



# UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA FACULTAD DE INGENIERÍA

Tesis para optar al título de  
Magíster en Ingeniería Estructural

**COMPORTAMIENTO DE LAS ARMADURAS  
FRENTE A LA CORROSIÓN,  
EN PIEZAS DE HORMIGÓN ARMADO,  
EXPUESTAS A UN AMBIENTE MARINO Y OTRO URBANO**

**Autor:**  
MIGUEL ALVARO PEDRON SARTORI, Ing.

**Director de tesis:**  
PROF. ATILIO ANIBAL MORQUIO DOVAT, Dr. Ing.

**Montevideo, Uruguay, 2015**



PAGINA DE APROBACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba la Tesis de Investigación:

Título:

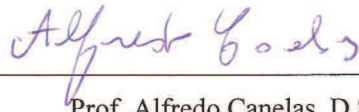
COMPORTAMIENTO DE LAS ARMADURAS FRENTE A LA CORROSIÓN, EN PIEZAS DE HORMIGÓN ARMADO, EXPUESTAS A UN AMBIENTE MARINO Y OTRO URBANO

Autor:

MIGUEL ALVARO PEDRON SARTORI, Ing.

Director de tesis:

Prof.. ATILIO ANIBAL MORQUIO DOVAT, Dr. Ing.



---

Prof. Alfredo Canelas, D.Sc.



---

Prof. Gonzalo Cetrángolo, M.Sc. Ing.



---

Prof. Leonardo Della Mea, M.Sc. Ing.

Montevideo – Uruguay

29 de Octubre de 2015



## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi agradecimiento al profesor Atilio Morquio, director de esta tesis, por su dedicación, sus acertadas recomendaciones, su permanente motivación alentando esta tarea, y depositar su confianza en que este trabajo tuviera este buen fin.

Agradezco también a la Universidad de la República, y en especial al Instituto de Estructuras y Transporte (IET) de la Facultad de Ingeniería, que ha logrado implementar y fomentar la formación de posgrado, entre otros, a través de la realización de la maestría en Ingeniería Civil. En particular mi agradecimiento a los profesores: Alfredo Canelas, Alvaro Gutiérrez, Atilio Morquio, Marcos Musso, Gemma Rodríguez y Berardi Sensale, por su contribución en el dictado de los cursos que recibí de las asignaturas de formación para la maestría. También mi profundo agradecimiento al Prof. Gerardo Rodríguez, quien despertó, alentó y contribuyó a mi formación en esta área de estudio, transmitiendo siempre un increíble entusiasmo, en procura de ampliar conocimientos, sin perder nunca como horizonte, conjugar los aspectos teóricos, con los experimentales.

Mi agradecimiento a varios integrantes del IET, profesores: Santina Caro, Patricia Vila, y Sebastián Viurrarena; docentes: Pablo Sánchez y Juan Vidal, quienes colaboraron arduamente en la realización de ensayos de laboratorio y en campo; y Marcelo Gancio, por su permanente apoyo en el área informática tanto a nivel de software como de hardware. También al Sr. Jorge Camiño, preparador del laboratorio, por su valioso aporte colaborando con la implementación, montaje y realización de diversos ensayos en gabinete y campo, y al profesor Alvaro Gutiérrez del Laboratorio de Control de Calidad de Fundaciones, quien también apoyó en aspectos logísticos de transporte para la realización de los ensayos de campo.

Al profesor Leonardo Della Mea del Instituto de Ensayo de Materiales, de la Facultad de Ingeniería, quien colaboró activamente brindando su conocimiento y poniendo a disposición equipos para la realización de diversos ensayos

electroquímicos.

También a la profesora Gemma Rodríguez del mismo Instituto, quien colaboró facilitando equipamiento para la confección de las probetas y el curado de las mismas.

A la profesora María Teresa Derrégibus del Instituto de Ingeniería Química, por su entrega de conocimientos y colaboración en la realización de ensayos en su área.

A las profesoras María del Carmen Andrade, del Instituto Eduardo Torroja, Madrid, España y Oladis Trocónis de Rincón, del Centro de Estudios de Corrosión, Facultad de Ingeniería - LUZ de la Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, por la generosa e incansable entrega de conocimientos, y ser quienes impulsaron y coordinaron la realización del proyecto DURACON.

A la empresa CONCREXUR, quien brindó personal y materiales para la elaboración de las probetas.

A la Lic. Jimena Machado encargada de la Biblioteca del IET por su constante colaboración en la búsqueda y localización de material bibliográfico.

A la Dirección Nacional de Meteorología y el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada, quienes brindaron la posibilidad de alojar las probetas de ensayo en las estaciones meteorológicas Prado y La Paloma, en los departamentos de Montevideo y Rocha, y proveyeron información meteorológica de las mismas.

Finalmente, agradezco a mi Sra. Karina, mi hijo Darío y nuestros familiares, por el apoyo y la comprensión que me han sabido brindar, ante la dedicación y el esfuerzo en esta etapa de mi formación.

# Resumen

El presente trabajo surgió bajo la motivación del estudio en nuestro medio, del comportamiento de las armaduras frente a la corrosión, en piezas de hormigón armado, expuestas a un ambiente marino y otro urbano. El mismo se desarrolló sobre la base de ejemplares de hormigón con y sin armaduras, elaborados con dos tipos de relación a/c y diferentes recubrimientos de armadura, como los habitualmente utilizados en las obras edilicias convencionales. Los valores de relación a/c considerados, corresponden a los extremos de un rango comúnmente utilizado en dicho tipo de obras.

Para el estudio se tomó registro experimental de los principales parámetros que rigen el fenómeno, entre ellos: características físico-químicas del hormigón utilizado, condición climático - ambiental del lugar de exposición de los ejemplares, grado de contaminación de los ejemplares con las principales sustancias contaminantes, y variables electroquímicas del hormigón y las armaduras.

La información así obtenida, se analizó utilizando técnicas de análisis gráfico y numérico convencional, a efectos de caracterizar el comportamiento de los ejemplares frente a la corrosión y su vinculación con los parámetros involucrados. Principalmente, se buscó expresar los resultados obtenidos, refiriéndolos a la relación a/c y al espesor de recubrimiento de las armaduras, por entender que estos aspectos son los que principalmente caracterizan a los hormigones utilizados.

Entre los resultados obtenidos, se halló para cada relación a/c, el coeficiente de difusión  $D$  del ión  $Cl^-$  y de propagación  $K_{CO_2}$  de la carbonatación en los hormigones. Esto permitió, realizar estimaciones de durabilidad sobre hormigones con similares características, que eventualmente se instalen en las condiciones medio ambientales en las que se realizó este estudio. Así entonces, en relación a la pérdida de sección de las armaduras provocada por la corrosión, se pudo estimar cual sería el período de tiempo hasta alcanzar una situación crítica

que requiera el refuerzo de las mismas.

También se llegó a conclusiones respecto a la influencia de la relación a/c en el ingreso de los agentes contaminantes, desencadenantes de la corrosión de las armaduras.

Con respecto a la influencia de las condiciones climático - ambientales, se concluyó que la dirección de los vientos dominantes es un parámetro que repercute marcadamente en el grado de contaminación del hormigón y en la dinámica de desarrollo de la corrosión. En relación a la variación estacional del clima, según los registros obtenidos, no se pudo observar una vinculación entre ésta y la dinámica de la corrosión de las armaduras.

Por último, para un mismo período de exposición al medio ambiente, se encontró mayor agresividad frente a la corrosión de las armaduras, en la estación marina que en la urbana.

**Palabras clave:** corrosión, armadura, hormigón armado, ión cloruro.



# Summary

This work comes under the motivation to study the behavior of reinforcement corrosion in reinforced concrete specimens exposed to our marine and urban environments. The research was developed on the basis of concrete specimens with and without reinforcement, made with two types of water to cement ratio and different reinforcement cover, as usually used in conventional construction sites. The values of w/c ratio considered, correspond to the range commonly used in construction.

For this study, experimental records of the main parameters that govern the phenomenon, were taken: physicochemical concrete features, environmental climate condition from exposure of the specimens, degree of contamination of specimens with the main pollutants, and electrochemical variables of concrete and steel reinforcement.

The information obtained was analyzed using conventional techniques, graphical and numerical analysis, in order to characterize the behavior of the specimens against corrosion and its relationship with the parameters involved. Mainly, the results obtained were referred to the w/c ratio and the cover thickness of the reinforcement, to understand that these aspects are primarily the aspects that characterized the concrete used.

Among the results, it was found for each ratio w/c, that the diffusion coefficient  $D$  of  $Cl^-$  ion and  $K_{CO_2}$  penetration of carbonation in concrete. This allowed, estimating durability of concrete with similar characteristics, that will eventually be installed in environmental conditions in which this study was conducted. So then, in relation to the loss of section caused by corrosion, which we estimated it would be the time to reach a critical situation requiring replacement thereof. This work reached conclusions regarding the influence of the w/c ratio in the entry of pollutants, triggers reinforcement corrosion.

Regarding the influence of environmental conditions, it was concluded that the direction of the prevailing wind is a parameter that affects markedly on the

degree of contamination of the concrete and the dynamics of development of corrosion. In relation to seasonal variation in climate, according to records obtained no link between it and the dynamics of reinforcement corrosion could be observed.

Finally, for the same period of exposure to the environment, it was found more aggressive corrosion of the reinforcement in the marine station than that found in the urban station.

**Keywords:** corrosion, steel reinforce, reinforced concrete, chloride ion.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivo del trabajo.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Contenido del trabajo.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Revisión bibliográfica.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Corrosión del Hormigón Armado .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2. Tipos de corrosión en las armaduras .....</b>	<b>14</b>
2.2.1 Corrosión localizada.....	14
2.2.1.1 Corrosión por picaduras .....	15
2.2.1.2 Corrosión bajo tensión y fragilización del acero .....	15
2.2.1.3 Corrosión en espacios confinados.....	15
2.2.1.4 Corrosión por corrientes de interferencia.....	16
2.2.1.5 Corrosión galvánica .....	17
2.2.2 Corrosión generalizada.....	17
<b>2.3. Factores que afectan y desencadenan la corrosión de las armaduras</b>	<b>18</b>
2.3.1 Dosificación del hormigón .....	19
2.3.2 Compacidad y homogeneidad .....	19
2.3.3 Humedad .....	20
2.3.4 Efecto del oxígeno.....	22
2.3.5 Espesor de recubrimiento del hormigón.....	23
2.3.6 Efecto de la temperatura.....	23
2.3.7 Estado superficial del acero.....	24
2.3.8 Tensiones mecánicas del acero.....	24
2.3.9 Existencia de fisuras .....	25
<b>2.4. Mecanismos de penetración de los agentes contaminantes.....</b>	<b>26</b>
2.4.1 Absorción capilar .....	26
2.4.2 Permeabilidad .....	26
2.4.3 Difusión .....	27
2.4.4 Migración .....	30

2.4.5 Efecto mecha.....	30
<b>2.5. Procedimiento de inspección .....</b>	<b>31</b>
2.5.1 Generalidades.....	31
2.5.2 Inspección preliminar .....	31
2.5.3 Inspección detallada.....	33
2.5.4 Ensayos tipo sobre el hormigón y las armaduras.....	33
2.5.5 Ensayos de evaluación del estado de contaminación del hormigón .....	34
2.5.5.1 Espesor de carbonatación .....	34
2.5.5.2 Concentración de ión Cl <sup>-</sup> .....	36
2.5.5.2.1 Extracción de muestras.....	38
2.5.5.2.2 Determinación del contenido de ión Cl <sup>-</sup> .....	39
2.5.6 Ensayos de evaluación del estado de corrosión de las armaduras .	42
2.5.6.1 Potencial de corrosión .....	42
2.5.6.2 Velocidad de corrosión.....	45
2.5.6.2.1 Gravimetría.....	46
2.5.6.2.2 Resistencia de polarización .....	46
2.5.6.2.3 Estudio de respuestas transitorias.....	50
2.5.6.2.4 Impedancia electroquímica.....	54
2.5.6.2.5 Ruido electroquímico .....	58
<b>3. Estudio experimental.....</b>	<b>61</b>
<b>3.1. Estaciones de ensayo natural.....</b>	<b>63</b>
3.1.1 Implantación y caracterización de las estaciones de ensayo natural .....	63
3.1.2 Evaluación de los parámetros climático - ambientales .....	69
3.1.2.1 Contaminación atmosférica con CO <sub>2</sub> .....	71
3.1.2.2 Contaminación atmosférica con ión Cl <sup>-</sup> .....	71
3.1.2.3 Contaminación atmosférica con SO <sub>2</sub> .....	71
<b>3.2. Elaboración de los ejemplares.....</b>	<b>73</b>
3.2.1 Diseño de los ejemplares de ensayo. ....	73
3.2.2 Hormigón elaborado para los ejemplares a ensayar .....	75

3.2.3	Caracterización de los materiales utilizados en la elaboración de los hormigones .....	77
3.2.4	Caracterización física y mecánica del hormigón.....	82
3.2.4.1	Ensayo de absorción total, porosidad total y densidad .....	87
3.2.4.2	Ensayo de Fagerlund .....	88
3.2.4.3	Ensayo de penetración forzada de ión $Cl^-$ .....	90
3.2.4.4	Ensayo de resistividad eléctrica .....	99
3.2.4.5	Ensayo de resistencia a tracción.....	102
3.2.4.6	Ensayo de módulo de elasticidad 28 días, norma ASTM C469 .....	104
3.2.4.7	Ensayo de resistencia a compresión.....	106
3.2.4.8	Resumen de las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones elaborados .....	108
3.2.5	Llenado de los moldes para los ejemplares y las muestras a ensayar .....	109
<b>3.3.</b>	<b>Exposición y seguimiento de los ejemplares .....</b>	<b>110</b>
3.3.1	Exposición de los ejemplares en las estaciones de ensayo natural .....	110
3.3.2	Seguimiento de parámetros de durabilidad y corrosión .....	112
3.3.2.1	Velocidad y potencial de corrosión.....	114
3.3.2.2	Resistividad eléctrica del hormigón .....	121
3.3.2.3	Contaminación de los ejemplares con $CO_2$ .....	123
3.3.2.4	Contaminación de los ejemplares con ión $Cl^-$ .....	126
3.3.2.4.1	Extracción de las muestras para los ensayos .....	126
3.3.2.4.2	Determinación del contenido de ión $Cl^-$ libre en el hormigón .....	127
3.3.2.4.3	Ajuste numérico de resultados por mínimos cuadrados .....	127
<b>4.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>131</b>
<b>4.1.</b>	<b>Probetas estación “Prado” .....</b>	<b>131</b>
4.1.1	Parámetros climático - ambientales.....	131
4.1.2	Potencial de corrosión .....	132

4.1.3 Velocidad de corrosión .....	135
4.1.4 Resistividad.....	138
4.1.5 Pérdida de masa .....	141
4.1.6 Contaminación del hormigón con CO <sub>2</sub> y el ión Cl <sup>-</sup> .....	143
4.1.7 Resumen.....	144
<b>4.2. Probetas estación “La Paloma” .....</b>	<b>145</b>
4.2.1 Parámetros climático - ambientales .....	145
4.2.2 Potencial de corrosión.....	145
4.2.3 Velocidad de corrosión .....	148
4.2.4 Resistividad.....	151
4.2.5 Pérdida de masa .....	154
4.2.6 Contaminación del hormigón con CO <sub>2</sub> y el ión Cl <sup>-</sup> .....	157
4.2.7 Resumen: .....	159
<b>5. Análisis de resultados .....</b>	<b>161</b>
5.1. Parámetros electroquímicos .....	161
5.2. Pérdida de masa en las armaduras.....	163
5.3. Contaminación con CO <sub>2</sub> y Cl <sup>-</sup> , coeficientes Cs y D.....	168
5.4. Caracterización mecánica y física de los hormigones.....	184
5.5. Parámetros climático - ambientales.....	185
<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>187</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>193</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>199</b>

