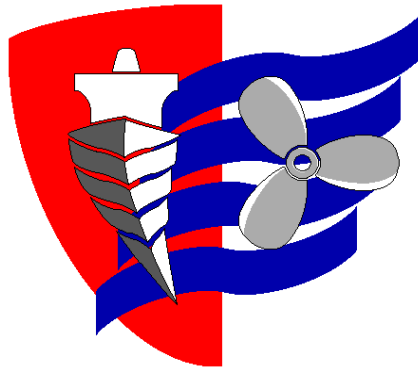


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

# **CORROSIÓN MARINA EN ESTRUCTURAS OFFSHORE**

---

Marine Corrosion in Offshore Structures

Para acceder al Título de Grado en

**INGENIERÍA MARINA**

Autor: Laura Pelayo Ruiz

Director: Sergio García Gómez

Octubre-2018

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

*Trabajo Fin de Grado*

**CORROSIÓN MARINA EN ESTRUCTURAS  
OFFSHORE**

---

Marine Corrosion in Offshore Structures

Para acceder al Título de Grado en

**INGENIERÍA MARINA**

Octubre-2018

## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría agradecer a todas las personas que de una forma u otra han formado parte del desarrollo de esta etapa.

A mi tutor, Sergio García, por el apoyo, la paciencia y la dedicación de su tiempo para hacer que este proyecto merezca la pena.

Por último, dar las gracias en especial a mi familia, a los que están y a los que se han ido. Gracias por aguantarme en las épocas en las que ni yo misma lo lograba, sin vuestro esfuerzo y apoyo incondicional esto no sería lo mismo. Gracias por cuidarme tan bien.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 TIPOS DE CORROSIÓN.....	3
1.1.1 <i>CORROSIÓN UNIFORME</i> .....	4
1.1.2 <i>CORROSIÓN GALVÁNICA</i> .....	6
1.1.3 <i>CORROSIÓN POR EROSIÓN</i> .....	8
1.1.4 <i>CORROSIÓN CAVERNOSA</i> .....	9
1.1.5 <i>CORROSIÓN POR PICADURAS</i> .....	11
1.1.6 <i>CORROSIÓN INTERGRANULAR</i> .....	13
1.1.7 <i>FISURACIÓN ASISTIDA POR EL ENTORNO</i> .....	15
1.1.8 <i>CORROSIÓN POR FATIGA</i> .....	16
<b>2. DESARROLLO DE LAS ESTRUCTURAS OFFSHORE.....</b>	<b>20</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	20
2.2 ESTRUCTURAS OFFSHORE .....	22
2.2.1 <i>PLATAFORMAS PETROLÍFERAS</i> .....	23
2.2.1.1 <i>PLATAFORMAS PETROLÍFERAS FIJAS</i> .....	24
2.2.1.1.1 <i>Plataforma auto-elevables o Jack ups</i> .....	25
2.2.1.1.2 <i>Estructura Jacket</i> .....	26
2.2.1.1.3 <i>Plataforma de gravedad</i> .....	27
2.2.1.1.4 <i>Torre flexible o Compliant</i> .....	28
2.2.1.2 <i>PLATAFORMAS PETROLÍFERAS FLOTANTES</i> .....	29
2.2.1.2.1 <i>Plataformas Semi-sumergibles</i> .....	30
2.2.1.2.2 <i>Plataformas Spar</i> .....	31
2.2.1.2.3 <i>Unidades flotantes de producción, almacenamiento y descarga (FPSO)</i> .....	32
2.2.1.2.4 <i>Plataformas de patas tensoras (TLP)</i> .....	32

2.2.2	<i>GENERADORES EÓLICOS MARINOS</i> .....	33
2.2.2.1	TIPOS DE CIMENTACIONES.....	34
2.2.2.1.1	Gravedad .....	35
2.2.2.1.2	Monopilote .....	35
2.2.2.1.3	Suction caisson.....	36
2.2.2.1.4	Multipod (Trípode y Jacket).....	36
2.2.2.2	ESTRUCTURAS FLOTANTES .....	36
2.2.2.2.1	Plataformas estabilizadas por lastre .....	38
2.2.2.2.2	Plataformas estabilizadas por líneas de amarre.....	38
2.2.2.2.3	Plataforma estabilizada por flotación.....	38
2.2.3	<i>DESARROLLO DE ENERGÍAS OCEÁNICAS</i> .....	39
<b>3.</b>	<b>SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN .....</b>	<b>41</b>
3.1	INTRODUCCIÓN .....	41
3.2	MÉTODOS DE PROTECCIÓN ACTIVA CONTRA LA CORROSIÓN... 42	
3.2.1	<i>SELECCIÓN DE MATERIALES</i> .....	42
3.2.2	<i>TOLERANCIA DE CORROSIÓN</i> .....	44
3.2.3	<i>DISEÑO CONSTRUCTIVO</i> .....	44
3.2.4	<i>MODIFICACIÓN DEL MEDIOAMBIENTE</i> .....	49
3.2.5	<i>MEDIDAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA</i> .....	51
3.3	MÉTODOS DE PROTECCIÓN PASIVA CONTRA LA CORROSIÓN .....	53
3.3.1	<i>USO DE RECUBRIMIENTOS</i> .....	53
3.3.1.1	RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS .....	54
3.3.1.2	RECUBRIMIENTOS METÁLICOS.....	56
3.3.1.2.1	Recubrimientos de Zinc por inmersión en caliente.....	56
3.3.1.2.2	Recubrimientos por pulverización térmica .....	58

3.3.1.3	RECUBRIMIENTOS INORGÁNICOS .....	59
3.3.1.4	ESTADO ACTUAL DE LOS RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIÓN .....	59
3.3.1.4.1	Recubrimientos antifouling conductivos.....	60
3.3.1.4.2	Recubrimientos antifouling biomarinos.....	60
3.3.1.4.3	Recubrimientos antifouling de silicato.....	61
3.3.1.4.4	Agente antifouling de capsaicina .....	61
3.3.1.4.5	Revestimientos antifouling de isotiazolinona .....	61
3.3.1.4.6	Nano recubrimientos Antiincrustantes.....	62
<b>4.</b>	<b>MÉTODOS DE ESTUDIO Y ENSAYO DE LA CORROSIÓN .....</b>	<b>63</b>
4.1	ENSAYOS CONVENCIONALES DE CORROSIÓN .....	64
4.1.1	<i>ENSAYOS DE CONTROL DE SERVICIO.....</i>	<i>64</i>
4.1.2	<i>ENSAYOS DE SIMULACIÓN DE SERVICIO.....</i>	<i>65</i>
4.1.2.1	ENSAYOS DE LABORATORIO .....	65
4.1.2.1.1	Ensayos de inmersión.....	66
4.1.2.1.2	Ensayos de pulverización.....	67
4.1.2.2	ENSAYOS EN AMBIENTES MARINOS REALES .....	67
4.2	ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS DE CORROSIÓN.....	68
<b>5.</b>	<b>REPERCUSIONES ECONÓMICAS.....</b>	<b>70</b>
<b>6.</b>	<b>FUTUROS DESARROLLOS ANTICORROSIÓN.....</b>	<b>73</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>77</b>
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXO 1 TIPOS DE CORROSIÓN RECOGIDOS SEGÚN LA NORMA UNE- EN ISO 8044:2015 .....</b>	<b>87</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clases generalizadas de corrosión .....	4
Figura 2 Ejemplo de corrosión uniforme .....	5
Figura 3 Celda de corrosión .....	6
Figura 4 Serie galvánica.....	7
Figura 5 Corrosión por erosión en un codo de tubería.....	8
Figura 6 Esquema de la sección transversal de una grieta.....	10
Figura 7 Boceto de formas de picaduras comunes.....	12
Figura 8 Microestructura de un acero inoxidable tipo 304.Izquierda: microestructura normalizada; derecha: estructura sensibilizada.....	14
Figura 9 Corrosión por fatiga en elementos de acero sujetos a componentes de carga cíclica .....	18
Figura 10 Curva S-N para juntas tubulares en aire y en agua de mar con protección catódica .....	19
Figura 11 Zonas de corrosión ilustradas en un OWEA. 1, Lecho marino; 2, Zona sumergida; 3, Zona de mareas; 4, Zona de salpicaduras; 5, Zona atmosférica (marina) .....	21
Figura 12 Clasificación de las estructuras petrolíferas fijas.....	25
Figura 13 Plataforma autoelevable (Jack-up) .....	26
Figura 14 Estructura jacket Fulmar.....	27
Figura 15 Plataforma de gravedad StatoilHydro Troll West .....	28
Figura 16 Torre compliant Bullwinkle.....	28
Figura 17 Tipos de plataformas flotantes.....	29
Figura 18 Plataforma semi-sumergible Scarabeo-9 .....	30
Figura 19 Tipos de plataformas Spar .....	31
Figura 20 FPSO Shell Prelude .....	32
Figura 21 Plataforma TLP Mars .....	33

Figura 22 Partes de un OWEA.....	34
Figura 23 Tipos de estructuras fijas para los OWECs .....	35
Figura 24 Principales conceptos de soportes flotantes para aerogeneradores marinos .....	37
Figura 25 Primera turbina marina comercial, SeaGen .....	40
Figura 26 Zonas de corrosión de una estructura offshore .....	42
Figura 27 Efectos de la categoría de material y corrosividad en las tasas de corrosión en una plataforma offshore en el Mar del Norte .....	43
Figura 28 Dimensiones mínimas recomendadas de las aberturas para el acceso a las áreas cerradas (medidas en milímetros) .....	45
Figura 29 Tratamiento de huecos .....	45
Figura 30 Sistema para evitar la retención de agua y humedad.....	46
Figura 31 Eliminación de bordes agudos .....	46
Figura 32 Eliminación de las imperfecciones en la superficie de las soldaduras .....	47
Figura 33 Diseño recomendado de refuerzos para la protección frente a la corrosión .....	48
Figura 34 Principios de protección catódica. Izquierda: CP basada en ánodos de sacrificio; Derecha: CP basada en corrientes impresas.....	51
Figura 35 Disposición típica de un sistema de recubrimiento con capas múltiples...	56
Figura 36 Sección transversal de un cable de acero con Zinc, Benzinal® (Zn, 5% Al), y Benzinal 3000® (Zn, 10% Al, <1% Mg).....	57
Figura 37 Reactor para la realización de ensayos de recubrimientos/materiales en condiciones controladas (Patente ES2601930B1). Universidad de Cantabria.....	66
Figura 38 Laboratorio Marino Biofouling para la realización de ensayos en ambiente marino. Universidad de Cantabria.....	68
Figura 39 Curvas de Tafel para la determinación de la intensidad de corrosión .....	69
Figura 40 Un desglose del coste anual de la corrosión en el sector de producción y fabricación de la economía de los EE. UU .....	70
Figura 41 Corrosión en la zona de salpicaduras.....	74



Figura 42 Zonas de corrosión a lo largo de una estructura de acero en un entorno de agua de mar y tasas de corrosión.....	75
---	----

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Categorías de corrosividad atmosférica según la Norma EN ISO 9223:2012 Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification, determination and estimation.....	1
Tabla 2 Categorías de corrosividad atmosférica según la Norma UNE-EN ISO 12944-2:1998 Pinturas y barnices-Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores- Parte 2: Clasificación de ambientes ....	2
Tabla 3 Fisuraciones recogidas por la Norma UNE-EN ISO 8044:2015 Corrosión de metales y aleaciones-Términos principales y definiciones.....	3
Tabla 4 Aplicación industrial y fisuración asistida por el entorno de aleaciones de Fe-Cr-Ni usadas comercialmente. LC: corrosión localizada, CF: corrosión por fatiga, HIC: fisuración inducida por hidrógeno, SCC: fisuración por corrosión bajo tensión, SST: ensayo de pulverización con sal, CCT: ensayo de corrosión cíclico.....	16
Tabla 5 Principales diferencias críticas entre plataformas de petróleo y gas y estructuras eólicas offshore.....	20
Tabla 6 Comparación de los sistemas de protección catódica en estructuras marinas..	52

## **RESUMEN**

Este trabajo pretende analizar el estado actual del conocimiento sobre los métodos de protección contra la corrosión marina en las estructuras offshore. La importancia del medio marino ha aumentado considerablemente en las últimas décadas debido a la necesidad de extracción de recursos naturales (por ejemplo, petróleo y gas) y la producción de energía eléctrica en el medio marino.

La corrosión en el agua de mar es un aspecto fundamental a tener en cuenta en los diferentes pasos del proceso tecnológico de desarrollo de este tipo de estructuras. La degradación de materiales en ambientes marinos es un proceso natural que se produce de forma espontánea, destruyendo o reduciendo las propiedades de los materiales en servicio. La importancia de la corrosión está determinada por sus implicaciones económicas y sociales. En las estructuras offshore depende en gran medida de factores específicos como la temperatura del agua, la salinidad, la clorinidad, la profundidad del agua y la velocidad de las corrientes, así como de las diferentes zonas a las que están expuestas.

Es necesario, por tanto, controlar estos procesos degradativos para mantener inalteradas las características de los componentes el mayor tiempo posible. Cuando se trata de tareas de protección contra la corrosión las operaciones que se realizan en la industria offshore requieren una inversión de capital importante. Se explicarán los diversos métodos disponibles para evitar, ralentizar o controlar la corrosión subdivididos en métodos activos y pasivos. El método más popular de protección pasiva contra la corrosión en la práctica es la aplicación de recubrimientos de alta eficiencia para separar el material a proteger del ambiente corrosivo. Aunque los ensayos y la monitorización no pueden considerarse estrictamente como métodos de control, son partes esenciales para evaluar la efectividad de las técnicas todo el proceso de control de la corrosión.

La corrosión es un hándicap que nos acecha diariamente, provocando innumerables pérdidas económicas, por lo que su estudio y mitigación resulta ser de vital importancia.

## **ABSTRACT**

This research aims to analyse the current state of knowledge on methods of protection against marine corrosion in offshore structures.

The importance of the marine environment has increased considerably in recent decades due to the need for extraction of natural resources (e.g. oil and gas) and the production of electrical energy in the marine environment.

Corrosion in seawater is a fundamental aspect to consider in the different steps of the technological development process of this kind of structures. Deterioration of materials in marine environments is a typical process that occurs spontaneously, destroying or reducing the properties of materials in service. The importance of corrosion is determined by its financial and social implications. Corrosion in offshore structures depends on specific factors such as water temperature, salinity, chlorinity, water depth and current speed, as well as the different “zones” to which they are exposed.

Therefore, it is necessary to control these degradation processes to keep the characteristics of the components unaltered as long as possible. When it comes to corrosion protection tasks, the operations carried out in the offshore industry require an important capital investment. There will be explained the various methods available to avoid, slow down or control corrosion, subdivided into active and passive methods. The most popular method of passive corrosion protection, in practice, is the application of high efficiency coatings to separate the material to be protected, from the corrosive environment. Although testing and monitoring cannot strictly be considered as methods of control, they are essential parts of the whole process of controlling corrosion.

Corrosion is a handicap that haunts us daily, causing countless economic losses consequently, the significant of its study and mitigation.

**PALABRAS CLAVE:** Corrosión, corrosión marina, offshore, estructuras.

**KEYWORDS:** Corrosion, marine corrosion, offshore, structures.



## 1. INTRODUCCIÓN

El término corrosión se define de la siguiente manera: “Interacción fisicoquímica entre un metal y su entorno que da como resultado cambios en las propiedades del metal y que puede conducir a un deterioro significativo de la función del metal, el medio ambiente o el sistema técnico del que forman parte” [1]. Esta interacción es a menudo de naturaleza electroquímica.

Con el conocimiento del papel de varios micro y macroorganismos que pueden influir en el comportamiento de la corrosión de los materiales, la definición debe ampliarse aún más para incluir factores de influencia microbiana.

El agua de mar a veces se describe como un medio vivo y se considera que es el más corrosivo de los entornos naturales siendo los iones cloruro el constituyente más agresivo [2]. Las incrustaciones biológicas pueden ser causa de varios problemas de corrosión al fijarse a la estructura. Cuando se sumerge la estructura en el mar no tarda en recubrirse de lo que se denomina “velo biológico”. Este “velo biológico” retiene partículas minerales y orgánicas en suspensión en el agua. Su formación facilita la posterior fijación de organismos vegetales y animales, que constituyen las incrustaciones biológicas.

Dependiendo de la norma que utilicemos, se clasifican diferentes ambientes atmosféricos en categorías de corrosividad atmosférica:

Categoría	Corrosividad
C1	Muy baja
C2	Baja
C3	Media
C4	Alta
C5	Muy alta
CX	Extrema

*Tabla 1 Categorías de corrosividad atmosférica según la Norma EN ISO 9223:2012 Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification, determination and estimation*

[3]



Curso: 2017-2018.

Categoría	Corrosividad
C1	Muy baja
C2	Baja
C3	Media
C4	Alta
C5-I	Muy alta (industrial)
C5-M	Muy alta (marina)

*Tabla 2 Categorías de corrosividad atmosférica según la Norma UNE-EN ISO 12944-2:1998 Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 2: Clasificación de ambientes [4]*

Los resultados de la corrosión son responsables de la alteración de las propiedades de los materiales afectados y lleva asociada una pérdida de material. Las graves consecuencias del proceso de corrosión se han convertido en un problema importante en entornos marinos debido a condiciones operativas extremas y la presencia de elementos corrosivos agresivos.

El control de la corrosión se logra reconociendo y comprendiendo los mecanismos de corrosión, utilizando materiales y diseños resistentes a la corrosión y utilizando sistemas de protección, dispositivos y tratamientos [5].

Las principales corporaciones, industrias y agencias gubernamentales han establecido grupos y comités para atender problemas relacionados con la corrosión, pero en muchos casos las responsabilidades se reparten entre los fabricantes o productores de sistemas y sus usuarios.

Se pueden producir diferentes tipos de corrosión. Según la norma UNE-EN ISO 8044:2015 [6] se distinguen los siguientes (ver Anexo 1). Todos los tipos básicos de corrosión pueden ocurrir en el agua de mar. Los fallos más abundantes ocurren por la corrosión por picaduras, corrosión en resquicios, corrosión galvánica, corrosión bajo tensión, corrosión por fatiga, ataque por choque y corrosión selectiva. La norma también diferencia dentro de los tipos de corrosión, una serie de fisuraciones tales como:



**Fisuración asistida por el entorno:** fisuración de un metal o aleación vulnerable debido a la acción conjugada ambiental y una tensión mecánica.

**Fisuración inducida por hidrógeno (HIC):** fisuración plana que se produce en metales debido a las tensiones inducidas cuando el hidrógeno atómico se difunde dentro del metal y a continuación se combina para formar hidrógeno molecular en las trampas.

**Fisuración bajo tensión por hidrógeno (HSC):** fisuración que resulta de la presencia de hidrógeno en un metal y de tensión en tracción.

**Fisuración gradual (SWC):** fisuración que conecta las HIC sobre planos contiguos en un metal.

**Fisuración inducida por hidrógeno orientada bajo tensión (SOHIC):** pequeñas fisuras escalonadas formadas aprox. de forma perpendicular a la tensión principal que conecta fisuras HIC existentes anteriormente.

**Fisuración por corrosión bajo tensión por sulfuros (SSCC):** fisuración del metal que conlleva corrosión y tensión en tracción en presencia de agua y sulfuro de hidrógeno.

**Fisuración por corrosión bajo tensión ayudada por irradiación:** fisuración intergranular de aceros inox. austeníticos resultantes de una reducción en la concentración de cromo seguida de la exposición a altas dosis de radiación de neutrones que exceden un desplazamiento por átomo.

*Tabla 3 Fisuraciones recogidas por la Norma UNE-EN ISO 8044:2015 Corrosión de metales y aleaciones. Términos principales y definiciones [6]*

La corrosión produce anualmente en todo el mundo pérdidas económicas muy elevadas. De acuerdo con la Administración Federal de Autopistas de EUA, en el año 2015 el coste directo anual aproximado de la corrosión para los Estados Unidos se estimó en USD 500 000 millones, lo que representa alrededor del 3,1% del Producto Interno Bruto (PIB) de ese país [7].

### 1.1 TIPOS DE CORROSIÓN

La corrosión puede ser clasificada por su apariencia y por el agente causante. Los ocho tipos de corrosión que se ven en la Figura 1, cubren la mayor parte de los mecanismos de corrosión observados en los metales.

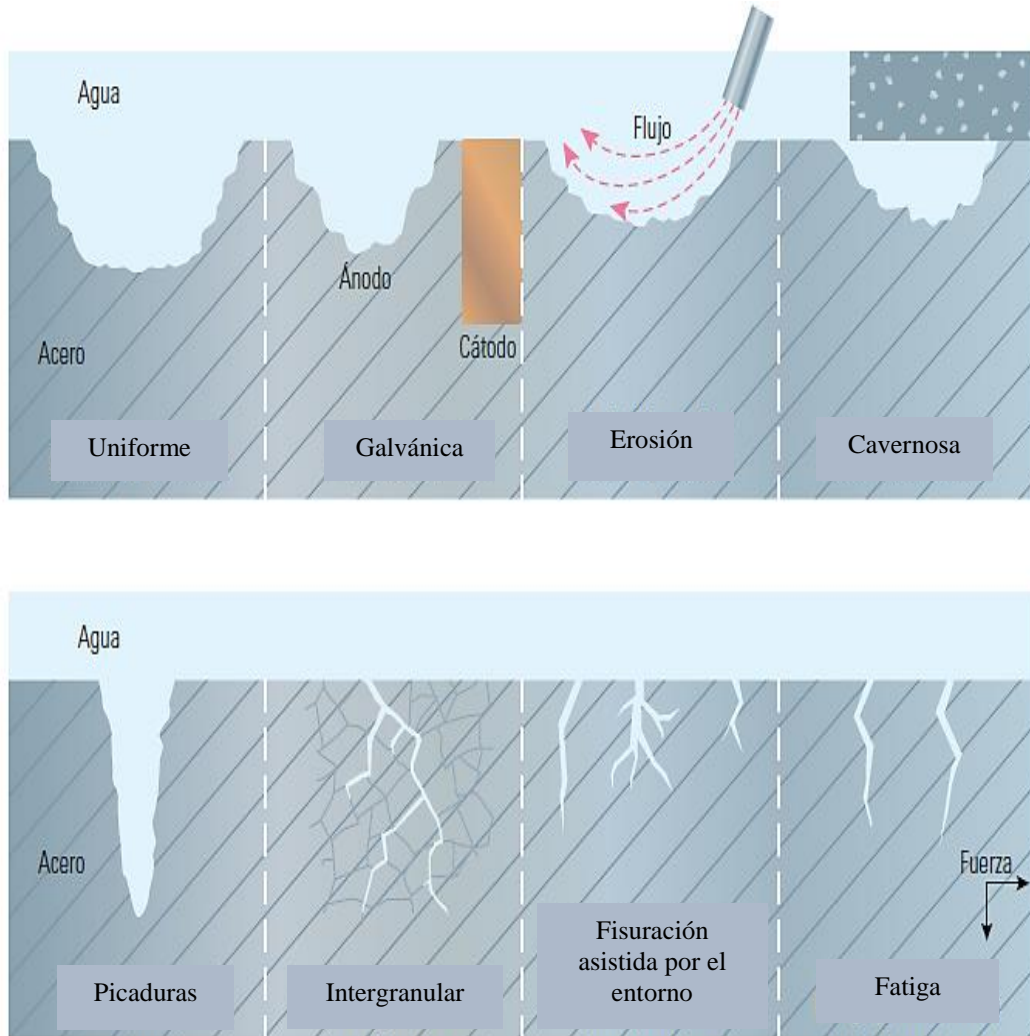


Figura 1 Clases generalizadas de corrosión  
[7]

### 1.1.1 CORROSIÓN UNIFORME

La corrosión uniforme ocurre cuando la corrosión se distribuye homogéneamente sobre la superficie del metal, lo que conduce a una reducción del espesor relativamente uniforme. Se asume que la corrosión uniforme es la forma más común de corrosión y es responsable de la mayor parte de la pérdida de material [8]. No hay sitios de corrosión preferenciales, tanto el ánodo como el cátodo no tienen una ubicación fija, lo que da como resultado una corrosión uniforme [9].





