



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

### *Análisis y Evaluación de la Corrosión en Aceros Navales*

#### Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** D. Miguel Eduardo Montesinos Rodríguez

**DIRECTORES:** Dña. Rosa Devesa Rey  
D. Santiago Urréjola Madriñán

**CURSO ACADÉMICO:** 2017-2018

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

### *Análisis y Evaluación de la Corrosión en Aceros Navales*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General de la Armada

Universida<sub>d</sub>eVigo



## **RESUMEN**

La corrosión del acero debida al agua de mar es un problema al que se enfrentan todos los buques. En este trabajo se han analizado dos de las variables que más influyen en el proceso de degradación de los aceros al carbono en ambientes marinos (el pH y la concentración de cloruros), así como la intensidad de corriente que surge cuando se produce un par galvánico, que aparece al entrar en contacto dos metales de diferente potencial. El estudio se realizó con dos tipos de acero (S275JR y S235JR) y se establecieron 15 ambientes diferentes.

La progresión de la corrosión se evaluó de dos formas: i) midiendo la variación de masa debida al fenómeno de la corrosión, lo que se utilizó posteriormente para determinar la cinética de la reacción, y ii) visualmente, mediante el empleo del software libre ImageJ. El efecto combinado de las tres variables se analizó mediante el programa informático Statistics realizando un análisis factorial a fin de obtener unas superficies de respuesta y sus correspondientes ecuaciones predictivas, que permiten prever el efecto de la corrosión. Finalmente, para poder observar las diferencias entre el modelo obtenido y el grado de corrosión real, los dos tipos de acero estudiado se sometieron al efecto del agua de mar de la dársena de la Escuela Naval Militar.

Del estudio realizado se concluye que la corrosión en el medio marino se acentúa en el acero al carbono empleado en la industria naval cuanto más ácido sea el pH del medio marino y cuanto mayor sea la concentración de cloruros disueltos en el agua, teniendo esta segunda variable mayor influencia que la primera. Asimismo, se observa que cuando actúa una corriente eléctrica, la velocidad de corrosión se ve incrementada de manera notable. Por último, el trabajo confirma que los aceros con mayor porcentaje de carbono en su composición presentan mayor grado de corrosión.

## **PALABRAS CLAVE**

Corrosión, Acero, Agua de Mar, Buque, Diseño factorial.



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis tutores, la Dra. Rosa Devesa y el Dr. Santiago Urréjola, a quienes deseo agradecer el haber aceptado mi propuesta de trabajo, el interés demostrado y su continuo apoyo y guía durante la realización del mismo. Es obvio que sin ellos este trabajo no hubiera salido adelante.

En este momento, también me gustaría nombrar a mis compañeros de promoción: “River”, “Super”, “Peto”, “Chen”, “Xino”, Luis, “Ferry”, José, Jesús, Álvaro, Cabezudo, Darío, “Isra”, “Rafa”, “Juanca”, Andrés... ¡Bueno! No sigo, que no me caben los cuarenta y tantos nombres pero, por supuesto, daos los demás por incluidos. A todos vosotros, quiero agradecerlos el haberme “aguantado” durante estos cinco años de singladura en la Escuela Naval. Porque, aunque no lo parezca, ha llovido mucho (y además literalmente) desde que cruzamos por primera vez la puerta de Carlos I. Recordad aquellas carreritas al palo en primero o la incontable cantidad de horas que hemos echado en la explanada “chopeando” estos años. Y también fuera de la ENM... ¡Cómo nos vamos a olvidar de nuestro querido “Cano Africano” o de la cantidad de horas que nos hemos pasado sentados en la terraza de la farola, con una estrellita en la mano, arreglando los problemas de la Escuela y el mundo! Por todos esos momentos que hemos pasado juntos, y todos los que nos esperan, me queda muy claro que no sólo sois compañeros de armas, sino que sois, verdaderamente, AMIGOS.

En estas breves líneas también quiero poner de manifiesto el continuo apoyo que he recibido por parte de toda mi familia, destacando, especialmente, el de mis abuelos: Antonio, “Carmiña”, Pepe y “Maricuca”. Y, por supuesto, el de mi padrino, Miguel, que ha sido el primer oficial de la Armada de la familia, aunque solo “ejerciese como tal” durante unos mesecillos en “la mili”. Durante ese corto periodo de tiempo aprendí a valorar este mundo y me ha sabido transmitir su pasión por la mar y por la Armada.

Finalmente, y como no podría ser de otra manera, deseo agradecer a mis padres y mi hermano todo su apoyo y cariño, ya no solo durante estos últimos años, sino durante toda mi vida. Mamá, Papá y Nacho ¡Gracias!



# CONTENIDO

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Contenido .....                                                         | 1  |
| Índice de Figuras .....                                                 | 5  |
| Índice de Tablas.....                                                   | 15 |
| 1 Introducción y Objetivos .....                                        | 17 |
| 1.1 Justificación .....                                                 | 17 |
| 1.2 Fundamentos de la Corrosión .....                                   | 17 |
| 1.2.1 Fenómeno de la Corrosión.....                                     | 18 |
| 1.2.2 Tipos de Corrosión .....                                          | 19 |
| 1.2.3 Técnicas para Retrasar la Corrosión .....                         | 19 |
| 1.3 Agua de Mar.....                                                    | 20 |
| 1.3.1 Composición .....                                                 | 20 |
| 1.3.2 Características.....                                              | 21 |
| 1.3.3 Influencia del Agua de Mar en la Corrosión .....                  | 22 |
| 1.4 Acero en la Construcción Naval .....                                | 23 |
| 1.4.1 Comportamiento de las Aleaciones Fe-C .....                       | 23 |
| 1.4.2 Clasificación del Acero según la Norma UNE 10020:2001 .....       | 24 |
| 1.4.3 Clasificación de los Aceros Empleados por la Industria Naval..... | 25 |
| 1.4.4 Aceros Empleados en la Industria Naval Militar.....               | 25 |
| 1.5 Objetivos .....                                                     | 26 |
| 2 Estado del arte .....                                                 | 27 |
| 2.1 Introducción .....                                                  | 27 |
| 2.2 La Corrosión del Acero en Ambientes Marinos .....                   | 28 |
| 2.3 Prevención de la Corrosión .....                                    | 29 |
| 2.4 Corrección de los Efectos Derivados de la Corrosión .....           | 30 |
| 3 Desarrollo del TFG.....                                               | 31 |
| 3.1 Introducción .....                                                  | 31 |
| 3.2 Metodología .....                                                   | 31 |
| 3.3 Descripción de las Variables a Estudiar.....                        | 33 |
| 3.3.1 Variable 1: pH.....                                               | 33 |
| 3.3.2 Variable 2: Concentración de Cloruros .....                       | 33 |
| 3.3.3 Variable 3: Corriente Eléctrica .....                             | 33 |
| 3.4 Descripción de los Ambientes Estudiados .....                       | 34 |
| 3.5 Preparación de los Ambientes Estudiados .....                       | 36 |

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.6 Análisis del Agua de la Dársena de la Escuela Naval Militar .....                                                                                         | 38  |
| 3.7 Empleo del Programa Informático ImageJ .....                                                                                                              | 39  |
| 3.8 Condiciones Iniciales de las Probetas .....                                                                                                               | 40  |
| 3.9 Material y Reactivos .....                                                                                                                                | 42  |
| 4 Resultados y Discusión .....                                                                                                                                | 43  |
| 4.1 Introducción .....                                                                                                                                        | 43  |
| 4.2 Resultados para el Acero “A” (S275JR) .....                                                                                                               | 43  |
| 4.2.1 Efecto Sinérgico del pH, Concentración de Cloruros y Corriente Eléctrica en la Pérdida de Masa de una Probeta del Acero “A” .....                       | 43  |
| 4.2.2 Efecto Sinérgico del pH, Concentración de Cloruros y Corriente Eléctrica en Porcentaje de Corrosión Visual Observado en una Probeta del Acero “A” ..... | 46  |
| 4.2.3 Cinética de la Corrosión .....                                                                                                                          | 49  |
| 4.3 Resultados para el Acero “B” (S235JR) .....                                                                                                               | 51  |
| 4.3.1 Efecto Sinérgico del pH, Concentración de Cloruros y Corriente Eléctrica en la Pérdida de Masa de una Probeta del Acero “B” .....                       | 51  |
| 4.3.2 Efecto Sinérgico del pH, Concentración de Cloruros y Corriente Eléctrica en Porcentaje de Corrosión Visual Observado en una Probeta del Acero “B” ..... | 53  |
| 4.3.3 Cinética de la Corrosión .....                                                                                                                          | 56  |
| 4.4 Discusión Comparada de los Resultados Obtenidos de Ambos Aceros .....                                                                                     | 58  |
| 4.4.1 Variación de Masa .....                                                                                                                                 | 58  |
| 4.4.2 Porcentaje de Corrosión Visual .....                                                                                                                    | 58  |
| 4.4.3 Cinética de la Corrosión .....                                                                                                                          | 59  |
| 4.5 Estudio con el Agua de la Dársena de la Escuela Naval Militar.....                                                                                        | 60  |
| 4.5.1 Análisis del Agua.....                                                                                                                                  | 60  |
| 4.5.2 Estudio Comparado del Grado de Corrosión Experimental y Calculado .....                                                                                 | 60  |
| 5 Conclusiones y Líneas Futuras .....                                                                                                                         | 65  |
| 5.1 Conclusiones .....                                                                                                                                        | 65  |
| 5.2 Líneas Futuras .....                                                                                                                                      | 65  |
| 6 Bibliografía.....                                                                                                                                           | 67  |
| Anexo I: Características Técnicas de los Aceros Estudiados .....                                                                                              | 71  |
| AI.1 Acero “A”: S275JR.....                                                                                                                                   | 71  |
| AI.2 Acero “B”: S235JR.....                                                                                                                                   | 71  |
| Anexo II: Imágenes de la Evolución del Acero “A” .....                                                                                                        | 73  |
| Anexo III: Imágenes de la Evolución del Acero “B” .....                                                                                                       | 87  |
| Anexo IV: Resultados del Acero “A” .....                                                                                                                      | 101 |
| Anexo V: Resultados del Acero “B” .....                                                                                                                       | 105 |

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| Anexo VI: Características Técnicas del Material Empleado..... | 109 |
| AVI.1 Microscopio Óptico .....                                | 109 |
| AVI.2 Medidor de pH .....                                     | 110 |
| AVI.3 Fuentes de Corriente .....                              | 110 |
| AVI.4 Balanza de Precisión .....                              | 111 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1 Diferencias de temperaturas del agua de mar en superficie durante el día 02/01/2018 [13] .....                | 22 |
| Figura 1-2 Diagrama Fe-C [18].....                                                                                       | 23 |
| Figura 2-1 Corrosión galvánica en los cascos de acero [25].....                                                          | 28 |
| Figura 3-1 Esquema seguido durante el TFG.....                                                                           | 32 |
| Figura 3-2 Esquema del modelo Box-Behnken.....                                                                           | 35 |
| Figura 3-3 Montaje del experimento .....                                                                                 | 37 |
| Figura 3-4 Posición de la toma de la muestra de agua de mar [46].....                                                    | 38 |
| Figura 3-5 Comparación imagen de una probeta antes y después del análisis por ImageJ.....                                | 39 |
| Figura 3-6 Resultado del análisis de una probeta con el programa ImageJ .....                                            | 40 |
| Figura 3-7 Probetas acero "A" (izq.) y "B" (dcha.) empleadas en el experimento .....                                     | 40 |
| Figura 4-1 Variación de masa del acero "A" para $I = 0$ A tras 1 semana.....                                             | 44 |
| Figura 4-2 Variación de masa del acero "A" para $I = 0$ A tras 2 semanas .....                                           | 44 |
| Figura 4-3 Variación de masa del acero "A" para $I = 0$ A tras 3 semanas .....                                           | 44 |
| Figura 4-4 Variación de masa del acero "A" para $I = 0,05$ A (izq.) y $0,1$ A (dcha.) tras 1 semana .....                | 45 |
| Figura 4-5 Variación de masa del acero "A" para $I = 0,05$ A (izq.) y $0,1$ A (dcha.) tras 2 semanas.....                | 45 |
| Figura 4-6 Variación de masa del acero "A" para $I = 0,05$ A (izq.) y $0,1$ A (dcha.) tras 3 semanas.....                | 46 |
| Figura 4-7 Porcentaje de corrosión visual del acero "A" para $I = 0$ A tras 1 semana .....                               | 47 |
| Figura 4-8 Porcentaje de corrosión visual del acero "A" para $I = 0$ A tras 2 semanas.....                               | 47 |
| Figura 4-9 Porcentaje de corrosión visual del acero "A" para $I = 0$ A tras 3 semanas.....                               | 47 |
| Figura 4-10 Porcentaje de corrosión visual del acero "A" para $I = 0,05$ A (izq.) y $0,1$ A (dcha.) tras 1 semana .....  | 48 |
| Figura 4-11 Porcentaje de corrosión visual del acero "A" para $I = 0,05$ A (izq.) y $0,1$ A (dcha.) tras 2 semanas ..... | 48 |
| Figura 4-12 Porcentaje de corrosión visual del acero "A" para $I = 0,05$ A (izq.) y $0,1$ A (dcha.) tras 3 semanas ..... | 49 |
| Figura 4-13 Evolución de la velocidad corrosión acero "A" (mm/año).....                                                  | 50 |
| Figura 4-14 Velocidad media de corrosión acero "A" (mm/año).....                                                         | 50 |
| Figura 4-15 Variación de masa del acero "B" para $I = 0$ A tras 1 semana.....                                            | 51 |
| Figura 4-16 Variación de masa del acero "B" para $I = 0$ A tras 2 semanas .....                                          | 51 |
| Figura 4-17 Variación de masa del acero "B" para $I = 0$ A tras 3 semanas .....                                          | 52 |
| Figura 4-18 Variación de masa del acero "B" para $I = 0,05$ A (izq.) y $0,1$ A (dcha.) tras 1 semana.....                | 52 |
| Figura 4-19 Variación de masa del acero "B" para $I = 0,05$ A (izq.) y $0,1$ A (dcha.) tras 2 semanas .....              | 53 |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4-20 Variación de masa del acero "B" para $I = 0,05$ A (izq.) y $0,1$ A (dcha.) tras 3 semanas .....              | 53 |
| Figura 4-21 Porcentaje de corrosión visual del acero "B" para $I = 0$ A tras 1 semana .....                              | 54 |
| Figura 4-22 Porcentaje de corrosión visual del acero "B" para $I = 0$ A tras 2 semanas .....                             | 54 |
| Figura 4-23 Porcentaje de corrosión visual del acero "B" para $I = 0$ A tras 3 semanas .....                             | 54 |
| Figura 4-24 Porcentaje de corrosión visual del acero "B" para $I = 0,05$ A (izq.) y $0,1$ A (dcha.) tras 1 semana .....  | 55 |
| Figura 4-25 Porcentaje de corrosión visual del acero "B" para $I = 0,05$ A (izq.) y $0,1$ A (dcha.) tras 2 semanas ..... | 55 |
| Figura 4-26 Porcentaje de corrosión visual del acero "B" para $I = 0,05$ A (izq.) y $0,1$ A (dcha.) tras 3 semanas ..... | 56 |
| Figura 4-27 Evolución de la velocidad corrosión acero "B" (mm/año) .....                                                 | 57 |
| Figura 4-28 Velocidad media de corrosión acero "B" (mm/año) .....                                                        | 57 |
| Figura 4-29 Variación final de masa para ambos aceros .....                                                              | 58 |
| Figura 4-30 Variación final del porcentaje de corrosión visual para ambos aceros .....                                   | 59 |
| Figura 4-31 Velocidades medias de corrosión finales para ambos aceros .....                                              | 59 |
| Figura A2-1 Estado inicial probeta A11 .....                                                                             | 73 |
| Figura A2-2 Estado probeta A11 tras 1 semana .....                                                                       | 73 |
| Figura A2-3 Estado probeta A11 tras 2 semanas .....                                                                      | 73 |
| Figura A2-4 Estado final probeta A11 .....                                                                               | 73 |
| Figura A2-5 Estado inicial probeta A12 .....                                                                             | 73 |
| Figura A2-6 Estado probeta A12 tras 1 semana .....                                                                       | 73 |
| Figura A2-7 Estado probeta A12 tras 2 semanas .....                                                                      | 73 |
| Figura A2-8 Estado final probeta A12 .....                                                                               | 73 |
| Figura A2-9 Estado inicial probeta A21 .....                                                                             | 74 |
| Figura A2-10 Estado probeta A21 tras 1 semana .....                                                                      | 74 |
| Figura A2-11 Estado probeta A21 tras 2 semanas .....                                                                     | 74 |
| Figura A2-12 Estado final probeta A21 .....                                                                              | 74 |
| Figura A2-13 Estado inicial probeta A22 .....                                                                            | 74 |
| Figura A2-14 Estado probeta A22 tras 1 semana .....                                                                      | 74 |
| Figura A2-15 Estado probeta A22 tras 2 semanas .....                                                                     | 74 |
| Figura A2-16 Estado final probeta A22 .....                                                                              | 74 |
| Figura A2-17 Estado inicial probeta A31 .....                                                                            | 74 |
| Figura A2-18 Estado probeta A31 tras 1 semana .....                                                                      | 74 |
| Figura A2-19 Estado probeta A31 tras 2 semanas .....                                                                     | 75 |
| Figura A2-20 Estado final probeta A31 .....                                                                              | 75 |
| Figura A2-21 Estado inicial probeta A32 .....                                                                            | 75 |

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| Figura A2-22 Estado probeta A32 tras 1 semana.....   | 75 |
| Figura A2-23 Estado probeta A32 tras 2 semanas ..... | 75 |
| Figura A2-24 Estado final probeta A32 .....          | 75 |
| Figura A2-25 Estado inicial probeta A41.....         | 75 |
| Figura A2-26 Estado probeta A41 tras 1 semana.....   | 75 |
| Figura A2-27 Estado probeta A41 tras 2 semanas ..... | 75 |
| Figura A2-28 Estado final probeta A41 .....          | 75 |
| Figura A2-29 Estado inicial probeta A42.....         | 76 |
| Figura A2-30 Estado probeta A42 tras 1 semana.....   | 76 |
| Figura A2-31 Estado probeta A42 tras 2 semanas ..... | 76 |
| Figura A2-32 Estado final probeta A42 .....          | 76 |
| Figura A2-33 Estado inicial probeta A51.....         | 76 |
| Figura A2-34 Estado probeta A51 tras 1 semana.....   | 76 |
| Figura A2-35 Estado probeta A51 tras 2 semanas ..... | 76 |
| Figura A2-36 Estado final probeta A51 .....          | 76 |
| Figura A2-37 Estado inicial probeta A52.....         | 76 |
| Figura A2-38 Estado probeta A52 tras 1 semana.....   | 76 |
| Figura A2-39 Estado probeta A52 tras 2 semanas ..... | 77 |
| Figura A2-40 Estado final probeta A52 .....          | 77 |
| Figura A2-41 Estado inicial probeta A61.....         | 77 |
| Figura A2-42 Estado probeta A61 tras 1 semana.....   | 77 |
| Figura A2-43 Estado probeta A61 tras 2 semanas ..... | 77 |
| Figura A2- 44 Estado final probeta A61 .....         | 77 |
| Figura A2-45 Estado inicial probeta A62.....         | 77 |
| Figura A2-46 Estado probeta A62 tras 1 semana.....   | 77 |
| Figura A2-47 Estado probeta A62 tras 2 semanas ..... | 77 |
| Figura A2-48 Estado final probeta A62 .....          | 77 |
| Figura A2-49 Estado inicial probeta A71.....         | 78 |
| Figura A2-50 Estado probeta A71 tras 1 semana.....   | 78 |
| Figura A2-51 Estado probeta A71 tras 2 semanas ..... | 78 |
| Figura A2-52 Estado final probeta A71 .....          | 78 |
| Figura A2-53 Estado inicial probeta A72.....         | 78 |
| Figura A2-54 Estado probeta A72 tras 1 semana.....   | 78 |
| Figura A2-55 Estado probeta A72 tras 2 semanas ..... | 78 |
| Figura A2-56 Estado final probeta A72 .....          | 78 |

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| Figura A2-57 Estado inicial probeta A81.....          | 78 |
| Figura A2-58 Estado probeta A81 tras 1 semana.....    | 78 |
| Figura A2-59 Estado probeta A81 tras 2 semanas .....  | 79 |
| Figura A2-60 Estado final probeta A81 .....           | 79 |
| Figura A2-61 Estado inicial probeta A82.....          | 79 |
| Figura A2-62 Estado probeta A82 tras 1 semana.....    | 79 |
| Figura A2-63 Estado probeta A82 tras 2 semanas .....  | 79 |
| Figura A2-64 Estado final probeta A82 .....           | 79 |
| Figura A2-65 Estado inicial probeta A91.....          | 79 |
| Figura A2-66 Estado probeta A91 tras 1 semana.....    | 79 |
| Figura A2-67 Estado probeta A91 tras 2 semanas .....  | 79 |
| Figura A2-68 Estado final probeta A91 .....           | 79 |
| Figura A2-69 Estado inicial probeta A92.....          | 80 |
| Figura A2-70 Estado probeta A92 tras 1 semana.....    | 80 |
| Figura A2-71 Estado probeta A92 tras 2 semanas .....  | 80 |
| Figura A2-72 Estado final probeta A92 .....           | 80 |
| Figura A2-73 Estado inicial probeta A101.....         | 80 |
| Figura A2-74 Estado probeta A101 tras 1 semana.....   | 80 |
| Figura A2-75 Estado probeta A101 tras 2 semanas ..... | 80 |
| Figura A2-76 Estado final probeta A101 .....          | 80 |
| Figura A2-77 Estado inicial probeta A102.....         | 80 |
| Figura A2-78 Estado probeta A102 tras 1 semana.....   | 80 |
| Figura A2-79 Estado probeta A102 tras 2 semanas ..... | 81 |
| Figura A2-80 Estado final probeta A102 .....          | 81 |
| Figura A2-81 Estado inicial probeta A111.....         | 81 |
| Figura A2-82 Estado probeta A111 tras 1 semana.....   | 81 |
| Figura A2-83 Estado probeta A111 tras 2 semanas ..... | 81 |
| Figura A2-84 Estado final probeta A111 .....          | 81 |
| Figura A2-85 Estado inicial probeta A112.....         | 81 |
| Figura A2-86 Estado probeta A112 tras 1 semana.....   | 81 |
| Figura A2-87 Estado probeta 112 tras 2 semanas .....  | 81 |
| Figura A2-88 Estado final probeta A112 .....          | 81 |
| Figura A2-89 Estado inicial probeta A121.....         | 82 |
| Figura A2-90 Estado probeta A121 tras 1 semana.....   | 82 |
| Figura A2-91 Estado probeta A121 tras 2 semanas ..... | 82 |
| Figura A2-92 Estado final probeta A121 .....          | 82 |

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| Figura A2-93 Estado inicial probeta A122.....          | 82 |
| Figura A2-94 Estado probeta A122 tras 1 semana.....    | 82 |
| Figura A2-95 Estado probeta A122 tras 2 semanas .....  | 82 |
| Figura A2-96 Estado final probeta A122 .....           | 82 |
| Figura A2-97 Estado inicial probeta A131.....          | 82 |
| Figura A2-98 Estado probeta A131 tras 1 semana.....    | 82 |
| Figura A2-99 Estado probeta A131 tras 2 semanas .....  | 83 |
| Figura A2-100 Estado final probeta A131 .....          | 83 |
| Figura A2-101 Estado inicial probeta A132.....         | 83 |
| Figura A2-102 Estado probeta A132 tras 1 semana.....   | 83 |
| Figura A2-103 Estado probeta A132 tras 2 semanas ..... | 83 |
| Figura A2-104 Estado final probeta A132 .....          | 83 |
| Figura A2-105 Estado inicial probeta A141.....         | 83 |
| Figura A2-106 Estado probeta A141 tras 1 semana.....   | 83 |
| Figura A2-107 Estado probeta A141 tras 2 semanas ..... | 83 |
| Figura A2-108 Estado final probeta A141 .....          | 83 |
| Figura A2-109 Estado inicial probeta A142.....         | 84 |
| Figura A2-110 Estado probeta A142 tras 1 semana.....   | 84 |
| Figura A2-111 Estado probeta A142 tras 2 semanas ..... | 84 |
| Figura A2-112 Estado final probeta A142 .....          | 84 |
| Figura A2-113 Estado inicial probeta A151.....         | 84 |
| Figura A2-114 Estado probeta A151 tras 1 semana.....   | 84 |
| Figura A2-115 Estado probeta A151 tras 2 semanas ..... | 84 |
| Figura A2-116 Estado final probeta A151 .....          | 84 |
| Figura A2-117 Estado inicial probeta A152.....         | 84 |
| Figura A2-118 Estado probeta A152 tras 1 semana.....   | 84 |
| Figura A2-119 Estado probeta A152 tras 2 semanas ..... | 85 |
| Figura A2-120 Estado final probeta A152 .....          | 85 |
| Figura A2-121 Estado inicial probeta A161.....         | 85 |
| Figura A2-122 Estado probeta A161.....                 | 85 |
| Figura A2-123 Estado probeta A161 tras 2 semanas ..... | 85 |
| Figura A2-124 Estado final probeta A161 .....          | 85 |
| Figura A2-125 Estado inicial probeta A162.....         | 85 |
| Figura A2-126 Estado probeta A162 tras 1 semana.....   | 85 |
| Figura A2-127 Estado probeta A162 tras 2 semanas ..... | 85 |

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| Figura A2-128 Estado final probeta A162 .....       | 85 |
| Figura A3-1 Estado inicial probeta B11 .....        | 87 |
| Figura A3-2 Estado probeta B11 tras 1 semana .....  | 87 |
| Figura A3-3 Estado probeta B11 tras 2 semanas.....  | 87 |
| Figura A3-4 Estado final probeta B11 .....          | 87 |
| Figura A3-5 Estado inicial probeta B12 .....        | 87 |
| Figura A3-6 Estado probeta B12 tras 1 semana .....  | 87 |
| Figura A3-7 Estado probeta B12 tras 2 semanas.....  | 87 |
| Figura A3-8 Estado final probeta B12 .....          | 87 |
| Figura A3-9 Estado inicial probeta B21 .....        | 88 |
| Figura A3-10 Estado probeta B21 tras 1 semana ..... | 88 |
| Figura A3-11 Estado probeta B21 tras 2 semanas..... | 88 |
| Figura A3-12 Estado final probeta B21.....          | 88 |
| Figura A3-13 Estado inicial probeta B22 .....       | 88 |
| Figura A3-14 Estado probeta B22 tras 1 semana ..... | 88 |
| Figura A3-15 Estado probeta B22 tras 2 semanas..... | 88 |
| Figura A3-16 Estado final probeta B22.....          | 88 |
| Figura A3-17 Estado inicial probeta B31 .....       | 88 |
| Figura A3-18 Estado probeta B31 tras 1 semana ..... | 88 |
| Figura A3-19 Estado probeta B31 tras 2 semanas..... | 89 |
| Figura A3-20 Estado final probeta B31.....          | 89 |
| Figura A3-21 Estado inicial probeta B32 .....       | 89 |
| Figura A3-22 Estado probeta B32 tras 1 semana ..... | 89 |
| Figura A3-23 Estado probeta B32 tras 2 semanas..... | 89 |
| Figura A3-24 Estado final probeta B32.....          | 89 |
| Figura A3-25 Estado inicial probeta B41 .....       | 89 |
| Figura A3-26 Estado probeta B41 tras 1 semana ..... | 89 |
| Figura A3-27 Estado probeta B41 tras 2 semanas..... | 89 |
| Figura A3-28 Estado final probeta B41.....          | 89 |
| Figura A3-29 Estado inicial probeta B42 .....       | 90 |
| Figura A3-30 Estado probeta B42 tras 1 semana ..... | 90 |
| Figura A3-31 Estado probeta B42 tras 2 semanas..... | 90 |
| Figura A3-32 Estado final probeta B42.....          | 90 |
| Figura A3-33 Estado inicial probeta B51 .....       | 90 |
| Figura A3-34 Estado probeta B51 tras 1 semana ..... | 90 |
| Figura A3-35 Estado probeta B51 tras 2 semanas..... | 90 |

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| Figura A3-36 Estado final probeta B51.....          | 90 |
| Figura A3-37 Estado inicial probeta B52.....        | 90 |
| Figura A3-38 Estado probeta B52 tras 1 semana ..... | 90 |
| Figura A3-39 Estado probeta B52 tras 2 semanas..... | 91 |
| Figura A3-40 Estado final probeta B52.....          | 91 |
| Figura A3-41 Estado inicial probeta B61.....        | 91 |
| Figura A3-42 Estado probeta B61 tras 1 semana ..... | 91 |
| Figura A3-43 Estado probeta B61 tras 2 semanas..... | 91 |
| Figura A3-44 Estado final probeta B61.....          | 91 |
| Figura A3-45 Estado inicial probeta B62.....        | 91 |
| Figura A3-46 Estado probeta B62 tras 1 semana ..... | 91 |
| Figura A3-47 Estado probeta B62 tras 2 semanas..... | 91 |
| Figura A3-48 Estado final probeta B62.....          | 91 |
| Figura A3-49 Estado inicial probeta B71 .....       | 92 |
| Figura A3-50 Estado probeta B71 tras 1 semana ..... | 92 |
| Figura A3-51 Estado probeta B71 tras 2 semanas..... | 92 |
| Figura A3-52 Estado final probeta B71.....          | 92 |
| Figura A3-53 Estado inicial probeta B72.....        | 92 |
| Figura A3-54 Estado probeta B72 tras 1 semana ..... | 92 |
| Figura A3-55 Estado probeta B72 tras 2 semanas..... | 92 |
| Figura A3-56 Estado final probeta B72.....          | 92 |
| Figura A3-57 Estado inicial probeta B81 .....       | 92 |
| Figura A3-58 Estado probeta B81 tras 1 semana ..... | 92 |
| Figura A3-59 Estado probeta B81 tras 2 semanas..... | 93 |
| Figura A3-60 Estado final probeta B81.....          | 93 |
| Figura A3-61 Estado inicial probeta B82.....        | 93 |
| Figura A3-62 Estado probeta B82 tras 1 semana ..... | 93 |
| Figura A3-63 Estado probeta B82 tras 2 semanas..... | 93 |
| Figura A3-64 Estado final probeta B82.....          | 93 |
| Figura A3-65 Estado inicial probeta B91.....        | 93 |
| Figura A3-66 Estado probeta B91 tras 1 semana ..... | 93 |
| Figura A3-67 Estado probeta B91 tras 2 semanas..... | 93 |
| Figura A3-68 Estado final probeta B91.....          | 93 |
| Figura A3-69 Estado inicial probeta B92.....        | 94 |
| Figura A3-70 Estado probeta B92 tras 1 semana ..... | 94 |

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| Figura A3-71 Estado probeta B92 tras 2 semanas.....   | 94 |
| Figura A3-72 Estado final probeta B92.....            | 94 |
| Figura A3-73 Estado inicial probeta B101.....         | 94 |
| Figura A3-74 Estado probeta B101 tras 1 semana.....   | 94 |
| Figura A3-75 Estado probeta B101 tras 2 semanas.....  | 94 |
| Figura A3-76 Estado final probeta B101.....           | 94 |
| Figura A3-77 Estado inicial probeta B102.....         | 94 |
| Figura A3-78 Estado probeta B102 tras 1 semana.....   | 94 |
| Figura A3-79 Estado probeta B102 tras 2 semanas.....  | 95 |
| Figura A3-80 Estado final probeta B102.....           | 95 |
| Figura A3-81 Estado inicial probeta B111.....         | 95 |
| Figura A3-82 Estado probeta B111 tras 1 semana.....   | 95 |
| Figura A3-83 Estado probeta B111 tras 2 semanas.....  | 95 |
| Figura A3-84 Estado final probeta B111.....           | 95 |
| Figura A3-85 Estado inicial probeta B112.....         | 95 |
| Figura A3-86 Estado probeta B112 tras 1 semana.....   | 95 |
| Figura A3-87 Estado probeta B112 tras 2 semanas.....  | 95 |
| Figura A3-88 Estado final probeta B112.....           | 95 |
| Figura A3-89 Estado inicial probeta B121.....         | 96 |
| Figura A3-90 Estado probeta B121 tras 1 semana.....   | 96 |
| Figura A3-91 Estado probeta B121 tras 2 semanas.....  | 96 |
| Figura A3-92 Estado final probeta B121.....           | 96 |
| Figura A3-93 Estado inicial probeta B122.....         | 96 |
| Figura A3-94 Estado probeta B122 tras 1 semana.....   | 96 |
| Figura A3-95 Estado probeta B122 tras 2 semanas.....  | 96 |
| Figura A3-96 Estado final probeta B122.....           | 96 |
| Figura A3-97 Estado inicial probeta B131.....         | 96 |
| Figura A3-98 Estado probeta B131 tras 1 semana.....   | 96 |
| Figura A3-99 Estado probeta B131 tras 2 semanas.....  | 97 |
| Figura A3-100 Estado final probeta B131.....          | 97 |
| Figura A3-101 Estado inicial probeta B132.....        | 97 |
| Figura A3-102 Estado probeta B132 tras 1 semana.....  | 97 |
| Figura A3-103 Estado probeta B132 tras 2 semanas..... | 97 |
| Figura A3-104 Estado final probeta B132.....          | 97 |
| Figura A3-105 Estado inicial probeta B141.....        | 97 |
| Figura A3-106 Estado probeta B141 tras 1 semana.....  | 97 |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A3-107 Estado probeta B141 tras 2 semanas.....                             | 97  |
| Figura A3-108 Estado final probeta B141 .....                                     | 97  |
| Figura A3-109 Estado inicial probeta B142.....                                    | 98  |
| Figura A3-110 Estado probeta B142 tras 1 semana .....                             | 98  |
| Figura A3-111 Estado probeta B142 tras 2 semanas.....                             | 98  |
| Figura A3-112 Estado final probeta B142 .....                                     | 98  |
| Figura A3-113 Estado inicial probeta B151 .....                                   | 98  |
| Figura A3-114 Estado probeta B151 tras semana .....                               | 98  |
| Figura A3-115 Estado probeta B151 tras 1 semana .....                             | 98  |
| Figura A3-116 Estado final probeta B151 .....                                     | 98  |
| Figura A3-117 Estado inicial probeta B152.....                                    | 98  |
| Figura A3-118 Estado probeta B152 tras 1 semana .....                             | 98  |
| Figura A3-119 Estado probeta B152 tras 2 semanas.....                             | 99  |
| Figura A3-120 Estado final probeta B152 .....                                     | 99  |
| Figura A3-121 Estado inicial probeta B161.....                                    | 99  |
| Figura A3-122 Estado probeta B161 tras 1 semana .....                             | 99  |
| Figura A3-123 Estado probeta B161 tras 2 semanas.....                             | 99  |
| Figura A3-124 Estado final probeta B161 .....                                     | 99  |
| Figura A3-125 Estado inicial probeta B162.....                                    | 99  |
| Figura A3-126 Estado probeta B162 tras 1 semana .....                             | 99  |
| Figura A3-127 Estado probeta B162 tras 2 semanas.....                             | 99  |
| Figura A3-128 Estado final probeta B162 .....                                     | 99  |
| Figura A6-1 Microscopio óptico de marca Krüss optronic y modelo MBL3300 [53]..... | 109 |
| Figura A6-2 Medidor de pH HI 98103 [54] .....                                     | 110 |
| Figura A6-3 Fuente de corriente TRP-3000 [55] .....                               | 111 |
| Figura A6-4 Balanza de precisión Blauscal AH-150 [56] .....                       | 111 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1-1 Potenciales electroquímicos a pH 0 [6].....                                                                    | 18  |
| Tabla 1-2 Principales gases disueltos en el agua de mar [9] .....                                                        | 20  |
| Tabla 1-3 Principales iones disueltos en el agua de mar (mg/L) [10] .....                                                | 21  |
| Tabla 1-4 Porcentaje límite de elementos en aceros al carbono [19] .....                                                 | 24  |
| Tabla 1-5 Composición de los aceros según la ASTM [21].....                                                              | 25  |
| Tabla 3-1 Combinación de variables normalizadas generadas por el programa Statistics.....                                | 34  |
| Tabla 3-2 Valor real de las variables normalizadas .....                                                                 | 36  |
| Tabla 3-3 Masa y porcentaje de corrosión iniciales de las probetas .....                                                 | 42  |
| Tabla 4-1 Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando $I = 0$ A .....                                          | 45  |
| Tabla 4-2 Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando $I = 0,05$ e $I = 0,1$ A.....                            | 46  |
| Tabla 4-3 Ecuaciones predictivas para el cálculo del porcentaje de corrosión visual para $I = 0$ A .48                   |     |
| Tabla 4-4 Ecuaciones predictivas para el cálculo del porcentaje de corrosión visual para $I = 0,05$ A e $I = 0,1$ A..... | 49  |
| Tabla 4-5 Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando $I = 0$ A .....                                          | 52  |
| Tabla 4-6 Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando $I = 0,05$ e $I = 0,1$ A.....                            | 53  |
| Tabla 4-7 Ecuaciones predictivas para el cálculo del porcentaje de corrosión visual para $I = 0$ A .55                   |     |
| Tabla 4-8 Ecuaciones predictivas para el cálculo del porcentaje de corrosión visual para $I = 0,05$ A e $I = 0,1$ A..... | 56  |
| Tabla 4-9 Variación de masa real-prevista (g) .....                                                                      | 61  |
| Tabla 4-10 Variación del porcentaje de corrosión visual real-previsto.....                                               | 62  |
| Tabla 4-11 Variación de la velocidad de corrosión real-prevista (mm/año) .....                                           | 63  |
| Tabla A1-1 Características técnicas acero "A" [52].....                                                                  | 71  |
| Tabla A1-2 Características técnicas acero "B" [52] .....                                                                 | 71  |
| Tabla A4-1 Resultados de la variación de masa.....                                                                       | 102 |
| Tabla A4-2 Resultados del porcentaje de corrosión visual .....                                                           | 103 |
| Tabla A4-3 Resultados de la velocidad de corrosión .....                                                                 | 104 |
| Tabla A5-1 Resultados de la variación de masa.....                                                                       | 106 |
| Tabla A5-2 Resultados del porcentaje de corrosión visual .....                                                           | 107 |
| Tabla A5-3 Resultados de la velocidad de corrosión .....                                                                 | 108 |
| Tabla A6-1 Características del microscopio MBL 3300 de la marca Krüss optronic [53] .....                                | 109 |
| Tabla A6-2 Característica técnicas medidor de pH HI 98103 [54] .....                                                     | 110 |
| Tabla A6-3 Características técnicas fuente de corriente TRP-3000 [55] .....                                              | 110 |
| Tabla A6-4 Características técnicas de la balanza de precisión Blauscal AH-150 [56] .....                                | 111 |



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Justificación

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) nace con el objetivo general de profundizar en la importancia del conocimiento y el estudio de la corrosión del acero empleado en entornos marítimos.

La corrosión es un problema experimentado por los cascos de los buques desde que se pasó de navegar en barcos de madera a barcos de metal. Esto provoca que la corrosión sea el principal factor de mantenimiento del casco de los buques a lo largo de toda su vida útil y que, además, sea un problema que acarrea grandes costes económicos tanto a nivel nacional como a nivel mundial.

Observando los presupuestos generales del estado para el año 2017, y más concretamente el presupuesto asignado al Ministerio de Defensa [1], se puede apreciar que la Dirección de Mantenimiento de la Armada gasta más de 50 millones de euros anuales en el “mantenimiento del funcionamiento operativo de los buques”. De estos 50 millones, una gran cantidad es debida a los problemas derivados de la corrosión. Además la corrosión, entre otras causas, provoca que aproximadamente cada dos años un buque entre en varada para poder realizarse un correcto mantenimiento del casco. En un plano más internacional, observando los análisis realizados por el departamento central de transportes de Estados Unidos [2] se puede ver que en el año 2002 el coste derivado de la corrosión en los medios de transporte norteamericanos era de más de 137 mil millones de dólares.

