

Índices

Índice

Resumen	3
Abstract	5
Resum	7
Dedicatorias	9
Agradecimientos	10
Índices	12
Capítulo 1. Introducción y planteamiento de la tesis	27
1.1 Introducción y formulación del problema	27
1.2 Objetivos	32
1.2.1 Objetivo general.	32
1.2.2 Objetivos específicos	32
1.3 Hipótesis de trabajo	33
1.4 Metodología de la investigación	33
Fases de la investigación	34
1.5 Normativa de la Aplicación	36
Capítulo 2. Estado del arte en referencia a los sistemas de protección de tierras	38
2.1 Introducción	39
2.2 Redes de tierras eléctricas de protección.	42
2.2.1 Objetivos y funciones básicas de una instalación de puesta a tierra	47
2.3 Elementos de las redes de protección	49
2.3.1 La toma de tierra	49
2.3.2 Conductor de tierra	51
2.3.3 Seccionador y borne principal de tierra	52
2.3.4 Conductor de protección.	54
2.3.5 Conductor equipotencial principal	57
2.4 Electrodo de puesta tierra	58

2.4.1 Pica o jabalina.	59
2.4.2 Placa de puesta a tierra	60
2.4.3 Conductor desnudo actuando como electrodo	62
2.5 Línea de tierra Conductor de tierra	65
2.5.1 Punto de puesta a tierra	66
2.5.2 Línea de enlace con el electrodo de puesta a tierra	68
2.6 Resistividad del terreno	70
2.6.1 Naturaleza de la resistencia de los electrodos de puesta a tierra	71
2.6.2 La dependencia de las características eléctricas del terreno	74
2.6.3 Factores que influyen en la resistividad del terreno	76
2.6.4 Estado higrométrico del terreno	79
2.6.5 Temperatura	81
2.6.6 Sales solubles y su concentración	82
2.6.7 Estratigrafía	83
2.6.7.1 Granulometría	85
2.6.7.2 Compacidad	85
2.6.7.3 Variaciones estacionales	85
2.6.7.4 Factores de naturaleza eléctrica	87
2.6.8 Medida de la resistividad del terreno	88
2.6.8.1 Métodos de medida	90
2.6.8.2 Método de los cuatro electrodos / Sistema simétrico	90
2.6.8.3 Método de Wenner	93
2.7 Influencia electroquímica de los electrodos	95
2.7.1 Puesta a tierra con picas	96
2.7.2 Puesta a tierra con placas metálicas	98
2.7.3 Conductores horizontales enterrados	99
2.7.4 Redes malladas de conductores enterrados	101
2.8 Funcionamiento de las redes de puesta a tierra	102
2.8.1 Construcción de los sistemas de redes de puesta a tierra.	104
2.8.2 Mantenimiento de las redes de protección de tierra	105
2.9 Corrosión	108
2.9.1 Mecanismo de corrosión electroquímica	110
2.10 Puesta a tierra en edificios	111
2.10.1 Equipotencial en partes metálicas	112
2.10.2 Equipotencial antenas de telecomunicaciones	115
2.10.3 Equipotencial en la estructura del edificio o armado	118

