. Zn= 0,3 – 0,5 Sn= --- Mg= --- Hg= 0,02 – 0,05 In= --- Cu= 0,006 máx. Otros= 0,002 máx.	Si= 0,10 máx. Fe= 0,13 máx. Zn= 3,5 – 5,0 Sn= --- Mg= 0,3 – 0,8 Hg= --- In= 0,02 – 0,05 Cu= 0,006 máx. Otros= 0,02 máx.	0,10 máx. Fe= 0,13 máx. Zn= 4 – 5 Sn= 0,08 – 0,16 Mg= --- Hg= --- In= --- Cu= 0,01 máx. Otros= 0,02 máx.
Rendimiento	0.95	0.5	0.95	0.9	0.5
Potencial de Trabajo mV vs Ag / AgCl	-1050	-1550	-1050	-1100	-1100
Potencial vs acero protegido	-250	-700	-250	-350	-350
Capacidad eléctrica teórica A-h / kg (A-h / lb)	820 (368)	2210 (1100)	2830 (1290)	2700 (1231)	variable
Capacidad eléctrica real A-h / kg (A-h / lb)	780 (356)	1100 (503)	2689 (1226)	2430 (1110)	variable
Consumo ánodo Kg / A-año lb / A-año	11,00 23,8	8,00 17,5	3,00 6,8	10,00 21,9	5,50 12
Densidad Kg / dm ³ lb / pulg. ³	7,3 0,258	1,77 0,063	2,75 0,098	2,81 0,10	2,81 0,10

C = capacidad eléctrica real = 2689 amperios a la hora por cada kilogramo

CORRIENTE DE PROTECCIÓN O DENSIDAD DE CORRIENTE

Viene expresado en intensidad por unidad de superficie y hora.

Mantenimiento



La densidad de corriente de mantenimiento para la zona de mareas es un 20% más de la indicada en la Norma EN 12495 tabla A.1

$$\text{Densidad de corriente mantenimiento} = 108 \text{ mA/m}^2$$

Inicial

La densidad de corriente de mantenimiento para la zona de mareas es un 20% más de la indicada en la Norma EN 12495 tabla A.1

$$\text{Densidad de corriente inicial} = 180 \text{ mA/m}^2$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCIÓN DE MANTENIMIENTO

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura durante todo el tiempo.

$$I_{\text{mant}} = A \times D$$

I_{mant} , intensidad necesaria, A

A, área a proteger, m².

D, densidad de corriente, A/m²

$$I_{\text{mant}} = 36,442 \times 0,108$$

$$I_{\text{mant}} = 3,936 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE TOTAL DE PROTECCIÓN DE ACTIVACIÓN

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura para activar.

$$I_{\text{actv}} = A \times D$$

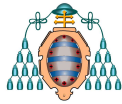
I_{actv} , intensidad necesaria, A

A, área a proteger, m²

D, densidad de corriente, A/m

$$I_{\text{actv}} = 36,442 \times 0,180$$

$$I_{\text{actv}} = 6,559 \text{ A}$$



INTENSIDAD DE CORRIENTE DE MANTENIMIENTO PARA 20 AÑOS

$$I_{\text{mant, total}} = I_{\text{mant}} \times 365 \times 24 \times n^{\circ} \text{ años}$$

$$I_{\text{mant, total}} = 3,936 \times 365 \times 24 \times 20$$

$I_{\text{mant, total}} = 689.587 \text{ Ah}$

MASA DE ALUMINIO A INSTALAR PARA 20 AÑOS

$$M = \frac{I_{\text{mant, total}}}{C \cdot u}$$

Siendo,

M, masa de zinc, Kg.

$I_{\text{mant, total}}$, Intensidad de corriente en n° años, Ah.

C, capacidad eléctrica real, Ah/Kg.

u, factor de utilización, 0,85

$$M = \frac{689.587}{2689 \cdot 0,85}$$

$M = 301,703 \text{ Kg}$

NUMERO TOTAL DE ANODOS A INSTALAR A-50

Dividiendo la masa total necesaria entre la masa del ánodo comercial a utilizar.

$$N = \frac{M}{m}$$

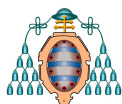
Siendo,

N, número de ánodos, adimensional.

M, masa de aluminio, Kg.

m, masa del ánodo comercial, Kg, 50

$$N = \frac{M}{m}$$



$$N = \frac{301,703}{50}$$

$$N = 6,034$$

Se redondea al entero superior

$$N = 7$$

RESISTIVIDAD ESPECÍFICA DEL ELECTROLITO

El valor de la resistividad va en función de la temperatura y clorinidad, y sus unidades son ohm-cm. En este caso el electrolito es agua de mar, cuyo valor lo obtenemos a través de tablas.

Lugar	Resistividad (ρ) Ohm-cm	Temperatura °C	Densidad de corriente típica para diseño	
			mA / m ²	mA / ft ²
Golfo de México	20	22	54 – 65	5,0 – 6,0
Costa oeste U.S.	24	15	76 – 106	7,0 – 10
Mar del norte	26 – 33	0 – 12	86 – 216	8,0 – 20
Golfo Pérsico	15	30	54 – 86	5,0 – 8,0
Indonesia	19	24	54 – 65	5,0 – 6,0
Perú – Costa Sur	24	18	54 – 65	5,0 – 6,0

En el caso objeto del proyecto la estructura esta localizada en el Mar del Norte.

Resistividad específica del electrolito = 33 ohm-cm

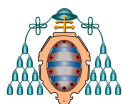
RADIO EQUIVALENTE ANODO Z-50

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 145 \cdot 175}{\pi}}$$

$$d = 179,746\text{mm}$$

$$r = 89,873\text{mm} = 0,09\text{m}$$



INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO INICIAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{inicial}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{inicial}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{inicial}}}{r_{\text{inicial}}} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,762} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,762}{0,09} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = 0,174 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{E}{R}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{0,250}{0,174}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = 1,437 \text{ A}$$

INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS INICIAL

Esta debe ser superior a la intensidad inicial de activación necesaria.

$$I_{\text{anodo, inicial}} \times N = 1,437 \times 7 = 10,059 \text{ A}$$

Comprobación que la intensidad inicial de los ánodos cumple con intensidad de activación.

$$N \times I_{\text{anodo, inicial}} \geq I_{\text{actv}}$$

$$10,059 \text{ A} \geq 6,559 \text{ A CUMPLE}$$

LONGITUD FINAL DEL ANODO

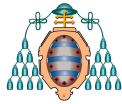
$$L_{\text{final}} = L_{\text{inicial}} - 0,1 \times u \times L_{\text{inicial}}$$

L_{final} , longitud final del ánodo, cm.