Por todo ello y debido a la gran cantidad de recursos y tiempo invertido por la Armada para paliar los efectos de la corrosión, resulta de gran interés determinar los factores que más afectan al proceso de degradación del acero que está en contacto con el agua del mar, tanto a nivel individual, como su efecto sinérgico, de manera que pueda contribuirse a paliar el efecto de la corrosión de los aceros de los buques, así como sus consecuencias.

## 1.2 Fundamentos de la Corrosión

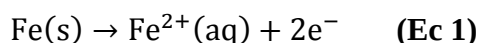
La Real Academia Española (RAE) define la corrosión como: *“Desgaste paulatino de los cuerpos metálicos por acción de agentes externos, persista o no su forma.”* [3]. Sin embargo, según la American Society of Materials (ASM), la corrosión se define como: *“Deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno”* [4].

Ambas definiciones coinciden en que es un proceso negativo, debido a que se produce un desgaste o deterioro del material corroído y que además es causado por agentes externos de su entorno más próximo.

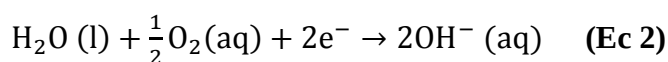
### 1.2.1 Fenómeno de la Corrosión

Como se puede deducir de las distintas definiciones expuestas anteriormente, la corrosión es un término que se utiliza para describir el proceso de deterioro de materiales metálicos mediante reacciones químicas. Estas reacciones presentes en los procesos de corrosión están constituidas por reacciones electroquímicas de reducción-oxidación (redox). Para que estas reacciones redox tengan lugar hacen falta cuatro elementos: los electrodos (un ánodo y un cátodo) en contacto, un electrolito, que será el medio conductor de corriente por medio de un transporte de iones, y una corriente eléctrica conectada a los electrodos. Una vez está establecida la conexión se producen las siguientes reacciones, que se pueden ilustrar con el ejemplo del hierro en agua.

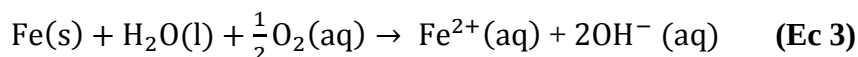
En el ánodo se produce la semireacción de oxidación:



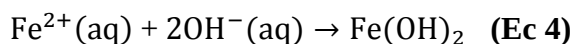
En el cátodo se produce la semireacción de reducción:



Reacción redox completa:



Ambas reacciones ocurren de forma simultánea y, como se sigue de las ecuaciones, el hierro cede electrones al sistema, aumentando su número de oxidación, siendo este material el que se sufre el fenómeno de corrosión. Por su parte, en el cátodo, las especies captan los electrones liberados en el ánodo y disminuyen su número de oxidación. Finalmente, los iones generados se combinan dando lugar a los productos de la corrosión. En nuestro ejemplo, el  $\text{Fe}^{2+}$  y el  $\text{OH}^{-}$  pasarán a formar hidróxido de hierro (II):



La facilidad con la que un metal se oxida viene dada por el potencial electroquímico, que se define como la susceptibilidad o la resistencia de un material metálico a sufrir el fenómeno de la corrosión, y cuyo valor varía según la composición del medio en el que se encuentre. Cuanto más negativo sea el valor del potencial, más susceptible de sufrir corrosión será ese material. Por el contrario, cuanto más positivo sea dicho valor del potencial, más noble es el metal y, por tanto, más resistente a la corrosión [5]. En la Tabla 1-1 se puede ver un extracto del potencial electroquímico de varios elementos.

| Semirreacción                                                                          | $E^0$ (V) |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| $\text{Na}^{+}(\text{aq}) + \text{e}^{-} \rightarrow \text{Na (s)}$                    | -2,71     |
| $\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Fe (s)}$                  | -0,44     |
| $\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^{+} + 4\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ | +1,23     |
| $\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{Cl}^{-}(\text{aq})$          | +1,36     |

**Tabla 1-1 Potenciales electroquímicos a pH 0 [6]**

Los productos formados sobre la superficie del metal que ha sufrido la corrosión pueden afectar a sus propiedades tanto positiva como negativamente. Existen metales como el aluminio, el níquel o el cromo, donde los productos de la corrosión tienen una mayor densidad que el metal original. Estos productos forman una capa sólida y estable sobre la superficie del metal y evitan así que la corrosión se extienda, provocando además que se proteja el material. Este proceso es conocido como pasivación.

Sin embargo, existen otros metales, como el hierro, donde el producto que se forma de la corrosión, conocido como herrumbre, tiene una menor densidad que el metal original. Esto provoca que este producto se desprenda de la superficie y facilite que la corrosión pueda continuar, lo que da lugar a que se acabe consumiendo el material [5].

### 1.2.2 Tipos de Corrosión

Existen múltiples maneras de clasificar la corrosión pero, en general, todas dependerán de la naturaleza del material y de las condiciones medioambientales donde se desarrolle el proceso de corrosión. Una forma común de clasificar los tipos de corrosión es función de la uniformidad con la que afecte el proceso de corrosión al material [5].

La **corrosión generalizada**, también conocida como corrosión uniforme, ocurre cuando el proceso corrosivo se produce sobre toda la superficie del material de forma homogénea, provocando que se deteriore completamente. Este tipo de corrosión es la que mayor pérdida de material provoca y se puede observar en materiales derivados del hierro, siempre y cuando no este aleado con materiales inoxidables, como el níquel o el cromo.

La **corrosión localizada** consiste en un ataque profundo en un determinado punto del metal. Este tipo de corrosión es más complicada de localizar y representa un mayor riesgo potencial que la corrosión uniforme. Esto es debido al pequeño diámetro de las perforaciones y a que además, estas perforaciones están recubiertas con los productos de la corrosión.

### 1.2.3 Técnicas para Retrasar la Corrosión

Debido a los efectos negativos derivados de los procesos de corrosión, se están desarrollando diferentes técnicas para retrasar, controlar o paliar los efectos de dicho proceso. En general, estas técnicas se centran en suprimir alguno de los cuatro elementos necesarios para que se produzcan las reacciones de corrosión [7].

Los **inhibidores** son una serie de sustancias químicas que, al añadirse al medio corrosivo, disminuyen la velocidad de corrosión. Existen varios tipos inhibidores. Por un lado están los inhibidores anódicos, también llamados pasivadores, los cuales son sustancias oxidantes que aumentan el potencial electroquímico del material que se desea proteger volviéndolo más noble y, por tanto, más resistente a la corrosión. Por otra parte están los inhibidores catódicos cuya función es controlar el pH del medio corrosivo impidiendo que se produzcan las reacciones de reducción.

Los **recubrimientos** son materiales que se depositan sobre el metal que se desea que no se corroa. Estos materiales se pueden clasificar atendiendo a su naturaleza (orgánica o metálica):

- Los recubrimientos orgánicos son pinturas hechas a base de polímeros resistentes a la degradación. Estas pinturas actúan como barrera, impidiendo la penetración de oxígeno y del agua, al incrementar tanto la resistividad eléctrica como la iónica, cortando el ciclo de corrosión.
- Los recubrimientos metálicos son metales que tienen mayor resistencia a la corrosión que el que se desea proteger. Existen diferentes métodos para efectuar estos recubrimientos, y los más utilizados son la galvanoplastia y el galvanizado. La diferencia entre ambos es que la galvanoplastia es un proceso de protección en el que se utiliza una corriente eléctrica externa para depositar el metal protector, mientras que en el galvanizado el material a proteger se sumerge en un baño de un metal con mayor potencial electroquímico.

La **protección catódica** consiste en modificar el valor del potencial electroquímico del material a proteger, haciendo que este material se comporte como un cátodo. Se emplea sobre todo en elementos sumergidos en agua de mar. Existen varias formas de lograr esto. Por un lado se puede usar un ánodo de sacrificio, lo que se consigue conectando eléctricamente un material con menor potencial

electroquímico; de esta forma, este material se comportará como el ánodo del sistema y por tanto protegerá al material debido a que será degradado él por la corrosión en lugar del material a proteger. Por otro lado tenemos la técnica de corriente impresa, que es una ampliación de la técnica del ánodo de sacrificio. Aquí, a mayores de hacer lo descrito para el ánodo de sacrificio, hay que inyectar una corriente eléctrica externa al sistema, debido a que el sistema por sí solo no genera suficiente corriente para poder formar la celda electroquímica.

La **protección anódica** consiste en disminuir el potencial electroquímico del material a proteger. Para ello, se inyecta una corriente externa en el material volviéndolo más anódico. Esto provoca que se induzca al material hacia un estado de pasivación. Al mantener la corriente externa, la capa de pasivación continúa en constante regeneración evitando que se deteriore el material. Esta técnica solo puede ser empleada en metales pasivables.

### 1.3 Agua de Mar

El concepto de agua de mar se refiere a todo el agua presente tanto en los mares como en los océanos. Este volumen de agua representa, según un estudio de National Geographic [8], aproximadamente el 98% de todo el agua presente en la hidrosfera terrestre.

#### 1.3.1 Composición

La composición del agua de mar varía en función de la zona del planeta donde se encuentre el agua. Por lo tanto, sus características sufrirán variaciones en función de la parte del globo en la que se encuentre, así como de la época de año. Esta variación afecta a muchos parámetros, entre los que se encuentra la densidad, que para una temperatura media en superficie de 17 °C es de aproximadamente de entre 1025 y 1026 kg/m<sup>3</sup>.

El agua de mar es una gran disolución donde el H<sub>2</sub>O actúa como disolvente para infinidad de compuestos, tanto sólidos como gaseosos, que, además y como ya se ha indicado, varían en su cantidad según la zona geográfica que se considere.

Por un lado, el agua tiene disueltas sustancias gaseosas. Éstas son las mismas que se pueden encontrar en la atmósfera si bien en un porcentaje algo diferente. Como se puede ver en la Tabla 1-2, el porcentaje de oxígeno disuelto en el agua del mar es mayor mientras que el de nitrógeno disminuye respecto a sus correspondientes concentraciones atmosféricas. También es destacable el aumento de CO<sub>2</sub>, que tiene una influencia demostrada en la acidificación paulatina que está sufriendo el marino.

| Compuesto                    | % Atmósfera | % Agua de mar |
|------------------------------|-------------|---------------|
| N <sub>2</sub>               | 78,08       | 69,3          |
| O <sub>2</sub>               | 20,94       | 33,4          |
| CO <sub>2</sub>              | 0,03        | 1,4           |
| Otros gases (He, Ar, Xe ...) | 0,95        | 1,6           |

Tabla 1-2 Principales gases disueltos en el agua de mar [9]

Respecto a la salinidad (parámetro que se hace referencia a la concentración de sales disueltas), el valor medio mundial en superficie se sitúa en 34,5 g/L, mientras que el mismo parámetro en el océano atlántico norte es ligeramente superior, con un valor aproximado de 35 g/L. Además de la zona geográfica que se considere, la concentración de sales también varía con la profundidad, descendiendo a medida que descendemos en el mar. Ello se debe a la disminución de las temperaturas a medida que se desciende por el lecho marino [9].

La Tabla 1-3 indica la cantidad media de los principales iones disueltos en el agua de mar. Se puede ver que el anión  $\text{Cl}^-$  es el que se encuentra disuelto en mayor concentración.

| Iones                     | Valores promedio del agua de mar | Mediterráneo Este | Golfo Arábico (Kuwait) | Mar Rojo (Jeddah) |
|---------------------------|----------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| $\text{Cl}^-$             | 18980                            | 21200             | 23000                  | 22219             |
| $\text{Na}^+$             | 10556                            | 11800             | 15850                  | 14255             |
| $\text{SO}_4^{2-}$        | 2649                             | 2950              | 3200                   | 3078              |
| $\text{Mg}^{2+}$          | 1262                             | 1403              | 1765                   | 742               |
| $\text{Ca}^{2+}$          | 400                              | 423               | 500                    | 225               |
| $\text{K}^+$              | 380                              | 463               | 460                    | 210               |
| $\text{HCO}_3^-$          | 140                              | ND                | 142                    | 146               |
| $\text{Sr}^{2+}$          | 13                               | ND                | ND                     | ND                |
| $\text{Br}^-$             | 65                               | 155               | 80                     | 72                |
| $\text{BO}_3^{3-}$        | 26                               | 72                | ND                     | ND                |
| $\text{F}^-$              | 1                                | ND                | ND                     | ND                |
| $\text{SiO}_3^{2-}$       | 1                                | ND                | 1,5                    | ND                |
| $\text{I}^-$              | <1                               | 2                 | ND                     | ND                |
| Sólidos totales disueltos | 34483                            | 38600             | 45000                  | 41000             |

**Tabla 1-3 Principales iones disueltos en el agua de mar (mg/L) [10]**

### 1.3.2 Características

Las características del agua de mar son muy parecidas a las del agua dulce, pero con algunas variaciones. Además hay que indicar que muchas de sus propiedades físicas están determinadas por la temperatura del agua o de la concentración de compuestos disueltos en un momento determinado.

La temperatura, al igual que la concentración de sales, varía con la profundidad. A medida que descendemos la temperatura va disminuyendo hasta estabilizarse aproximadamente a 4 °C a grandes profundidades en la conocida como zona termoclina. Sin embargo, la temperatura del agua de mar en superficie, ha ido aumentando a lo largo de los últimos años, lo que provoca el aumento del nivel del mar [12]. Actualmente la temperatura media del agua del mar se sitúa, aproximadamente, en 17 °C, si bien los valores de la temperatura varían tanto con la época del año como con la zona del globo en la que se esté y van desde los -2 °C en las zonas polares hasta los 36 °C en las zonas ecuatoriales, tal como se puede observar en la Figura 1-1.

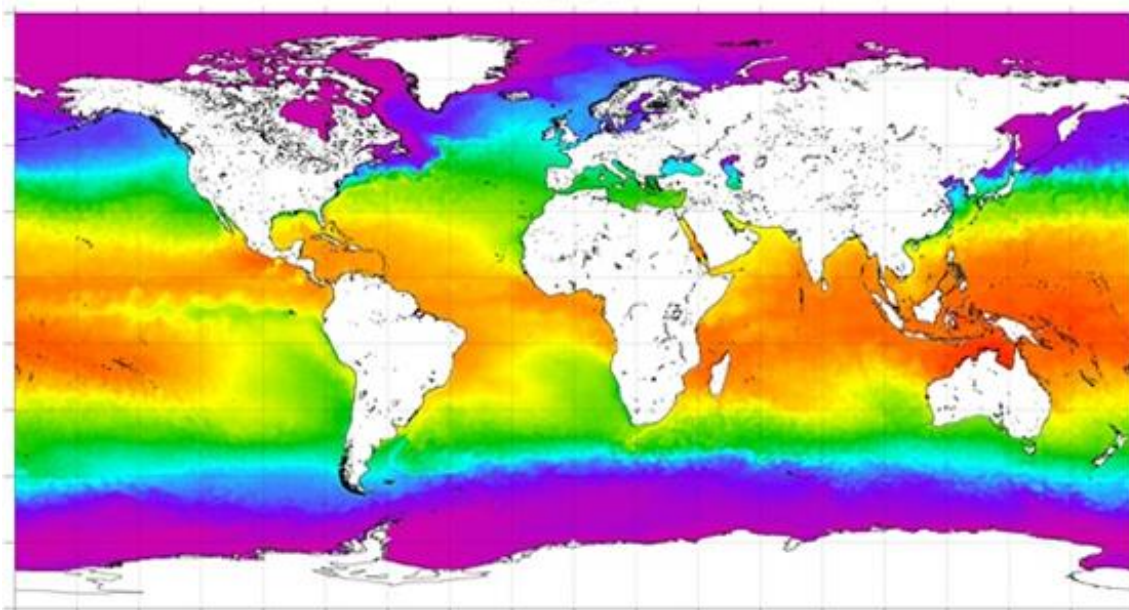


**Figura 1-1 Diferencias de temperaturas del agua de mar en superficie durante el día 02/01/2018 [13]**

En ambientes oceánicos, el pH puede alcanzar valores ligeramente alcalinos, con valores oscilando entre 7,5 y 8,5 y con un valor medio aproximado para el Atlántico Norte de 7,8 [13]. Estos valores de pH aumentan o disminuyen en función de la profundidad, concentración de sales y temperatura del agua del mar. También hay que tener en cuenta que, según el estudio previamente mencionado [8], en 2050 el agua de mar será un 150% más ácida que en 1800. Es decir, las aguas oceánicas están dejando de ser alcalinas. Esto es debido a la gran cantidad de  $\text{CO}_2$  que se encuentra disuelto en ellas, tanto por motivos naturales, como son las erupciones volcánicas submarinas, como por causas antropogénicas. Sin embargo, mientras que se ha descrito una tendencia hacia la acidificación de las aguas como consecuencia del cambio climático y la absorción de  $\text{CO}_2$ , es importante reseñar que los valores más ácidos en las aguas se observan en las cercanías de los puertos, donde la contaminación de origen urbano y/o industrial parece ser la responsable de la disminución del pH.

Otra de las características destacables del agua de mar es la buena conductividad que presenta. Como se ha explicado anteriormente, en el agua de mar se encuentran disueltas diversas sustancias. Las sales en el agua se encuentran disociadas, lo que le otorga al agua esa buena conductividad de la electricidad. De hecho, la conductividad del agua de mar es aproximadamente de 56 mS/cm, lo que significa que es entre 70 y 110 veces mejor conductora que el agua dulce doméstica (500 – 800  $\mu\text{S/cm}$ ) [15].

### *1.3.3 Influencia del Agua de Mar en la Corrosión*

El agua de mar se comporta como un electrolito corrosivo en los procesos de corrosión debido a que lleva un alto contenido de distintas sales disueltas. El modo en el que el agua de mar influye en los metales bañados por ella, está relacionada con los distintos parámetros derivados de su composición, descritos en el apartado 1.3.1.

El proceso de corrosión es el mismo que se produce en tierra, es decir, está causado por la interacción del hierro y carbono con el oxígeno. Sin embargo, se ve incentivado por distintos factores. Por un lado están los aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ...) disueltos en el agua que ayudan a las reacciones redox y, por otro, la temperatura que, al aumentar, provoca que se aumente la velocidad de la reacción. También es destacable la influencia del componente biológico, tanto los microorganismos, que usan los huecos producto de la corrosión para vivir, como los organismos superiores (por ejemplo, los moluscos) que pueden arrancar capas de protección frente a la corrosión de los materiales [16].

## 1.4 Acero en la Construcción Naval

La RAE define el acero como: “Aleación de hierro y carbono, en la que éste entra en una proporción entre el 0,02 y el 2%, y que, según su tratamiento, adquiere especial elasticidad, dureza o resistencia” [3].

Como se sigue de esta definición, el acero es un material constituido mayoritariamente por hierro. Se obtiene en los altos hornos a partir de un mineral de hierro (generalmente un óxido), coque y caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), que se cargan por la parte superior del mismo. Las temperaturas que se alcanzan en el interior del horno varían con la altura y van desde los 200 °C de la parte superior a los 2000 °C de la inferior. Como resultado de las reacciones que se desencadenan se obtiene el arrabio (aleación de Fe con alto contenido en carbono) y la escoria (principalmente  $\text{CaSiO}_3$  que proviene de la reacción de la cal con la ganga silíceas) que se recogen separadamente por la parte inferior del horno. Para obtener el acero propiamente, el arrabio se somete a un proceso de refinado con oxígeno a fin de reducirle la cantidad de carbono, lo que se realiza en un convertidor. En caso de que se quisiera un acero aleado, los materiales aleantes se pueden introducir o bien en el alto horno o una vez extraído el arrabio de éste. [17].

### 1.4.1 Comportamiento de las Aleaciones Fe-C

En función de la temperatura de solidificación y del porcentaje de carbono de la mezcla, en las aleaciones de hierro con carbono se van a producir una serie de fases (Figura 1-2) que le proporcionarán unas características u otras al material final lo que se traducirá en diferentes prestaciones según el uso que se le quiera dar desde el punto de vista mecánico.

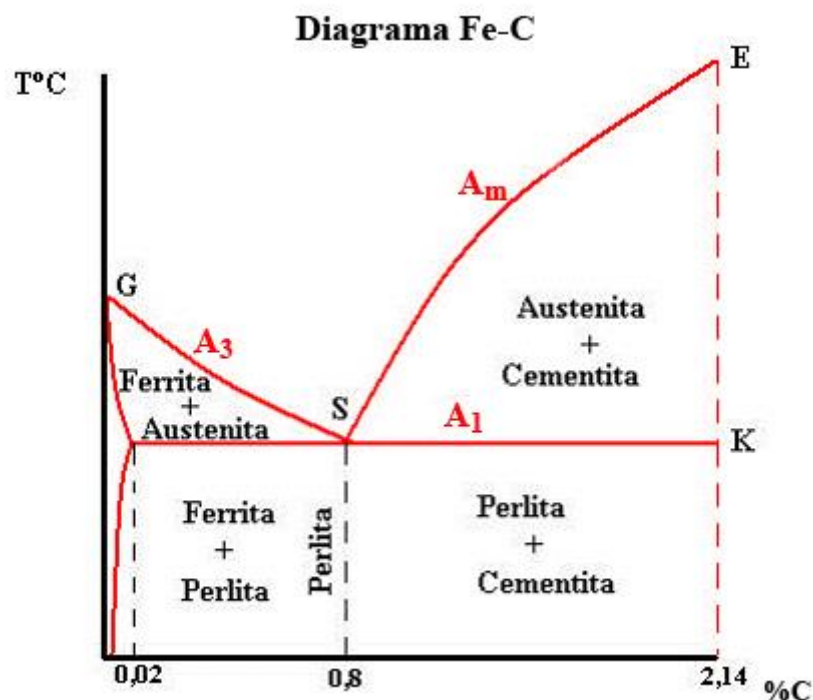


Figura 1-2 Diagrama Fe-C [18]

En la **industria naval** se tiende a usar aceros con bajos porcentajes de carbono y, de hecho, rara vez esos porcentajes superan el 0,21%. Ello se debe a que las planchas de acero empleadas en los cascos deben ser muy duras pero lo suficientemente dúctiles para poder adquirir las formas redondeadas e hidrodinámicas habituales. Así pues, la mayoría de los aceros empleados para buques son hipoeutectoides. Los **aceros hipoeutectoides** son aquellos con un porcentaje de carbono menor del

0,77% y cuya microestructura resultante es una mezcla de perlita y hierro- $\alpha$  cuando el enfriado es lento. El hierro- $\alpha$  es una fase en la que la estructura de los átomos de hierro es cúbica centrada en el cuerpo y los átomos de carbono presentes se sitúan en intersticios. La cantidad de átomos de carbono es muy pequeña y el material resultante, que conserva la dureza, es, además, dúctil y magnético. Por el contrario, por encima del 0,77% de carbono, tendremos aceros hipereutectoides en los que las fases que predominan son perlita y cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) y que, siendo duros, son de difícil mecanización.

#### 1.4.2 Clasificación del Acero según la Norma UNE 10020:2001

En vista de la definición de acero y de cómo se elabora, podemos observar que la proporción añadida de carbono y otros posibles elementos otorgarán distintas clases de aceros con diversas propiedades. Actualmente, los aceros están regulados por la norma UNE 10020:2001, que los clasifica como no aleados, aleados e inoxidable [19].

##### 1.4.2.1 Aceros no aleados

Son aquellos aceros en los cuales, el contenido de cualquier elemento aleante, a excepción del carbono, es inferior a la cantidad mostrada en la Tabla 1-4. Este grupo se puede subdividir en función del contenido de carbono presente en el acero:

- *Aceros de bajo carbono*: Porcentaje de carbono menor al 0,25%.
- *Aceros de medio carbono*: Porcentaje de carbono entre el 0,25 y 0,55%.
- *Aceros de alto carbono*: Porcentaje de carbono entre el 0,55 y 2%.

Las características de estos aceros varían en función del porcentaje de carbono. Tendrán mayor resistencia y dureza cuanto mayor sea su porcentaje de carbono.

| Elementos                                                                         | Porcentaje máximo permitido |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Mn                                                                                | 1,60                        |
| Si                                                                                | 0,60                        |
| Cu, Pb                                                                            | 0,40                        |
| Cr, Ni                                                                            | 0,30                        |
| Al, Bi, Co, V, W                                                                  | 0,10                        |
| Mo                                                                                | 0,08                        |
| Ti, Nb, Lantánidos y Elementos aleantes no tabulados (a excepción de C, P, N y O) | 0,05                        |
| B                                                                                 | 0,0008                      |

Tabla 1-4 Porcentaje límite de elementos en aceros al carbono [19]

##### 1.4.2.2 Aceros aleados

Son los aceros que, además del carbono, poseen al menos un elemento con un porcentaje mayor al valor límite dado en la Tabla 1-4. A su vez este grupo se puede subdividir en:

- *Aceros de baja aleación*: Porcentaje de elementos aleantes menor del 5%.
- *Aceros de alta aleación*: Porcentaje de elementos aleantes mayor del 5%.

Las características de estos aceros dependen en gran medida de sus elementos aleantes y de la proporción en la que éstos se incorporan. Por ejemplo, el cobre y níquel le proporcionan resistencia a la corrosión, el molibdeno aumenta su tenacidad y el boro su dureza [20].

### 1.4.2.3 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables no son más que aceros aleados, pero la norma UNE los clasifica aparte debido a que poseen unas proporciones determinadas. Se consideran aceros inoxidables aquellos aceros que contienen un mínimo del 10,5% de cromo y un máximo del 1,2% de carbono. Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea el contenido de carbono, menor será la resistencia a la corrosión. Esto es debido a que el carbono se combina con el cromo para formar carburo de cromo, reduciendo así la disponibilidad de cromo libre en el acero y, por lo tanto, su capacidad de pasivación. Estos aceros se caracterizan por su resistencia a la corrosión, alta resistencia y ductilidad.

### 1.4.3 Clasificación de los Aceros Empleados por la Industria Naval

Como se ha detallado, los aceros están clasificados por una norma UNE según su composición; sin embargo, existe una clasificación del acero específica para la industria naval. La *American Society for Testing Materials* (ASTM) ha establecido una norma para la clasificación del acero empleado en las industrias navales. La composición de estos aceros se puede ver en la Tabla 1-5 [21].

| Tipo  | % C  | Min % Mn    | Max % P | Max % S | Max % Si    | Min % Al | % Nb          |
|-------|------|-------------|---------|---------|-------------|----------|---------------|
| A     | 0,21 | 2,5 x % C   | 0,035   | 0,035   | 0,50        | ---      | ---           |
| B     | 0,21 | 0,80        | 0,035   | 0,035   | 0,35        | ---      | ---           |
| D     | 0,21 | 0,70        | 0,035   | 0,035   | 0,10 – 0,35 | 0,020    | ---           |
| E     | 0,18 | 0,70        | 0,035   | 0,035   | 0,10 – 0,35 | 0,020    | ---           |
| AH 36 | 0,18 | 0,70 – 1,60 | 0,035   | 0,035   | 0,50        | 0,020    | 0,020 – 0,050 |
| DH 36 | 0,18 | 0,90 – 1,60 | 0,035   | 0,035   | 0,50        | 0,020    | 0,020 – 0,050 |

Tabla 1-5 Composición de los aceros según la ASTM [21]

Los aceros empleados en los cascos de los buques son aceros suaves con una resistencia a la tracción que varía de 400 a 520 MPa. Los requisitos de tracción son para placas que no excedan los 30 mm de espesor, puesto que las placas con mayores espesores están sujetas a una consideración especial. Como se puede ver en la Tabla 1-5, se especifican cuatro clases de acero generales: A, B, D y E. Aunque estos cuatro aceros poseen la misma resistencia a la tracción, se caracterizan por un grado creciente de tenacidad. A parte de los cuatro tipos de acero generales, existen otros dos tipos más de acero que poseen grados de resistencia a la tracción mayores. Estos dos tipos son el AH36, e el DH36, con resistencias a tracción de entre 490 y 620 MPa.

### 1.4.4 Aceros Empleados en la Industria Naval Militar

Como se ha visto en el apartado anterior, el acero es una pieza fundamental del proceso de construcción naval. Sin embargo, en la industria naval se emplean otros muchos materiales metálicos como pueden ser también el cobre o el aluminio.

La tendencia actual del mundo de la construcción naval es sustituir el acero por compuestos no metálicos como la fibra de vidrio. Sin embargo, este compuesto es mucho menos resistente que el acero tradicional, por lo que es un material que ha sido descartado para buques que necesiten gran

resistencia por la actividad que realizan. Pese a ello, la fibra de vidrio está ganando terreno al acero en embarcaciones de recreo o pequeño porte. De hecho, la Armada posee varios buques hechos de fibra. A parte de las lanchas de instrucción empleadas por los alumnos de la Escuela Naval Militar, los cazaminas clase “Segura” y que además están actualmente en servicio, tienen un casco hecho de fibra para poder reducir su firma magnética lo máximo posible.

Pese a todo ello, el acero continúa siendo el principal material del que están fabricados los cascos de los grandes buques mercantes y de guerra. En la Revista General de Marina (RGM) [22], un antiguo ingeniero naval de la Empresa Nacional “Bazán”, precursora de la actual “Navantia”, relata cómo es el proceso de construcción de un buque de guerra. En ese artículo, se detallan los tipos de acero empleados para la construcción de los buques. En líneas generales, para los buques auxiliares se tiende a emplear acero dulce, es decir acero al carbono con poca cantidad de éste. Sin embargo, para los buques que presumiblemente van a entrar en combate directo, como fragatas, portaaviones, buques de asalto anfibio, etc. se suelen emplear aceros de alta resistencia; que son aceros aleados que le confieren mejoras en sus propiedades mecánicas y en la resistencia a la corrosión, entre otros factores.

## 1.5 Objetivos

Habiendo definido los fundamentos de la corrosión y teniendo en cuenta que la mayoría de los buques de la Armada están hechos de acero, el presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) comprende un estudio de la corrosión del acero debida a diferentes parámetros que afectan al agua de mar. En el estudio propuesto se analizará el comportamiento de dos aceros con distintos porcentajes de carbono frente a la corrosión sobre la base de tres de las variables que más influyen en el proceso de corrosión de aceros: el pH, la salinidad y la intensidad de la corriente que simula el efecto de un par galvánico. En concreto, los objetivos del presente trabajo son:

- La obtención de superficies de respuesta y ecuaciones predictivas de la corrosión en función de los valores del pH, porcentaje de cloruros e intensidad de la corriente.
- El cálculo de la cinética de la reacción debida a la pérdida de masa de las probetas estudiadas.
- Estudio del grado de corrosión real con agua de la dársena de la Escuela Naval Militar, a fin de comparar el efecto real de la corrosión con el modelo predictivo previamente calculado.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Introducción

La corrosión no es un problema reciente. Desde que el hombre empezó a usar metales en la prehistoria, se pudieron observar sus primeros efectos. Por ello actualmente, el estudio de la corrosión es un tema de gran importancia para una gran variedad de industrias. Los estudios existentes respecto a la corrosión se pueden dividir en tres grandes grupos. Por un lado están los dedicados a poder observar el efecto de la corrosión y sus diferentes causas, por otro lado las investigaciones dedicadas a prevenir la corrosión y, finalmente, los centrados en corregir los efectos de la corrosión.

Muchos de los estudios realizados no se centran en un único material, sino que distribuyen su análisis en distintos materiales. La mayoría de ellos están referidos a materiales de construcción, como el acero o el hormigón, aunque también a múltiples metales como el aluminio, el cobre o el bronce. Sin embargo, en la actualidad el elemento metálico constructivo por excelencia es el acero, que está presente en las construcciones de manera individual, o bien formando parte del hormigón armado.

Centrándonos más en el ámbito marítimo, la Armada Española siempre ha tenido presente que la corrosión es un enemigo al que hay que prevenir y estudiar. Por ello, en la Escuela Naval Militar, se ha desarrollado numerosa bibliografía que sirve de referencia y estudio para los alumnos que allí se forman y donde la corrosión es objeto de interés de varios de ellos.

En varios de los capítulos del libro referente a la antigua asignatura de Química Aplicada I [23] se aborda el tema de la corrosión y su efecto sobre los buques de guerra. Entre otras cuestiones, esta publicación indica, y hace entender al alumno, que las pérdidas por corrosión en las fuerzas armadas no sólo resultarán de tipo económico, sino que en determinadas unidades como buques, carros de combate... pueden ocasionar una pérdida del valor operativo de dicha unidad.

Este texto docente pone en valor que la acidez o alcalinidad del medio en el que se produce la corrosión es determinante para el resultado final. Por un lado, a pH bajos, aumenta la  $[H^+]$  haciendo que la reacción se acelere, lo que hace que se aumente la velocidad de formación de productos derivados de la corrosión. Sin embargo, cuando el ambiente es alcalino, la formación de  $OH^-$  influirá en el proceso corrosivo dependiendo del metal del que se trate. Pese a ello, el documento indica que a pH muy alcalinos la velocidad de corrosión se vuelve también muy elevada. Por ello, el documento concluye exhortando a los oficiales de máquinas de que deben asegurarse de que el agua para alimentar las calderas posea un pH, a temperatura ambiente, de entre 10,5 y 11.

En otra publicación de la Escuela Naval titulada “*La corrosión y la protección catódica*” [24], se analiza el efecto de la corrosión en los buques debido al par galvánico. En esta publicación se explica

que este efecto corrosivo se produce cuando una parte cualquiera de una superficie de acero se torna anódica con respecto al metal circundante debido a diferencias zonales de reactividad tales como alteraciones de tipo químico, eléctrico, mecánico o térmico. Al producirse esto, el metal disuelto en el ánodo establece una picadura y los productos resultantes de las reacciones electroquímicas se depositan sobre el ánodo manteniendo la existencia de la pila eléctrica. Esta clase de picaduras puede tener lugar en las zonas más calientes de las superficies generadoras de vapor de las calderas. La evolución de este tipo de corrosión se puede ver en la Figura 2-1.

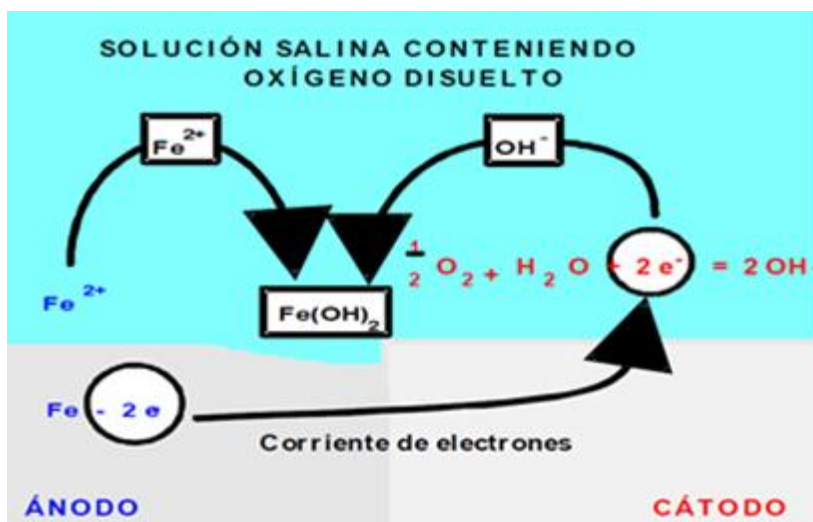


Figura 2-1 Corrosión galvánica en los cascos de acero [25]

La corrosión, como se acaba de exponer y se ha mencionado previamente, es un motivo de estudio dentro de la Armada Española. A nivel práctico, también existe documentación en vigor y empleada por todos los buques de la flota para ver los efectos de la corrosión y cómo tratarlos. En la I-BC-01, “Instrucción de inspección submarina” [26], se dan instrucciones a los buceadores de las distintas unidades sobre la manera exacta en la que tienen que realizar las inspecciones de los cascos de los buques y el modo en el que tienen que medir el grado de corrosión y extensión del mismo. De hecho, la publicación ordena que, en el caso de que alguna parte del casco se encuentre sin pintar o se haya desprendido la pintura por cualquier causa, se informe de manera urgente para que se tomen las medidas oportunas de cara a minimizar los daños por corrosión que se pudieran haber ocasionado. En la D-CP-10, que es otra publicación en vigor titulada “Manual doctrinal de energía y propulsión” [27], se explican las acciones necesarias a tomar en el momento de la varada de un buque. Por un lado, para analizar el estado del casco y poder ver el estado real del acero una vez se le ha retirado la pintura existente y, por otro, para saber cómo actuar a fin de prevenir la corrosión desde que el buque ha sido reparado hasta la siguiente varada del barco.

## 2.2 La Corrosión del Acero en Ambientes Marinos

Para abordar este tema hay que tener en cuenta que, como se describió en el apartado 1.4 existen multitud de aceros y pueden responder de forma algo diferente al fenómeno de la corrosión. De hecho, al variar una pequeña parte de la concentración de algún material, las propiedades del acero resultante varían de manera sustancial. Así pues, los estudios de la corrosión en aceros, se deben subdividir en dos grandes grupos: con aceros al carbono y con aceros inoxidables. Dado que en este TFG se han seleccionado aceros al carbono para realizar el estudio, en este apartado únicamente nos centraremos en estudios de corrosión del acero al carbono en ambientes marinos.

La **temperatura** es un factor determinante en la corrosión por agua de mar. Según la zona del planeta y la época del año, las temperaturas del agua de mar en superficie varían notablemente lo que influye en el fenómeno corrosivo. La Universidad de la Habana [28] concluyó que la corrosión en la

época estival era notablemente mayor que durante el invierno debido a dos factores principales. Por un lado, el aumento de las temperaturas atmosféricas en verano y, por otro, la mayor presencia de gases contaminantes en la zona del estudio en esas épocas lo que incrementaba la velocidad de corrosión. En otros estudios [29] y [30] se ha analizado la corrosión en dos ambientes alejados geográficamente y con temperaturas del mar muy variadas, concluyéndose que la corrosión era mayor en las zonas marítimas ecuatoriales que en las zonas del Pacífico Sur más próximas al sur del continente americano. La temperatura es un factor tan determinante en el proceso de corrosión que se han creado programas informáticos que permiten prever la corrosión de los buques en función de las temperaturas del agua de mar [31].

Otro parámetro fundamental en la corrosión en ambientes marinos es la cantidad de **cloruros** del ambiente a estudiar. En diversos estudios [32], [33] y [34] se remarca la diferencia del efecto corrosivo en distintos ambientes con distintos porcentajes de cloruros. Los estudios concluyeron que, a mayor concentración de iones cloruro, mayor es la corrosión en los aceros estudiados. Asimismo, los estudios también apuntan que si a los iones cloruro se les añaden otros compuestos, como los sulfuros, el efecto corrosivo se ve acentuado a razón de la cantidad de sulfuros añadidos.

Existen estudios que han abordado el estudio del fenómeno de corrosión en función de la zona de mar donde se navegue. Por ejemplo, existen estudios donde se analiza la corrosión en función de la distancia a costa. En las referencias [35] y [36] se afirma que hay una clara relación entre la corrosión sufrida por el buque con la distancia a costa. En realidad, la relación entre la corrosión y la distancia a costa depende en gran medida de la salinidad. Los resultados del estudio determinan que el punto más corrosivo es la costa debido a las grandes concentraciones de sales que allí existen, y que este efecto corrosivo decreciente de manera exponencial hasta un valor asintótico que se corresponde con el valor de corrosión de la atmósfera de la región estudiada. Por otro lado también podemos encontrar en la bibliografía estudios sobre la corrosión en función de la profundidad [37]. La conclusión de este estudio indica que la corrosión desciende a medida que descendemos en profundidad. Esto es debido, por un lado, a que a medida que descendemos en profundidad, la temperatura disminuye lo que provoca que la velocidad de la reacción disminuya y, por otro, que a medida que descendemos la cantidad de oxígeno disuelto proveniente de la atmósfera también disminuye lo que causa un aminoramiento de las reacciones de corrosión.

Por otro lado, existen investigaciones que analizan el efecto de la corrosión según aspectos físicos del acero. El estudio [38] concluyó que la rugosidad del acero tiene efectos importantes en la corrosión. Las zonas del material más rugosas tienden a almacenar en su superficie mayores cantidades de productos de corrosión. Estos estudios están relacionados con un estudio de la Universidad Politécnica de Cartagena [39] donde se analiza la pérdida de potencia de los barcos según el grado de corrosión de su casco. Este estudio determinó que a mayor corrosión sufrida, mayor era la rugosidad del casco y por tanto se presentaba más resistencia frente al avance del barco en el agua del mar.