2.11 Puesta a tierra en centro de transformación	120
2.12 Puesta a tierra del conductor neutro en instalaciones de baja tensión	127
2.13 Puesta a tierra en apoyos de alta y baja tensión	141
Capítulo 3. Desarrollo del estudio adoptado	144
3.1 Planteamiento del estudio.	146
3.2 Fabricación de testigos y probetas	147
3.2.1 Unión de elementos de puesta a tierra mediante soldadura aluminotérmica.	150
3.2.1.1 Puntos y tratamiento para la ejecución de la soldadura aluminotérmica	155
3.2.2 Uniones de elementos de puesta a tierra mediante bridas.	157
3.2.3 Asignación de códigos a las probetas.	159
3.2.4 Moldeo de probetas de hormigón.	164
3.2.4.1 Materiales constituyentes del hormigón	166
3.2.4.2 Diseño de la mezcla de hormigón.	170
3.2.4.3 Preparación del hormigón	171
3.2.4.4 Maduración de la probeta en cámara húmeda.	175
3.2.4.5 Procedimiento de protección de las probetas.	176
3.3 Reproducción de condiciones ambientes	177
3.3.1 Condiciones ambientales con presencia de cloruros.	179
3.3.2 Condiciones ambientales con presencia de sulfatos.	181
3.3.3 Condiciones de exposición no agresivas.	183
Capítulo 4. Ensayos experimentales en laboratorio	185
4.1 Ensayo de determinación de la velocidad de corrosión	186
4.1.1 Elementos utilizados para el procedimiento de los ensayos.	186
4.1.2 Proceso de preparación de las probetas para el ensayo.	190
4.1.3 Proceso de realización del ensayo	194
4.1.4 Secado posterior al ensayo.	198
4.2 Preparación para el cálculo de la resistividad eléctrica.	199
4.3 Cálculo de la Intensidad de Corrosión	201
4.4 Ensayo de aceleración de la corrosión mediante láminas de carbono	203
4.5 Caracterización metalográfica mediante observación micrográfica	209
4.5.2 Microscopio metalográfico y obtención de micrografías	219
4.6 Fractura de probetas de referencia o testigo	223

4.6.1 Equipo de rectificado de probetas _____	223
4.6.2 Equipo de compresión para ensayos mecánicos. _____	225
4.6.3 Resultados del ensayo. _____	226
Capítulo 5. Resultados _____	229
5.1 Análisis de los datos _____	230
5.1.1 Desarrollo de la corrosión _____	231
5.1.2 Medición de la resistencia eléctrica en los testigos _____	257
5.1.3 Procedimiento del análisis metalográfico a base de micrografías _____	261
5.1.4 Análisis de micrografías electrónicas _____	270
5.1.4.1 Microscopía electrónica pieza con soldadura _____	271
5.1.4.2 Comparativa de microscopías electrónicas de puntas de bridas _____	275
5.2 Propuestas de mejora _____	278
Capítulo 6. Conclusiones _____	281
6.1. Conclusiones _____	282
Capítulo 7. Investigaciones futuras _____	288
7.1. Investigaciones futuras. _____	289
7.1.1 Probeta con cloruros _____	289
7.1.2 Investigación de las patologías con elementos independientes _____	291
7.1.3 Investigación de las tomas de tierra en ambiente real _____	293
Capítulo 8. Referencias bibliográficas _____	297
Capítulo 9. Anexos _____	314
Anexo 1. Tablas, datos y gráficos por probetas _____	315
Anexo 2. Resultados de laboratorio de microscopía electrónica _____	353
Anexo 3. Otros resultados de laboratorio de microscopía electrónica _____	372

índice de figuras

Figura 1. Objetivos, finalidad y tipos de investigación a desarrollar.	35
Figura 2. Representación esquemática de circuito de puesta a tierra.	43
Figura 3. Representación esquemática de circuito de puesta a tierra en edificio de viviendas.	46
Figura 4. Electrodo de puesta a tierra.	50
Figura 5. Seccionador de puesta a tierra con tapa transparente.	53
Figura 6. Bornero puesta a tierra en cuadros eléctricos.	54
Figura 7. Intensidades admisibles (A) al aire 40 °C, N° de conductores con carga y naturaleza de aislamiento.	55
Figura 8. Relación entre las secciones de los conductores de protección y los de fase.	56
Figura 9. Punto de equipotencial en tuberías de agua	57
Figura 10. Método de hincado y detalle de pica.	59
Figura 11. Placa de Cu y Acero Galvanizado de puesta a tierra 0,5m x 0,5 m 2mm espesor.	61
Figura 12. Fórmulas para estimar la resistencia de tierra en función de la resistividad del terreno y las características del electrodo	62
Figura 13. Grafica logarítmica de resistividades y resistencias para cables enterrados rectilíneos.	64
Figura 14. Circuito de puesta a tierra de un edificio.	67
Figura 15. Resistividad específica de algunos tipos de materiales.	71
Figura 16. La resistividad del terreno, ρ, expresada en $\Omega \cdot m$ equivale a la resistencia de un cubo de terreno, de 1 metro de arista.	74
Figura 17. Factores que intervienen en el terreno.	77

