

# ÍNDICE

<b>MOTIVACIÓN</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>METODOLOGÍA</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE</b>	<b>7</b>
<b>1.1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
<b>1.2. TERMODINÁMICA DE CORROSIÓN APLICADA AL HORMIGÓN ARMADO</b>	<b>14</b>
1.2.1. Fundamentos termodinámicos previos	14
1.2.1.1. Reacción Redox	14
1.2.1.2. Potencial electroquímico	16
1.2.1.3. Diagramas de Pourbaix	23
1.2.2. Causas de la corrosión de las armaduras	24
1.2.2.1. La capa pasiva como barrera electroquímica	24
1.2.2.2. El recubrimiento de hormigón como barrera física	28
1.2.2.3. Despasivación de las armaduras	28
1.2.2.4. Corrosión inducida por Carbonatación	30
1.2.2.5. Corrosión inducida por cloruros	32
1.2.3. Mecanismos de corrosión de las armaduras	39
1.2.4. Productos de corrosión y sus consecuencias	44
1.2.4.1. Efectos sobre el hormigón	45
1.2.4.2. Efectos sobre las armaduras	47
1.2.4.3. Efecto sobre el sistema hormigón-acero	49
<b>1.3. MÉTODOS DE MEDIDA DE LA CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO</b>	<b>49</b>
1.3.1. Estado del recubrimiento de hormigón	50
1.3.1.1. Inspección visual	50
1.3.1.2. Resistividad eléctrica	50
1.3.2. Estado de las armaduras embebidas	56
1.3.2.1. Medida del potencial de corrosión	57
1.3.2.2. Determinación de la velocidad de corrosión mediante técnicas electroquímicas	59

1.3.3.	Sistemas de monitorización de la corrosión en estructuras de hormigón armado	109
1.3.3.1.	Sistemas portátiles para la medida in situ	109
1.3.3.2.	Monitorización mediante sensores embebidos	114