L_{inicial} , longitud inicial del ánodo, cm, 76,2

u , factor de utilización, 0,85.

$$L_{\text{final}} = 76,2 - 0,1 \times 0,85 \times 76,2$$



$$L_{\text{final}} = 69,723 \text{ cm}$$

RADIO EQUIVALENTE FINAL DEL ANODO

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{W \times (1 - u)}{\pi \cdot \text{densidad} \cdot L_{\text{final}}} + (r_{\text{nucleo}})^2 \right]}$$

W, masa del ánodo, Kg, 50

u, factor de utilización, 0,85

densidad, densidad de la aleación del ánodo, Kg/cm³, 0,00275

r_{nucleo}, radio exterior del núcleo de acero, cm, 1,382

L_{final}, longitud final del ánodo, cm, 69,723

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{50 \times (1 - 0,85)}{\pi \cdot 0,00275 \cdot 69,723} + (1,382)^2 \right]}$$

$$r_{\text{final}} = 3,789 \text{ cm}$$

INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO FINAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

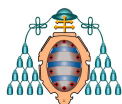
$$R_{\text{final}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{final}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{final}}}{r_{\text{final}}} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{final}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,697} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,697}{0,0363} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{final}} = 0,252 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{E}{R_{\text{final}}}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{0,250}{0,252}$$



$$I_{\text{anodo, final}} = 1 \text{ A}$$

INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS FINAL

Esta debe ser superior a la intensidad de mantenimiento necesaria.

$$I_{\text{anodo, final}} \times N = 1 \times 7 = 7 \text{ A}$$

Comprobación intensidad final del ánodo cumple con intensidad de mantenimiento

$$N \times I_{\text{anodo, final}} \geq I_{\text{mant}}$$

$$7 \text{ A} > 3,936 \text{ A CUMPLE}$$

COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CORRIENTE DEL ANODO

Capacidad de corriente de un ánodo

$$C = m \times e \times u$$

C, capacidad de corriente de un ánodo, Ah

m, masa del ánodo, Kg, 50

e, capacidad eléctrica real, 2689 Ah/Kg

u, factor de utilización, 0,85

$$C = 50 \times 2689 \times 0,85$$

$$C = 114.283 \text{ Ah}$$

Comprobación

$$N \times C \geq I_{\text{mant, total}}$$

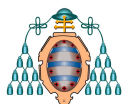
N, número de ánodos, 7

C, capacidad de corriente del ánodo, Ah.

$I_{\text{mant, total}}$, intensidad de corriente de mantenimiento para 20 años.

$$7 \times 114.283 = 799.978 \text{ Ah}$$

$$799.978 \text{ Ah} \geq 689.587 \text{ Ah CUMPLE}$$



VIDA DE LOS ANODOS

$$V = \frac{N \cdot M \cdot u}{I_{\text{mant}} \cdot c}$$

V, vida del ánodo, años

N, número de ánodos

M, masa de los ánodos, Kg

u, factor de utilización

c, consumo ánodo, obtenido de tabla norma americana MIL-A 18001-H, Kg/Aaño, 3

I_{mant} , intensidad de mantenimiento necesaria, A

$$V = \frac{7 \cdot 50 \cdot 0,85}{3,936 \cdot 3}$$

V = 25,194 años CUMPLE

5.2.3 ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC EN EL CASO DE UN ACERO PINTADO

5.2.3.1 ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC. ZONA SUMERGIDA ACERO PINTADO

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCIÓN DE MANTENIMIENTO

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura durante todo el tiempo.

Intensidad de mantenimiento del acero desnudo, $I_{\text{mant}} = 6,150$ A

Intensidad de mantenimiento del acero pintado, $I_{\text{mant pintado}}$

$$I_{\text{mant pintado}} = (I_{\text{mant}} \times f_r) \times (1 + f_b + f_t)$$

f_r Factor de recubrimiento, $f_r = a + b \times t = 0,2$

Siendo,

t, edad de la pintura, años.

a, constante dependiente de las propiedades de la pintura y del ambiente.

b, constante dependiente de las propiedades de la pintura y del ambiente.

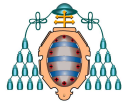


Table 10-4 Recommended constants a and b for calculation of paint coating breakdown factors. (Coating Categories are defined in 6.4.6).

Depth (m)	Recommended a and b values for Coating Categories I, II and III (see 6.4.7)		
	I (a = 0.10)	II (a = 0.05)	III (a = 0.02)
0-30	b = 0.10	b = 0.025	b = 0.012
>30	b = 0.05	b = 0.015	b = 0.008

En esta tabla tenemos las constantes a y b que dependen de las categorías del recubrimiento:

- Categoría I: una capa de pintura epoxi, con un espesor de capa seca mínimo de 20 µm.
- Categoría II: una o más capas de pintura marina base epoxi, poliuretano o vinilo con un espesor mínimo de la capa seca de 250 µm.
- Categoría III: dos o más capas de pintura marina base epoxi, poliuretano o vinilo con un espesor mínimo de la capa seca de 350 µm.

La categoría I incluye una primera capa de imprimación.

Para las categorías II y III se asume que han sido cualificados de forma documentada por su rendimiento o por pruebas pertinentes.

Para las tres categorías se asume que todo el trabajo se lleva a cabo según las recomendaciones del fabricante y que la preparación de la superficie incluye limpieza por granalla a un mínimo de SA 2.5 de acuerdo con ISO 8501.

f_b Factor de deterioro de colocación, se obtiene por la Norma EN 12495 anexo A.5, 0,015

f_t Factor de deterioro por el tiempo, se obtiene por la Norma EN 12495 anexo A.5, 0,01/año

tiempo estimado de duración de la pintura 15 años

$$f_t = 0,01 \times 15 = 0,15$$

$$I_{\text{mant pintado}} = (I_{\text{mant}} \times f_r) \times (1 + f_b + f_t)$$

$$I_{\text{mant pintado}} = 1,433 \text{ A}$$

$$I_{\text{mant pintado}} = 1,433 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE TOTAL DE PROTECCIÓN DE ACTIVACIÓN

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura para activar.

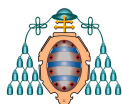
Intensidad de corriente de activación de acero desnudo, $I_{\text{actv}} = 10,249 \text{ A}$

Intensidad de corriente de activación de acero pintado, $I_{\text{actv pintado}}$

$$I_{\text{actv pintado}} = (I_{\text{actv}} \times f_r) \times (1 + f_b)$$

f_b Factor de deterioro de colocación, se obtiene por la Norma EN 12495 anexo A.5, 0,015

f_r Factor de recubrimiento, 0,2



$$I_{\text{actv pintado}} = 2,08 \text{ A}$$

$$I_{\text{actv pintado}} = 2,08 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE MANTENIMIENTO PARA 20 AÑOS

$$I_{\text{mant, total}} = I_{\text{mant}} \times 365 \times 24 \times n^{\circ} \text{ años}$$

$$I_{\text{mant, total}} = 1,433 \times 365 \times 24 \times 20$$

$$I_{\text{mant, total}} = 251.061,6 \text{ Ah}$$

MASA DE ZINC A INSTALAR PARA 20 AÑOS

$$M = \frac{I_{\text{mant, total}}}{C \cdot u}$$

Siendo,

M, masa de zinc, Kg.

$I_{\text{mant, total}}$, Intensidad de corriente en n° años, Ah.

C, capacidad eléctrica real, Ah/Kg.

u, factor de utilización, 0,85.

$$M = \frac{251.061,6}{780 \cdot 0,85}$$

$$M = 378,68 \text{ Kg}$$

NUMERO TOTAL DE ANODOS A INSTALAR Z-34

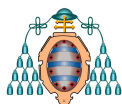
Dividiendo la masa total necesaria entre la masa del ánodo comercial a utilizar.

$$N = \frac{M}{m}$$

Siendo,

N, número de ánodos, adimensional.

M, masa de zinc, Kg.



m, masa del ánodo comercial, Kg, 36,5.

$$N = \frac{M}{m}$$

$$N = \frac{378,68}{36,5}$$

$$N = 10,37$$

Se redondea al entero superior.

$$N = 11$$

RESISTIVIDAD ESPECÍFICA DEL ELECTROLITO

El valor de la resistividad va en función de la temperatura y clorinidad, y sus unidades son ohm-cm. En este caso el electrolito es agua de mar, cuyo valor lo obtenemos a través de tablas.

Lugar	Resistividad (ρ) Ohm-cm	Temperatura °C	Densidad de corriente típica para diseño	
			mA / m ²	mA / ft ²
Golfo de México	20	22	54 – 65	5,0 – 6,0
Costa oeste U.S.	24	15	76 – 106	7,0 – 10
Mar del norte	26 – 33	0 – 12	86 – 216	8,0 – 20
Golfo Pérsico	15	30	54 – 86	5,0 – 8,0
Indonesia	19	24	54 – 65	5,0 – 6,0
Perú – Costa Sur	24	18	54 – 65	5,0 – 6,0

En el caso objeto del proyecto la estructura esta localizada en el Mar del Norte.