## Índice de figuras

### 2. Revisión bibliográfica

Figura 2.1. Diagrama de Pourbaix del hierro en una solución sin el ión $\text{Cl}^-$ . Tomado de (T. de Rincón et al., [55]).....	13
Figura 2.2. Diagrama de Pourbaix del hierro en una solución conteniendo el ión $\text{Cl}^-$ (355ppm). Tomado de (T. de Rincón et al., [55]).....	13
Figura 2.3. Tipos de corrosión de las armaduras en el hormigón. Tomado de (Feliu et al., [28]). .....	14
Figura 2.4. Efecto mecha. Tomado de (Irassar, E. F., [39]).....	30
Figura 2.5. Diagrama del electrodo de calomelanos ( $\text{Hg} / \text{Hg}_2\text{Cl}_2 / \text{KCl}$ ). Tomado de (Andrade et al., [17]).....	43
Figura 2.6. Diagrama del electrodo de cobre sulfato de cobre ( $\text{Cu} / \text{CuSO}_4$ ). Tomado de (Andrade et al., [17]).....	43
Figura 2.7. Diagrama del electrodo de plata cloruro de plata ( $\text{Ag} / \text{AgCl}$ ). Tomado de (Andrade et al., [17]).....	43
Figura 2.8. Esquema del ensayo de medida del potencial de corrosión. Tomado de (Feliu et al., [28]). .....	45
Figura 2.9. Diagrama de Evans. Curva de polarización de un electrodo. Gráficos con ejes de abscisas en coordenadas aritmética y logarítmica. Tomado de (Pourbaix, M., [48]).....	47
Figura 2.10. Circuito de Randle. ....	50
Figura 2.11. Respuesta transitoria en potencial eléctrico $E$ , ante un pulso de intensidad de corriente constante $I_p$ . Tomado de (Luping, [42]).....	51
Figura 2.12. Respuesta transitoria en intensidad de corriente $I_t$ , ante un pulso de potencial eléctrico $\Delta E_p$ constante. Tomado de (Luping, [42]).....	51
Figura 2.13. Descomposición de la respuesta en potencial $V_t$ ante un impulso constante de corriente $I_p$ . Tomado de (Song et al., [53]).....	52
Figura 2.14. Diagrama de Nyquist. Representación de impedancias en el plano complejo. Tomado de (Andrade et al., [13]).....	55
Figura 2.15. Diagrama de Bode. Módulo de impedancia vs. frecuencia. Tomado de (Andrade et al., [13]).....	55
Figura 2.16. Espectro de ruido electroquímico de una barra de acero inmersa en hormigón. Tomado de (Andrade et al., [13]).....	58

### 3. Estudio experimental

Figura 3.1. Ubicación de las estaciones de ensayo natural. ....	64
Figura 3.2. Ubicación de la Estación Prado en Montevideo .....	65

## Índice de figuras

---

Figura 3.3. Temperatura media.....	65
Figura 3.4. Humedad relativa media .....	66
Figura 3.5. Precipitación media.....	66
Figura 3.6. Días con precipitación > 1mm. ....	67
Figura 3.7. Ubicación de la Estación La Paloma.....	67
Figura 3.8. Temperatura media.....	68
Figura 3.9. Humedad relativa media. ....	68
Figura 3.10. Precipitación media.....	69
Figura 3.11. Días con precipitación > 1mm. ....	69
Figura 3.12. Detalle de la geometría de los ejemplares. Vistas superior y frontal	74
Figura 3.13. Detalle de la geometría de los ejemplares. Vista lateral .....	74
Figura 3.14. Granulometría del agregado grueso .....	79
Figura 3.15. Ensayo de Fagerlund para a/c=0,45. ....	89
Figura 3.16. Ensayo de Fagerlund para a/c=0,65. ....	89
Figura 3.17. Ensayos de penetración forzada para ambas mezclas. ....	97
Figura 3.18. Circuito utilizado para el ensayo de resistividad.....	100
Figura 3.19. Curvas tensión-deformación unitaria para ambas mezclas. ....	105
Figura 3.20. Apoyo de las probetas. Corte transversal.....	111
Figura 3.21. Ubicación en planta de las bases para los ejemplares y las casetas.	111
Figura 3.22. Circuito de Randle. Modelo equivalente de la celda de corrosión..	114
Figura 3.23. Esquema del circuito eléctrico montado para el ensayo de $I_{corr}$ . ....	115
Figura 3.24. Esquema del montaje para el ensayo de $I_{corr}$ y $E_{corr}$ . ....	116
Figura 3.25. Detalle del apoyo del electrodo de referencia. ....	116
Figura 3.26. Gráficas tipo de $I$ y $E$ vs tiempo, en barras objeto de estudio .....	120
Figura 3.27. Montaje utilizado para medir la resistividad del hormigón. ....	122

## 4. Resultados

Figura 4.1. $E_{corr}$ , cara expuesta, rec. 1,5cm. ....	132
Figura 4.2. $E_{corr}$ , cara expuesta, rec. 2,0cm. ....	133
Figura 4.3. $E_{corr}$ , cara expuesta, rec. 3,0cm.....	133
Figura 4.4. $E_{corr}$ , cara resguardada, rec. 1,5cm.....	133
Figura 4.5. $E_{corr}$ , cara resguardada, rec. 2,0cm. ....	134



## Índice de figuras

---

Figura 4.6. $E_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 3,0cm. ....	134
Figura 4.7. $i_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 1,5cm. ....	135
Figura 4.8. $i_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 2,0cm. ....	136
Figura 4.9. $i_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 3,0cm. ....	136
Figura 4.10. $i_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 1,5cm. ....	136
Figura 4.11. $i_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 2,0cm. ....	137
Figura 4.12. $i_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 3,0cm. ....	137
Figura 4.13. $\rho$ , cara expuesta, rec. 1,5cm. ....	138
Figura 4.14. $\rho$ , cara expuesta, rec. 2,0cm. ....	138
Figura 4.15. $\rho$ , cara expuesta, rec. 3,0cm. ....	139
Figura 4.16. $\rho$ , cara resguardada, rec. 1,5cm. ....	139
Figura 4.17. $\rho$ , cara resguardada, rec. 2,0cm. ....	139
Figura 4.18. $\rho$ , cara resguardada, rec. 3,0cm. ....	140
Figura 4.19. Perdida secc. estación Prado. (rec.=1,5 cm). ....	141
Figura 4.20. Perdida secc. estación Prado, (rec.=2,0cm). ....	142
Figura 4.21. Perdida secc. estación Prado, (rec.=3,0cm). ....	142
Figura 4.22. $E_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 1,5cm. ....	146
Figura 4.23. $E_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 2,0cm. ....	146
Figura 4.24. $E_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 3,0cm. ....	146
Figura 4.25. $E_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 1,5cm. ....	147
Figura 4.26. $E_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 2,0cm. ....	147
Figura 4.27. $E_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 3,0cm. ....	147
Figura 4.28. $i_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 1,5cm. ....	149
Figura 4.29. $i_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 2,0cm. ....	149
Figura 4.30. $i_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 3,0cm. ....	149
Figura 4.31. $i_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 1,5cm. ....	150
Figura 4.32. $i_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 2,0cm. ....	150
Figura 4.33. $i_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 3,0cm. ....	150
Figura 4.34. $\rho$ , cara expuesta, rec. 1,5cm. ....	152
Figura 4.35. $\rho$ , cara expuesta, rec. 2,0cm. ....	152
Figura 4.36. $\rho$ , cara expuesta, rec. 3,0cm. ....	152

## Indice de figuras

---

Figura 4.37. $\rho$ , cara resguardada, rec. 1,5cm.....	153
Figura 4.38. $\rho$ , cara resguardada, rec. 2,0cm.....	153
Figura 4.39. $\rho$ , cara resguardada, rec. 3,0cm.....	153
Figura 4.40. Pérdida porcentual de sección de las armaduras con 1,5 cm de recubrimiento.....	155
Figura 4.41. Pérdida porcentual de sección de las armaduras con 2,0 cm de recubrimiento.....	156
Figura 4.42. Pérdida porcentual de sección de las armaduras con 3,0 cm de recubrimiento.....	156
Figura 4.43. 2º año, perfil ión Cl <sup>-</sup> libre, a/c=0,45 .....	157
Figura 4.44. 2º año, perfil ión Cl <sup>-</sup> libre, a/c=0,65 .....	158
Figura 4.45. 3º año, perfil ión Cl <sup>-</sup> libre, a/c=0,45 .....	158
Figura 4.46. 3º año, perfil ión Cl <sup>-</sup> libre a/c=0,65 .....	158
Figura 4.47. 4º año, perfil ión Cl <sup>-</sup> libre, a/c=0,45 .....	159

## 5. Análisis de resultados

Figura 5.1. Estación La Paloma. Pérdida promedio de sección, en las armaduras de la cara resguardada de las probetas con relación a/c=0,65. ....	164
Figura 5.2. Estación La Paloma. Pérdida promedio de sección, en las armaduras de la cara expuesta de las probetas con relación a/c=0,65 .....	164
Figura 5.3. Estación La Paloma. Tiempo estimado para una pérdida de sección de las armaduras del 15%, en un hormigón con rel. a/c=0,65.....	166
Figura 5.4. Estación La Paloma. Tiempo estimado para una pérdida de sección de las armaduras del 15%, en un hormigón con rel. a/c=0,45.....	166
Figura 5.5. Muestras a/c=0.45, corte 4,3 años, cara expuesta, probetas código 2, 4 y 6. ....	171
Figura 5.6. Muestras a/c=0.65, corte 2,2 años, cara resguardada, probetas código 2, 4 y 6 .....	171
Figura 5.7. Muestra a/c=0.45, corte 2º año, cara expuesta.....	172
Figura 5.8. Muestra a/c=0.65, corte 2º año, cara expuesta.....	172
Figura 5.9. Muestra a/c=0.45, corte 4º año, cara expuesta.....	173
Figura 5.10. Muestra a/c=0.65, corte 3º año, cara resguardada.....	173
Figura 5.11. Valores de $D$ , lote 1.....	175
Figura 5.12. Valores de $D$ , lote 2.....	175

## Índice de figuras

---

Figura 5.13. Valores de $C_s$ , lote 1 .....	176
Figura 5.14. Valores de $C_s$ , lote 2 .....	176
Figura 5.15. Valores de $R^2$ , lote 1 .....	176
Figura 5.16. Valores de $R^2$ , lote 2 .....	177
Figura 5.17. Valores de $D$ , lote 1 .....	178
Figura 5.18. Valores de $C_s$ , lote 1 .....	178
Figura 5.19. Valores de $R^2$ , lote 1 .....	178

## Índice de fotos

### 3. Estudio experimental

Foto 3.1. Toma de muestras de aire para la determinación del contenido de CO <sub>2</sub> atmosférico. ....	71
Foto 3.2. Caseta con vela para muestreo del contenido de ión Cl <sup>-</sup> en la atmósfera. ....	72
Foto 3.3. Caseta con vela para muestreo del contenido de SO <sub>2</sub> en la atmósfera. ....	72
Foto 3.4. Disposición de las armaduras. ....	75
Foto 3.5. Colocación de las armaduras dentro de los moldes metálicos. ....	75
Foto 3.6. Probetas utilizadas en el ensayo de Fagerlund. ....	88
Foto 3.7. Montaje para el ensayo de penetración forzada de ión Cl <sup>-</sup> . ....	98
Foto 3.8. Celdas para ensayo de penetración forzada de ión Cl <sup>-</sup> . ....	98
Foto 3.9. Estado de la malla una vez finalizado el ensayo de una probeta con relación a/c=0,65. ....	99
Foto 3.10. Estado final de un electrodo en celda de NaOH para probeta con rel. a/c=0,65. ....	99
Foto 3.11. Foto de la rotura de la probeta 8/45. ....	103
Foto 3.12. Foto de la rotura de la probeta 8/45. ....	103
Foto 3.13. Dispositivo que permite medir el acortamiento de la probeta. ....	104
Foto 3.14. Ensayo de módulo de elasticidad. ....	104
Foto 3.15. Exposición de los ejemplares en la Estación “Prado”. ....	110
Foto 3.16. Exposición de los ejemplares en la Estación “La Paloma”. ....	110
Foto 3.17. Instrumentación para los ensayos de $I_{corr}$ y $E_{corr}$ . ....	117
Foto 3.18. Dispositivo para soporte del electrodo de referencia. ....	117
Foto 3.19. Instrumentación para el ensayo de resistividad. ....	123
Foto 3.20. Dispositivo para contacto del disco con el hormigón, y soporte del electrodo de referencia. ....	123
Foto 3.21. Máquina cortadora de rebanadas de hormigón. ....	124
Foto 3.22. Rebanadas de hormigón obtenidas. ....	124
Foto 3.23. Tinción de rebanada de hormigón con fenolftaleína. ....	125
Foto 3.24. Extracción de polvo de hormigón con fresa. ....	126

## Índice de cuadros

### 3. Estudio experimental

Cuadro 3.1. Características básicas de los ejemplares .....	73
Cuadro 3.2. Características fisico-químicas del cemento. ....	77
Cuadro 3.3. Características mecánicas del cemento .....	78
Cuadro 3.4. Resultados obtenidos de la granulometría del agregado grueso.....	78
Cuadro 3.5. Resultados obtenidos del módulo de finura del agregado fino. ....	80
Cuadro 3.6. Dosificación de las mezclas utilizadas. ....	80
Cuadro 3.7. Nomenclatura y destino de las probetas con mezcla a/c = 0,45. ....	83
Cuadro 3.8. Nomenclatura y destino de las probetas extraídas a partir de 7s/45 y 11s/45. ....	85
Cuadro 3.9. Nomenclatura y destino de las probetas con mezcla a/c = 0,65. ....	85
Cuadro 3.10. Nomenclatura y destino de las probetas extraídas a partir de 7s/65 y 11s/65. ....	87
Cuadro 3.11. Resultados obtenidos para los ensayos de absorción total, porosidad total y peso unitario .....	88
Cuadro 3.12. Resultados para el ensayo de Fagerlund.....	90
Cuadro 3.13. Resultados del ensayo de penetración forzada de cloruros para la probeta 9/45.....	91
Cuadro 3.14. Resultados del ensayo de penetración forzada de cloruros para la probeta 7/45.....	92
Cuadro 3.15. Resultados del ensayo de penetración forzada de cloruros para la probeta 8/45.....	93
Cuadro 3.16. Resultados del ensayo de penetración forzada de cloruros para la probeta 7/65.....	94
Cuadro 3.17. Resultados del ensayo de penetración forzada de cloruros para la probeta 8/65.....	95
Cuadro 3.18. Resultados del ensayo de penetración forzada de cloruros para la probeta 9/65.....	96
Cuadro 3.19. Resultados obtenidos para el ensayo de resistividad a los 28 días. ....	101
Cuadro 3.20. Resultados obtenidos para el ensayo de resistividad a los 90 días. ....	102
Cuadro 3.21. Resultados obtenidos en los ensayos de tracción. ....	103
Cuadro 3.22. Resultados de ensayos de Módulo de elasticidad a los 28 días.....	105
Cuadro 3.23. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días, para la relación a/c=0,45. ....	106

## Indice de cuadros

---

Cuadro 3.24. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días, para la relación a/c=0,65.....	106
Cuadro 3.25. Resistencia a la compresión para ambos hormigones a los 90 días.....	107
Cuadro 3.26. Resumen de las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones de las probetas. ....	108
Cuadro 3.27. Ensayos para el seguimiento de los parámetros de durabilidad y corrosión. ....	112

### **4. Resultados**

Cuadro 4.1. Contaminación por CO <sub>2</sub> .....	143
---	-----

### **5. Análisis de Resultados**

Cuadro 5.1. Resultados de $D$ , $C_s$ y $R^2$ para cada grupo de datos y lote. ....	175
Cuadro 5.2. Resultados de $D$ , $C_s$ y $R^2$ para el lote 1, por año y grupo de datos ..	177