*Figura 2 Ejemplo de corrosión uniforme*  
[10]

La velocidad de la corrosión uniforme es, en general, expresada en términos de pérdida de masa por unidad de superficie y por unidad de tiempo<sup>1</sup>, o por la pérdida del espesor del metal corroído en función del tiempo [11].

Como la corrosión se produce de manera uniforme en toda la superficie del componente metálico, puede controlarse prácticamente mediante protección catódica, a través del uso de revestimientos o pinturas, o simplemente especificando una tolerancia de corrosión. El fallo de los sistemas de recubrimiento protector en las estructuras a menudo conduce a esta forma de corrosión. [12] Sin embargo, no es una forma peligrosa de corrosión porque la predicción de la tasa de reducción de espesor se puede conocer mediante técnicas de corrosión electroquímica o de pérdida de peso [13].

En realidad, es poco probable que se produzca un ataque de corrosión puramente homogéneo. Siempre hay áreas, especialmente en partes metálicas complejas, que se

---

<sup>1</sup> La velocidad de corrosión generalmente se da en micrómetros por año ( $\mu\text{m/a}$ ) [14].

corroerán más rápido que otras, dando lugar a una superficie más o menos rugosa con una cubierta irregular de productos de corrosión [14].

### 1.1.2 CORROSIÓN GALVÁNICA

La corrosión galvánica es un proceso electroquímico asociado con el movimiento de electrones entre áreas que poseen potenciales electroquímicos diferentes. La celda de corrosión describe esquemáticamente la corrosión oxidante, que es análoga a una batería en la cual dos metales distintos son conectados por un electrolito.

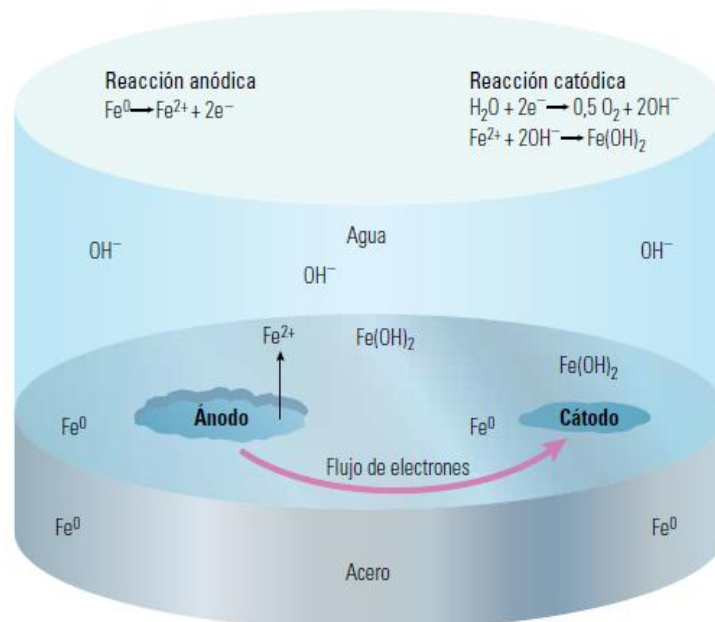


Figura 3 Celda de corrosión [7]

Un metal que posee un índice de corrosión más alto (más inestable) representa la parte negativa de la celda y actúa como ánodo. Un segundo metal que posee un índice de corrosión más bajo (más estable) actúa como la parte positiva de la celda, es decir, el cátodo. Durante la corrosión galvánica, se forman óxidos metálicos a medida que los electrones fluyen del ánodo al cátodo a través del electrolito que es el fluido en contacto con el ánodo y el cátodo. En otras palabras, tal y como se muestra en la Figura 3, la presencia de agua [H<sub>2</sub>O] sobre la superficie del acero [Fe<sup>0</sup>] libera electrones para formar iones ferroso [Fe<sup>2+</sup>] y férrico [Fe<sup>3+</sup>], que actúan como el ánodo en nuestra analogía de la batería. Los electrones liberados fluyen hacia el cátodo, donde se forman (con presencia del oxígeno) el óxido ferroso [FeO] y óxido férrico [Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>] como

incrustaciones de herrumbre o precipitados. Un subproducto de la reacción en el cátodo son los iones hidroxilo  $[OH^-]$  que se combinan con el  $Fe^{2+}$  solubilizado y forman hidróxido de hierro  $[Fe(OH)_2]$ . [7]

Los metales pueden ser descritos de acuerdo con sus tendencias anódicas o catódicas organizadas en una serie galvánica. La serie que se muestra en la figura 4 es para agua de mar (el orden puede cambiar según el electrolito) considerándose un buen predictor de la severidad de la corrosión.

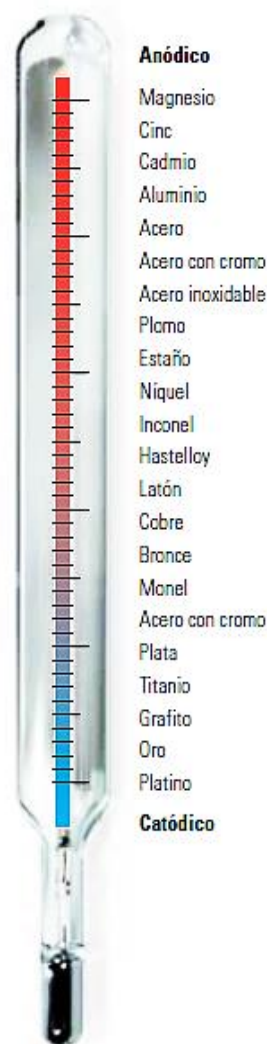


Figura 4 Serie galvánica

[7]

### 1.1.3 CORROSIÓN POR EROSIÓN

La corrosión por erosión es una aceleración en la velocidad de corrosión de un metal debido al movimiento relativo de un fluido corrosivo y la superficie de un metal. Si, además, el fluido presenta contenido de partículas sólidas en suspensión se tiende a incrementar el efecto erosivo que causa el deterioro del metal. [15]

La interacción entre estos dos procesos, corrosión y erosión, ha sido referida por diferentes investigadores como un efecto sinérgico [9]. En general, se describe la sinergia como la diferencia entre el daño debido a la acción combinada de la corrosión por erosión y la suma del daño vinculado solo a las contribuciones relacionadas con la erosión y la corrosión pura [17]. La sinergia normalmente tiene lugar en codos de tubería, constricciones del tubo y otras estructuras que alteran la dirección o la velocidad del flujo.



*Figura 5 Corrosión por erosión en un codo de tubería*  
[18]

El estudio de fenómenos de erosión por partículas inmersas en ambientes acuosos ha progresado significativamente en los últimos años. La complejidad del proceso de corrosión por erosión se debe principalmente a la multiplicidad de causas que pueden promoverlo.



Durante la corrosión por erosión, los productos de corrosión se depositan primero en la superficie interna de la tubería en forma de sarro. Varias investigaciones [19],[20] han conseguido estudiar los fenómenos de erosión-corrosión implicados. Se cree que la erosión afecta la corrosión mediante la eliminación de depósitos superficiales, el aumento de la turbulencia local y la rugosidad de la superficie.

La acción del desgaste mecánico da como resultado el daño de la película pasiva, lo que lleva a la exposición de superficies frescas y desnudas al medio corrosivo. Esto acelera el proceso de corrosión que, a su vez, conduce al desarrollo de una nueva película pasiva que eventualmente se dañará por acción mecánica adicional. Además, las partículas abrasivas de alta velocidad deforman el metal de forma significativa y forman una capa endurecida por el trabajo. La capa endurecida por el trabajo tiene altas actividades químicas y puede formar microcélulas primarias debido a las diferencias de deformación con los dominios adyacentes de baja deformación, lo que acelera el proceso de disolución del metal [21]. En una investigación previa [22] se logró observar que la deformación plástica y la fractura son los mecanismos dominantes durante el proceso de corrosión por erosión.

#### *1.1.4 CORROSIÓN CAVERNOSA*

La corrosión cavernosa es un tipo de corrosión localizada que se puede encontrar dentro de grietas o en superficies blindadas donde hay una solución estancada [23]. Al mismo tiempo, es una de las formas de corrosión más dañinas, ya que ocurre en las aleaciones que normalmente presentan una resistencia a la corrosión perfecta, como el acero inoxidable, y también en áreas que no son inmediatamente visibles. Por lo tanto, la corrosión cavernosa puede provocar una falla devastadora repentina del metal en servicio. Las grietas crean un entorno químico que es diferente del de las superficies expuestas libremente y, por lo tanto, aceleran la corrosión. Este ambiente mantiene la humedad, atrapa los contaminantes, concentra los productos de corrosión y al mismo tiempo excluye el oxígeno [24].

Las grietas en las que se produce la corrosión cavernosa pueden estar desarrolladas por:

- La geometría de la estructura, por ejemplo: placas remachadas, fabricaciones soldadas, uniones roscadas
- Contacto del metal con sólidos no metálicos, por ejemplo: plásticos, caucho o vidrio
- Depósitos de arena, suciedad o productos de corrosión permeables sobre la superficie del metal

La figura 6 define los aspectos geométricos de una grieta. El sustrato de la grieta es el material metálico de interés. El formador de hendiduras puede ser cualquier tipo de material que esté lo suficientemente cerca de la superficie del sustrato para formar una región hermética (grieta). El espacio entre el formador de hendiduras y el sustrato se denomina espacio de grieta ( $g$ ), y la longitud del formador de hendiduras se denomina longitud de la hendidura ( $L$ ) [25].

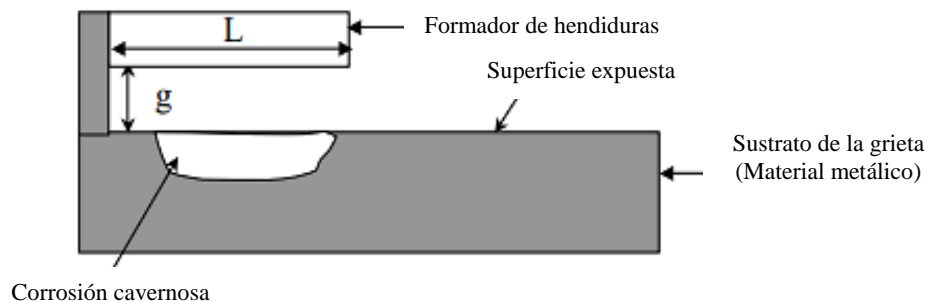


Figura 6 Esquema de la sección transversal de una grieta [25]

Se han realizado considerables trabajos experimentales sobre la corrosión cavernosa de metales en una variedad de entornos, y se han construido modelos conceptuales y computacionales basados en estos resultados. El modelo de Fontana y Greene [26] describe el mecanismo de corrosión en grietas. Este modelo consta de cuatro etapas:



- ETAPA 1. La corrosión ocurre normalmente tanto dentro como fuera de la grieta: Reacción anódica:  $M \rightarrow Mn^+ + ne^-$ , reacción catódica:  $O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4OH^-$ . Los iones metálicos cargados positivamente  $[H^+]$  se contrarrestan electrostáticamente con los iones hidróxido  $[OH^-]$ .
- ETAPA 2. En esta etapa, la reacción catódica dentro de la grieta consume la mayor parte del oxígeno disponible.
- ETAPA 3. Los iones  $Cl^-$  y  $OH^-$  se difunden en la grieta para mantener una energía potencial mínima. Se forma cloruro de metal. La hidrólisis del cloruro de metal reduce el pH y  $MCl_n + nH_2O = M(OH)_n + nHCl$ .
- ETAPA 4. Más iones  $Mn^+$  atacan más a los  $Cl^-$  lo que conduce a un pH más bajo dentro de la grieta. La disolución del metal, por consiguiente, se acelera y se producen más iones  $Mn^+$  que disminuirán el pH.

Hasta ahora, se han desarrollado varios métodos de protección contra la corrosión cavernosa, incluida la protección catódica y el uso de inhibidores y recubrimientos. Sin embargo, las investigaciones sobre este tipo devastador de corrosión aún continúan.

### *1.1.5 CORROSIÓN POR PICADURAS*

La corrosión por picaduras es una forma localizada de corrosión por la cual se producen cavidades o "agujeros" en el material. Las picaduras se consideran más peligrosas que el daño por corrosión uniforme ya que es más difícil de detectar, predecir y diseñar en su contra [27]–[29].

El proceso clásico de corrosión por picaduras generalmente se modela alrededor de aleaciones pasivas como aceros inoxidable y otras aleaciones resistentes a la corrosión (CRA<sup>2</sup>). Se ve ampliamente en el contexto la siguiente secuencia de eventos [30]:

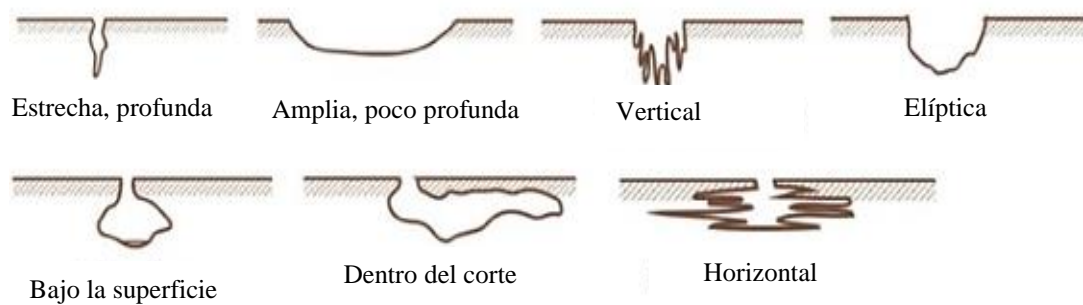
---

<sup>2</sup> Aleación resistente a la corrosión, del inglés Corrosion-Resistant Alloy.



- a) Iniciación o nucleación de las picaduras: esto abarca la descomposición de películas pasivas/productos de corrosión carbonosa
- b) Proceso de crecimiento o propagación de la picadura: bajo la etapa de crecimiento de la picadura es un crecimiento metaestable que podría verse como una transición entre el inicio de la picadura y el crecimiento de la picadura estable
- c) La repasivación de las picaduras es posible en algunos materiales (especialmente pasivos) y también dependiendo de los parámetros ambientales; como el pH, la temperatura y la química de la solución

La corrosión por picaduras en secciones metálicas se manifiesta en varias formas:



*Figura 7 Boceto de formas de picaduras comunes*  
[31]

Roberge et al. [13] informaron que la importancia práctica de la corrosión por picadura depende del grosor del metal y de la tasa de penetración. En general, se encontró que la tasa de penetración disminuye si aumenta el número de picaduras. Abood et al. [32] estudiaron diferentes parámetros que influyen en la corrosión por picaduras. Los parámetros investigados fueron limitados al medio ambiente, composición del metal, potencial de picaduras, temperatura y las condiciones de la superficie. Dentro de estos, los parámetros ambientales se encontraron como los factores más críticos. Además, reconoce que la corrosión por picaduras causada por la degradación pasiva de la película solo ocurre en presencia de especies aniónicas agresivas, y que el ion cloruro  $[Cl^-]$  es usualmente la causa.





Las picaduras casi siempre se inician debido a la heterogeneidad química o física en la superficie, como inclusiones, partículas de segunda fase, límites de granos segregados por solutos, defectos, daños mecánicos o dislocaciones. La mayoría de las aleaciones de ingeniería tienen muchos o todos esos defectos y en primer lugar se forma una picadura en los sitios más susceptibles. Por ejemplo, las picaduras en aceros inoxidable se asocian a menudo con inclusiones de sulfuro de manganeso [MnS] que se encuentran en la mayoría de los aceros comerciales.

El mecanismo para la corrosión por picaduras y cavernosa tiene algunas similitudes. Las picaduras se ven a menudo como el precursor de la corrosión cavernosa.

### *1.1.6 CORROSIÓN INTERGRANULAR*

La microestructura de metales y aleaciones se compone de granos, separados por límites de grano. La IGC<sup>3</sup> ocurre a lo largo de los límites del grano, o inmediatamente adyacente a ellos [33]. Los límites de grano son siempre las áreas preferidas en los que se producen tanto la precipitación como la segregación de compuestos en las aleaciones [34]. En cualquier caso, las propiedades mecánicas de la estructura se ven seriamente afectadas cuando este tipo de corrosión tiene lugar.

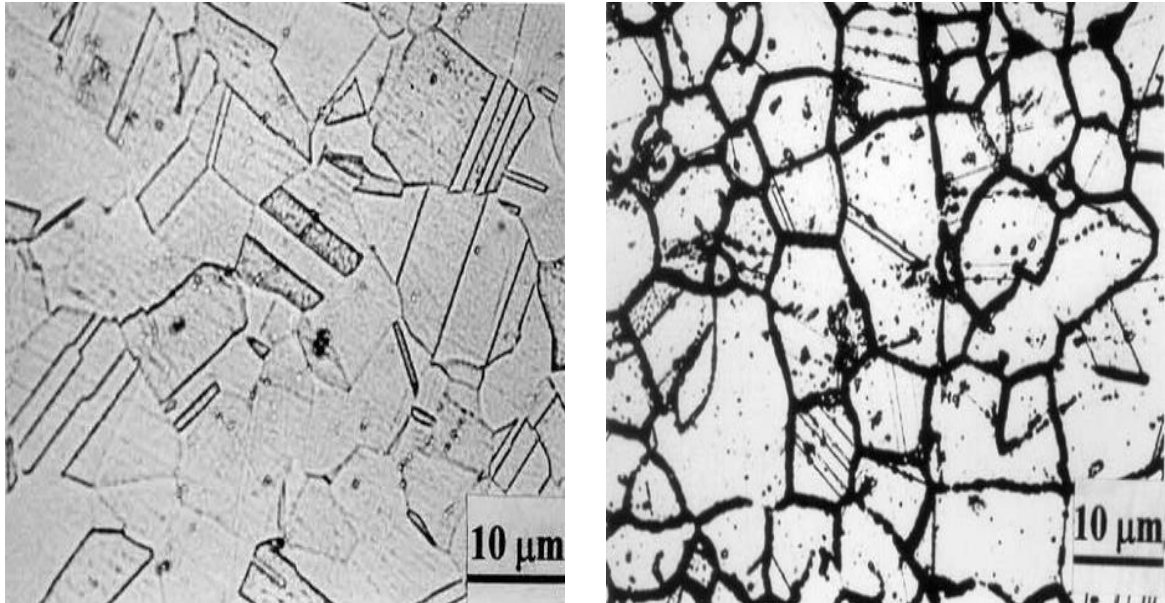
Los carburos Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> pueden precipitar localmente debido a tratamientos térmicos o procedimientos de soldadura con una temperatura de sensibilización que oscila entre 550 y 850°C, dependiendo de la composición química del acero [35]. En general, se considera que las aleaciones con fases o compuestos intermetálicos son altamente susceptibles a la corrosión intergranular [34]. Esta situación puede ocurrir en aleaciones resistentes a la corrosión, cuando los límites de grano de los elementos inhibidores de la corrosión, como el cromo, se agotan por algún mecanismo.

Un ejemplo clásico es la sensibilización de aceros inoxidable austeníticos y aleaciones de níquel, una condición de empobrecimiento de cromo en zonas

---

<sup>3</sup> Corrosión intergranular del inglés, Intergranular Corrosion.

adyacentes a los límites de grano debido a la precipitación del carburo de cromo en estos límites [33], [36].



*Figura 8 Microestructura de un acero inoxidable tipo 304. Izquierda: microestructura normalizada; derecha: estructura sensibilizada [37]*

Del mismo modo, las aleaciones no ferrosas también son propensas a IGC. La segregación de Zn en latón, y Si en aleaciones de aluminio, también conducen a IGC. De forma similar, la segregación de elementos de impurezas de Fe en las aleaciones de Al también conduce a IGC [38].

Este ataque de corrosión es bastante difícil de cuantificar, considerando que la pérdida de peso es realmente baja y que las dimensiones de las zonas atacadas son realmente reducidas [39].



### *1.1.7 FISURACIÓN ASISTIDA POR EL ENTORNO*

Un tipo de corrosión especialmente peligrosa es la fisuración asistida por el entorno (EAC<sup>4</sup>). Los metales y aleaciones comerciales como los aceros al carbono, los aceros inoxidables y las súper aleaciones base níquel, con frecuencia encuentran este problema de fisuración y falla resultante en los componentes de ingeniería.

Durante décadas, los mecanismos de la EAC se han estudiado intensa y extensamente en el procesamiento químico, en la industria del petróleo y gas y en la generación de energía nuclear [40].

Este tipo de corrosión parece ser causada por la fragilidad del hidrógeno a lo largo de los límites del grano, lo que lleva a la iniciación de grietas y posterior propagación. Estas grietas típicamente comienzan desde agujeros u otras áreas de concentración de tensión y generalmente se propagan en un plano perpendicular a la dirección ST<sup>5</sup>. A este fenómeno se le ha relacionado con la composición química de las aleaciones, especialmente con una alta proporción de zinc/magnesio, combinada con un bajo contenido de cobre. Las fracturas frágiles se han reproducido en laboratorios y se ha demostrado que el agrietamiento se debe a la exposición temporal (envejecimiento) y no está relacionado con la fatiga, aunque no se puede excluir una mayor propagación de grietas bajo cargas operativas. Sólo puede tener lugar cuando se cumplan las siguientes condiciones [41]:

- Aleación de material susceptible
- Estrés sostenido en la dirección ST
- Envejecimiento en un ambiente típico.

Si se puede eliminar una de esas condiciones, es poco probable que se produzca esta forma de agrietamiento de EAC.

---

<sup>4</sup> Fisuración asistida por el entorno del inglés, Environmentally Assisted Corrosion.

<sup>5</sup> Del inglés, Short Transverse direction.



Material	Acero al carbono/ baja aleación	Acero inox	Aleación base Ni
<b>Sector industrial</b>	Automoción	Producción sal/ procesamiento químico	Producción sal/agua supercrítica
<b>Composición química</b>	Fe, C, elementos menores	Fe, Cr >10%	Ni ≥ 50%, Cr, Mo, etc.
<b>Aplicación</b>	Sistemas de suspensión	Corrosión y resistencia térmica	Excelente corrosión y resistencia a alta temperatura
<b>Tipo de corrosión</b>	LC, CF, HIC	SCC en materiales a granel	LC, generalizada
<b>Fallo causa raíz</b>	LC promovida por la CF y la HIC de recubrimientos dañados	Bajo pH de [Cl] concentrado	CLSCC/SCC en SCW que contiene aniones
<b>Enfoques experimentales</b>	SST, CCT	Curva en U	Prueba de autoclave, prueba de velocidad de deformación lenta
<b>Rendimiento requerido</b>	Mejor corrosión por fatiga vida a fatiga y resistente a la falla retardada	Resistencia a la SCC	Excelente resistencia a la corrosión y SCC

*Tabla 4 Aplicación industrial y fisuración asistida por el entorno de aleaciones de Fe-Cr-Ni usadas comercialmente. LC: corrosión localizada, CF: corrosión por fatiga, HIC: fisuración inducida por hidrógeno, SCC: fisuración por corrosión bajo tensión, SST: ensayo de pulverización con sal, CCT: ensayo de corrosión cíclico.*  
[40]

### 1.1.8 CORROSIÓN POR FATIGA

La aplicación repetida de tensiones o deformaciones en materiales metálicos provoca cambios en sus propiedades mecánicas que pueden llevar a la fisuración e incluso a la rotura del material para valores de la tensión inferiores a los que se necesitan cuando se trata de cargas monótonas. Este fenómeno, se conoce como fatiga y es el responsable de la mayoría de las roturas que se producen en piezas de maquinaria y componentes estructurales.

Cuando el material está sometido a cargas oscilantes en presencia de un ambiente agresivo se habla de corrosión por fatiga, y el efecto global es más perjudicial que la simple adición de los efectos debidos a la fatiga mecánica y a la corrosión química por separado. Se trata de un proceso muy complejo en el que interaccionan toda una serie de variables químicas, mecánicas y microestructurales, lo que dificulta sobremanera su análisis [29].