Resistividad específica del electrolito = 33 ohm-cm

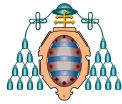
RADIO EQUIVALENTE ANODO Z-34

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 50 \cdot 130}{\pi}}$$

$$d = 90,973\text{mm}$$

$$r = 45,486\text{mm} = 0,0455\text{m}$$



INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO INICIAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{inicial}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{inicial}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{inicial}}}{r_{\text{inicial}}} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,914} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,914}{0,0455} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = 0,195 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{E}{R}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{0,250}{0,195}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = 1,282 \text{ A}$$

INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS INICIAL

Esta debe ser superior a la intensidad inicial de activación necesaria.

$$I_{\text{anodo, inicial}} \times N = 1,282 \times 11 = 14,103 \text{ A}$$

Comprobación que la intensidad inicial de los ánodos cumple con intensidad de activación.

$$N \times I_{\text{anodo, inicial}} \geq I_{\text{actv pintado}}$$

$$14,103 \text{ A} \geq 2,08 \text{ A CUMPLE}$$

LONGITUD FINAL DEL ANODO

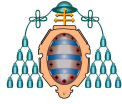
$$L_{\text{final}} = L_{\text{inicial}} - 0,1 \times u \times L_{\text{inicial}}$$

L_{final} , longitud final del ánodo, cm.

L_{inicial} , longitud inicial del ánodo, cm, 91,4

u , factor de utilización, 0,85.

$$L_{\text{final}} = 91,4 - 0,1 \times 0,85 \times 91,4$$



$$L_{\text{final}} = 83,631 \text{ cm}$$

RADIO EQUIVALENTE FINAL DEL ANODO

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{W \times (1 - u)}{\pi \cdot \text{densidad} \cdot L_{\text{final}}} + (r_{\text{nucleo}})^2 \right]}$$

W, masa del ánodo, Kg, 36,5

u, factor de utilización, 0,85

densidad, densidad de la aleación del ánodo, Kg/cm³, 0,0073

r_{nucleo}, radio exterior del núcleo de acero, cm, 0,927

L_{final}, longitud final del ánodo, cm, 83,631

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{36,5 \times (1 - 0,85)}{\pi \cdot 0,0073 \cdot 83,631} + (0,927)^2 \right]}$$

$$r_{\text{final}} = 1,927 \text{ cm}$$

INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO FINAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{final}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{final}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{final}}}{r_{\text{final}}} \right) - 1 \right]$$

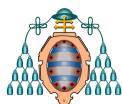
$$R_{\text{final}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,83631} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,83631}{0,01927} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{final}} = 0,261 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{E}{R_{\text{final}}}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{0,250}{0,261}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = 0,96 \text{ A}$$



INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS FINAL

Esta debe ser superior a la intensidad de mantenimiento necesaria.

$$I_{\text{anodo, final}} \times N = 0,96 \times 11 = 10,54 \text{ A}$$

Comprobación intensidad final del ánodo cumple con intensidad de mantenimiento

$$N \times I_{\text{anodo, final}} \geq I_{\text{mant pintado}}$$

$$10,54 \text{ A} > 1,433 \text{ A CUMPLE}$$

COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CORRIENTE DEL ANODO

Capacidad de corriente de un ánodo

$$C = m \times e \times u$$

C, capacidad de corriente de un ánodo, Ah

m, masa del ánodo, Kg, 36,5

e, capacidad eléctrica real, 780 Ah/Kg

u, factor de utilización, 0,85

$$C = 36,5 \times 780 \times 0,85$$

$$C = 24.199,5 \text{ Ah}$$

Comprobación

$$N \times C \geq I_{\text{mant, total}}$$

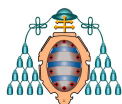
N, número de ánodos, 11

C, capacidad de corriente del ánodo, Ah.

$I_{\text{mant, total}}$, intensidad de corriente de mantenimiento para 20 años.

$$11 \times 24.199,5 = 266.194,5 \text{ Ah}$$

$$266.194,5 \text{ Ah} \geq 251.061,6 \text{ Ah CUMPLE}$$



VIDA DE LOS ANODOS

$$V = \frac{N \cdot M \cdot u}{I_{\text{mant}} \cdot c}$$

V, vida del ánodo, años

N, número de ánodos

M, masa de los ánodos, Kg

u, factor de utilización

c, consumo ánodo, obtenido de tabla norma americana MIL-A 18001-H, Kg/Aaño, 11

I_{mant} , intensidad de mantenimiento necesaria, A

$$V = \frac{11 \cdot 36,5 \cdot 0,85}{1,433 \cdot 11}$$

V = 21,65 años CUMPLE

5.2.3.2 ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC. ZONA DE MAREAS. ACERO PINTADO

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCIÓN DE MANTENIMIENTO

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura durante todo el tiempo.

Intensidad de mantenimiento del acero desnudo, $I_{\text{mant}} = 3,936 \text{ A}$

Intensidad de mantenimiento del acero pintado, $I_{\text{mant pintado}}$

$$I_{\text{mant pintado}} = (I_{\text{mant}} \times f_r) \times (1 + f_b + f_t)$$

f_r Factor de recubrimiento, $f_r = a + b \times t = 0,2$

Siendo,

t, edad de la pintura, años.

a, constante dependiente de las propiedades de la pintura y del ambiente.

b, constante dependiente de las propiedades de la pintura y del ambiente.

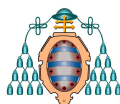


Table 10-4 Recommended constants a and b for calculation of paint coating breakdown factors. (Coating Categories are defined in 6.4.6).

Depth (m)	Recommended a and b values for Coating Categories I, II and III (see 6.4.7)		
	I (a = 0.10)	II (a = 0.05)	III (a = 0.02)
0-30	b = 0.10	b = 0.025	b = 0.012
>30	b = 0.05	b = 0.015	b = 0.008

En esta tabla tenemos las constantes a y b que dependen de las categorías del recubrimiento:

-Categoría I: una capa de pintura epoxi, con un espesor de capa seca mínimo de 20 µm.

-Categoría II: una o más capas de pintura marina base epoxi, poliuretano o vinilo con un espesor mínimo de la capa seca de 250 µm.

-Categoría III: dos o más capas de pintura marina base epoxi, poliuretano o vinilo con un espesor mínimo de la capa seca de 350 µm.

La categoría I incluye una primera capa de imprimación.

Para las categorías II y III se asume que han sido cualificados de forma documentada por su rendimiento o por pruebas pertinentes.

Para las tres categorías se asume que todo el trabajo se lleva a cabo según las recomendaciones del fabricante y que la preparación de la superficie incluye limpieza por granalla a un mínimo de SA 2.5 de acuerdo con ISO 8501.

f_b Factor de deterioro de colocación, se obtiene por la Norma EN 12495 anexo A.5, 0,035

f_t Factor de deterioro por el tiempo, se obtiene por la Norma EN 12495 anexo A.5, 0,01/año

tiempo estimado de duración de la pintura 15 años

$$f_t = 0,01 \times 15 = 0,15$$

$$I_{\text{mant pintado}} = (I_{\text{mant}} \times f_r) \times (1 + f_b + f_t)$$

$$I_{\text{mant pintado}} = 0,933 \text{ A}$$

$$I_{\text{mant pintado}} = 0,933 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE TOTAL DE PROTECCIÓN DE ACTIVACIÓN

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura para activar.