## Índice de símbolos

$A$	- área,
$a/c$	- relación en peso: agua / cemento,
$Ag$	- plata,
$Ag^+$	- ión plata,
$AgCl$	- cloruro de plata,
$AgNO_3$	- nitrato de plata,
$B$	- constante de Stern,
$C(x,t)$	- concentración del constituyente en la profundidad $x$ , e instante $t$ ,
$C_3A$	- aluminato tricálcico,
$C_2S$	- silicato dicálcico
$C_3S$	- silicato tricálcico,
$C_4AF$	- ferroaluminato tetracálcico,
$Ca(OH)$	- hidróxido de calcio,
$CaCO_3$	- carbonato de calcio,
$C_{dl}$	- capacitancia de la doble capa originada por la polarización de la pieza,
$C_{ijk}$	- concentración del constituyente ión $Cl^-$ , obtenida experimentalmente, correspondiente a los subíndices $i, j, k$ ,
$Cl^-$	- ión cloruro,
$CP40$	- cemento Pórtland nacional (bajo álcali),
$C_s$	- concentración del constituyente en la superficie externa de la pieza,
$CSE$	- electrodo de referencia de cobre - sulfato de cobre,
$C_{Tij}$	- concentración de ión $Cl^-$ , obtenida de forma teórica, correspondiente a los subíndices $i, j, k$ ,
$Cu$	- cobre,
$CuSO_4$	- sulfato de cobre,
$D$	- coeficiente de difusión,
$e^-$	- electrón,
$E(t)$	- potencial electroquímico de la pieza en el instante $t$ ,
$E_0$	- potencial electroquímico de equilibrio,
$E_{corr.}$	- potencial electroquímico de corrosión,
$E_{máx.}$	- potencial electroquímico máximo,
$\tilde{E}$	- potencial eléctrico alterno aplicado a la pieza,

## Índice de símbolos

---

- $erf(u)$  - función de error de variable  $u$ ,
- $f$  - frecuencia,
- $F$  - constante de Faraday (96.500 coul),
- $F_{aux}$  - función auxiliar. Corresponde a la suma de las diferencias al cuadrado, entre los valores de concentración de ión  $Cl^-$ , obtenidos experimentalmente y los obtenidos en forma teórica a partir de la solución de la segunda ley de Fick,
- $Fe$  - hierro,
- $Fe^{+2}$  - ión hierro,
- $Fe^{+3}$  - ión hierro,
- $f_0$  - frecuencia correspondiente al punto más alto del semicírculo del diagrama de Nyquist,
- $h$  - altura de probeta,
- $H^+$  - ión hidrógeno,
- $H_2$  - dihidrógeno,
- $H_2CO_3$  - ácido carbónico,
- $H_2O$  - agua,
- $HCO_3^-$  - anión bicarbonato,
- $Hg$  - mercurio,
- $Hg_2Cl_2$  - cloruro mercurioso,
- $HNO_3$  - ácido nítrico,
- $i$  - 1, ..., 4; índice correspondiente al año de realización del ensayo,
- $I$  - intensidad total de corriente en la celda,
- $I_\infty$  - intensidad de corriente en la celda cuando  $t \rightarrow \infty$ ,
- $I_1$  - intensidad de corriente en la celda en el instante  $t_1$ ,
- $I_2$  - intensidad de corriente en la celda en el instante  $t_2$ ,
- $I_3$  - intensidad de corriente en la celda en el instante  $t_3$ ,
- $I_f$  - intensidad de corriente en la celda, amplitud de la frecuencia fundamental,
- $I_{2f}$  - intensidad de corriente en la celda, amplitud del segundo armónico,
- $I_{3f}$  - intensidad de corriente en la celda, amplitud del tercer armónico,
- $I_a$  - intensidad de corriente en la zona anódica de la pieza de estudio,
- $I_c$  - intensidad de corriente en la zona catódica de la pieza de estudio,



## Índice de símbolos

---

$I_{corr}$	- intensidad de corriente de corrosión,
$i_{corr}$	- densidad de corriente de corrosión,
$I_p$	- intensidad de corriente aplicada a la celda,
$j$	- 1, ..., n; índice correspondiente a la profundidad que se realizó el ensayo,
$\bar{j}$	- unidad imaginaria,
$J$	- flujo del constituyente,
$J_x$	- flujo del constituyente en la dirección x,
$k$	- 1, 2, 3; índice correspondiente a la probeta estudiada,
$k_d$	- coeficiente de permeabilidad de Darcy,
$K$	- factor de forma para calcular la resistividad,
$KCl$	- cloruro de potasio,
$K_{CO_2}$	- coeficiente de propagación del anhídrido carbónico,
$K_t$	- amplitud de la respuesta transitoria,
$L_n$	- logaritmo neperiano,
$log$	- logaritmo decimal,
$m$	- masa del metal disuelto en el ánodo,
$n$	- número de valencia en los procesos redox,
$n_e$	- número de electrones intercambiados (2 para el Fe),
$NH_4SCN$	- tiosianato de amonio,
$O_2$	- oxígeno,
$OH$	- ión hidroxilo,
$P$	- presión,
$pH$	- potencial hidrógeno,
$ppm$	- partes por millón,
$P_r$	- probeta de la estación Prado,
$Q$	- caudal,
$R$	- constante de los gases perfectos,
$R_\Omega$	- resistencia eléctrica del hormigón,
$R^2$	- coeficiente de correlación,
$R_p$	- resistencia de polarización,

## Indice de símbolos

---

- $SCN$  - ión tiocianato,
- $SCR$  - suma de los cuadrados reducidos,
- $SCT$  - suma de los cuadrados totales,
- $T$  - temperatura absoluta,
- $t$  - tiempo,
- $t_i$  - tiempo de realización del ensayo, correspondiente al subíndice  $i$ ,
- $V$  - volumen total exudado por unidad de área,
- $w$  - frecuencia angular ( $w=2.\pi.f$ ),
- $W_n$  - peso molar del metal (55,85 g/mol, para el  $F_e$ ),
- $x$  - coordenada, distancia según el eje  $x$ ,
- $X_{CO_2}$  - profundidad de carbonatación del hormigón según el eje  $x$ ,
- $x_j$  - coordenada, profundidad según el eje  $x$  donde se realizó el ensayo, correspondiente al subíndice  $j$ ,
- $y$  - coordenada, distancia según el eje  $y$ ,
- $z$  - coordenada, distancia según el eje  $z$ ,
- $Z$  - impedancia eléctrica
- $\alpha$  y  $\beta$  - coeficientes relacionados con la caída de potencial en la doble capa que rodea el electrodo,
- $\beta_a, \beta_c$  - constantes de Tafel,
- $\Delta E$  - incremento de potencial eléctrico,
- $\Delta I$  - incremento de intensidad de corriente,
- $\Delta E_p$  - incremento de potencial electroquímico debido a la polarización de la pieza.
- $\Delta I_p$  - incremento de intensidad en la celda debido a la polarización de la pieza,
- $\varepsilon$  - deformación unitaria,
- $\eta$  - polarización aplicada ( $E - E_{corr}$ ),
- $\Phi$  - diámetro del disco,
- $\mu$  - viscosidad de un fluido,
- $\rho$  - resistividad eléctrica,
- $\sigma$  - tensión, fuerza por unidad de superficie.

## Índice de símbolos

---

$\Omega_{\text{exp}}$  - área de la superficie expuesta de la varilla objeto de estudio de velocidad de corrosión,

## Índice de siglas y abreviaturas

<i>ANCAP</i>	- Administración Nacional de Combustibles Alcohol y Portland,
<i>ASTM</i>	- American Society for Testing Materials,
<i>BB40</i>	- código del plastificante de marca SIKA, en base a lignosulfonato de calcio,
<i>CYTED</i>	- Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo,
<i>DNM</i>	- Dirección Nacional de Meteorología,
<i>DURACON</i>	- Proyecto Iberoamericano. “Influencia de la Acción del Medio Ambiente en la Durabilidad del Concreto”. Auspiciado por el <i>CYTED</i> ,
<i>ECS</i>	- electrodo de calomelanos saturado,
<i>EDX</i>	- espectrografía de difracción de rayos X,
<i>EHE</i>	- Instrucción Española del Hormigón Estructural,
<i>ISE</i>	- ionic selective electrode (electrodo iónico selectivo),
<i>ISO</i>	- International Organization for Standardization,
<i>45E/R</i>	- denominación para la cara expuesta y o resguardada de un conjunto de probetas con relación $a/c=0,45$ ,
<i>65E/R</i>	- denominación para la cara expuesta y o resguardada de un conjunto de probetas con relación $a/c=0,65$ ,
<i>LP E45</i>	- denominación para la cara expuesta de las probetas con relación $a/c=0,45$ de la estación “La Paloma”,
<i>LP E65</i>	- denominación para la cara expuesta de las probetas con relación $a/c=0,65$ de la estación “La Paloma”,
<i>LP R45</i>	- denominación para la cara resguardada de las probetas con relación $a/c=0,45$ de la estación “La Paloma”,
<i>LP R65</i>	- denominación para la cara resguardada de las probetas con relación $a/c=0,65$ de la estación “La Paloma”,
<i>P.B.I</i>	- producto bruto interno,
<i>PR E45</i>	- denominación para la cara expuesta de las probetas con relación $a/c=0,45$ de la estación “Prado”,
<i>PR E65</i>	- denominación para la cara expuesta de las probetas con relación $a/c=0,65$ de la estación “Prado”,
<i>PR R45</i>	- denominación para la cara resguardada de las probetas con relación $a/c=0,45$ de la estación “Prado”,
<i>PR R65</i>	- denominación para la cara resguardada de las probetas con relación $a/c=0,65$ de la estación “Prado”,

## Índice de siglas y abreviaturas

---

<i>RILEM</i>	- International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures,
<i>Rx</i>	- rayos X,
<i>SEM</i>	- scanning electronic microscopy (microscopía electrónica de barrido),
<i>SNMM</i>	- sobre el nivel medio del mar,
<i>SOHMA</i>	- Servicio de Oceanografía Hidrografía y Meteorología de la Armada,
<i>UNE</i>	- Una Norma Española,
<i>UNIT</i>	- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas,
<i>XRD</i>	- X ray difraction (difracción de rayos X).



# Capítulo 1

## Introducción

El hormigón armado, es uno de los materiales que ha tenido en estas últimas décadas una muy vasta aplicación, entre otras, a nivel mundial, en la industria del sector de la construcción civil. Esto ha llevado, a que dicho material esté presente en una gran variedad de obras, en medios con condiciones muy variadas, que resultan en algunos casos benignas, neutras y en otros agresivas para el mismo.

El hormigón armado, es un material compuesto, integrado básicamente por áridos, material cementante, agua, acero y aire. El proceso de envejecimiento de cada uno de estos materiales, depende de las sustancias agresivas con las cuales toma contacto y del grado de contaminación que estas alcanzan sobre los mismos.

En particular, si centramos la atención en las barras de acero, estas son susceptibles de deteriorarse por el fenómeno de la corrosión, cuando sustancias que contaminen el hormigón, como por ejemplo el ión  $\text{Cl}^-$ , los sulfatos, o el  $\text{CO}_2$ , alcanzan ciertos umbrales de concentración crítica sobre aquellas, y además, existen condiciones electroquímicas favorables. En el caso del ión  $\text{Cl}^-$ , principalmente afecta a estructuras edilicias próximas a zonas de las costas oceánicas, estructuras de piscinas en clubes, infraestructura vial y de plantas industriales donde se procesan sustancias con compuestos de ión  $\text{Cl}^-$ .

Con respecto al sulfatos y el  $\text{CO}_2$ , afectan mayormente a estructuras situadas en ciudades con intenso tránsito vehicular y aquellas en plantas

## 1. Introducción

---

industriales con emisiones de gases que contienen compuestos de dichas sustancias.

Las características físico - químicas del hormigón, son las que rigen el grado de avance de las sustancias contaminantes hacia el interior de la masa (Irassar, E. F., [39]). A su vez, las condiciones de exposición del hormigón al medio ambiente, y las características de éste, son parámetros que condicionan la velocidad con la que se desarrolla el fenómeno.

Finalmente, una vez que el fenómeno de la corrosión, se instala en las armaduras, comienza un proceso de deterioro del hormigón. Esto es debido a que los productos de la corrosión, al ser expansivos, generan fuerzas de tracción sobre el hormigón, que al superar su capacidad resistente, lo fisuran.

El fenómeno de la corrosión de las armaduras en el hormigón armado, es una de las causas que origina importantes daños a las estructuras. Esto trae como consecuencia grandes pérdidas económicas, por concepto de reparación y rehabilitación de las estructuras afectadas. Estudios a nivel mundial revelan que las pérdidas económicas por concepto de la corrosión en general, se sitúan aproximadamente entre el 1,5 al 5,2% del P.B.I. de cada país que sufre este problema (Thompson et al., [56]). A su vez se originan otros costos indirectos asociados a la suspensión de la prestación de servicios o de producción, durante el período de reparación o reemplazo de las obras afectadas.

Muchas de las construcciones, que resultan afectadas por el fenómeno de la corrosión, tienen un importante uso por la sociedad, como por ejemplo infraestructuras viales y portuarias, sistemas de suministro de agua corriente, escuelas, hospitales, clubes, etc. Esto hace que el problema de la corrosión de las armaduras en el hormigón armado, además de ser un problema de ingeniería y económico, también sea un problema con directa repercusión en la sociedad (López Celis et al., [40]).

La entidad del problema, ha hecho que hace varias décadas, numerosos



## 1. Introducción

---

grupos en el mundo, iniciaran investigaciones tendientes al estudio del fenómeno, con el propósito de contribuir en términos generales, con lineamientos para proyectar estructuras con una mayor vida útil, y mejorar las técnicas y sistemas de reparación a aplicar a estructuras afectadas. Actualmente, el Instituto de Estructuras y Transporte de la Facultad de Ingeniería, cuenta con un grupo dedicado a esto.

El presente trabajo, surge entre otros, dentro del marco de las actividades experimentales realizadas por el mencionado grupo, con el propósito del proyecto “Influencia de la Acción del Medio Ambiente en la Durabilidad del Concreto”, DURACON (DURACON, [26]), desarrollado en Uruguay .

Dicho proyecto, fue auspiciado por la Cooperación Iberoamericana por medio del CYTED, y convocó la participación de investigadores en el área de 12 países de Iberoamérica. En términos generales, buscó caracterizar la durabilidad de los hormigones expuestos a diferentes condiciones ambientales reinantes en Iberoamérica, utilizando estaciones de ensayo natural, donde se colocaron en exposición probetas armadas y sin armar en al menos dos atmósferas distintas, una marina y otra urbana, en cada país iberoamericano participante. En Uruguay se eligió como estación urbana, una ubicada en la ciudad de Montevideo, capital del país, y como estación marina, representativa de la costa Atlántica, otra ubicada en el balneario La Paloma, perteneciente al departamento de Rocha.

## 1.1. Objetivo del trabajo

El objetivo general del trabajo consistió en la caracterización del fenómeno de la corrosión de las armaduras en piezas de hormigón armado, expuestas a un ambiente marino y otro urbano. Como objetivos específicos, se buscó:

- caracterizar el comportamiento electroquímico de la corrosión de las armaduras en función de las características químicas, físicas y eléctricas del hormigón -las cuales también serán estudiadas-, su recubrimiento y la acción del medio ambiente,
- conocer la dinámica y cuantificar los parámetros que rigen la contaminación del hormigón con los agentes desencadenantes de la corrosión de las armaduras. En particular, hallar el coeficiente de difusión  $D$  del ión  $Cl^-$ , y el de propagación  $K_{CO_2}$  del  $CO_2$ ,
- cuantificar los parámetros climáticos del medio ambiente, y de concentración de los agentes agresivos desencadenantes de la corrosión de las armaduras,
- buscar una posible vinculación entre la dinámica de la corrosión y la variación estacional del clima,
- relacionar la influencia de la exposición del hormigón al viento dominante con la dinámica de su contaminación con los agentes agresivos, y la de corrosión de las armaduras,
- identificar la influencia de la relación a/c en relación a la vulnerabilidad que presentan los hormigones al ingreso de los agentes contaminantes promotores de la corrosión, como también respecto al desarrollo de la misma,
- realizar estimaciones de durabilidad, para predecir el tiempo a partir del cual piezas de hormigón armado expuestas a ambientes similares a los

## 1.1. Objetivo del trabajo

---

estudiados, sufrirían un grado de contaminación que dispare la corrosión de las armaduras, y se produzcan pérdidas de sección que requieran su refuerzo,

## **1.2. Contenido del trabajo**

El contenido del presente trabajo, se desarrolla en un total de seis capítulos. A continuación, se describe cada uno de ellos:

- **Capítulo 1: Introducción**

Este capítulo busca introducir al lector en la comprensión del fenómeno de la corrosión de las armaduras en el hormigón armado, y presentar cual es el alcance de su afectación en las estructuras, y el impacto social y económico del problema que origina. Se mencionan los principales agentes desencadenantes de la corrosión, el origen de los mismos, y cuales son los aspectos que promueven su desarrollo.