Los principales parámetros que influyen en la vida a fatiga de una estructura son las propiedades de los materiales, la geometría y las propiedades del elemento, el efecto ambiental y la carga [42].

La corrosión por fatiga no requiere para cada material un medio específico, sino que se presenta en cualquier medio corrosivo, en especial si se produce un ataque localizado. Este tipo de corrosión presenta una serie de peculiaridades específicas [28]:

- No se produce únicamente en aleaciones, sino también en metales puros
- No existe un medio ambiente específico para cada material que provoque el agrietamiento, cualquier medio puede ponerlo de manifiesto siempre que actúe durante un tiempo suficiente
- La velocidad del ataque producido varía en función de la agresividad del ambiente de forma similar al desarrollo de un proceso de corrosión

El mecanismo de crecimiento de grietas por corrosión puede amplificarse bajo cargas de fatiga, debido a la interacción sinérgica de las cargas cíclicas aplicadas y la influencia de los ambientes corrosivos. Este es el caso de los mecanismos que pueden ocurrir en las estructuras en alta mar debido a la carga cíclica a la que se ven sometidas en los severos entornos marinos [43].

El comportamiento a la fatiga puede verse significativamente influenciado por la variación de la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto, la salinidad y, en particular, por la composición del agua de mar. Las grietas por fatiga pueden progresar a partir de los defectos existentes que pueden introducirse mediante la fabricación, transporte e instalación.

En particular, las piezas soldadas son muy susceptibles al agrietamiento por fatiga, generalmente debido a la concentración de esfuerzos y tensiones residuales, así como a defectos microestructurales y heterogeneidades inducidas por discontinuidades relacionadas con la ejecución de la soldadura. Además, un diseño deficiente puede aumentar la concentración de tensiones y aumentar su susceptibilidad al agrietamiento por fatiga.

Por estas razones, los defectos o grietas en las estructuras offshore deben inspeccionarse y controlarse de manera confiable para garantizar que la estructura cumpla con la vida útil del diseño en servicio [44].



*Figura 9 Corrosión por fatiga en elementos de acero sujetos a componentes de carga cíclica [42]*

El diseño para evitar la fatiga en las estructuras de acero offshore se considera, de acuerdo con la práctica recomendada DNVGL-RP-C203 [45]. La resistencia a la fatiga normalmente se da en términos de una curva S-N que informa el número de ciclos N frente al rango de tensiones S. En particular, la vida a fatiga de diseño para los componentes estructurales debe basarse en la vida útil especificada de la estructura.

La curva S-N se proporciona para las siguientes condiciones ambientales: "en aire" para superficies con revestimiento, "en agua de mar" para superficies con protección catódica, "corrosión libre" para superficies protegidas únicamente con tolerancia a la corrosión [44].



Curso: 2017-2018.

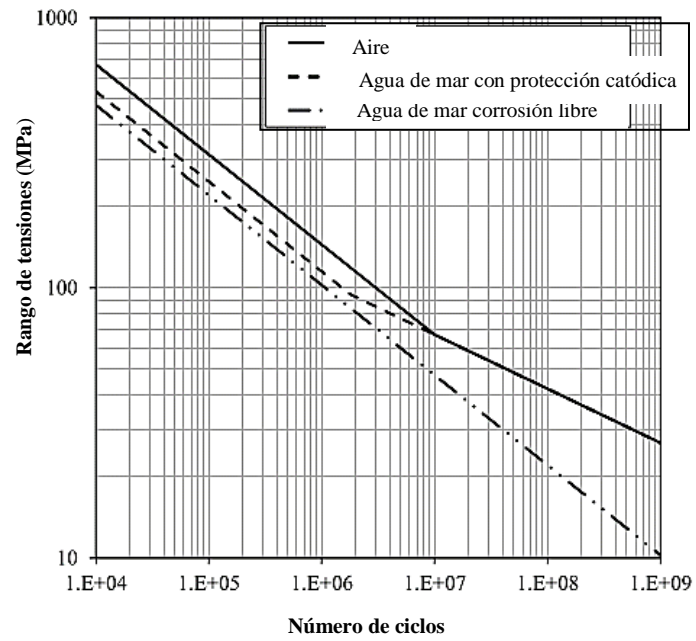


Figura 10 Curva S-N para juntas tubulares en aire y en agua de mar con protección catódica [45]



## 2. DESARROLLO DE LAS ESTRUCTURAS OFFSHORE

### 2.1 INTRODUCCIÓN

La construcción de plataformas offshore surgió como una necesidad para extraer petróleo y gas de las reservas que se localizaban en el fondo marino [46]. Este campo de la ingeniería está en continuo desarrollo y requiere de las más avanzadas tecnologías. Este marco es el que ha podido posibilitar que este tipo de estructuras se empiece a utilizar con más frecuencia y con otras finalidades como la producción de energía sostenible en alta mar.

Existen diferencias fundamentales entre las plataformas de petróleo y gas y las torres de energía eólica. La más importante de ellas, es que los dispositivos de energía eólica marina (OWEA) son estructuras no tripuladas con acceso altamente restringido.

PLATAFORMAS PETRÓLEO Y GAS	ESTRUCTURAS EÓLICAS
Sistemas de protección contra la corrosión generalmente bajos-inspección permanente	Estructuras no tripuladas con acceso muy restringido (accesibilidad <60%) [47]
Las áreas de recubrimiento deteriorado pueden ser reconocidas y reparadas	Las reparaciones de recubrimiento deteriorado no son factibles
Sin fuerte influencia de la carga en fenómenos de corrosión	El diseño estructural y la corrosión por fatiga son un problema crucial

*Tabla 5 Principales diferencias críticas entre plataformas de petróleo y gas y estructuras eólicas offshore*  
[44]

Existen muchas necesidades comunes, en las que la eólica se apoya en la experiencia de sector petrolífero, sin embargo, existen otras muchas necesidades en las que la industria petrolífera no puede ayudar tan directamente al mundo eólico marino, por lo que deben de ser desarrolladas por la industria eólica.

Se afirma que los costes de la reparación de los sistemas de protección contra la corrosión de los dispositivos de energía eólica marina son 50 veces más altos que los costes iniciales de la aplicación. Por estas razones, los sistemas de protección contra la corrosión para un OWEA deben mostrar una mayor confiabilidad [1].



A diferencia de los barcos, que están diseñados para el comercio mundial, estas estructuras offshore están diseñadas para una ubicación específica [48]. Hay que tener en cuenta que una estructura puede estar expuesta a cinco zonas corrosivas diferentes dependiendo de la posición de sus partes en relación con el nivel del mar:

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

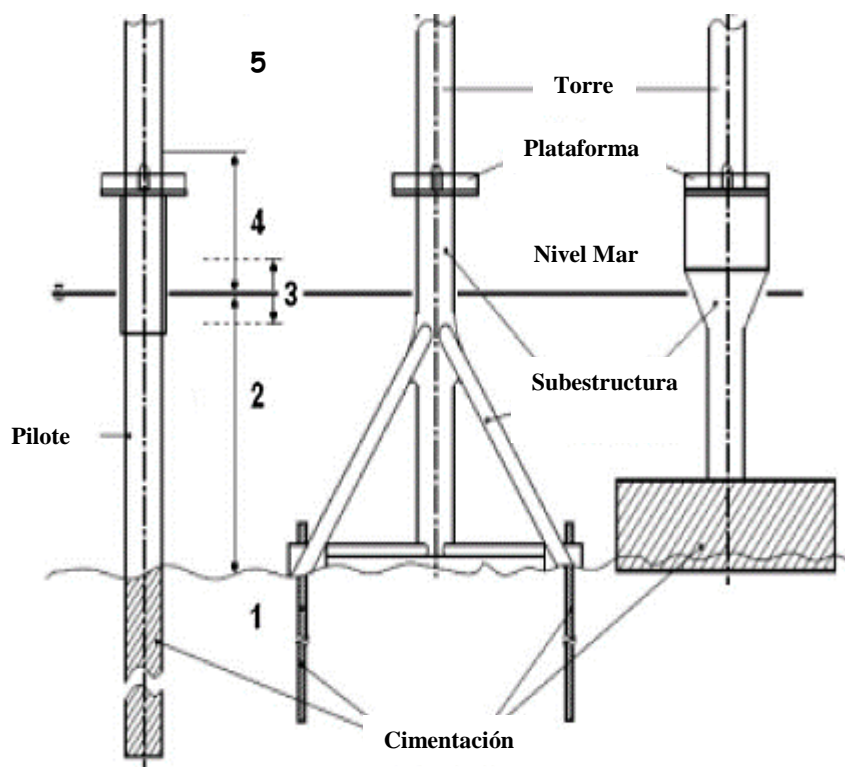


Figura 11 Zonas de corrosión ilustradas en un OWEA. 1, Lecho marino; 2, Zona sumergida; 3, Zona de mareas; 4, Zona de salpicaduras; 5, Zona atmosférica (marina)



El objetivo general del diseño de estas plataformas es evitar la resonancia directa con las frecuencias dominantes de las olas oceánicas. Debido al alto coste de dicha estructura, la información detallada sobre el entorno de la ola en la ubicación prevista normalmente se recoge mediante boyas de olas, lo que permite una descripción estadística más precisa de los estados del mar [48]. Diseñar cimientos para convertidores de energía eólica marina (OWEC) es más difícil que para plataformas marinas de petróleo y gas. Las cargas aerodinámicas que actúan sobre los OWEC son importantes debido a su gran extensión de hoja e incluso inevitables. Las cargas hidrodinámicas que actúan en los OWEC y plataformas de petróleo (o gas) también son diferentes. Los OWEC se instalan en aguas superficiales y transitorias, mientras que las plataformas petroleras se instalan principalmente en aguas profundas [49]

Existen diferentes métodos para proteger las estructuras del ataque de la corrosión y así mismo evitar el desgaste. La industria del recubrimiento ha desarrollado, a lo largo de los años, sistemas de recubrimiento especiales para proteger las estructuras offshore de la corrosión.

Los conceptos más prometedores para la extracción de energía en alta mar son estructuras para la energía eólica y la extracción de energía de las olas. [48]. Las turbinas eólicas marinas han experimentado un rápido aumento en los últimos años, con una capacidad instalada total que se espera alcance los 40 GW en 2020 y 150 GW en 2030, cubriendo el 4% y el 14% del consumo total de electricidad de la UE [50].

## **2.2 ESTRUCTURAS OFFSHORE**

Una estructura offshore es una estructura situada en el mar y que, por tanto, se encuentra sometida a la acción del oleaje, y además a unas condiciones meteorológicas adversas. Estas estructuras están en contacto directo con el medio ambiente, y cualquier fallo inesperado puede ser de naturaleza desastrosa [51]. Estos fenómenos son importantes tenerlos en cuenta en el diseño y el cálculo de estas estructuras ya que el tiempo meteorológico es una de las principales causas de fallos en las estructuras offshore.



Las estructuras offshore pueden ser clasificadas de diversas maneras, por ejemplo, en el caso más habitual de plataformas destinadas a la extracción de gas o petróleo, se suele distinguir entre plataformas de perforación y plataformas de producción, siendo las primeras las que exploran y perforan los pozos productores mientras que las de producción son aquellas posicionadas en los campos ya descubiertos cuya finalidad es la extracción y distribución del recurso. Obviamente, estas clasificaciones no son aplicables a otros tipos de plataformas como las de parques eólicos o las de aprovechamiento de energía marina [52].

Debido a que el interés de este trabajo se centra en la corrosión marina de estas estructuras clasificaremos a las estructuras offshore, en: las apoyadas en el fondo marino o fijas y las flotantes [46],[48]. Las primeras plataformas construidas fueron estructuras fijas, pero las necesidades de explotación convertían en un objetivo la instalación de plataformas en aguas más profundas, las plataformas flotantes han ido adquiriendo un desarrollo más amplio.

Teniendo en cuenta que la industria de aerogeneradores marinos se ha desarrollado con posterioridad a la industria petrolera, la mayoría de los tipos de plataformas para parques eólicos offshore están inspirados en sus equivalentes para hidrocarburos.

### *2.2.1 PLATAFORMAS PETROLÍFERAS*

En la actualidad, el petróleo y el gas se producen en casi todas partes del mundo desde depósitos poco profundos de 20 metros de profundidad hasta pozos de 3.000 metros de profundidad en más de 2.000 metros de agua [53].

Las plataformas petrolíferas tienen la función de extraer petróleo y gas natural de los yacimientos del lecho marino y para luego transportarlo hacia la costa para su uso. Han avanzado en seguridad y en rapidez de instalación y estructuras con otras características como son los propios buques pueden realizar la misma función que una gran plataforma [54].



Debido a su actividad principal, las plataformas petroleras son propensas a sufrir accidentes que pueden ocasionar pérdidas de vidas humanas, derrames de petróleo y graves daños ambientales

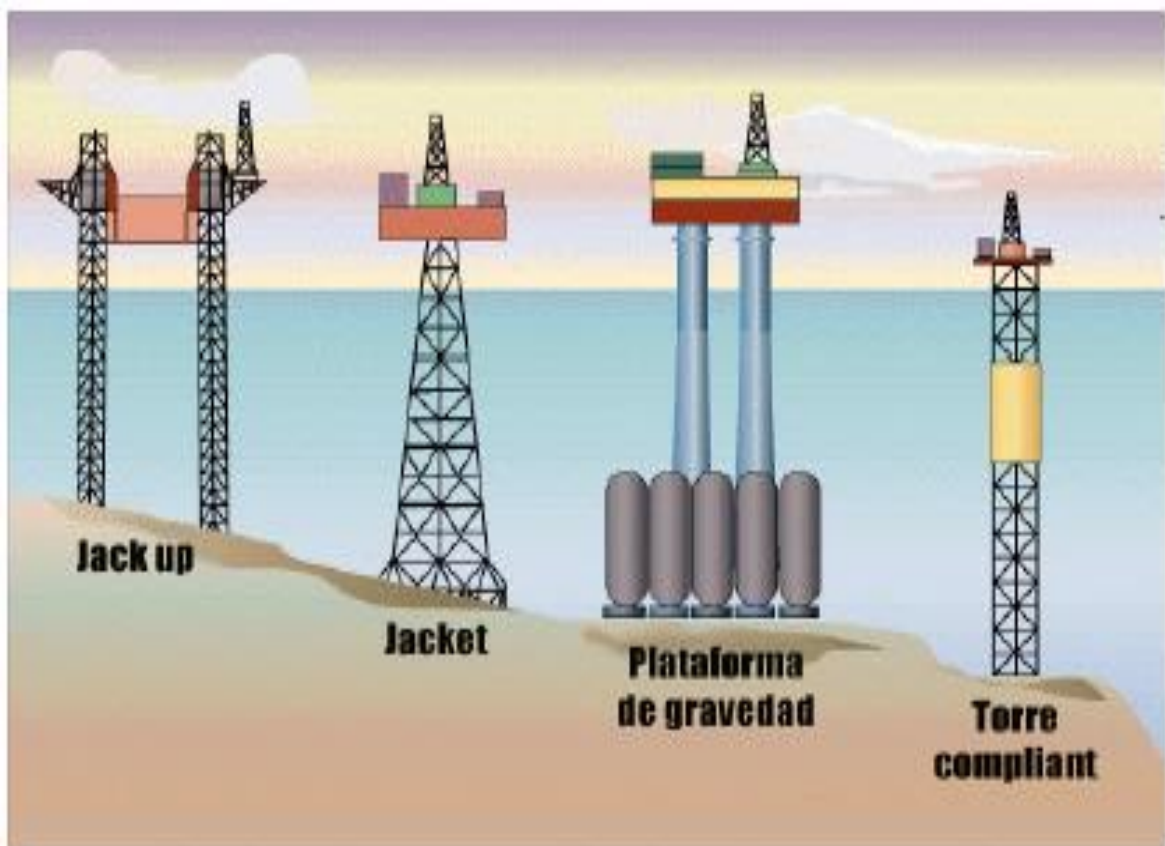
Se utiliza toda una gama de estructuras diferentes en alta mar, según el tamaño y la profundidad del agua. La mayoría de las plataformas son portátiles, perforan un pozo en un sitio mar adentro y después se mueven para perforar en otro lugar. Se clasifican en unidades soportadas en el fondo y unidades flotantes [55].

#### 2.2.1.1 PLATAFORMAS PETROLÍFERAS FIJAS

Una subestructura fija es la parte de una plataforma marina que se encuentra en el fondo del mar y es rígidamente conectado a él por medio de pilotes de cimentación (por ejemplo, estructura jacket) o bajo el efecto de su peso (por ejemplo, estructura de gravedad) [56].

Se caracterizan por ser utilizadas en profundidades pequeñas, en torno a 300 metros. Sin embargo, los pozos de petróleo que son explorados hoy en día se encuentran a más de 4000 metros de profundidad por lo que el uso de plataformas fijas es inviable [46],[52].

Las estructuras apoyadas en el fondo marino, a excepción de las construidas en hormigón, son perfiles tubulares de acero soldados que actúan como un entramado que soportan el peso de la estructura total y las fuerzas debidas a las olas, la corriente marina y el viento [46]. Por regla general, excluyendo las plataformas “minimal” que solo son de uso auxiliar, se distinguen cuatro tipos de plataformas fijas: Jackets, torres flexibles o compliant, auto-elevables o jack-ups y plataformas de gravedad.



*Figura 12 Clasificación de las estructuras petrolíferas fijas*  
[52]

#### 2.2.1.1.1 Plataforma auto-elevables o Jack ups

Son plataformas autónomas de casco plano con tres o cuatro patas que se pueden bajar mediante unos mecanismos hasta que se clavan en el fondo del mar. Una vez que las patas han sido hincadas, la plataforma se eleva sobre esas piernas (gracias a su complejo sistema hidráulico) por encima de la superficie del mar. [56].



*Figura 13 Plataforma autoelevable (Jack-up)*

[55]

Estas estructuras auto-elevables se utilizan casi exclusivamente en la industria del petróleo. Tienen por finalidad la perforación de pozos exploratorios en la plataforma continental en profundidades de hasta 130 metros y por tanto son proyectadas para ser movidas desde el lugar de fabricación hasta la zona de exploración

#### 2.2.1.1.2 Estructura Jacket

Se trata de una armadura tridimensional de perfiles tubulares de acero que generalmente tienen tres, cuatro, seis u ocho pies fijos en el suelo marino a través de pilotes clavados al fondo. Los pies de la chaqueta y las abrazaderas transmiten cargas ambientales y de superficie a los pilotes y, posteriormente, al lecho marino. La mayor ventaja de este tipo de plataformas es que pueden ser construidas en tierra y

transportadas a su lugar de emplazamiento evitando así los inconvenientes de su construcción en el mar. Generalmente se construyen cercanas a la costa lo que facilita el transporte del recurso explotado. En la explotación de petróleo se han llegado a utilizar jackets hasta los 100 metros de profundidad.

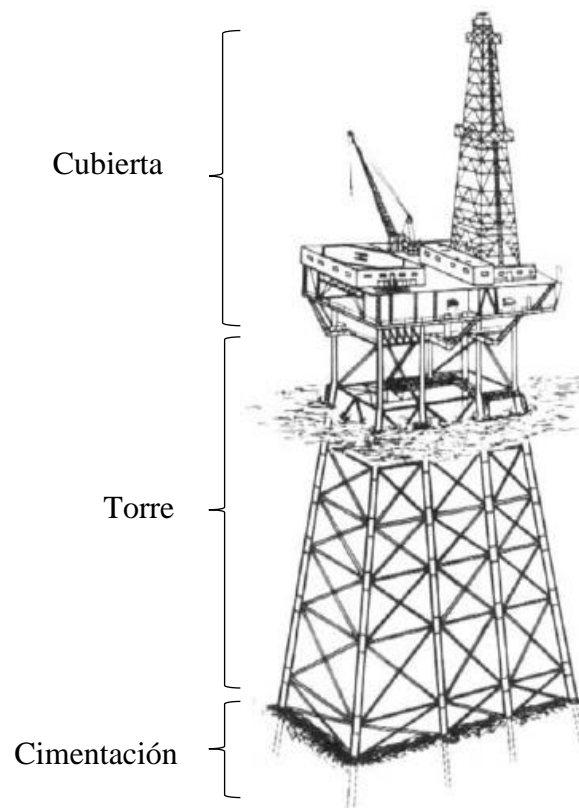


Figura 14 Estructura jacket Fulmar  
[53],[55]

### 2.2.1.1.3 Plataforma de gravedad

Las plataformas de gravedad (GBS) son estructuras muy grandes que se asientan en el lecho marino que son construidas generalmente en hormigón o en acero y resisten las cargas de deslizamiento y vuelco por fricción y capacidad de carga del suelo.

No necesitan sistemas adicionales de anclaje. El casco de un GBS está hecho de varios tanques que se usan para almacenar aceite y lastre. Estas plataformas se han instalado en profundidades de agua de hasta 300 m [52],[53].



Curso: 2017-2018.



*Figura 15 Plataforma de gravedad StatoilHydro Troll West*  
[58]

#### 2.2.1.1.4 Torre flexible o Compliant

Las torres compliant se componen de varias secciones rígidas de acero unidas mediante bisagras de modo que la torre puede balancearse bajo cargas ambientales.



*Figura 16 Torre compliant Bullwinkle*  
[59]



Las características de rigidez y masa de una torre compliant se ajustan de modo que su período natural sea mucho mayor que el período de las olas en el entorno de diseño extremo. Esto reduce su respuesta dinámica a dicho entorno y extiende la aplicabilidad de la plataforma fija a aguas más profundas, como 1000 m [56].

### 2.2.1.2 PLATAFORMAS PETROLÍFERAS FLOTANTES

Desde que se descubrió petróleo a profundidades superiores a 1000 metros, surgió la necesidad de utilizar plataformas flotantes instaladas a través de un sistema de anclaje [52]. Normalmente se componen de una estructura rígida flotante cuyos grados de libertad en posicionamiento, dependen del tipo de anclaje utilizado para fijarla al lecho marino.

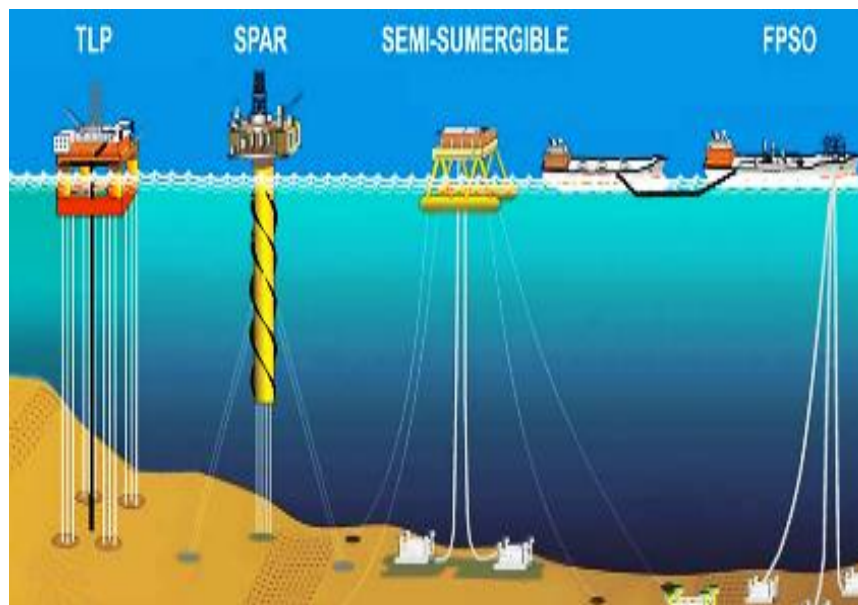


Figura 17 Tipos de plataformas flotantes [60]

Las plataformas flotantes se agrupan en estructuras con flotación neutra, como las plataformas Semi-sumergibles, las plataformas “Spars” y los FPSO<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Unidades flotantes de producción, almacenamiento y descarga, del inglés Floating Production, Storage and Offloading units.

Por otro lado, las estructuras con flotación positiva, podemos encontrar las plataformas TLP<sup>7</sup> [52],[53],[58].