Figura 18. Valores medios aproximados de la resistividad en función del terreno	78
Figura 19. Valores orientativos de la resistividad en función del terreno.	79
Figura 20. El porcentaje de humedad modifica la resistividad del suelo (saturación del terreno)	80
Figura 21. Resistividad del terreno en función a la temperatura	81
Figura 22. La conductividad del suelo es función, principalmente, porcentaje de sales.	82
Figura 23. Variación de la resistividad en función de la estratigrafía del sustrato.	84
Figura 24. Variación de la resistividad en función de las variaciones estacionales.	86
Figura 25. Medición de la resistividad del terreno mediante dos electrodos.	91
Figura 26. Medida de la resistividad entre dos puntos de tierra, C y D, situados simétricamente respecto a O y la distancia entre ellos "L"	92
Figura 27. Medida de resistividad del terreno con 4 electrodos de pequeñas dimensiones.	95
Figura 28. Seccionador de tierra (Punto de comprobación y mantenimiento).	106
Figura 29. Reacción electroquímica de corrosión en el metal.	111
Figura 30. Detalle de una falla en un receptor.	113
Figura 31. Detalle corriente diferencial.	114
Figura 32. Detalle de puesta a tierra en un receptor de telecomunicaciones.	117
Figura 33. Detalle de conexión equipotencial al armado mediante brida (conexión a tierra en el armado).	119
Figura 34. Detalle de conexión equipotencial al armado y anillo.	120
Figura 35. Fachada de un edificio de viviendas con un Centro de Transformación en planta baja.	121
Figura 36. Puesta a tierra de protección o herrajes, caja de derivaciones y conexiones.	122
Figura 37. Puesta a tierra de las cabinas de línea y protección de media tensión.	123

Figura 38. Puesta a tierra de la malla o pantalla de los conductores de alta tensión.	124
Figura 39. Puesta a tierra de la malla o pantalla de los conductores de alta tensión.	124
Figura 40. Elementos componentes de un cable de energía de media y alta tensión.	125
Figura 41. Detalle de superficie equipotencial en el interior del centro de transformación.	126
Figura 42. Esquema de una línea de distribución trifásica con neutro.	129
Figura 43. Esquema de una línea de distribución trifásica sin neutro.	130
Figura 44. Detalle de puesta a tierra de protección y servicio en el Centro de Transformación.	137
Figura 45. Detalle de puesta a tierra de protección de todos los elementos metálicos que componen el C.T. y servicio.	138
Figura 46. Puesta a tierra del neutro en el cuadro de Baja Tensión en el Centro de Transformación (N).	139
Figura 47. Puesta a tierra del neutro en la Caja General de Protección (n).	140
Figura 48. Auto válvula para transformador de intemperie	143
Figura 49. Redondo de acero para armaduras estructurales.	148
Figura 50. Electrodo de puesta a tierra tipo piqueta.	148
Figura 51. Cables de cobre desnudo de 35 mm².	149
Figura 52. Maquina y esquema para realizar la unión por soldadura.	152
Figura 53. Cápsulas utilizadas para soldadura aluminotérmica.	154
Figura 54. Elemento de Control para el encendido.	155
Figura 55. Soldaduras aluminotérmicas con diferentes materiales.	157
Figura 56. Conexión tipo Brida para la unión de elementos.	158
Figura 57. Conexión bridas con diferentes materiales.	159