## 2.3 Prevención de la Corrosión

Existen numerosas investigaciones acerca de cómo aplicar distintas técnicas para evitar la corrosión [40]. Técnicas comunes para evitar la corrosión son el uso de inhibidores, pinturas y ánodos de sacrificio. Cada una de ellas es eficiente en una situación determinada. Las pinturas, que no dejan de ser un tipo de recubrimientos, son especialmente efectivas en superficies muy lisas. Ello se debe a que cualquier imperfección en la capa de pintura, o cualquier roce o golpe en la superficie, puede crear un contacto directo del metal a proteger con el medio externo y provocar que se corra por debajo de la capa de pintura sin que nos demos cuenta.

Los ánodos de sacrificio son muy útiles cuando la superficie a proteger es de formas irregulares o con mucha rugosidad. En esta técnica lo que se hace es colocar un material con un potencial de reducción más negativo que el del metal a proteger. En el mercado ya existen múltiples barras de

diferentes metales para ser empleados como ánodos de sacrificio. Los más comunes son el magnesio, el aluminio y el zinc, que poseen un potencial de reducción de -2,38 V, -1,68 V y -0,76 V respectivamente [6].

Finalmente, respecto a los inhibidores (que no son más que compuestos que reaccionan formando una película sobre las superficies que se quieren proteger), se suelen emplean en torres de enfriamiento o calderas. Los últimos estudios sugieren emplearlos como un aditivo del propio material a proteger [41]. Los inhibidores son el centro de interés de la mayoría de los últimos estudios en materia de protección frente a la corrosión porque son un método de protección relativamente nuevo y, por tanto, constituyen una técnica en desarrollo.

En un estudio realizado en la Universidad Politécnica de Cartagena [42], se analizó cuál de las técnicas anteriores para evitar la corrosión era la óptima. La conclusión final fue que para un buque que va a navegar durante mucho tiempo lo mejor es emplear recubrimientos poliméricos en forma de pinturas. El pintado de todo el casco debe hacerse de manera minuciosa debido a que, como hemos indicado, cualquier pequeña fisura en la pintura puede ocasionar que la corrosión penetre y corroa el acero por debajo de la capa de pintura. Además, se determinó que en los tanques de lastrado interiores de los barcos, al no poder ir pintados, la mejor opción era emplear ánodos de sacrificio. Estos ánodos de sacrificio deben ir colocados en todos los tanques ya que si uno no lo llevase la corrosión empezaría a atacar los mamparos de ese compartimento.

## **2.4 Corrección de los Efectos Derivados de la Corrosión**

El efecto de la corrosión no afecta solamente al mundo de la construcción y al ámbito naval. Por ejemplo, existen estudios realizados en el ámbito de la arqueología [43] en los que emplean técnicas electroquímicas de manera eficaz para poder eliminar la corrosión de pequeñas monedas y objetos encontrados en yacimientos arqueológicos próximos a zonas costeras. Actualmente existen múltiples técnicas para corregir la corrosión. En general, se pueden dividir en: limpieza empleando agua o agentes químicos, limpieza mecánica o limpieza electroquímica [44].

Por un lado la limpieza empleando agua, consiste en verter agua a presión sobre una superficie para poder eliminar el material soluble que hubiera en esa superficie. Además, al echar el agua a presión, se introduce en las posibles cavidades del material generadas en el proceso corrosivo expulsando a la mayor parte de los desechos de la corrosión existentes. La limpieza empleando sustancias químicas es parecida a la del agua, con la diferencia de que estos productos reaccionarán mejor sobre los productos de la corrosión. Hay que tener en cuenta que los productos químicos a emplear no deben dañar el material que se quiere limpiar, por lo que deben variar de un material a otro. Por ejemplo para limpiar aluminio no se debe emplear un pH muy alto; mientras que para el acero es indistinto. Estas técnicas han sido aplicadas y probadas también por personal de la Armada, consiguiendo limpiar pequeñas piezas metálicas pertenecientes a las lanchas de instrucción [45].

La limpieza mecánica consiste en limpiar las superficies corroídas con materiales abrasivos. Estos materiales pueden variar desde una simple lija manual hasta grandes máquinas de chorreado de un material abrasivo a presión. Por último, la limpieza electroquímica consiste en crear una pila electrolítica con la pieza a limpiar. En este proceso la pieza a recuperar actuará como cátodo mientras que se utilizarán otros materiales, como el grafito, para actuar como ánodo.

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Introducción

Como ya se ha indicado en el apartado 1.5 (Objetivos), el trabajo consta de dos partes diferenciadas. Por un lado se va a estudiar el efecto de tres variables en la corrosión de dos aceros con propiedades y composición distintas a fin de obtener, gracias al empleo del programa informático Statistics, unas superficies de respuesta así como las correspondientes ecuaciones predictivas que nos permitan prever el efecto de la corrosión según las características del medio en el que se encuentre este material. Por otro lado, se introducirán probetas de los dos tipos de aceros objeto de estudio en una muestra de agua de mar de la dársena de la Escuela Naval Militar para poder comparar el efecto real de la corrosión y, de esta manera, proceder a la validación del método anterior comparando sus resultados reales de corrosión con los que se deberían presentar según el modelo previamente calculado.

Los dos aceros que se van a emplear en el estudio son el S275JR y el S235JR que, de aquí en adelante, se denominarán como acero “A” y “B”, respectivamente. La diferencia principal entre ambos radica en que el acero “A” posee un mayor porcentaje de carbono (0,21%) ligeramente mayor que el “B” (0,18%).

### 3.2 Metodología

La metodología seguida durante el trabajo se resume en la Figura 3-1.

Para poder obtener las superficies de respuesta generadas por el software Statistics, en primer lugar hacen falta definir las variables independientes de las que dependerá el grado de corrosión final de los dos tipos de acero. Una vez definidas dichas variables hay que preparar cada uno de los distintos ambientes donde se introducirán los aceros y medir las condiciones iniciales de cada probeta de acero, para poder observar las variaciones de las propiedades a estudiar a medida que se desarrolle el experimento.

Las variables dependientes en las que se va a observar el efecto de la corrosión son: i) el porcentaje visual de corrosión empleando el programa ImageJ y ii) la variación de masa a lo largo de todo el experimento. Además, una vez obtenida la variación de masa, se calculará la cinética de corrosión de los aceros estudiados.

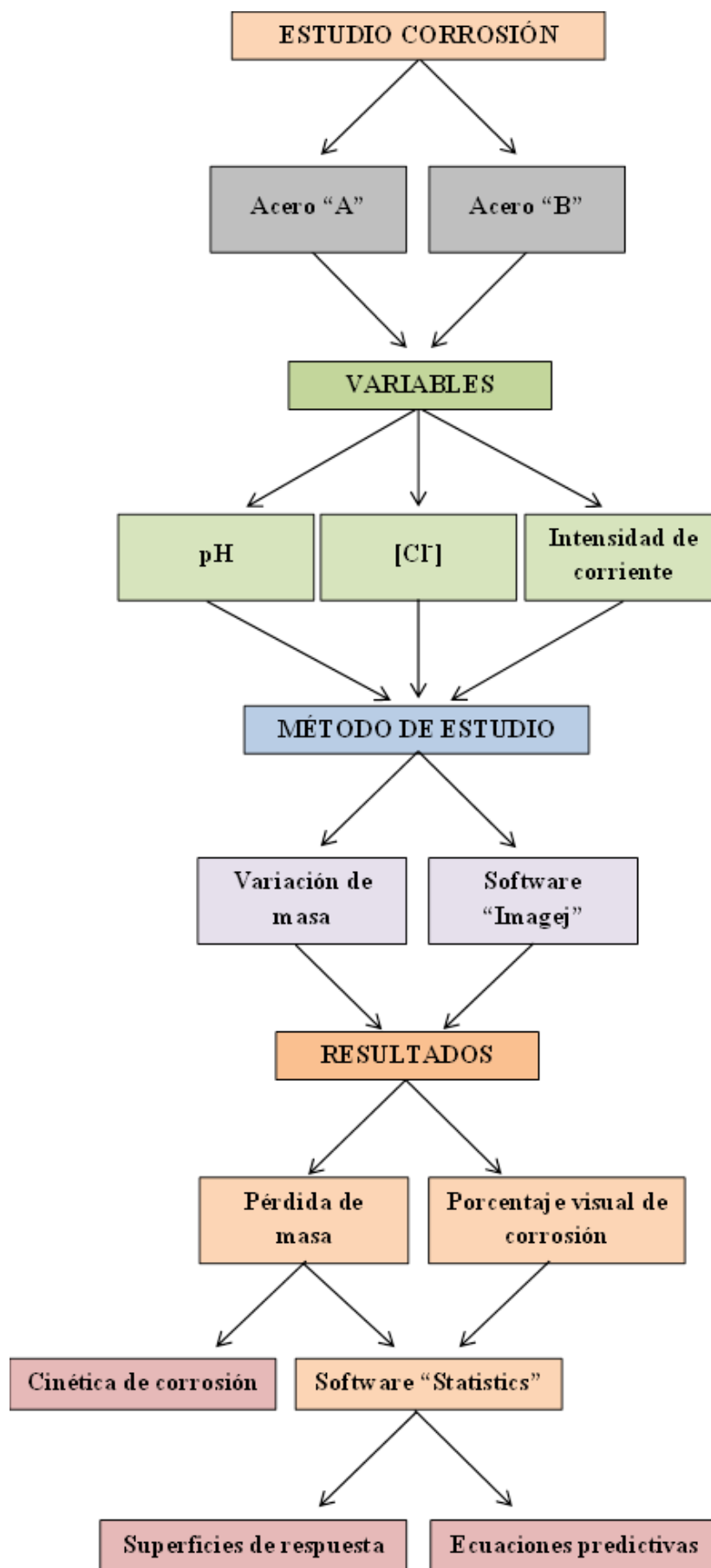


Figura 3-1 Esquema seguido durante el TFG

### 3.3 Descripción de las Variables a Estudiar

En vista de la variabilidad en la composición del agua de mar (descrita en el apartado 1.3.1) y de cómo esta variabilidad afecta a la corrosión (descrito en el apartado 1.3.3), se ha decidido estudiar tres variables a partir de las cuales se crearán 15 ambientes distintos. En cada uno de estos ambientes se observará el efecto de la corrosión. Las variables a medir serán la variación de masa y el porcentaje visual de corrosión, empleando el software ImageJ.

Para definir cada uno de los distintos ambientes se emplea el programa Statistics, mediante el cual se definen las tres variables independientes, y para las cuales habrá que establecer su rango de medida, especificando en cada caso, el valor máximo, mínimo y medio. Las variables a estudiar son: el pH, la concentración de iones  $\text{Cl}^-$  y la presencia, o no, de corriente eléctrica.

#### 3.3.1 Variable 1: pH

Como se ha explicado en el apartado 1.3.1, el pH del agua del mar oscila entre el 7,5 y el 8,5. Tal y como se indicó en apartados anteriores, el aumento del  $\text{CO}_2$  provoca que lentamente las aguas se estén acidificando. Además, en las cercanías de los puertos, fundamentalmente debido a la concentración de contaminantes, el valor del pH puede adquirir valores fuera de ese intervalo. Por ello, en el experimento se toman los valores de pH entre 4 y 10 a fin de que todos los valores posibles que pueda adquirir esta variable estén encuadrados en las gráficas resultantes. Por lo tanto, se toman como valores:

- pH mínimo = 4, que se codificará con el valor -1.
- pH máximo = 10, que se codificará con el valor 1.
- pH medio = 7, que se codificará con el valor 0.

Dado que en el diseño se incluyen tres variables independientes, con diferentes órdenes de magnitud entre ellas, se procede a su codificación, asignando valores de +1, 0 y -1 al máximo, punto central y mínimo, respectivamente, de manera que el resultado obtenido no se vea influenciado por la magnitud de las variables de partida.

#### 3.3.2 Variable 2: Concentración de Cloruros

Como se ha detallado anteriormente, el cloruro es el ion mayoritario en las aguas de mar, siendo mucho más abundante que el resto de aniones. Por tanto, en el experimento se estudiará exclusivamente el efecto de este anión en la corrosión.

Pese a que la concentración de cloruros habitualmente ronda el 3%, se van a analizar todos los rangos posibles de cantidad de cloruros en el agua, para poder incluir los posibles efectos corrosivos dependiendo de si el buque navega en entornos marítimos próximos a ríos o íntegramente fluviales. Los valores a tomar serán:

- $[\text{Cl}^-]$  mínima = 0%, que se codificará con el valor -1.
- $[\text{Cl}^-]$  máxima = 5% que se corresponde con la máxima concentración posible de cloruro en el agua a temperatura ambiente, que se codificará con el valor 1.
- $[\text{Cl}^-]$  media = 2.5%, que se codificará con el valor 0.

#### 3.3.3 Variable 3: Corriente Eléctrica

También se ha comentado en apartados previos que el agua, y más concretamente el agua de mar, es un buen conductor de la electricidad. Por lo tanto, hemos considerado interesante incorporar a nuestro estudio sobre corrosión el efecto de la corriente eléctrica, la cual será suministrada durante una hora al día. Esto es debido a que no es despreciable la degradación del acero como consecuencia de la aparición de un par galvánico al entrar en contacto dos metales de diferente potencial. En este caso los límites de esta variable vienen determinados por la ley de Ohm ( $V = I \times R$ ) (Ec 5). Por tanto,

partiendo del máximo voltaje generado, se generará una intensidad de corriente máxima para cada medio que será determinada por la conductividad del mismo, de manera que la resistencia del medio cumpla dicha ley.

El medio menos conductor, y por lo tanto más resistivo, es el que posee menor cantidad de iones. Así, el medio más resistivo será el que posea un 0% de cloruros y un pH 7, puesto que para obtener otros valores de pH se necesita introducir en las disoluciones iones provenientes de una base (en nuestro caso NaOH) o un ácido (en nuestro caso H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). El máximo voltaje generado por la fuente de corriente con la que se realiza este experimento es 30,8 V, y se ha determinado experimentalmente que la máxima corriente que se le puede introducir es 0.1 A. La resistencia del medio es de 308 Ω. Además teniendo en cuenta las dimensiones de las probetas estudiadas, se determina que el medio posee una conductividad eléctrica de 12.99 μS/cm; que es un valor bastante inferior al del agua dulce doméstica (500 μS/cm) y extremadamente inferior al del agua del mar (56 mS/cm). Por lo tanto, el rango de valores será:

- Corriente mínima = 0 A, que se codificará con el valor -1.
- Corriente máxima = 0.1 A, que se codificará con el valor 1.
- Corriente media = 0.05 A que se codificará con el valor 0.

### 3.4 Descripción de los Ambientes Estudiados

Como ya se indicó en el apartado 3.1, se va a emplear el software Statistics para poder hallar las gráficas del efecto de la corrosión y observar qué combinación de las tres variables es más perjudicial para cada tipo de acero.

| Ambiente | pH | [Cl <sup>-</sup> ] | Intensidad |
|----------|----|--------------------|------------|
| 1        | 0  | -1                 | -1         |
| 2        | 0  | 1                  | -1         |
| 3        | 0  | -1                 | 1          |
| 4        | 0  | 1                  | 1          |
| 5        | -1 | -1                 | 0          |
| 6        | -1 | 1                  | 0          |
| 7        | 1  | -1                 | 0          |
| 8        | 1  | 1                  | 0          |
| 9        | -1 | 0                  | -1         |
| 10       | -1 | 0                  | 1          |
| 11       | 1  | 0                  | -1         |
| 12       | 1  | 0                  | 1          |
| 13       | 0  | 0                  | 0          |
| 14       | 0  | 0                  | 0          |
| 15       | 0  | 0                  | 0          |

**Tabla 3-1 Combinación de variables normalizadas generadas por el programa Statistics**

Para poder generar el experimento y, una vez abierto el programa, se abre un cuaderno de trabajo nuevo. Una vez abierto, se pincha en el comando Design of Experiments (DOE), donde se crea una tabla Box-Behnken. El Box-Behnken son una serie de diseños experimentales empleados para generar superficies de respuesta. Para poder realizarlo, cada factor o variable independiente, se coloca en uno de tres valores igualmente espaciados, donde dos de las variables poseen valores en sus extremos, mientras otra permanece en su valor central, generalmente codificados como -1, 0, +1, y donde además los resultados del diseño puedan ajustarse a un modelo cuadrático.

En concreto, en nuestro diseño particular se van a analizar 3 variables independientes en un total de 15 experimentos, siendo los 3 últimos experimentos de control para verificar que todo ha salido correctamente. En la Figura 3-2 se puede observar en un modelo volumétrico, como los 15 ensayos construyen una red cúbica a partir de la cual obtener el resto de valores de la superficie respuesta.

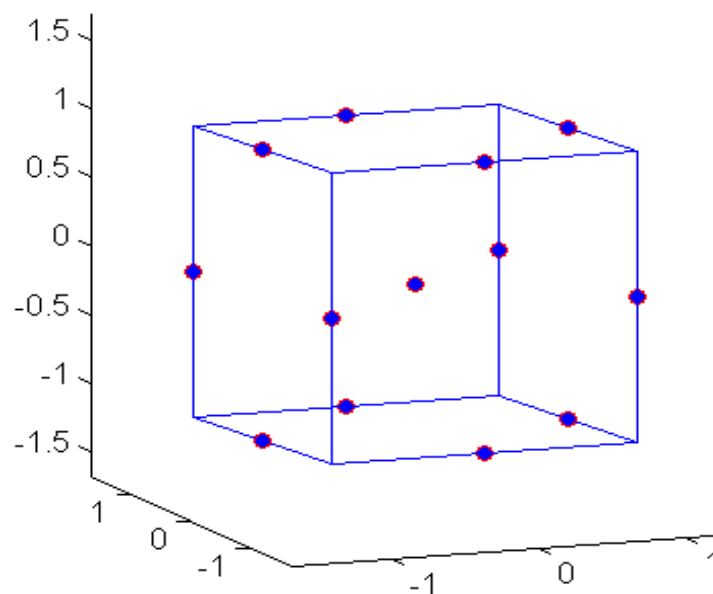


**Figura 3-2 Esquema del modelo Box-Behnken**

La variación de las variables independientes se corresponde con las descritas en el apartado 3.3, y cada una, como ya se ha dicho previamente, desde un valor mínimo a otro máximo, pasando por uno intermedio. La combinación de variables normalizadas generada por el programa Statistics está reflejada en la Tabla 3-1.

Una vez se ha obtenido la tabla con las variables independientes normalizadas, para poder llevarla a la práctica, hay que sustituir los parámetros normalizados por sus equivalencias reales que están reflejadas en los apartados 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.3 respectivamente para cada una de las variables. En la Tabla 3-2 se puede ver la conversión de las variables con unidades normalizadas en unidades reales.

| Ambiente | pH | [Cl <sup>-</sup> ] | Intensidad |
|----------|----|--------------------|------------|
| 1        | 7  | 0%                 | 0 A        |
| 2        | 7  | 5%                 | 0 A        |
| 3        | 7  | 0%                 | 0,1 A      |
| 4        | 7  | 5%                 | 0,1 A      |
| 5        | 4  | 0%                 | 0,05 A     |
| 6        | 4  | 5%                 | 0,05 A     |
| 7        | 10 | 0%                 | 0,05 A     |
| 8        | 10 | 5%                 | 0,05 A     |
| 9        | 4  | 2,5%               | 0 A        |
| 10       | 4  | 2,5%               | 0,1 A      |
| 11       | 10 | 2,5%               | 0 A        |
| 12       | 10 | 2,5%               | 0,1 A      |
| 13       | 7  | 2,5%               | 0,05 A     |
| 14       | 7  | 2,5%               | 0,05 A     |
| 15       | 7  | 2,5%               | 0,05 A     |

Tabla 3-2 Valor real de las variables normalizadas

### 3.5 Preparación de los Ambientes Estudiados

Para llevar a cabo cada uno de los ambientes reflejados en la Tabla 3-2 se preparan una serie de disoluciones en el laboratorio. La cantidad de disolución preparada en cada caso será de un litro.

Como se necesitan concentraciones del 2,5 y 5%, y para realizar las disoluciones se ha empleado un NaCl con una pureza del 98%, se necesitarán añadir al agua:

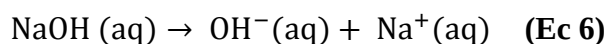
$$2,5\% = \frac{2,5 \text{ g NaCl}}{100 \text{ mL disolucion}} \times \frac{1000 \text{ mL disolucion}}{1 \text{ L disolucion}} \times \frac{100 \text{ g NaCl al } 98\%}{98 \text{ g NaCl puros}} = 25,51 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ NaCl (al } 98\%)$$

$$5\% = \frac{5 \text{ g NaCl}}{100 \text{ mL disolucion}} \times \frac{1000 \text{ mL disolucion}}{1 \text{ L disolucion}} \times \frac{100 \text{ g NaCl al } 98\%}{98 \text{ g NaCl puros}} = 51,02 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ NaCl (al } 98\%)$$

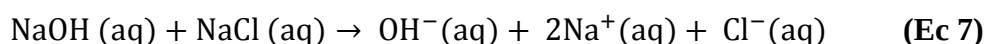
Una vez obtenidas las concentraciones de cloruro deseadas hay que obtener los distintos pH. Para crear los ambientes ácidos o básicos, se emplean ácidos y bases fuertes, es decir, que se disocian completamente. A continuación se indican los cálculos para obtener los pH necesarios y las reacciones químicas de disociación presentes en las distintas disoluciones.

Para obtener el medio básico, con un pH necesario de 10, se va a emplear sosa caustica (NaOH), con una pureza del 98%, que tiene una peso molecular de 40 g/mol.

Disociación en ambiente básico con una concentración de cloruros del 0%:



Disociación en ambiente básico con una concentración de cloruros mayor del 0%:

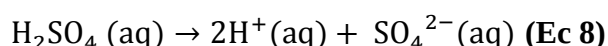


Cálculos realizados:

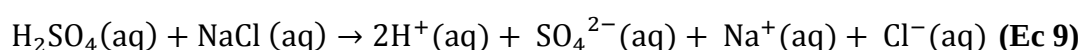
$$\begin{aligned} \text{pH} = 10 &\rightarrow \text{pOH} = 4 \rightarrow \text{pOH} = 4 = -\log [\text{OH}^{-}] \rightarrow [\text{OH}^{-}] = 10^{-4} \text{ M} \\ 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{L}} &\times \frac{40 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times \frac{100 \text{ g NaOH al 98\%}}{98 \text{ g NaOH puros}} = 4.08 \times 10^{-3} \text{ g} = 4,08 \text{ mg NaOH (al 98\%)} \end{aligned}$$

Para obtener el medio ácido, con un pH necesario de 4, se va a emplear ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) al 98%, que tiene un peso molecular de 98 g/mol y una densidad de 1.38 g/mL.

Disociación en ambiente ácido con una concentración de cloruros del 0%:



Disociación en ambiente ácido con una concentración de cloruros mayor del 0%:



Cálculos realizados:

$$\begin{aligned} \text{pH} = 4 &\rightarrow \text{pH} = -\log [\text{H}^{+}] \rightarrow [\text{H}^{+}] = 1 \times 10^{-4} \text{ M} \\ 1 \times 10^{-4} \text{ M} &\times \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{2 \text{ mol H}^{+}} \times \frac{98 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times \frac{1 \text{ mL}}{1.84 \text{ g}} \times \frac{100 \text{ mL disolución H}_2\text{SO}_4}{98 \text{ mL H}_2\text{SO}_4} = \\ &= 2,72 \times 10^{-3} \text{ mL H}_2\text{SO}_4(\text{al 98\%}) \end{aligned}$$

Finalmente, en los ambientes en los que exista corriente, simplemente se le conecta una fuente de corriente con la intensidad indicada. Como las probetas estudiadas tienen que actuar de ánodo (oxidarse), se emplea otra probeta de acero fuera de estudio como cátodo.

En cada ambiente serán introducidas dos probetas de cada tipo de acero, lo que hace un total de 60 probetas estudiadas, para estos 15 ambientes. El montaje inicial del experimento, con todas las probetas distribuidas en sus ambientes, se puede ver en la Figura 3-3. Las características técnicas de cada acero están descritas en el Anexo I: Características Técnicas de los Aceros Estudiados.

A lo largo de todo el experimento, se pesan diariamente todas las probetas para poder obtener las ecuaciones de la cinética de la reacción. Para analizar el porcentaje visual de corrosión, y poder ver su evolución, se toman fotografías a las probetas con periodicidad semanal.



Figura 3-3 Montaje del experimento

### 3.6 Análisis del Agua de la Dársena de la Escuela Naval Militar

Para poder comparar el efecto real de la corrosión del agua de mar en los aceros estudiados, se crea un decimosexto ambiente. Este ambiente simplemente es una muestra del agua de la dársena de la Escuela Naval Militar, donde se introducirán los dos tipos de aceros estudiados.

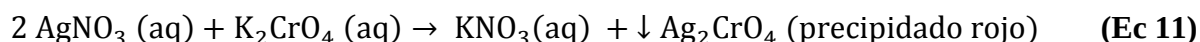
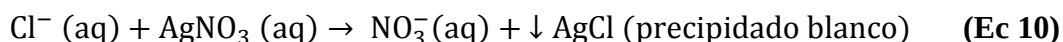


**Figura 3-4 Posición de la toma de la muestra de agua de mar [46]**

La muestra del agua de mar fue tomada el día 19 de enero del 2018 a las 13:30, y procede de la dársena de la Escuela Naval Militar sita en la Villa de Marín en la provincia de Pontevedra. Concretamente, la muestra fue tomada del muelle “Almirante Vierna” en el lugar de atraque habitual del patrullero P-28 “Tabarca” de la Armada Española, cuya situación GPS es 42° 23’ 46.92” N 008° 42’ 23.13” W y está señalada con un círculo rojo en la Figura 3-4.

De la muestra tomada, solo se van a analizar los parámetros necesarios para entrar en las gráficas que resultarán del experimento. Es decir, se analizará el pH y la concentración de cloruros de la misma. Para analizar el pH simplemente se toma una muestra del agua y se analiza empleando un medidor de pH.

Para poder hallar la concentración de cloruros, se emplea el método de Mohr. Este método se utiliza para determinar iones cloruro mediante una valoración de precipitación, aunque solo es válido en disoluciones que poseen pH con valores de entre 7 y 9 [44]. En este método se provoca que el ion cloruro precipite como cloruro de plata ( $\text{AgCl}$ ), utilizando como patrón una solución de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) de concentración 0,1 N. Como indicador se emplea cromato de potasio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ), que forma en el punto final un precipitado de cromato de plata ( $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ ) observable a simple vista porque la disolución torna a un color rojo ladrillo. Las reacciones químicas producidas se describen a continuación:



Una vez ha precipitado el cromato de plata, se mide el volumen de nitrato de plata empleado. Una vez se posee en volumen de  $\text{AgNO}_3$  necesario, se pasa a moles y se calcula la cantidad de  $\text{Cl}^-$  presente en la disolución.

Una vez realizada la valoración del agua de mar, se necesitaron 19,2 ml de  $\text{AgNO}_3$  al 0,1 N para hacer precipitar todos los cloruros de una muestra de 5 ml de agua de la dársena. Los cálculos realizados para obtener la concentración de cloruros son los siguientes:

$$19,2 \text{ mL AgNO}_3 \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{0,1 \text{ mol AgNO}_3}{1 \text{ L disolucion}} \times \frac{1 \text{ mol Cl}^-}{1 \text{ mol AgNO}_3} \times \frac{35,45 \text{ g}}{1 \text{ mol Cl}^-} = 0,0681 \text{ g Cl}^-$$

La equivalencia de moles de  $\text{AgNO}_3$  y  $\text{Cl}^-$  está reflejada en la Ec 10.

$$\frac{0,0681 \text{ g Cl}^-}{5 \text{ mL agua d'arsena}} = 0,01361 \frac{\text{g}}{\text{mL}} \text{ Cl}^-$$

Es importante reseñar que los aniones  $\text{Br}^-$  y  $\text{I}^-$  también precipitan con  $\text{Ag}^+$ . Dado que ambos iones se encuentran en el agua de mar en concentraciones extraordinariamente bajas en comparación con el  $\text{Cl}^-$ , como se puede observar en la Tabla 1-3. Por tanto, se asume que su presencia en la muestra valorada es despreciable y debido a ello, que todo el nitrato de plata consumido se ha usado en la precipitación de  $\text{Cl}^-$ .

### 3.7 Empleo del Programa Informático ImageJ

ImageJ es un programa informático de tratamiento digital de imágenes, desarrollado en lenguaje Java por la National Institute of Health. Este software inicialmente está orientado hacia el ámbito de las ciencias de la salud y posee potentes herramientas para editar, procesar y analizar imágenes de casi cualquier tipo y formato. Por ello, ha sido empleado en múltiples ocasiones y en diversidad de estudios en estudios para nada relacionados con las ciencias de la salud. En concreto, en el presente trabajo se ha usado para obtener el porcentaje de corrosión de las probetas de acero estudiadas.

Para poder obtener el porcentaje de corrosión debe aplicarse un tratamiento de imagen de manera que puedan cuantificarse las zonas afectadas por corrosión en una escala blanco/negro, procediendo de la siguiente manera: primero se importa la imagen al microscopio de la probeta analizada ejecutando el comando “File – Open”. Una vez tenemos la imagen importada la transformamos a un formato de 8 bits con el comando “Image – Type – 8-bit”. Tras ello, se transforma la imagen en blanco y negro, de tal forma que los píxeles solo tendrán un valor numérico de 0 si es blanco, o de 255 si es negro. Para poder realizarlo se ejecuta “Image – Adjust – Threshold”. De esta manera, con la imagen de blanco y negro, el programa informático nos muestra las partes corroídas en negro y las partes sin corroer en blanco. Se puede ver la diferencia en una imagen sin tratar y en otra tratada en la Figura 3-5.

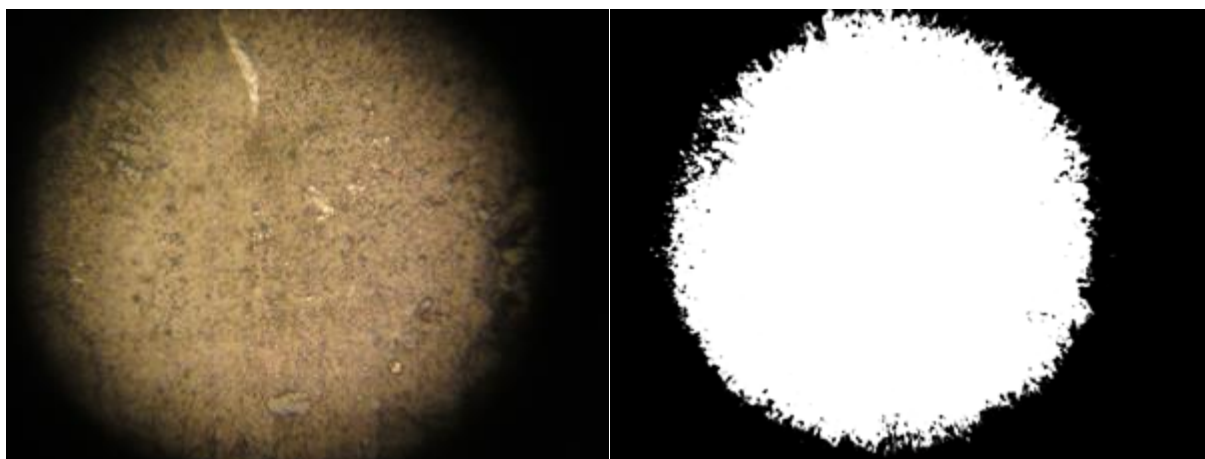


**Figura 3-5 Comparación imagen de una probeta antes y después del análisis por ImageJ**

Una vez se ha obtenido la imagen en blanco y negro, hay que contar los píxeles en blanco y en negro para poder calcular el porcentaje de corrosión de manera visual. Para ello, se ejecuta el comando “Analyze – Histogram”. Al ejecutarlo aparecerá en pantalla una imagen como la Figura 3-6, en la que el número total de píxeles analizados aparece tras la palabra “Count” y el número de píxeles con el valor 0 (sin corroer) tras la palabra “Mode 0”.

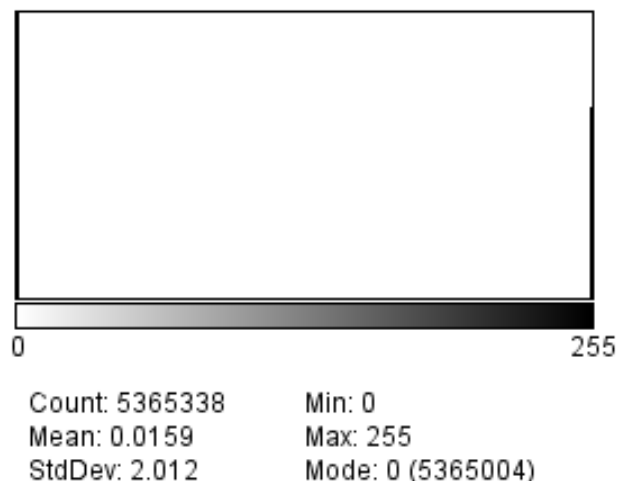


**Figura 3-6 Resultado del análisis de una probeta con el programa ImageJ**

Una vez que tenemos el número total de píxeles en blanco y el número total de píxeles, simplemente se dividen los dos datos entre ellos para obtener el porcentaje total de corrosión. Por ejemplo, el resultado de la probeta analizada en la Figura 3-6, su porcentaje de corrosión sería aproximadamente del 0.01%.

### 3.8 Condiciones Iniciales de las Probetas

Como ya se ha indicado, se van a emplear, en cada ambiente, dos probetas de dos tipos de acero. Estas probetas están hechas de acero S275JR (denominado durante el experimento como acero “A”) y el acero S235JR (nombrado como acero “B”). Las características de los dos tipos de acero están descritas en el Anexo I: Características Técnicas de los Aceros Estudiados. Las probetas empleadas inicialmente muestran en la Figura 3-7.

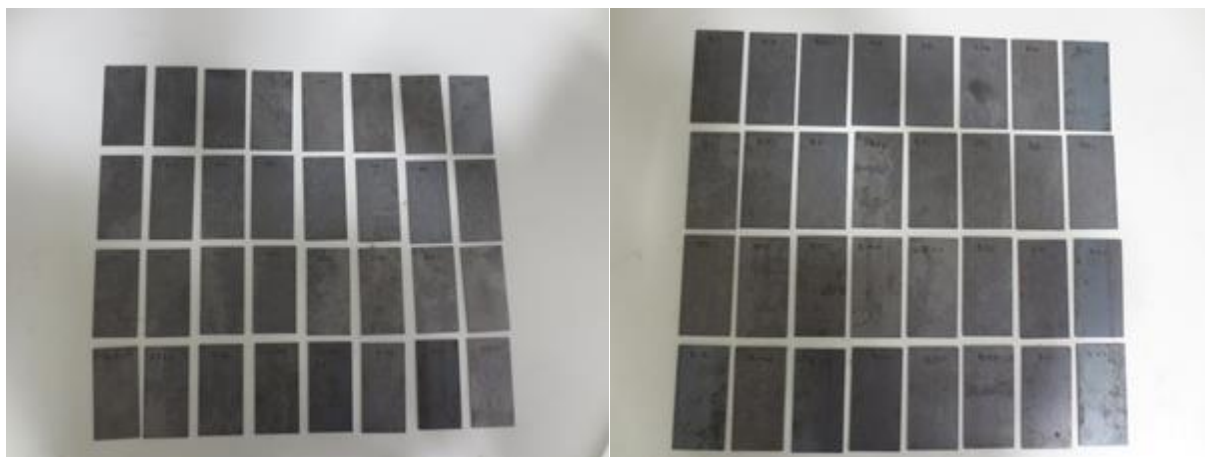


**Figura 3-7 Probetas acero "A" (izq.) y "B" (dcha.) empleadas en el experimento**

Como se puede observar, todas las probetas poseen las mismas dimensiones: 100 mm, 50 mm y 2 mm de largo, ancho y alto respectivamente. Su masa es aproximadamente de 78 g y su porcentaje de corrosión visual es prácticamente nulo. Para poder medir la evolución del porcentaje de corrosión, y de la pérdida de masa fruto del fenómeno corrosivo, es necesario tomar sus datos antes de iniciar el experimento para poder obtener unos resultados lo más precisos posibles. Estos datos se recogen en la Tabla 3-3.

| Probeta | Masa (g) | % Corrosión | Probeta | Masa (g) | % Corrosión |
|---------|----------|-------------|---------|----------|-------------|
| A11     | 78,235   | 0,06%       | B11     | 78,140   | 0,64%       |
| A12     | 78,280   | 2,58%       | B12     | 78,105   | 0,01%       |
| A21     | 78,170   | 0,18%       | B21     | 78,175   | 0,50%       |
| A21     | 77,945   | 0,12%       | B21     | 78,230   | 0,10%       |
| A31     | 77,980   | 2,95%       | B31     | 78,050   | 0,25%       |
| A32     | 78,015   | 0,21%       | B32     | 78,270   | 0,71%       |
| A41     | 78,150   | 0,25%       | B41     | 78,240   | 0,56%       |
| A42     | 77,995   | 1,13%       | B42     | 77,935   | 0,49%       |
| A51     | 78,275   | 0,59%       | B51     | 78,180   | 0,72%       |
| A52     | 78,015   | 0,01%       | B52     | 78,355   | 0,78%       |
| A61     | 77,985   | 0,08%       | B61     | 78,300   | 0,09%       |
| A62     | 78,045   | 0,66%       | B62     | 78,000   | 0,25%       |
| A71     | 78,165   | 0,06%       | B71     | 78,085   | 0,24%       |
| A72     | 78,065   | 0,13%       | B72     | 78,245   | 0,92%       |
| A81     | 78,115   | 0,28%       | B81     | 78,220   | 0,24%       |
| A82     | 78,085   | 0,01%       | B82     | 78,230   | 0,82%       |
| A91     | 78,090   | 0,08%       | B91     | 78,285   | 0,10%       |
| A92     | 78,315   | 0,25%       | B92     | 78,100   | 0,26%       |
| A101    | 78,120   | 1,37%       | B101    | 78,125   | 0,02%       |
| A102    | 78,185   | 0,62%       | B102    | 78,200   | 0,10%       |
| A111    | 78,215   | 0,66%       | B111    | 78,250   | 0,18%       |
| A112    | 78,265   | 0,60%       | B112    | 78,195   | 0,05%       |
| A121    | 78,080   | 0,83%       | B121    | 78,100   | 0,21%       |
| A122    | 78,165   | 0,67%       | B122    | 77,970   | 0,02%       |
| A131    | 78,100   | 1,02%       | B131    | 77,845   | 0,76%       |
| A132    | 78,025   | 0,21%       | B132    | 78,250   | 0,24%       |
| A141    | 78,030   | 0,09%       | B141    | 77,950   | 0,05%       |
| A142    | 78,055   | 0,03%       | B142    | 78,105   | 0,12%       |
| A151    | 78,040   | 0,02%       | B151    | 78,310   | 0,92%       |

|      |        |       |      |        |       |
|------|--------|-------|------|--------|-------|
| A152 | 78,270 | 0,38% | B152 | 78,140 | 0,18% |
| A161 | 78,165 | 0,27% | B161 | 78,285 | 0,80% |
| A162 | 77,995 | 0,08% | B162 | 77,845 | 0,16% |

---

**Tabla 3-3 Masa y porcentaje de corrosión iniciales de las probetas**

### 3.9 Material y Reactivos

A continuación se enumeran los recursos materiales necesarios para el desarrollo del trabajo, tanto de laboratorio como informático. Respecto al material digital necesario, destaca el programa Statistics, que genera la combinación de las variables a estudiar, así como los resultados y permite obtener las gráficas deseadas. Por otro lado, también es necesario el software ImageJ, que ya ha sido detallado en el apartado 3.7 y que se utiliza para poder obtener el porcentaje de corrosión de manera visual. Finalmente cabe indicar que también es necesario algún programa más común como el Microsoft Excel para poder almacenar todos los datos obtenidos y poder trabajar con ellos.