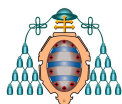
Intensidad de corriente de activación de acero desnudo, $I_{\text{actv}} = 6,559 \text{ A}$

Intensidad de corriente de activación de acero pintado, $I_{\text{actv pintado}}$

$$I_{\text{actv pintado}} = (I_{\text{actv}} \times f_r) \times (1 + f_b)$$

f_b Factor de deterioro de colocación, se obtiene por la Norma EN 12495 anexo A.5, 0,035

f_r Factor de recubrimiento, 0,2



$$I_{\text{actv pintado}} = 1,36 \text{ A}$$

$$I_{\text{actv pintado}} = 1,36 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE MANTENIMIENTO PARA 20 AÑOS

$$I_{\text{mant, total}} = I_{\text{mant}} \times 365 \times 24 \times n^{\circ} \text{ años}$$

$$I_{\text{mant, total}} = 0,933 \times 365 \times 24 \times 20$$

$$I_{\text{mant, total}} = 163.461,6 \text{ Ah}$$

MASA DE ZINC A INSTALAR PARA 20 AÑOS

$$M = \frac{I_{\text{mant, total}}}{C \cdot u}$$

Siendo,

M, masa de zinc, Kg.

$I_{\text{mant, total}}$, Intensidad de corriente en n° años, Ah.

C, capacidad eléctrica real, Ah/Kg.

u, factor de utilización, 0,85

$$M = \frac{163.461,6}{780 \cdot 0,85}$$

$$M = 246,55 \text{ Kg}$$

NUMERO TOTAL DE ANODOS A INSTALAR Z-34

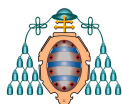
Dividiendo la masa total necesaria entre la masa del ánodo comercial a utilizar.

$$N = \frac{M}{m}$$

Siendo,

N, número de ánodos, adimensional.

M, masa de zinc, Kg.



m, masa del ánodo comercial, Kg, 36,5

$$N = \frac{M}{m}$$

$$N = \frac{246,55}{36,5}$$

$$N = 6,75$$

Se redondea al entero superior

$$N = 7$$

RESISTIVIDAD ESPECÍFICA DEL ELECTROLITO

El valor de la resistividad va en función de la temperatura y clorinidad, y sus unidades son ohm-cm. En este caso el electrolito es agua de mar, cuyo valor lo obtenemos a través de tablas.

Lugar	Resistividad (ρ) Ohm-cm	Temperatura °C	Densidad de corriente típica para diseño	
			mA / m ²	mA / ft ²
Golfo de México	20	22	54 – 65	5,0 – 6,0
Costa oeste U.S.	24	15	76 – 106	7,0 – 10
Mar del norte	26 – 33	0 – 12	86 – 216	8,0 – 20
Golfo Pérsico	15	30	54 – 86	5,0 – 8,0
Indonesia	19	24	54 – 65	5,0 – 6,0
Perú – Costa Sur	24	18	54 – 65	5,0 – 6,0

En el caso objeto del proyecto la estructura esta localizada en el Mar del Norte.

Resistividad específica del electrolito = 33 ohm-cm

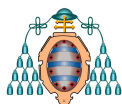
RADIO EQUIVALENTE ANODO Z-34

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 50 \cdot 130}{\pi}}$$

$$d = 90,973\text{mm}$$

$$r = 45,486\text{mm} = 0,0455\text{m}$$



INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO INICIAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{inicial}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{inicial}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{inicial}}}{r_{\text{inicial}}} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,914} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,914}{0,0455} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = 0,195 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{E}{R}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{0,250}{0,195}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = 1,282 \text{ A}$$

INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS INICIAL

Esta debe ser superior a la intensidad inicial de activación necesaria.

$$I_{\text{anodo, inicial}} \times N = 1,282 \text{ A} \times 7 = 8,974 \text{ A}$$

Comprobación que la intensidad inicial de los ánodos cumple con intensidad de activación.

$$N \times I_{\text{anodo, inicial}} \geq I_{\text{actv pintado}}$$

$$8,974 \geq 1,36 \text{ A CUMPLE}$$

LONGITUD FINAL DEL ANODO

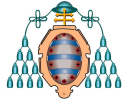
$$L_{\text{final}} = L_{\text{inicial}} - 0,1 \times u \times L_{\text{inicial}}$$

L_{final} , longitud final del ánodo, cm.

L_{inicial} , longitud inicial del ánodo, cm, 91,4

u , factor de utilización, 0,85.

$$L_{\text{final}} = 91,4 - 0,1 \times 0,85 \times 91,4$$



$$L_{\text{final}} = 83,631 \text{ cm}$$

RADIO EQUIVALENTE FINAL DEL ANODO

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{W \times (1 - u)}{\pi \cdot \text{densidad} \cdot L_{\text{final}}} + (r_{\text{nucleo}})^2 \right]}$$

W, masa del ánodo, Kg, 36,5

u, factor de utilización, 0,85

densidad, densidad de la aleación del ánodo, Kg/cm³, 0,0073

r_{nucleo}, radio exterior del núcleo de acero, cm, 0,927

L_{final}, longitud final del ánodo, cm, 83,631

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{36,5 \times (1 - 0,85)}{\pi \cdot 0,0073 \cdot 83,631} + (0,927)^2 \right]}$$

$$r_{\text{final}} = 1,927 \text{ cm}$$

INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO FINAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{final}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{final}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{final}}}{r_{\text{final}}} \right) - 1 \right]$$

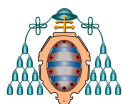
$$R_{\text{final}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,83631} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,83631}{0,01927} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{final}} = 0,261 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{E}{R_{\text{final}}}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{0,250}{0,261}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = 0,96 \text{ A}$$



INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS FINAL

Esta debe ser superior a la intensidad de mantenimiento necesaria.

$$I_{\text{anodo, final}} \times N = 0,96 \times 7 = 6,72 \text{ A}$$

Comprobación intensidad final del ánodo cumple con intensidad de mantenimiento

$$N \times I_{\text{anodo, final}} \geq I_{\text{mant pintado}}$$

$$6,72 \text{ A} > 0,933 \text{ A CUMPLE}$$

COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CORRIENTE DEL ANODO

Capacidad de corriente de un ánodo

$$C = m \times e \times u$$

C, capacidad de corriente de un ánodo, Ah

m, masa del ánodo, Kg, 36,5

e, capacidad eléctrica real, 780 Ah/Kg

u, factor de utilización, 0,85

$$C = 36,5 \times 780 \times 0,85$$

$$C = 24.199,5 \text{ Ah}$$

Comprobación

$$N \times C \geq I_{\text{mant, total}}$$

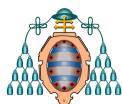
N, número de ánodos, 7

C, capacidad de corriente del ánodo, Ah.

$I_{\text{mant, total}}$, intensidad de corriente de mantenimiento para 20 años.

$$7 \times 24.199,5 = 169.396,5 \text{ Ah}$$

$$169.396,5 \text{ Ah} \geq 163.461,6 \text{ Ah CUMPLE}$$



VIDA DE LOS ANODOS

$$V = \frac{N \cdot M \cdot u}{I_{\text{mant}} \cdot c}$$

V, vida del ánodo, años

N, número de ánodos

M, masa de los ánodos, Kg

u, factor de utilización

c, consumo ánodo, obtenido de tabla norma americana MIL-A 18001-H, Kg/Aaño, 11

I_{mant} , intensidad de mantenimiento necesaria, A

$$V = \frac{7 \cdot 36,5 \cdot 0,85}{0,933 \cdot 11}$$

V = 21,16 años CUMPLE

5.2.4 ANODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO EN EL CASO DE UN ACERO PINTADO

5.2.4.1 ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO. ZONA SUMERGIDA. ACERO PINTADO

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCIÓN DE MANTENIMIENTO

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura durante todo el tiempo.