Figura 58. Nomenclatura de las probetas.	160
Figura 59. Probetas tipo Sulfatos (S).	161
Figura 60. Probetas tipo Cloruros (M).	162
Figura 61. Listado de probetas a elaborar.	163
Figura 62. Detalle y elementos de probeta prismática.	165
Figura 63. Esquema tipo de probeta cilíndrica.	166
Figura 64. Detalle del cemento.	167
Figura 65. Grava y arenas utilizadas para la confección del hormigón.	168
Figura 66. Máquina para mezclado del hormigón.	172
Figura 67. Moldes de acero para la elaboración de las probetas.	173
Figura 68. Vibrador para la compactación del hormigón.	174
Figura 69. Cámara de humedad controlada.	175
Figura 70. Método de protección de la probeta	176
Figura 71. Ambientes generados en contenedores.	178
Figura 72. Puesto de trabajo AUTOLAB potenciostato/galvanostato.	187
Figura 73. Electrodo de referencia calomelanos.	188
Figura 74. Elementos que componen el electrodo calomelanos.	189
Figura 75. Armario metálico, figuración de jaula de Faraday.	190
Figura 76. Probeta acondicionada en su ambiente y cubierta con paño húmedo.	191
Figura 77. Colocación y fijación de la malla.	192
Figura 78. Conectores de contacto y módulo intermedio del potenciostato.	193
Figura 79. Probeta acondicionada en su forma final para los ensayos.	194
Figura 80. Resultados del OCP (potencial de corrosión).	195
Figura 81. Curva de potencial vs. tiempo durante el ensayo de polarización (± 10 mV)	196

Figura 82. Curva característica de polarización electroquímica (I vs. E)	196
Figura 83. Región lineal de la curva I–E y determinación de pendiente.	197
Figura 84. Horno para proceso de secado de las probetas a 60°C.	198
Figura 85. Probetas de deferentes tipos preparadas para la medición de la resistividad eléctrica.	200
Figura 86. Equipamiento de la probeta con láminas de carbono.	204
Figura 87. Retícula plástica para el refuerzo de las láminas de carbono.	205
Figura 88. Detalle del epoxi con la retícula plástica.	205
Figura 89. Detalle de conexiones para proceder al ensayo.	206
Figura 90. Esquema de reacciones electroquímicas.	207
Figura 91. Intensidad de corriente en mA aportada por la lámina de carbono.	207
Figura 92. Probetas preparadas para el comienzo del ensayo de aceleración.	208
Figura 93. Muestras de supuración de corrosión.	208
Figura 94. Probetas seleccionadas para el estudio mediante micrografías.	210
Figura 95. Probetas adicionales destinadas al estudio microestructural.	210
Figura 96. Rotura de probeta y limpieza del hormigón.	212
Figura 97. Piezas limpias para pasar al corte.	212
Figura 98. Sierra de corte metalográfica.	213
Figura 99. Detalle de las piezas cortadas.	214
Figura 100. Maquina utilizada para el desbaste de la pieza marca “Labopol-21”.	214
Figura 101. Discos de 68µm y 30µm para el desbastado de las piezas.	215
Figura 102. Polvo fino de diamante de calidad industrial.	216
Figura 103. Preparado ácido y lugar para el proceso a realizar.	217
Figura 104. Equipo de microscopía metalográfica utilizado en la obtención de micrografías.	219

Figura 105. Componentes y configuración de la conexión. Sección preparada para análisis micrográfico.	220
Figura 106. Zona de unión acero–cobre (material de soldadura). Micrografía a 100x.	221
Figura 107. Zona de unión acero–cobre (material de soldadura). Micrografía a 200x.	222
Figura 108. Zona de unión acero–cobre (material de soldadura). Micrografía a 400x.	222
Figura 109. Máquina diseñada para rectificar probetas de hormigón.	224
Figura 110. Condición de las probetas de referencia antes y tras el refrentado.	225
Figura 111. Equipo de compresión.	225
Figura 112. Datos obtenidos mediante el sistema informático conectado a la prensa de ensayo.	226
Figura 113. Rotura en probetas testigo tras el ensayo a compresión.	228
Figura 114. Comparación de muestras de acero en Sulfatos	262
Figura 115. Comparación de las muestras de acero en Cloruros.	263
Figura 116. Comparación de las muestras de acero Aceleradas	264
Figura 117. Comparación de las muestras de acero Aceleradas.	266
Figura 118. Comparación de las muestras de latón en Sulfatos.	267
Figura 119. Comparación de las muestras de latón en Cloruros.	268
Figura 120. Comparación de las muestras de latón Acelerados.	269
Figura 121. Soldadura para microscopia electrónica.	271
Figura 122. Fisura entre materiales.	272
Figura 123. Barrido de materiales.	272
Figura 124. Evaluación de punto en unión de soldadura, Zoom 2000x.	273
Figura 125. Espectro #1 en punta del tornillo en sulfatos.	275