El material de laboratorio necesario para preparar los distintos ambientes es:

- Balanza de precisión de 3 decimales (modelo AH-150 de la marca Blauscal)
- Microscopio óptico (modelo MBL 3300 de la marca Krüss Optronic)
- Cámara de fotografía digital (Canon IXUS 125 HS)
- Fuente de corriente (TRP-3000)
- Medidor de pH digital (modelo HI 98103 de la marca Hanna)
- Recipientes para introducir las probetas estudiadas
- Matraz aforado
- Matraz Erlenmeyer
- Vaso de precipitados
- Espátula
- Vidrio de reloj
- Embudo cónico
- Pipeta graduada
- Pipeteador
- Agitador

Los reactivos necesarios para preparar los ambientes y analizar el agua son:

- $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ácido sulfúrico) de marca Quimipur y 98% de pureza
- $\text{NaOH}$  (sosa caustica) de marca Analema y 98% de pureza
- $\text{NaCl}$  (sal común) de marca Analema y 98% de pureza
- $\text{AgNO}_3$  (nitrato de plata) de marca Quimipur y 0,1N
- $\text{K}_2\text{CrO}_4$  (cromato potásico) de marca Fisher Scientific y 98% de pureza
- Agua destilada ( $\text{H}_2\text{O}$ ) como disolvente

Las características técnicas del material utilizado en el experimento se encuentran descritas en el Anexo VI: Características Técnicas del Material Empleado.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Introducción

En el presente capítulo se presentan y se discuten los resultados obtenidos. Por un lado, se indican los resultados obtenidos cada semana en la variación de masa y del porcentaje visual de corrosión de ambos. Estos resultados están reflejados en forma de superficies de respuesta y de ecuaciones predictivas. Cabe reseñar que, en dichas ecuaciones predictivas, los datos de las variables a introducir están en sus valores normalizados; pero que sin embargo el resultado está en su valor real. Por otro lado, se presentan los resultados obtenidos del análisis del agua de la dársena de la ENM, y se compara la corrosión teórica prevista según los resultados obtenidos en las predicciones semana a semana con la corrosión realmente observada en dicho ambiente.

### 4.2 Resultados para el Acero “A” (S275JR)

En el presente apartado se presentan los resultados para el acero “A” en función de las tres variables analizadas (pH,  $[Cl^-]$  e intensidad de corriente) indicando los resultados obtenidos en forma de tabla y las superficies de respuesta con sus ecuaciones predictivas correspondientes para cada período de tiempo obtenido a través del programa informático Statistics. El conjunto de datos obtenidos están reflejados en forma de tablas en el Anexo IV: Resultados del Acero “A”.

#### 4.2.1 Efecto Sinérgico del pH, Concentración de Cloruros y Corriente Eléctrica en la Pérdida de Masa de una Probeta del Acero “A”

Primeramente, se van a presentar los resultados de la pérdida de masa para los casos en los que no se aplica intensidad de corriente, y cuyas superficies de respuesta obtenidas del programa Statistics están reflejadas en la Figura 4-1, Figura 4-2 y Figura 4-3. En dichas figuras se puede observar que la cantidad de masa perdida es de aproximadamente 0,1 g por probeta a la semana.

Del análisis en detalle de las figuras se aprecia que la pérdida de masa es mayor cuanto mayor sea la concentración de iones cloruro. Además, se observa que a pH ácidos la corrosión es mayor. Sin embargo, y como se puede ver en la evolución de las superficies de respuesta, el pH no es tan determinante como la concentración de cloruros. Las ecuaciones predictivas derivadas de las superficies de respuesta están recogidas en la Tabla 4-1.

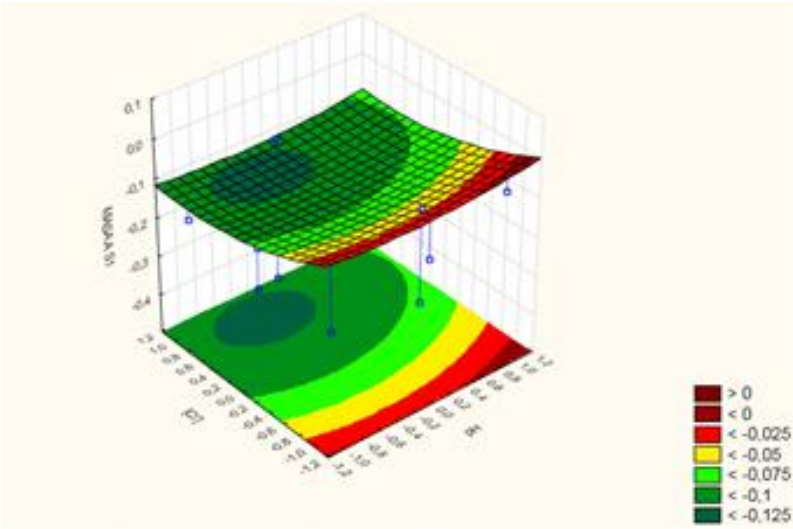


Figura 4-1 Variación de masa del acero "A" para I = 0 A tras 1 semana

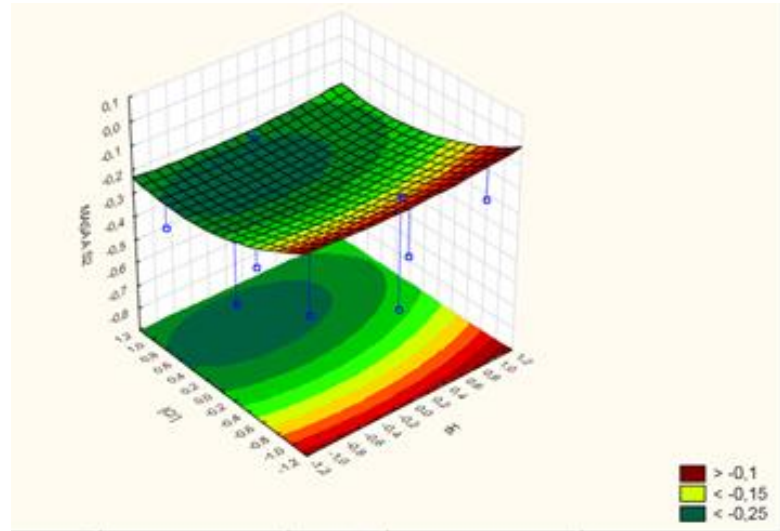


Figura 4-2 Variación de masa del acero "A" para I = 0 A tras 2 semanas

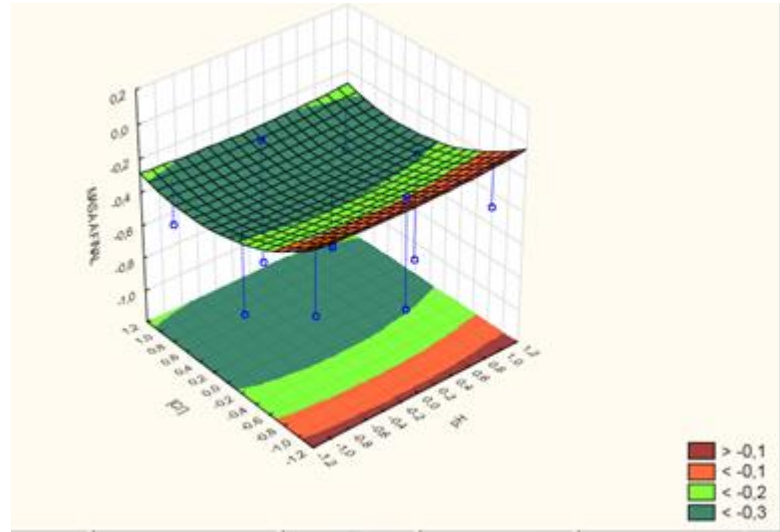


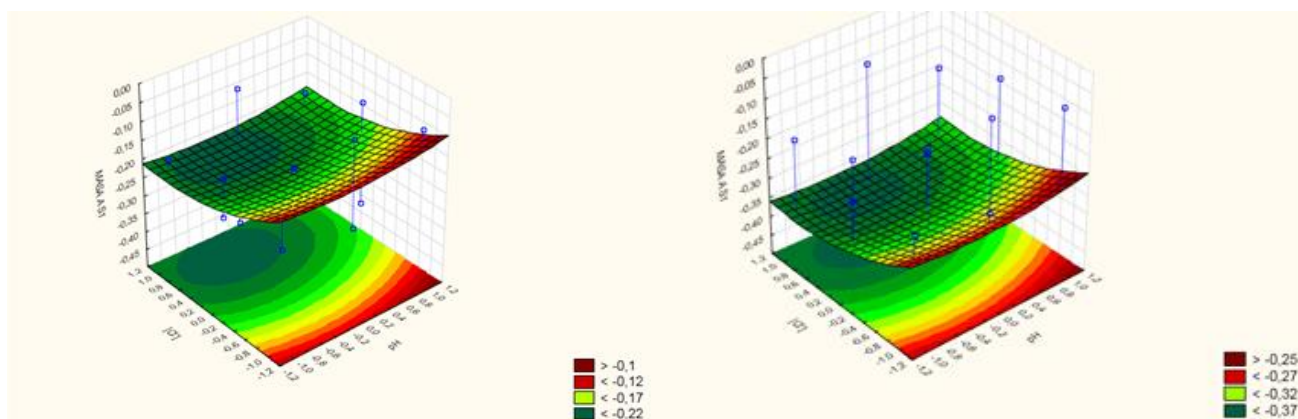
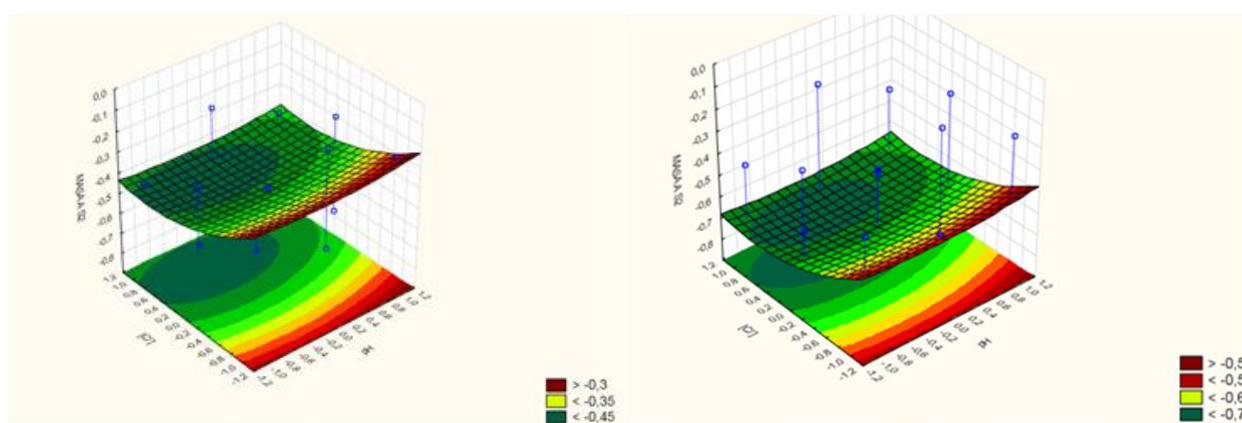
Figura 4-3 Variación de masa del acero "A" para I = 0 A tras 3 semanas

Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando  $I = 0$  A

|                |              |                                                                                                                                                       |
|----------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tras 1 semana  | <b>Ec 12</b> | $8,8 \times 10^{-3} \text{ pH} + 12,8 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 39,1 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 25,9 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,113$  |
| Tras 2 semanas | <b>Ec 13</b> | $12,2 \times 10^{-3} \text{ pH} + 17,3 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 73,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 57,9 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,238$ |
| Tras 3 semanas | <b>Ec 14</b> | $4,1 \times 10^{-3} \text{ pH} + 19,1 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 98,4 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 105,2 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,340$ |

Tabla 4-1 Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando  $I = 0$  A

Por su parte, en la Figura 4-4, Figura 4-5 y Figura 4-6 se muestran las superficies de respuesta generadas en función del pH y la concentración de cloruros cuando existe intensidad de corriente. Al igual que en el caso arriba comentado, la corrosión se acentúa en medios ácidos y altas concentraciones de cloruros. En este caso, se puede apreciar que a medida que se aumenta la intensidad de corriente la corrosión aumenta de manera notable. De hecho, de media se ha perdido hasta el doble de masa cuando la corriente era de 0,05 A y hasta el triple cuando la intensidad de corriente poseía valores de 0,1 A con respecto a los ambientes sin corriente eléctrica. Las ecuaciones predictivas derivadas de estas superficies de respuesta se presentan en la Tabla 4-2.

Figura 4-4 Variación de masa del acero "A" para  $I = 0,05$  A (izq.) y 0,1 A (dcha.) tras 1 semanaFigura 4-5 Variación de masa del acero "A" para  $I = 0,05$  A (izq.) y 0,1 A (dcha.) tras 2 semanas

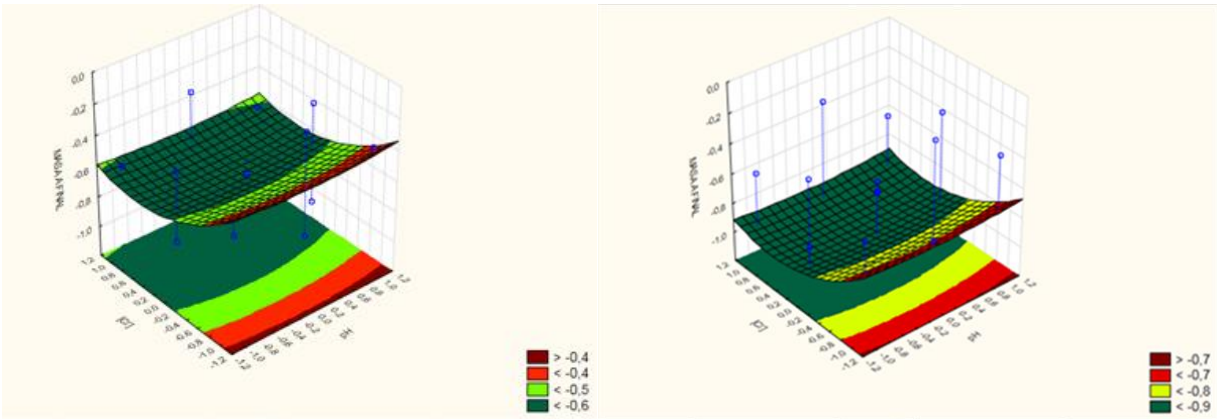


Figura 4-6 Variación de masa del acero "A" para I = 0,05 A (izq.) y 0,1 A (dcha.) tras 3 semanas

**Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando I = 0,05 A**

|                |              |                                                                                                                                                       |
|----------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tras 1 semana  | <b>Ec 15</b> | $8,8 \times 10^{-3} \text{ pH} + 12,8 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 39,1 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 25,9 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,210$  |
| Tras 2 semanas | <b>Ec 16</b> | $12,2 \times 10^{-3} \text{ pH} + 17,3 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 73,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 57,9 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,441$ |
| Tras 3 semanas | <b>Ec 17</b> | $4,1 \times 10^{-3} \text{ pH} + 19,1 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 98,4 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 105,2 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,644$ |

**Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando I = 0,1 A**

|                |              |                                                                                                                                                       |
|----------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tras 1 semana  | <b>Ec 18</b> | $8,8 \times 10^{-3} \text{ pH} + 12,8 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 39,1 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 25,9 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,358$  |
| Tras 2 semanas | <b>Ec 19</b> | $12,2 \times 10^{-3} \text{ pH} + 17,3 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 73,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 57,9 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,686$ |
| Tras 3 semanas | <b>Ec 20</b> | $4,1 \times 10^{-3} \text{ pH} + 19,1 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 98,4 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 105,2 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,749$ |

Tabla 4-2 Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando I = 0,05 e I = 0,1 A

**4.2.2 Efecto Sinérgico del pH, Concentración de Cloruros y Corriente Eléctrica en Porcentaje de Corrosión Visual Observado en una Probeta del Acero "A"**

Al igual que con la masa, también se han obtenido una serie de superficies de respuesta (ver Figura 4-7, Figura 4-8 y Figura 4-9) en función del pH del medio, la cantidad de cloruros y la intensidad de corriente y sus correspondientes ecuaciones predictivas que se recogen en la Tabla 4-3.

Al contrario de lo esperado, y de forma sorprendente, se observa que el porcentaje de corrosión se acentúa en concentraciones de cloruros medias (próximas a concentraciones que rondan el 2,5%). Asimismo, el análisis comparado de las superficies permiten apreciar que si bien inicialmente (semana 1) el porcentaje de corrosión visual es mayor cuanto más extremo es el pH (tanto ácido como alcalino), con el paso del tiempo esa diferencia desaparece y prácticamente no hay un máximo porcentaje de corrosión en función del pH (ver Figura 4-9).

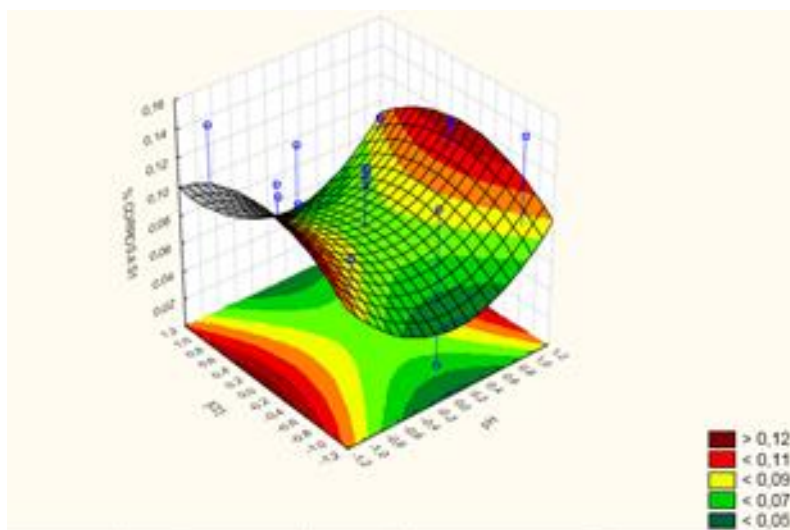


Figura 4-7 Porcentaje de corrosión visual del acero "A" para  $I = 0$  A tras 1 semana

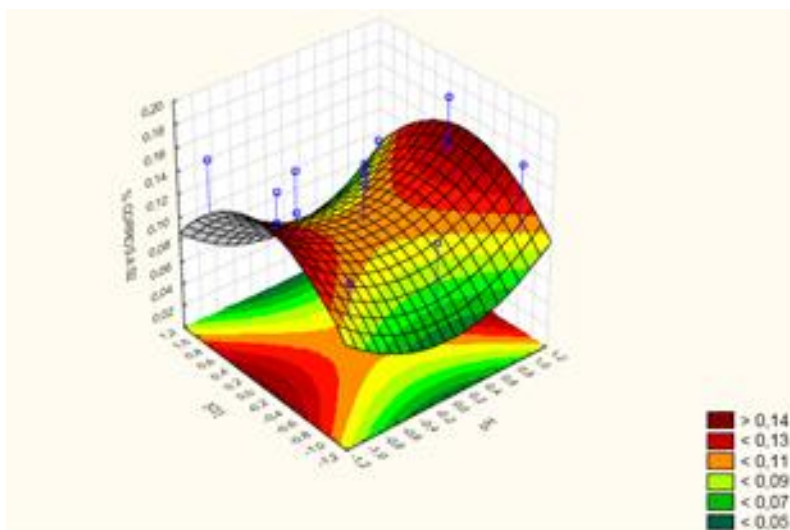


Figura 4-8 Porcentaje de corrosión visual del acero "A" para  $I = 0$  A tras 2 semanas

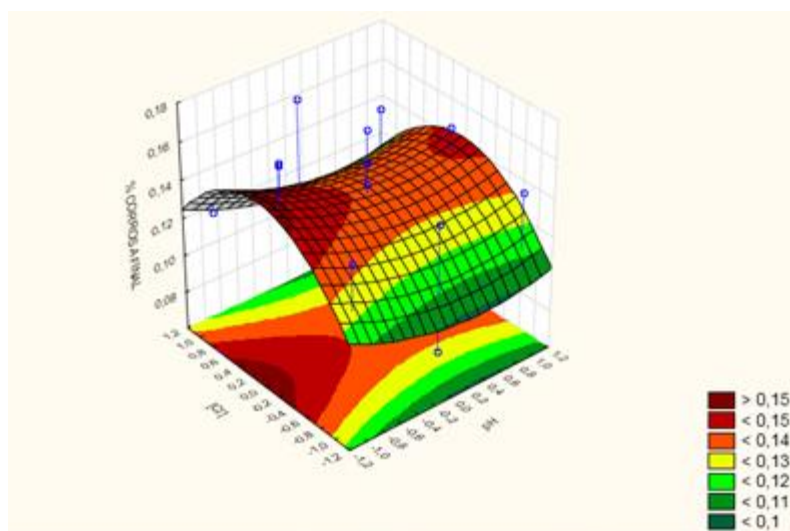


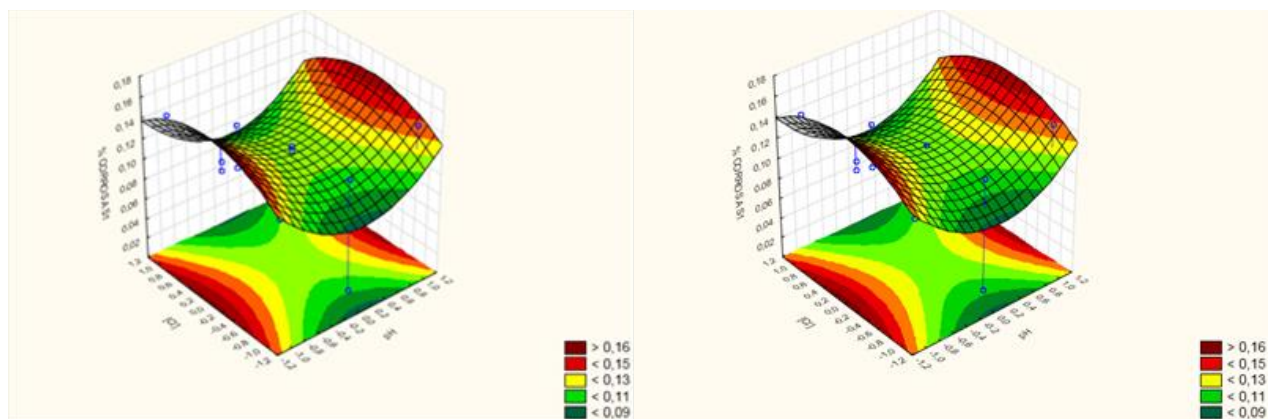
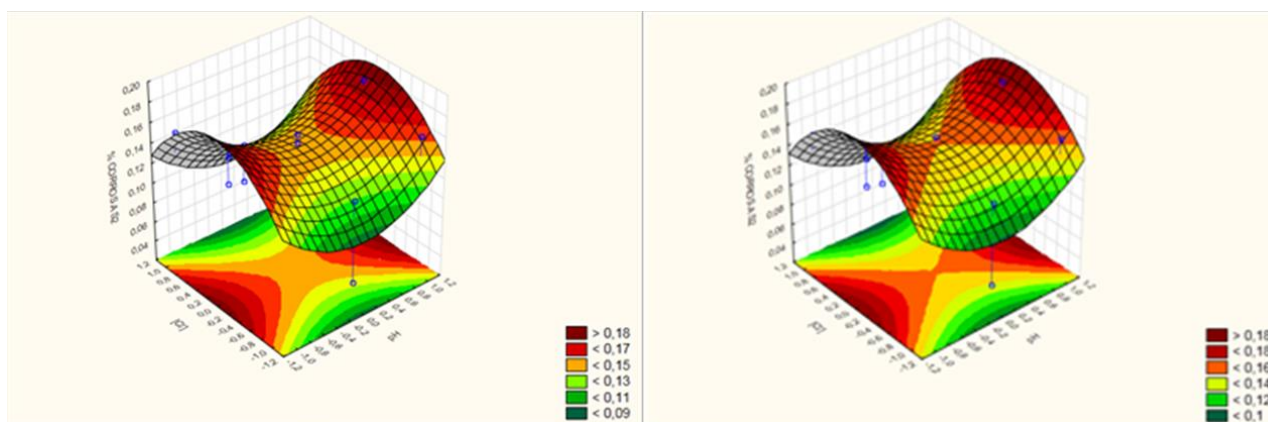
Figura 4-9 Porcentaje de corrosión visual del acero "A" para  $I = 0$  A tras 3 semanas

**Ecuaciones predictivas para el porcentaje de corrosión visual para  $I = 0$  A**

|                |              |                                                                                                                                                      |
|----------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tras 1 semana  | <b>Ec 21</b> | $-3,1 \times 10^{-3} \text{ pH} + 32,2 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 1,0 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 19,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,077$ |
| Tras 2 semanas | <b>Ec 22</b> | $-0,9 \times 10^{-3} \text{ pH} + 28,8 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 2,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 38,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,104$ |
| Tras 3 semanas | <b>Ec 23</b> | $-5,3 \times 10^{-3} \text{ pH} + 7,6 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 3,7 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 24,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,140$  |

**Tabla 4-3 Ecuaciones predictivas para el cálculo del porcentaje de corrosión visual para  $I = 0$  A**

De igual modo, también se han obtenido superficies de respuesta (ver Figura 4-10, Figura 4-11 y Figura 4-12) y ecuaciones predictivas (ver Tabla 4-4), para los casos en los que la intensidad de corriente opera, observándose que, al igual que en el caso en el que no existe corriente eléctrica, la corrosión se acentúa a valores de pH extremos y concentraciones de cloruros medias. Comparando los resultados con los observados cuando se valora la pérdida de masa (4.2.1), es de destacar que no se aprecia un aumento de la corrosión de manera tan notable cuando aumenta la intensidad de corriente. De hecho, se notan cambios en el porcentaje de corrosión cuando se comparan las superficies con ella y sin ella, donde se presentan que rondan entre un 5% y un 10% entre probetas introducidas en medios con y sin corriente eléctrica. Sin embargo, la diferencia en los resultados cuando la intensidad varía de 0,05 A a 0,1 A no es tan apreciable, lo que se corrobora analizando las ecuaciones predictivas correspondientes reflejadas en la Tabla 4-4.

**Figura 4-10 Porcentaje de corrosión visual del acero "A" para  $I = 0,05$  A (izq.) y 0,1 A (dcha.) tras 1 semana****Figura 4-11 Porcentaje de corrosión visual del acero "A" para  $I = 0,05$  A (izq.) y 0,1 A (dcha.) tras 2 semanas**

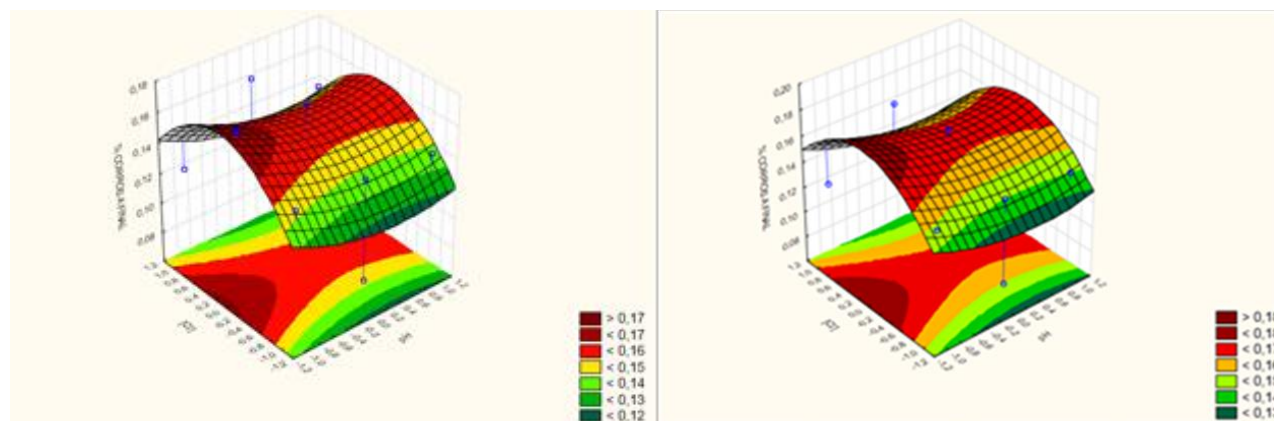


Figura 4-12 Porcentaje de corrosión visual del acero "A" para  $I = 0,05$  A (izq.) y  $0,1$  A (dcha.) tras 3 semanas

#### Ecuaciones predictivas para el porcentaje de corrosión visual para $I = 0,05$ A

|                |              |                                                                                                                                                       |
|----------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tras 1 semana  | <b>Ec 24</b> | $- 3,1 \times 10^{-3} \text{ pH} + 32,2 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 1,0 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 19,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,115$ |
| Tras 2 semanas | <b>Ec 25</b> | $- 0,9 \times 10^{-3} \text{ pH} + 28,8 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 2,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 38,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,146$ |
| Tras 3 semanas | <b>Ec 26</b> | $- 5,3 \times 10^{-3} \text{ pH} + 7,6 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 3,7 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 24,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,156$  |

#### Ecuaciones predictivas para el porcentaje de corrosión visual para $I = 0,1$ A

|                |              |                                                                                                                                                       |
|----------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tras 1 semana  | <b>Ec 27</b> | $- 3,1 \times 10^{-3} \text{ pH} + 32,2 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 1,0 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 19,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,116$ |
| Tras 2 semanas | <b>Ec 28</b> | $- 0,9 \times 10^{-3} \text{ pH} + 28,8 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 2,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 38,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,150$ |
| Tras 3 semanas | <b>Ec 29</b> | $- 5,3 \times 10^{-3} \text{ pH} + 7,6 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 3,7 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 24,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,164$  |

Tabla 4-4 Ecuaciones predictivas para el cálculo del porcentaje de corrosión visual para  $I = 0,05$  A e  $I = 0,1$  A

### 4.2.3 Cinética de la Corrosión

En la Figura 4-13 se muestra la variación de la velocidad de corrosión a lo largo de todo el experimento. La velocidad de corrosión se calcula según la siguiente fórmula:

$$\text{Velocidad corrosión} = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa final}}{\text{densidad} \times \text{superficie de exposición} \times \text{tiempo de exposición}} \quad (\text{Ec 30})$$

donde, la densidad del acero es una constante que posee un valor de  $7850 \text{ kg/m}^3$  y la superficie de exposición se corresponde con la parte sumergida de cada probeta, que coincide con un tercio de la longitud de la misma (aproximadamente  $33 \text{ mm}^2$ ).

En la gráfica se puede observar que en los primeros días se han producido grandes picos y variaciones en la velocidad de corrosión, sin embargo luego la velocidad de corrosión se estabiliza a valores casi constantes para cada ambiente. Respecto a la variación de velocidades de corrosión de los distintos medios, por un lado se observa que los que presentan una mayor velocidad de corrosión son los medios a los que se aplicó una mayor cantidad de intensidad de corriente (medios n<sup>os</sup> 3, 4, 10 y 12). Posteriormente se sitúan los medios con una intensidad de corriente media (medios n<sup>os</sup> 5, 6, 7, 8, 13, 14 y 15) y finalmente los medios que no poseían intensidad de corriente (medios n<sup>os</sup> 1, 2, 9 y 11). Este comportamiento es el esperado de acuerdo con lo observado en estudios previos [25], que señala que el paso de una corriente eléctrica acelera el proceso corrosivo.

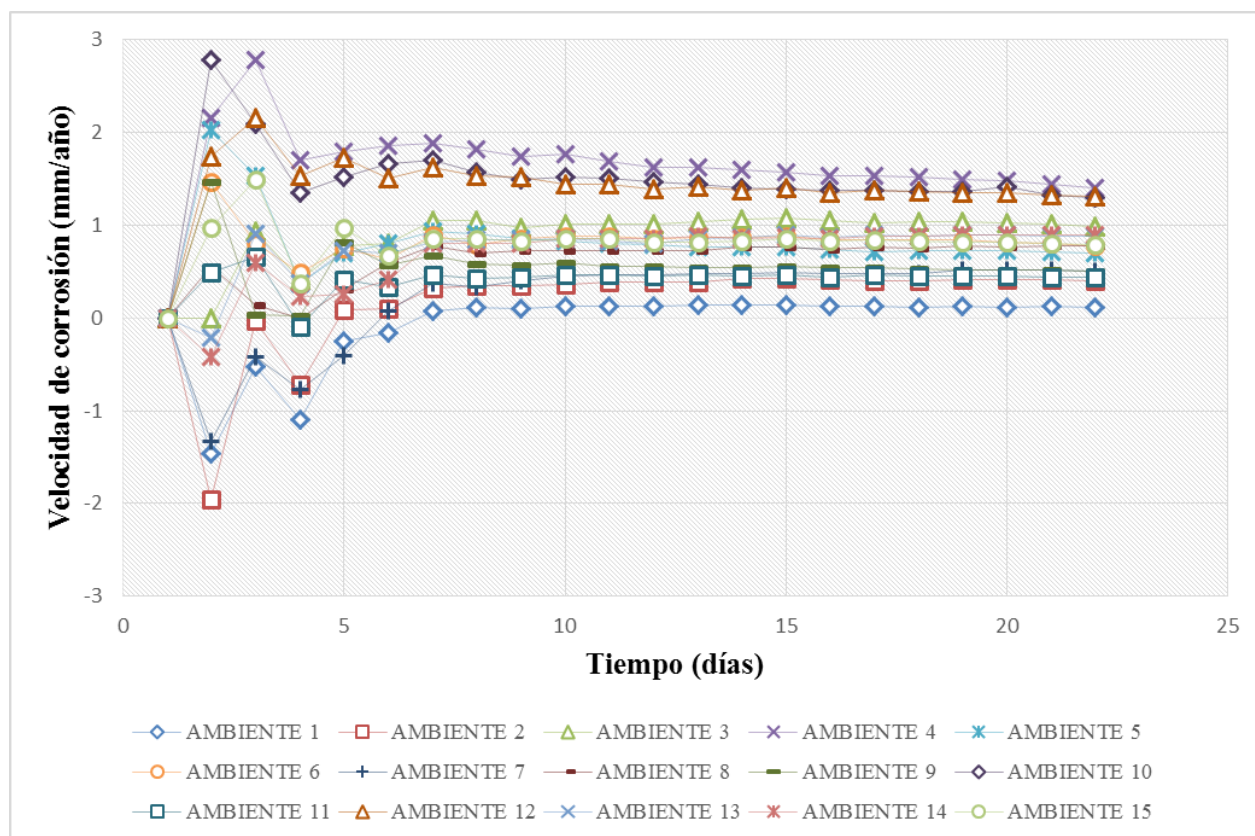


Figura 4-13 Evolución de la velocidad corrosión acero "A" (mm/año)

Las velocidades de corrosión medias tras finalizar el experimento para cada ambiente están reflejadas en el gráfico de la Figura 4-14. Todas las velocidades rondan entre los 0,1 y 2 mm/año de velocidad de corrosión, valores aceptables y que coinciden con varios estudios previos efectuados [48].

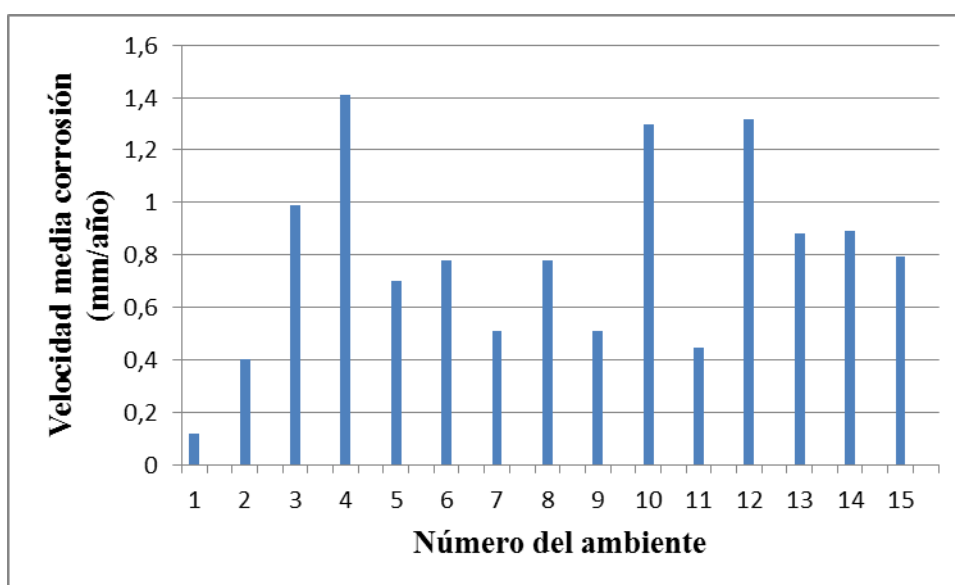


Figura 4-14 Velocidad media de corrosión acero "A" (mm/año)

Asimismo, comparando ambos gráficos, se puede apreciar que dentro de cada grupo de ambientes con la misma corriente eléctrica se produce, de manera general, mayor velocidad de corrosión en los que poseen un mayor porcentaje de cloruros disueltos. Con respecto al efecto del pH, en medios con la misma intensidad de corriente y cantidad de cloruros se produce una mayor velocidad de corrosión

cuanto más ácido sea ese medio con excepción del medio n° 12 que, pese a ser un medio alcalino, presenta una velocidad de corrosión prácticamente igual que el medio n° 10, que es ácido.

### 4.3 Resultados para el Acero “B” (S235JR)

En el presente apartado se presentan y discuten los resultados para el acero “B”, siguiendo una estructura similar a la realizada para el acero “A”. El conjunto de datos obtenidos están recogidos en forma de tablas en el Anexo V: Resultados del Acero “B”.

#### 4.3.1 Efecto Sinérgico del pH, Concentración de Cloruros y Corriente Eléctrica en la Pérdida de Masa de una Probeta del Acero “B”

En la Figura 4-15, Figura 4-16 y Figura 4-17 se muestran las superficies de respuesta cuando no hay par intensidad de corriente. El comportamiento observado es similar al obtenido para el acero “A”: la pérdida de masa media es algo superior a 0,1g por probeta a la semana, mayor cuanto mayor es la concentración de iones cloruro y también mayor a pH ácidos. De nuevo el efecto del pH es menos determinante que la concentración de cloruros. Las ecuaciones predictivas derivadas de las superficies de respuesta están reflejadas en la Tabla 4-5.