## **CAPÍTULO 2: MODELIZACIÓN DE LA INTERFASE ACERO-HORMIGÓN MEDIANTE CIRCUITOS EQUIVALENTE** **131**

### **2.1. INTRODUCCIÓN** **133**

### **2.2. FUNDAMENTO DE LOS MODELOS TEÓRICOS** **139**

#### 2.2.1. Definiciones previas 139

##### 2.2.1.1. Respuesta de los sistemas a una secuencia de pulsos potencioestáticos 139

##### 2.2.1.2. Estructura general de un circuito equivalente 140

#### 2.2.2. Procesos Farádicos y no Farádicos 141

#### 2.2.3. Modelización de procesos electroquímicos No-Farádicos 143

##### 2.2.3.1. Sistema No-Farádico Simple 145

##### 2.2.3.2. Sistema No-Farádico Binario 149

#### 2.2.4. Modelización de procesos electroquímicos Farádicos 151

##### 2.2.4.1. Sistemas Farádicos Simples 151

##### 2.2.4.2. Sistema Farádico Binario 152

#### 2.2.5. Modelización de procesos Mixtos (Farádico / No-Farádico) 154

### **2.3. SECUENCIA DE PULSOS POTENCIOSTÁTICOS** **155**

### **2.4. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS TEÓRICOS Y CUADRO DE MORFOLOGÍAS** **157**

#### 2.4.1. Materiales y métodos 157

#### 2.4.2. Resultados y discusión 158

##### 2.4.2.1. Modelos de circuito equivalente para procesos no-Farádicos 158

##### 2.4.2.2. Modelos de circuito equivalente para procesos Farádicos 166

##### 2.4.2.3. Modelos de circuito equivalente para procesos mixtos 171

##### 2.4.2.4. Cuadro resumen de morfologías y metodología 172

#### 2.4.3. Conclusiones 174

### **2.5. MODELIZACIÓN DE SISTEMAS ACERO-HORMIGÓN** **175**

#### 2.5.1. Materiales y métodos 175

#### 2.5.2. Resultados y discusión 182

2.5.2.1.	Circuito equivalente	182
2.5.2.2.	Validación experimental	185
2.5.3.	Conclusiones	190
<b>2.6.</b>	<b>CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO</b>	<b>190</b>
<b>APÉNDICE: Respuesta de los circuitos equivalentes</b>		<b>192</b>
I.	Circuito RC	192
II.	Circuito RC con una resistencia en paralelo con el condensador	194
III.	Carga transferida a través del circuito RC	197
<b>CAPÍTULO 3: MÉTODO PARA LA MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO</b>		<b>199</b>
<b>3.1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>201</b>
<b>3.2.</b>	<b>FUNDAMENTO DEL MÉTODO</b>	<b>207</b>
<b>3.3.</b>	<b>DESARROLLO Y VALIDACIÓN DEL MÉTODO</b>	<b>211</b>
3.3.1.	Materiales y métodos	211
3.3.2.	Resultados y discusión	213
3.3.2.1.	Diseño de la secuencia de pulsos	213
3.3.2.2.	Validación del método en hormigón armado	222
3.3.2.3.	Breve análisis de los parámetros obtenidos	230
3.3.2.4.	Combinación del método con herramientas quimiométricas	233
3.3.3.	Conclusiones	240
<b>3.4.</b>	<b>ESTUDIO DE OTROS SISTEMAS ELECTROQUÍMICOS</b>	<b>241</b>
3.4.1.	Materiales y métodos	242
3.4.1.1.	Electrodos y celda electroquímica de medida	242
3.4.1.2.	Disoluciones	247
3.4.1.3.	Métodos de medida	248
3.4.2.	Resultados y discusión	249
3.4.2.1.	Acero en disolución de poro	249
3.4.2.2.	Acero en agua de mar	256
3.4.2.3.	Otros sistemas	258
3.4.3.	Conclusiones	261
<b>3.5.</b>	<b>CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO</b>	<b>262</b>

<b>CAPÍTULO 4: SISTEMA SENSOR PARA MONITORIZAR LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO</b>	<b>265</b>
<b>4.1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>267</b>
<b>4.2. LIMITACIONES DE LOS SISTEMAS ACTUALES</b>	<b>270</b>
4.2.1.    Métodos invasivos	270
4.2.2.    Estado del sensor no representativo	270
4.2.3.    Electrodo de referencia	271
4.2.4.    Viabilidad de implementación	271
<b>4.3. SISTEMA DE SENSORES PROPUESTO</b>	<b>272</b>
4.3.1.    Diseño del sensor	274
4.3.2.    Principio operacional del sensor	276
4.3.3.    Ventajas del sensor de corrosión	281
<b>4.4. ESTUDIO DE LA CONFIGURACIÓN DEL SENSOR DE CORROSIÓN</b>	<b>281</b>
4.4.1.    Materiales y métodos	282
4.4.2.    Resultados y discusión	284
4.4.3.    Conclusiones	288
<b>4.5. PARTICIPACIÓN EN LOS PROCESOS DE MACROPAR</b>	<b>289</b>
4.5.1.    Materiales y métodos	290
4.5.2.    Resultados y discusión	291
4.5.3.    Conclusiones	294
<b>4.6. DESARROLLO DEL SISTEMA</b>	<b>295</b>
4.6.1.    Sensores integrados	295
4.6.1.1.    Sensor de corrosión y conexión a la estructura	296
4.6.1.2.    Sensores adicionales y electrodo de referencia	299
4.6.2.    Equipo electrónico y programa de postprocesado de datos	303
4.6.2.1.    Sistema electrónico	303
4.6.2.2.    Aplicación para el análisis automatizado	306
4.6.3.    Conclusiones	311
<b>4.7. RESPUESTA DEL SISTEMA EN HORMIGÓN</b>	<b>312</b>

4.7.1.	Materiales y métodos	313
4.7.2.	Resultados y discusión	319
4.7.3.	Conclusiones	325
<b>4.8.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA</b>	<b>326</b>
4.8.1.	Monitorización de una estructura prototipo	326
4.8.1.1.	Materiales y métodos	327
4.8.1.2.	Resultados y discusión	336
4.8.1.3.	Conclusiones	342
4.8.2.	Monitorización de estructuras marinas	343
4.8.2.1.	Materiales y métodos	344
4.8.2.2.	Resultados y discusión	354
4.8.2.3.	Conclusiones	361
<b>4.9.</b>	<b>CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO</b>	<b>362</b>
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES GENERALES</b>		<b>365</b>
<b>5.1.</b>	<b>APARTADO DE CONCLUSIONES</b>	<b>367</b>
<b>5.2.</b>	<b>TRABAJOS A FUTURO</b>	<b>371</b>
<b>CHAPTER 5: GENERAL CONCLUSIONS</b>		<b>373</b>
<b>5.1.</b>	<b>SECTION OF CONCLUSIONS</b>	<b>375</b>
<b>5.2.</b>	<b>FUTURE WORKS</b>	<b>379</b>
<b>CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>381</b>
<b>6.1.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 1</b>	<b>383</b>
<b>6.2.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 2</b>	<b>399</b>
<b>6.3.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 3</b>	<b>401</b>
<b>6.4.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 4</b>	<b>405</b>