Intensidad de mantenimiento del acero desnudo, $I_{\text{mant}} = 6,150$ A

Intensidad de mantenimiento del acero pintado, $I_{\text{mant pintado}}$

$$I_{\text{mant pintado}} = (I_{\text{mant}} \times f_r) \times (1 + f_b + f_t)$$

f_r Factor de recubrimiento, $f_r = a + b \times t = 0,2$

Siendo,

t, edad de la pintura, años.

a, constante dependiente de las propiedades de la pintura y del ambiente.

b, constante dependiente de las propiedades de la pintura y del ambiente.

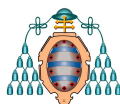


Table 10-4 Recommended constants a and b for calculation of paint coating breakdown factors. (Coating Categories are defined in 6.4.6).

Depth (m)	Recommended a and b values for Coating Categories I, II and III (see 6.4.7)		
	I (a = 0.10)	II (a = 0.05)	III (a = 0.02)
0-30	b = 0.10	b = 0.025	b = 0.012
>30	b = 0.05	b = 0.015	b = 0.008

En esta tabla tenemos las constantes a y b que dependen de las categorías del recubrimiento:

-Categoría I: una capa de pintura epoxi, con un espesor de capa seca mínimo de 20 µm.

-Categoría II: una o más capas de pintura marina base epoxi, poliuretano o vinilo con un espesor mínimo de la capa seca de 250 µm.

-Categoría III: dos o más capas de pintura marina base epoxi, poliuretano o vinilo con un espesor mínimo de la capa seca de 350 µm.

La categoría I incluye una primera capa de imprimación.

Para las categorías II y III se asume que han sido cualificados de forma documentada por su rendimiento o por pruebas pertinentes.

Para las tres categorías se asume que todo el trabajo se lleva a cabo según las recomendaciones del fabricante y que la preparación de la superficie incluye limpieza por granalla a un mínimo de SA 2.5 de acuerdo con ISO 8501.

f_b Factor de deterioro de colocación, se obtiene por la Norma EN 12495 anexo A.5, 0,015

f_t Factor de deterioro por el tiempo, se obtiene por la Norma EN 12495 anexo A.5, 0,01/año

tiempo estimado de duración de la pintura 15 años

$$f_t = 0,01 \times 15 = 0,15$$

$$I_{\text{mant pintado}} = (I_{\text{mant}} \times f_r) \times (1 + f_b + f_t)$$

$$I_{\text{mant pintado}} = -1,433 \text{ A}$$

$$I_{\text{mant pintado}} = 1,433 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE TOTAL DE PROTECCIÓN DE ACTIVACIÓN

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura para activar.

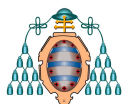
Intensidad de corriente de activación de acero desnudo, $I_{\text{actv}} = -10,249 \text{ A}$

Intensidad de corriente de activación de acero pintado, $I_{\text{actv pintado}}$

$$I_{\text{actv pintado}} = (I_{\text{actv}} \times f_r) \times (1 + f_b)$$

f_b Factor de deterioro de colocación, se obtiene por la Norma EN 12495 anexo A.5, 0,015

f_r Factor de recubrimiento, 0,2



$$I_{\text{actv pintado}} = -2,08 \text{ A}$$

$$I_{\text{actv pintado}} = 2,08 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE MANTENIMIENTO PARA 20 AÑOS

$$I_{\text{mant, total}} = I_{\text{mant}} \times 365 \times 24 \times n^{\circ} \text{ años}$$

$$I_{\text{mant, total}} = 1,433 \times 365 \times 24 \times 20$$

$$I_{\text{mant, total}} = 251.061,6 \text{ Ah}$$

MASA DE ALUMINIO A INSTALAR PARA 20 AÑOS

$$M = \frac{I_{\text{mant, total}}}{C \cdot u}$$

Siendo,

M, masa de zinc, Kg.

$I_{\text{mant, total}}$, Intensidad de corriente en n° años, Ah.

C, capacidad eléctrica real, Ah/Kg.

u, factor de utilización, 0,85.

$$M = \frac{251.061,6}{2689 \cdot 0,85}$$

$$M = 109,84 \text{ Kg}$$

NUMERO TOTAL DE ANODOS A INSTALAR A-34

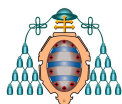
Dividiendo la masa total necesaria entre la masa del ánodo comercial a utilizar.

$$N = \frac{M}{m}$$

Siendo,

N, número de ánodos, adimensional.

M, masa de aluminio, Kg.



m, masa del ánodo comercial, Kg, 15,9

$$N = \frac{M}{m}$$

$$N = \frac{109,84}{15,9}$$

$$N = 6,908$$

Se redondea al entero superior.

$$N = 7$$

RESISTIVIDAD ESPECÍFICA DEL ELECTROLITO

El valor de la resistividad va en función de la temperatura y clorinidad, y sus unidades son ohm-cm. En este caso el electrolito es agua de mar, cuyo valor lo obtenemos a través de tablas.

Lugar	Resistividad (ρ) Ohm-cm	Temperatura °C	Densidad de corriente típica para diseño	
			mA / m ²	mA / ft ²
Golfo de México	20	22	54 – 65	5,0 – 6,0
Costa oeste U.S.	24	15	76 – 106	7,0 – 10
Mar del norte	26 – 33	0 – 12	86 – 216	8,0 – 20
Golfo Pérsico	15	30	54 – 86	5,0 – 8,0
Indonesia	19	24	54 – 65	5,0 – 6,0
Perú – Costa Sur	24	18	54 – 65	5,0 – 6,0

En el caso objeto del proyecto la estructura esta localizada en el Mar del Norte.

Resistividad específica del electrolito = 33 ohm-cm

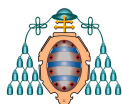
RADIO EQUIVALENTE ANODO A-34

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 50 \cdot 130}{\pi}}$$

$$d = 90,973\text{mm}$$

$$r = 45,486\text{mm} = 0,0455\text{m}$$



INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO INICIAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{inicial}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{inicial}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{inicial}}}{r_{\text{inicial}}} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,914} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,914}{0,0455} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = 0,195 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{E}{R}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{0,250}{0,195}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = 1,282 \text{ A}$$

INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS INICIAL

Esta debe ser superior a la intensidad inicial de activación necesaria.

$$I_{\text{anodo, inicial}} \times N = 1,282 \text{ A} \times 7 = 8,974 \text{ A}$$

Comprobación que la intensidad inicial de los ánodos cumple con intensidad de activación.

$$N \times I_{\text{anodo, inicial}} \geq I_{\text{actv pintado}}$$

$$8,974 \text{ A} \geq 2,08 \text{ A CUMPLE}$$

LONGITUD FINAL DEL ANODO

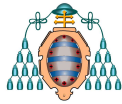
$$L_{\text{final}} = L_{\text{inicial}} - 0,1 \times u \times L_{\text{inicial}}$$

L_{final} , longitud final del ánodo, cm.