#### 2.2.1.2.1 Plataformas Semi-sumergibles

Son estructuras flotantes utilizadas para perforar o producir petróleo. Flotan gracias a la flotabilidad de las columnas y pontones situados bajo el agua y el peso suficiente para mantener la estructura en posición vertical. Cuando una plataforma semi-sumergible se traslada, se retira agua de lastre de los pontones para que el equipo tenga mayor flotación y pueda moverse con más facilidad sobre la superficie del mar.



*Figura 18 Plataforma semi-sumergible Scarabeo-9*  
[55]

La mayoría de estas plataformas cuentan con sistemas de propulsión propios ubicados en los pontones. Las plataformas semi-sumergibles son capaces de soportar temporales y de perforar en aguas muy profundas, las más modernas perforan en aguas de más de 2500 metros de profundidad [60].

---

<sup>7</sup> Plataformas de piernas tensionadas, del inglés Tension Leg Platform.

### 2.2.1.2.2 Plataformas Spar

Una plataforma Spar es una estructura tubular de gran diámetro y de entre 100 y 250 metros de longitud que se fijan al fondo mediante catenarias o amarres tensionados. Son utilizadas para la exploración en aguas profundas, pudiendo llegar hasta más de los 3000 metros [52].

Disponen de un gran contrapeso en la parte inferior y no dependen del fondeo para mantenerse en posición vertical. Además, tienen la capacidad de moverse horizontalmente, gracias al ajuste de las tensiones de línea de fondeo, lo que les permite posicionarse sobre pozos a cierta distancia de la ubicación principal de la plataforma. Es posible distinguir tres tipos de plataformas Spar según ha ido evolucionando la estructura tubular: Spar clásica, Truss Spar y Cell Spar.

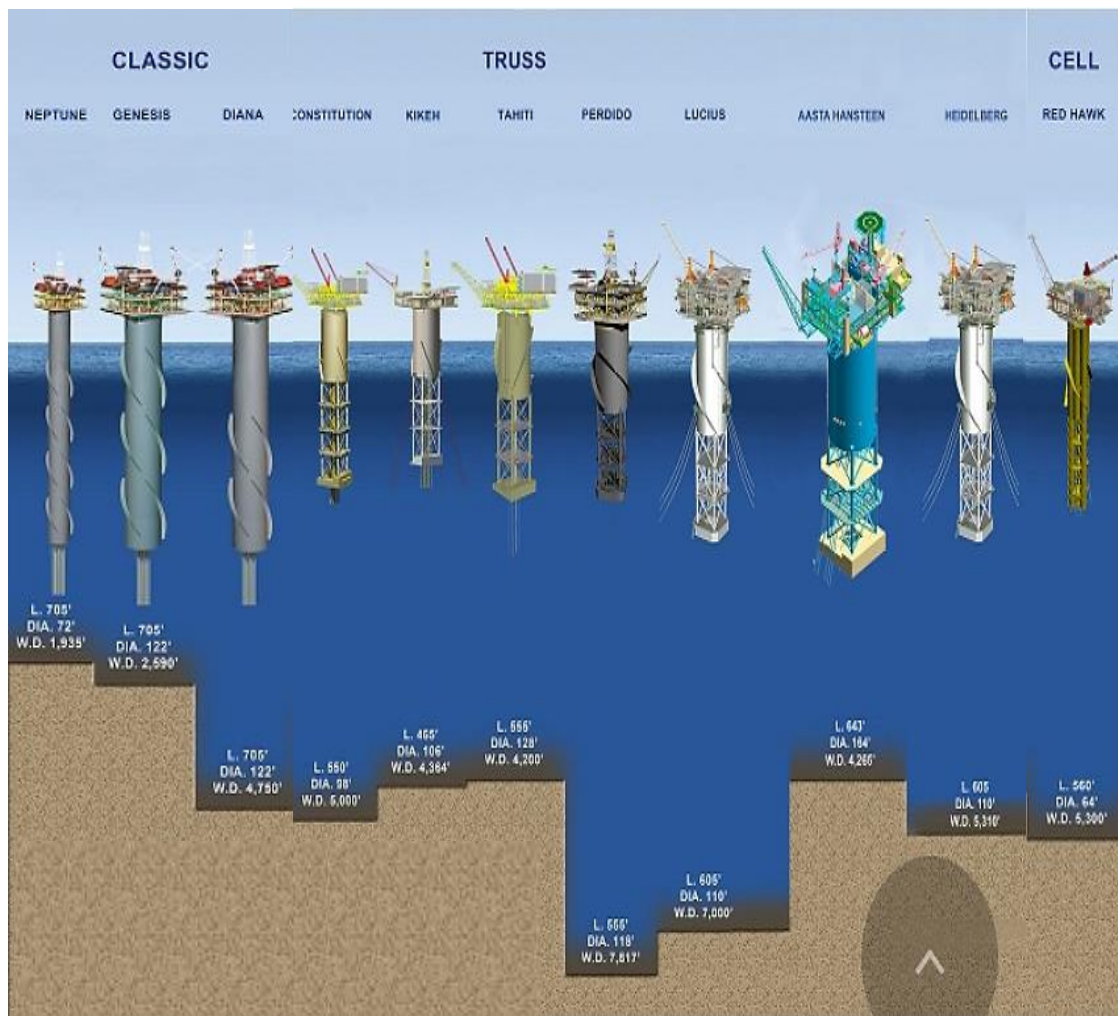


Figura 19 Tipos de plataformas Spar  
([www.technipfmc.com](http://www.technipfmc.com), Pag. Web de Technip)

### 2.2.1.2.3 Unidades flotantes de producción, almacenamiento y descarga (FPSO)

Aparecieron por la necesidad de explorar en aguas profundas y para su construcción se aprovechaban buques petroleros. La idea central de los FPSO es garantizar una gran capacidad de almacenamiento que permita la instalación de esas unidades en campos mucho más alejados de la costa, donde la instalación de líneas de tuberías fuese imposible o demasiado costosa. La profundidad máxima a la que puede operar una unidad de producción flotante es de unos 1900 metros.



*Figura 20 FPSO Shell Prelude*  
[55]

### 2.2.1.2.4 Plataformas de patas tensoras (TLP)

Son unidades flotantes tanto de perforación como de producción de petróleo. Poseen un casco semejante a una plataforma semi-sumergible, pero las TLP están fondeadas por un sistema de haces de tubos o cables de acero, sujetos al fondo del mar por medio de una gran plataforma de hormigón clavada al fondo marino, conocida con el nombre de plantilla. Han sido diseñadas para profundidades de agua entre 150 y 800 metros, aunque algunas han llegado a utilizarse en aguas de más de 2000 metros de profundidad.





*Figura 21 Plataforma TLP Mars*  
(<https://www.offshore-technology.com/projects/mars/>)

### 2.2.2 GENERADORES EÓLICOS MARINOS

Se espera que el parque eólico marino se convierta en una importante fuente de energía a nivel mundial debido a sus diversas ventajas. La planificación de la generación para la próxima década, es decir, hasta 2020 está en pleno apogeo.

En particular, en 2015 la energía eólica contribuyó a satisfacer el 11,4% de la demanda de electricidad de la UE, frente al 2,4% calculado en el 2000 [61]. Desde 2011, el Reino Unido tiene la mayor cantidad de estructuras eólicas marinas instaladas en Europa, seguido de Alemania, con ambos países mostrando un aumento significativo entre 2011 y 2015. Dinamarca es el tercer mayor productor de energía eólica marina en la UE [42].

Igual que sucedió en la industria petrolera marina, las primeras plataformas eólicas se han situado en aguas cercanas a la costa, por lo que se han utilizado fundamentalmente estructuras fijas [52]. La ventaja reside en la posibilidad de instalar las turbinas eólicas en aguas más profundas ahorrando costes y facilidad en la construcción, pero actualmente es una tecnología en desarrollo y hay muchas investigaciones [62].

La Figura 22 muestra las distintas partes de las que se compone de un aerogenerador marino que sirve para esquematizar las diferentes partes del conjunto:

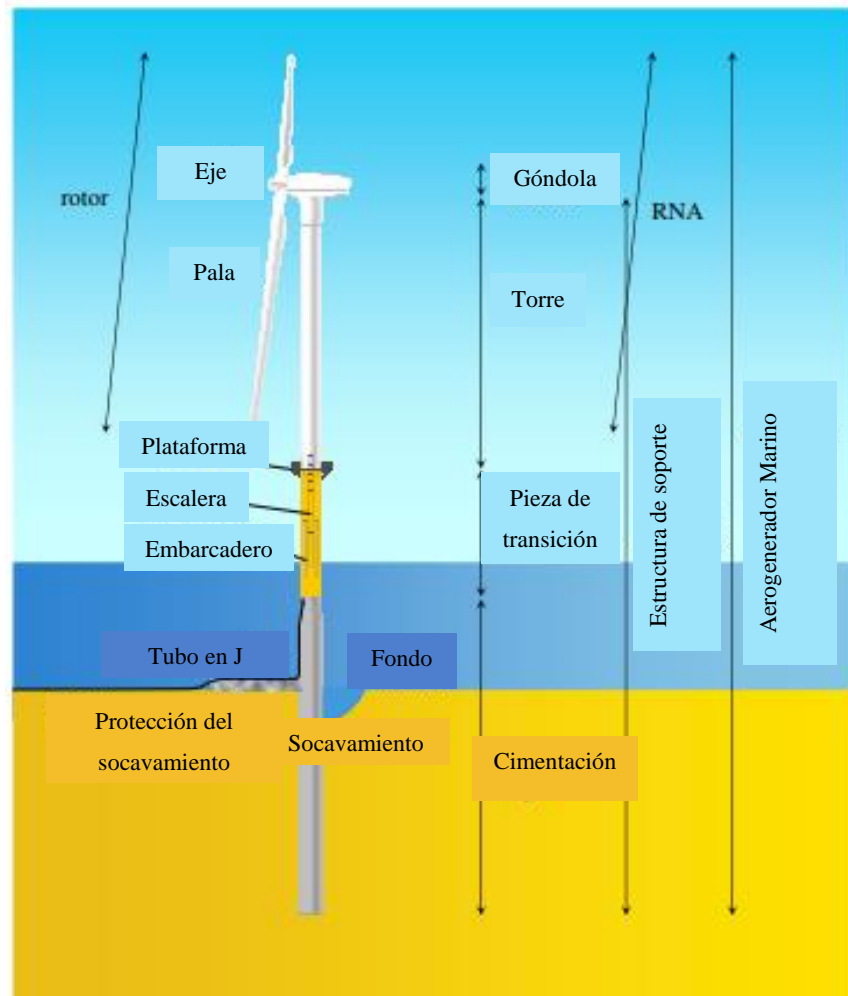


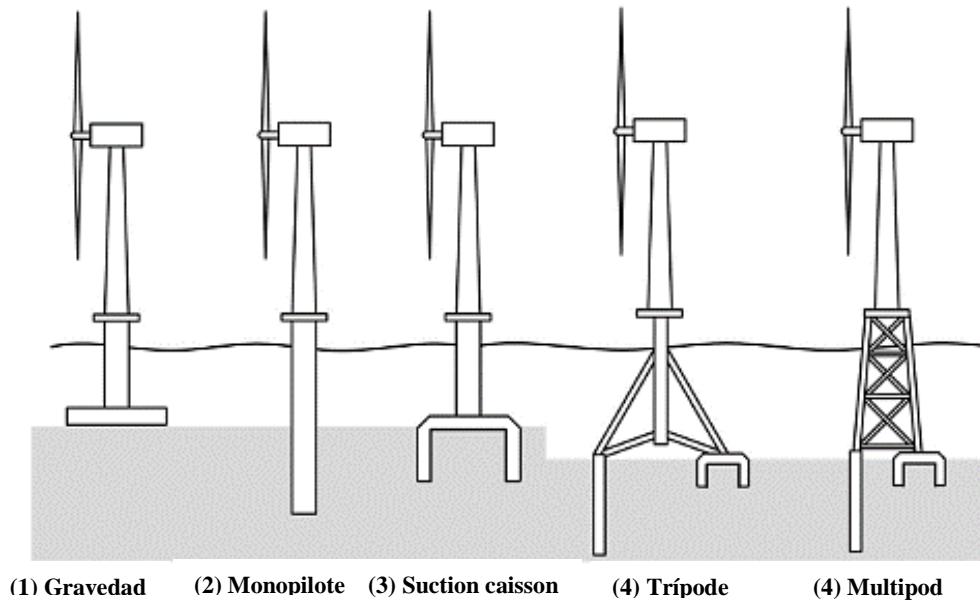
Figura 22 Partes de un OWEA  
[57]

### 2.2.2.1 TIPOS DE CIMENTACIONES

La profundidad del mar generalmente se clasifica en tres clases: aguas superficiales (0-30 m), aguas de transición (30-50 m), y aguas profundas (50-200 m). La profundidad del mar es el factor más importante para la viabilidad de los parques eólicos marinos porque el precio de los cimientos aumenta significativamente con la profundidad.

En aguas poco profundas, los tipos que se utilizan principalmente son el de gravedad y monopilote. En aguas de transición y profundas, son el tipo monopilote y multipod

los que se desarrollan principalmente. Los valores correspondientes a multipod incluyen tanto el trípode como jacket [49].



*Figura 23 Tipos de estructuras fijas para los OWECs [49]*

#### 2.2.2.1.1 Gravedad

Los primeros parques eólicos offshore en Dinamarca se instalaron utilizando este tipo de cimientos cerca de la costa, donde la profundidad del agua es muy poco profunda. El tipo de gravedad no se usa para OWEC de más de 3MW porque tendría que ser muy pesado y costoso para construirse en aguas más profundas para resistir altas cargas aerodinámicas e hidrodinámicas para una gran capacidad de la turbina eólica [49].

#### 2.2.2.1.2 Monopilote

Son estructuras formadas por una torre directamente pilotada al fondo marino sobre la que se instala el aerogenerador [52]. Este tipo de cimentaciones se usa principalmente para la mayoría de los aerogeneradores marinos, especialmente en parques eólicos marinos europeos.



#### 2.2.2.1.3 Suction caisson

Son simples fabricaciones de acero que parecen cubos al revés, que pueden diseñarse para ser más ligeros que el acero requerido para una base de monopilote equivalente [49]. Tienen varias ventajas sobre el monopilote, incluida una mayor durabilidad, sin necesidad de recipientes especializados, con una mayor facilidad de instalación y mayor resistencia de la estructura a las cargas verticales y laterales debido a sus diámetros más grandes. Se están considerando este tipo de cimentaciones para un generador eólico marino de 200 MW en Hong Kong, en aguas a unos 30 metros de profundidad [63].

#### 2.2.2.1.4 Multipod (Trípode y Jacket)

Se necesitan diferentes conceptos de subestructuras para reducir el coste de construcción para aguas de transición. Las estructuras trípode y jacket o chaqueta, proporcionan suficiente capacidad de carga en profundidades de agua de transición con una longitud de penetración relativamente corta. Además, el peso relativamente bajo de trípodes y chaquetas mejora la viabilidad económica[49].

### 2.2.2.2 ESTRUCTURAS FLOTANTES

En los próximos años, es probable que haya grandes parques eólicos marinos en las partes más profundas del Mar del Norte. Desafortunadamente, los costes de las estructuras en aguas superficiales y de transición se vuelven prohibitivamente altos. Sin embargo, existen escuelas alternativas de diseño para estructuras de apoyo en aguas profundas, incluidas estructuras de soporte flotantes. Las estructuras flotantes son aquellas que, aunque están fijadas al lecho marino mediante cables, la base sobre la que se apoya el aerogenerador está flotando en el mar. Es una tecnología aún reciente, la primera turbina plenamente funcional se instaló en 2009 en Noruega [62].

Las estructuras flotantes tienen muchas ventajas en aguas profundas tanto en costes, como construcción, instalación y desmantelamiento [49]. La estructura debe, por un lado, proporcionar suficiente flotabilidad para soportar el peso de la turbina, y por otro restringir los movimientos de pitch, roll y heave a unos límites aceptables [64].



Existen numerosas configuraciones de plataformas flotantes de apoyo a turbinas eólicas en el mar. En realidad, todas ellas se basan en la variedad de los sistemas de amarre existentes, tanques, y las opciones de lastre que se utilizan en el sector offshore del petróleo y gas. Podemos clasificar las estructuras flotantes soporte de aerogeneradores en tres tipos principales, atendiendo al sistema de estabilización que emplean:

- Plataformas estabilizadas por lastre: utiliza un peso muy grande bajo el agua, proporcionando un contrapeso a las cargas. Se usan amarres simples para mantener la estructura en su lugar.
- Plataformas estabilizadas por líneas de amarre: utilizan disposiciones de amarre tensadas para mantener estable la estructura.
- Plataformas estabilizadas por inercia en la flotación: usa el área del plano de agua para lograr estabilidad, similar a la forma en que lo hace una barcaza. Se usan amarres simples para mantener la estructura en su lugar.



*Figura 24 Principales conceptos de soportes flotantes para aerogeneradores marinos*

[64]

Ya se han realizado algunos estudios preliminares para evaluar los sistemas flotantes, pero ninguno de los estudios públicos hasta la fecha ha intentado optimizar el precio y



la geometría de la plataforma. La inversión comercial en turbinas eólicas flotantes es un desafío tecnológico, pero necesario si se quiere explotar todo el potencial eólico.

#### 2.2.2.2.1 Plataformas estabilizadas por lastre

Comúnmente conocidas como boyas de tipo Spar, están formadas básicamente por un cuerpo cilíndrico, con una relación entre su altura y su diámetro considerablemente grande. Son plataformas que logran la estabilidad mediante el uso de lastre en la parte baja de la boya, consiguiendo que el centro de masas se desplace lo más abajo posible. Una boya Spar tiene la forma más simple de todas las plataformas flotantes, pero debido a que el centro de gravedad de una turbina eólica de eje horizontal es bastante alto, será necesario que la estructura para soportar la turbina (y su torre) sea muy grande. Estas boyas podrán estar amarradas y fijadas al fondo marino mediante líneas de catenaria o bien por líneas tensionadas, si bien generalmente se emplean líneas de catenaria y anclas de arrastre.

#### 2.2.2.2.2 Plataformas estabilizadas por líneas de amarre

Plataformas que logran la estabilidad a través de la tensión producida por los amarres. La tensión de los amarres proporciona una interacción de la estructura con la ola relativamente baja con respecto a los amarres con catenaria, dando lugar a que la plataforma tenga unos desplazamientos mínimos. Sin embargo, será necesaria una mayor complejidad en el diseño de la estructura para que esta pueda soportar las cargas de las líneas de amarre.

En cuanto a la estructura de la plataforma, está podrá ser de tipo semi-sumergible, boya (spar o no), etc.

#### 2.2.2.2.3 Plataforma estabilizada por flotación

Son una de las plataformas menos conocidas que aún se están investigando. También se denomina concepto de chaqueta flotante. Los cimientos utilizan una barcaza, con líneas de amarre catenarias fijadas a los anclajes en el lecho marino, estabilizada en la superficie del océano para soportar las turbinas eólicas. Este tipo de cimentación no ha encontrado un amplio uso práctico debido a su susceptibilidad a grandes olas [65],[63].



### 2.2.3 *DESARROLLO DE ENERGÍAS OCEÁNICAS*

Los océanos tienen enormes recursos naturales, que pueden contribuir significativamente a nuestras futuras demandas de energía [66]. En particular, la energía oceánica (OE<sup>8</sup>) ofrece un recurso renovable con la ventaja de ser predecible con varios días de anticipación, consistente durante el día y la noche y significativamente mayor en su densidad de energía en comparación con las energías eólica y solar [67]. Varios tipos de fuentes oceánicas se han definido como fuentes potenciales para generar electricidad, incluidos el aluvión de mareas, la energía de las corrientes marinas, la energía undimotriz (u olamotriz), la energía maremotérmica y la energía de gradiente de salino [68].

El desafío del mercado mundial de la energía oceánica es de 337GW de capacidad instalada para 2050 y en Europa la aspiración del sector de la energía oceánica es instalar hasta 100 GW [69]. De esta forma, la energía oceánica tiene un potencial significativo, pero las tecnologías relacionadas requieren mejoras adicionales para reducir los costes. El coste de la generación de energía maremotriz y undimotriz es menos competitivo que otros métodos de generación de electricidad verde. En particular, la energía maremotriz tiene costos de producción de alrededor de 350 €/MWh y energía undimotriz, tiene costos más altos en unos 450 €/MWh [70] aunque estas cifras son estimaciones aproximadas, debido a la naturaleza emergente de estas tecnologías.

La energía de las corrientes marinas (TDE<sup>9</sup>) es más predecible y más fácil de cuantificar en comparación con la energía eólica y undimotriz. Para esta tecnología, las condiciones extremas del mar deben ser consideradas para la supervivencia de las turbinas de corrientes marinas (TCT<sup>10</sup>), que es el mayor desafío actual para la energía del océano [66]. Las TCT enfrentan problemas de corrosión durante su vida útil y el

---

<sup>8</sup> Del inglés, Ocean Energy.

<sup>9</sup> Del inglés, Tidal current energy.

<sup>10</sup> Del inglés, Tidal Current Turbines

ambiente corrosivo genera incertidumbre en la confiabilidad de estas. Son vulnerables al daño de la erosión del lecho marino, a la falla de las cuchillas por fatiga, a la corrosión debido al ataque del agua de mar y al fallo hidrodinámico producido por las incrustaciones en las cuchillas.



*Figura 25 Primera turbina marina comercial, SeaGen [71]*

Los mercados de energía oceánica representan para Europa un avance hacia una economía eficiente en el uso de los recursos, con una gran proyección en términos de crecimiento económico y creación de empleo. Sin embargo, todavía están lejos de la escala prevista y el despliegue comercial.



### **3. SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN**

Hay varios métodos disponibles para evitar, ralentizar o controlar la corrosión. Por razones formales, los métodos de protección contra la corrosión se pueden subdividir en métodos activos y pasivos [1]. El daño debido a la corrosión es el principal factor de degradación del material para las estructuras metálicas submarinas y subterráneas. La solución más efectiva para ese problema es la combinación de pintura y la instalación de ánodos de sacrificio o sistemas de ICCP<sup>11</sup> [72].

Como anteriormente se mencionaba, existen diferentes zonas de corrosión a las que se ve expuesta una estructura offshore. Haciendo un análisis de estas zonas se identifican diversas áreas críticas donde el tipo de corrosión por el cual se ve afectada la estructura es diferente.

No se puede exagerar el hecho de que la corrosión debe controlarse en vista de la cantidad colosal de dinero que se gasta anualmente [73]. Los materiales están protegidos contra la corrosión a través de una amplia variedad de métodos. Hung et al (2011) destacaron las medidas en prevención y control de la corrosión de la siguiente manera: selección de materiales, protección catódica y anódica y recubrimiento. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los principios de prevención de la corrosión se basan en la modificación del medioambiente, enfoques electroquímicos y materiales resistentes a la corrosión. De acuerdo con Hegedus (2004), existen sistemas de varias capas en revestimientos que se componen de imprimación y capa superior. Las funciones de cada capa son específicas, pero cada capa es interactiva. Los materiales de recubrimiento pueden ser metálicos, inorgánicos u orgánicos [74].

---

<sup>11</sup> Protección catódica por corriente impresa, del inglés Impressed Current Cathodic Protection.