Figura 126. Evaluación de punto en unión de soldadura, Zoom 2000x.	276
Figura 127. Espectro #1 en punto tornillo en cloruros.	277
Figura 128. Preparación probetas con cloruros directos.	290
Figura 129. Colocación de caucho aislante.	292
Figura 130. Cable para medición de brida embebida.	292
Figura 131. Tomas en arcilla.	294
Figura 132. Tomas en ambiente marino, arena de playa.	295
Figura 133. Tomas en arena de construcción	295

Índice de tablas

TABLA 1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS ÁRIDOS (% PASA). _____	169
Tabla 2. Proporciones de los materiales del hormigón. _____	170
Tabla 3. Valores procedentes del ensayo de compresión, primera amasada. ____	226
Tabla 4. Valores procedentes del ensayo de compresión, segunda amasada ____	227
Tabla 5. Valores electroquímicos obtenidos en ambientes no agresivos _____	233
Tabla 6. Valores electroquímicos obtenidos en ambiente no agresivo. _____	236
Tabla 7. Valores electroquímicos obtenidos en ambiente Agresivo (Sulfatos). ____	240
Tabla 8. Valores electroquímicos obtenidos en ambiente Agresivo (Sulfatos). ____	243
Tabla 9. Valores electroquímicos obtenidos en ambiente Agresivo (Cloruros). ____	247
Tabla 10. Valores electroquímicos obtenidos en ambiente Agresivo (Cloruros). ____	249
Tabla 11. Valores electroquímicos obtenidos en diferentes ambientes. _____	252
Tabla 12. Valores electroquímicos obtenidos, ensayos acelerados en ambiente Agresivo (Cloruros). _____	255
Tabla 13. Valoración inicial de la resistencia eléctrica de los testigos. _____	258
Tabla 14. Valores iniciales y finales de los resultados de la resistencia eléctrica de los testigos. _____	259
Tabla 15. Valores pieza de soldadura. _____	274
Tabla 16. Porcentaje de elementos espectro 1. _____	276
Tabla 17. Porcentaje de elementos espectro 1. _____	277
Tabla 18. Porcentaje de elementos espectro 1. _____	278
Tabla 19. Propiedades de amasado para probetas con elementos independientes	291

Índice de gráficas

Gráfica 1. Diagrama Fasorial de tensiones del sistema trifásico desequilibrado.	134
Gráfica 2. Diagrama Fasorial de tensiones del sistema trifásico equilibrado.	136
Gráfica 3. Resultados gráficos de Granulometría.	169
Gráfica 4. Valores de OCP en ambiente no agresivo.	233
Gráfica 5. Valores de Icorr en ambiente no agresivo.	234
Gráfica 6. Valores de OCP en ambiente no agresivo.	236
Gráfica 7. Valores de Icorr en ambiente no agresivo.	238
Gráfica 8. Valores de OCP en ambiente Agresivo (Sulfatos).	240
Gráfica 9. Grafica de Icorr en ambiente Agresivo (Sulfatos).	241
Gráfica 10. Valores de OCP en ambiente Agresivo (Sulfatos).	244
Gráfica 11. Valores de Icorr en ambiente Agresivo (Sulfatos).	245
Gráfica 12. Valores de OCP en ambiente Agresivo (Cloruros).	247
Gráfica 13. Valores de Icorr en ambiente Agresivo (Cloruros).	248
Gráfica 14. Valores de OCP en ambiente Agresivo (Cloruros).	250
Gráfica 15. Valores de Icorr en ambiente Agresivo (Cloruros).	250
Gráfica 16. Valores de OCP en diferentes ambientes.	252
Gráfica 17. Grafica de Icorr en diferentes ambientes.	254
Gráfica 18. Valores de OCP, ensayos acelerados en ambiente Agresivo (Cloruros).	255
Gráfica 19. Valores de Icorr, ensayos acelerados en ambiente Agresivo (Cloruros).	256
Gráfica 20. Valores pieza de soldadura.	274