L_{inicial} , longitud inicial del ánodo, cm, 91,4

u , factor de utilización, 0,85.

$$L_{\text{final}} = 91,4 - 0,1 \times 0,85 \times 91,4$$



$$L_{\text{final}} = 83,631 \text{ cm}$$

RADIO EQUIVALENTE FINAL DEL ANODO

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{W \times (1 - u)}{\pi \cdot \text{densidad} \cdot L_{\text{final}}} + (r_{\text{nucleo}})^2 \right]}$$

W, masa del ánodo, Kg, 15,9

u, factor de utilización, 0,85

densidad, densidad de la aleación del ánodo, Kg/cm³, 0,00275

r_{nucleo}, radio exterior del núcleo de acero, cm, 0,927

L_{final}, longitud final del ánodo, cm, 83,631

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{15,9 \times (1 - 0,85)}{\pi \cdot 0,00275 \cdot 83,631} + (0,927)^2 \right]}$$

$$r_{\text{final}} = 2,040 \text{ cm}$$

INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO FINAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{final}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{final}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{final}}}{r_{\text{final}}} \right) - 1 \right]$$

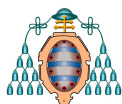
$$R_{\text{final}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,83631} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,83631}{0,0204} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{final}} = 0,251 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{E}{R_{\text{final}}}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{0,250}{0,251}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = 1 \text{ A}$$



INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS FINAL

Esta debe ser superior a la intensidad de mantenimiento necesaria.

$$I_{\text{anodo, final}} \times N = 1 \times 7 = 7 \text{ A}$$

Comprobación intensidad final del ánodo cumple con intensidad de mantenimiento

$$N \times I_{\text{anodo, final}} \geq I_{\text{mant}}$$

$$7 \text{ A} > 1,433 \text{ CUMPLE}$$

COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CORRIENTE DEL ANODO

Capacidad de corriente de un ánodo

$$C = m \times e \times u$$

C, capacidad de corriente de un ánodo, Ah

m, masa del ánodo, Kg, 15,9

e, capacidad eléctrica real, 2689 Ah/Kg

u, factor de utilización, 0,85

$$C = 15,9 \times 2689 \times 0,85$$

$$C = 36.341,835 \text{ Ah}$$

Comprobación

$$N \times C \geq I_{\text{mant, total}}$$

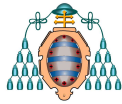
N, número de ánodos, 7

C, capacidad de corriente del ánodo, Ah.

$I_{\text{mant, total}}$, intensidad de corriente de mantenimiento para 20 años.

$$7 \times 36.341,835 = 254392,845 \text{ Ah}$$

$$254392,845 \geq 251.061,6 \text{ Ah CUMPLE}$$



VIDA DE LOS ANODOS

$$V = \frac{N \cdot M \cdot u}{I_{\text{mant}} \cdot c}$$

V, vida del ánodo, años

N, número de ánodos

M, masa de los ánodos, Kg

u, factor de utilización

c, consumo ánodo, obtenido de tabla norma americana MIL-A 18001-H, Kg/Año, 3

I_{mant} , intensidad de mantenimiento necesaria, A

$$V = \frac{7 \cdot 15,9 \cdot 0,85}{1,433 \cdot 3}$$

V = 22 años CUMPLE

5.2.4.2 ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO PARA LA ZONA DE MAREAS

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCIÓN DE MANTENIMIENTO

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura durante todo el tiempo.

Intensidad de mantenimiento del acero desnudo, $I_{\text{mant}} = 3,936 \text{ A}$

Intensidad de mantenimiento del acero pintado, $I_{\text{mant pintado}}$

$$I_{\text{mant pintado}} = (I_{\text{mant}} \times f_r) \times (1 + f_b + f_t)$$

f_r Factor de recubrimiento, $f_r = a + b \times t = 0,2$

Siendo,

t, edad de la pintura, años.

a, constante dependiente de las propiedades de la pintura y del ambiente.

b, constante dependiente de las propiedades de la pintura y del ambiente.

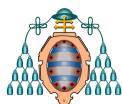


Table 10-4 Recommended constants a and b for calculation of paint coating breakdown factors. (Coating Categories are defined in 6.4.6).

Depth (m)	Recommended a and b values for Coating Categories I, II and III (see 6.4.7)		
	I (a = 0.10)	II (a = 0.05)	III (a = 0.02)
0-30	b = 0.10	b = 0.025	b = 0.012
>30	b = 0.05	b = 0.015	b = 0.008

En esta tabla tenemos las constantes a y b que dependen de las categorías del recubrimiento:

-Categoría I: una capa de pintura epoxi, con un espesor de capa seca mínimo de 20 µm.

-Categoría II: una o más capas de pintura marina base epoxi, poliuretano o vinilo con un espesor mínimo de la capa seca de 250 µm.

-Categoría III: dos o más capas de pintura marina base epoxi, poliuretano o vinilo con un espesor mínimo de la capa seca de 350 µm.

La categoría I incluye una primera capa de imprimación.

Para las categorías II y III se asume que han sido cualificados de forma documentada por su rendimiento o por pruebas pertinentes.

Para las tres categorías se asume que todo el trabajo se lleva a cabo según las recomendaciones del fabricante y que la preparación de la superficie incluye limpieza por granalla a un mínimo de SA 2.5 de acuerdo con ISO 8501.

f_b Factor de deterioro de colocación, se obtiene por la Norma EN 12495 anexo A.5, 0,035

f_t Factor de deterioro por el tiempo, se obtiene por la Norma EN 12495 anexo A.5, 0,01/año

tiempo estimado de duración de la pintura 15 años

$$f_t = 0,01 \times 15 = 0,15$$

$$I_{\text{mant pintado}} = (I_{\text{mant}} \times f_r) \times (1 + f_b + f_t)$$

$$I_{\text{mant pintado}} = 0,933 \text{ A}$$

$$I_{\text{mant pintado}} = 0,933 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE TOTAL DE PROTECCIÓN DE ACTIVACIÓN

Intensidad necesaria que se debe aplicar a la estructura para activar.

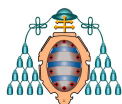
Intensidad de corriente de activación de acero desnudo, $I_{\text{actv}} = 6,559 \text{ A}$

Intensidad de corriente de activación de acero pintado, $I_{\text{actv pintado}}$

$$I_{\text{actv pintado}} = (I_{\text{actv}} \times f_r) \times (1 + f_b)$$

f_b Factor de deterioro de colocación, se obtiene por la Norma EN 12495 anexo A.5, 0,035

f_r Factor de recubrimiento, 0,2



$$I_{\text{actv pintado}} = 1,36 \text{ A}$$

$$I_{\text{actv pintado}} = 1,36 \text{ A}$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE DE MANTENIMIENTO PARA 20 AÑOS

$$I_{\text{mant, total}} = I_{\text{mant}} \times 365 \times 24 \times n^{\circ} \text{ años}$$

$$I_{\text{mant, total}} = 0,933 \times 365 \times 24 \times 20$$

$$I_{\text{mant, total}} = 163.461,6 \text{ Ah}$$

MASA DE ALUMINIO A INSTALAR PARA 20 AÑOS

$$M = \frac{I_{\text{mant, total}}}{C \cdot u}$$

Siendo,

M, masa de zinc, Kg.

$I_{\text{mant, total}}$, Intensidad de corriente en n° años, Ah.

C, capacidad eléctrica real, Ah/Kg.

u, factor de utilización, 0,85

$$M = \frac{163.461,6}{2689 \cdot 0,85}$$

$$M = 71,51 \text{ Kg}$$

NUMERO TOTAL DE ANODOS A INSTALAR A-34

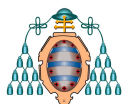
Dividiendo la masa total necesaria entre la masa del ánodo comercial a utilizar.

$$N = \frac{M}{m}$$

Siendo,

N, número de ánodos, adimensional.

M, masa de aluminio, Kg.



m, masa del ánodo comercial, Kg, 15,9

$$N = \frac{M}{m}$$

$$N = \frac{71,51}{15,9}$$

$$N = 4,49$$

Se redondea al entero superior

$$N = 5$$

RESISTIVIDAD ESPECÍFICA DEL ELECTROLITO

El valor de la resistividad va en función de la temperatura y clorinidad, y sus unidades son ohm-cm. En este caso el electrolito es agua de mar, cuyo valor lo obtenemos a través de tablas.