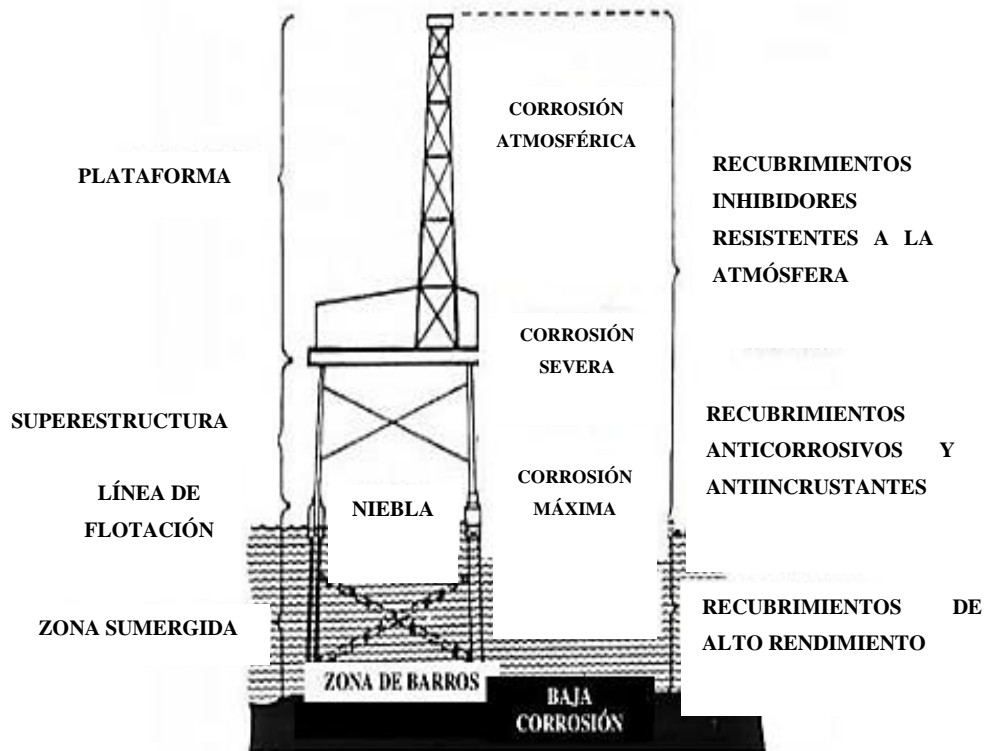


Figura 26 Zonas de corrosión de una estructura offshore [57]

### 3.2 MÉTODOS DE PROTECCIÓN ACTIVA CONTRA LA CORROSIÓN

Los siguientes métodos pueden considerarse métodos activos de protección contra la corrosión:

- Selección de materiales resistentes a la corrosión
- Tolerancia de corrosión
- Diseño constructivo apropiado
- Influencia del medio corrosivo
- Protección catódica contra la corrosión

#### 3.2.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

El control de la corrosión es sólo uno de los muchos factores que intervienen en la selección del material. Al efectuar una determinada selección se debe tener en cuenta una serie de factores, como las propiedades físicas y mecánicas del material,



resistencia a la corrosión, la disponibilidad y facilidad de trabajo, además de los aspectos económicos, antes que pensar en el material en sí mismo.

La Figura 27 muestra los efectos de la selección del material sobre la velocidad de corrosión en una plataforma offshore situada en el Mar del Norte [1]. Se puede ver que, para categorías de corrosividad iguales (C5), el cobre se deterioró más lentamente que el acero.

Sin embargo, por razones de coste, las estructuras están hechas principalmente de aceros de construcción sensibles a la corrosión. Por lo tanto, las medidas de protección contra la corrosión discutidas en las siguientes secciones juegan un papel más importante.

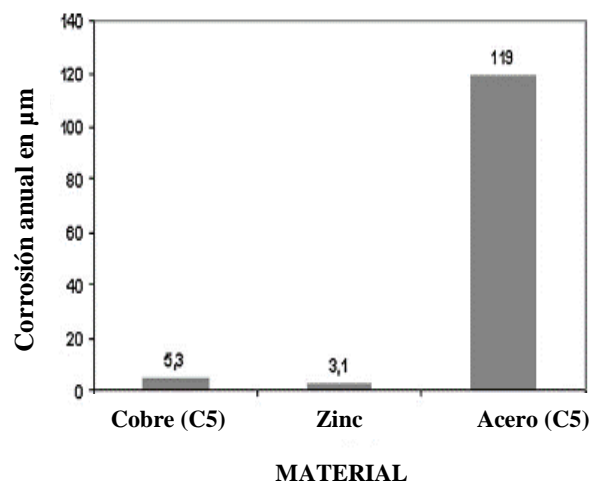


Figura 27 Efectos de la categoría de material y corrosividad en las tasas de corrosión en una plataforma offshore en el Mar del Norte [1]

Entre los metales comúnmente usados en aleaciones de aceros se encuentra: el cromo, el cobre, el níquel y el molibdeno. En otros casos se usan metales como aluminio, cuyo precio es muy razonable.

Materiales menos comunes como el titanio y tantalio se emplean solamente bajo condiciones muy severas. Para condiciones oxidantes se usan aleaciones que contengan cromo. Los elementos cerámicos poseen buena resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas, pero llegan a ser quebradizos, su utilización se restringe a procesos que no incluyan riesgos.



La selección de los materiales que vayamos a usar será factor decisivo en el control de la corrosión [57].

### 3.2.2 TOLERANCIA DE CORROSIÓN

Las tolerancias de corrosión son secciones de material que pueden corroerse sin comprometer la función (seguridad, estabilidad, resistencia) de la construcción. Este enfoque se puede considerar cuando se espera que ocurra corrosión general y, en particular para las estructuras OWs<sup>12</sup>, se recomienda la tolerancia a la corrosión principalmente para la zona de salpicaduras [44]. El valor preciso para una tolerancia a la corrosión depende del material, la carga mecánica esperada, así como de la categoría de corrosión y la zona de corrosión [1].

En general, se recomienda combinar la tolerancia a la corrosión con el recubrimiento, a fin de tener una estructura más confiable, pero también por razones costosas.

### 3.2.3 DISEÑO CONSTRUCTIVO

Existen diversos tipos de diseños constructivos de baja corrosión en estructuras offshore. Las unidades se pueden diseñar de forma que se evite el contacto con medios corrosivos; lo que reduciría el riesgo de corrosión.

El objetivo de diseñar una estructura es el de asegurar que la estructura sea adecuada para su función, que tenga una estabilidad, resistencia y durabilidad adecuada, que se construya con un coste aceptable y que sea estéticamente agradable. El diseño en su conjunto que debe facilitar la preparación de las superficies, el pintado, las inspecciones y el mantenimiento. Las reglas básicas para un diseño constructivo de baja corrosión incluyen las siguientes [75]:

---

<sup>12</sup> Estructuras eólicas offshore, del inglés Offshore Wind structure.



- Buen acceso de las partes y secciones a proteger

Los componentes de acero deberían diseñarse para que sean accesibles a la hora de aplicar, inspeccionar y mantener el sistema de pintura protector.

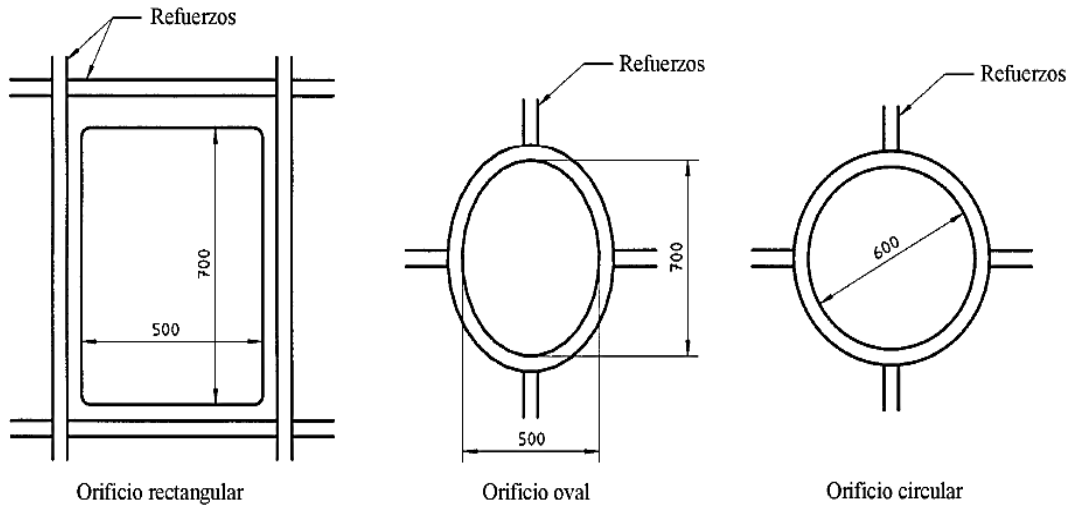


Figura 28 Dimensiones mínimas recomendadas de las aberturas para el acceso a las áreas cerradas (medidas en milímetros)

- Evitar huecos, uniones y conexiones superpuestas

Orificios estrechos, hendiduras ciegas y uniones solapadas son lugares potenciales para ser atacados por la corrosión procedente de la retención de humedad y suciedad incluyendo cualquier abrasivo utilizado durante la preparación de la superficie.

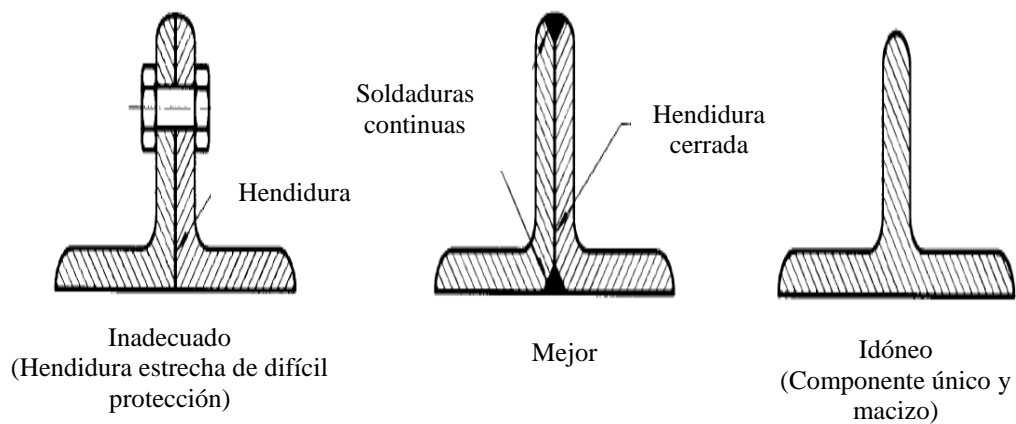


Figura 29 Tratamiento de huecos

- Precaución contra los depósitos y la acumulación de electrolitos

Deberían evitarse configuraciones superficiales en las que el agua pueda quedar retenida, y que puedan de este modo, en presencia de materias extrañas, incrementar el potencial de los agentes corrosivos.

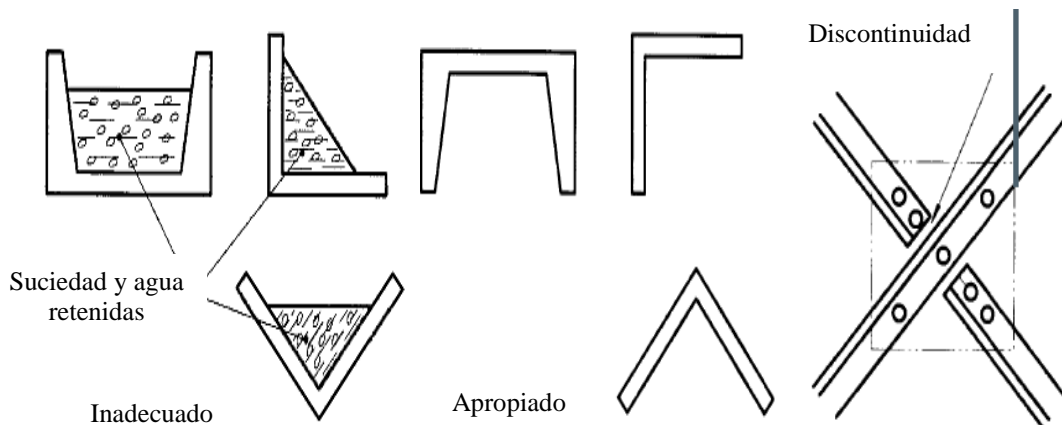


Figura 30 Sistema para evitar la retención de agua y humedad

- Tratamiento de bordes

Los bordes redondeados son deseables, para posibilitar la aplicación de la capa protectora de modo uniforme y para lograr un espesor de película adecuado sobre borde agudos. Las capas protectoras en los bordes agudos son también más susceptibles al deterioro.

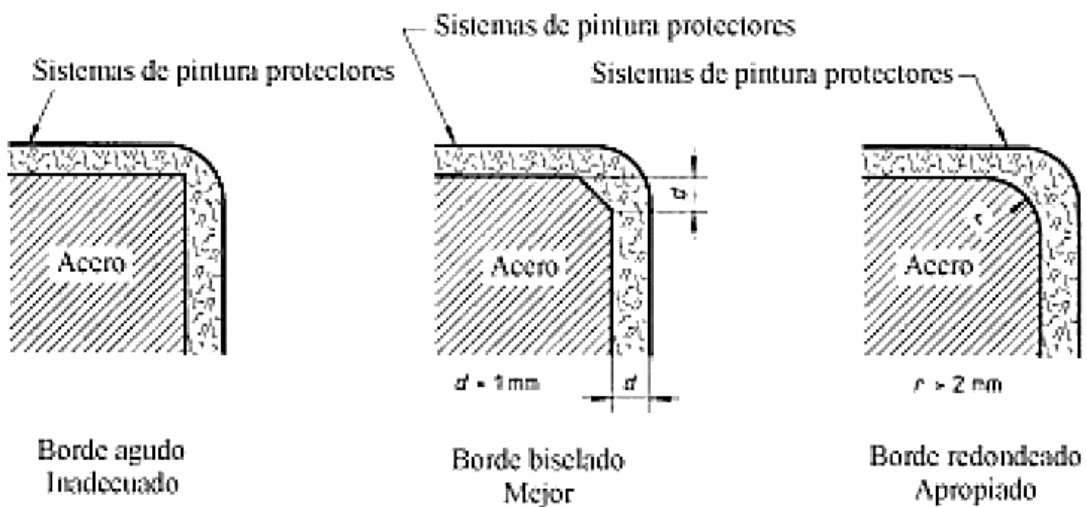


Figura 31 Eliminación de bordes agudos

- Tratamiento de cordones de soldadura e imperfecciones superficiales

Las soldaduras deberían estar libres de imperfecciones (por ejemplo: asperezas, fracturas, orificios, cráteres, proyecciones), que son difíciles de cubrir eficientemente con un sistema de pintura protector.

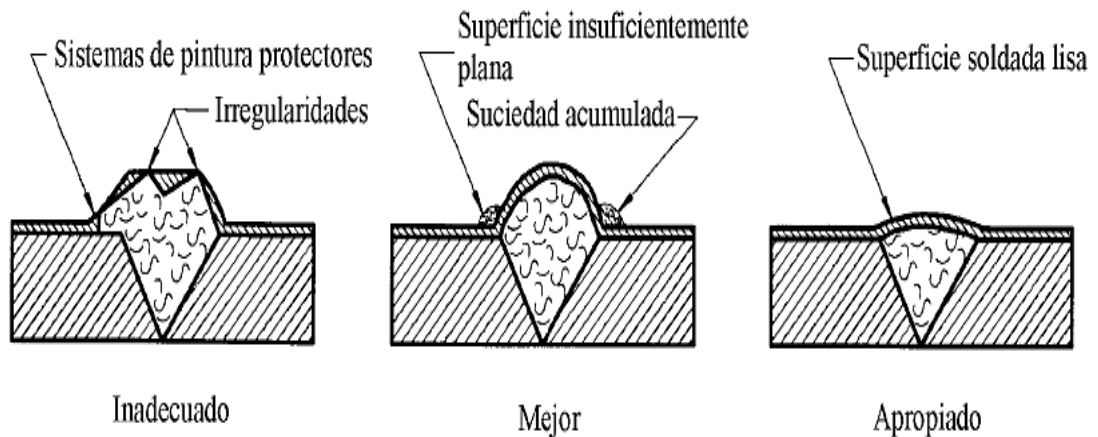


Figura 32 Eliminación de las imperfecciones en la superficie de las soldaduras

- Diseño apropiado de conexiones con pernos

Los pernos, las tuercas y las arandelas deben protegerse contra la corrosión para obtener la misma durabilidad que la protección de la estructura.

- Diseño apropiado de entallas y refuerzos

Cuando se requieran refuerzos, por ejemplo, entre un alma y una pestaña, es esencial, que la intersección entre el refuerzo y los componentes colindantes esté soldada a todo alrededor, para prevenir la formación de huecos. El diseño de refuerzos no debería permitir la retención de depósitos ni agua y debe permitir el acceso para la preparación de la superficie y la aplicación de un sistema de pintura protector.

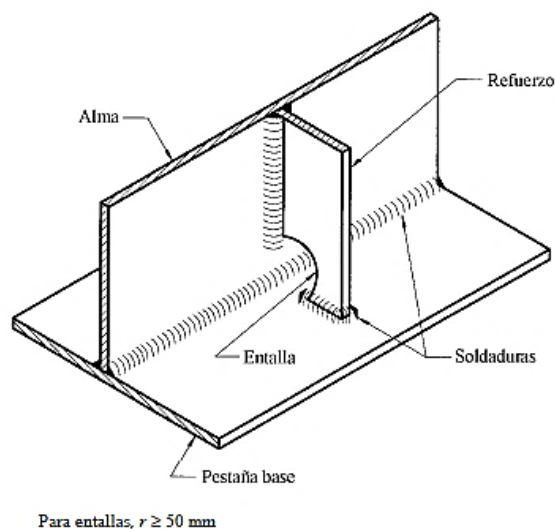


Figura 33 Diseño recomendado de refuerzos para la protección frente a la corrosión

- Prevención de la corrosión galvánica

Debe tenerse cuidado cuando se unan componentes de metal menos noble (es decir, el más electronegativo) con componentes de metal más noble. Además de tener especial cuidado cuando el componente de metal menos noble tenga un área pequeña en comparación con la del metal más noble.

Si el diseño es tal que el par galvánico no puede evitarse, las superficies en contacto deberían estar aisladas eléctricamente, por ejemplo, pintando las superficies de ambos metales, en caso de solo poder pintar un metal se debería pintar, si es posible, el metal más noble de los dos.

- Manipulación, transporte y montaje cuidadoso de las partes a proteger

Durante la etapa de diseño, deberían considerarse la manipulación, el transporte y el montaje de la estructura. Además de prestar atención al sistema de elevación, así como a las precauciones necesarias para prevenir daños en el sistema de pintura protector durante el transporte, la elevación y las operaciones a pie de obra.

Si se trata de la aplicación de revestimientos protectores, se debe prestar especial atención a la preparación del acero, concretamente a los bordes, cordones de soldadura e imperfecciones de la superficie. Los estándares de regulación para la protección contra la corrosión distinguen tres grados de preparación del acero [76]:



- P1 Preparación suave: ninguna solo una mínima preparación es necesaria antes de la aplicación de la pintura.
- P2 Preparación estricta: la mayoría de las imperfecciones se elimina.
- P3 Preparación muy estricta: la superficie no presenta ninguna imperfección significativa visible.

#### 3.2.4 MODIFICACIÓN DEL MEDIOAMBIENTE

Las condiciones ambientales son muy importantes para el control de corrosión. La modificación del medioambiente se puede lograr bien eliminando el oxígeno disuelto o bien mediante la adición en el medio agresivo de ciertas sustancias llamadas inhibidores[77], entre otras.

A continuación, se muestran algunas formas de reducir los efectos del medio sobre la corrosión [78]:

- Bajando la temperatura del medio disminuye la velocidad de corrosión. Sin embargo, una de las excepciones sucede con el agua de mar, que en ebullición es menos corrosiva que cuando está fría. Esto se debe a que la solubilidad del oxígeno disminuye al aumentar la temperatura.
- Disminuyendo la velocidad del fluido, se disminuye la velocidad de corrosión.
- Disminuyendo o eliminando el oxígeno en las disoluciones ya que a mayor concentración de oxígeno mayor velocidad de corrosión en las disoluciones acuosas.
- Disminuyendo la concentración de iones agresivos. En el caso de los aceros inoxidables disminuyendo la concentración del ion  $[Cl^-]$  en una solución salina, implica una disminución de la corrosión.
- 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 son sustancias químicas que, añadidas en concentraciones pequeñas al medio corrosivo, actúan en la interfase metal-solución, disminuyendo sensiblemente la velocidad de corrosión del material metálico, expuesto al mismo [79]. Se emplean cuando otros métodos de alteración del medio corrosivo no se pueden aplicar, o no se pueden variar o ajustar los parámetros de operación, o su variación o ajuste no produzca efecto beneficioso significativo [80]. Los inhibidores corresponden a cuatro categorías principales [7]:

<b>Secuestradores</b>	<p><b>Los secuestradores de oxígeno.</b> Estos agentes no sólo reducen la corrosión oxidante, sino que además controlan el crecimiento de los microbios que requieren oxígeno para prosperar.</p> <p><b>Los secuestradores de ácido sulfhídrico.</b> Reducen el nivel de H<sub>2</sub>S presente en la corriente de flujo.</p>
<b>Agentes reactivos</b>	<p><b>La inhibición reactiva.</b> Opera en el nivel del cátodo para la celda de corrosión. Los cationes del inhibidor reaccionan con los aniones catódicos formando películas insolubles, que se adhieren a la superficie de los metales y evitan que el O<sub>2</sub> entre en contacto con el metal.</p>
<b>Inhibidores fase vapor</b>	<p><b>Los inhibidores en fase vapor.</b> Se utilizan principalmente para combatir la corrosión con CO<sub>2</sub>. Estos inhibidores neutralizan el CO<sub>2</sub> y bloquean la formación de ácido carbónico [H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]. Son transportados a través de la fase vapor en las líneas de gas húmedo.</p>
<b>Formadores de películas</b>	<p><b>Los formadores de películas.</b> Su acción consiste en crear una capa continua entre el metal y los fluidos reactivos, lo que reduce el ataque de los elementos corrosivos. Son los inhibidores de corrosión más utilizados en la industria del petróleo y el gas. Son eficaces para reducir la corrosión por CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, no tienen eficacia contra la corrosión por O<sub>2</sub></p> <p><b>Los inhibidores con sales de amonio cuaternario.</b> son eficaces para combatir la corrosión ácida. Las propiedades biocidas de las sales de amonio cuaternario también pueden prevenir la corrosión MIC.</p>

### 3.2.5 MEDIDAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Las técnicas de protección catódica se usan ampliamente para evitar secuencias de corrosión en estructuras offshore. La protección catódica (CP<sup>13</sup>) se basa en el movimiento de los electrones (corriente) desde un ánodo externo hasta el equipo que se está protegiendo, que actúa como cátodo.

Tanto el cátodo como el ánodo deben encontrarse en el mismo electrolito y estar conectados eléctricamente [7]. La protección catódica puede ser de dos tipos: por ánodos de sacrificio o por corrientes impresas.

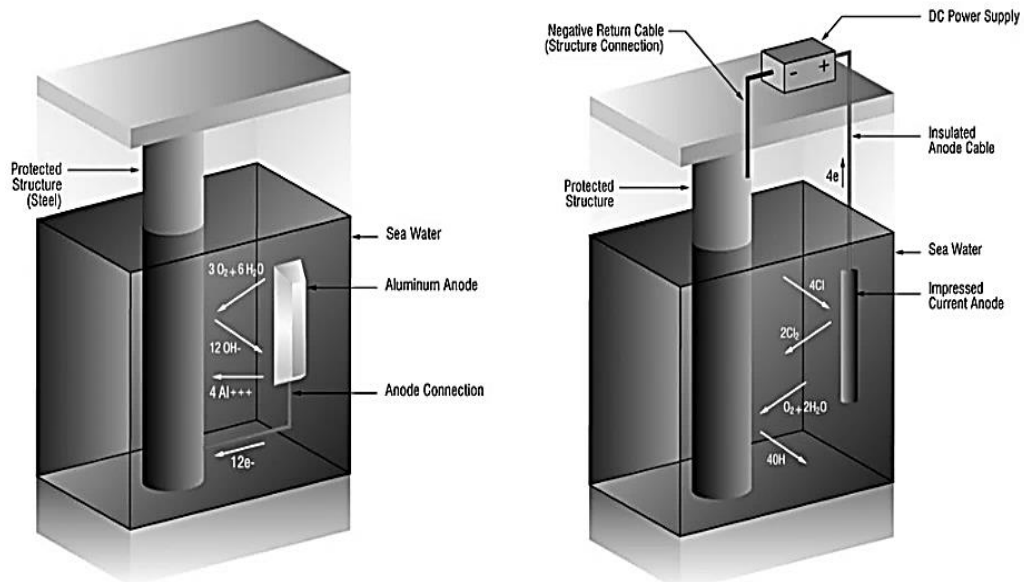


Figura 34 Principios de protección catódica. Izquierda: CP basada en ánodos de sacrificio; Derecha: CP basada en corrientes impresas

([www.stoprust.com](http://www.stoprust.com), Pág Web Deepwater Corrosion Services, Inc.)

El sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio es un método de protección donde los metales con un potencial electroquímico más negativo que la estructura que tenemos que proteger, se colocan en la superficie metálica desempeñando el papel de

<sup>13</sup> Del inglés Cathodic Protection.



ánodo (36). Hoy, en la CP se utilizan elementos de sacrificio fabricados con aluminio, cinc y magnesio para proteger el acero de las estructuras grandes y las tuberías.

Por otro lado, el sistema de protección catódica por corrientes impresas utiliza una fuente de alimentación de corriente continua externa (a la que se asocia el ánodo a la terminal positiva y el cátodo, a la terminal negativa) aumentando el nivel de potencial de la superficie de protección y, por lo tanto, minimizando la corrosión [72]. Se utiliza principalmente en aquellos casos en los que la resistencia electrolítica es alta y en donde se dispone fácilmente de una fuente de corriente constante.

Característica	Ánodos de sacrificio	Corrientes impresas
Mantenimiento	Prácticamente no	si
Coste de instalación	Medio	Alto
Peso del ánodo	Alto	Bajo
Número de ánodos	Grande	Pequeño
Vida	Limitada	Alta
Corriente de salida	Limitada, autorregulable	Controlada (manual o automático)
Distribución de la corriente	Con muchos ánodos-Bien	Menos bueno con pocos ánodos
Daños en la propiedad	Generalmente ningún revestimiento cerca de ánodos	Sí, son necesarias medidas especiales de protección
Costes de funcionamiento	Favorable con objetos pequeños	Favorable con objetos grandes
Vida usual	Sobre 10 años	Superior a 20 años

*Tabla 6 Comparación de los sistemas de protección catódica en estructuras marinas.*  
[81]

La protección catódica constituye sin duda el más importante de todos los métodos empleados para prevenir la corrosión de estructuras metálicas enterradas en el suelo o sumergidas en medios acuosos. Tanto el acero como el cobre, plomo y bronce son algunos de los metales que suelen ser protegidos de la corrosión por este método.

Una gran cantidad de parámetros están involucrados en la elección del sistema de protección contra la corrosión y la provisión de la corriente de protección. En particular, para nuevas ubicaciones de plataformas fijas de producción, el conocimiento de, por ejemplo, la temperatura del agua, el contenido de oxígeno, la conductividad, la velocidad de flujo, la composición química, la actividad biológica y la abrasión por arena es útil.





El área submarina de estructuras marinas también contiene componentes mecanizados de acero inoxidable o metales no ferrosos. Estos componentes estructurales se deben unir en una forma adecuada para que se observen los rangos de potencial de protección [57].

### 3.3 MÉTODOS DE PROTECCIÓN PASIVA CONTRA LA CORROSIÓN

El método más popular de protección pasiva contra la corrosión en la práctica es la aplicación de sistemas de recubrimiento para separar el material a proteger del ambiente corrosivo. No solamente es importante seleccionar una barrera adecuada para cumplir los requisitos en una situación dada, sino que es de igual importancia también especificar la preparación de la superficie. Hay a disposición una amplia variedad de materiales, equipos y procedimientos disponibles [57].

#### 3.3.1 USO DE RECUBRIMIENTOS

La protección por recubrimientos constituye el método de protección contra la corrosión más empleado en la práctica, lo que está determinado por su efectividad (si es aplicado correctamente), economía, y facilidad de aplicación. [80]. Estos se pueden clasificar en:

<b>TIPOS DE RECUBRIMIENTOS</b>	{	Recubrimientos Orgánicos	Pinturas, barnices y lacas.
		Recubrimientos Metálicos	Capa de zinc, aleación de zinc/aluminio, aleación de zinc/silicio o aluminio puro.
		Recubrimientos Inorgánicos	Esmaltes vítreos, revestimientos de vidrio, esmaltes de porcelana, recubrimientos de cementos y recubrimientos obtenidos por transformaciones químicas.

Recubrimientos relativamente finos de materiales metálicos e inorgánicos pueden proporcionar una barrera satisfactoria entre el metal y su entorno. Los recubrimientos metálicos se pueden aplicar por electrodeposición, pulverización a la llama, revestimiento, inmersión en caliente o deposición de vapor. Sin embargo, los compuestos inorgánicos se aplican o se forman por pulverización, difusión o conversión química.



Los recubrimientos orgánicos implican una barrera relativamente delgada entre el material del sustrato y el medio ambiente. Además de la aplicación adecuada, los tres factores principales a considerar para los recubrimientos orgánicos se enumeran en orden de importancia como la preparación de la superficie, el tipo de imprimación o capa de imprimación y la selección de la capa o capas de acabado [74].

Los materiales cerámicos son materiales atractivos debido a sus características como alta resistencia química, resistencia al desgaste, resistencia térmica y resistencia a la corrosión. Los materiales cerámicos a granel se pueden encontrar en materiales refractarios, baldosas de cerámica, cerámica avanzada como cerámica cocida a baja temperatura, pero también los recubrimientos cerámicos tienen este rendimiento único. Los revestimientos cerámicos y esmaltes están formados por una mezcla de vidrio fundido y diversos aditivos. Pueden modificarse mediante la adición de materiales en bruto como cuarzo, óxido de titanio, silicato de zirconio o pigmentos cerámicos para ajustarse al tipo de metal y al producto de aplicación final. Hasta ahora, el uso de esmalte cerámico para proteger estructuras metálicas ha estado limitado por muchos factores [82].

### 3.3.1.1 RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS

Son en su mayoría de tipo polimérico como plásticos y elastómeros, aunque también se incluyen otros no poliméricos como grasas, aceites, ceras y preservas para la protección temporal. En la realidad muchas pinturas presentan en su composición algunos componentes de naturaleza inorgánica pero los orgánicos constituyen el elemento fundamental en casi todos los casos. Son las pinturas el tipo de recubrimiento más importante y el tipo de protección contra la corrosión de mayor aplicación [80].

A continuación, se describe el sistema de aplicación de recubrimientos utilizado en la industria marina [57]:



- Acondicionamiento del área

Se entiende por acondicionamiento del área el preparar tanto el lugar de trabajo con todas las herramientas necesarias para ejecutar la actividad, incluyendo equipo de seguridad, como la protección del inmobiliario, estructuras, equipos y accesorios.

- Reparación de la superficie

La reparación de una superficie consiste en realizar las actividades necesarias para obtener una uniformidad superficial de lo que se requiera recubrir. Básicamente es soldar y repara huecos y grietas. Es necesario para el buen desempeño y para ayudar a prolongar la vida de los recubrimientos, que la superficie se encuentre uniforme, que no tenga bordes ni puntos críticos que puedan en un futuro ocasionar que el sistema de protección se dañe, abriendo la puerta a la corrosión. Para esto se tiene que asegurar que la superficie se encuentre libre de huecos, grietas y bordes de soldadura.

- Preparación de la superficie

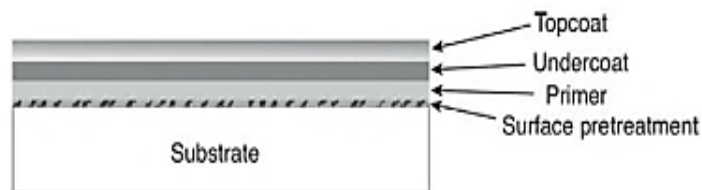
La preparación de la superficie consiste en eliminar cualquier contaminante del área a aplicar con la finalidad de obtener una adherencia excelente. La durabilidad de los recubrimientos está directamente relacionada con el grado de preparación de la superficie, esto significa que la superficie debe estar libre de polvo, grasa, óxido, moho, recubrimientos viejos y/o cualquier otro contaminante.

- Aplicación de la capa imprimación

Es la capa de recubrimiento que está en contacto con la superficie, su función principal es asegurar la adherencia o permanencia de la capa posterior de recubrimiento, así como tapar la porosidad en materiales y en mayor o menor medida proteger al sustrato del medio ambiente.

- Aplicación de capa de acabado o superior

Se entiende por acabado a la última capa que se aplica de recubrimiento sobre la superficie. Esta es la que se encuentra en contacto directo con el medio ambiente y que brinda la protección y durabilidad.



*Figura 35 Disposición típica de un sistema de recubrimiento con capas múltiples*  
[83]

### 3.3.1.2 RECUBRIMIENTOS METÁLICOS

Son dos los principales grupos de recubrimientos los que se pueden aplicar: recubrimientos de zinc por inmersión en caliente y recubrimientos por pulverización térmica.

#### 3.3.1.2.1 Recubrimientos de Zinc por inmersión en caliente

La estructura de acero se sumerge en un baño de zinc fundido. Dependiendo del tiempo de inmersión, la capa de zinc crecerá hasta un cierto espesor. El espesor del recubrimiento galvanizado se ve influenciado por diversos factores, incluidos el tamaño y el grosor de la pieza de trabajo y la preparación de la superficie del acero. Los aceros y aceros gruesos que se han limpiado con chorro abrasivo tienden a producir recubrimientos relativamente gruesos. Además, la composición del acero tiene una influencia sobre el recubrimiento producido.

La capa galvanizada se compone de varias subcapas con un contenido de hierro y una dureza crecientes hacia el sustrato. Esta propiedad es importante para la resistencia a la abrasión en comparación con otros revestimientos. Algunos aspectos del diseño de los componentes estructurales del acero deben tener en cuenta el proceso de galvanización, particularmente en lo que respecta a la facilidad de llenado, ventilación y drenaje y la probabilidad de distorsión.

Se puede encontrar más información sobre el diseño de los artículos a galvanizar por inmersión en caliente en la norma UNE-EN ISO 14713:2011 [84].

El beneficio del zinc es su naturaleza anódica hacia el hierro que proporciona la denominada protección sacrificial o catódica. En la mayoría de los casos, las estructuras de acero galvanizado están pintadas (sistemas dúplex) para aumentar su resistencia de forma sinérgica.

El recubrimiento por inmersión en caliente no solo se realiza con zinc puro. Las capas de inmersión en caliente que contienen aluminio y magnesio también se aplican. Esto proporciona ventajas tanto en términos de propiedades mecánicas como de resistencia a la corrosión (ver Figura 36).



*Figura 36 Sección transversal de un cable de acero con Zinc, Bezinal® (Zn, 5% Al), y Bezinal 3000® (Zn, 10% Al, <1% Mg) [44]*

El alambre de acero galvanizado se utiliza en muchas aplicaciones marinas y en alta mar, incluidas cuerdas de pesca, cuerdas de elevación mar adentro, cables y cuerdas para estructuras suspendidas y cables ROV<sup>14</sup>. Incluso cuando los cables están enfundados en polímero, a menudo se galvanizan para proporcionar una capa adicional de protección en caso de que se dañe el revestimiento del polímero [44].

---

<sup>14</sup> Vehículo operado remotamente del inglés, Remote Operated Vehicle. es un robot submarino no tripulado y conectado a una unidad de control en la superficie por medio de un cable umbilical.



### 3.3.1.2.2 Recubrimientos por pulverización térmica

La técnica más aplicada para la aplicación de recubrimientos metálicos en estructuras de acero en el sector offshore es la pulverización térmica [85]. Es particularmente adecuado para proteger artículos que son demasiado grandes para sumergirlos en un baño de galvanización y para repararlos [86].

En el caso de metales rociados, la técnica se denomina metalización. Esta técnica, que se encuentra descrita en la norma UNE-EN ISO 2063:2005 [87], consiste en rociar partículas de metal que se calientan a temperaturas cercanas o superiores al punto de fusión, sobre una superficie. Los materiales adecuados para la pulverización térmica incluyen metales puros, aleaciones, materiales cerámicos, incluso plásticos y composites (resinas compuestas).

Los materiales se pulverizan en forma de polvo o alambre, se calientan a un estado fundido o semifundido y se proyectan hacia sustratos en forma de partículas de tamaño micrométrico. En general, la calidad del recubrimiento aumenta al aumentar la velocidad de las partículas. Los métodos de pulverización térmica más comunes son la proyección por arco eléctrico o plasma. Aunque también podemos encontrar otros métodos [44]:

- Pulverización por pistola de detonación
- Plasma de arco transferido (PTA<sup>15</sup>)
- Pulverización con llama
- Pulverización combustible-oxígeno de alta velocidad (HVOF<sup>16</sup>)
- Pulverización térmica de alta velocidad gas-aire (HVAF<sup>17</sup>)
- Pulverización en frío

---

<sup>15</sup> Del inglés, Plasma Transferred Arc.

<sup>16</sup> Del inglés, High Velocity Oxy-Fuel

<sup>17</sup> Del inglés, High Velocity Air Fuel



### 3.3.1.3 RECUBRIMIENTOS INORGÁNICOS

Se clasifican en dos grandes grupos [80]: los cerámicos o silíceos y los de conversión química.

Los primeros se corresponden bien con los materiales cerámicos de construcción como son las porcelanas, cerámicas blancas en general (químicas), las rojas, los esmaltes vítreos, los cementos y masillas inorgánicas antiácido o resistentes a los agentes químicos. Estos recubrimientos y revestimientos son por lo general de muy elevada inercia química ya que resisten casi todos los reactivos químicos conocidos salvo excepciones. Su gran enemigo es el ácido fluorhídrico y derivados ya que disuelve el principal constituyente de estos materiales, el óxido de silicio [SiO<sub>2</sub>].

Los recubrimientos por conversión química constituyen un grupo especial de recubrimientos inorgánicos que no se “aplican” como los anteriores, sino que se forman o generan por tratamiento químico o electroquímico del propio metal a recubrir con soluciones apropiadas.

### 3.3.1.4 ESTADO ACTUAL DE LOS RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIÓN

Los recubrimientos anticorrosión tratan de proteger al material base del ambiente corrosivo al que está expuesto. La principal problemática de los recubrimientos marinos anticorrosión es la adhesión de microorganismos que degradan el recubrimiento y llegan a producir corrosión. Por lo tanto, los recubrimientos están diseñados para combatir la adhesión microbiana mediante biocidas y otros compuestos que evitan dicha adhesión. Estos recubrimientos se denominan recubrimientos antifouling (AF<sup>18</sup>). A continuación, se detallan los principales recubrimientos utilizados actualmente en la industria.

---

<sup>18</sup> Antiincrustante, del inglés Antifouling.



#### 3.3.1.4.1 Recubrimientos antifouling conductivos

El revestimiento conductivo AF usa la conductividad del sistema, electroliza el agua de mar, produce hipoclorito y luego previene la contaminación. Un método es cubrir la superficie a proteger con una capa de polímero conductor, luego la superficie es el cátodo y el recubrimiento conductivo es el ánodo. A través de la microcorriente, se origina una capa de  $\text{ClO}_4$  sobre el recubrimiento para así lograr el efecto antifouling. Otro método es el uso de materiales poliméricos conductores dopados para recubrir la superficie directamente sin corriente eléctrica.

Wang et al. produjeron un revestimiento conductor de polianilina. El recubrimiento tenía una vulnerabilidad especial y el rendimiento del AF se pudo mantener de 6 a 9 meses [88]. Esta técnica es un tipo de tecnología AF amigable con el medio ambiente, pero se ve afectada fácilmente por factores ambientales, por lo que no se puede promover su uso.

#### 3.3.1.4.2 Recubrimientos antifouling biomarinos

Los organismos marinos tienen la capacidad natural de AF como algas, mariscos, delfines, ballenas y otros. Viven en el ambiente marino todo el tiempo, pero pocos organismos marinos se adhieren a él. A partir del estudio, los investigadores encontraron que los corales y otros organismos marinos pueden producir propiedades de AF por sí mismos, por lo que los humanos podrían usar el extracto de dicho material biológico para hacer el recubrimiento de AF.

Qian et al. estudiaron importantes compuestos de AF descubiertos de una gran variedad de organismos desde 2004 hasta mediados de 2009. Debatieron las tendencias en el descubrimiento de compuestos de AF y resumieron la actualización de científicos e ingenieros sobre los desafíos actuales que enfrenta la investigación de AF (natural). Aunque ya hay algunos logros en este tipo de recubrimiento de AF, los productos son de alto costo y efecto a corto plazo con efecto de AF no ideal.





#### 3.3.1.4.3 Recubrimientos antifouling de silicato

El recubrimiento de silicato es un tipo de agente AF compuesto por silicatos alcalinos solubles, que pueden formar una fuerte región alcalina entre la superficie y las áreas marinas en contacto. El pH del hábitat adecuado para los organismos incrustantes marinos es de 7,5-8,0 (agua de mar ligeramente alcalina), siendo no apto para estos mismos en ambientes alcalinos o ácidos. El silicato podría convertirse en agente de AF como zeolitas (cristalización de silicato de alúmina con agua) y su mecanismo de AF podría ser el intercambio iónico o el efecto de tamiz molecular.

Durante el proceso, el intercambio de iones ocurre entre el silicato y el hidrón [H<sup>+</sup>] que proviene del agua de mar. Luego se libera el agente AF y se logra la función AF. De esta manera, no solo se trata de una característica barata, eficiente, sin riesgos ambientales, sino que tampoco podría verse afectada por el cambio climático y el medio ambiente marino.

#### 3.3.1.4.4 Agente antifouling de capsaicina

La capsaicina es la sustancia principal del sabor picante en el chile. Además, tiene la función antibacteriana y podría prevenir el crecimiento de organismos marinos. El recubrimiento AF con capsaicina logra el objetivo de AF mediante el efecto de conducción. Los componentes efectivos del mismo podrían liberarse lentamente a través de la tecnología de control de liberación y lograr un efecto AF seguro a largo plazo.

#### 3.3.1.4.5 Revestimientos antifouling de isotiazolinona

El derivado de isotiazolinona es un término general para una clase de derivados que se usan ampliamente como agente AF amigable con el medio ambiente. El mecanismo AF de este tipo de compuestos es formar enlaces de hidrógeno, a través del efecto alcalino, entre la parte activa de la isotiazolinona y de los organismos. Luego destruye la estructura del ADN y conduce a la muerte celular debido a la pérdida de la capacidad de replicación.



Puede degradarse rápidamente en agua de mar, y no forma acumulación biológica en el medio marino y tampoco influye en el medio ambiente ni en las consecuencias para la salud humana. Pero la solubilidad en agua de este tipo de compuestos es pobre y no es fácil preparar. Por lo tanto, es necesario trabajar más para mejorar el rendimiento, que es adecuado para todo tipo de condiciones.

#### 3.3.1.4.6 Nano recubrimientos Antiincrustantes

La introducción de nanopartículas podría mejorar la reología, la adherencia del recubrimiento, la dureza, la suavidad y las propiedades antienviejimiento, por lo que es la única dirección importante del desarrollo como agente AF. La tecnología de microencapsulación es una nanotecnología AF eficaz, que utiliza un tipo de material de resina soluble en agua para convertir los nanopulvos del agente en partículas y luego formularlas en el recubrimiento. En aplicaciones prácticas, las microcápsulas podrían disolverse gradualmente con agua de mar, y el agente AF se liberaría lenta y eficazmente para lograr un efecto AF estable. El agente de AF microencapsulado tiene una eficacia AF más duradera, un mejor efecto e incluso podría reducir el impacto ambiental.



#### 4. MÉTODOS DE ESTUDIO Y ENSAYO DE LA CORROSIÓN

La detección de cambios en el comportamiento dinámico de las estructuras es un tema importante en la evaluación de la seguridad estructural. El desarrollo de métodos de detección asume una mayor importancia en el caso de las plataformas offshore porque los problemas inherentes se ven agravados por el entorno hostil. El campo de medición, control y prevención de la corrosión abarca un espectro muy amplio de actividades técnicas. La medición de la corrosión emplea una variedad de técnicas para determinar cuán corrosivo es el medio ambiente y con qué frecuencia se experimenta la pérdida de metal. La medición de la corrosión es el método cuantitativo mediante el cual se puede evaluar la efectividad de las técnicas de control y prevención de la corrosión y proporciona los comentarios para optimizar los métodos de prevención y control de la corrosión [89].

Existe una amplia variedad de técnicas de medida de la corrosión:

<b>Pruebas no destructivas</b>	{	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ultrasonido</li> <li>Radiografía</li> <li>Termografía</li> <li>Corriente Eddy/Flujo magnético</li> <li>Cochinos inteligentes</li> </ul>
<b>Análisis químico</b>	{	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medición del pH</li> <li>Gas disuelto [O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S]</li> <li>Conteo de Iones Metálicos [Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>]</li> <li>Análisis Microbiológico</li> </ul>
<b>Fluido Electroquímico</b>	{	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medición de potencial</li> <li>Medición potencio-estática</li> <li>Medición potencio-dinámica</li> <li>Impedancia A.C.</li> </ul>
<b>Monitoreo de Corrosión</b>	{	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cupones de pérdida de peso</li> <li>Resistencia eléctrica</li> <li>Polarización lineal</li> <li>Penetración de hidrógeno</li> <li>Corriente galvánica</li> </ul>

Algunas técnicas proporcionan una medición directa de la pérdida de metal o de la tasa de corrosión, mientras que otras son indirectas, pues son utilizadas para inferir el ambiente corrosivo que pueda existir.



La caracterización del comportamiento de los materiales en diversos medios agresivos es de una importancia fundamental en el desarrollo, selección y elección de materiales para la fabricación de equipos y componentes. Los ensayos de corrosión se dividen en dos grandes grupos: ensayos convencionales o de inmersión en laboratorio y ensayos electroquímicos.

#### **4.1 ENSAYOS CONVENCIONALES DE CORROSIÓN**

Los ensayos convencionales consisten básicamente en someter a la pieza o material que vamos a ensayar a corrosión, a un medio agresivo en el cual se desarrolla el mismo mecanismo de corrosión que en el medio en el cual la pieza o material va a trabajar normalmente. Los ensayos de corrosión generalmente no pueden cubrir todas las aplicaciones y condiciones prácticas de utilización, pero cuando están bien diseñados pueden llevar a una gran comprensión del comportamiento de los materiales frente a diferentes medios agresivos. Además, deben imitar en lo posible las condiciones reales de trabajo, acelerando los procesos de corrosión para evitar tiempos largos de ensayo, sin variar el carácter de la corrosión que podría invalidar los resultados obtenidos.

##### *4.1.1 ENSAYOS DE CONTROL DE SERVICIO*

Se utilizan fundamentalmente para diseño y conocimiento de operaciones de procesos industriales. Se realizan con probetas testigo situadas en las plantas industriales. Estos ensayos incluyen cualquier técnica de evaluación del avance de la corrosión. Como métodos de control pueden utilizarse técnicas como: resistencia eléctrica, medición de espesores, resistencia de polarización, medición de potenciales, etc., debiendo seleccionarse una de estas técnicas en función de parámetros como tipo de corrosión previsto, tiempo de respuesta, accesibilidad de los testigos, perjuicios a la planta o al proceso, costes, etc.



#### 4.1.2 ENSAYOS DE SIMULACIÓN DE SERVICIO

Se utilizan fundamentalmente para predecir el comportamiento en servicio frente a la corrosión, siendo los más indicados en este aspecto, ya que son representativos de muchas situaciones de servicio.

Se clasifican en función del medio al que son expuestas las probetas: en atmósfera, agua y en suelo.