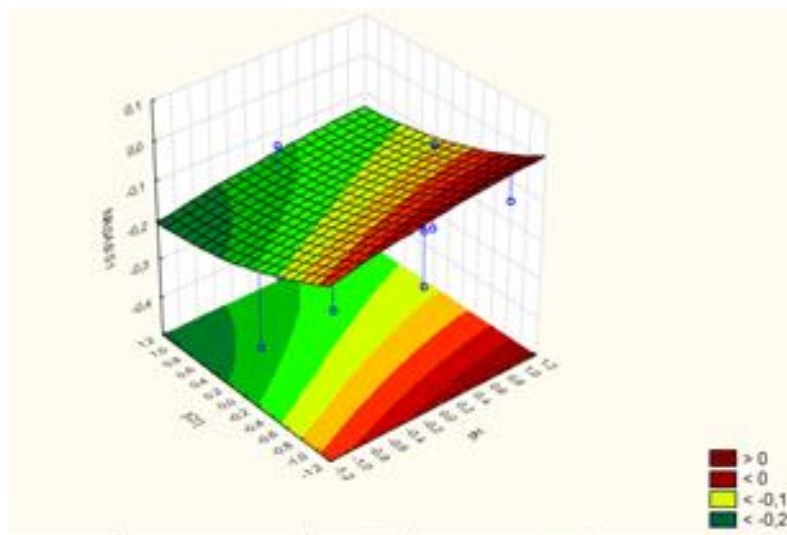


Figura 4-15 Variación de masa del acero "B" para I = 0 A tras 1 semana

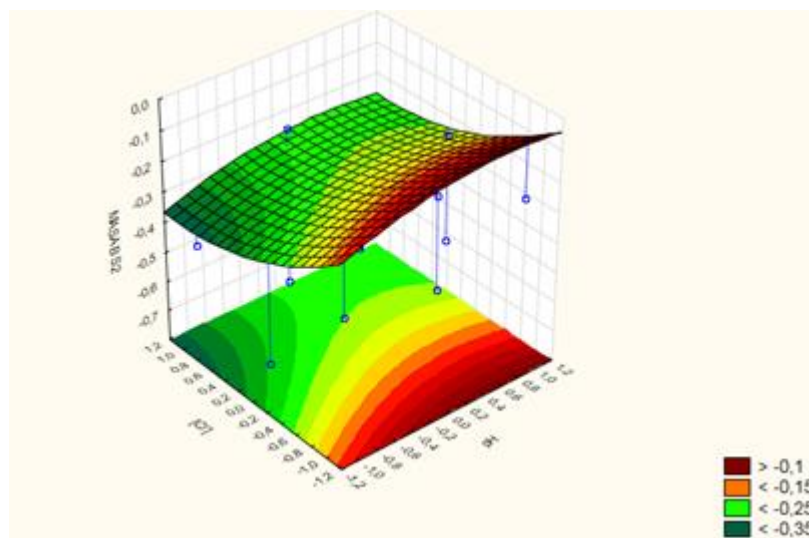


Figura 4-16 Variación de masa del acero "B" para I = 0 A tras 2 semanas

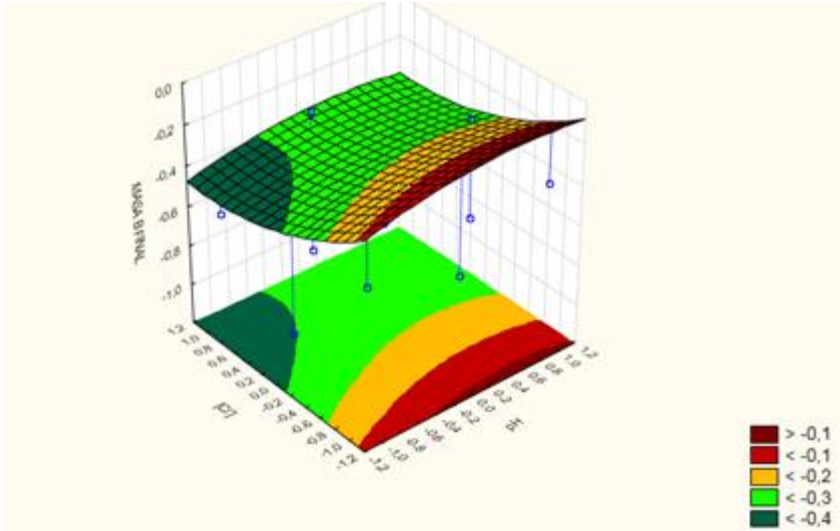


Figura 4-17 Variación de masa del acero "B" para I = 0 A tras 3 semanas

**Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando I = 0 A**

|                |              |                                                                                                                                                        |
|----------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tras 1 semana  | <b>Ec 31</b> | $28,8 \times 10^{-3} \text{ pH} - 7,2 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 60,0 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 21,6 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,118$   |
| Tras 2 semanas | <b>Ec 32</b> | $40 \times 10^{-3} \text{ pH} - 32,40 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 95,3 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 45,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,224$   |
| Tras 3 semanas | <b>Ec 33</b> | $37,8 \times 10^{-3} \text{ pH} - 39,2 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 125,9 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 65,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,319$ |

**Tabla 4-5 Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando I = 0 A**

En la Figura 4-18, Figura 4-19 y Figura 4-20 se muestran las superficies de respuesta generadas en función del pH y la concentración de cloruros cuando se produce intensidad de corriente y de nuevo comportamiento es similar al observado para el acero "A". Así, al igual que en el caso en el que no hay corriente eléctrica, la corrosión se acentúa en medios ácidos y altas concentraciones de cloruros. En este caso se puede apreciar que a medida que se aumenta la intensidad, la corrosión aumenta de manera notable. De hecho, de media se ha perdido hasta el doble de masa cuando la intensidad posee un valor de 0,05 A y el triple cuando el valor es de 0,1 A al igual que en el acero "A". Las ecuaciones predictivas derivadas de las superficies de respuesta están reflejadas en la Tabla 4-6.

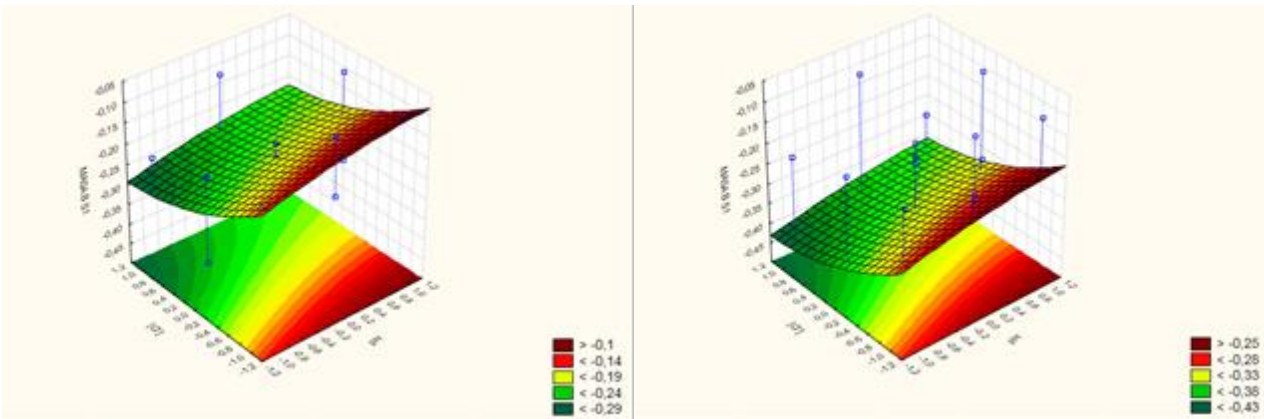


Figura 4-18 Variación de masa del acero "B" para I = 0,05 A (izq.) y 0,1 A (dcha.) tras 1 semana

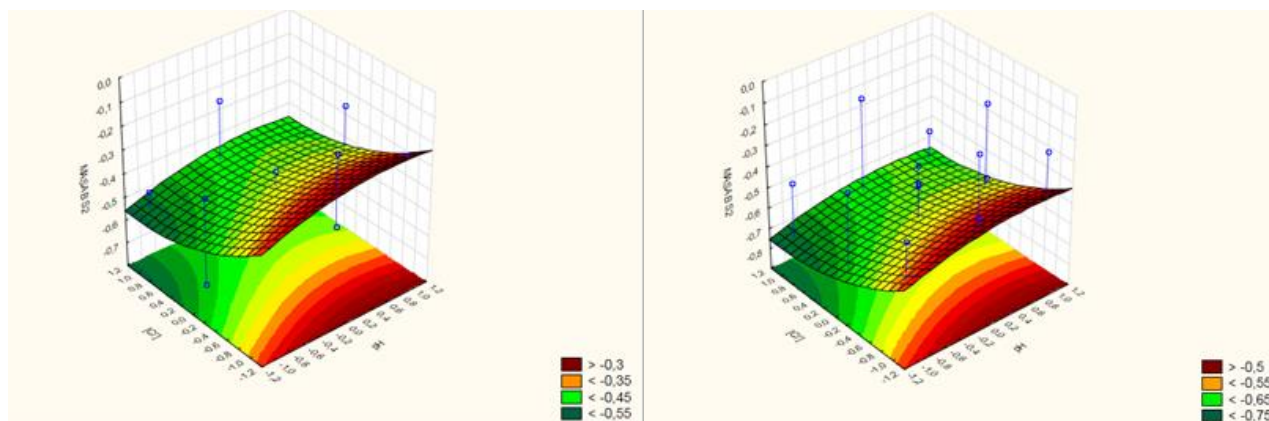


Figura 4-19 Variación de masa del acero "B" para I = 0,05 A (izq.) y 0,1 A (dcha.) tras 2 semanas

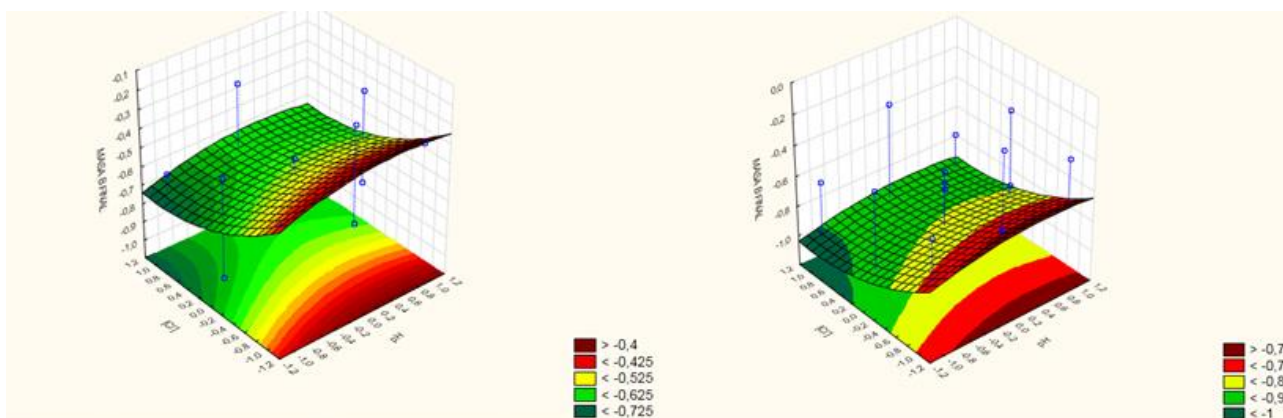


Figura 4-20 Variación de masa del acero "B" para I = 0,05 A (izq.) y 0,1 A (dcha.) tras 3 semanas

#### Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando I = 0,05 A

|                |              |                                                                                                                                                        |
|----------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tras 1 semana  | <b>Ec 34</b> | $28,8 \times 10^{-3} \text{ pH} - 7,2 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 60,0 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 21,6 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,208$   |
| Tras 2 semanas | <b>Ec 35</b> | $40 \times 10^{-3} \text{ pH} - 32,40 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 95,3 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 45,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,416$   |
| Tras 3 semanas | <b>Ec 36</b> | $37,8 \times 10^{-3} \text{ pH} - 39,2 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 125,9 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 65,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,582$ |

#### Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando I = 0,1 A

|                |              |                                                                                                                                                        |
|----------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tras 1 semana  | <b>Ec 37</b> | $28,8 \times 10^{-3} \text{ pH} - 7,2 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 60,0 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 21,6 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,346$   |
| Tras 2 semanas | <b>Ec 38</b> | $40 \times 10^{-3} \text{ pH} - 32,40 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 95,3 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 45,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,612$   |
| Tras 3 semanas | <b>Ec 39</b> | $37,8 \times 10^{-3} \text{ pH} - 39,2 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 - 125,9 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 65,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 - 0,880$ |

Tabla 4-6 Ecuaciones predictivas para la pérdida de masa cuando I = 0,05 e I = 0,1 A

#### 4.3.2 Efecto Sinérgico del pH, Concentración de Cloruros y Corriente Eléctrica en Porcentaje de Corrosión Visual Observado en una Probeta del Acero "B"

La Figura 4-21, Figura 4-22 y Figura 4-23 muestran el efecto de la corrosión en función del pH y concentración de cloruros cuando la intensidad de corriente es 0. Analizando en detalle las mismas se sigue que el porcentaje de corrosión visual es mayor cuanto más extremo sea el pH, tanto ácido como alcalino. El porcentaje de corrosión se acentúa inicialmente en concentraciones de cloruros altas. A medida que transcurre el tiempo el mayor porcentaje de corrosión se traslada a las zonas más alcalinas

y en concentraciones de cloruros medias. Las ecuaciones predictivas derivadas de las superficies de respuesta se muestran en la Tabla 4-7.

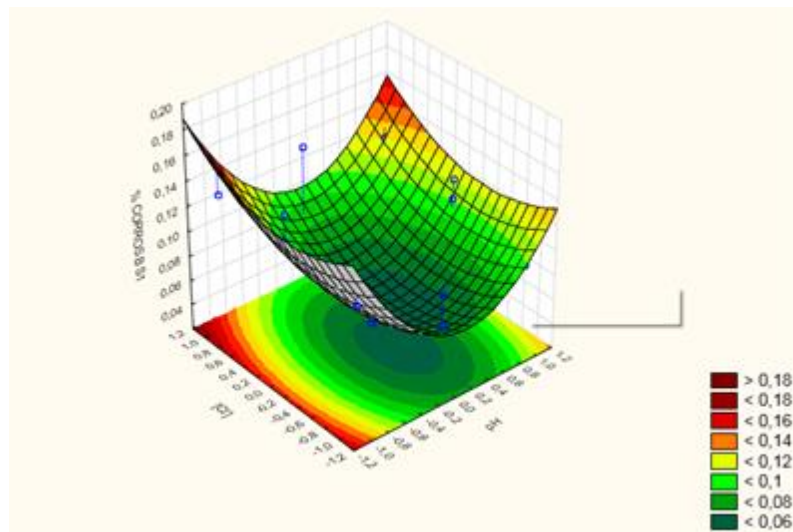


Figura 4-21 Porcentaje de corrosión visual del acero "B" para  $I = 0$  A tras 1 semana

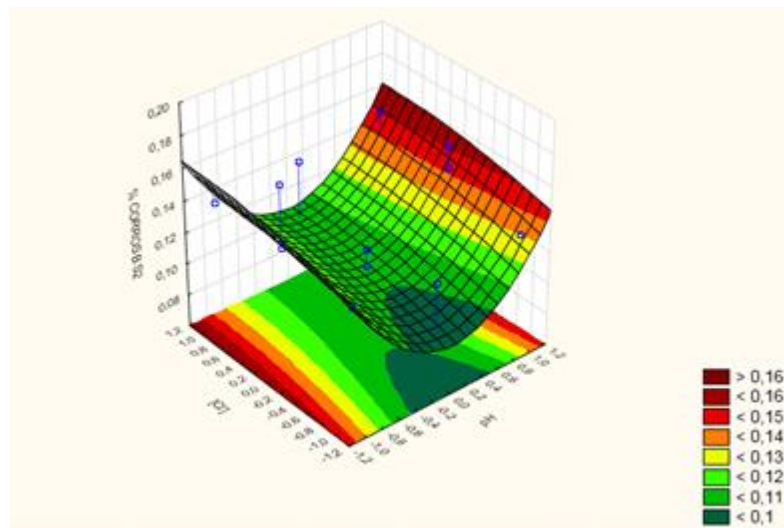


Figura 4-22 Porcentaje de corrosión visual del acero "B" para  $I = 0$  A tras 2 semanas

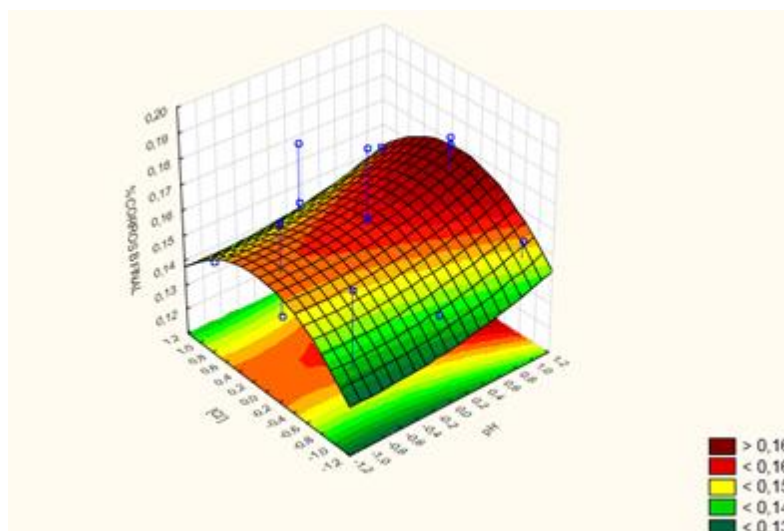


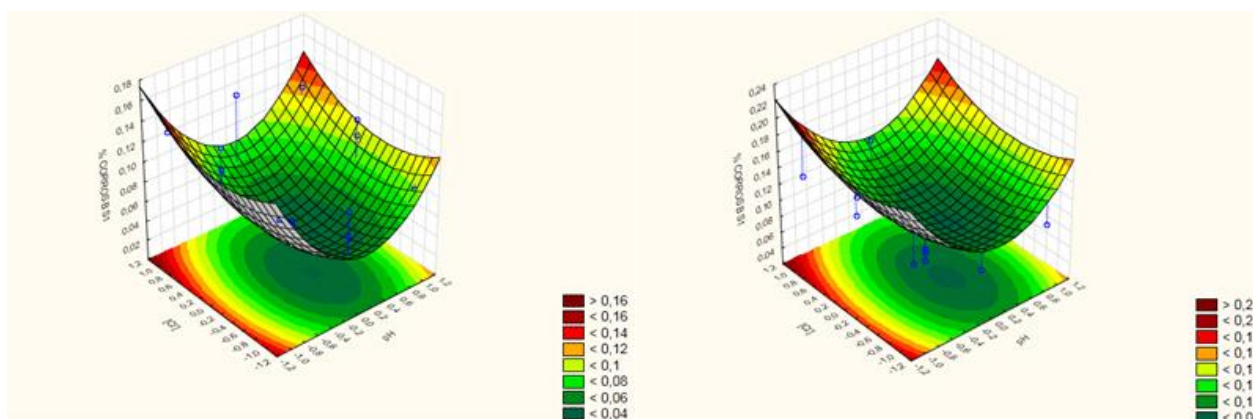
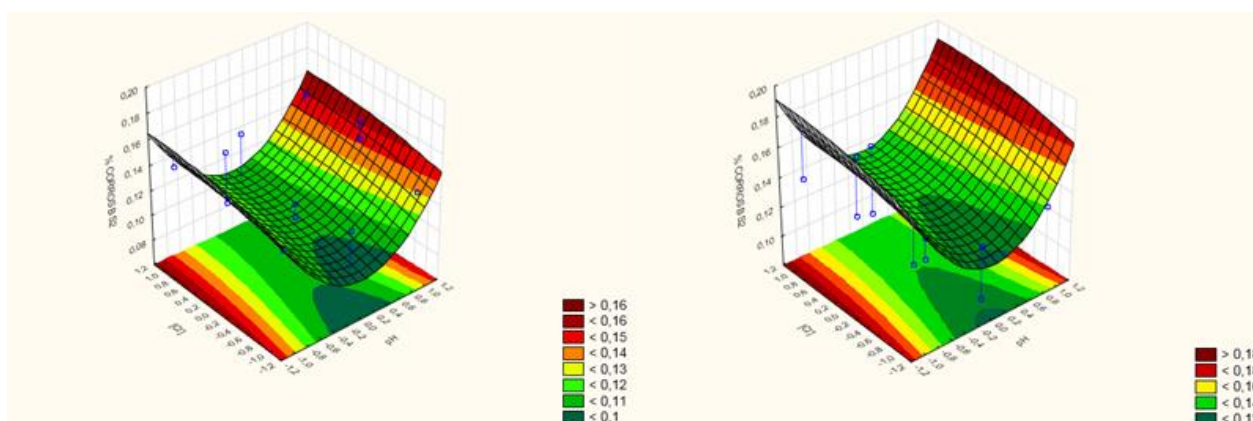
Figura 4-23 Porcentaje de corrosión visual del acero "B" para  $I = 0$  A tras 3 semanas

**Ecuaciones predictivas para el porcentaje de corrosión visual para I = 0 A**

|                |              |                                                                                                                                                        |
|----------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tras 1 semana  | <b>Ec 40</b> | $-12,7 \times 10^{-3} \text{ pH} + 52,9 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 10,0 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 19,5 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,056$ |
| Tras 2 semanas | <b>Ec 41</b> | $-1,4 \times 10^{-3} \text{ pH} + 39,1 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 6,6 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 2,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,102$    |
| Tras 3 semanas | <b>Ec 42</b> | $-5,7 \times 10^{-3} \text{ pH} + 2,9 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 3,4 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 14,9 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,157$    |

**Tabla 4-7 Ecuaciones predictivas para el cálculo del porcentaje de corrosión visual para I = 0 A**

En la Figura 4-24, Figura 4-25 y Figura 4-26 se muestran las superficies de respuesta cuando se aplica corriente. En este caso, sin embargo, al contrario que en el acero “A”, se puede apreciar que a medida que se aumenta la intensidad de corriente la corrosión sí aumenta de manera apreciable como ocurre con la variación de masa. Así, se notan cambios en el porcentaje de corrosión cuando se comparan las superficies de respuesta obtenidas para las dos diferentes intensidades. Se puede observar que cuando la intensidad es de 0,1 A se producen aumentos en el porcentaje de corrosión de hasta un 5% con respecto a las superficies de respuesta para una intensidad de 0,05 A. Las ecuaciones predictivas correspondientes se recogen en la Tabla 4-8.

**Figura 4-24 Porcentaje de corrosión visual del acero "B" para I = 0,05 A (izq.) y 0,1 A (dcha.) tras 1 semana****Figura 4-25 Porcentaje de corrosión visual del acero "B" para I = 0,05 A (izq.) y 0,1 A (dcha.) tras 2 semanas**

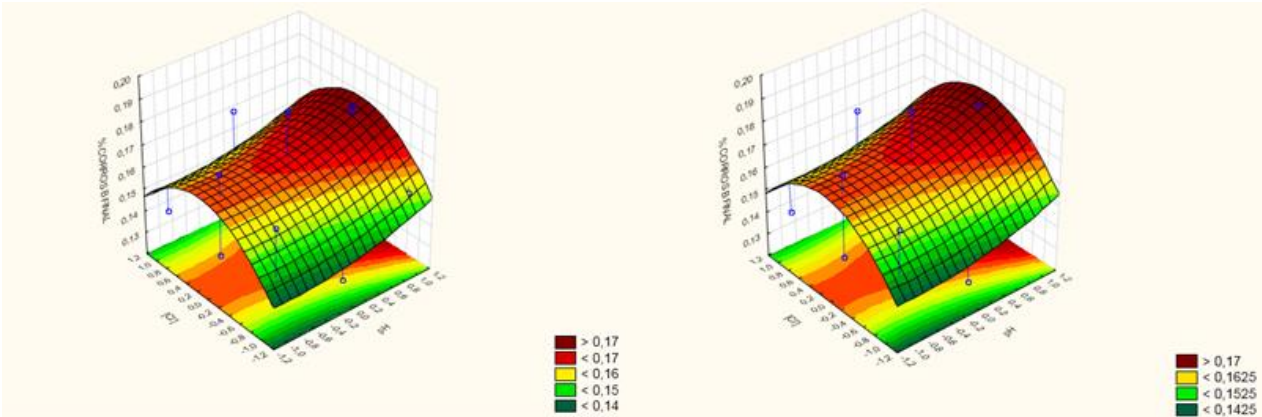


Figura 4-26 Porcentaje de corrosión visual del acero "B" para I = 0,05 A (izq.) y 0,1 A (dcha.) tras 3 semanas

**Ecuaciones predictivas para el porcentaje de corrosión visual para I = 0,05 A**

|                |              |                                                                                                                                                         |
|----------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tras 1 semana  | <b>Ec 43</b> | $- 12,7 \times 10^{-3} \text{ pH} + 52,9 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 10,0 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 19,5 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,042$ |
| Tras 2 semanas | <b>Ec 44</b> | $- 1,4 \times 10^{-3} \text{ pH} + 39,1 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 6,6 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 2,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,103$    |
| Tras 3 semanas | <b>Ec 45</b> | $- 5,7 \times 10^{-3} \text{ pH} + 2,9 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 3,4 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 14,9 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,167$    |

**Ecuaciones predictivas para el porcentaje de corrosión visual para I = 0,1 A**

|                |              |                                                                                                                                                         |
|----------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tras 1 semana  | <b>Ec 46</b> | $- 12,7 \times 10^{-3} \text{ pH} + 52,9 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 10,0 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] + 19,5 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,090$ |
| Tras 2 semanas | <b>Ec 47</b> | $- 1,4 \times 10^{-3} \text{ pH} + 39,1 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 6,6 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 2,8 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,129$    |
| Tras 3 semanas | <b>Ec 48</b> | $- 5,7 \times 10^{-3} \text{ pH} + 2,9 \times 10^{-3} \text{ pH}^2 + 3,4 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-] - 14,9 \times 10^{-3} [\text{Cl}^-]^2 + 0,169$    |

Tabla 4-8 Ecuaciones predictivas para el cálculo del porcentaje de corrosión visual para I = 0,05 A e I = 0,1 A

**4.3.3 Cinética de la Corrosión**

La velocidad de corrosión se ha calculado según la Ec 30 que se encuentra en el apartado 4.2.3.

Los resultados son similares a los encontrados para el acero "A". De nuevo se observan importantes variaciones en la velocidad de corrosión durante los primeros días, y su posterior ralentización hasta llegar a valores casi constantes para cada ambiente. Igualmente, la velocidad de corrosión está altamente influida por la intensidad de corriente siendo mayor cuanto mayor es ésta (Figura 4-27).

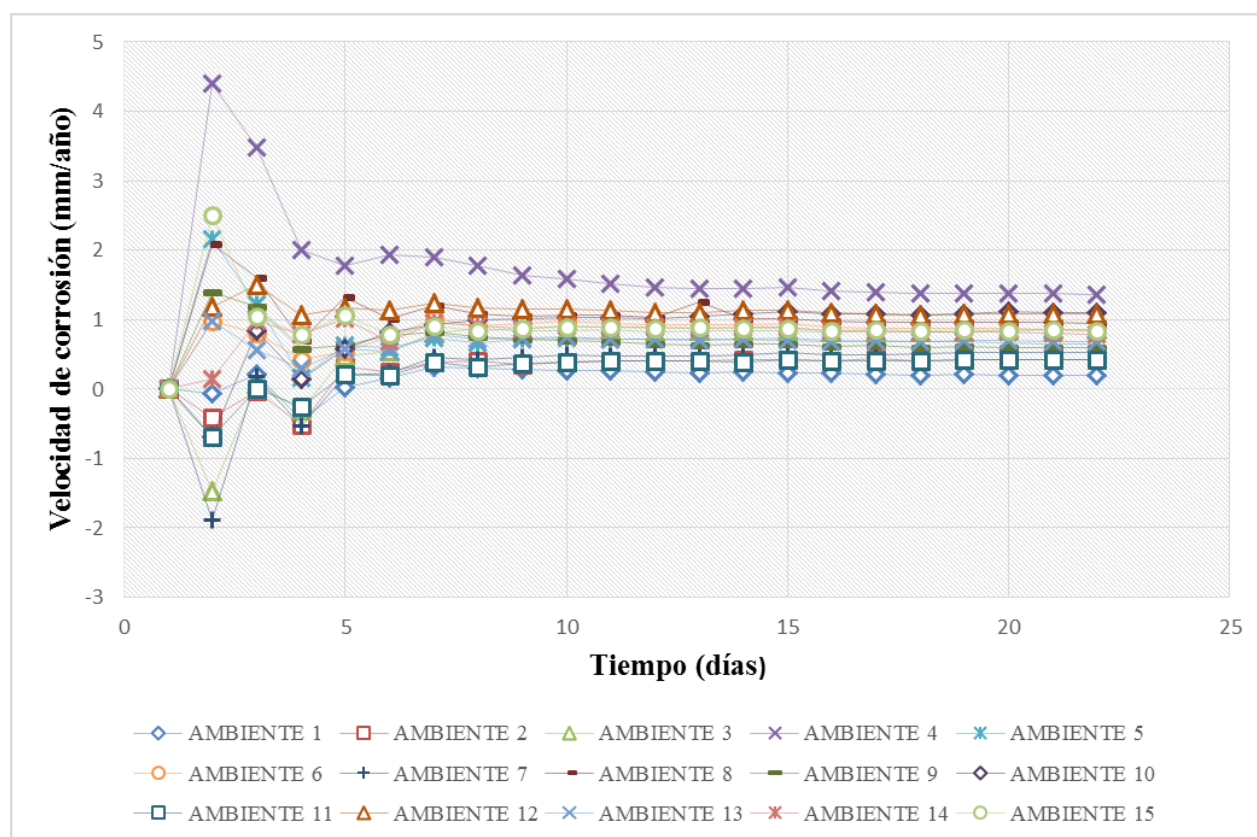


Figura 4-27 Evolución de la velocidad corrosión acero "B" (mm/año)

Las velocidades de corrosión medias tras finalizar el experimento para cada medio, están reflejadas en la Figura 4-28. Al igual que en el acero "A", todas las velocidades rondan entre los 0,2 y 2 mm/año de velocidad de corrosión, que son valores aceptables y que coinciden con estudios previos descritos en la bibliografía [48].

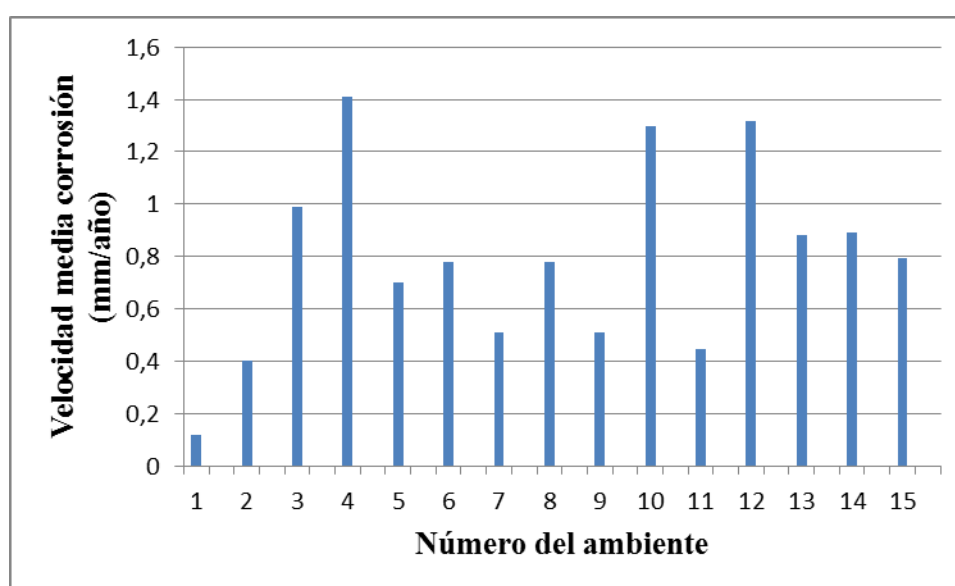


Figura 4-28 Velocidad media de corrosión acero "B" (mm/año)

Observando ambas figuras se aprecia que la corrosión es más rápida en aquellos medios que poseen un mayor porcentaje de cloruros disueltos. Comparando medios con la misma corriente y cantidad de cloruros, se ve que la velocidad de corrosión es mayor cuanto menor sea el pH de ese medio.

## 4.4 Discusión Comparada de los Resultados Obtenidos de Ambos Aceros

### 4.4.1 Variación de Masa

Ambos aceros poseen graficas de corrosión similares, donde las mayores pérdidas de masa se producen en los ambientes donde la intensidad de corriente es mayor. Además, en caso de igualdad de intensidad de corriente, la corrosión se acentúa en ambientes ácidos y altas concentraciones de cloruros. De las gráficas también se sigue que la concentración de cloruros es más determinante que el pH a la hora de producirse una mayor corrosión.

En la Figura 4-29 se muestra una gráfica con la variación de masa experimentada por ambos aceros como consecuencia de la corrosión según el ambiente en el que se encuentran. En general, ambos aceros experimentan pérdidas de masa parecidas, si bien hay pequeñas variaciones. En los medios n<sup>os</sup> 2, 5, 6, 7, 9, 11, 14 y 15 las probetas de ambos aceros se corroen en cantidad similar. Sin embargo, en los medios n<sup>os</sup> 3, 4, 10, 12 y 13 se han corroído más notablemente las probetas del acero “A” y en los medios n<sup>os</sup> 1 y 8 se han corroído más las probetas del acero “B”. En líneas generales se observa que el acero “A” se ha corroído más que el “B”, esto es, el acero con mayor porcentaje de carbono experimenta mayor corrosión. Este comportamiento está de acuerdo con trabajos y experimentaciones previas, que habían encontrado una correlación positiva entre un mayor porcentaje de carbono mayor corrosión [30] [49] [50].

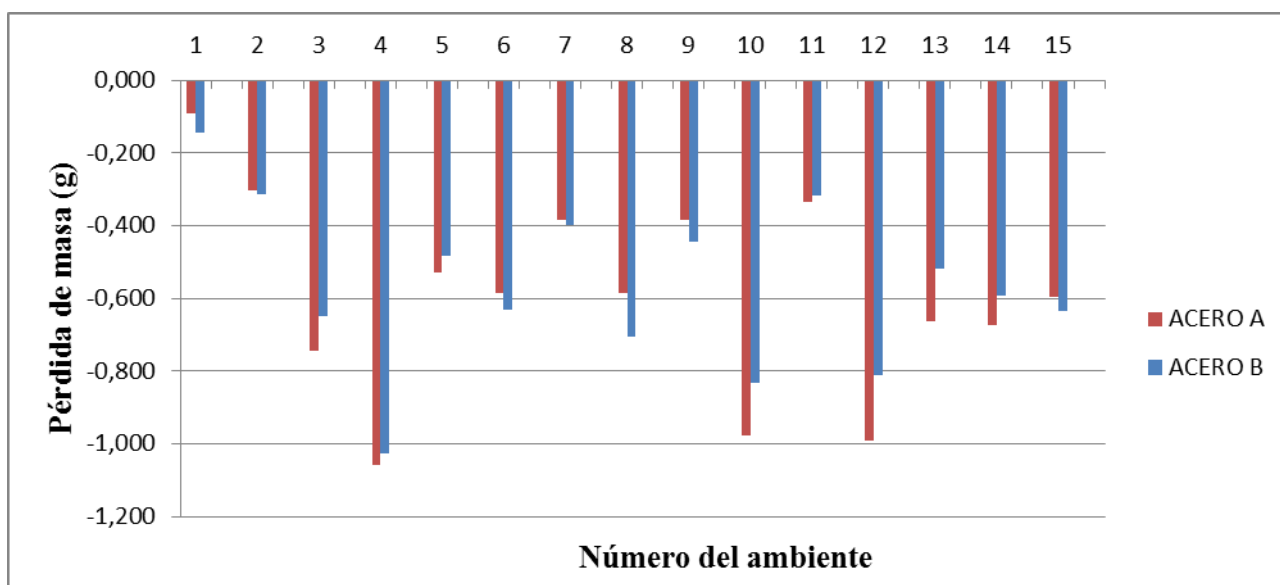


Figura 4-29 Variación final de masa para ambos aceros

### 4.4.2 Porcentaje de Corrosión Visual

Respecto al porcentaje de corrosión visual se obtienen resultados dispares para ambos aceros. Mientras que para el acero “A” se obtiene el mayor pico de corrosión en un pH ácido y una cantidad de cloruros media (en torno al 2,5%), en el acero “B” se obtiene una gráfica diferente. En este caso, el mayor pico de corrosión se da en concentraciones de cloruros medias, pero situándose en pH alcalinos. En la Figura 4-30 se puede observar la diferencia de porcentaje visual de corrosión en ambos aceros según el ambiente en el que se encuentren.

Contrario a lo esperado [30] [49] [50], y a lo observado con ayuda del procedimiento de pérdida de masa (4.4.1), nuestros estudios basados en porcentaje de corrosión visual concluyen que la mayor corrosión se produce en probetas del acero “B”, que es el de menor porcentaje de carbono. Estos inesperados resultados parecen deberse a que este método depende de la zona de la probeta donde se haya tomado la fotografía de la corrosión que no siempre es representativa del grado total de corrosión de la probeta.

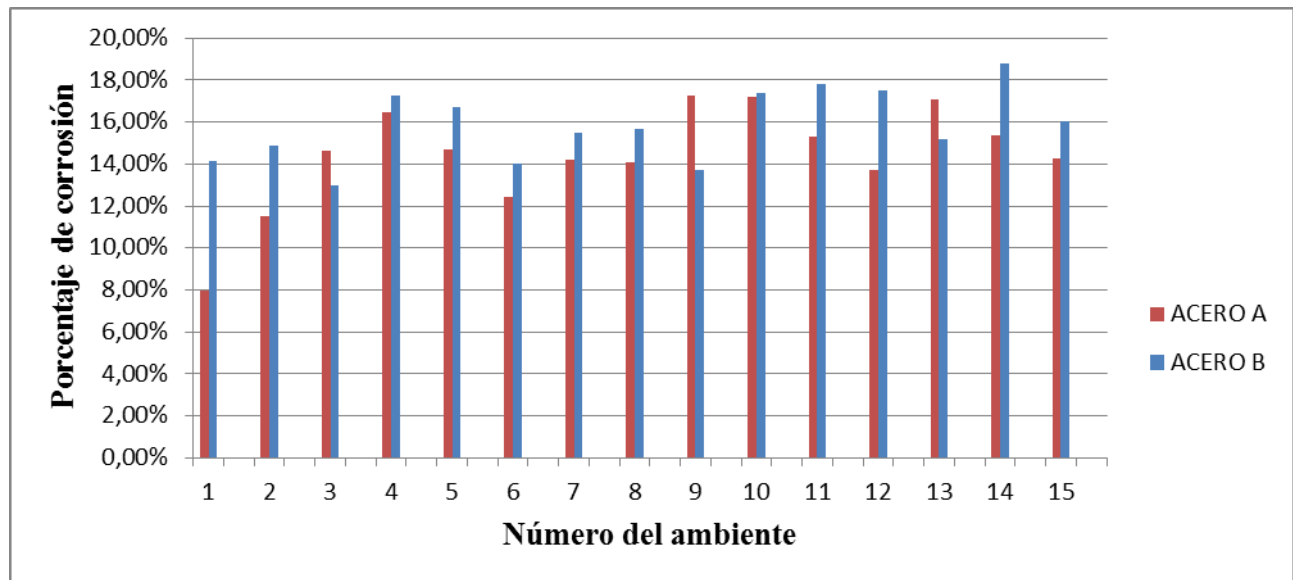


Figura 4-30 Variación final del porcentaje de corrosión visual para ambos aceros

#### 4.4.3 Cinética de la Corrosión

La velocidad de corrosión se ha calculado sobre la base de la pérdida de masa observada. Comparando la cinética de las reacciones de corrosión, se puede concluir que ambos aceros se han corroído de la misma manera.