Por último, se menciona cual fue el elemento motivador del estudio y su enclave dentro de un contexto general de investigación en el tema.

- **Capítulo 2: Revisión bibliográfica**

Se expone un marco teórico general, vinculado a varios aspectos relacionados al fenómeno de la corrosión de las armaduras en el hormigón armado. En este sentido, los principales temas abordados, se refieren a los posibles tipos de corrosión que pueden encontrarse en el hormigón armado, los factores que la inducen y desencadenan, los mecanismos de penetración de los agentes contaminantes, y las técnicas de inspección y evaluación del grado de contaminación y avance de la corrosión de las armaduras en las estructuras afectadas.

## 1.2. Contenido del trabajo

---

- Capítulo 3: Estudio experimental

Se expone el método seguido, abordando los aspectos específicos más relevantes del estudio, entre ellos: la implantación y caracterización de las estaciones de ensayo natural, la evaluación de los parámetros climático - ambientales, la caracterización de los materiales empleados y del hormigón elaborado, el seguimiento de los parámetros de durabilidad y corrosión en los ejemplares, y los resultados obtenidos.

- Capítulo 4: Resultados

Para cada estación de ensayo natural, se presentan los resultados obtenidos de los parámetros estudiados: climático - ambientales, electroquímicos y agentes contaminantes.

- Capítulo 5: Análisis de resultados

Para cada estación de ensayo natural, se realizó el análisis de los parámetros estudiados: potencial y velocidad de corrosión, resistividad del hormigón, niveles de contaminación y coeficientes de difusión del ión  $\text{Cl}^-$  y  $\text{CO}_2$  en el hormigón y pérdida de masa de las armaduras.

- Capítulo 6: Conclusiones

Finalmente, se extraen las conclusiones en relación a los diversos aspectos estudiados: parámetros electroquímicos, pérdida de masa de las armaduras, coeficientes de difusión del ión  $\text{Cl}^-$  y  $\text{CO}_2$ , caracterización mecánica y física de los hormigones y del ambiente. Se incluye un resumen general sobre las conclusiones arribadas.

También se concluye que el estudio realizado sirvió como elemento

## 1.2. Contenido del trabajo

---

estimulador para emprender nuevas líneas de investigación, que en términos generales busquen profundizar el estado actual del conocimiento en relación al problema de la corrosión de las armaduras en el hormigón armado, y quizás también puedan dar origen a nuevos aportes que sean incorporados en las normas nacionales al respecto. Así, algunas posibles líneas de investigación visualizadas, podrían ser: técnicas electroquímicas para minimizar y detener el proceso de corrosión, técnicas electroquímicas de saneado de la contaminación del hormigón con el ión  $\text{Cl}^-$ , utilización de adiciones en los hormigones para mejorar las características de durabilidad frente a la corrosión de las armaduras, la contaminación con el ión  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{CO}_2$ ; y el monitoreo en tiempo real en estructuras existentes de los parámetros electroquímicos y los agentes contaminantes, vinculados al fenómeno de la corrosión de las armaduras.

# Capítulo 2

## Revisión bibliográfica

### 2.1. Corrosión del Hormigón Armado

El hormigón es un material que por su naturaleza le confiere al acero de las armaduras protección física y química. (Irassar, E. F., [39]) Confiere protección física porque básicamente aísla las armaduras de su exposición directa al medio ambiente. No obstante el hormigón contiene una importante red capilar y de poros que si bien en algunos casos no llega a impedir el ingreso de la humedad y de las sustancias químicamente agresivas hasta las armaduras, les dificulta o retarda su velocidad de ingreso. También le confiere protección química a las armaduras, porque debido a su naturaleza, es capaz de formar sobre la superficie de las mismas un óxido protector estable, denominado capa pasiva, que las preserva en forma indefinida, en la medida que el hormigón no modifique sus características físico - químicas. Dicha capa, se forma como consecuencia de la alta alcalinidad de la solución presente en la matriz de poros, que se sitúa en valores de pH entre 13 y 14. Dicha alcalinidad, se ha demostrado esta constituida principalmente por iones  $\text{OH}^-$ , provenientes de los hidróxidos de sodio y potasio (T. de Rincón et al., [55]) .

En algunos casos, el hormigón se encuentra expuesto a sustancias químicamente agresivas desde el punto de vista de la corrosión de las armaduras,

## 2.1. Corrosión del hormigón armado

---

que son capaces de iniciarla rompiendo la capa pasiva y posteriormente mantenerla.

Los mecanismos más aceptados asociados a estos procesos son los siguientes (T. de Rincón et al., [55]):

- reducción de la alcalinidad natural del hormigón, debido a procesos de lixiviación de las sustancias alcalinas con agua, o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro material de naturaleza ácida,
- acción electroquímica del ión  $\text{Cl}^-$  en presencia del oxígeno.

A continuación se desarrolla una interpretación energética del fenómeno de la corrosión.

Exceptuando los metales nobles, los demás se encuentran en la naturaleza generalmente bajo la forma de compuestos (óxidos, hidróxidos, sulfatos, etc.), estado que corresponde a valores reducidos de la energía de Gibbs. La extracción de los elementos metálicos a partir de tales compuestos, requiere el suministro de energía, mediante un proceso de reducción. Esto lleva a que los metales durante su vida de servicio, tiendan a regresar de forma natural, a un estado con un nivel energético inferior. Esto ocurre, en los procesos de corrosión, donde al oxidarse los elementos metálicos, se convierten a otros compuestos disminuyendo su energía libre de Gibbs (Andrade et al., [16]).

Existen dos posibles mecanismos según los cuales se desarrolla la corrosión :

- corrosión directa ( o corrosión seca ), que ocurre cuando los metales se encuentran a una temperatura elevada,
- corrosión en solución acuosa ( o corrosión húmeda ),

La corrosión de las armaduras en el hormigón, es considerada en medio



## 2.1. Corrosión del hormigón armado

---

acuoso, por estar las mismas, en contacto con la solución presente en la red de poros y capilares del hormigón. Este tipo de corrosión, da origen a la formación de una celda electroquímica, conformada básicamente por los siguientes elementos:

- ánodo, donde ocurre la reacción de oxidación,
- cátodo, donde ocurre la reacción de reducción,
- electrolito, considerado como el propio hormigón, donde se producen las reacciones químicas y el intercambio de iones,
- conductor de electrones, la propia armadura, por donde circulan los electrones, desprendidos en la reacción de oxidación.

Las reacciones anódica y catódica que se desarrollan, en medio acuoso son las siguientes :



( zona anódica de disolución del metal )

En el caso de un medio neutro o básico y aireado, se desarrolla la siguiente reacción catódica



( zona catódica donde el material permanece inalterado)

En el caso de un medio ácido, se desarrolla la siguiente reacción catódica



( zona catódica donde el material permanece inalterado)

## 2.1. Corrosión del hormigón armado

---

Existe una correspondencia entre la masa de metal disuelto  $m$  en el ánodo y la intensidad de corriente  $I$  que circula en la celda originada por el flujo de electrones liberados en el ánodo, que circula hacia el cátodo, durante un cierto período de tiempo  $t$ . Según la ley de Faraday, dicha correspondencia tiene la siguiente expresión :

$$m = \frac{I \cdot t \cdot W_m}{F \cdot n_e} \quad (2.4)$$

Siendo:

$m$  - masa del metal disuelto en el ánodo (grs),

$I$  - intensidad de corriente que circula en la celda,

$t$  - tiempo transcurrido mientras circula corriente entre el ánodo y el cátodo,

$W_n$  - peso molar del metal (55,85 g/mol, para el Fe),

$F$  - constante de Faraday (96.500 coul),

$n_e$  - número de electrones intercambiados (2 para el Fe),

La corrosión del acero en el hormigón, es un proceso electroquímico, que surge de la formación de una celda electroquímica, cuya diferencia de potencial, puede tener los siguientes orígenes (Broomfield, J. P., [22]):

- **pilas de composición:** cuando el acero entra en contacto con otro metal diferente, o existen variaciones significativas en las condiciones superficiales del acero,
- **pilas de concentración:** cuando existen diferencias de concentración de los iones disueltos cerca del acero, como los álcalis, el  $\text{Cl}^-$ , o el oxígeno.

En los denominados diagramas de Pourbaix, se representa el potencial electroquímico  $E$  de los metales en función del pH de la solución con la que toma contacto. Tomando como variables estos parámetros, en dichos diagramas, se



## 2.2. Tipos de corrosión en las armaduras

La corrosión del acero, puede adoptar diferentes tipologías, principalmente según la localización de las zonas anódica y catódica, y la posible existencia de tensiones mecánicas importantes (Fontana, M. G., [31]). En el caso particular del hormigón armado, en la Figura 2.3 se muestran las principales tipologías posibles de hallar:

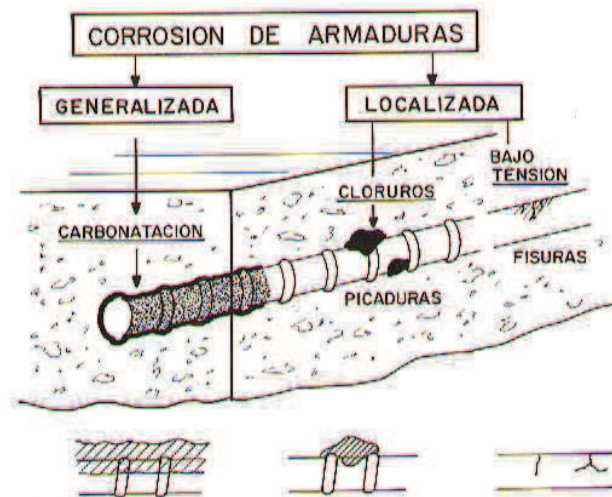


Figura 2.3. Tipos de corrosión de las armaduras en el hormigón. Tomado de (Feliu et al., [28]).

### 2.2.1 Corrosión localizada

Es un tipo de corrosión, cuya acción se concentra en zonas limitadas. Su manifestación puede ocurrir de varias formas, como por ejemplo las siguientes:

- corrosión por picaduras,
- corrosión bajo tensión y fragilización del acero,
- corrosión en espacios confinados,

## 2.2. Tipos de corrosión en las armaduras

---

- corrosión por corrientes de interferencia,
- corrosión galvánica.

### 2.2.1.1 Corrosión por picaduras

Este tipo de corrosión, principalmente es debido a la presencia del ión  $\text{Cl}^-$ , sobre la superficie de la armadura (Feliu et al., [28]). El ión  $\text{Cl}^-$  pueden provenir del medio o estar incorporado en la masa del hormigón.

Una vez que dichos iones llegan a la capa pasiva, la rompen y da comienzo la corrosión, permaneciendo una parte como área pasiva intacta, actuando como cátodo en el cual se reduce el oxígeno, y una pequeña área donde se ha perdido la película, actuando como ánodo en la que se corroe el acero.

### 2.2.1.2 Corrosión bajo tensión y fragilización del acero

Este fenómeno se produce cuando la armadura que esta siendo corroída se encuentra sometida a grandes tensiones de tracción. (Feliu et al., [28]) En general este tipo de corrosión, ocurre por ejemplo en aceros de alta resistencia como los utilizados en los cables de estructuras pre o postensadas, con presencia de picaduras originadas por iones  $\text{Cl}^-$ .

Otro fenómeno que también afecta a las armaduras bajo tensión, es su fragilización debido a la difusión de hidrógeno atómico en el metal. Dicho hidrógeno puede provenir de diferentes fuentes como por ejemplo: el originado por la propia corrosión de las armaduras, sistemas de protección catódica, etc.

Ambos fenómenos originan daños del tipo catastrófico ya que provocan la falla de las armaduras por mecanismos sin preaviso.

### 2.2.1.3 Corrosión en espacios confinados

Este tipo de corrosión surge, cuando bajo ciertas condiciones, unas partes

## 2.2. Tipos de corrosión en las armaduras

---

de la armadura, resultan expuestas en contraposición a otras, a condiciones diferentes de acceso de oxígeno (T. de Rincón et al., [55]). Esto da origen, a la creación de celdas de corrosión por aireación diferencial.

Algunos casos donde ocurre este tipo de corrosión, son por ejemplo, donde se realizó el sellado de grietas que atraviesan armaduras, a las cuales ya llegó el material contaminante, entonces las zonas con escaso acceso de oxígeno, son donde se aceleraría la corrosión.

Otro caso, ocurre en las armaduras con revestimiento epóxico, donde este se daña, o desprende, y existe presencia de contaminación por ión  $\text{Cl}^-$ . En estas condiciones, el pH dentro del espacio confinado decrece, agravándose el proceso de corrosión. En este caso, el ión  $\text{Cl}^-$  interviene en un proceso auto catalítico como en la corrosión por picaduras.

### 2.2.1.4 Corrosión por corrientes de interferencia

En algunos casos, las estructuras, son recorridas por corrientes no deseadas, denominadas de interferencia, erráticas, de fuga o vagabundas (T. de Rincón et al., [55]). De estas corrientes, la que ocasiona mayor daño, es la continua, ya que al circular en una única dirección, el daño se concentra en su punto de salida. En el caso de la corriente alterna, el daño es mucho menor.

Algunos ejemplos donde se origina esta clase de corrientes son: sistemas de protección catódica próximos a las estructuras, o máquinas con conexión eléctrica a tierra, como por ejemplo trenes eléctricos o soldadoras.

Cualquiera de estas corrientes, se origina debido a un gradiente de potencial entre dos zonas de la estructura. Las armaduras que estén próximas a la zona de influencia de dicho gradiente, resultan sometidas a un determinado potencial, que en algunos casos, dependiendo de su valor, podrá originar su corrosión, y en otros llevarla a un estado pasivo o de inmunidad. Esto puede interpretarse observando los ábacos de Pourbaix de corrosión del acero, en una

## 2.2. Tipos de corrosión en las armaduras

---

solución acuosa con presencia o no de ión  $\text{Cl}^-$  (Pourbaix, M., [48]).

### 2.2.1.5 Corrosión galvánica

Este tipo de corrosión, se asocia al funcionamiento de una macro celda, en la cual existe una zona anódica donde se corroe el metal, y otra catódica donde se pasiva permaneciendo inalterado (Feliu et al., [28]). Algunas situaciones donde ocurre este tipo de corrosión son por ejemplo: cuando el acero de refuerzo queda en contacto con otro tipo de metal más noble, o armaduras exteriores que se corroen al ingresar cloruros, mientras que otras interiores interconectadas permanecen pasivas, o cuando alguna parte de la armadura se dañe o pierda la capa pasiva, frente a otras que la mantengan.

### 2.2.2 Corrosión generalizada

Este tipo de corrosión se distribuye de forma uniforme o generalizada sobre la superficie de la pieza afectada. En general esta atribuido a la rotura de la capa pasiva por la pérdida de la alcalinidad, natural del hormigón, debido a procesos de lixiviación de las sustancias alcalinas con agua, o neutralización parcial con compuestos ácidos derivados por ejemplo del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o de azufre ( $\text{SO}_2$ ) u otro material que produzca acidez (Feliu et al., [28]). En el caso de la carbonatación, se ha llegado a situaciones donde el pH del hormigón contra las armaduras, desciende a valores de 8 (T. de Rincón et al., [55]).

También cuando la concentración de iones  $\text{Cl}^-$  es muy elevada, se produce un fenómeno de corrosión generalizada.