Atmósfera	La corrosión ocurre de forma natural y depende de los materiales y del tipo de atmósfera.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rural</li> <li>Urbana</li> <li>Industrial</li> <li>Marina</li> </ul>
Agua	Muy utilizado en la corrosión cavernosa. Las probetas se introducen en tanques o en líneas de flujo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inmersión total (estática o dinámica)</li> <li>Inmersión parcial</li> <li>Inmersión intermitente</li> </ul>
Suelos	La corrosión está determinada por el material y las características del suelo considerado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Naturales o no distorsionados</li> <li>Distorsionados</li> </ul> <p style="margin-left: 20px;">Son los menos agresivos, dependiendo de la presencia de oxígeno Su agresividad es función de su resistividad, pH y composición</p>

##### 4.1.2.1 ENSAYOS DE LABORATORIO

Son ensayos acelerados que utilizan peores condiciones o más críticas que las de servicio, para lo que se utilizan medios que permitan acelerar los procesos de corrosión sin cambiar los mecanismos de esta (Figura 37). En la mayoría de los casos son ensayos normalizados. De estos ensayos son fundamentalmente los ensayos de inmersión y los de pulverización o nebulización.

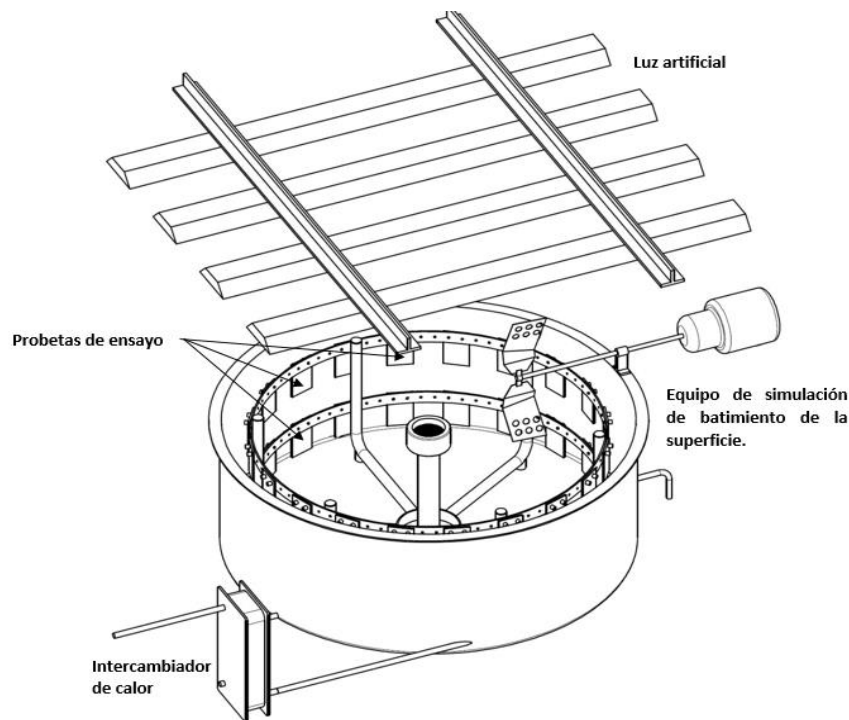


Figura 37 Reactor para la realización de ensayos de recubrimientos/materiales en condiciones controladas (Patente ES2601930B1). Universidad de Cantabria.

#### 4.1.2.1.1 Ensayos de inmersión

Estos ensayos a su vez son clasificados en función del tipo de inmersión: total, parcial o intermitente.

- Ensayos de inmersión total

Se realiza sumergiendo totalmente las muestras en el medio corrosivo. La principal dificultad experimental consiste en que al tener que haber un contacto de la probeta con el recipiente o con el medio de sustentación, pueden provocarse zonas de corrosión localizada.

- Ensayos de inmersión parcial

En este tipo de ensayos las probetas se sumergen parcialmente en el medio corrosivo, lo cual resulta interesante porque en el servicio se dan más frecuentemente estas circunstancias. Debe tenerse en cuenta si existe acentuación del ataque en la “Línea de agua”, pues en esos casos debe prestarse especial atención el mantener constante el



nivel del medio corrosivo de forma que el ataque se produzca en la misma zona de la probeta y se acelere el proceso de corrosión.

- Ensayos de inmersión intermitente

En estos se realizan inmersiones y emersiones alternadas dentro de un líquido corrosivo lo que puede simular movimientos de líquidos en instalaciones químicas, entre otras, permitiendo un ensayo relativamente rápido del efecto de las soluciones acuosas.

#### 4.1.2.1.2 Ensayos de pulverización

En este tipo ensayos las muestras son expuestas a la pulverización de un determinado medio corrosivo. Son utilizados para determinar la debilidad de recubrimientos protectores y como ensayos de control de calidad. La exposición puede ser continua o intermitente. La solución más empleada es la salina con diferentes concentraciones de cloruro de sodio [NaCl], para simular atmósferas marinas.

En las cámaras de pulverización, el rociado de la solución llega a la muestra por gravedad por lo que, debe prestarse especial atención a la colocación de las probetas dentro de la cámara y a la forma de la misma. Estos ensayos son relativamente baratos y fáciles de realizar, pero, como en la mayoría de los ensayos acelerados, es conveniente confirmar los resultados con ensayos de campo.

#### 4.1.2.2 ENSAYOS EN AMBIENTES MARINOS REALES

Estos ensayos someten a los materiales a un entorno marino natural, cuyo objetivo principal es evaluar, estudiar y analizar los efectos del entorno marino real sobre los materiales y/o recubrimientos.

Estos laboratorios están diseñados para probar materiales o compuestos bajo condiciones reales de exposición en cualquiera de las tres diferentes zonas de exposición (sumergida, mareas y salpicaduras) según normativa ASTM G-52 [90] o ISO 11306:1998 [91].



*Figura 38 Laboratorio Marino Biofouling para la realización de ensayos en ambiente marino. Universidad de Cantabria.*

Estos ensayos analizan la influencia del entorno marino sobre los materiales en condiciones estáticas, es decir, no se tiene en cuenta el efecto de la corrosión por erosión que se producen en los materiales al ser sometidos a velocidades de flujo superiores a 1 m/s [92].

Los ensayos en ambiente marino real deben de tener una duración de un año para minimizar los efectos de las variables medioambientales relacionadas con los cambios de estación y/o geográficos.

## **4.2 ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS DE CORROSIÓN**

Los ensayos electroquímicos de corrosión basan su existencia en que, en la corrosión electroquímica se produce transferencia de cargas, lo cual permite el estudio y la cuantificación de la corrosión a través de la medida de variables eléctricas. Para ello se han propuesto diversos métodos electroquímicos, la mayoría basados en la imposición de pequeñas excitaciones eléctricas desde el exterior, analizando la respuesta del metal o aleación objeto del estudio.





Las técnicas de corriente continua se utilizan para determinar la velocidad instantánea de corrosión. Existen dos métodos: método de intersección o de Tafel y método de resistencia de polarización.

La variación de potencial por el paso de una densidad de corriente ( $i$ ) se conoce como polarización. Una curva de polarización es la representación del potencial ( $E$ ) frente al logaritmo de la densidad de corriente ( $\log(i)$ ). La diferencia de potencial de polarización entre el ánodo y el cátodo es la fuerza electromotriz (FEM) de la pila de corrosión. La corriente en el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), se define como corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) del sistema [93].

En el método de intersección, se traza una curva de polarización desde -250 mV con respecto al potencial de corrosión hasta +250 mV por encima de este potencial. La intensidad de corrosión se determina extrapolando las líneas rectas que aparecen en representación semilogarítmica, hasta las proximidades de polarización cero (potencial de corrosión).

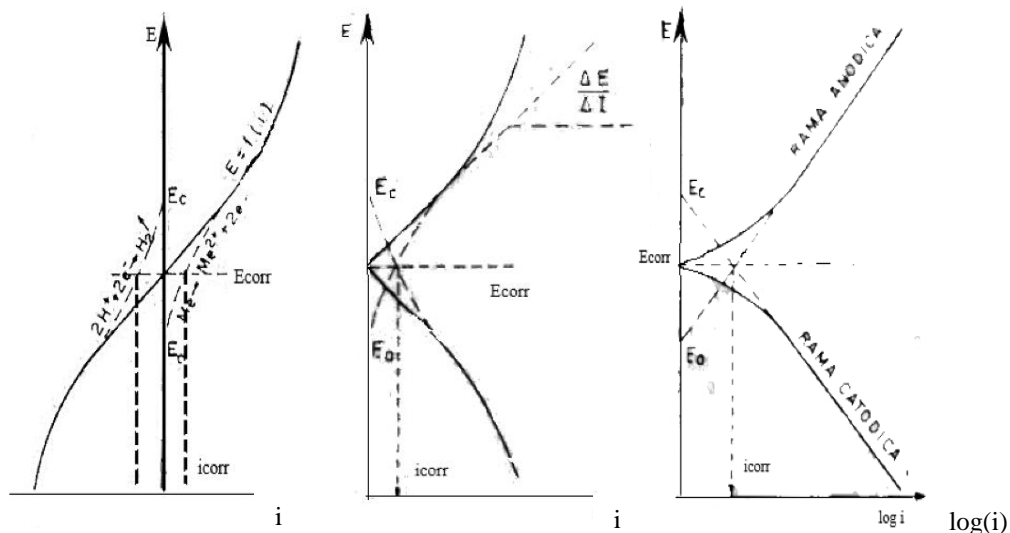


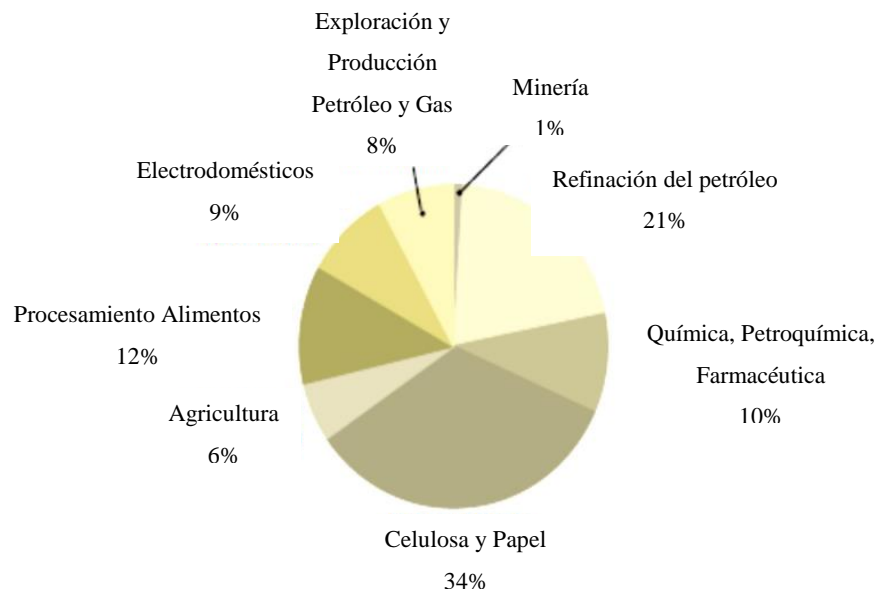
Figura 39 Curvas de Tafel para la determinación de la intensidad de corrosión [28]

El método de resistencia de polarización se basa en el estudio del comportamiento frente a la polarización, cuando ésta es pequeña. En este caso, la curva de polarización obtenida es una recta, cuya pendiente es la resistencia de polarización, y la intensidad de corrosión se obtiene a través de la ecuación de Stern y Geary:



## 5. REPERCUSIONES ECONÓMICAS

Para satisfacer las necesidades básicas de los 7450 millones de personas en este mundo, que incluyen nutrición adecuada, agua potable, buena salud, vivienda segura, energía confiable, comunicación efectiva y movilidad, se deben lograr muchos cambios tecnológicos con dimensiones globales. Si bien este concepto es ampliamente apreciado como tal, a menudo hay una conciencia limitada de cuán crítico es resolver los problemas de corrosión y cuáles son las implicaciones reales para la sociedad [94]. La corrosión es uno de los problemas más antiguos que han desafiado al mundo industrial.



*Figura 40 Un desglose del coste anual de la corrosión en el sector de producción y fabricación de la economía de los EE. UU [30]*

La corrosión produce anualmente en todo el mundo pérdidas económicas muy elevadas, estas pérdidas pueden clasificarse en pérdidas directas y pérdidas indirectas [28].

Las pérdidas directas corresponden a los gastos de sustitución de estructuras corroídas o el mantenimiento de las mismas por medio de pinturas, recubrimientos metálicos, protección catódica, etc. Dentro de este grupo puede incluirse también la utilización de aleaciones resistentes a la corrosión de precio más elevado, cuando por necesidades



meramente de resistencia mecánica sería posible la utilización de materiales más económicos.

Las pérdidas indirectas son más difíciles de establecer, pero son más importantes debido a que sin lugar a dudas causan pérdidas mucho mayores, algunos ejemplos son [95]:

- Pérdidas por parada de instalaciones, para una planta este hecho causa indudablemente grandes pérdidas, todo el tiempo que la maquinaria está parada cuando debiera estar funcionando es una pérdida económica.
- Pérdidas de producto, cualquiera que éste sea, agua dulce, salada, vapor, gas, petróleo, con sus consiguientes riesgos de accidentes debido a conductos o maquinarias en mal estado debido a la corrosión.
- Pérdidas por contaminación del producto. Contaminación de alimentos por cationes metálicos procedentes de envases metálicos.
- Pérdidas de eficiencia de los equipos. La formación de productos de la corrosión en el interior de tuberías, o en el interior de calderas, reducen los coeficientes de transmisión del calor, como también pueden producir obstrucciones en tuberías lo que conlleva tener que aumentar la capacidad de bombeo de la instalación.
- Pérdidas por sobredimensionado, se hace teniendo en cuenta el espesor de pared que se prevé que vamos a perder por la corrosión, es una práctica habitual sobredimensionar equipos teniendo en cuenta su vida de uso.
- Pérdidas por accidentes derivados de la corrosión, son las explosiones o accidentes derivados de problemas de corrosión que pueden dar lugar a lesiones o fallecimientos de personas.

El impacto global de la corrosión trasciende todos los aspectos del espacio económico industrial que emplea el uso de una forma de componente metálico u otro. En una nota general y para una perspectiva más clara, el costo anual de la corrosión se ha puesto globalmente en un 3-4% del Producto Interno Bruto (PIB) total de las naciones industrializadas (alrededor de 1.8 billones de dólares) [30]. La apreciación del papel de la investigación y el desarrollo (I+D) en áreas tales como el desarrollo y selección



de materiales, sistemas innovadores de protección de superficies y monitoreo basado en condiciones utilizando sensores y métodos remotos de recopilación de datos podría ser una inversión digna. La armonización óptima de estas estrategias podría ayudar significativamente a reducir el costo de la corrosión hasta en un 25-30% del costo anual total de la corrosión solo en la economía de EE. UU según Schmitt et al [94] y Gerhardus et al [96].



## **6. FUTUROS DESARROLLOS ANTICORROSIÓN**

La corrosión continúa siendo un gran problema en las estructuras marinas, y un factor importante para tener en cuenta en los análisis económicos de todas las instalaciones offshore.

Un buque, diseñado para desempeñar su vida útil en el mar, está sentenciado a la corrosión, por ello, se recurre a una serie de tratamientos y pinturas sobre la obra viva para mantener así, unas condiciones óptimas de trabajo y seguridad de la estructura durante el periodo más largo de tiempo posible. Los buques actuales utilizan métodos antifouling basados en compuestos a partir de polímeros llamados hidrogeles y libres de biocidas. Esta tecnología está basada en la aplicación de un recubrimiento que proporciona una superficie lisa, resbaladiza, con un bajo coeficiente de fricción en el cual los organismos incrustantes tienen dificultades para adherirse. Gracias a este sistema, un buque se libra de las incrustaciones con facilidad al alcanzar una velocidad crítica aproximada entre 10 y 20 nudos. Estas pinturas para estructuras sometidas a esfuerzos dinámicos presentan un gran inconveniente; la vulnerabilidad del recubrimiento a ser dañado por abrasión durante la navegación y la limpieza. La debilidad estructural de estos revestimientos requiere una mayor frecuencia de aplicación, que puede llegar a ser en algunos casos de dos años.

Por el contrario, las estructuras offshore, que también desempeñan su vida útil en el mar, son estructuras estáticas o tienen una gran dificultad para trasladarse a dique seco. De esta manera, la adhesión de biofouling y la posterior generación de corrosión se producirá de manera completamente diferente que las estructuras dinámicas, como los buques. Por lo tanto, las actuales pinturas de aplicación a los buques no pueden ser utilizadas en estructuras flotantes o fijas. Debido a lo cual, en la actualidad, el sector eólico offshore se enfrenta a un desafío significativo en el campo de la protección contra la corrosión. Las pinturas actuales de protección contra la corrosión son orgánicas con una duración de no más de 15 años [97], y a partir de entonces, las pinturas empiezan a degradarse y el fenómeno de corrosión comienza a atacar al material base. Las ingenierías de estructuras offshore tienen en cuenta esta degradación

y sobredimensionan los espesores de las estructuras para cubrir los 20 años de diseño de estas estructuras sin aplicación de recubrimientos de reparación.

El desarrollo de los nuevos recubrimientos intenta resolver el problema del tiempo de duración y protección contra la corrosión. Los nuevos recubrimientos tienen que proteger en las diversas zonas de la estructura offshore, en la cual se producen diferentes tasas de ataque producidas por la corrosión. Hoy todavía hay debate sobre los sistemas de recubrimiento más óptimos para las estructuras offshore [98], [99].

Las tasas de corrosión son más altas en la zona de salpicaduras como se puede observar en la figura 41 por consiguiente, esta zona requiere especial atención para la protección frente a la corrosión.



*Figura 41 Corrosión en la zona de salpicaduras*  
[100]

Las estructuras offshore fijadas al fondo marino asumen diferentes consideraciones en la protección contra la corrosión que las estructuras flotantes, debido a que estas últimas tienen mayor superficie expuesta a condiciones más agresivas. La corrosión en el medio marino varía en función de la profundidad a la que está sumergida la estructura. El entorno de aguas profundas tiene un ambiente muy diferente de la superficie, ya que se caracteriza por la ausencia total de luz solar, la alta presión hidrostática (aumento de 1 atm por cada 10 m de profundidad) y una baja temperatura

del agua de aproximadamente 3°C [34]. Todas estas variables reducen la agresividad del entorno para las estructuras fijas. Por el contrario, las aguas superficiales tienen un mayor nivel de corrosión, especialmente en la zona denominada de salpicaduras, que se localiza justo encima de la línea de agua (Figura 41). Esto indica que las estructuras flotantes tendrán mayores problemas de corrosión y se deberán de diseñar sistemas y recubrimientos para mitigarlos. A medida que aumentamos la profundidad, la cantidad de O<sub>2</sub> disminuye hasta alcanzar un mínimo entre los 200 y 1000 m. A partir de los 1000 m, el fenómeno de polarización catódica aumenta y la corrosión disminuye hasta los 1500 m. A partir de esta profundidad la pérdida por corrosión es constante ya que la presencia de O<sub>2</sub> es prácticamente nula [101].

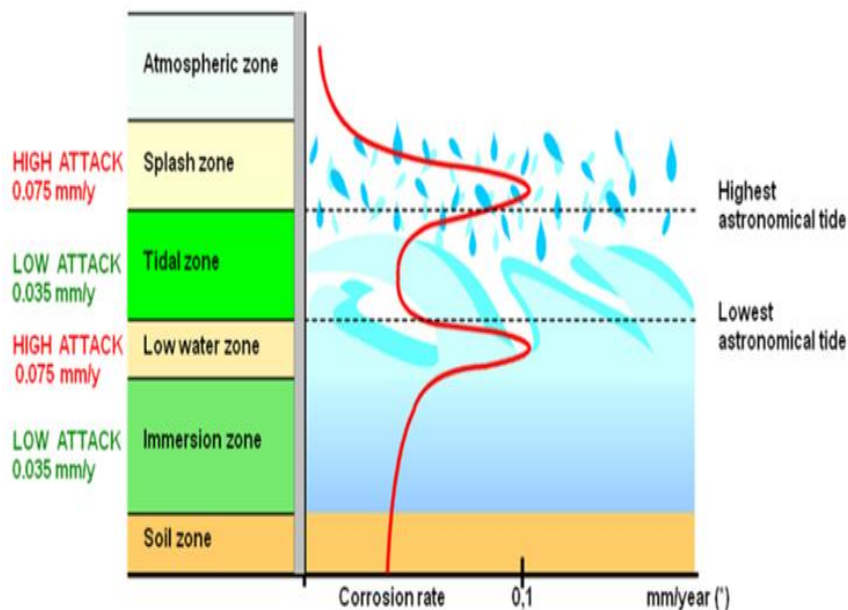


Figura 42 Zonas de corrosión a lo largo de una estructura de acero en un entorno de agua de mar y tasas de corrosión [100]

Las estructuras offshore en su análisis nos ofrecen una problemática más que evidente para el sector de la producción de energía sostenible en alta mar. Actúan como arrecifes artificiales, lo que respalda a una acumulación indeseable de vida marina al ofrecer el hábitat para microorganismos, algas, peces e invertebrados. La corrosión y el biofouling tienen efectos mutuos entre sí: el biofouling puede inducir a la corrosión, pero la corrosión también puede inducir el biofouling. Este fenómeno aplicado en las turbinas de marea produce una importante pérdida de potencia.



En la actualidad, los recubrimientos antifouling marinos se están desarrollando en la dirección del alto rendimiento, ahorro de energía, construcción conveniente y protección del medio ambiente. Se están reemplazando gradualmente los recubrimientos tradicionales, por nuevos recubrimientos antifouling vitrificados y de materiales compuestos [82].

Se estima que las energías renovables marinas jueguen un papel importante, impulsadas tanto por factores políticos como económicos. Se prevé que la generación de electricidad a partir de energías renovables se triplique en el período 2013-2040, superando al carbón para convertirse en la mayor fuente de electricidad. De acuerdo con el nuevo escenario de políticas, el 33% de la generación eléctrica mundial provendrá de fuentes renovables en 2040 [102]. La inversión y la investigación en el campo de las energías renovables por parte del gobierno, las universidades y el sector privado podrían conducir potencialmente a avances que podrían incluso introducir estas energías offshore como un recurso energético competitivo y sostenible.

El futuro de las estructuras marinas continuará estando situado más lejos de la costa y en aguas más profundas. Para que estas plataformas puedan mantener la integridad estructural durante sus vidas de diseño, será necesario emplear sistemas de revestimiento adecuados y rentables en combinación con planes adecuados de control de la salud y de inspección en servicio.





## 7. CONCLUSIONES

En este estudio del estado del arte de la corrosión marina en estructuras offshore, se desarrolla una idea del fenómeno de corrosión que nos permite abarcar, de manera general, el conocimiento que se tiene del mismo.

Como hemos podido comprobar existen diversos tipos de plataformas offshore. Ya sean dependiendo del sector al que pertenecen o los sistemas de anclaje al fondo marino. A consecuencia de los efectos causados por la corrosión, debemos de tener sistemas de control y protección empleados a través de diferentes métodos. Para conseguir que estas técnicas de control se desarrollen de manera efectiva, existe la monitorización o los ensayos de corrosión.

Las conclusiones a las se obtienen se reflejan a continuación:

- La industria offshore, requiere el desarrollo de nuevos recubrimientos que permitan tener una protección frente a la corrosión más prolongada. Los recubrimientos orgánicos empleados actualmente tienen una duración de no más de 15 años., que no son suficientes para las demandas del sector y requieren un mantenimiento elevado.
- Las necesidades del sector offshore requieren desarrollar recubrimientos con una duración mínima de 20 años, que se corresponde con la vida de diseño de las instalaciones. Por ejemplo, las estructuras eólicas marinas.
- La preparación de la superficie antes del recubrimiento es una operación fundamental ya que influye fuertemente en la adhesión de los recubrimientos, que debe ser apropiada para los nuevos recubrimientos.
- Los nuevos recubrimientos deben de ser económicamente viables y tener unos costes de mantenimiento bajos.
- Las energías renovables marinas juegan un papel importante debiendo ser desarrolladas en diversos aspectos, donde los sistemas de protección contra la corrosión son un factor clave para la rentabilidad de estas energías.