Lugar	Resistividad (ρ) Ohm-cm	Temperatura °C	Densidad de corriente típica para diseño	
			mA / m ²	mA / ft ²
Golfo de México	20	22	54 – 65	5,0 – 6,0
Costa oeste U.S.	24	15	76 – 106	7,0 – 10
Mar del norte	26 – 33	0 – 12	86 – 216	8,0 – 20
Golfo Pérsico	15	30	54 – 86	5,0 – 8,0
Indonesia	19	24	54 – 65	5,0 – 6,0
Perú – Costa Sur	24	18	54 – 65	5,0 – 6,0

En el caso objeto del proyecto la estructura esta localizada en el Mar del Norte.

Resistividad específica del electrolito = 33 ohm-cm

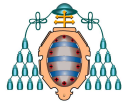
RADIO EQUIVALENTE ANODO A-34

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 50 \cdot 130}{\pi}}$$

$$d = 90,973\text{mm}$$

$$r = 45,486\text{mm} = 0,0455\text{m}$$



INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO INICIAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{inicial}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{inicial}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{inicial}}}{r_{\text{inicial}}} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,914} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,914}{0,0455} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{inicial}} = 0,195 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{E}{R}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = \frac{0,250}{0,195}$$

$$I_{\text{anodo, inicial}} = 1,282 \text{ A}$$

INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS INICIAL

Esta debe ser superior a la intensidad inicial de activación necesaria.

$$I_{\text{anodo, inicial}} \times N = 1,282 \times 5 = 6,41 \text{ A}$$

Comprobación que la intensidad inicial de los ánodos cumple con intensidad de activación.

$$N \times I_{\text{anodo, inicial}} \geq I_{\text{actv}}$$

$$6,41 \text{ A} \geq 1,36 \text{ A CUMPLE}$$

LONGITUD FINAL DEL ANODO

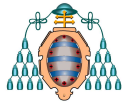
$$L_{\text{final}} = L_{\text{inicial}} - 0,1 \times u \times L_{\text{inicial}}$$

L_{final} , longitud final del ánodo, cm.

L_{inicial} , longitud inicial del ánodo, cm, 91,4

u , factor de utilización, 0,85.

$$L_{\text{final}} = 91,4 - 0,1 \times 0,85 \times 91,4$$



$$L_{\text{final}} = 83,631 \text{ cm}$$

RADIO EQUIVALENTE FINAL DEL ANODO

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{W \times (1 - u)}{\pi \cdot \text{densidad} \cdot L_{\text{final}}} + (r_{\text{nucleo}})^2 \right]}$$

W, masa del ánodo, Kg, 15,9

u, factor de utilización, 0,85

densidad, densidad de la aleación del ánodo, Kg/cm³, 0,00275

r_{nucleo}, radio exterior del núcleo de acero, cm, 0,927

L_{final}, longitud final del ánodo, cm, 83,631

$$r_{\text{final}} = \sqrt{\left[\frac{15,9 \times (1 - 0,85)}{\pi \cdot 0,00275 \cdot 83,631} + (0,927)^2 \right]}$$

$$r_{\text{final}} = 2,040 \text{ cm}$$

INTENSIDAD GENERADA POR UN ANODO FINAL

Se aplica la formula de Dwight, para $L \geq 4r$.

$$R_{\text{final}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_{\text{final}}} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_{\text{final}}}{r_{\text{final}}} \right) - 1 \right]$$

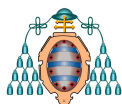
$$R_{\text{final}} = \frac{0,33}{2\pi \cdot 0,83631} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0,83631}{0,0204} \right) - 1 \right]$$

$$R_{\text{final}} = 0,251 \Omega$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{E}{R_{\text{final}}}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = \frac{0,250}{0,251}$$

$$I_{\text{anodo, final}} = 1 \text{ A}$$



INTENSIDAD GENERADA POR EL TOTAL DE LOS ANODOS FINAL

Esta debe ser superior a la intensidad de mantenimiento necesaria.

$$I_{\text{anodo, final}} \times N = 1 \times 5 = 5 \text{ A}$$

Comprobación intensidad final del ánodo cumple con intensidad de mantenimiento

$$N \times I_{\text{anodo, final}} \geq I_{\text{mant}}$$

$$5 \text{ A} > 0,933 \text{ A CUMPLE}$$

COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CORRIENTE DEL ANODO

Capacidad de corriente de un ánodo

$$C = m \times e \times u$$

C, capacidad de corriente de un ánodo, Ah

m, masa del ánodo, Kg, 15,9

e, capacidad eléctrica real, 2689 Ah/Kg

u, factor de utilización, 0,85

$$C = 15,9 \times 2689 \times 0,85$$

$$C = 36.341,835 \text{ Ah}$$

Comprobación

$$N \times C \geq I_{\text{mant, total}}$$

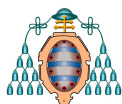
N, número de ánodos, 5

C, capacidad de corriente del ánodo, Ah.

$I_{\text{mant, total}}$, intensidad de corriente de mantenimiento para 20 años.

$$5 \times 36.341,835 = 181.709,175 \text{ Ah}$$

$$181.709,175 \text{ Ah} \geq 160.658,4 \text{ Ah CUMPLE}$$



VIDA DE LOS ANODOS

$$V = \frac{N \cdot M \cdot u}{I_{\text{mant}} \cdot c}$$

V, vida del ánodo, años

N, número de ánodos

M, masa de los ánodos, Kg

u, factor de utilización

c, consumo ánodo, obtenido de tabla norma americana MIL-A 18001-H, Kg/Aaño, 3

I_{mant} , intensidad de mantenimiento necesaria, A

$$V = \frac{5 \cdot 15,9 \cdot 0,85}{0,197 \cdot 3}$$

V = 24,56 años CUMPLE

6 DISTRIBUCIÓN DE LOS ÁNODOS

Los ánodos se distribuirán de forma uniforme en la estructura. La forma escogida es a tresbolillo.

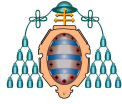
En el anexo ubicado al final del documento se indica de forma gráfica la distribución de los ánodos.

7 NORMATIVA DE APLICACIÓN⁶

UNE-EN ISO 8501 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Evaluación visual de la limpieza de las superficies.

UNE-EN ISO 8502 Preparación de sustratos de acero previa aplicación de pinturas y productos relacionados. Ensayos para la evaluación de la limpieza de las superficies.

⁶ Fuente: <http://www.aenor.es/> <http://www.standard.no/>



UNE-EN ISO 8503 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos afines. Características de la rugosidad de los sustratos de acero chorreados.

UNE-EN ISO 8504 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Métodos de preparación de las superficies.

UNE-EN ISO 11124 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Especificaciones para materiales abrasivos metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado.

UNE-EN ISO 11125 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Métodos de ensayo para materiales abrasivos metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado.

UNE-EN ISO 11126 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Especificaciones para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado.

UNE-EN ISO 11127 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Métodos de ensayo para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado.

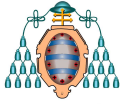
UNE-EN ISO 12944 Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores.

UNE-EN 13173:2001 Protección catódica para las estructuras marítimas flotantes de acero.

UNE-EN 12473:2014 Principios generales de la protección catódica en agua de mar.

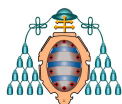
UNE-EN 12496:2013 Ánodos galvánicos para protección catódica en agua de mar y lodos salinos.

UNE-EN 10027-1:2006 Sistemas de designación de aceros. Parte 1: Designación simbólica



UNE-EN 10025-4:2007 Productos laminados en caliente de aceros para estructuras.
Parte 4: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales soldables de grano fino laminados termomecánicamente.

NORSOK standard M-501 Surface preparation and protective coating.