### **2.3. Factores que afectan y desencadenan la corrosión de las armaduras**

Los factores que afectan y desencadenan la corrosión de las armaduras, son aquellos aspectos que inducen la despasivación del acero (T. de Rincón et al., [55]). Esto ocurre cuando la alcalinidad del hormigón que las rodea, no existe debido a huecos que impiden el contacto del hormigón con las armaduras, o desciende hasta valores de pH inferiores a 8 (Pourbaix, M., [48]). En el caso de las estructuras de hormigón armado, los factores que habitualmente desencadenan la corrosión de las armaduras son el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{-2}$ , o cualquier otra sustancia ácida o aspecto que neutralice o reduzca el pH alcalino del hormigón, como por ejemplo la lixiviación por aguas blandas. Otros factores de menor ocurrencia que también desencadenan la corrosión de las armaduras son: huecos en el hormigón en contacto con las armaduras, pilas de pH, aireación diferencial, pilas galvánicas por contacto entre dos metales diferentes o corrientes erráticas.

Los factores que en general afectan e inciden en la evolución de la corrosión de las armaduras, son los que se mencionan y describe a continuación :

- dosificación del hormigón,
- compacidad y homogeneidad,
- humedad,
- efecto del oxígeno,
- espesor de recubrimiento,
- efecto de la temperatura,
- estado superficial del acero,
- tensiones mecánicas del acero,



### 2.3. Factores que afectan y desencadenan la corrosión de las armaduras

---

- existencia de fisuras.

#### 2.3.1 Dosificación del hormigón

El hormigón, que recubre las armaduras, es un elemento que las protege de dos formas (T. de Rincón et al., [55]).

- como barrera física, desde el punto de vista mecánico y contra el ingreso de sustancias químicamente agresivas para el hormigón y las armaduras,
- creando una capa pasiva que de no dañarse mantiene las armaduras indefinidamente libres de corrosión.

Esto pone en evidencia, que la dosificación del hormigón, es lo que define las características de protección que éste le otorga a las armaduras, la cual, básicamente responde a la porosidad aportada principalmente por la pasta de cemento.

La porosidad, incide de forma directa en el ingreso de las sustancias líquidas y gaseosas desde el exterior al interior de la masa de hormigón.

La cantidad y características de la porosidad, esta vinculada principalmente a los siguientes factores: relación a/c, grado de hidratación de la pasta endurecida, cantidad de pasta, compacidad, etc. (O'Reilly, V., [45]).

#### 2.3.2 Compacidad y homogeneidad

La compacidad de un hormigón, es la propiedad que expresa la cantidad de materia sólida que existe por unidad de volumen, o sea la relación entre el volumen sólido y el volumen aparente total (T. de Rincón et al., [55]).

Esto evidencia, que la compacidad, es función de la calidad, cantidad y proporción de los materiales, por lo cual resulta inversamente proporcional a la porosidad.

### 2.3. Factores que afectan y desencadenan la corrosión de las armaduras

---

La compacidad también se ve afectada por otros aspectos como un mal mezclado, transporte y compactación, que provocan la segregación de los materiales, y un aumento de la porosidad.

En aquellas mezclas con una muy baja relación a/c ( $a / c < 0,4$ ), y con mal curado, no se logra la hidratación total del cemento, lo cual reduce la formación del gel, y como consecuencia provoca un aumento de la porosidad, con la consecuente disminución de la compacidad (T. de Rincón et al., [55]).

Si bien el hormigón, es un material heterogéneo, la propiedad que se refiere a la uniformidad con la que se distribuyen los componentes que lo integran, se denomina homogeneidad. Para lograr un hormigón con una buena homogeneidad, se deben cuidar como mínimo los siguientes aspectos: proceso de producción, transporte, colocación, compactación y curado.

En resumen, para lograr un hormigón con buena compacidad y homogeneidad, se debe prestar especial atención a una buena ejecución de los siguientes aspectos :

- selección y dosificación de los materiales,
- mezclado de los componentes
- procedimientos de transporte
- colocación
- compactación
- curado
- desencofrado

#### 2.3.3 Humedad

El agua es un elemento imprescindible para el desarrollo de la corrosión, ya que ésta interviene en la reacción catódica de reducción del oxígeno.

### 2.3. Factores que afectan y desencadenan la corrosión de las armaduras

---



Además es el elemento que hace posible la movilidad de los iones a través de los poros del hormigón .

El contenido de agua de los poros del hormigón, esta relacionado, en condiciones de no inmersión, con la humedad relativa ambiental.

Por estos motivos, en los hormigones con muy bajo contenido de agua en los poros, los procesos de corrosión, se ven lentificados o detenidos, incluso en aquellos casos donde ya este rota la capa pasiva.

La existencia de redes capilares en los hormigones, hace que absorban el agua con mayor velocidad que la liberan. Por esto, en regímenes de humedad ambiente fluctuante, en general, el hormigón tiene un grado de humedad mayor, y sólo en situaciones estacionarias de humedad ambiente, a largo plazo, éstas se igualan. Los hormigones contaminados con ión  $Cl^-$ , presentan una tendencia a mantener un mayor grado de humedad debido al carácter higroscópico de estos últimos.

Estos fenómenos se acentúan hacia el interior de la masa del hormigón, por ello, en la mayoría de los hormigones, a profundidades de más de 3 o 4 cm, los poros, se encuentran totalmente saturados de forma permanente. Estos comportamientos, están estrechamente vinculados con las características de la porosidad de cada hormigón en particular, por ello hormigones muy compactos, sólo intercambian humedad en una capa exterior de 1 o 2 cm (Broomfield, J. P., [22]).

El contenido de humedad, es uno de los factores que más influye en la dinámica de la corrosión de las armaduras. Altos contenidos de humedad en el hormigón reducen significativamente su resistividad eléctrica, y por lo tanto facilitan elevados ritmos de corrosión. Sin embargo, esta condición, dificulta el ingreso y la cantidad de oxígeno necesario para el desarrollo de la corrosión, ya

### 2.3. Factores que afectan y desencadenan la corrosión de las armaduras

---

que para ingresar, debe disolverse en el agua (Feliu et al., [28]).

Como caso extremo, una situación de muy bajo contenido de humedad en los poros, facilita el ingreso del oxígeno, pero la resistividad aumenta significativamente, con lo cual el proceso de corrosión resulta también dificultado.

Las máximas velocidades de corrosión, se registran con contenidos elevados de humedad pero sin llegar a la saturación, ya que se posibilita el ingreso de oxígeno, y la resistividad resulta baja.(T. de Rincón et al., [55]).

#### 2.3.4 Efecto del oxígeno

El  $O_2$  es uno de los elementos necesarios para el desarrollo de la reacción catódica de corrosión, por lo tanto la disponibilidad del mismo, para participar en la reacción, es un factor de regulador de la misma.

La principal vía de transporte del  $O_2$ , en la atmósfera, hasta las armaduras, en el hormigón, es la red capilar, que según las condiciones de exposición al ambiente, puede estar con diferentes grados de humedad.

En el caso que el hormigón se encuentre en un ambiente muy seco, por lo general la red capilar, resulta prácticamente seca hasta una profundidad de 3 a 4 cm, con lo cual facilita su ingreso. En este caso pese a una gran disponibilidad de  $O_2$ , la dinámica de corrosión resulta baja por la escasez de agua.

En los casos de hormigones sumergidos o en ambientes muy húmedos, por lo general, la red capilar se encuentra saturada de agua, dificultando el ingreso de  $O_2$ , ya que su ingreso sería exclusivamente por difusión. En este caso si bien la alta disponibilidad de agua, reduce significativamente la resistividad, y por lo tanto se aceleraría la corrosión, no resulta así por la muy baja disponibilidad de  $O_2$ . Esta situación, también se da en hormigones muy compactos, en profundidades de recubrimiento superiores a los 3 a 4 cm, donde la red de poros está permanentemente saturada.

En la práctica, se observa que las mayores dinámicas de corrosión, resultan

### 2.3. Factores que afectan y desencadenan la corrosión de las armaduras

---

en aquellos hormigones expuestos a humedades relativas altas, donde la red capilar no llega a saturarse, pero la resistividad es muy baja, y se facilita el ingreso de  $O_2$ . Así, se dan todas las condiciones que favorecen altas dinámicas de corrosión (Feliu et al., [28]).

#### 2.3.5 Espesor de recubrimiento del hormigón

Es la porción de hormigón que confiere protección a las barras de acero, respecto al ambiente donde se encuentran.

Distintas normas a nivel mundial, especifican diferentes espesores de recubrimiento según cada ambiente.

En variadas circunstancias, el recubrimiento resulta con prestaciones inferiores, debido entre otros, por lo común, a una mala compactación del hormigón.

Si bien un aumento del espesor de recubrimiento, mejora la protección de la armadura, a su vez genera mayor fisuración, en especial en piezas traccionadas. Esto facilita el ingreso de agentes contaminantes como el ión  $Cl^-$  y el  $CO_2$ , y de otros agentes que inciden en la evolución de la corrosión como el agua y el oxígeno.

#### 2.3.6 Efecto de la temperatura

La acción de las temperaturas elevadas facilita y acelera todas las reacciones químicas, principalmente debido a que produce un aumento de la movilidad de las moléculas y los iones. Este aspecto promueve un aumento de la dinámica de corrosión.

También, presenta un efecto contrapuesto, ya que su aumento, provoca la reducción de la humedad, y el aumento de la resistividad. Esto finalmente, conlleva a una reducción de la dinámica de la corrosión.

Por el contrario, su reducción, reduce la dinámica de corrosión, pero,

### 2.3. Factores que afectan y desencadenan la corrosión de las armaduras

---

produce fenómenos de condensación, que provocan un aumento de la humedad y con ello, una disminución de la resistividad y por lo tanto un aumento de la dinámica de la corrosión (López, W. et al., [41]).

#### 2.3.7 Estado superficial del acero

La superficie del acero de las armaduras, constituye la interfase que está en contacto con el medio, por lo cual su estado afecta el desarrollo de las reacciones que ocurran sobre la misma.

En general aquellos aceros cuya superficie posea óxidos provenientes del proceso de conformado, resultan menos reactivos que aquellos cuya superficie este libre de ellos. En el caso de los óxidos producidos por la contaminación atmosférica, no se produce el mismo efecto. Por ejemplo, aquellas armaduras que se utilicen contaminadas con el ión  $Cl^-$ , se propicia la corrosión.

Para el caso de las estructuras pre o postensadas donde se utilizan armaduras con aceros con altos límites elásticos de tracción, la superficie de las mismas deben estar libres de óxidos ya que éstos pueden inducir grietas de corrosión. (T. de Rincón et al., [55]).

#### 2.3.8 Tensiones mecánicas del acero

En estructuras pre o postensadas las armaduras se encuentran sometidos a altas tensiones de tracción del orden del 60 al 80 % de su límite elástico. Esto no constituye un riesgo si el acero está exento de imperfecciones u óxidos superficiales. Si por el contrario los iones despasivantes llegan hasta las armaduras, existe riesgo de corrosión bajo tensión, que se caracteriza por incubar grietas no visibles al ojo humano que se propagan con relativa rapidez hacia el interior, alcanzando una pérdida de sección crítica que provoca una rotura frágil de la armadura (T. de Rincón et al., [55]).

## 2.3. Factores que afectan y desencadenan la corrosión de las armaduras

---

### 2.3.9 Existencia de fisuras

Las fisuras de origen estructural, generalmente ortogonales a las armaduras, significan riesgo de corrosión para éstas porque constituyen una vía fácil de ingreso de los agentes contaminantes hasta las mismas. También existen fisuras longitudinales a las armaduras, generalmente provocadas por la propia corrosión de éstas, procedimientos constructivos incorrectos, retracción de fraguado o estados de tensión complejos, que resultan con igual problemática que las fisuras estructurales ante la corrosión.

La incidencia de la latitud de las fisuras en la corrosión de las armaduras, depende de varios factores, entre los cuales los más relevantes son: la agresividad del medio ambiente, el recubrimiento de la armadura y la calidad del hormigón.

Esto ha llevado a que los códigos suelen limitar el ancho de las fisuras a valores entre 0.1 y 0.3 mm (T. de Rincón et al., [55]).

## **2.4. Mecanismos de penetración de los agentes contaminantes**

Existen varios mecanismo físico - químicos a través de los cuales se produce el ingreso de los agentes contaminantes a la masa de hormigón. Básicamente se produce mediante el escurrimiento del agua intersticial del hormigón (en fase líquida) o el transporte por difusión en la estructura de poros.

Los principales mecanismos que intervienen en estos procesos, son los siguientes (Torrent, R., [57]):

- absorción capilar
- permeabilidad
- difusión
- migración
- efecto mecha

### **2.4.1 Absorción capilar**

Este mecanismo se basa en el efecto producido por la tensión superficial, que actúa sobre los líquidos, en los conductos capilares (Irassar, E. F., [39]). Estas tensiones, generan diferencias de presión que producen el desplazamiento de los líquidos por la red capilar. Estas presiones son mayores cuanto más finos son los conductos capilares.

Luego, las sustancias contaminantes disueltas en los líquidos son arrastradas por estos a través de los conductos capilares del hormigón.

### **2.4.2 Permeabilidad**

La permeabilidad, es la aptitud que presenta un material de ser atravesado



## 2.4. Mecanismos de penetración de los agentes contaminantes

---

por un fluido, líquido o gaseoso, sometido a un gradiente de presión (O'Reilly, V., [45]). En el caso del hormigón, esta propiedad, está estrechamente ligada con las características de la red de poros, en especial, su distribución y tamaño.

Este fenómeno, puede ser cuantificado experimentalmente, mediante la aplicación de la Ley generalizada de Darcy en la cual, se establece que el caudal  $Q$  de un fluido de viscosidad  $\mu$ , y coeficiente de permeabilidad  $K_d$ , que atraviesa un espesor  $dz$  de material de sección aparente  $A$ , bajo la acción de una diferencia de presión  $dP$ , puede determinarse de acuerdo a la siguiente expresión (Irassar, E. F., [39]):

$$Q = -\left(\frac{K_d}{\mu}\right) \cdot A \cdot \left(\frac{dP}{dz}\right) \quad (2.6)$$

### 2.4.3 Difusión

Se denomina difusión, al fenómeno de transporte de una sustancia, dentro de un medio, debido al efecto de su agitación a escala molecular (movimiento Browniano de átomos y moléculas) (Irassar, E. F., [39]). Debido a este efecto, si en un medio, existen dos puntos con diferente concentración, de una misma sustancia, entonces, surge una “resultante” del movimiento aleatorio, que genera un transporte global o neto, de dicha sustancia, desde la zona con mayor concentración, a la de menor.

El parámetro que cuantifica la capacidad de transporte por este mecanismo, se denomina coeficiente de difusión, o difusividad.

Este fenómeno puede desarrollarse en fase líquida o gaseosa. En el primer caso, el medio de transporte más común para las sustancias contaminantes es el agua, mientras que en el segundo, lo constituye el aire.