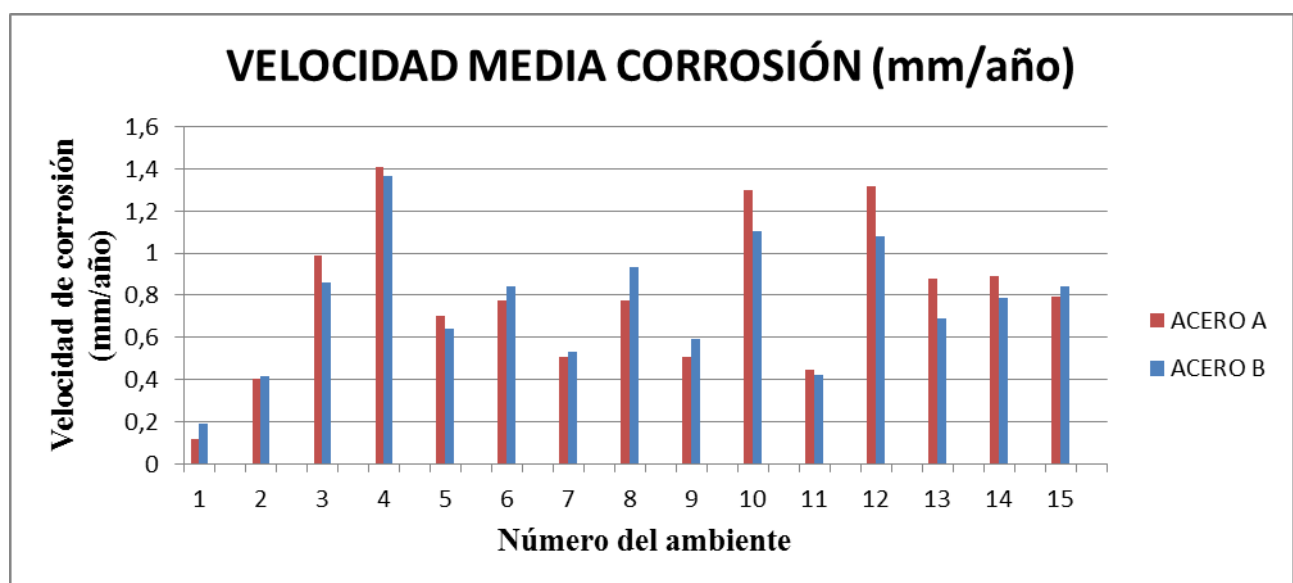


Figura 4-31 Velocidades medias de corrosión finales para ambos aceros

En la Figura 4-31 se presenta una gráfica con una comparación de las velocidades medias de corrosión tras la finalización del experimento para ambos aceros en función de los distintos medios. En la gráfica se puede observar que las variaciones de velocidad varían desde 1,4 mm por año cuando las condiciones de corrosión son las más óptimas, hasta 0,1 mm/año en las condiciones menos idóneas. El estudio comparado concluye que los medios que provocan mayores velocidades de corrosión son aquellos con mayor cantidad de intensidad de corriente. Aplicando la misma intensidad de corriente, en los medios que tienen mayor concentración de iones cloruro se observan mayores velocidades de corrosión. Finalmente, a iguales concentraciones de cloruros y corriente, se corroen más rápidamente aquellas probetas introducidas en medios ácidos.

Nuestros estudios concluyen que el acero “A” (que posee un mayor porcentaje de carbono) se corroe a mayores velocidades que el acero “B” (con un porcentaje de carbono menor). Este comportamiento es el esperado se acuerdo con estudios previos realizados [48].

## 4.5 Estudio con el Agua de la Dársena de la Escuela Naval Militar

Con el fin de comprobar la validez de los modelos generados, se realizó el estudio de la corrosión de sendas probetas de los aceros “A” y “B” con una muestra de agua de mar real procedente de la dársena de la ENM (ambiente 16), y se compararon los resultados obtenidos experimentalmente con los calculados a partir de las ecuaciones predictivas. Para utilizar estas ecuaciones es necesario conocer los datos de nuestras variables (pH y  $[Cl^-]$ ) en la muestra del agua empleada.

### 4.5.1 Análisis del Agua

El análisis del agua se realizó siguiendo la metodología descrita en el apartado 3.6. El pH medido es de 7,6 lo que indica que el agua de la dársena es ligeramente alcalina tal como es de esperar. Para determinar la concentración de cloruros se empleó el método de Mohr [47]:

$$\frac{0,0681 \text{ g } Cl^-}{5 \text{ mL agua dársena}} = 0,01361 \frac{\text{g}}{\text{mL}} Cl^- = 1,361 \% Cl^-$$

El resultado determina que el valor de concentración de cloruros en el agua de la dársena de la Escuela Naval Militar es bajo en comparación con la concentración media del agua en mar abierto (Tabla 1-3). Inicialmente, este dato puede llamar la atención pero, sin embargo, no debe extrañar. Es habitual que, por la entrada de agua dulce proveniente de los ríos que allí desembocan, en el agua de las rías la concentración de  $Cl^-$  disminuya respecto al valor de la misma en las aguas en mar abierto. En nuestro caso tenemos la desembocadura del río Lérez a menos de una milla náutica de la posición de donde se tomó la muestra. Otro factor que ayuda a disminuir la concentración de cloruros en agua de mar en dársenas y zonas próximas a puertos es la lluvia caída en los días previos a la toma de muestra. Nuestra muestra se tomó el 19 de enero del presente año, tras varios días de precipitaciones. El resultado de  $[Cl^-]$  obtenido en nuestro análisis está en concordancia con un estudio de la salinidad del agua de las Islas Ons (Pontevedra) que indica un porcentaje de iones cloruros similares (1,5%) [51].

### 4.5.2 Estudio Comparado del Grado de Corrosión Experimental y Calculado

Los cálculos teóricos se realizaron introduciendo en las ecuaciones los siguientes parámetros:

- Intensidad de corriente = 0 A; por lo que se emplearán las ecuaciones predictivas para esa intensidad.
- pH = 7,6; que se normalizará como 0,2 a la hora de introducirlo en las ecuaciones.
- $[Cl^-] = 1,361\%$ ; que se normalizará como -0,546 a la hora de introducirlo en las ecuaciones.

#### 4.5.2.1 Variación de masa

Para poder observar la variación de masa esperada, se introdujeron los valores obtenidos en el análisis del agua en las ecuaciones nº 12, 13 y 14 para el acero “A” y en las ecuaciones nº 31, 32 y 33 para el acero “B” obteniendo los resultados que se recogen en la Tabla 4-9.

| Acero “A”  |          |            |          |            |          |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 1 semana   |          | 2 semanas  |          | 3 semanas  |          |
| Real       | Previsto | Real       | Previsto | Real       | Previsto |
| -0,110     | -0,082   | -0,203     | -0,175   | -0,267     | -0,249   |
| Desviación |          | Desviación |          | Desviación |          |
| -25,45%    |          | -13,79%    |          | -6,74%     |          |

| Acero “B”  |          |            |          |            |          |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 1 semana   |          | 2 semanas  |          | 3 semanas  |          |
| Real       | Previsto | Real       | Previsto | Real       | Previsto |
| -0,070     | -0,068   | -0,163     | -0,149   | -0,223     | -0,220   |
| Desviación |          | Desviación |          | Desviación |          |
| -2,86%     |          | -8,59%     |          | -1,35%     |          |

**Tabla 4-9 Variación de masa real-prevista (g)**

La pérdida de masa observada experimentalmente es ligeramente mayor que la que predicen nuestras ecuaciones si bien en la mayoría de los casos se acercan de manera aceptable, especialmente para el acero “B” en el que no superan la barrera del 10% de desviación. Estas discrepancias entre el valor observado experimentalmente y el calculado teóricamente a partir de las ecuaciones propuestas puede justificarse sobre la base de la composición real del agua del mar que incluye una amplia variedad de iones disueltos y que, si bien se encuentran en proporciones mucho menores que el cloruro, también contribuyen al proceso corrosivo. Asimismo, deberían de considerarse otros factores como la materia biológica, oxígeno disuelto... En cualquier caso, de los datos mostrados en la tabla anterior se puede ver que las ecuaciones deducidas para el acero “B”, que posee un menor porcentaje de carbono, dan valores más próximos al real que las obtenidas para el acero “A”.

#### 4.5.2.2 Porcentaje de corrosión visual

Para este cálculo se utilizaron las ecuaciones nº 21, 22 y 23 para el acero “A” y nº 40, 41 y 42 para el acero “B”. Los resultados se recogen en la Tabla 4-10.

| Acero "A"  |          |            |          |            |          |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 1 semana   |          | 2 semanas  |          | 3 semanas  |          |
| Real       | Previsto | Real       | Previsto | Real       | Previsto |
| 10,40%     | 7,20%    | 11,92%     | 9,19%    | 17,27%     | 13,19%   |
| Desviación |          | Desviación |          | Desviación |          |
| -30,79%    |          | -29,71%    |          | -23,64%    |          |

| Acero "B"  |          |            |          |            |          |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 1 semana   |          | 2 semanas  |          | 3 semanas  |          |
| Real       | Previsto | Real       | Previsto | Real       | Previsto |
| 8,23%      | 5,59%    | 11,49%     | 9,88%    | 17,77%     | 15,20%   |
| Desviación |          | Desviación |          | Desviación |          |
| -32,08%    |          | -14,01%    |          | -14,46%    |          |

**Tabla 4-10 Variación del porcentaje de corrosión visual real-previsto**

Comparando los datos reales con los calculados se puede observar que el porcentaje visual de corrosión real es mayor que el obtenido teóricamente. Esto parece corroborar las limitaciones que se habían observado para este método comentados en el apartado 4.4.2 debido a que la efectividad de este método depende de la posición de donde se haya obtenido la fotografía, por lo que según la posición se observará un porcentaje de corrosión u otro. Al contrario que con la variación de masa, los porcentajes de error con respecto a los valores esperados son elevados, de hecho, el en el mejor de los casos la desviación ronda el 14%. Sin embargo, sí que se sigue el patrón observado en la variación de masa ya que los resultados teóricos obtenidos para el acero "B", con un menor porcentaje de carbono, se acercan más a los experimentales que los del "A".

#### 4.5.2.3 Cinética de corrosión

Obteniendo las variaciones de masa esperadas descritas en el apartado 4.5.2.1, se puede calcular la velocidad de corrosión media esperada empleando la Ec 30, y compararla con la real. Las diferencias de variación de masa se muestran en la Tabla 4-11.

| Acero "A"  |          |            |          |            |          |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 1 semana   |          | 2 semanas  |          | 3 semanas  |          |
| Real       | Previsto | Real       | Previsto | Real       | Previsto |
| 0,4384     | 0,3268   | 0,4035     | 0,3487   | 0,3554     | 0,3308   |
| Desviación |          | Desviación |          | Desviación |          |
| -25,45%    |          | -13,41%    |          | -6,92%     |          |

| Acero “B”  |          |            |          |            |          |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 1 semana   |          | 2 semanas  |          | 3 semanas  |          |
| Real       | Previsto | Real       | Previsto | Real       | Previsto |
| 0,2790     | 0,2710   | 0,3238     | 0,2969   | 0,2956     | 0,2922   |
| Desviación |          | Desviación |          | Desviación |          |
| -2,87%     |          | -8,31%     |          | -1,15%     |          |

**Tabla 4-11 Variación de la velocidad de corrosión real-prevista (mm/año)**

Los resultados están en la línea de los encontrados para la pérdida de masa ya que dependen de ella. Es decir, las velocidades de corrosión calculadas son ligeramente menores que las reales. Tal como se indicó anteriormente, ello puede deberse a la cantidad de elementos presentes en el agua y que no se han tenido en cuenta en las variables del experimento. Sin embargo, a medida que avanza el experimento, las velocidades de corrosión se aproximan mucho al valor esperado, especialmente en el acero “B”, lo que permite realizar predicciones de velocidades de corrosión con errores menores al 9% en el peor de los casos.

La velocidad de corrosión en la muestra real está en torno a 0,3 mm/año. Este dato debería tenerse en cuenta a la hora de abordar el tema de la corrosión de los buques que se encuentran amarrados en la dársena de la Escuela. A la vista del dato se considera conveniente realizar recubrimientos de las partes menos espesas de los cascos de dichos buques.



## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

Los resultados del estudio han demostrado que el método tradicional de pérdida de masa es una manera efectiva de observar los grados de corrosión del acero y de obtener la velocidad de corrosión del mismo. Las ecuaciones propuestas en este trabajo dan resultados de pérdidas de masa algo menores que las observadas experimentalmente con agua de la dársena de la Escuela Naval Militar. Ello se justifica en base a que hay una gran variedad de iones presentes en el agua de mar que, aunque se encuentran en menores concentraciones que los cloruros, también ayudan en el proceso de la corrosión y que, en las ecuaciones deducidas no se han tenido en cuenta. También habría que considerar la materia biológica presente, que también contribuye, así como muchas otras variables (temperatura, cantidad de oxígeno disuelto...). En cualquier caso, las variaciones observadas son relativamente pequeñas, por lo que el método propuesto sirve para obtener un valor aproximado de la corrosión que puede sufrir un buque con porcentajes de error pequeños.

Por otro lado, los resultados del trabajo muestran que el empleo de programas informáticos modernos basados en la observación de imágenes para cuantificar la corrosión no son medios muy fiables. Esto es debido a la gran importancia de la posición exacta de donde se sacan las fotografías para ser analizadas, puesto a que no tienen por qué representar el grado general de corrosión de la muestra.

Respecto a las distintas variables estudiadas en el presente trabajo, se puede concluir que la corrosión en el medio marino se acentúa en el acero al carbono empleado en la industria naval cuanto más ácido sea el pH y cuanto mayor sea la concentración de cloruros disueltos en el agua. Además se ha observado que la concentración de cloruros tiene más influencia que el pH del medio en el que esté. Por otro lado, también se puede concluir que cuando entra en juego la corriente eléctrica, la velocidad de corrosión se ve incrementada de manera notable.

Finalmente, y tras comparar los dos aceros al carbono, se verifican los estudios que indican que los aceros con mayor porcentaje de carbono en su composición presentan mayor tendencia a la corrosión que los que poseen un porcentaje menor.

### 5.2 Líneas Futuras

La corrosión es un campo de estudio con numerosas vertientes y tiene muchas posibilidades en cuanto a las líneas futuras. Centrándonos en las más relacionadas con el presente trabajo y con las más útiles de cara a ser empleadas por la Armada Española, se proponen las siguientes:

En primer lugar una ampliación del estudio actual teniendo en cuenta nuevas variables. Por un lado se propone analizar el efecto de la temperatura del agua, debido a que afecta a las velocidades de corrosión y a la máxima cantidad admisible de cloruros en el agua. Por otro lado, la influencia de burbujas de oxígeno presentes en el agua y derivadas de la cavitación de los buques al navegar a velocidades elevadas. También sería conveniente poder estudiar y analizar el efecto de la corrosión biológica y su efecto en los aceros, debido a que puede ser reseñable su efecto en buques que permanecen mucho tiempo amarrados en puerto.

Otra posible línea futura, es volver a realizar el estudio empleando otros tipos de acero con diferentes porcentajes de carbono, para terminar reforzar las conclusiones del presente trabajo sobre la corrosión en función de la composición del acero.

Finalmente, se propone una comparación de la corrosión producida en aceros navales con las pinturas y recubrimientos empleados en los buques de la flota, de cara a poder observar su efecto y posibles mejoras o variaciones en estos recubrimientos.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas, Presupuesto del Ministerio de Defensa 2017, 2017.
- [2] US Department of Transportation, «Corrosion costs and preventive strategies in the Unites States,» National Technical Information Service, 2002.
- [3] Real Academia Española, Diccionario de la Lengua Española, 2014.
- [4] American Society for Materials, «Volumen 13,» de *Corrosión. 5ª Edición*, ASM Handbook, 1996, pp. 1-8.
- [5] J. A. Salazar-Jiménez, «Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales,» *Tecnología en marcha*, vol. 28, nº 3, pp. 127-136, 2015.
- [6] David R. Lide, de *Handbook of Chemistry and Physics. 84ª Edición*, Chemical Rubber Company, 2004, pp. 1217-1227.
- [7] R. Winston Revie y Herber H. Uhlig, de *Corrosion and corrosion control. And introduction to corrosion science and engineering. 4ª Edición*, John Wiley and sons, 2008, pp. 251-316.
- [8] «National Geographic,» [En línea]. Available: <http://www.ngenespanol.com/fotografia/lo-mas/11/06/01/mar-acido/>. [Último acceso: 02 Enero 2018].
- [9] A. Haro García, Tesis Doctoral: "Impacto de los efluentes de una planta desaladora sobre el recurso marino", Universidad de Sonora, 2012.
- [10] Karl K. Turekian, *Marine chemistry and geochemistry*, Elsevier, 2010.
- [11] Lenntech, «Composition of seawater,» [En línea]. Available: <https://www.lenntech.com/composition-seawater.htm>. [Último acceso: 13 Enero 2018].
- [12] «Ventanas al universo,» [En línea]. Available: <https://www.windows2universe.org/?page=/earth/Water/temp.html&lang=sp>. [Último acceso: 02 Enero 2018].

- [13] NOAA, «Surface Sea Temperature,» [En línea]. Available: <http://www.ospo.noaa.gov/Products/ocean/sst/contour/>. [Último acceso: 02 Enero 2018].
- [14] Universidad Politécnica de Cartagena, «Estudio y análisis del agua del mar,» [En línea]. Available: [https://www.upct.es/~minaees/analisis\\_aguas.pdf](https://www.upct.es/~minaees/analisis_aguas.pdf). [Último acceso: 31 Diciembre 2017].
- [15] REITEC, «Conductividad eléctrica del agua,» 2010.
- [16] E. Sesé Rodríguez, Trabajo Fin de Grado: "Mantenimiento preventivo de la corrosión aplicado a la obra viva del buque", Universidad de La laguna, 2014.
- [17] Augustine Moffitt, «Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo,» de *Hierro y Acero*, Organización Internacional del Trabajo, 2012, pp. 73.1 - 73.19.
- [18] N. Greenwood y A. Earnshaw, de *Chemistry of the elements. 1ª Edición*, Pergamon Press, 1984, pp. 1244-1249.
- [19] AENOR, UNE-EN 10020:2001 "Definición y clasificación de los tipos de aceros", 2001.
- [20] J. L. Maldonado Flores, Tesis Doctoral: "Aceros y sus aplicaciones", Universidad autonoma Nuevo León, 1996.
- [21] American Society of Testing Materials, Rules for the classification of steel ships, 2017.
- [22] J. M. Blanco-Traba y Traba, «La construcción naval,» *Revista General de Marina*, nº 6, pp. 63 -74, 2009.
- [23] J. L. Santos Blanco, Química Aplicada I. Pub nº 385 ENM, Escuela Naval Militar, 1981.
- [24] La corrosión y la protección catódica. Publicación nº 500 ENM, Escuela Naval Militar, 1985.
- [25] S. R. Urréjola Madriñán, Tesis Doctoral: "Aplicación de la técnica de ruido electroquímico a los estudios de corrosión", Universidad de Vigo, 1999.
- [26] Armada Española, I-BC-01 Instrucción de inspección submarina (SINCLAS), Ministerio de Defensa, 2013.
- [27] Armada Española, D-CP-10 Manual doctrinal de energía y propulsión (SINCLAS), Ministerio de Defensa, 2015.
- [28] L. Dzib-Pérez, J. González-Sánchez, F. Corvo, M. Sosa y T. Pérez, Indoor atmospheric corrosion of carbon steel and copper in tropical humid climate, Universidad de la Habana, 2015.
- [29] X. I. Suárez Corrales, F. E. Corvo Pérez, R.V. Villar López y M. Rigoberto, «Resistencia al clima tropical de los aceros galvanizados con y sin recubrimientos,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XV, nº 1, pp. 29-40, 2014.
- [30] C. H. Guerra Carvallo, Tesis Doctoral: "Estudio de la corrosión atmosférica sobre dos tipos de acero bajo en carbono en instalaciones industriales petroleras cercanas al mar nor oeste del Perú", Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2014.
- [31] P. Segarra Ventura, Proyecto Fin de Carrera: "Estudio de los cambios producidos en la corrosión por picadura en el casco de acero de un barco con la temperatura del mar utilizando el programa OXIPSIS 12", Universidad Politécnica de Cartagena, 2015.

- [32] Y. A. Montero, I. Rizo Alvarez, J. D. Harriett, M. Balmayor Moure, J. A. Alonso Pérez y M. Cabrales Fruto, «Corrosión del acero al carbono en una zona cubana muy contaminada por iones cloruro y compuestos de azufre,» *Revista CENIC Ciencias Químicas*, vol. 44, pp. 200-207, 2013.
- [33] J. M. Delgado Anchundia y M. D. Zambrano Moreira, Proyecto Fin de Carrera: "Estudio de la deposición de iones cloruro para conocer el comportamiento de la velocidad de corrosión", Universidad Técnica de Manabí, 2017.
- [34] J. Jimenez Umberto y Y. Milano, «Corrosión acelerada en medio salino y adherencia de sistemas de pinturas depositadas sobre acero,» *Mundo Fesc*, nº 13, pp. 48-55, 2017.
- [35] B. Chico, E. Otero, L. Mariaca y M. Morcillo, «La corrosión en atmósferas marinas. Efecto de la distancia a la costa,» *Metal*, nº 34, pp. 71 - 74, 1998.
- [36] M. Morcillo, J. Alcántara, I. Díaz, B.Chico, J. Simancas y D. de la Fuente, «Marine atmospheric corrosion of carbon steels,» *Revista de Metalurgia*, nº 51, pp. 45-63, 2015.
- [37] L. Espada Recarey, X. R. Nóvoa, J. A. Varela y C. dos Santos, «Corrosión de aceros al carbono en agua de mar,» Vigo, 1984.
- [38] J. J. Cabrera Buegueño, Tesis Doctoral: "Estudio de la corrosión de acero al carbono AISI 1020 en soluciones cloradas y su dependencia con la rugosidad del material", Universidad de Santiago de Chile, 2016.
- [39] M. Borrás Salla, Trabajo Fin de Grado: "Desarrollo de una interfaz gráfica y validación del software para el cálculo de la pérdida de potencia en función del aumento de la corrosión en su casco", Universidad Politécnica de Cartagena, 2016.
- [40] F. L. Cuesta Fernández, Trabajo Fin de Carrera: "Análisis del fenómeno de la corrosión en materiales de uso técnico: metales procedimientos de protección", Universidad de Cádiz, 2009.
- [41] V. M. Salinas-Bravo y J. G. González-Rodríguez, «Evaluación de un inhibidor utilizado en soluciones ácidas bajo condiciones hidrodinámicas controladas,» *Revista de metalurgia*, vol. 33, nº 3, pp. 182-186, 1997.
- [42] J. M. Mármol Sáez, Trabajo Fin de Grado: "Mantenimiento estructural y del casco del buque de carga", Universidad Politécnica de Cartagena, 2016.
- [43] T. España, V. Montiel, M. López-Segura y A. Aldaz, Limpieza y restauración electroquímica de objetos arqueológicos metálicos, Universidad de Alicante, 1985.
- [44] J. Lora García, Trabajo Fin de Grado: "Limpieza electrolítica de sustratos metálicos oxidados", Centro Universitario de la Defensa (Universidad de Vigo), 2016.
- [45] E. Diaz Zuaza, Trabajo Fin de Grado: "Recuperación electrolítica de piezas de acero oxidadas", Centro Universitario de la Defensa (Universidad de Vigo), 2014.
- [46] Google, «Google Maps,» [En línea]. Available: <https://www.google.es/maps/@42.3962439,-8.7052559,994m/data=!3m1!1e3>. [Último acceso: 16 Enero 2018].

- [47] Universidad Nacional Nordeste, «Volumetría de precipitación,» 2010. [En línea]. Available: <http://ing.unne.edu.ar/pub/quimica/ab2/TP4.pdf>. [Último acceso: 17 Febrero 2018].
- [48] N. W. Farro Pérez, Tesis Doctoral: "Corrosión del cobre y del acero al carbono en el mar y atmósfera del puerto de Salaverry (Perú)", Universidad Nacional Trujillo, 2009.
- [49] E. A. Mina Cevallos, Tesis Doctoral: "Ensayos de corrosión metálica en laboratorio y su correlación con ensayos de campo", Escuela Politécnica Nacional, 2011.
- [50] CCernind S.A., [En línea]. Available: <http://www.inoxidable.com/corrosion.htm>. [Último acceso: 27 Febrero 2018].
- [51] A. Ruiz Pico y J. Samper Calvete, «Hidrogeología de las islas Ons,» Universidad de La Coruña, 2000.
- [52] Metalasa S.A., Productos siderúrgicos: datos y características principales, 2017.
- [53] Krüss optronic, «Krüss optronic: Instrumentos de precisión,» [En línea]. Available: <http://www.kruess.com/laboratorio/productos/microscopios-para-laboratorios/>. [Último acceso: 24 Febrero 2018].
- [54] Hanna Instruments, [En línea]. Available: <http://www.hannainst.es/catalogo-productos/medidores-de-bolsillo-o-testers/ph>. [Último acceso: 24 Febrero 2018].
- [55] Ditecom Design, [En línea]. Available: <http://www.ditecom.com/instrumentacion/fuentes-alimentacion-laboratorio-tp.html>. [Último acceso: 2018 Febrero 24].
- [56] Blauscal, «Solvo,» [En línea]. Available: [https://solvo.es/WebRoot/Store19/Shops/fab964d6-f17c-4c7b-be1a-4645d1f9dad2/MediaGallery/AH\\_mods.150\\_a\\_3000.pdf](https://solvo.es/WebRoot/Store19/Shops/fab964d6-f17c-4c7b-be1a-4645d1f9dad2/MediaGallery/AH_mods.150_a_3000.pdf). [Último acceso: 24 Febrero 2018].

## ANEXO I: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ACEROS ESTUDIADOS

Como se ha descrito a lo largo de la memoria, para el estudio se han empleado dos tipos distintos de aceros. El denominado en el experimento como acero “A” que se corresponde con el acero S275JR y el denominado acero “B” que se corresponde con el acero S235JR. A continuación se detallan las características técnicas de ambos aceros para las probetas estudiadas, que poseen unas medidas de 100 mm de largo, 50 mm de ancho y 2 mm de espesor.

### AI.1 Acero “A”: S275JR

| Características |                  |
|-----------------|------------------|
| Límite elástico | 275 MPa          |
| Carga de rotura | 430 - 580 MPa    |
| Alargamiento    | Min. 15%         |
| Composición (%) | C : $\leq 0,21$  |
|                 | Mn : $\leq 1,50$ |
|                 | P : $\leq 0,035$ |
|                 | S : $\leq 0,035$ |
|                 | Cu : $\leq 0,55$ |
|                 | N : $\leq 0,012$ |

Tabla A1-1 Características técnicas acero "A" [52]

### AI.2 Acero “B”: S235JR

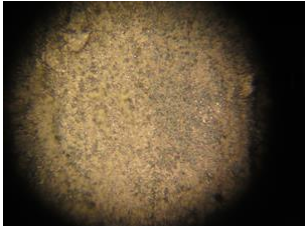
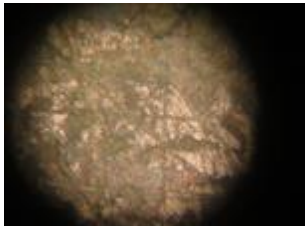
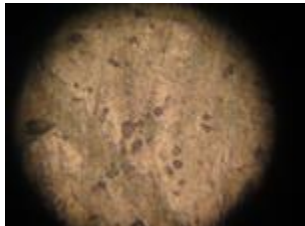
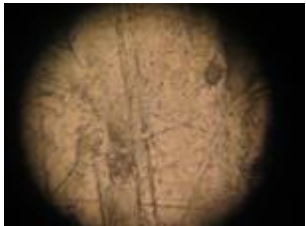
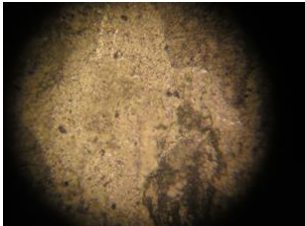
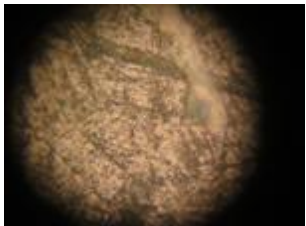
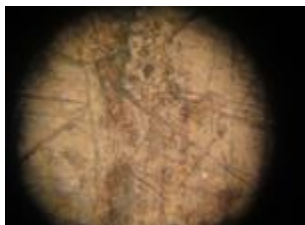
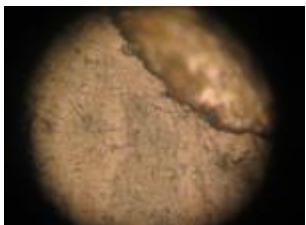
| Características |                  |
|-----------------|------------------|
| Límite elástico | 235 MPa          |
| Carga de rotura | 360 - 510 MPa    |
| Alargamiento    | Min. 17%         |
| Composición (%) | C : $\leq 0,18$  |
|                 | Mn : $\leq 1,40$ |
|                 | P : $\leq 0,030$ |
|                 | S : $\leq 0,030$ |
|                 | Cu : $\leq 0,55$ |
|                 | N : $\leq 0,012$ |

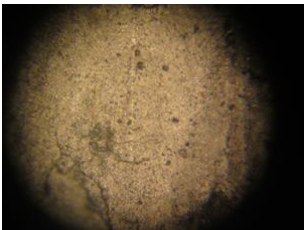
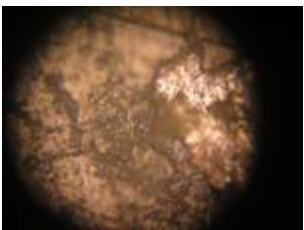
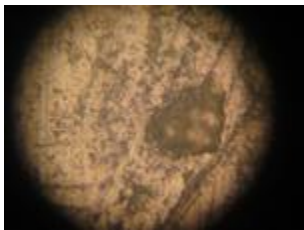
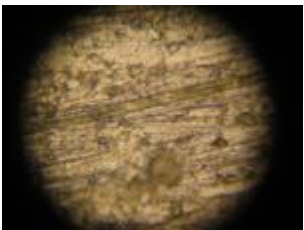
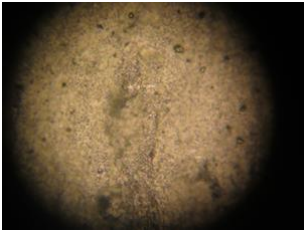
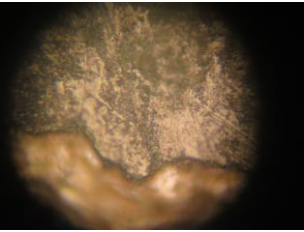
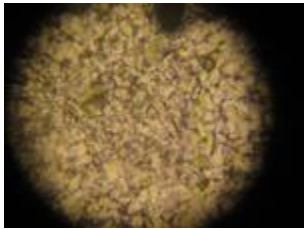
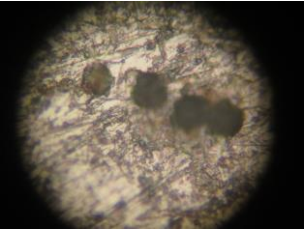
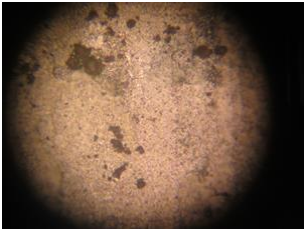
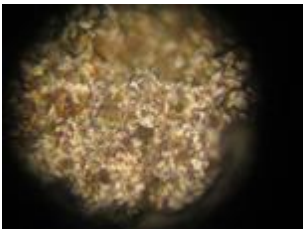
Tabla A1-2 Características técnicas acero "B" [52]

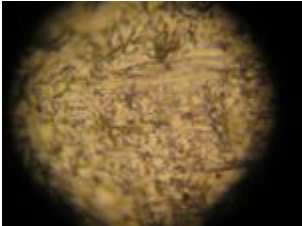
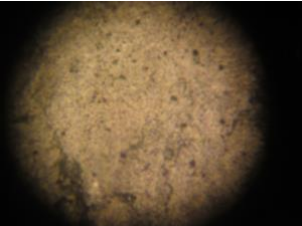
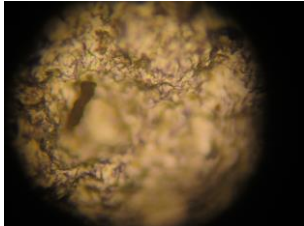
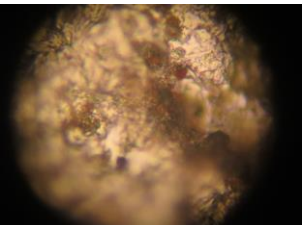
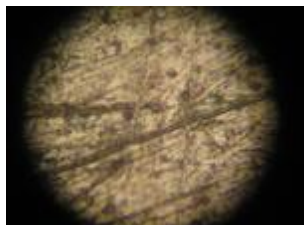
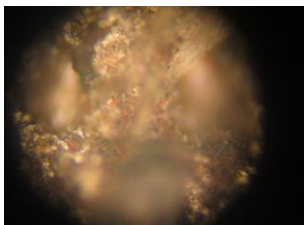


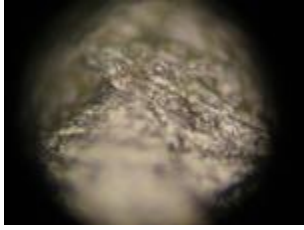
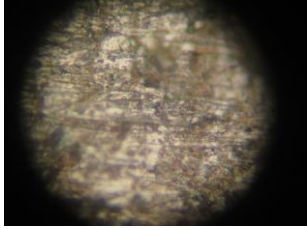
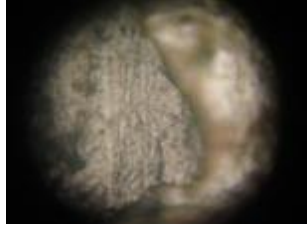
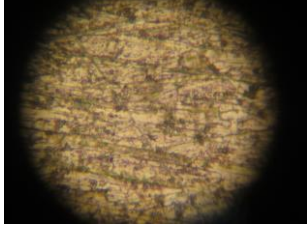
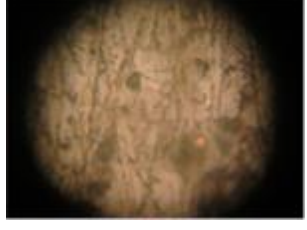
## ANEXO II: IMÁGENES DE LA EVOLUCIÓN DEL ACERO “A”

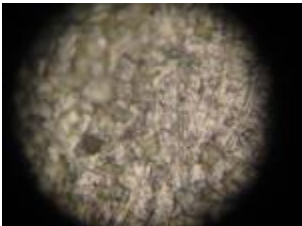
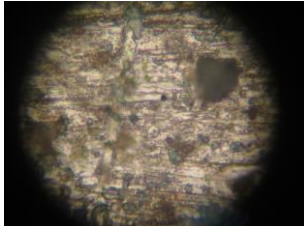
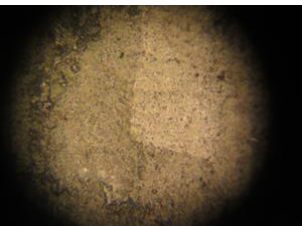
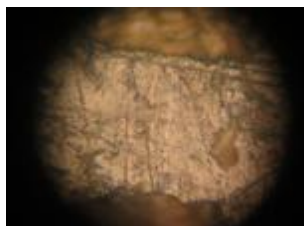
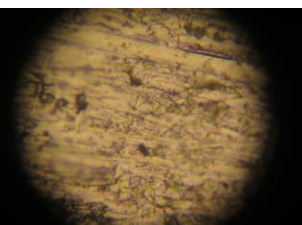
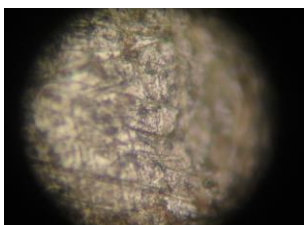
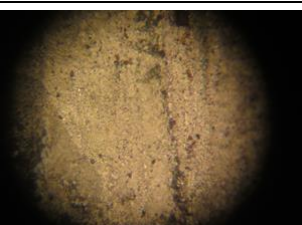
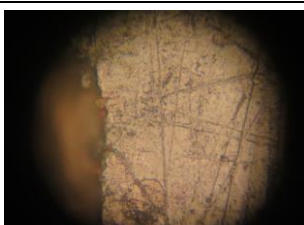
En este anexo, se muestra la evolución de las probetas del acero “A” (S275JR) desde su condición inicial hasta su condición final, pasando por cada semana de estudio. Las imágenes han sido tomadas con un microscopio óptico de marca Krüss optronic y con un aumento en el objetivo de 40x y en el ocular de 10x, que hacen un total de 400x.