Curso: 2017-2018.

La batalla contra la corrosión nunca terminará, sin embargo, se continuará buscando formas efectivas de luchar contra esta. Los costes de ignorar el problema son demasiado elevados y las consecuencias de las fallas pueden ser potencialmente catastróficas.



## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Momber, «Corrosion and corrosion protection of support structures for offshore wind energy devices (OWEA)», *Mater. Corros.*, vol. 62, n.º 5, pp. 391-404, 2011.
- [2] B. Phull y A. A. Abdullahi, «Marine Corrosion», en *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2017.
- [3] ISO (International Organization for Standardization), «Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation», 2013.
- [4] ISO (International Organization for Standardization), «Pinturas y barnices Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores Parte 2: Clasificación de ambientes», 1999.
- [5] P. R. Roberge, *Handbook of Corrosion Engineering Library of Congress Cataloging-in-Publication Data*. 1999.
- [6] ISO (International Organization for Standardization), «Corrosión de metales y aleaciones - Términos principales y definiciones», 2015.
- [7] B. Mackay, J. E. Jackson, D. Melot, J. Scheie, y J. Vittonato, «La corrosión: La lucha más extensa», *Oilf. Rev.* 28, vol. 28, n.º 2, pp. 36-51, 2016.
- [8] V. Cicek, *Corrosion Engineering and Cathodic Protection Handbook: With Extensive Question and Answer Section*. 2017.
- [9] B. Popov, *Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems*. 2015.
- [10] L. Peiró, «Stainless steel corrosion», *Pág. Web Cedinox*, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.cedinox.es/en/actividades/highlighted/detail-highlighted/Stainless-steel-corrosion/#prettyPhoto>.
- [11] F. Domingo, «Principios de la protección de estructuras metálicas en situación de corrosión y fuego.», *Inst. Mex. Construcción en Acero.*, vol. 52, n.º 55, p. 52, 2017.
- [12] NACE, «Uniform Corrosion», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.nace.org/Corrosion-Central/Corrosion-101/Uniform-Corrosion/>.
- [13] P. Roberge, *Corrosion engineering: principles and practice*. 2008.
- [14] HILTI, «Corrosion Handbook», n.º May, 2015.



- [15] W. Aperador, C. Ramírez-Martin, y J. B. Ruiz, «Sinergia entre la corrosión erosión del acero 1045 recubierto por multicapas de TiN/TiAlN», *Rev. Mex. Fis.*, vol. 57, n.º 4, pp. 350-355, 2011.
- [16] M. B. Kermani y A. Morshed, «Carbon dioxide corrosion in oil and gas production – a compendium», 2003.
- [17] Nitty-Gritty, «Corrosion-erosion», 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.nitty-gritty.it/corrosion-erosion/?lang=en>.
- [18] C. García, «corrosión por erosión», 2016. [En línea]. Disponible en: <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/07/corrosion-por-erosion.html>.
- [19] X. Hu y A. Neville, «CO<sub>2</sub>erosion-corrosion of pipeline steel (API X65) in oil and gas conditions-A systematic approach», *Wear*, vol. 267, n.º 11, pp. 2027-2032, 2009.
- [20] M. Aminul Islam, Z. N. Farhat, E. M. Ahmed, y A. M. Alfantazi, «Erosion enhanced corrosion and corrosion enhanced erosion of API X-70 pipeline steel», *Wear*, vol. 302, n.º 1-2, pp. 1592-1601, 2013.
- [21] M. A. Islam y Z. Farhat, «Erosion-corrosion mechanism and comparison of erosion-corrosion performance of API steels», *Wear*, vol. 376-377, pp. 533-541, 2017.
- [22] M. A. Islam y Z. N. Farhat, «The synergistic effect between erosion and corrosion of API pipeline in CO<sub>2</sub>and saline medium», *Tribol. Int.*, vol. 68, pp. 26-34, 2013.
- [23] A. J. Sedriks, *Corrosion of Stainless Steels*. 1996.
- [24] N. Rashidi, S. Alavi-soltani, y R. Asmatulu, «Crevice Corrosion Theory, Mechanisms and Prevention Methods», *Proc. 3rd Annu. GRASP Symp.*, pp. 215-216, 2007.
- [25] X. Wang, R. G. Kelly, J. S. Lee, y M. L. Reed, «Microfabrication of Crevice Corrosion Samples», *MRS Proc.*, vol. 657, n.º January 2011, p. EE5.31, 2000.
- [26] P. A. Schweitzer, «Schweitzer, P. - Corrosion Engineering Handbook - Fundamentals of Metallic Corrosion (2007).pdf». 2007.
- [27] NACE, «Pitting Corrosion», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.nace.org/Pitting-Corrosion/>.
- [28] J. L. Martí y J. R. Ibars, «INTRODUCCIÓN A LOS FENÓMENOS DE CORROSIÓN», 2015.



- [29] J. Ruiz, *Corrosion Fatiga en aleaciones ligeras de Al-Zn-Mg*. 1993.
- [30] F. O. Pessu, «Investigation of Pitting Corrosion of Carbon Steel in Sweet and Sour Oilfield Corrosion Conditions : a Parametric Study», n.º June, 2015.
- [31] J. Bhandari, F. Khan, R. Abbassi, V. Garaniya, y R. Ojeda, «Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures - A technical review», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 37, n.º September 2015, pp. 39-62, 2015.
- [32] T. H. Abood, *The influence of various parameters on pitting corrosion of 316L and 202 stainless steel*. Department of Chemical Engineering of the University of Technology. University of Technology, 2008.
- [33] NACE, «Intergranular Corrosion», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.nace.org/Corrosion-Central/Corrosion-101/Intergranular-Corrosion/>.
- [34] P. Traverso y E. Canepa, «A review of studies on corrosion of metals and alloys in deep-sea environment», *Ocean Eng.*, vol. 87, pp. 10-15, 2014.
- [35] Outokumpu, «Handbook of Stainless Steel», *Sandvikens Tryckeri*, pp. 1-89, 2013.
- [36] N. Alonso-Falleiros, M. Magri, y I. G. S. Falleiros', «Intergranular corrosion in a martensitic stainless steel detected by electrochemical tests», *Corrosion*, vol. 55, n.º 8, pp. 769-778, 1999.
- [37] C. Clinic, «Intergranular Corrosion (Cracking)», 2018. [En línea]. Disponible en: [http://www.corrosionclinic.com/types\\_of\\_corrosion/intergranular\\_corrosion\\_cracking.htm](http://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/intergranular_corrosion_cracking.htm).
- [38] V. Kain, *Corrosion-resistant materials*. Elsevier Inc., 2012.
- [39] F. Iacoviello, V. Di Cocco, y L. D'Agostino, «Analysis of the intergranular corrosion susceptibility in stainless steel by means of potentiostatic reactivation tests», *Procedia Struct. Integr.*, vol. 3, pp. 269-275, 2017.
- [40] Y. Ashida, Y. Daigo, y K. Sugahara, «An Industrial Perspective on Environmentally Assisted Cracking of Some Commercially Used Carbon Steels and Corrosion-Resistant Alloys», *Jom*, vol. 69, n.º 8, pp. 1381-1388, 2017.
- [41] EASA, «Safety Information Bulletin», n.º February, pp. 1-5, 2018.
- [42] S. Price y R. Figueira, «Corrosion Protection Systems and Fatigue Corrosion in Offshore Wind Structures: Current Status and Future Perspectives», *Coatings*,



vol. 7, n.º 2, p. 25, 2017.

- [43] O. Adedipe, F. Brennan, y A. Kolios, «Review of corrosion fatigue in offshore structures: Present status and challenges in the offshore wind sector», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 61, pp. 141-154, 2016.
- [44] G. Masi, F. Matteucci, y J. Tacq, «State of the Art Study on Materials and Solutions against Corrosion in Offshore Structures North Sea Solutions for Innovation in Corrosion for Energy», n.º February, 2018.
- [45] DNV GL, «DNVGL-RP-C203: Fatigue Design of Offshore Steel Structures», n.º DNVGL-RP-C203, p. 176, 2016.
- [46] F. J. Cañamero Torres, «Análisis de Estructuras Offshore sometidas a la Acción del Oleaje mediante ANSYS», 2010.
- [47] D. T. Griffith, N. C. Yoder, B. Resor, J. White, y J. Paquette, «Structural health and prognostics management for the enhancement of offshore wind turbine operations and maintenance strategies», en *Wind Energy*, 2014, pp. 1737-1751.
- [48] P. T. Pedersen, «Marine Structures: Future Trends and the Role of Universities», *Engineering*, vol. 1, n.º 1, pp. 131-138, 2015.
- [49] K. Y. Oh, W. Nam, M. S. Ryu, J. Y. Kim, y B. I. Epureanu, «A review of foundations of offshore wind energy convertors: Current status and future perspectives», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 88, n.º April 2016, pp. 16-36, 2018.
- [50] A. Campanile, V. Piscopo, y A. Scamardella, «Mooring design and selection for floating offshore wind turbines on intermediate and deep water depths», *Ocean Eng.*, vol. 148, pp. 349-360, 2018.
- [51] A. Mojtahedi, M. A. Lotfollahi Yaghin, M. M. Ettefagh, Y. Hassanzadeh, y M. Fujikubo, «Detection of nonlinearity effects in structural integrity monitoring methods for offshore jacket-type structures based on principal component analysis», *Mar. Struct.*, vol. 33, pp. 100-119, 2013.
- [52] A. Ageitos Santos, «SISTEMAS DE ANCLAJE Y POSICIONAMIENTO DE BUQUES Y PLATAFORMAS OFFSHORE», 2015.
- [53] H. Devold, *Oil and gas production handbook An introduction to oil and gas production, transport, refining and petrochemical industry*. 2013.
- [54] L. M. Prieto Luis, «CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE PLATAFORMAS PETROLÍFERAS Y UNIDADES OFF-SHORE», 2015.
- [55] P. L. Gil, «Plataformas petrolíferas y procesos para la extracción del petróleo», p. 94, 2015.



- [56] S. K. Chakrabarti, *Handbook of Offshore Engineering*, vol. I y II. 2005.
- [57] M. Ballesta Morales, «ANÁLISIS DE LA PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DE ESTRUCTURA JACKET», Cartagena, 2012.
- [58] M. Abduh, «Offshore, Platforms, and the Hurricanes», *Integrity Engineering*, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://abduh137.wordpress.com/2008/04/30/offshore-platforms-and-the-hurricanes/>.
- [59] O. Technology, «Manatee Field, Gulf of Mexico», 2003. [En línea]. Disponible en: <https://www.offshore-technology.com/projects/manatee/>.
- [60] G. Ventura Castelló, «Estudio del comportamiento en la mar de una plataforma tipo truss spar», 2016.
- [61] M. Martinez-Luengo, A. Kolios, y L. Wang, «Structural health monitoring of offshore wind turbines: A review through the Statistical Pattern Recognition Paradigm», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 91-105, 2016.
- [62] C. Serrano Morán, «Diseño de una estructura flotante para un aerogenerador offshore», 2015.
- [63] WindEnergy, «Review of Options for Offshore Foundation Substructures», 2012.
- [64] S. Ferreño González, L. Castro Santos, V. Díaz Casás, y J. Á. Fraguera Formoso, «52º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima», 2013.
- [65] M. Randolph y S. Gourvenec, *Offshore Geotechnical Engineering*. 2009.
- [66] L. Chen y W. H. Lam, «A review of survivability and remedial actions of tidal current turbines», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 891-900, 2014.
- [67] M. Lehmann, F. Karimpour, C. A. Goudey, P. T. Jacobson, y M. R. Alam, «Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, n.º November 2016, pp. 1300-1313, 2017.
- [68] R. Pelc y R. M. Fujita, «Renewable energy from the ocean», *Mar. Policy*, vol. 26, n.º 6, pp. 471-479, 2002.
- [69] ADMA, «Advanced Manufacturing for Energy-Related Applications in Harsh Environments». 2016.
- [70] S. Ocean, «Wave and Tidal Energy Market Deployment Strategy for Europe»,



2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.si-ocean.eu/en/Market-Deployment/Market-Deployment-Strategy/>.

- [71] H. J. Yadav, «Recent developments of Ocean Energy in India – An Overview Recent», *Int. J. Recent Innov. Trends Comput. Commun.*, vol. 3, n.º 12, 2016.
- [72] D. C. Rodopoulos, T. V Gortsas, S. V Tsinopoulos, y D. Polyzos, «Boundary element method solution for large scale cathodic protection problems», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 276, p. 012021, 2017.
- [73] A. Popoola, O. E. Olorunniwo, y O. Ige, «Corrosion Resistance Through the Application of Anti-Corrosion Coatings», *Dev. Corros. Prot.*, pp. 241-270, 2014.
- [74] A. Popoola, O. Olorunniwo, y O. Ige, «Corrosion Resistance Through the Application of Anti- Corrosion Coatings», *Dev. Corros. Prot.*, 2014.
- [75] ISO (International Organization for Standardization), *Pinturas y barnices-Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores-Parte 3: Consideraciones sobre el diseño*. 1999.
- [76] ISO (International Organization for Standardization), *Preparación de substratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados-Evaluación visual de la limpieza de las superficies-Parte 3: Grados de preparación de soldaduras, bordes y otras áreas con imperfecciones en la superficie*. 2008.
- [77] J. Ávila y J. Genescá, *MÁS ALLÁ DE LA HERRUMBRE II*. 2013.
- [78] C. Huerta Fernández, «ESTUDIO DE LAS SOLUCIONES DE PINTURA EN ESTRUCTURAS OFFSHORE PARA EÓLICA Y DE LAS POSIBLES NUEVAS VARIANTES DE PROTECCIÓN SUPERFICIAL», 2014.
- [79] J. Uruchurtu, B. Sandianes Vega, O. Calderón Secada, y O. Calderón Sánchez, «ESTUDIO DE UN INHIBIDOR DE CORROSIÓN EN MEDIO ÁCIDO», 2014.
- [80] J. J. Camejo Giniebra, M. Rigoberto, y J. A. Domínguez Domínguez, «Apuntes sobre corrosión y protección contra la corrosión», n.º April. 2018.
- [81] W. v. Baeckmann y B. Richter, *Handbook of CATHODIC CORROSION PROTECTION*. 1997.
- [82] S. García, A. Trueba, L. M. Vega, y E. Madariaga, «Ceramic coating solution for offshore structures», pp. 453-458, 2018.
- [83] H. Ivanov, «Corrosion Protection Systems in Offshore Structures», p. 27, 2016.





- [84] ISO (International Organization for Standardization), *Directrices y recomendaciones para la protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acero. Recubrimientos de cinc. Parte 2: Galvanización en caliente*. 2011.
- [85] K. Mühlberg, «Corrosion protection of offshore wind turbines», *Wind power R&D Semin.*, n.º March, 2010.
- [86] R. Hudson, «Coating for the Protection of Structural Steelwork», *Natl. Phys. Lab. Dep. Trade Ind. UK*, pp. 1-16, 2000.
- [87] ISO (International Organization for Standardization), *Proyección térmica. Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos inorgánicos. Cinc, aluminio y sus aleaciones*. 2005.
- [88] X. H. Wang *et al.*, «Polyaniline as marine antifouling and corrosion-prevention agent», *Synth. Met.*, vol. 102, n.º 1-3, pp. 1377-1380, 1999.
- [89] METAL SAMPLES, «Introducción al Monitoreo de Corrosión», *Corros. Monit. Syst.*, pp. 1-10, 2018.
- [90] ASTM, *Standard Practice for Exposing and Evaluating Metals and Alloys in Surface Sea water*, vol. 00, n.º Reapproved. 2006, pp. 1-4.
- [91] ISO (International Organization for Standardization), *Corrosión de metales y aleaciones. Guías para la exposición y evaluación de metales y aleaciones en la superficie marina*. 1998.
- [92] G. Peláez Romero, «SELECCIÓN Y PROCESOS DE DEGRADACIÓN DE MATERIALES EN INSTALACIONES DE TRATAMIENTO Y CONDUCCIÓN DE AGUA».
- [93] M. Criado, S. Fajardo, B. Valdez, y J. M. Bastidas, «Aspectos cinéticos de la corrosión y fenómenos de pasividad», *Corros. y Preserv. la Infraestruct. Ind.*, vol. 0, n.º 0, pp. 11-32, 2013.
- [94] G. a. Schmitt *et al.*, «Global Needs for Knowledge Development in Materials Deterioration and Corrosion Control in cooperation with», *Fed. Highw. Adm.*, vol. FHWA-RD-01, n.º May, pp. 1-44, 2009.
- [95] I. Díez, «Protección Catódica de un buque Ro Ro de 210 Plataformas(Tesis de Pregrado)», p. 90, 2008.
- [96] M. P. H. Gerhardus H. Koch y and N. G. T. Y. P. V. J. H. P. Brongers, «Corrosion costs and preventive strategies in the United States», *Summ. Shute. Inst.*, pp. 1-12, 2002.
- [97] HEMPEL, «Directrices para la protección anticorrosiva del acero y superficies



metálicas con recubrimientos según la Norma ISO 12944 (UNE-EN ISO 12944)», vol. 2010.

- [98] R. Singh, *Corrosion Control for Offshore Structures*. 2014.
- [99] A. W. Momber, P. Plagemann, y V. Stenzel, «Performance and integrity of protective coating systems for offshore wind power structures after three years under offshore site conditions», *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 606-617, 2015.
- [100] D. Vélez y J. Muñoz, «NMBP 06-2017: Improved material durability in buildings and infrastructures, including offshore». 2017.
- [101] ANTALA, «Prevenir problemas con anticorrosivos para el sector marino», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.antala.es/anticorrosivos-sector-marino/>.
- [102] IEA, «Offshore Energy Outlook», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/weo/offshore/>.

**ANEXO 1 TIPOS DE CORROSIÓN RECOGIDOS SEGÚN LA NORMA UNE-EN ISO 8044:2015**

TIPOS DE CORROSIÓN

- Corrosión electroquímica:** corrosión que implica, al menos, una reacción anódica y una reacción catódica. → **Corrosión por corriente de fuga:** debida a la acción de una fuente exterior de corriente eléctrica. → **Corrosión por corriente vagabunda:** debida a una corriente que pasa por otros circuitos distintos de los previstos.
- Corrosión química:** corrosión que no implica una reacción electroquímica.
- Corrosión gaseosa:** corrosión en la que el único medio corrosivo es un gas seco, sin ninguna fase líquida presente en la superficie del metal.
- Corrosión atmosférica:** corrosión en la que la atmósfera terrestre a temperatura ambiente es el medio corrosivo.
- Corrosión marina:** corrosión en la que el agua de mar es el agente principal del medio corrosivo.
- Corrosión en suelos:** corrosión de metales enterrados, en la que el suelo es el medio corrosivo
- Corrosión microbiana:** corrosión asociada a la acción de microorganismos presentes en el sistema de corrosión. → **Corrosión bacteriana:** debida a la acción de las bacterias.
- Corrosión generalizada:** corrosión que progresa en el conjunto de la superficie del metal expuesto en el medio corrosivo → **Corrosión uniforme:** progresa aprox. a la misma velocidad sobre todo el conjunto de la superficie.
- Corrosión localizada:** corrosión concentrada preferentemente sobre lugares discretos de la superficie de un metal expuestos al medio corrosivo.
  - Corrosión por picaduras:** se traduce en una aparición de cavidades que se extienden sobre el metal a partir de la superficie
  - Corrosión cavernosa:** asociada un espacio restringido existente entre la superficie de un metal y otra superficie (metálica o no)
  - Corrosión bajo depósito:** asociada a, y que tiene lugar por debajo o en la proximidad inmediata, de un depósito de productos de la corrosión u otra sustancia.
  - Ampollamiento:** proceso que se manifiesta por defecto en forma de cúpula visible en la superficie de un objeto y que proviene de una pérdida de cohesión localizada bajo la superficie.
  - Ataque por choque:** bajo condiciones de alta velocidad o de flujo turbulento asociado sobre la superficie del metal que causa rotura repetitiva de las películas protectoras.
- Corrosión galvánica:** corrosión debida a la acción de una pila de corrosión. → **Corrosión bimetalica:** corrosión en la que los electrodos están constituidos por metales diferentes.
- Corrosión en la línea de flotación:** corrosión que resulta por la presencia de una interfase gas-líquido y localizada a lo largo de ésta.
- Corrosión selectiva:** corrosión de una aleación cuyos diferentes constituyentes reaccionan en proporciones diferentes de sus proporciones en la aleación.
  - Decincificación del latón:** lleva a una eliminación preferencial del cinc.
  - Grafitización:** corrosión selectiva de la fundición gris, eliminando parcialmente los constituyentes metálicos y dejando subsistir el grafito.
  - Desaleación.**
- Corrosión intergranular:** corrosión situada en el límite de un grano de un metal o en su proximidad inmediata.
- Corrosión en la soldadura:** corrosión asociada a la presencia de una junta soldada y que se localiza al nivel de esta junta o en su proximidad inmediata.
- Corrosión en filo de cuchillo:** corrosión que conduce a la aparición de una hendidura dentro o contra la unión metal de aporte/metal base de una junta soldada.
- Corrosión por deslaminación:** corrosión de capas internas de un metal corroído que lleva a veces a la exfoliación, a la descohesión de las capas no atacadas.
- Corrosion por cavitación:** proceso que implica la acción conjugada de la corrosión y cavitación.
- Corrosión por fatiga:** proceso que implica la acción conjugada de la corrosión y una deformación alternada del metal y que conlleva a menudo a una fisuración.
- Corrosión bajo tension:** proceso que implica la acción conjugada de la corrosión y una deformación del metal bajo el efecto de tensiones aplicadas o residuales.
  - Corrosión por exfoliación:** forma estratificada de corrosión bajo tensión
  - Fisuración por corrosión bajo tensión:** fisuración debida a una corrosión bajo tensión.
- Fragilización por hidrógeno:** proceso que conlleva una reducción de la tenacidad o ductilidad de un metal, debida a la absorción de hidrógeno.
- Descamación:** fragmentación y separación de porciones de la capa superficial o escamas.
- Deslustre:** pérdida de brillo, aparición de manchas o cambio de tono de una superficie metálica a consecuencia de la formación de una fina capa de productos de la corrosión.
- Corrosion acuosa:** corrosión con agua o una disolución acuosa como ambiente corrosivo.
- Corrosion microbiológica (MIC):** corrosión influida por la acción de microorganismos.
  - Tribocorrosión:** cualquier forma de corrosión que incluye eliminación constante de la capa pasiva debido a un fluido o a partículas que impactan sobre la superficie corroída o debido a la fricción entre la superficie corroída y otra superficie.
    - Corrosión por desgaste:** proceso que implica la acción conjugada de la corrosión y el rozamiento entre dos superficies deslizantes en contacto.
    - Corrosión por frotamiento:** proceso que implica la acción conjugada de la corrosión y el frotamiento de dos superficies vibrantes en contacto.
    - Corrosión por erosión:** proceso que implica la acción conjugada de la corrosión y de la erosión.
- Corrosión filiforme:** tipo de corrosión que se produce por debajo de los materiales de recubrimiento sobre metales en forma de fibras, comenzando generalmente a partir de extremos desnudos o a partir de daño local en el recubrimiento.
- Corrosión a alta temperatura:** corrosión por gases o depósitos o ambos que se origina a temperaturas elevadas bajo condiciones donde ya no existen los electrolitos acuosos. → **Corrosión en caliente:** corrosión por gases o depósitos o ambos que forma una fase líquida durante una reacción de corrosión a alta temperatura.
- Sulfuración:** reacción de un metal o aleación con una especie que contenga azufre para producir sulfuros metálicos sobre o por debajo de la superficie del metal o aleación.
- Pulverización metálica:** carburización de los materiales metálicos en gases de proceso que conducen a la desintegración del metal en polvo de grafito, metal o carburos, o en combinaciones de estos.
- Corrosión de las barras de armadura:** corrosión de las barras de armadura en hormigón.

**AVISO:**

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado así como el profesor tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.