8 PRESUPUESTO

PREPARACIÓN DE SUPERFICIES

Superficie a preparar: 299,147 m²

Lavado con detergente aclarado con agua dulce

Eliminación de cantos vivos, cordones y otros defectos

Chorro abrasivo grado Sa 2 ½

Limpieza de superficie después del chorro

Tiempo de preparación de las superficies: 48 horas

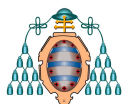
Precio preparación superficies: 35€/hora

Coste total preparación de las superficies	1680€
--	-------

RECUBRIMIENTO

Para el cálculo de los costes de recubrimiento hay que tener por un lado el gasto de pintura y por otro la aplicación de la misma. Para el cálculo es necesario una serie de formulas. Además de esto hay que tener en cuenta que rendimiento práctico es menor que el teórico por lo que se tendrán pérdidas de producto, por lo que habrá que aplicar un factor de corrección que tendrá el valor medio de 0.7

Las fórmulas son las siguientes: S.V. = E. S. x 100 / E. H. E.H. = E. S. x 100 / S.V. R.T. = S.V. x 10 / E.S. R.P. = R.T. x K F.P. = ((R.T. - R.P.) / (R.T.)) x 100	Donde: S.V. (sólidos en volumen, %) E.S. (espesor de película seca, µm) E.H. (espesor de película húmeda, µ m) R.T. (rendimiento teórico, m2/ litro) R.P. (rendimiento práctico, m2/ litro) F.P. (factor de pérdidas medio, en %) K (constante de pérdidas que tiene un valor aproximado a 0.7).
Costo de pintura / m2 (€/ m2) = costo pintura (€/ litro) / R.P.	



1ª CAPA

Espesor de película húmeda:

$$E.H. (1) = E.S.(1) \times 100 / S.V.(1) = 200 \times 100 / 70 = 286 \mu\text{m}.$$

Rendimiento teórico

$$R.T.(1) = S.V.(1) \times 10 / E.S.(1) = 70 \times 10 / 200 = 3,5 \text{ m}^2/\text{litro}.$$

Rendimiento práctico:

$$R.P.(1) = R.T.(1) \times K1 = 3,5 \times 0,7 = 2,45 \text{ m}^2/\text{litro}.$$

Factor de pérdidas:

$$F.P.(1) = ((R.T.(1) - R.P.(1)) / R.T.(1)) \times 100 = ((3,5 - 2,45) / 3,5) \times 100 = 30\%$$

$\text{GASTO PINTURA } 1^{\text{a}} \text{ CAPA} = \text{Área} / R.P.(1) = 299,147 / 2,45 = 122,10 \text{ litros}$
--

2ª CAPA

Espesor de película húmeda:

$$E.H. (2) = E.S.(2) \times 100 / S.V.(2) = 200 \times 100 / 80 = 250 \mu\text{m}.$$

Rendimiento teórico

$$R.T.(2) = S.V.(2) \times 10 / E.S.(2) = 80 \times 10 / 200 = 4 \text{ m}^2/\text{litro}.$$

Rendimiento práctico:

$$R.P.(2) = R.T.(2) \times K2 = 4 \times 0,7 = 2,8 \text{ m}^2/\text{litro}.$$

Factor de pérdidas:

$$F.P.(2) = ((R.T.(2) - R.P.(2)) / R.T.(2)) \times 100 = ((4 - 2,8) / 4) \times 100 = 30\%$$

$\text{GASTO PINTURA } 2^{\text{a}} \text{ CAPA} = \text{Área} / R.P.(2) = 299,147 / 2,8 = 106,83 \text{ litros}$

3ª CAPA

Al ser igual que la segunda capa el gasto de pintura es por tanto el mismo

$\text{GASTO PINTURA } 3^{\text{a}} \text{ CAPA} = \text{Área} / R.P.(3) = 299,147 / 2,8 = 106,83 \text{ litros}$

4ª CAPA

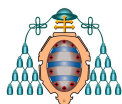
Espesor de película húmeda:

$$E.H. (4) = E.S.(4) \times 100 / S.V.(4) = 60 \times 100 / 67 = 90 \mu\text{m}.$$

Rendimiento teórico

$$R.T.(4) = S.V.(4) \times 10 / E.S.(4) = 67 \times 10 / 60 = 11,17 \text{ m}^2/\text{litro}.$$

Rendimiento práctico:



$$R.P.(4) = R.T.(4) \times K4 = 11,17 \times 0,7 = 7,82 \text{ m}^2/\text{litro.}$$

Factor de pérdidas:

$$F.P.(4) = ((R.T.(4) - R.P.(4)) / R.T.(4)) \times 100 = ((11,17 - 7,82) / 11,17) \times 100 = 30\%$$

$\text{GASTO PINTURA 4ª CAPA} = \text{Área} / R.P.(4) = 299,147 / 7,82 = 38,25 \text{ litros}$
--

COSTES DE PINTURA

1ª Capa: 122,10 litros x 9 €/litro = 1098,9 €

2ª Capa 106,83 litros x 5 €/litro = 534,15 €

3ª Capa 106,83 litros x 5 €/litro = 534,15 €

4ª Capa 38,25 litros x 12 €/litro = 459 €

Coste de pintura:	2626,2 €
-------------------	----------

COSTES DE APLICACIÓN DE PINTURA

45€/hora pintura

Superficie a pintar: 299,147 m²

Tiempo necesario para pintar una capa = 16 horas

Tiempo necesario para pintar todas las capas = 64 horas

Coste de aplicación de pintura:	2880 €
---------------------------------	--------

PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC

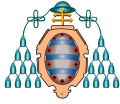
ANODOS DE SACRIFICIO PARA ACERO PINTADO

Precio aleación de zinc, 2,5 €/kg

N, número de ánodos de zinc, 18

M, masa de cada ánodo de zinc, 36,5kg

Coste de ánodos de zinc:	1642,5 €
--------------------------	----------



FIJACIÓN DE ANODOS DE SACRIFICIO PARA ACERO PINTADO

Fijación ánodos sacrificio a la estructura

Precio proceso de soldadura, 50 €/h

Tiempo necesario para fijación de los ánodos, 5 horas

Coste colocación ánodos	250 €
-------------------------	-------

PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ALUMINIO

ANODOS DE SACRIFICIO PARA ACERO PINTADO

Precio ánodo aluminio 120€

N, número de ánodos de aluminio, 12

M, masa de cada ánodo de aluminio, 15,9 kg

Coste de ánodos de aluminio para acero pintado:	1440 €
---	--------

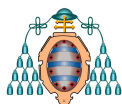
FIJACIÓN DE ANODOS DE SACRIFICIO PARA ACERO PINTADO

Fijación ánodos sacrificio a la estructura

Precio proceso de soldadura, 50 €/h

Tiempo necesario para fijación de los ánodos, 3 horas

Coste fijación ánodos de aluminio para acero pintado:	150 €
---	-------



PRESUPUESTO GENERAL (RECUBRIMIENTO + ÁNODOS DE ZINC)

Preparación de superficies	1680 €
Costes de pintura	2626,2 €
Aplicación de pintura	2880 €
Protección por ánodos de zinc	1642,5 €
Fijación ánodos de zinc	250 €

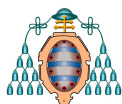
Importe total	9078,7 €
NUEVE MIL SETENTA Y OCHO EUROS Y SIETE CÉNTIMOS DE EURO	

PRESUPUESTO GENERAL (RECUBRIMIENTO+ÁNODOS DE ALUMINIO)

Preparación de superficies	1680 €
Costes de pintura	2626,2 €
Aplicación de pintura	2880 €
Protección por ánodos de aluminio	1440 €
Fijación ánodos de zinc	150 €

Importe total	8776,2 €
OCHO MIL SETECIENTOS SETENTA Y SEIS EUROS Y DOS CÉNTIMOS DE EURO	

Gijón, 17 de julio de 2014



ANEXO

DISTRIBUCIÓN DE ÁNODOS DE SACRIFICIO PARA ACERO PINTADO

ÁNODOS DE ZINC

ÁNODOS DE ALUMINIO