Este fenómeno puede ser cuantificado mediante la aplicación de la Ley de Fick (Costa, A. et al., [23]), cuya expresión general, es la siguiente:

#### 2.4. Mecanismos de penetración de los agentes contaminantes

---

$$J = -D \cdot \nabla C \quad (2.7)$$

Siendo:

$J$  - flujo del constituyente

$D$  - coeficiente de difusión

$C$  - concentración del constituyente

Si se considera que el fenómeno de difusión se desarrolla en una única dirección, la ecuación (2.7), se reduce a la siguiente:

$$J_x = -D \cdot \left( \frac{dC}{dx} \right) \quad (2.8)$$

Siendo:

$J_x$  - flujo del constituyente en la dirección  $x$

$x$  - distancia según el eje  $x$

Tomando en cuenta el principio de conservación de la masa, en un volumen de control, se llega a la siguiente expresión general :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V C \cdot dV = - \int_{\partial V} J \cdot dS \quad (2.9)$$

Siendo:

$t$  - tiempo

Aplicando el teorema de Gauss a la ecuación (2.9), resulta la siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla J = 0 \quad (2.10)$$

## 2.4. Mecanismos de penetración de los agentes contaminantes

---

Sustituyendo en la ecuación (2.10), la expresión de  $J$  de la ley de Fick, resulta la siguiente ecuación general, denominada 2º ley de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D \cdot \nabla^2 C = \frac{\partial C}{\partial t} - D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.11)$$

Siendo:

- y - distancia según el eje y
- z - distancia según el eje z

Si se considera que el fenómeno de difusión se desarrolla en una única dirección, la ecuación (2.11), se reduce a la siguiente:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \cdot \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right) \quad (2.12)$$

En un caso particular, de difusión unidireccional de la sustancia, donde el medio donde se desarrolla el fenómeno es semi - infinito y las condiciones iniciales son uniformes, es decir, si la concentración interior es nula; y la exterior  $C_s$  y  $D$  se asumen constantes, la solución de la ecuación (2.12), se resuelve mediante la aplicación de la “ función error ” ( erf ) (Irassar, E. F., [39]). La solución resultante, tiene la siguiente expresión:

$$C(x,t) = C_s \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (2.13)$$

Siendo:

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} \cdot dt \text{ - función de error,}$$

## 2.4. Mecanismos de penetración de los agentes contaminantes

---

$C(x,t)$  - concentración a la profundidad  $x$ , en el instante de tiempo  $t$ ,

$C_S$  - concentración en superficie.

### 2.4.4 Migración

Para este mecanismo, la fuerza motriz de transporte, surge de un gradiente de campo eléctrico dentro del material (Torrent, R., [57]). Dicho campo, hace que todos los iones participen en el fenómeno. La dirección de desplazamiento, de los iones, es la que resulta de la interacción de su carga, con el campo eléctrico. A veces el desplazamiento por migración, se ve contrarrestado por un movimiento de contra- difusión.

También para el análisis cuantitativo de este fenómeno, hay que tener en cuenta que la carga total transportada, depende de la carga de cada ión en particular.

### 2.4.5 Efecto mecha

Este mecanismo de transporte, actúa en aquellos conductos del hormigón que vinculan una zona permanentemente saturada con agua, con otra expuesta al aire, donde ocurre un fenómeno continuo de evaporación (Torrent, R., [57]). El funcionamiento de este fenómeno puede apreciarse en la Figura 2.4.

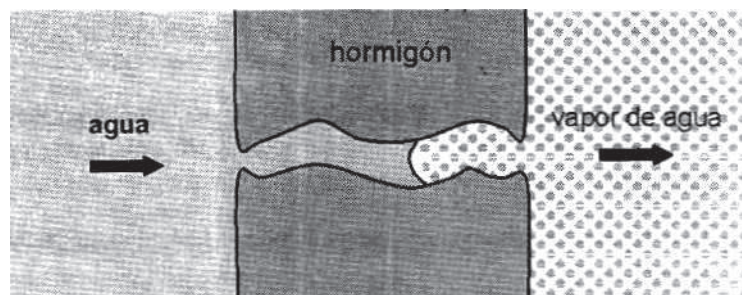


Figura 2.4. Efecto mecha. Tomado de (Irassar, E. F., [39]).

## **2.5. Procedimiento de inspección**

### **2.5.1 Generalidades**

La inspección de la obra constituye una etapa muy importante en la evaluación y posterior reparación de las estructuras de hormigón dañadas por corrosión, ya que a través de ella se obtiene - directa o indirectamente – la información requerida para la solución del problema (T. de Rincón et al., [55]).

Los procedimientos de inspección de las estructuras de hormigón armado, pueden implicar diversos grados de dificultad en las tareas a realizar según la complejidad de los problemas y la magnitud y naturaleza de las estructuras. En este sentido resulta importante una buena planificación de las etapas o procedimiento general a seguir. También hay que tener presente que de acuerdo al tipo y magnitud de la información que se desea obtener, no siempre es necesario llevar a cabo la totalidad de las etapas o procedimiento general propuesto. Se pueden diferenciar dos etapas que corresponden a una denominada inspección preliminar que permite tener una idea general del contexto de la estructura y sus problemas; y otra denominada inspección detallada en la cual se llevan a cabo ensayos y mediciones específicas programados en la inspección preliminar, a efectos de una evaluación acertada del problema y para la definición de sistemas y técnicas de intervención en caso que se requieran.

### **2.5.2 Inspección preliminar**

Las actividades en general asociadas a esta etapa son las siguientes:

- Elaboración de una ficha de antecedentes de la estructura y del medio ambiente:

Con respecto a la estructura, se procura recopilar información referente a

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

su edad, tiempo de servicio, características, naturaleza y procedencia de los materiales, dosificación, tecnología y resistencia del hormigón, edad de inicio de los problemas, intervenciones, niveles de trabajo de los elementos estructurales y eventuales cambios de uso.

En relación al medio ambiente, se busca recabar información que permita caracterizar su agresividad, en función del enclave de la estructura, buscando conocer la forma de interacción con la misma y la intensidad de su acción.

- Examen visual general de la estructura:

En los casos de piezas de estructuras de hormigón armado dañadas por la corrosión, la inspección visual constituye una etapa importante para una primera evaluación de las manifestaciones de daños existentes, como también para la selección de técnicas que permitan una evaluación cuantitativa de los diversos parámetros involucrados en el fenómeno.

En el examen visual general de la estructura, se deben inspeccionar aspectos exteriores y el estado de las armaduras. En ambos casos, es de interés registrar todas las anomalías. En el caso del hormigón, posibles anomalías son por ejemplo: humedades, eflorescencias, grietas, manchas de óxido, desprendimientos de hormigón, expansiones, etc.

Para el caso de las armaduras, es importante, registrar la disminución de su diámetro original, el color y aspectos de los óxidos, y la morfología del ataque en el sentido si es localizado o generalizado, y si existe presencia de cráteres o no.

Con toda la información recopilada, es de utilidad la confección de planos donde se puedan apreciar las distintas graduaciones de los daños existentes, mediante por ejemplo el uso de colores. El resultado sería un mapa de deterioro que puede aportar una visión del conjunto.

### 2.5.3 Inspección detallada

Como ya fue mencionado anteriormente, en algunas situaciones, puede resultar imprescindible llevar a cabo una inspección detallada de la estructura, para contar con una evaluación más completa de la problemática de la misma. Los principales aspectos o plan de trabajo a tener en cuenta en esta etapa son las siguientes:

- selección de zonas para un examen visual detallado, e implementación de un plan de muestreo,
- selección de zonas y técnicas para la realización de ensayos, mediciones, y análisis físico-químicos, en el hormigón, las armaduras y en el medio ambiente circundante.
- ejecución de los ensayos, mediciones, y análisis propuestos.

### 2.5.4 Ensayos tipo sobre el hormigón y las armaduras

Una parte muy importante de la información básica necesaria para poder efectuar un dictamen sobre las causas que han podido determinar la corrosión de las armaduras y su propagación, se obtienen realizando apropiados ensayos sobre las armaduras y el hormigón de la estructura (T. de Rincón et al., [55]). En este sentido, existen diversos tipos de ensayos, que en general permiten la evaluación de dichos materiales. A continuación se mencionan los mismos agrupados según su cometido:

- Evaluación del hormigón y de las armaduras

En este grupo se encuentran los siguientes ensayos sobre el hormigón: resistividad eléctrica, ultrasonido, esclerometría, resistencia a compresión y porosidad, y sobre las armaduras: localización, espesor de recubrimiento, pérdida de diámetro y límite elástico.

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

- Evaluación del estado de contaminación del hormigón

Aquí se reúnen los ensayos de espesor de carbonatación y concentración de ión  $\text{Cl}^-$ . Estos ensayos se describen en las siguientes secciones.

- Evaluación del estado de corrosión de las armaduras

Los ensayos asociados a este grupo son los de: potencial de corrosión, velocidad de corrosión, gravimetría, resistencia de polarización, estudio de respuestas transitorias, impedancia electroquímica y ruido electroquímico. Estos ensayos se describen en las siguientes secciones.

### 2.5.5 Ensayos de evaluación del estado de contaminación del hormigón

Es de interés, detectar el grado de contaminación del hormigón, producido por la presencia de  $\text{CO}_2$  y el ión  $\text{Cl}^-$ , que son los principales agentes contaminantes, causantes de la corrosión de las armaduras.

#### 2.5.5.1 Espesor de carbonatación

El  $\text{CO}_2$  es uno de los agentes contaminantes más comunes del hormigón en medios urbanos e industriales, responsable de desencadenar la corrosión de las armaduras.

El efecto corrosivo del  $\text{CO}_2$ , surge como consecuencia de la reducción de la alcalinidad normal del hormigón, hasta valores que provocan la despasivación de las armaduras (Broomfield, J. P., [22]). El hormigón no contaminado, habitualmente presenta un pH cuyos valores oscilan de 12 a 14, debido principalmente a la presencia de los hidróxidos de calcio, sodio y potasio.

El  $\text{CO}_2$  atmosférico ingresa al hormigón, difundiendo a través del aire contenido en sus poros, y en presencia de la humedad contenida en estos reacciona con los álcalis, neutralizándolos, para formar carbonatos. Este es el mecanismo por el cual, se reduce la alcalinidad del hormigón llegando a valores

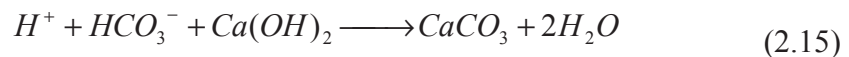
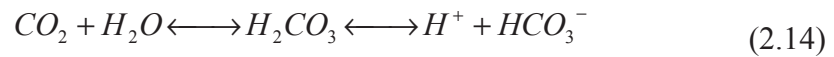


## 2.5. Procedimiento de inspección

---

de pH por debajo de 10.

A continuación, se desarrollan las reacciones químicas que tienen lugar (Irassar, E. F., [39]).



El efecto de reducción de la alcalinidad del hormigón hacia el interior de su masa debido al ingreso del  $CO_2$ , provoca lo que se denomina un frente carbonatado donde se da la transición, con el hormigón interior fuertemente alcalino. Para la detección de este frente carbonatado, se utiliza como solución indicador ácido – base, la fenolftaleína (1g fenolftaleína + 49g alcohol + 50g agua) o la timolftaleína (1g timolftaleína + 99g agua), la cual se aplica sobre la zona del hormigón a estudiar.

La fenolftaleína, es el indicador más utilizado, siendo su rango de viraje de tonalidad de incolora a violeta- rojiza, entre pH 8,2 y 9,8. También, se utiliza la timolftaleína, cuyo viraje de tonalidad de incolora a azul, se produce en el rango de pH 9,3 a 10,5.

Para la determinación práctica de la profundidad de carbonatación (T. de Rincón et al., [55]), en una pieza de hormigón, se extrae una probeta de la misma, que abarque la profundidad que se desea estudiar. Luego se realiza un corte longitudinal en profundidad de la misma, que abarque la cara expuesta, y antes de los 15 minutos, se aplica uniformemente mediante aerosol, la solución indicadora ácido – base.

Antes de los 16 minutos de aplicada la solución, se efectúa la medición de la profundidad de la zona incolora, registrada desde la cara expuesta, incluyendo los máximos y mínimos del frente.

A efectos de documentar el estudio realizado, además de la propia medida

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

en la probeta, se incluyen, como mínimo los siguientes registros: tipo de indicador utilizado, ubicación de extracción del testigo, y una fotografía de la misma.

### 2.5.5.2 Concentración de ión $\text{Cl}^-$

Uno de los agentes, más comunes, responsables de desencadenar la corrosión de las armaduras en las estructuras de hormigón armado, es el ión  $\text{Cl}^-$ . Las principales fuentes del mismo, son el agua de mar, piletas de natación, o sustancias que se incorporan al hormigón como aditivos.

Su dinámica de ingreso, depende de las características físico químicas del hormigón, y del medio ambiente específico donde esté emplazado, dando origen en cada caso, a un perfil o gradiente característico de contaminación del hormigón. Una vez dentro de la masa de hormigón, el ión  $\text{Cl}^-$ , puede combinarse químicamente con otros, o permanecer libre. De allí, surge la denominación de ión  $\text{Cl}^-$  libre o combinado, y al conjunto, totales.

Una vez que el ión  $\text{Cl}^-$  alcanza las armaduras, se provoca la despasivación de las mismas -debido a la rotura de la capa de óxidos protectores- y su posterior corrosión en caso de existir condiciones electroquímicas favorables. Esta forma de corrosión se produce según picaduras en profundidad, que pueden llegar a provocar la rotura de las barras en una zona puntual de las mismas.

En trabajos de varios autores y cuerpos normativos internacionales, vinculados al diseño de estructuras de hormigón armado, se limita el contenido máximo total de ión  $\text{Cl}^-$ , a valores que en relación al peso de cemento, oscilan en torno a 0,4%. Si bien el ión  $\text{Cl}^-$ , que resulta peligroso para la corrosión de las armaduras, es el libre, disuelto en la fase acuosa, por lo general, todas las normas hacen referencia al contenido total de ión  $\text{Cl}^-$ . Esto es así, porque se entiende que los combinados, pueden volver a la disolución, por efectos por ejemplo de la carbonatación. No hay consenso en torno a un único valor, ya que depende de varios factores, entre los cuales, pueden citarse: pH de la solución de poros,

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

humedad, temperatura, tipo de catión que acompaña al  $\text{Cl}^-$ , contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ , finura del cemento, adiciones, relación  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ , etc..

Algunos autores, a efectos del diseño de hormigones, consideran como valor límite de concentración de ión  $\text{Cl}^-$  que provoca la rotura de la capa pasiva y da comienzo a la corrosión, 0,4% (en relación al peso de cemento), y como contenido crítico, para el cual la corrosión, se ha propagado lo suficiente, y originado la fisuración, 1% (en relación al peso de cemento) (Costa, A. et al., [23]).

A los efectos del control de la corrosión de las armaduras, es de interés determinar si a la profundidad de las mismas, la concentración con el ión  $\text{Cl}^-$ , ha alcanzado los valores que disparan el fenómeno.

Para la determinación práctica del perfil de concentración por contaminación del hormigón con el ión  $\text{Cl}^-$ , se requiere la extracción de muestras de hormigón a diferentes profundidades desde la superficie expuesta, a las cuales se les realiza un análisis de contenido de ión  $\text{Cl}^-$ . Cuanto menor sea el intervalo de profundidad entre los puntos de análisis, mayor continuidad tendrá el perfil de concentración que se obtenga.

Finalmente los resultados de concentración obtenidos, pueden expresarse como una relación porcentual entre el peso de ión  $\text{Cl}^-$  y el de la respectiva muestra de hormigón donde se halló. Si se conoce la dosificación del hormigón, la concentración hallada puede referirse al peso de cemento de la muestra.

El análisis de la tipología de la curva de contaminación con  $\text{Cl}^-$  obtenida, permite analizar, si la contaminación del hormigón provino del exterior o fue incorporada durante su elaboración. También adoptando la segunda ley de Fick, como modelo matemático, de difusión del ión  $\text{Cl}^-$  en el hormigón (Costa, A. et al., [23]), es posible realizar estimaciones de durabilidad, calculando cual sería la concentración de éstos a nivel de las armaduras, en un instante de tiempo dado, para cotejarlo por ejemplo con los valores límite recomendados por las normas.

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

Existen varias técnicas experimentales que permiten determinar el contenido de iones  $\text{Cl}^-$  libre y totales en el hormigón, entre ellas: químico analíticas, SEM, EDX y XRD. En las siguientes secciones se describen estas técnicas. El resultado así obtenido, puede referirse al peso total de la muestra o al de cemento.

### 2.5.5.2.1 Extracción de muestras

Básicamente, existen dos técnicas de extracción de muestras: una consiste en extraer probetas cilíndricas, en profundidad, que abarquen la zona del hormigón que se desea estudiar, y la otra, en extraer directamente muestras de polvo de hormigón, mediante mecha de widia, a diferentes profundidades, en el rango que se desea estudiar.