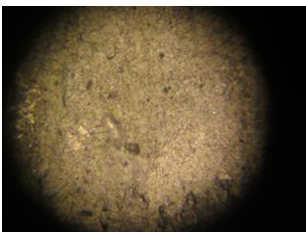
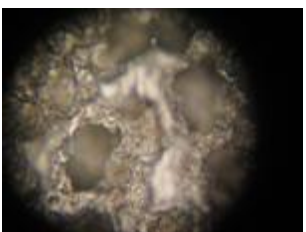
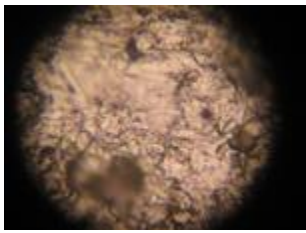
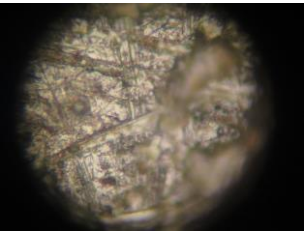
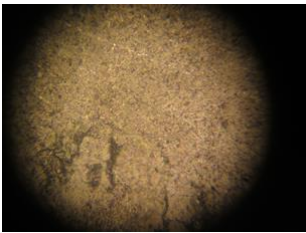
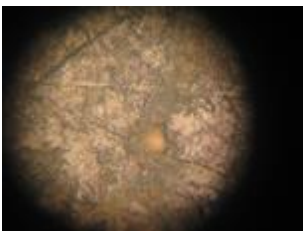
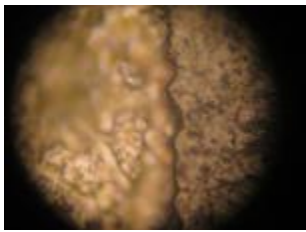
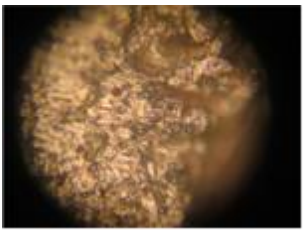
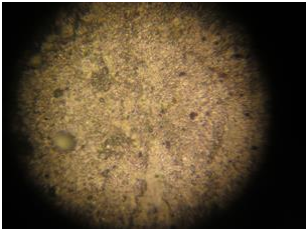
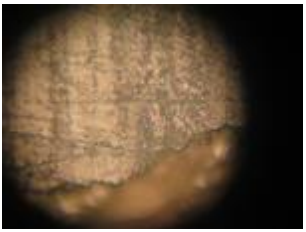
| AMBIENTE   | PROBETA | FOTOGRAFÍAS DE LAS PROBETAS                                                          |                                                                                       |
|------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| AMBIENTE 1 | A11     |    |    |
|            |         | Figura A2-1 Estado inicial probeta A11                                               | Figura A2-2 Estado probeta A11 tras 1 semana                                          |
|            |         |   |   |
|            |         | Figura A2-3 Estado probeta A11 tras 2 semanas                                        | Figura A2-4 Estado final probeta A11                                                  |
|            | A12     |  |  |
|            |         | Figura A2-5 Estado inicial probeta A12                                               | Figura A2-6 Estado probeta A12 tras 1 semana                                          |
|            |         |  |  |
|            |         | Figura A2-7 Estado probeta A12 tras 2 semanas                                        | Figura A2-8 Estado final probeta A12                                                  |

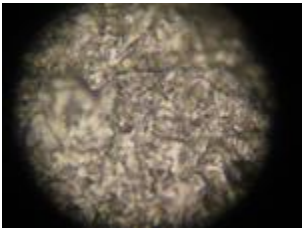
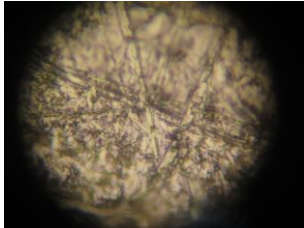
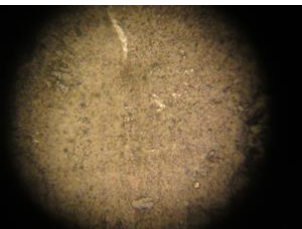
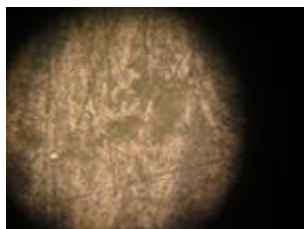
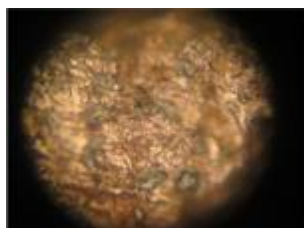
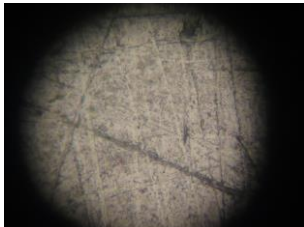
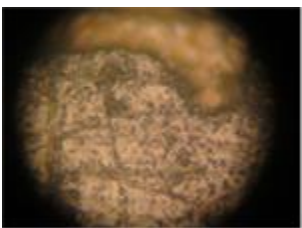
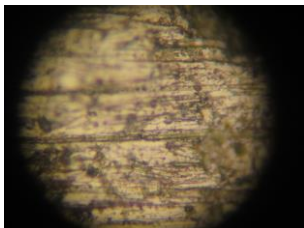
|                   |            |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AMBIENTE 2</b> | <b>A21</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A2-9 Estado inicial probeta A21</b>                                        | <b>Figura A2-10 Estado probeta A21 tras 1 semana</b>                                  |
|                   | <b>A22</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A2-11 Estado probeta A21 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-12 Estado final probeta A21</b>                                          |
|                   | <b>A22</b> |   |   |
|                   |            | <b>Figura A2-13 Estado inicial probeta A22</b>                                       | <b>Figura A2-14 Estado probeta A22 tras 1 semana</b>                                  |
| <b>AMBIENTE 3</b> | <b>A31</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A2-15 Estado probeta A22 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-16 Estado final probeta A22</b>                                          |
| <b>AMBIENTE 3</b> | <b>A31</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A2-17 Estado inicial probeta A31</b>                                       | <b>Figura A2-18 Estado probeta A31 tras 1 semana</b>                                  |

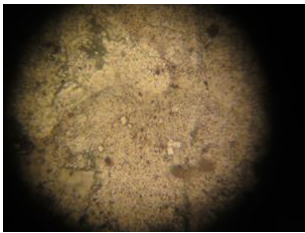
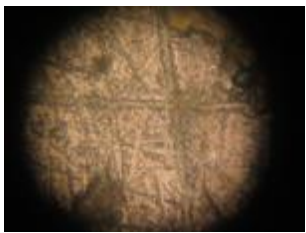
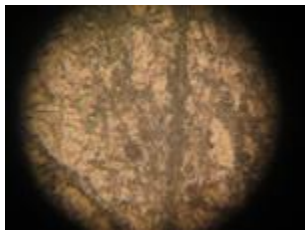
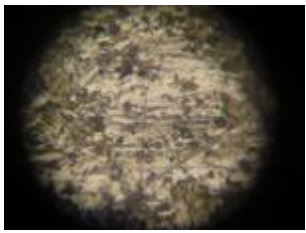
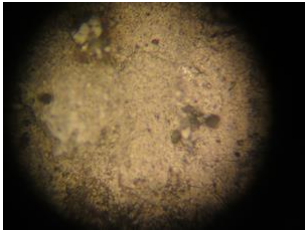
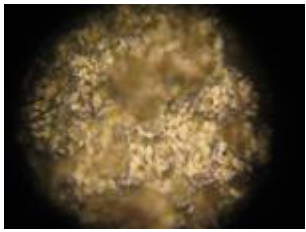
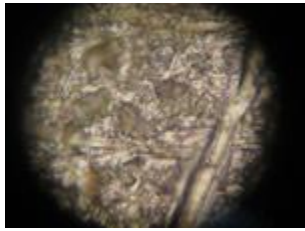
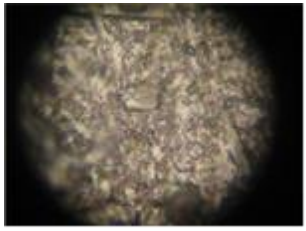
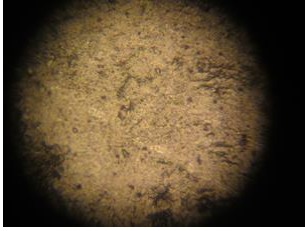
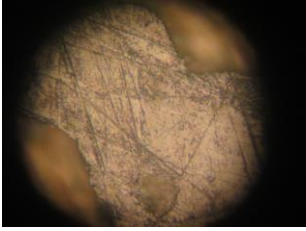
|                   |            |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                   |            |    |    |
|                   |            | <b>Figura A2-19 Estado probeta A31 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-20 Estado final probeta A31</b>                                          |
|                   | <b>A32</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A2-21 Estado inicial probeta A32</b>                                       | <b>Figura A2-22 Estado probeta A32 tras 1 semana</b>                                  |
|                   |            |   |   |
|                   |            | <b>Figura A2-23 Estado probeta A32 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-24 Estado final probeta A32</b>                                          |
| <b>AMBIENTE 4</b> | <b>A41</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A2-25 Estado inicial probeta A41</b>                                       | <b>Figura A2-26 Estado probeta A41 tras 1 semana</b>                                  |
|                   |            |  |  |
|                   |            | <b>Figura A2-27 Estado probeta A41 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-28 Estado final probeta A41</b>                                          |

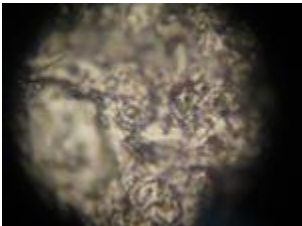
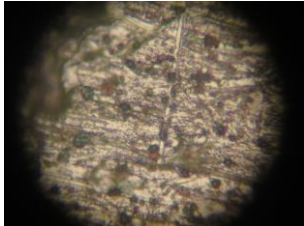
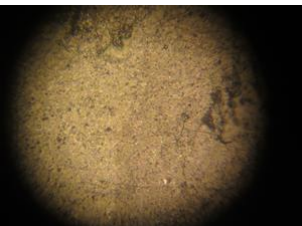
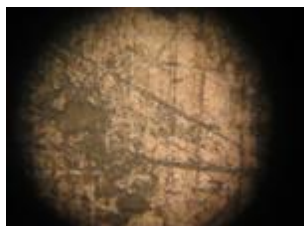
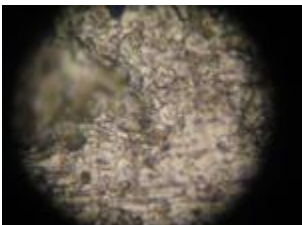
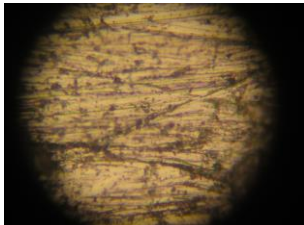
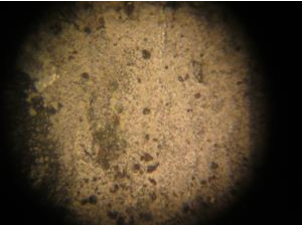
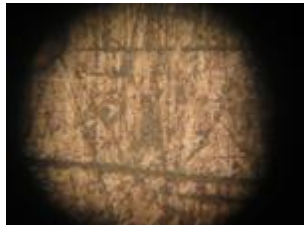
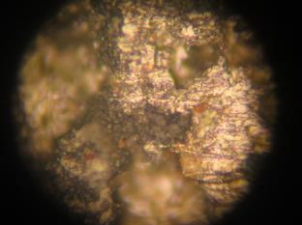
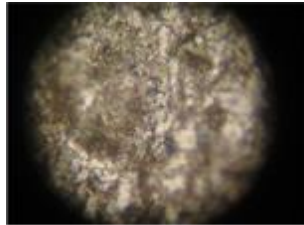
|                   |            |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AMBIENTE 5</b> | <b>A42</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A2-29 Estado inicial probeta A42</b>                                       | <b>Figura A2-30 Estado probeta A42 tras 1 semana</b>                                  |
|                   |            |    |    |
|                   |            | <b>Figura A2-31 Estado probeta A42 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-32 Estado final probeta A42</b>                                          |
|                   | <b>A51</b> |   |   |
|                   |            | <b>Figura A2-33 Estado inicial probeta A51</b>                                       | <b>Figura A2-34 Estado probeta A51 tras 1 semana</b>                                  |
|                   |            |  |  |
|                   |            | <b>Figura A2-35 Estado probeta A51 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-36 Estado final probeta A51</b>                                          |
|                   | <b>A52</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A2-37 Estado inicial probeta A52</b>                                       | <b>Figura A2-38 Estado probeta A52 tras 1 semana</b>                                  |

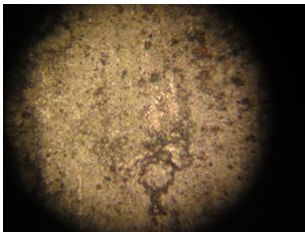
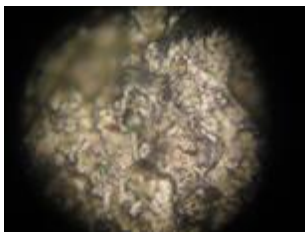
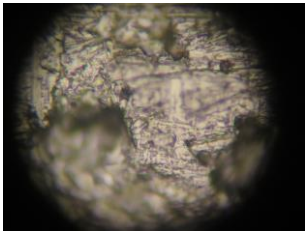
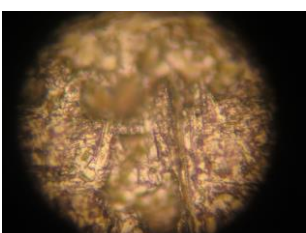
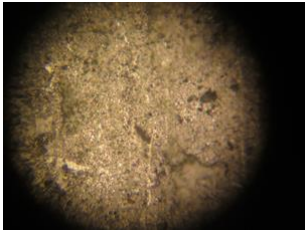
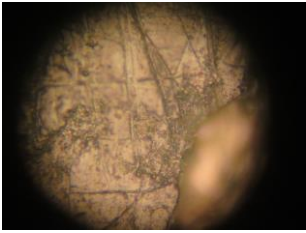
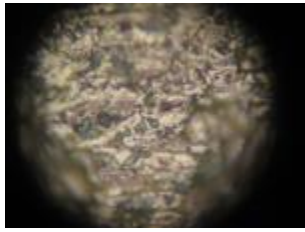
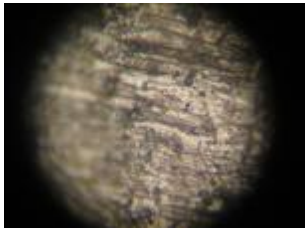
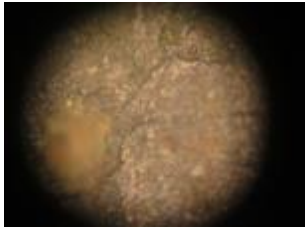
|                   |            |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                   |            |    |    |
|                   |            | <b>Figura A2-39 Estado probeta A52 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-40 Estado final probeta A52</b>                                          |
| <b>AMBIENTE 6</b> | <b>A61</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A2-41 Estado inicial probeta A61</b>                                       | <b>Figura A2-42 Estado probeta A61 tras 1 semana</b>                                  |
|                   |            |   |   |
|                   |            | <b>Figura A2-43 Estado probeta A61 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2- 44 Estado final probeta A61</b>                                         |
|                   | <b>A62</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A2-45 Estado inicial probeta A62</b>                                       | <b>Figura A2-46 Estado probeta A62 tras 1 semana</b>                                  |
|                   |            |  |  |
|                   |            | <b>Figura A2-47 Estado probeta A62 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-48 Estado final probeta A62</b>                                          |

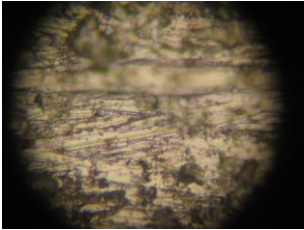
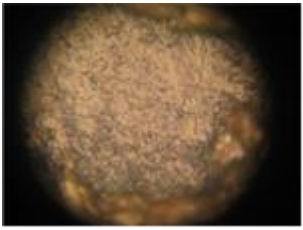
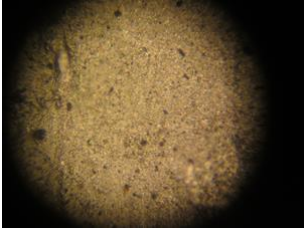
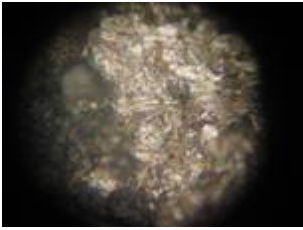
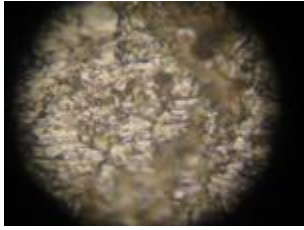
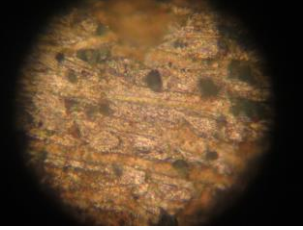
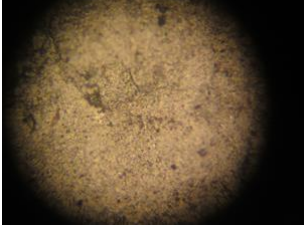
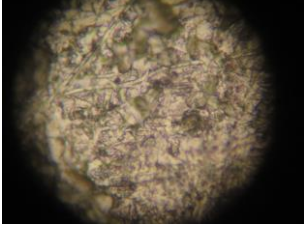
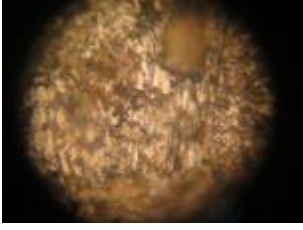
|                   |            |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AMBIENTE 7</b> | <b>A71</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A2-49 Estado inicial probeta A71</b>                                       | <b>Figura A2-50 Estado probeta A71 tras 1 semana</b>                                  |
|                   | <b>A72</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A2-51 Estado probeta A71 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-52 Estado final probeta A71</b>                                          |
|                   | <b>A72</b> |   |   |
|                   |            | <b>Figura A2-53 Estado inicial probeta A72</b>                                       | <b>Figura A2-54 Estado probeta A72 tras 1 semana</b>                                  |
| <b>AMBIENTE 8</b> | <b>A81</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A2-55 Estado probeta A72 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-56 Estado final probeta A72</b>                                          |
| <b>AMBIENTE 8</b> | <b>A81</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A2-57 Estado inicial probeta A81</b>                                       | <b>Figura A2-58 Estado probeta A81 tras 1 semana</b>                                  |

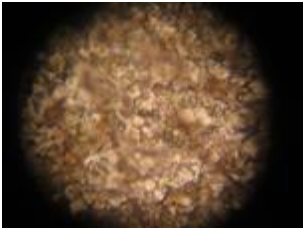
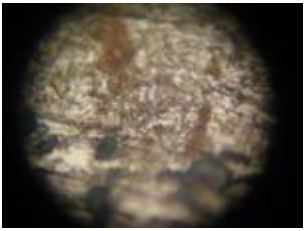
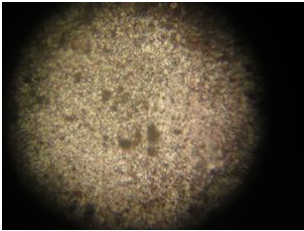
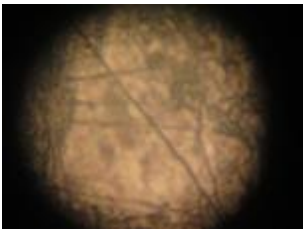
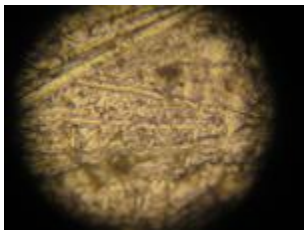
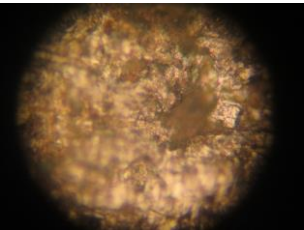
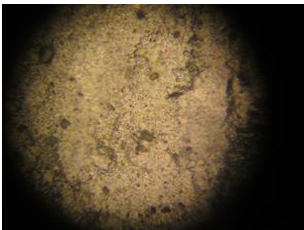
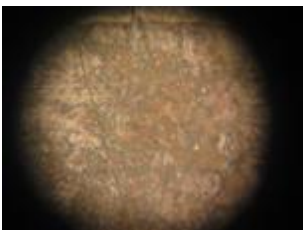
|                   |            |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                   |            |    |    |
|                   |            | <b>Figura A2-59 Estado probeta A81 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-60 Estado final probeta A81</b>                                          |
|                   | <b>A82</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A2-61 Estado inicial probeta A82</b>                                       | <b>Figura A2-62 Estado probeta A82 tras 1 semana</b>                                  |
|                   |            |   |   |
|                   |            | <b>Figura A2-63 Estado probeta A82 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-64 Estado final probeta A82</b>                                          |
| <b>AMBIENTE 9</b> | <b>A91</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A2-65 Estado inicial probeta A91</b>                                       | <b>Figura A2-66 Estado probeta A91 tras 1 semana</b>                                  |
|                   |            |  |  |
|                   |            | <b>Figura A2-67 Estado probeta A91 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-68 Estado final probeta A91</b>                                          |

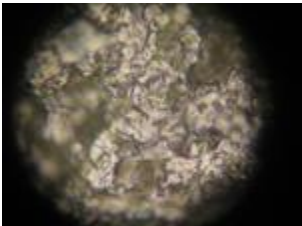
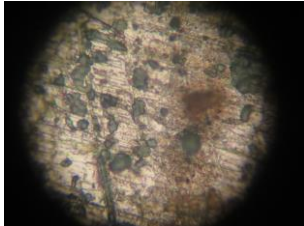
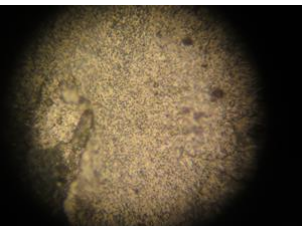
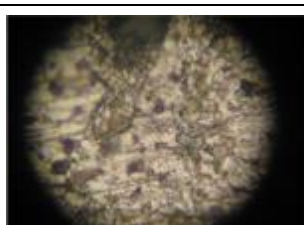
|                    |             |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AMBIENTE 10</b> | <b>A92</b>  |    |    |
|                    |             | <b>Figura A2-69 Estado inicial probeta A92</b>                                       | <b>Figura A2-70 Estado probeta A92 tras 1 semana</b>                                  |
|                    |             |    |    |
|                    |             | <b>Figura A2-71 Estado probeta A92 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-72 Estado final probeta A92</b>                                          |
|                    | <b>A101</b> |   |   |
|                    |             | <b>Figura A2-73 Estado inicial probeta A101</b>                                      | <b>Figura A2-74 Estado probeta A101 tras 1 semana</b>                                 |
|                    |             |  |  |
|                    |             | <b>Figura A2-75 Estado probeta A101 tras 2 semanas</b>                               | <b>Figura A2-76 Estado final probeta A101</b>                                         |
|                    | <b>A102</b> |  |  |
|                    |             | <b>Figura A2-77 Estado inicial probeta A102</b>                                      | <b>Figura A2-78 Estado probeta A102 tras 1 semana</b>                                 |

|                    |             |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |             |    |    |
|                    |             | <b>Figura A2-79 Estado probeta A102 tras 2 semanas</b>                               | <b>Figura A2-80 Estado final probeta A102</b>                                         |
| <b>AMBIENTE 11</b> | <b>A111</b> |    |    |
|                    |             | <b>Figura A2-81 Estado inicial probeta A111</b>                                      | <b>Figura A2-82 Estado probeta A111 tras 1 semana</b>                                 |
|                    | <b>A111</b> |   |   |
|                    |             | <b>Figura A2-83 Estado probeta A111 tras 2 semanas</b>                               | <b>Figura A2-84 Estado final probeta A111</b>                                         |
|                    | <b>A112</b> |  |  |
|                    |             | <b>Figura A2-85 Estado inicial probeta A112</b>                                      | <b>Figura A2-86 Estado probeta A112 tras 1 semana</b>                                 |
|                    |             |  |  |
|                    |             | <b>Figura A2-87 Estado probeta 112 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A2-88 Estado final probeta A112</b>                                         |

|                    |             |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AMBIENTE 12</b> | <b>A121</b> |    |    |
|                    |             | <b>Figura A2-89 Estado inicial probeta A121</b>                                      | <b>Figura A2-90 Estado probeta A121 tras 1 semana</b>                                 |
|                    | <b>A122</b> |    |    |
|                    |             | <b>Figura A2-91 Estado probeta A121 tras 2 semanas</b>                               | <b>Figura A2-92 Estado final probeta A121</b>                                         |
| <b>AMBIENTE 13</b> | <b>A131</b> |   |   |
|                    |             | <b>Figura A2-93 Estado inicial probeta A122</b>                                      | <b>Figura A2-94 Estado probeta A122 tras 1 semana</b>                                 |
|                    | <b>A132</b> |  |  |
|                    |             | <b>Figura A2-95 Estado probeta A122 tras 2 semanas</b>                               | <b>Figura A2-96 Estado final probeta A122</b>                                         |
| <b>AMBIENTE 13</b> | <b>A131</b> |  |  |
|                    |             | <b>Figura A2-97 Estado inicial probeta A131</b>                                      | <b>Figura A2-98 Estado probeta A131 tras 1 semana</b>                                 |

|                    |             |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |             |    |    |
|                    |             | <b>Figura A2-99 Estado probeta A131 tras 2 semanas</b>                               | <b>Figura A2-100 Estado final probeta A131</b>                                        |
|                    | <b>A132</b> |    |    |
|                    |             | <b>Figura A2-101 Estado inicial probeta A132</b>                                     | <b>Figura A2-102 Estado probeta A132 tras 1 semana</b>                                |
|                    |             |   |   |
|                    |             | <b>Figura A2-103 Estado probeta A132 tras 2 semanas</b>                              | <b>Figura A2-104 Estado final probeta A132</b>                                        |
| <b>AMBIENTE 14</b> | <b>A141</b> |  |  |
|                    |             | <b>Figura A2-105 Estado inicial probeta A141</b>                                     | <b>Figura A2-106 Estado probeta A141 tras 1 semana</b>                                |
|                    |             |  |  |
|                    |             | <b>Figura A2-107 Estado probeta A141 tras 2 semanas</b>                              | <b>Figura A2-108 Estado final probeta A141</b>                                        |

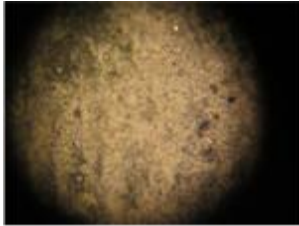
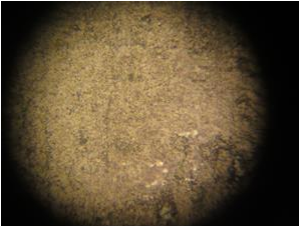
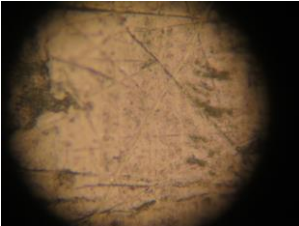
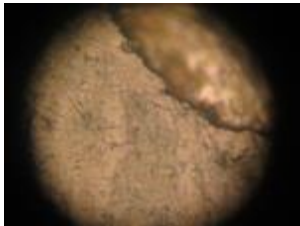
|                    |             |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                    | <b>A142</b> |    |    |
|                    |             | <b>Figura A2-109 Estado inicial probeta A142</b>                                     | <b>Figura A2-110 Estado probeta A142 tras 1 semana</b>                                |
|                    |             |    |    |
|                    |             | <b>Figura A2-111 Estado probeta A142 tras 2 semanas</b>                              | <b>Figura A2-112 Estado final probeta A142</b>                                        |
| <b>AMBIENTE 15</b> | <b>A151</b> |   |   |
|                    |             | <b>Figura A2-113 Estado inicial probeta A151</b>                                     | <b>Figura A2-114 Estado probeta A151 tras 1 semana</b>                                |
|                    |             |  |  |
|                    |             | <b>Figura A2-115 Estado probeta A151 tras 2 semanas</b>                              | <b>Figura A2-116 Estado final probeta A151</b>                                        |
|                    | <b>A152</b> |  |  |
|                    |             | <b>Figura A2-117 Estado inicial probeta A152</b>                                     | <b>Figura A2-118 Estado probeta A152 tras 1 semana</b>                                |

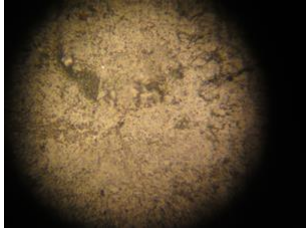
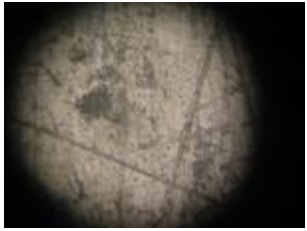
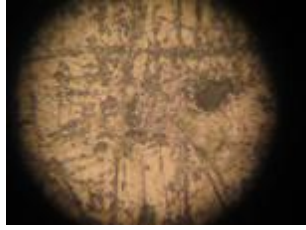
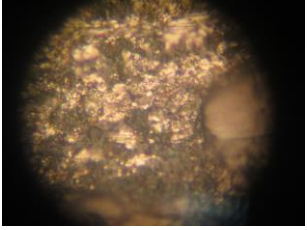
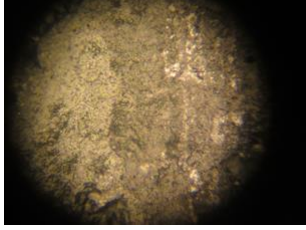
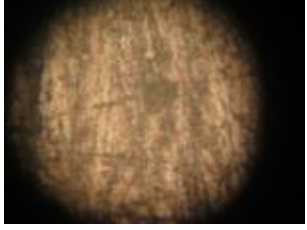
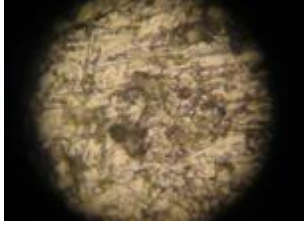
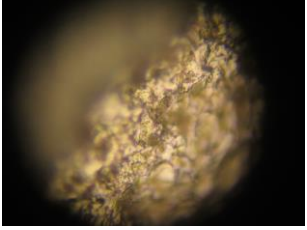
|                    |             |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |             |    |    |
|                    |             | <b>Figura A2-119 Estado probeta A152 tras 2 semanas</b>                              | <b>Figura A2-120 Estado final probeta A152</b>                                        |
| <b>AMBIENTE 16</b> | <b>A161</b> |    |    |
|                    |             | <b>Figura A2-121 Estado inicial probeta A161</b>                                     | <b>Figura A2-122 Estado probeta A161</b>                                              |
|                    |             |   |   |
|                    |             | <b>Figura A2-123 Estado probeta A161 tras 2 semanas</b>                              | <b>Figura A2-124 Estado final probeta A161</b>                                        |
|                    | <b>A162</b> |  |  |
|                    |             | <b>Figura A2-125 Estado inicial probeta A162</b>                                     | <b>Figura A2-126 Estado probeta A162 tras 1 semana</b>                                |
|                    |             |  |  |
|                    |             | <b>Figura A2-127 Estado probeta A162 tras 2 semanas</b>                              | <b>Figura A2-128 Estado final probeta A162</b>                                        |

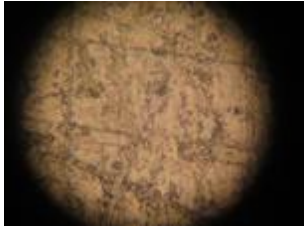
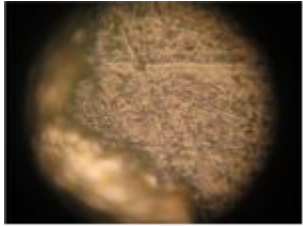
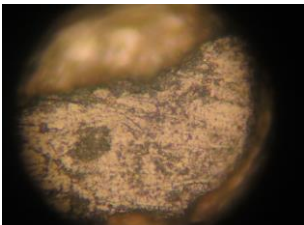
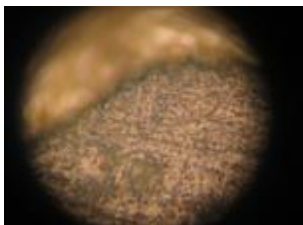
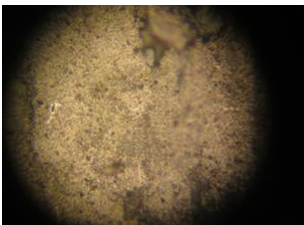
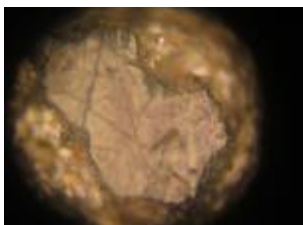
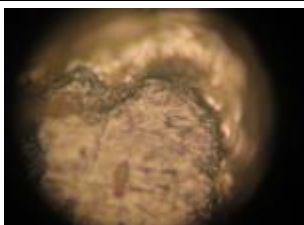


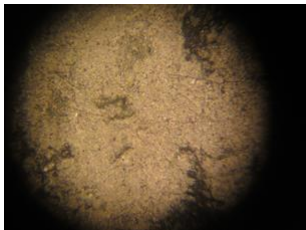
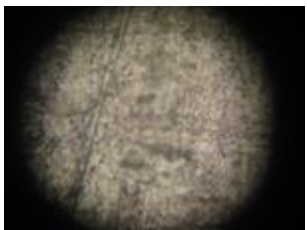
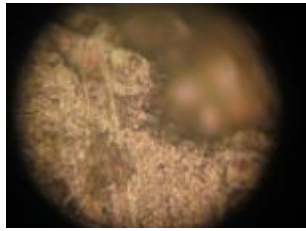
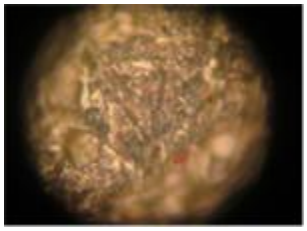
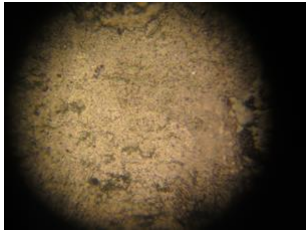
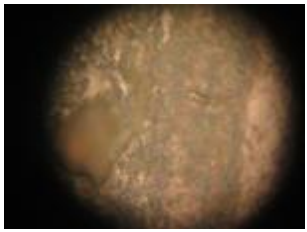
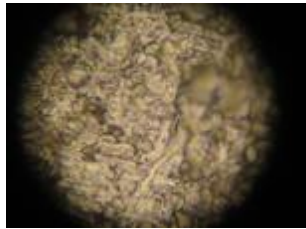
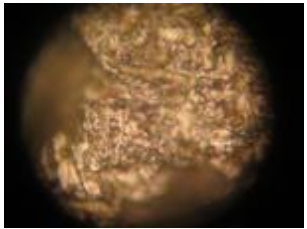
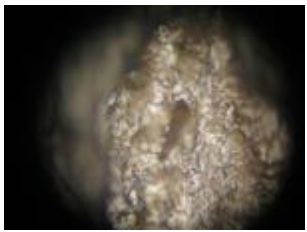
## ANEXO III: IMÁGENES DE LA EVOLUCIÓN DEL ACERO “B”

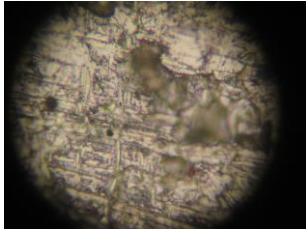
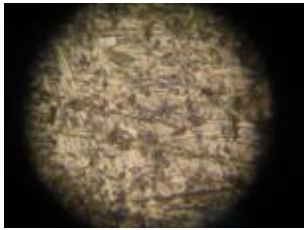
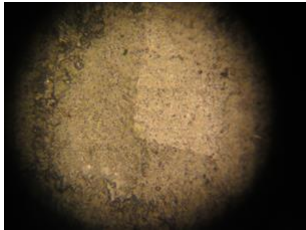
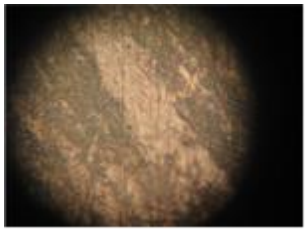
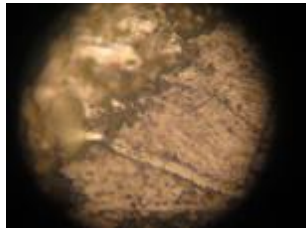
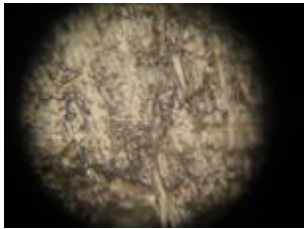
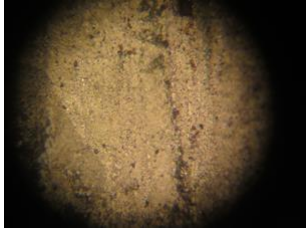
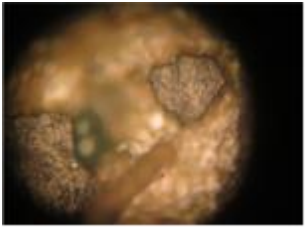
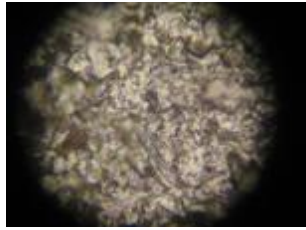
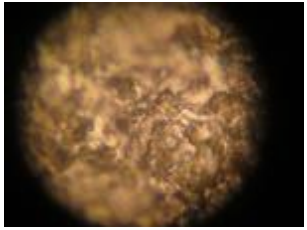
En este anexo, se muestra la evolución de las probetas del acero “B” (S235JR) desde su condición inicial hasta su condición final, pasando por cada semana de estudio. Al igual que para el acero “A”, las imágenes han sido tomadas con un microscopio óptico de marca Krüss optronic y con un aumento en el objetivo de 40x y en el ocular de 10x, que hacen un total de 400x.

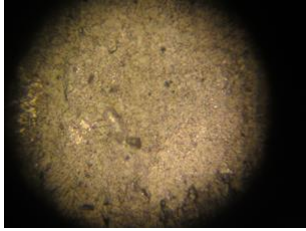
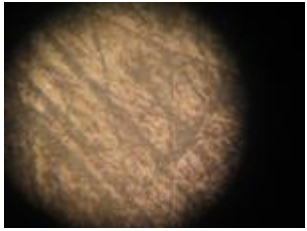
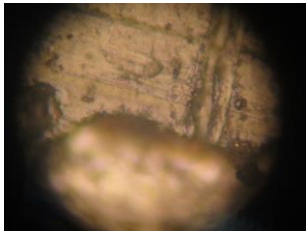
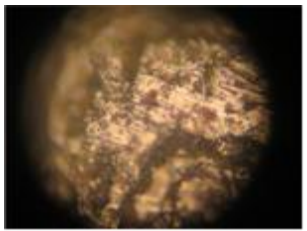
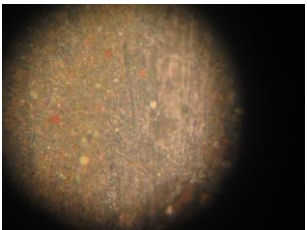
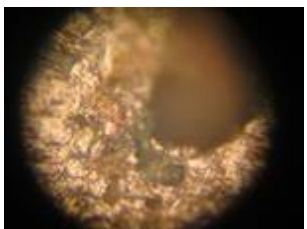
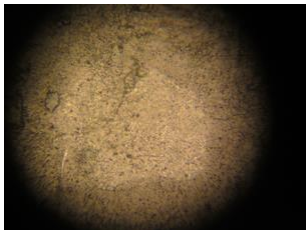
| AMBIENTE   | PROBETA | FOTOGRAFÍAS DE LAS PROBETAS                                                          |                                                                                       |
|------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| AMBIENTE 1 | B11     |    |    |
|            |         | Figura A3-1 Estado inicial probeta B11                                               | Figura A3-2 Estado probeta B11 tras 1 semana                                          |
|            | B12     |   |   |
|            |         | Figura A3-3 Estado probeta B11 tras 2 semanas                                        | Figura A3-4 Estado final probeta B11                                                  |
| AMBIENTE 1 | B11     |  |  |
|            |         | Figura A3-5 Estado inicial probeta B12                                               | Figura A3-6 Estado probeta B12 tras 1 semana                                          |
|            | B12     |  |  |
|            |         | Figura A3-7 Estado probeta B12 tras 2 semanas                                        | Figura A3-8 Estado final probeta B12                                                  |

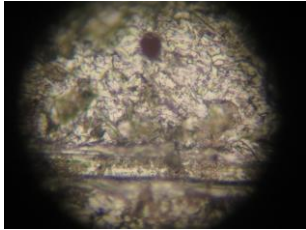
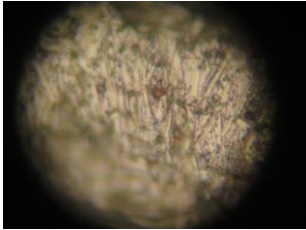
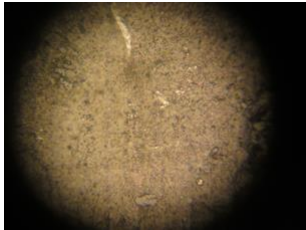
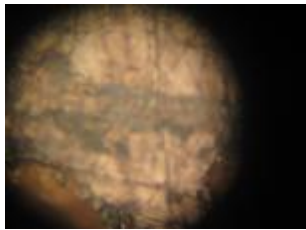
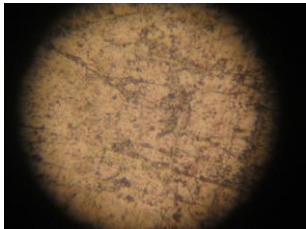
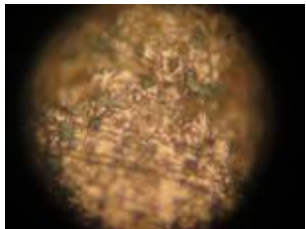
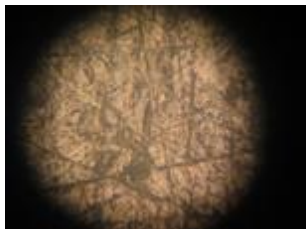
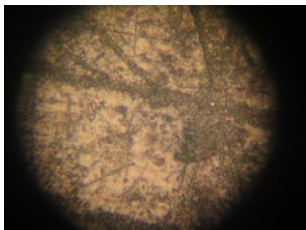
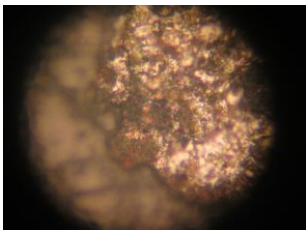
|                   |            |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AMBIENTE 2</b> | <b>B21</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A3-9 Estado inicial probeta B21</b>                                        | <b>Figura A3-10 Estado probeta B21 tras 1 semana</b>                                  |
|                   | <b>B22</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A3-11 Estado probeta B21 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A3-12 Estado final probeta B21</b>                                          |
|                   | <b>B22</b> |   |   |
|                   |            | <b>Figura A3-13 Estado inicial probeta B22</b>                                       | <b>Figura A3-14 Estado probeta B22 tras 1 semana</b>                                  |
| <b>AMBIENTE 3</b> | <b>B31</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A3-15 Estado probeta B22 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A3-16 Estado final probeta B22</b>                                          |
| <b>AMBIENTE 3</b> | <b>B31</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A3-17 Estado inicial probeta B31</b>                                       | <b>Figura A3-18 Estado probeta B31 tras 1 semana</b>                                  |

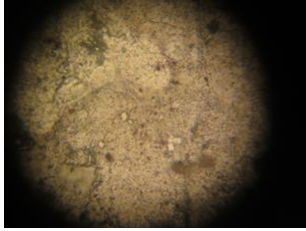
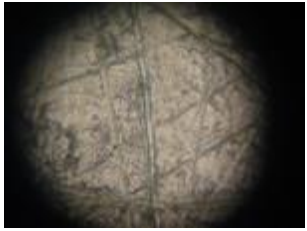
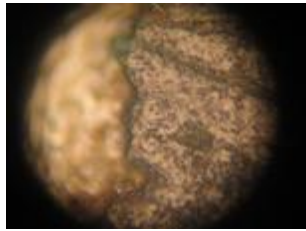
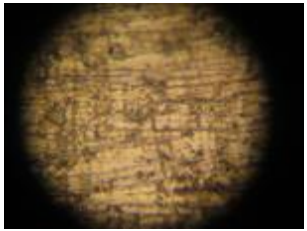
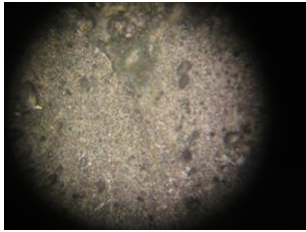
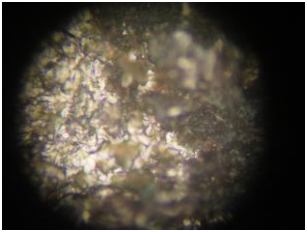
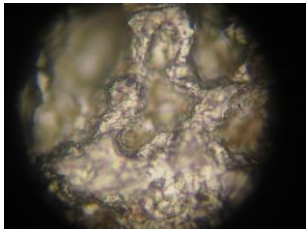
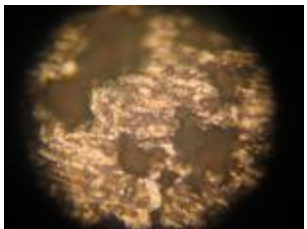
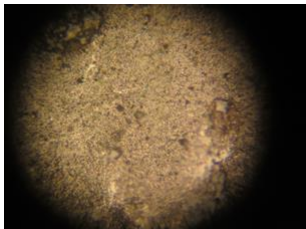
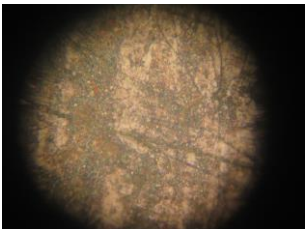
|            |     |                                                                                      |                                                                                       |
|------------|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|            |     |    |    |
|            |     | Figura A3-19 Estado probeta B31 tras 2 semanas                                       | Figura A3-20 Estado final probeta B31                                                 |
|            | B32 |    |    |
|            |     | Figura A3-21 Estado inicial probeta B32                                              | Figura A3-22 Estado probeta B32 tras 1 semana                                         |
|            |     |   |   |
|            |     | Figura A3-23 Estado probeta B32 tras 2 semanas                                       | Figura A3-24 Estado final probeta B32                                                 |
| AMBIENTE 4 | B41 |  |  |
|            |     | Figura A3-25 Estado inicial probeta B41                                              | Figura A3-26 Estado probeta B41 tras 1 semana                                         |
|            |     |  |  |
|            |     | Figura A3-27 Estado probeta B41 tras 2 semanas                                       | Figura A3-28 Estado final probeta B41                                                 |

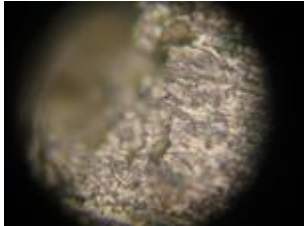
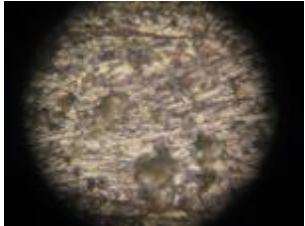
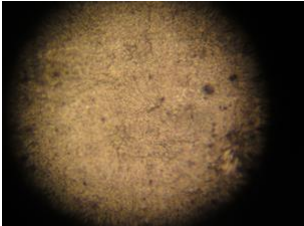
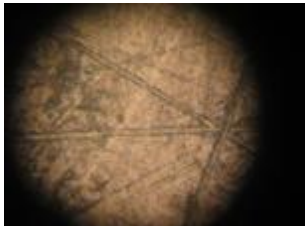
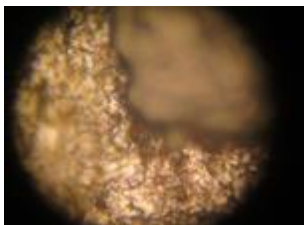
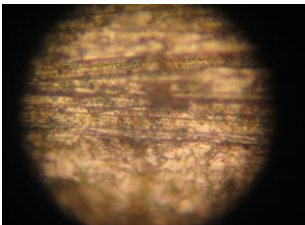
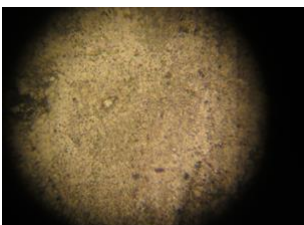
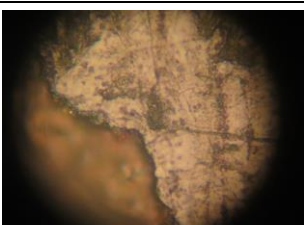
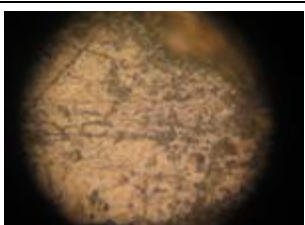
|                   |            |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | <b>B42</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A3-29 Estado inicial probeta B42</b>                                       | <b>Figura A3-30 Estado probeta B42 tras 1 semana</b>                                  |
|                   |            |    |    |
|                   |            | <b>Figura A3-31 Estado probeta B42 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A3-32 Estado final probeta B42</b>                                          |
| <b>AMBIENTE 5</b> | <b>B51</b> |   |   |
|                   |            | <b>Figura A3-33 Estado inicial probeta B51</b>                                       | <b>Figura A3-34 Estado probeta B51 tras 1 semana</b>                                  |
|                   |            |  |  |
|                   |            | <b>Figura A3-35 Estado probeta B51 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A3-36 Estado final probeta B51</b>                                          |
|                   | <b>B52</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A3-37 Estado inicial probeta B52</b>                                       | <b>Figura A3-38 Estado probeta B52 tras 1 semana</b>                                  |

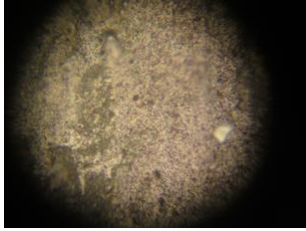
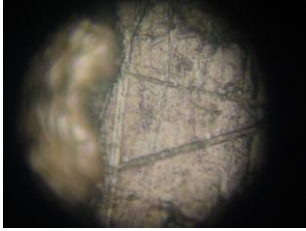
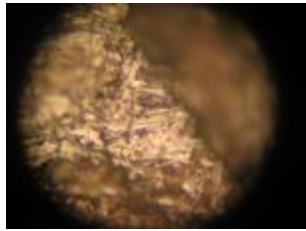
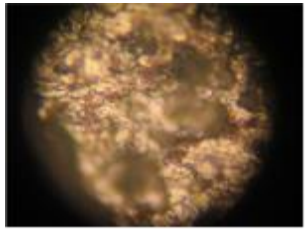
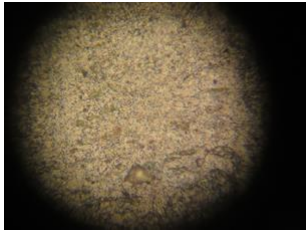
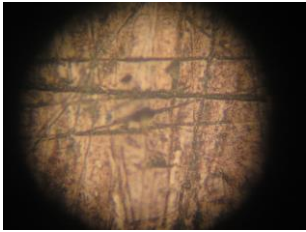
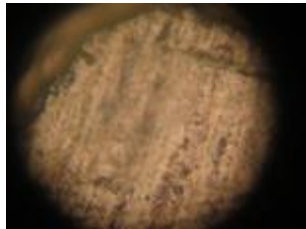
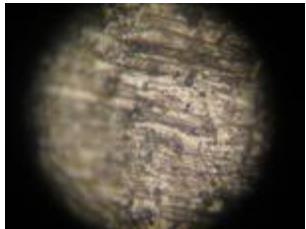
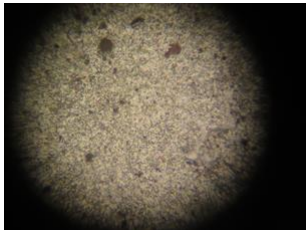
|            |     |                                                                                      |                                                                                       |
|------------|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|            |     |    |    |
|            |     | Figura A3-39 Estado probeta B52 tras 2 semanas                                       | Figura A3-40 Estado final probeta B52                                                 |
| AMBIENTE 6 | B61 |    |    |
|            |     | Figura A3-41 Estado inicial probeta B61                                              | Figura A3-42 Estado probeta B61 tras 1 semana                                         |
|            |     |   |   |
|            |     | Figura A3-43 Estado probeta B61 tras 2 semanas                                       | Figura A3-44 Estado final probeta B61                                                 |
|            | B62 |  |  |
|            |     | Figura A3-45 Estado inicial probeta B62                                              | Figura A3-46 Estado probeta B62 tras 1 semana                                         |
|            |     |  |  |
|            |     | Figura A3-47 Estado probeta B62 tras 2 semanas                                       | Figura A3-48 Estado final probeta B62                                                 |

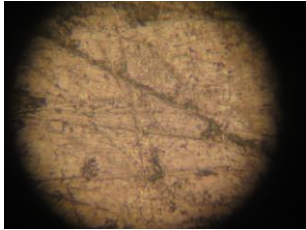
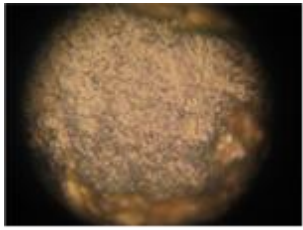
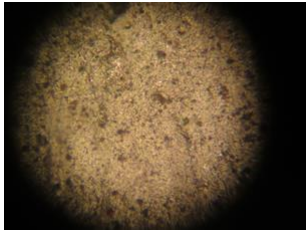
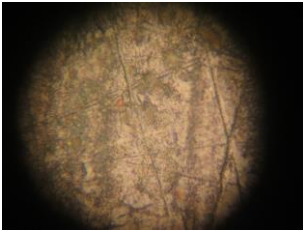
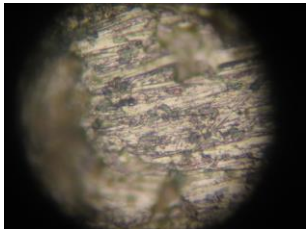
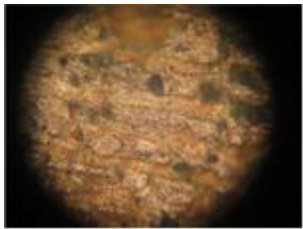
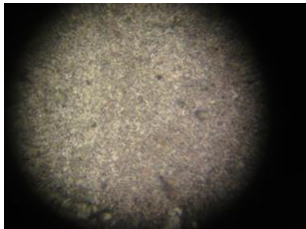
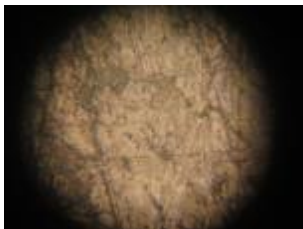
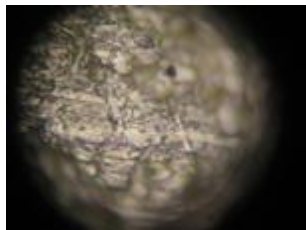
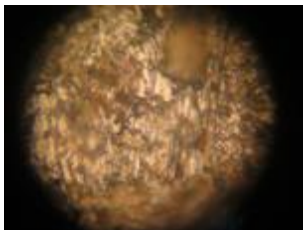
|                   |            |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AMBIENTE 7</b> | <b>B71</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A3-49 Estado inicial probeta B71</b>                                       | <b>Figura A3-50 Estado probeta B71 tras 1 semana</b>                                  |
|                   | <b>B72</b> |    |    |
|                   |            | <b>Figura A3-51 Estado probeta B71 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A3-52 Estado final probeta B71</b>                                          |
|                   | <b>B72</b> |   |   |
|                   |            | <b>Figura A3-53 Estado inicial probeta B72</b>                                       | <b>Figura A3-54 Estado probeta B72 tras 1 semana</b>                                  |
| <b>AMBIENTE 8</b> | <b>B81</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A3-55 Estado probeta B72 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A3-56 Estado final probeta B72</b>                                          |
| <b>AMBIENTE 8</b> | <b>B81</b> |  |  |
|                   |            | <b>Figura A3-57 Estado inicial probeta B81</b>                                       | <b>Figura A3-58 Estado probeta B81 tras 1 semana</b>                                  |

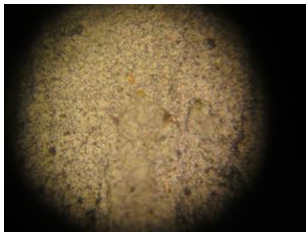
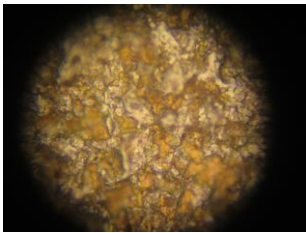
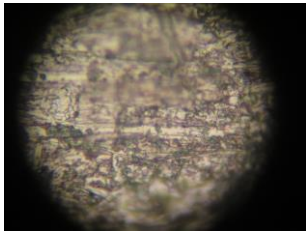
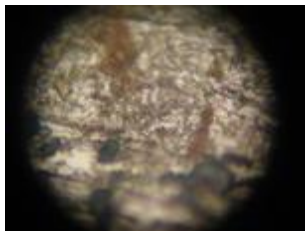
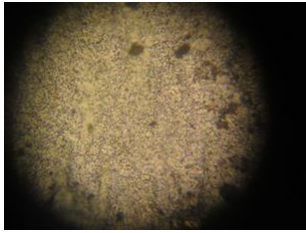
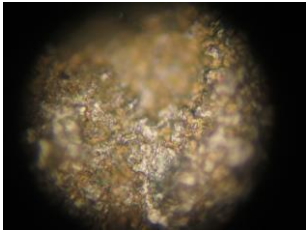
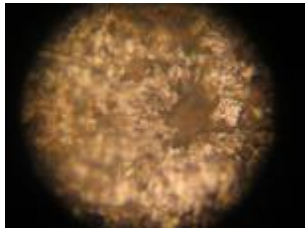
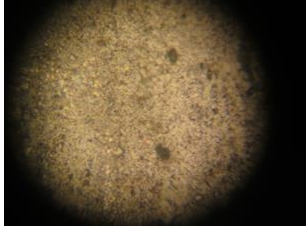
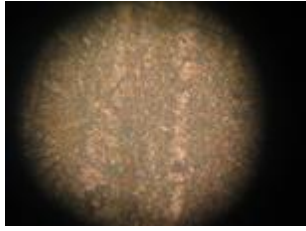
|                   |            |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                   |            |    |    |
|                   |            | Figura A3-59 Estado probeta B81 tras 2 semanas                                       | Figura A3-60 Estado final probeta B81                                                 |
|                   | <b>B82</b> |    |    |
|                   |            | Figura A3-61 Estado inicial probeta B82                                              | Figura A3-62 Estado probeta B82 tras 1 semana                                         |
|                   |            |   |   |
|                   |            | Figura A3-63 Estado probeta B82 tras 2 semanas                                       | Figura A3-64 Estado final probeta B82                                                 |
| <b>AMBIENTE 9</b> | <b>B91</b> |  |  |
|                   |            | Figura A3-65 Estado inicial probeta B91                                              | Figura A3-66 Estado probeta B91 tras 1 semana                                         |
|                   |            |  |  |
|                   |            | Figura A3-67 Estado probeta B91 tras 2 semanas                                       | Figura A3-68 Estado final probeta B91                                                 |

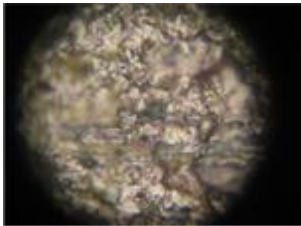
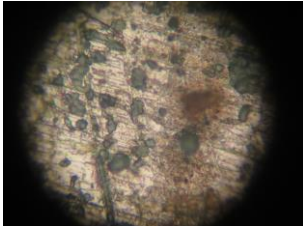
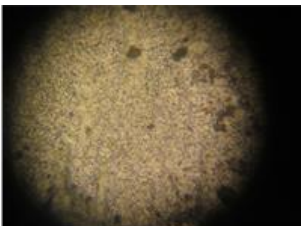
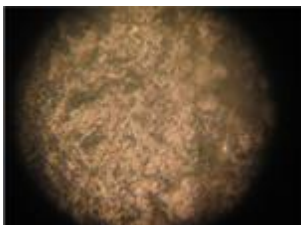
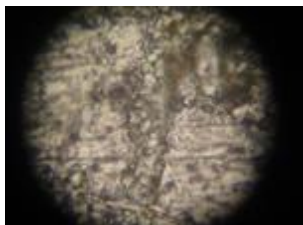
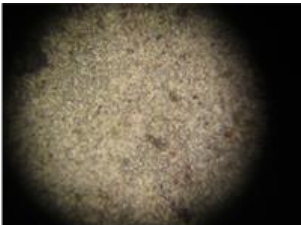
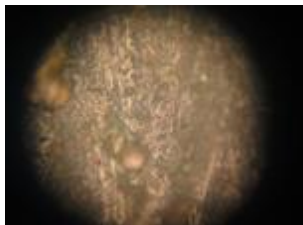
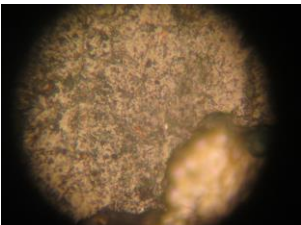
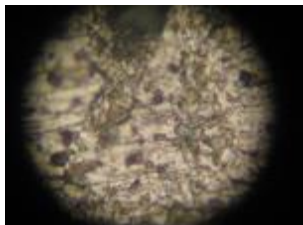
|                    |             |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AMBIENTE 10</b> | <b>B92</b>  |    |    |
|                    |             | <b>Figura A3-69 Estado inicial probeta B92</b>                                       | <b>Figura A3-70 Estado probeta B92 tras 1 semana</b>                                  |
|                    |             |    |    |
|                    |             | <b>Figura A3-71 Estado probeta B92 tras 2 semanas</b>                                | <b>Figura A3-72 Estado final probeta B92</b>                                          |
|                    | <b>B101</b> |   |   |
|                    |             | <b>Figura A3-73 Estado inicial probeta B101</b>                                      | <b>Figura A3-74 Estado probeta B101 tras 1 semana</b>                                 |
|                    |             |  |  |
|                    |             | <b>Figura A3-75 Estado probeta B101 tras 2 semanas</b>                               | <b>Figura A3-76 Estado final probeta B101</b>                                         |
|                    | <b>B102</b> |  |  |
|                    |             | <b>Figura A3-77 Estado inicial probeta B102</b>                                      | <b>Figura A3-78 Estado probeta B102 tras 1 semana</b>                                 |

|                    |             |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                    |
|--------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |             |  <p><b>Figura A3-79 Estado probeta B102 tras 2 semanas</b></p>   |  <p><b>Figura A3-80 Estado final probeta B102</b></p>           |
| <b>AMBIENTE 11</b> | <b>B111</b> |  <p><b>Figura A3-81 Estado inicial probeta B111</b></p>          |  <p><b>Figura A3-82 Estado probeta B111 tras 1 semana</b></p>   |
|                    |             |  <p><b>Figura A3-83 Estado probeta B111 tras 2 semanas</b></p>  |  <p><b>Figura A3-84 Estado final probeta B111</b></p>          |
|                    | <b>B112</b> |  <p><b>Figura A3-85 Estado inicial probeta B112</b></p>        |  <p><b>Figura A3-86 Estado probeta B112 tras 1 semana</b></p> |
|                    |             |  <p><b>Figura A3-87 Estado probeta B112 tras 2 semanas</b></p> |  <p><b>Figura A3-88 Estado final probeta B112</b></p>         |

|                    |             |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AMBIENTE 12</b> | <b>B121</b> |    |    |
|                    |             | <b>Figura A3-89 Estado inicial probeta B121</b>                                      | <b>Figura A3-90 Estado probeta B121 tras 1 semana</b>                                 |
|                    | <b>B122</b> |    |    |
|                    |             | <b>Figura A3-91 Estado probeta B121 tras 2 semanas</b>                               | <b>Figura A3-92 Estado final probeta B121</b>                                         |
|                    | <b>B122</b> |   |   |
|                    |             | <b>Figura A3-93 Estado inicial probeta B122</b>                                      | <b>Figura A3-94 Estado probeta B122 tras 1 semana</b>                                 |
| <b>AMBIENTE 13</b> | <b>B131</b> |  |  |
|                    |             | <b>Figura A3-95 Estado probeta B122 tras 2 semanas</b>                               | <b>Figura A3-96 Estado final probeta B122</b>                                         |
| <b>AMBIENTE 13</b> | <b>B131</b> |  |  |
|                    |             | <b>Figura A3-97 Estado inicial probeta B131</b>                                      | <b>Figura A3-98 Estado probeta B131 tras 1 semana</b>                                 |

|                    |             |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |             |    |    |
|                    |             | <b>Figura A3-99 Estado probeta B131 tras 2 semanas</b>                               | <b>Figura A3-100 Estado final probeta B131</b>                                        |
|                    | <b>B132</b> |    |    |
|                    |             | <b>Figura A3-101 Estado inicial probeta B132</b>                                     | <b>Figura A3-102 Estado probeta B132 tras 1 semana</b>                                |
|                    |             |   |   |
|                    |             | <b>Figura A3-103 Estado probeta B132 tras 2 semanas</b>                              | <b>Figura A3-104 Estado final probeta B132</b>                                        |
| <b>AMBIENTE 14</b> | <b>B141</b> |  |  |
|                    |             | <b>Figura A3-105 Estado inicial probeta B141</b>                                     | <b>Figura A3-106 Estado probeta B141 tras 1 semana</b>                                |
|                    |             |  |  |
|                    |             | <b>Figura A3-107 Estado probeta B141 tras 2 semanas</b>                              | <b>Figura A3-108 Estado final probeta B141</b>                                        |

|                    |             |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                    | <b>B142</b> |    |    |
|                    |             | Figura A3-109 Estado inicial probeta B142                                            | Figura A3-110 Estado probeta B142 tras 1 semana                                       |
|                    |             |    |    |
|                    |             | Figura A3-111 Estado probeta B142 tras 2 semanas                                     | Figura A3-112 Estado final probeta B142                                               |
| <b>AMBIENTE 15</b> | <b>B151</b> |   |   |
|                    |             | Figura A3-113 Estado inicial probeta B151                                            | Figura A3-114 Estado probeta B151 tras semana                                         |
|                    |             |  |  |
|                    |             | Figura A3-115 Estado probeta B151 tras 1 semana                                      | Figura A3-116 Estado final probeta B151                                               |
|                    | <b>B152</b> |  |  |
|                    |             | Figura A3-117 Estado inicial probeta B152                                            | Figura A3-118 Estado probeta B152 tras 1 semana                                       |

|                    |             |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                     |
|--------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |             |  <p><b>Figura A3-119 Estado probeta B152 tras 2 semanas</b></p>   |  <p><b>Figura A3-120 Estado final probeta B152</b></p>           |
| <b>AMBIENTE 16</b> | <b>B161</b> |  <p><b>Figura A3-121 Estado inicial probeta B161</b></p>          |  <p><b>Figura A3-122 Estado probeta B161 tras 1 semana</b></p>   |
|                    |             |  <p><b>Figura A3-123 Estado probeta B161 tras 2 semanas</b></p>  |  <p><b>Figura A3-124 Estado final probeta B161</b></p>          |
|                    | <b>B162</b> |  <p><b>Figura A3-125 Estado inicial probeta B162</b></p>        |  <p><b>Figura A3-126 Estado probeta B162 tras 1 semana</b></p> |
|                    |             |  <p><b>Figura A3-127 Estado probeta B162 tras 2 semanas</b></p> |  <p><b>Figura A3-128 Estado final probeta B162</b></p>         |



## ANEXO IV: RESULTADOS DEL ACERO “A”

### Resultados de la variación de masa (g)

| Probeta | 1 semana | 2 semanas | 3 semanas |
|---------|----------|-----------|-----------|
| A11     | -0,020   | -0,060    | -0,085    |
| A12     | -0,040   | -0,075    | -0,095    |
| A21     | -0,090   | -0,200    | -0,275    |
| A22     | -0,085   | -0,235    | -0,330    |
| A31     | -0,250   | -0,535    | -0,695    |
| A32     | -0,275   | -0,550    | -0,795    |
| A41     | -0,470   | -0,800    | -1,120    |
| A42     | -0,445   | -0,780    | -1,000    |
| A51     | -0,265   | -0,425    | -0,520    |
| A52     | -0,190   | -0,345    | -0,535    |
| A61     | -0,150   | -0,390    | -0,540    |
| A62     | -0,245   | -0,495    | -0,630    |
| A71     | -0,095   | -0,270    | -0,430    |
| A72     | -0,075   | -0,230    | -0,335    |
| A81     | -0,185   | -0,400    | -0,600    |
| A82     | -0,165   | -0,370    | -0,570    |
| A91     | -0,150   | -0,275    | -0,385    |
| A92     | -0,145   | -0,290    | -0,380    |
| A101    | -0,400   | -0,725    | -0,925    |
| A102    | -0,390   | -0,675    | -1,030    |
| A111    | -0,090   | -0,210    | -0,310    |
| A112    | -0,125   | -0,260    | -0,360    |
| A121    | -0,330   | -0,625    | -0,930    |
| A122    | -0,440   | -0,780    | -1,055    |
| A131    | -0,215   | -0,460    | -0,695    |

|      |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|
| A132 | -0,210 | -0,445 | -0,630 |
| A141 | -0,190 | -0,425 | -0,660 |
| A142 | -0,215 | -0,450 | -0,685 |
| A151 | -0,260 | -0,480 | -0,605 |
| A152 | -0,170 | -0,385 | -0,590 |
| A161 | -0,170 | -0,255 | -0,335 |
| A162 | -0,050 | -0,150 | -0,200 |

---

**Tabla A4-1 Resultados de la variación de masa**

**Resultados del porcentaje de corrosión visual**

---

| Probeta | 1 semana | 2 semanas | 3 semanas |
|---------|----------|-----------|-----------|
| A11     | 2,35%    | 5,57%     | 9,56%     |
| A12     | 0,67%    | 3,48%     | 6,34%     |
| A21     | 6,55%    | 7,97%     | 10,10%    |
| A22     | 5,99%    | 6,45%     | 12,89%    |
| A31     | 12,75%   | 9,34%     | 11,51%    |
| A32     | 12,02%   | 16,08%    | 17,76%    |
| A41     | 15,76%   | 11,55%    | 16,94%    |
| A42     | 5,29%    | 10,44%    | 15,95%    |
| A51     | 12,61%   | 12,63%    | 14,88%    |
| A52     | 11,08%   | 13,24%    | 14,44%    |
| A61     | 16,57%   | 16,77%    | 11,14%    |
| A62     | 12,22%   | 13,58%    | 13,69%    |
| A71     | 15,85%   | 21,40%    | 14,92%    |
| A72     | 13,47%   | 10,62%    | 13,54%    |
| A81     | 8,87%    | 11,60%    | 13,98%    |
| A82     | 11,13%   | 9,47%     | 14,19%    |
| A91     | 11,63%   | 11,59%    | 15,41%    |
| A92     | 13,76%   | 15,89%    | 19,14%    |
| A101    | 15,05%   | 14,66%    | 16,51%    |
| A102    | 11,93%   | 17,98%    | 17,88%    |
| A111    | 10,87%   | 12,84%    | 16,63%    |

|      |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|
| A112 | 14,57% | 15,64% | 14,02% |
| A121 | 18,79% | 20,91% | 14,20% |
| A122 | 6,40%  | 15,27% | 13,20% |
| A131 | 9,38%  | 16,16% | 15,80% |
| A132 | 14,62% | 14,91% | 18,36% |
| A141 | 9,30%  | 12,46% | 17,50% |
| A142 | 13,88% | 16,88% | 13,20% |
| A151 | 11,91% | 12,43% | 14,78% |
| A152 | 9,79%  | 14,93% | 13,77% |
| A161 | 9,91%  | 11,55% | 16,25% |
| A162 | 10,88% | 12,28% | 18,30% |

**Tabla A4-2 Resultados del porcentaje de corrosión visual**

**Resultados de la velocidad de corrosión (mm/año)**

| Probeta | 1 semana | 2 semanas | 3 semanas |
|---------|----------|-----------|-----------|
| A11     | 0,0797   | 0,1196    | 0,1129    |
| A12     | 0,1594   | 0,1495    | 0,1262    |
| A21     | 0,3587   | 0,3985    | 0,3653    |
| A22     | 0,3388   | 0,4683    | 0,4384    |
| A31     | 0,9964   | 1,0661    | 0,9233    |
| A32     | 1,0960   | 1,0960    | 1,0561    |
| A41     | 1,8732   | 1,5942    | 1,4879    |
| A42     | 1,7735   | 1,5543    | 1,3285    |
| A51     | 1,0561   | 0,8469    | 0,6908    |
| A52     | 0,7572   | 0,6875    | 0,7107    |
| A61     | 0,5978   | 0,7772    | 0,7174    |
| A62     | 0,9764   | 0,9864    | 0,8369    |
| A71     | 0,3786   | 0,5380    | 0,5712    |
| A72     | 0,2989   | 0,4583    | 0,4450    |
| A81     | 0,7373   | 0,7971    | 0,7971    |
| A82     | 0,6576   | 0,7373    | 0,7572    |

|      |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|
| A91  | 0,5978 | 0,5480 | 0,5115 |
| A92  | 0,5779 | 0,5779 | 0,5048 |
| A101 | 1,5942 | 1,4447 | 1,2288 |
| A102 | 1,5543 | 1,3451 | 1,3683 |
| A111 | 0,3587 | 0,4185 | 0,4118 |
| A112 | 0,4982 | 0,5181 | 0,4783 |
| A121 | 1,3152 | 1,2455 | 1,2355 |
| A122 | 1,7536 | 1,5543 | 1,4015 |
| A131 | 0,8569 | 0,9167 | 0,9233 |
| A132 | 0,8369 | 0,8868 | 0,8369 |
| A141 | 0,7572 | 0,8469 | 0,8768 |
| A142 | 0,8569 | 0,8967 | 0,9100 |
| A151 | 1,0362 | 0,9565 | 0,8037 |
| A152 | 0,6775 | 0,7672 | 0,7838 |
| A161 | 0,6775 | 0,5081 | 0,4450 |
| A162 | 0,1993 | 0,2989 | 0,2657 |

---

**Tabla A4-3 Resultados de la velocidad de corrosión**

## ANEXO V: RESULTADOS DEL ACERO “B”

**Resultados de la variación de masa (g)**

| Probeta | 1 semana | 2 semanas | 3 semanas |
|---------|----------|-----------|-----------|
| B11     | -0,080   | -0,120    | -0,145    |
| B12     | -0,075   | -0,120    | -0,140    |
| B21     | -0,085   | -0,190    | -0,295    |
| B22     | -0,115   | -0,235    | -0,335    |
| B31     | -0,120   | -0,325    | -0,590    |
| B32     | -0,315   | -0,515    | -0,705    |
| B41     | -0,470   | -0,790    | -1,080    |
| B42     | -0,425   | -0,680    | -0,975    |
| B51     | -0,130   | -0,325    | -0,470    |
| B52     | -0,205   | -0,410    | -0,495    |
| B61     | -0,220   | -0,450    | -0,630    |
| B62     | -0,240   | -0,490    | -0,635    |
| B71     | -0,085   | -0,225    | -0,325    |
| B72     | -0,125   | -0,295    | -0,475    |
| B81     | -0,325   | -0,575    | -0,775    |
| B82     | -0,215   | -0,450    | -0,635    |
| B91     | -0,155   | -0,285    | -0,405    |
| B92     | -0,220   | -0,370    | -0,485    |
| B101    | -0,260   | -0,560    | -0,820    |
| B102    | -0,240   | -0,560    | -0,845    |
| B111    | -0,075   | -0,220    | -0,330    |
| B112    | -0,085   | -0,195    | -0,305    |
| B121    | -0,345   | -0,600    | -0,850    |
| B122    | -0,245   | -0,530    | -0,775    |
| B131    | -0,165   | -0,305    | -0,420    |

|      |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|
| B132 | -0,195 | -0,405 | -0,615 |
| B141 | -0,215 | -0,415 | -0,590 |
| B142 | -0,245 | -0,485 | -0,595 |
| B151 | -0,210 | -0,435 | -0,640 |
| B152 | -0,215 | -0,450 | -0,630 |
| B161 | -0,025 | -0,110 | -0,170 |
| B162 | -0,115 | -0,215 | -0,275 |

---

**Tabla A5-1 Resultados de la variación de masa**

**Resultados del porcentaje de corrosión visual**

| Probeta | 1 semana | 2 semanas | 3 semanas |
|---------|----------|-----------|-----------|
| B11     | 6,89%    | 7,61%     | 13,08%    |
| B12     | 7,37%    | 10,26%    | 15,23%    |
| B21     | 5,09%    | 8,09%     | 15,53%    |
| B22     | 7,91%    | 11,07%    | 14,27%    |
| B31     | 8,41%    | 10,98%    | 12,86%    |
| B32     | 10,77%   | 13,86%    | 13,03%    |
| B41     | 16,93%   | 14,27%    | 17,42%    |
| B42     | 10,91%   | 14,27%    | 17,15%    |
| B51     | 8,25%    | 14,78%    | 19,26%    |
| B52     | 15,71%   | 12,17%    | 14,20%    |
| B61     | 13,23%   | 13,54%    | 14,63%    |
| B62     | 12,92%   | 14,48%    | 13,43%    |
| B71     | 8,71%    | 12,84%    | 17,91%    |
| B72     | 8,66%    | 13,12%    | 13,04%    |
| B81     | 12,01%   | 17,42%    | 17,25%    |
| B82     | 11,74%   | 13,06%    | 14,11%    |
| B91     | 12,33%   | 13,82%    | 13,12%    |
| B92     | 13,58%   | 14,28%    | 14,34%    |
| B101    | 16,34%   | 19,57%    | 18,58%    |
| B102    | 13,90%   | 16,19%    | 16,16%    |
| B111    | 10,45%   | 14,26%    | 16,68%    |

|      |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|
| B112 | 10,38% | 17,10% | 18,91% |
| B121 | 12,38% | 15,73% | 20,05% |
| B122 | 11,59% | 13,02% | 14,95% |
| B131 | 2,99%  | 7,95%  | 14,31% |
| B132 | 3,59%  | 9,88%  | 16,10% |
| B141 | 4,06%  | 10,84% | 18,88% |
| B142 | 5,60%  | 10,03% | 18,67% |
| B151 | 4,92%  | 10,76% | 16,98% |
| B152 | 3,81%  | 12,32% | 15,09% |
| B161 | 8,07%  | 12,08% | 16,29% |
| B162 | 8,38%  | 10,91% | 19,26% |

**Tabla A5-2 Resultados del porcentaje de corrosión visual**

**Resultados de la velocidad de corrosión (mm/año)**

| Probeta | 1 semana | 2 semanas | 3 semanas |
|---------|----------|-----------|-----------|
| B11     | 0,3188   | 0,2391    | 0,1926    |
| B12     | 0,2989   | 0,2391    | 0,1860    |
| B21     | 0,3388   | 0,3786    | 0,3919    |
| B22     | 0,4583   | 0,4683    | 0,4450    |
| B31     | 0,4783   | 0,6476    | 0,7838    |
| B32     | 1,2554   | 1,0263    | 0,9366    |
| B41     | 1,8732   | 1,5742    | 1,4348    |
| B42     | 1,6938   | 1,3551    | 1,2953    |
| B51     | 0,5181   | 0,6476    | 0,6244    |
| B52     | 0,8170   | 0,8170    | 0,6576    |
| B61     | 0,8768   | 0,8967    | 0,8369    |
| B62     | 0,9565   | 0,9764    | 0,8436    |
| B71     | 0,3388   | 0,4484    | 0,4318    |
| B72     | 0,4982   | 0,5879    | 0,6310    |
| B81     | 1,2953   | 1,1458    | 1,0296    |
| B82     | 0,8569   | 0,8967    | 0,8436    |

|      |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|
| B91  | 0,6177 | 0,5679 | 0,5380 |
| B92  | 0,8768 | 0,7373 | 0,6443 |
| B101 | 1,0362 | 1,1159 | 1,0894 |
| B102 | 0,9565 | 1,1159 | 1,1226 |
| B111 | 0,2989 | 0,4384 | 0,4384 |
| B112 | 0,3388 | 0,3886 | 0,4052 |
| B121 | 1,3750 | 1,1956 | 1,1292 |
| B122 | 0,9764 | 1,0561 | 1,0296 |
| B131 | 0,6576 | 0,6078 | 0,5580 |
| B132 | 0,7772 | 0,8071 | 0,8170 |
| B141 | 0,8569 | 0,8270 | 0,7838 |
| B142 | 0,9764 | 0,9665 | 0,7904 |
| B151 | 0,8369 | 0,8668 | 0,8502 |
| B152 | 0,8569 | 0,8967 | 0,8369 |
| B161 | 0,0996 | 0,2192 | 0,2258 |
| B162 | 0,4583 | 0,4284 | 0,3653 |

---

**Tabla A5-3 Resultados de la velocidad de corrosión**

## ANEXO VI: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MATERIAL EMPLEADO

### AVI.1 Microscopio Óptico

El microscopio empleado durante el presente trabajo se trata de un microscopio óptico de modelo MBL 3300 de la marca Krüss optronic (Figura A6-1). Las características técnicas están reflejadas en la Tabla A6-1.

| Equipamiento óptico                       | Equipamiento                               | Iluminación                         | Particularidades                     |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 10x oculares de campo plano               | Mesa XY                                    | 6 V 30 W regulable                  | Microscopios                         |
| Número de campo visual: 18                | Enfoque de precisión/ aproximativo coaxial | Luz incidente a través de objetivos | Contraste de fases con luz incidente |
| Objetivos (acromáticos planos):           | Diafragma iris                             |                                     | Fototubo                             |
| 4x/NA 0,10 // Ø campo de objeto: 4,5 mm   | Soporte de filtro                          |                                     |                                      |
| 10x/NA 0,25 // Ø campo de objeto: 1,8 mm  | Filtro azul                                |                                     |                                      |
| 40x/NA 0,65 // Ø campo de objeto: 0,45 mm | Filtro verde                               |                                     |                                      |

Tabla A6-1 Características del microscopio MBL 3300 de la marca Krüss optronic [53]



Figura A6-1 Microscopio óptico de marca Krüss optronic y modelo MBL3300 [53]

## AVI.2 Medidor de pH

El medidor de pH empleado ha sido un medidor portátil de la marca Hanna y modelo HI 98103 (Figura A6-2). Las características técnicas están descritas en Tabla A6-2.

| Características       |                  |
|-----------------------|------------------|
| Rango                 | 0,00 - 14,00 pH  |
| Resolución            | 0,1 pH           |
| Error máximo (a 25°C) | 0,2 pH           |
| Dimensiones           | 50 x 174 x 21 mm |
| Peso                  | 50 g             |

**Tabla A6-2 Característica técnicas medidor de pH HI 98103 [54]**



**Figura A6-2 Medidor de pH HI 98103 [54]**

## AVI.3 Fuentes de Corriente

El modelo de las fuentes de corriente utilizadas han sido las TRP-3000 (Figura A6-3). Las características técnicas están recogidas en la Tabla A6-3.

| Características     |             |
|---------------------|-------------|
| Tensión de salida   | 0 – 30 V    |
| Corriente de salida | 0 – 3 A     |
| Regulación de carga | 2 mV / 3 mA |

**Tabla A6-3 Características técnicas fuente de corriente TRP-3000 [55]**



Figura A6-3 Fuente de corriente TRP-3000 [55]

#### AVI.4 Balanza de Precisión

La balanza empleada ha sido de la marca Blauscal y modelo AH-150 (Figura A6-4). Las características técnicas están reseñadas en la Tabla A6-4.

| Características         |         |
|-------------------------|---------|
| Capacidad               | 150 g   |
| Resolución              | 0,005 g |
| Rango de cero           | < 2%    |
| Rango de tara           | < 2%    |
| Diámetro base de pesado | 166 mm  |

Tabla A6-4 Características técnicas de la balanza de precisión Blauscal AH-150 [56]



Figura A6-4 Balanza de precisión Blauscal AH-150 [56]