En el caso de la extracción de una probeta cilíndrica, ésta se subdivide en tajadas paralelas a la superficie expuesta, para luego, realizarle a cada una de estas el análisis de contenido de cloruros. El espesor de estas tajadas, puede variar entre 1 mm a 1 cm, dependiendo del grado de precisión que se desee obtener en la curva de contaminación. Luego, estas tajadas son molidas hasta grado de polvo para poderle realizar la determinación del contenido de ión  $\text{Cl}^-$ .

Para la extracción directa de muestras de polvo de la estructura, se realizan perforaciones con una mecha de widia, en intervalos de profundidad, acordes al grado de precisión que se requiera para la obtención del gradiente de contaminación. El polvo resultante de cada intervalo de perforación, constituye la muestra que se utiliza para analizar el contenido de ión  $\text{Cl}^-$ .

Cuanto menor sea el intervalo, en profundidad de extracción de las muestras, mayor continuidad tendrá la curva con el gradiente de concentración de ión  $\text{Cl}^-$  que se obtenga.

Existen varias técnicas químico analíticas para obtener la concentración de ión  $\text{Cl}^-$  en la muestra de polvo de hormigón. Estas técnicas requieren que

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

previamente se realice la disolución de los cloruros contenido en la muestra. Este proceso, es de carácter destructivo.

### 2.5.5.2.2 Determinación del contenido de ión $\text{Cl}^-$

La determinación del contenido de cloruro libres o totales, depende del procedimiento de disolución de los cloruros que se siga. Luego el contenido de los cloruros combinados, se calcula por diferencia entre los otros.

El hormigón, es un material compuesto por pasta de cemento constituida principalmente por compuestos básicos hidratados como el hidróxido cálcico y silicatos y aluminatos cálcicos que son solubles en ácidos. En base a este aspecto, para la obtención de los cloruros totales, se ataca la muestra de polvo con ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) en caliente, que permite su disolución prácticamente de forma completa. Posteriormente se filtra la solución, y se realiza el análisis del contenido de ión  $\text{Cl}^-$ .

La extracción de los cloruros libres o solubles en agua (T. de Rincón et al., [55]), se realiza mediante el lixiviado de la muestra sólida, en agua destilada, o una solución alcalina que simula el electrolito interno de los poros. Se asume que esta técnica no afecta a los ión  $\text{Cl}^-$  ligados en la fase sólida del hormigón. La muestra de hormigón a utilizar puede estar en polvo o granulada. Posteriormente se filtra la solución, y se realiza el análisis del contenido de ión  $\text{Cl}^-$ .

También existe otra técnica de extracción de los cloruros libres, denominada “pore pressing”. La misma consiste en extraer directamente los cloruros disueltos en la estructura de poros del hormigón, mediante un proceso de exudación inducido por la aplicación de grandes presiones a la muestra. Luego se realiza el análisis del contenido de ión  $\text{Cl}^-$ .

La determinación del contenido de ión  $\text{Cl}^-$  en las disoluciones, es posible realizarla mediante diversas técnicas químico – analíticas. Las principales son el método de Volhard, la valoración potenciométrica y la potenciometría directa.

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

Otras técnicas que permiten la detección del ión  $\text{Cl}^-$  en el hormigón, son: SEM, EDX y XRD. A continuación, se describen dichas técnicas.

### ***Método de Volhard:***

Este método de valoración por retroceso, consiste básicamente en agregar un exceso de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ), de concentración conocida, que precipita el ión  $\text{Cl}^-$ . Finalmente el exceso de  $\text{AgNO}_3$  es valorado contra tiosianato de amonio ( $\text{NH}_4\text{SCN}$ ), lo que permite hallar por diferencia el consumo en la precipitación de ión  $\text{Cl}^-$  y por ende su concentración. Se realiza una valoración colorimétrica, utilizando  $\text{Fe}^{3+}$  como indicador, que forma un complejo coloreado con el  $\text{SCN}^-$ .

### ***Valoración potenciométrica:***

La disolución a analizar, se valora con nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ), donde precipita el ión  $\text{Cl}^-$  con la  $\text{Ag}^+$ , de acuerdo a la siguiente reacción:



La valoración, se sigue potenciométricamente con un electrodo iónico selectivo (ISE), de  $\text{Ag}^+$  o  $\text{Cl}^-$ . Se registra el potencial leído frente al volumen añadido de  $\text{AgNO}_3$ . El punto de inflexión de la curva obtenida, corresponde con el volumen estequiométrico de  $\text{AgNO}_3$ . Para determinarlo, se deriva la curva respecto al volumen añadido de  $\text{AgNO}_3$ . El máximo de esta curva corresponde con el volumen buscado. A esta manera de determinar el punto de equivalencia, se le conoce como método de la primera derivada.

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

### ***Potenciometría directa:***

Con este método, la concentración de ión  $\text{Cl}^-$  de una disolución, se determina de forma directa a partir del potencial leído con electrodo selectivo de ión  $\text{Cl}^-$ . El potencial de dicho electrodo es medido respecto a un electrodo de referencia. Puede asumirse que dicho potencial varía linealmente con el logaritmo de la concentración de ión  $\text{Cl}^-$ . Este método requiere la calibración de la lectura del potencial en función de la concentración de ión  $\text{Cl}^-$ , mediante la utilización de muestras patrón. En la expresión final que se llega para la determinación de la concentración de ión  $\text{Cl}^-$ , el potencial participa en una exponencial. De aquí que un pequeño error en su determinación, provoca una variación muy grande en la concentración de ión  $\text{Cl}^-$ .

Es un método muy sencillo de aplicar que permite realizar medidas en campo.

### ***Técnicas SEM, EDX y XRD:***

Otras técnicas para la detección de la contaminación del hormigón con el ión  $\text{Cl}^-$  son la microscopía electrónica de barrido (SEM), en conjunción con un microanálisis por sonda de espectrometría de difracción de rayos X (EDX), en los modos de electrones retrodispersados y electrones secundarios; y también la difracción por rayos X (XRD).

La difracción de rayos X es una de las técnicas más poderosas para el análisis cualitativo y cuantitativo de fases sólidas cristalinas, tanto orgánicas como inorgánicas, en muestras de polvo, capas finas o cristales, de gran cantidad de materiales como pueden ser minerales, rocas, sedimentos, metales, aleaciones, plásticos, materiales de construcción, productos químicos, entre otros.

A su vez, la técnica de microscopía electrónica de barrido, permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, entregando información morfológica del material analizado. A partir de esta

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

técnica se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para examinar muchas de sus características, pudiéndose realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de diversos materiales, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas (Méndez Menéndez, [44]), (Melgarejo et al., [43]).

La técnica XRD, requiere una fina molienda de las muestras a analizar, mientras que para la técnica EDX, pueden utilizarse muestras pulverulentas o trozos del material fracturado.

### 2.5.6 Ensayos de evaluación del estado de corrosión de las armaduras

Existen diversas técnicas y ensayos, que permiten evaluar si las armaduras están en una situación de pasividad o corrosión, y cual es la dinámica de su avance.

#### 2.5.6.1 Potencial de corrosión

La medida del potencial de corrosión, es una técnica de ensayo no destructiva, que aporta información principalmente cualitativa, que sirve para complementar otras técnicas de ensayo.

De acuerdo a esta técnica, se determina la diferencia de potencial eléctrico que existe entre el acero de las armaduras, y un electrodo de referencia que se coloca en contacto con el hormigón de recubrimiento, en la zona a estudiar.

Los electrodos de referencia, basan su funcionamiento en reacciones reversibles, con lo cual mantienen su potencial constante, oficiando de patrón. En la práctica, para la medida del potencial eléctrico de un metal, los electrodos de referencia o patrones comúnmente usados, son el de calomelanos ( basado en la reacción  $\text{Hg} / \text{Hg}_2\text{Cl}_2 / \text{KCl}$ ), el de cobre / sulfato de cobre ( $\text{Cu} / \text{CuSO}_4$ ) y el de plata cloruro de plata ( $\text{Ag} / \text{AgCl}$  ). En la Figura 2.5, Figura 2.6 y la Figura 2.7, se muestran los diagramas de estos electrodos.



## 2.5. Procedimiento de inspección

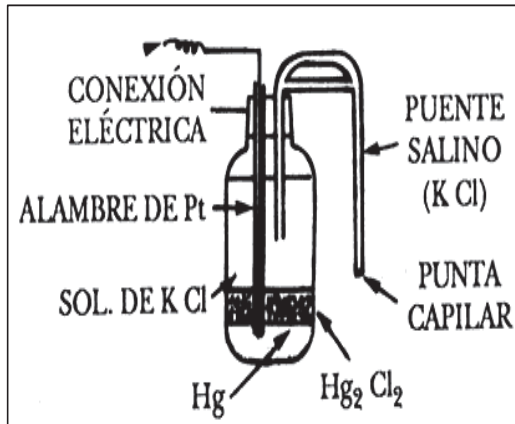


Figura 2.5. Diagrama del electrodo de calomelanos (Hg / Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> / KCl). Tomado de (Andrade et al., [17]).

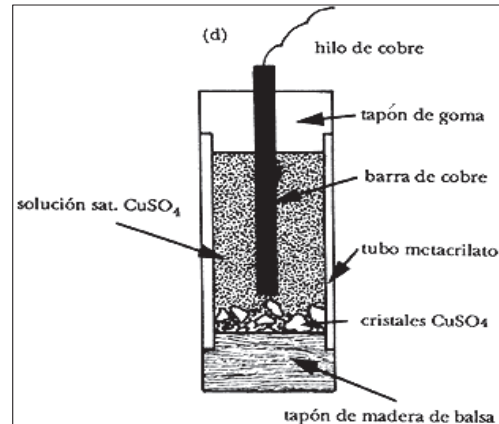


Figura 2.6. Diagrama del electrodo de cobre sulfato de cobre (Cu / CuSO<sub>4</sub>). Tomado de (Andrade et al., [17]).

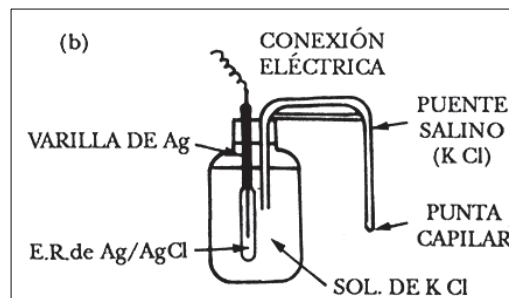


Figura 2.7. Diagrama del electrodo de plata cloruro de plata (Ag / AgCl). Tomado de (Andrade et al., [17]).

Esta medida, depende de varios factores, entre ellos: contenido de oxígeno y humedad del hormigón, espesor de recubrimiento, presencia de fisuras o grietas, corrientes erráticas, etc.

El efecto de la sequedad o la humedad, hace que los potenciales medidos, difieran en unos 100 o 200 mV del valor que corresponde. En el caso de un hormigón húmedo, los valores tienden a ser más negativos.

Con respecto a la disponibilidad de oxígeno a nivel de las armaduras, en el caso que sea escasa, los potenciales serán más negativos que cuando hay buena

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

oxigenación.

La elevada resistividad del hormigón, especialmente cuando este tiene un bajo grado de humedad, hace que el potencial medido con un electrodo sobre el hormigón difiera al que pudiera medirse con una sonda a nivel de la armadura. Esta hace que un mismo grado de corrosión de la armadura arroje diferentes valores de potencial, para diferentes espesores de recubrimiento.

Por estos motivos, es que no se pueden extraer conclusiones exactas, sino sólo sobre la probabilidad que la corrosión exista (Feliu et al., [28]).

Para estudiar el potencial de una zona extensa del hormigón, con presencia de armaduras, se recomienda realizar una retícula, que servirá de base para el levantamiento de las medidas, y posterior confección de mapas de potencial. Estos mapas permiten detectar las zonas con problema de corrosión.

Para realizar la medida de potencial, se recomienda humedecer 15 a 30 minutos antes la superficie de hormigón con una mezcla de agua potable con detergente. Luego se debe descubrir en un punto la armadura a estudiar, para conectar el borne positivo del multímetro a la misma, y el otro al electrodo de referencia que puede ser por ejemplo de calomelanos saturado (ECS), o de cobre sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>).

Finalmente se pone en contacto el electrodo con el hormigón, mediante una esponja o papel de filtro para no dañar el electrodo.

Como criterio de valoración de los resultados, existen varias normas, entre ellas, se puede citar la ASTM C 876 (ASTM, [3]) que establece los siguientes rangos de probabilidad de corrosión, en función del potencial medido con un electrodo de Cu / CuSO<sub>4</sub>:

- $E_{\text{corr.}} < - 350 \text{ mV}$  ( 90% de probabilidad que exista corrosión )
- $-350 < E_{\text{corr.}} < - 200 \text{ mV}$  ( no es posible asegurar que exista corrosión )
- $E_{\text{corr.}} > - 200 \text{ mV}$  ( 90% de probabilidad que no exista corrosión )

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

A continuación, en la Figura 2.8 se muestra un esquema del montaje y conexiones para la medida.

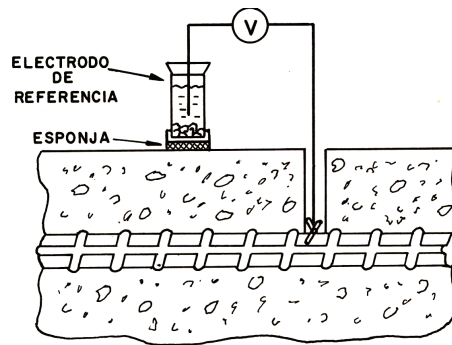


Figura 2.8. Esquema del ensayo de medida del potencial de corrosión. Tomado de (Feliu et al., [28]).

### 2.5.6.2 Velocidad de corrosión

En términos generales, la velocidad de corrosión, es la magnitud con la cual se registra la pérdida de masa por unidad de tiempo de una porción pieza de acero, debido a su corrosión. Las unidades de medida de esta magnitud, en casos de corrosión superficial uniforme, pueden estar referidas a la pérdida de masa o de espesor en la zona afectada. De este modo las unidades de medida resultan ser respectivamente:  $\text{gr.} / \text{cm}^2 \cdot \text{año}$  o  $\text{mm} / \text{año}$ . En el caso de corrosión electroquímica uniforme, la unidad de medida de esta magnitud puede estar referida a la corriente eléctrica originada por la carga eléctrica liberada durante la pérdida de metal en dicho fenómeno (corriente de corrosión). De este modo la unidad de medida resulta ser  $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ , (densidad superficial de corriente de corrosión) que mediante la aplicación de la ley de Faraday, puede convertirse en  $\text{mm} / \text{año}$ .

Para medir la velocidad de corrosión, existen varias técnicas, entre ellas:

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

- gravimetría,
- resistencia de polarización,
- respuestas transitorias a pulsos de corriente o de potencial eléctrico,
- espectroscopia de impedancia electroquímica
- ruido electroquímico

### 2.5.6.2.1 Gravimetría

Esta técnica consiste en medir la pérdida de masa que sufre una pieza de acero debido a un proceso de corrosión. Para la realización de esta técnica, se requiere acceder físicamente a la pieza de acero y remover los productos de la oxidación. Este procedimiento, la convierte en una técnica destructiva, como por ejemplo, en el caso del hormigón armado, por lo cual no resulta conveniente para aplicaciones en campo.

Es una técnica muy precisa en laboratorio, que resulta de gran utilidad para corroborar resultados obtenidos por otras técnicas. También hay que observar que permite obtener valores promedio a lo largo de un cierto intervalo de tiempo, no es posible obtener valores instantáneos.

### 2.5.6.2.2 Resistencia de polarización

Esta técnica, consiste en estudiar el comportamiento del potencial electroquímico de una pieza de metal, en equilibrio, en una situación de corrosión, bajo la aplicación de un campo eléctrico, mediante un electrodo externo. Dicho campo, no debe causar una variación del potencial electroquímico de equilibrio ( $E_0 = E_{\text{corr.}}$ ) de la pieza, polarización, mayor de  $\pm 20\text{mV}$ , para que no se perturbe su situación.

El procedimiento a seguir para la obtención de la resistencia de

## 2.5. Procedimiento de inspección

polarización ( $R_p$ ), consiste en aplicar a la celda de estudio, una variación lineal de potencial, en el tiempo, de tal forma de variar  $E_{corr.}$  en un rango de  $\pm 20\text{mV}$ . Luego, se registra la respuesta del potencial electroquímico ( $E$ ) de la pieza en función de la intensidad de corriente ( $I$ ) que circula por la celda (ver Figura 2.9). Obtenida esta curva, se observa que en un entorno del potencial de corrosión, ( $E_{corr.}$ ), la misma tiene un andamio recto. Este comportamiento, se asemeja al de una resistencia eléctrica, como en la ley de Ohm. A su vez dicha curva, refleja el comportamiento a la polarización del metal. Por todo esto, la pendiente de la curva  $E$  vs.  $I$ , se le denomina resistencia de polarización ( $R_p$ ), y tiene la siguiente expresión:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \text{ cuando } \Delta E \rightarrow 0, \text{ en } E = E_{corr.} \quad (2.17)$$

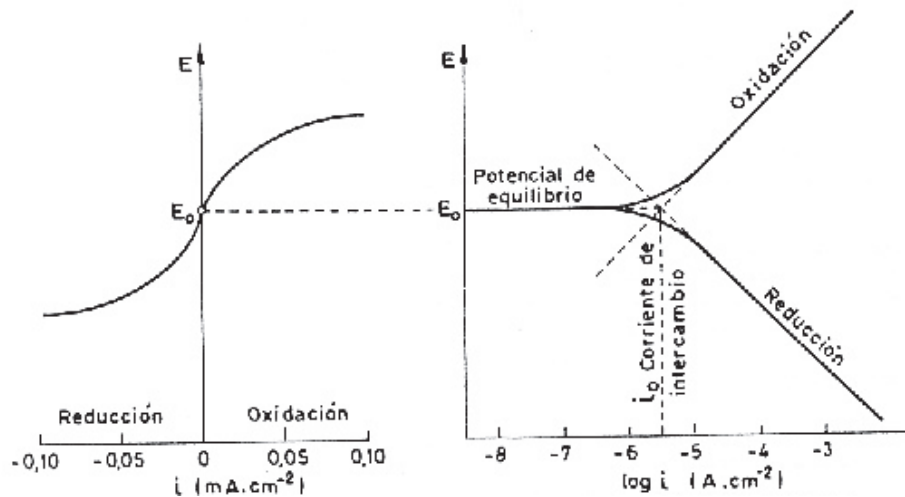


Figura 2.9. Diagrama de Evans. Curva de polarización de un electrodo. Gráficos con ejes de abscisas en coordenadas aritmética y logarítmica. Tomado de (Pourbaix, M., [48]).

Por otro lado, cuando se aplica un potencial a la celda, se rompe el potencial de equilibrio de la pieza, y surge una corriente instrumental ( $I$ ), que es posible medir. Dicha corriente, puede expresarse como la superposición de las corrientes parciales, correspondientes a las zonas anódicas ( $I_a$ ) y catódicas ( $I_c$ ) de

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

la pieza de estudio, vinculadas a su vez a la intensidad de corriente de corrosión ( $I_{corr.}$ ), que se desea hallar. Así, la expresión resultante es la siguiente (Fernández, [30]):

$$I = I_a + I_c = I_{corr.} \left[ e^{\left(\frac{\alpha n F}{R.T} \eta\right)} - e^{\left(\frac{-\beta n F}{R.T} \eta\right)} \right] \quad (2.18)$$

Siendo:

- $I$  - intensidad de corriente que circula en la celda,
- $I_a$  - intensidad de corriente en la zona anódica de la pieza de estudio,
- $I_c$  - intensidad de corriente en la zona catódica de la pieza de estudio,
- $I_{corr}$  - intensidad de corriente de corrosión.
- $\alpha$  y  $\beta$  - coeficientes relacionados con la caída de potencial en la doble capa que rodea el electrodo,
- $n$  - cambio de valencia en los procesos redox,
- $F$  - constante de Faraday,
- $\eta$  - polarización aplicada ( $E - E_{corr}$ ),
- $R$  - constante de los gases perfectos,
- $T$  - temperatura absoluta,

Considerando variaciones diferenciales de polarización ( $d\eta$ ) en el entorno de  $E=E_{corr.}$ , la expresión de la intensidad de corriente instrumental en la celda, adquiere la siguiente expresión (Andrade, C, [18]):

$$dI = I_{corr.} \left( \frac{\alpha n F}{R.T} + \frac{\beta n F}{R.T} \right) d\eta \quad (2.18)$$

A partir de esta última ecuación, es posible despejar la intensidad de corriente de corrosión en la pieza, resultando la siguiente expresión:

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

$$I_{corr} = \frac{1}{\left(\frac{\alpha n F}{RT} + \frac{\beta n F}{RT}\right)} \cdot \frac{dI}{d\eta} \quad (2.19)$$

Recordando la expresión de  $R_p$ , como  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $F$ ,  $R$  y  $T$  son constantes, si se define una constante  $B$ , es posible reescribir la expresión anterior del siguiente modo (ecuación de Stern y Geary (Andrade et al., [15]):

$$I_{corr} = B \cdot \frac{dI}{d\eta} = \frac{B}{R_p} \quad (2.20)$$

Siendo:

$B$  - Constante de Stern

$B$  es una constante que Stern comprobó, varía de 13 a 52 mV (Andrade et al., [17]), para la casi totalidad de los procesos de corrosión conocidos. Esta constante, esta relacionada con las características electroquímicas del acero embebido en el hormigón, y responde a las curvas de polarización del metal (Stern et al., [54]) . En el caso particular del acero embebido en el hormigón, se encontró un valor de 26mV, para los casos de corrosión activa, y de 52 mV para aceros pasivos (Andrade et al., [13]). El valor exacto de  $B$ , debe ser hallado contrastando las técnicas electroquímicas con las de gravimetría.

Ante el desconocimiento del valor exacto de  $B$ , tomar un valor de  $B=26\text{mV}$ , representa un error máximo del 100%, muy pequeño, en comparación con el error de los valores de intensidad de corriente de corrosión, de varios órdenes superior en los procesos reales de corrosión.

Para la aplicación de esta técnica, hay que compensar la caída óhmica del potencial electroquímico medido, debido a la elevada resistencia eléctrica del hormigón. También, en los registros de potencial versus corriente, hay que

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

corroborar el cumplimiento de una relación lineal. Muchos resultados experimentales han permitido corroborar que con la aplicación de velocidades de polarización de 2,5 a 10 mV/min., se alcanzan dichos objetivos.

En el caso del hormigón armado, esta técnica ha sido aplicada por primera vez, a principios de los 70 (Andrade, C, [18]) citado en (Andrade et al., [13]).

### 2.5.6.2.3 Estudio de respuestas transitorias

Esta técnica surge del estudio de la respuesta transitoria en intensidad de corriente o en potencial eléctrico, en el dominio del tiempo, de una celda de corrosión, cuando la pieza de estudio, es sometida mediante un contra electrodo a un pulso de potencial o de intensidad de corriente.

Se admite que el circuito de Randle (ver Figura 2.10), es un modelo que aproxima razonablemente el comportamiento eléctrico de una celda de corrosión (Luping, [42]). En el caso de la corrosión de las armaduras en el hormigón, en dicho circuito,  $R_{\Omega}$ , representa la resistencia eléctrica del electrolito (hormigón),  $R_p$ , la resistencia de polarización de la pieza de estudio (acero de las barras) y  $C_{dl}$  la capacitancia debida a la doble capa originada por la polarización de la pieza.

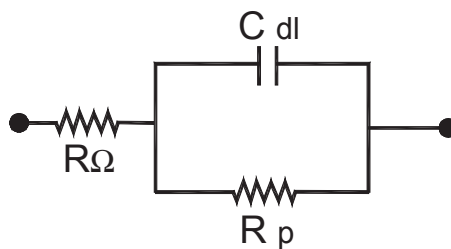


Figura 2.10. Circuito de Randle.

En la Figura 2.11 y la Figura 2.12 se observan las curvas típicas de respuesta de este circuito ante la aplicación de un escalón de potencial eléctrico  $\Delta E_p$  (salto potencioestático), o de intensidad de corriente  $\Delta I_p$  (salto galvanostático), en cada caso.



## 2.5. Procedimiento de inspección

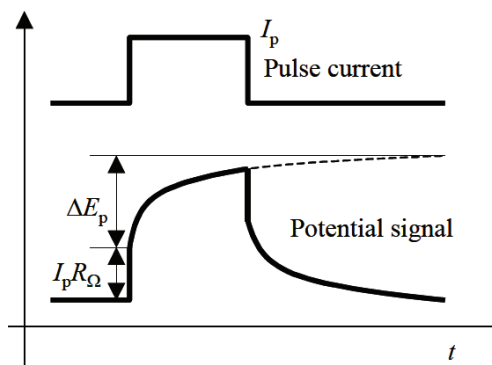


Figura 2.11. Respuesta transitoria en potencial eléctrico  $E$ , ante un pulso de intensidad de corriente constante  $I_p$ . Tomado de (Luping, [42]).

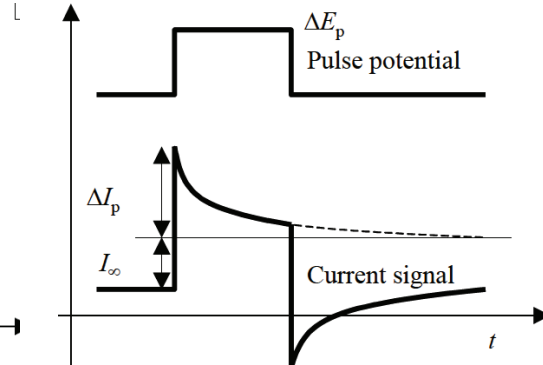


Figura 2.12. Respuesta transitoria en intensidad de corriente  $I_t$ , ante un pulso de potencial eléctrico  $\Delta E_p$  constante. Tomado de (Luping, [42]).

La respuesta en el tiempo del potencial eléctrico total de este circuito, que corresponde al potencial electroquímico  $E$  de la pieza, cuando se le aplica un escalón de intensidad de corriente  $I_p$  constante, queda representado por la siguiente ecuación (Song et al., [53]):

$$E(t) = I_p \cdot \left[ R_p \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_p \cdot C_{dl}}} \right) + R_\Omega \right] = \Delta E_p + I_p \cdot R_\Omega \quad (2.21)$$

Siendo:

$E(t)$  - potencial electroquímico de la pieza en el instante  $t$ ,

$t$  - tiempo,

$I_p$  - intensidad de corriente aplicada a la celda,

$R_p$  - resistencia de polarización de la pieza,

$C_{dl}$  - capacitancia de la doble capa originada por la polarización de la pieza,

$R_\Omega$  - resistencia eléctrica del hormigón,

$\Delta E_p$  - incremento de potencial electroquímico debido a la polarización de la pieza.

## 2.5. Procedimiento de inspección

A continuación en la Figura 2.13, se representa el andamio de esta última ecuación .

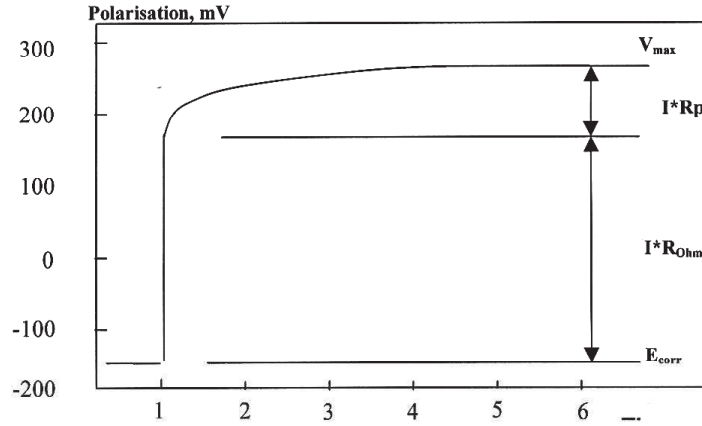


Figura 2.13. Descomposición de la respuesta en potencial  $E$  ante un impulso constante de corriente  $I_p$ . Tomado de (Song et al., [53]).

La expresión lineal de la ecuación (2.21), es la siguiente (Song et al., [53]):

$$L_n[E_{m\acute{a}x.} - E(t)] = L_n(I_p \cdot R_p) - \frac{t}{(R_p \cdot C_{dl})} \quad (2.22)$$

Siendo:

$E_{m\acute{a}x.}$  - potencial electroquímico máximo de la pieza cuando  $t \rightarrow \infty$ ,

Luego para obtener los valores de  $R_{\Omega}$ ,  $C_{dl}$  y  $R_p$ , se evalúa esta última expresión en  $t=0$ .  $E_{m\acute{a}x.}$  es un valor obtenido experimentalmente luego de finalizado el período de estabilización, y  $E(t=0)$ , es posible hallarlo a partir de extrapolar la respuesta lineal, obtenida a partir de la técnica de regresión lineal. Evaluando la ecuación anterior en  $t=0$  resulta :

$$L_n[E_{m\acute{a}x.} - E(0)] = L_n(I_p \cdot R_p) \quad (2.23)$$

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

A partir de la ecuación (2.23), es posible obtener el valor de  $R_p$ .

Luego, mediante la ecuación (2.20) de Stern y Geary, es posible calcular  $I_{corr}$  del siguiente modo:

$$I_{corr.} = \frac{B}{R_p} \quad (2.24)$$

En el caso particular del acero embebido en el hormigón, se encontró un valor de B de 26mV, para los casos de corrosión activa, y de 52mV para aceros pasivos (Andrade et al., [13]).

En el caso que a la celda de corrosión, se aplique un escalón de potencial  $\Delta E_p$ , la respuesta en corriente total  $I$  que surge del circuito de Randle, tiene la siguiente expresión (Luping, [42]):

$$I(t) = I_\infty + \Delta I_p = \frac{\Delta E_p}{(R_p + R_\Omega)} + K_t \cdot e^{-\frac{t}{R_p \cdot C_{dl}}} \quad (2.25)$$

Siendo:

- $I(t)$  - intensidad total de corriente en la celda en el instante  $t$ ,
- $I_\infty$  - intensidad de corriente en la celda cuando  $t \rightarrow \infty$ ,
- $\Delta I_p$  - incremento de intensidad de corriente en la celda debido a la polarización de la pieza,
- $K_t$  - amplitud de la respuesta transitoria.

Luego, de forma análoga, se puede calcular  $R_p$ , y finalmente mediante la ecuación de Stern – Geary, se calcula  $I_{corr}$

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

### 2.5.6.2.4 Impedancia electroquímica

La espectroscopia de impedancia electroquímica, se basa en la aplicación mediante un contra electrodo, de una señal alterna al electrodo activo de la celda de corrosión. La señal inyectada, en potencial o corriente a través de un potenciostato, es tal que provoca variaciones ( $\Delta E$ ) en el potencial de corrosión del electrodo de trabajo, en el orden de 10 a 20 mV. Esta señal se aplica, barriendo un amplio campo de frecuencias. Luego, la respuesta en corriente ( $\Delta I$ ) en la celda para cada frecuencia, resulta otra señal sinusoidal, con diferente amplitud, y fase que la original (Andrade et al., [13]).

La impedancia del sistema es:

$$Z = \Delta E / \Delta I \quad (2.26)$$

Asumiendo que el comportamiento eléctrico de la celda de corrosión, se asemeja al del circuito de Randle, la impedancia eléctrica del sistema  $Z$ , se puede representar mediante la siguiente expresión (Andrade et al., [13]):

$$Z = R_{\Omega} + \frac{R_p}{(1 + \bar{j} \cdot \omega \cdot C_{dl} \cdot R_p)} \quad (2.27)$$

Siendo:

$Z$  - impedancia eléctrica del sistema,

$\bar{j}$  - unidad imaginaria,

$f$  - frecuencia,

$\omega$  - frecuencia angular ( $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ).

La impedancia  $Z$ , depende de la frecuencia, entonces asumiendo constantes los demás parámetros de la ecuación, al calcular  $Z$  para valores de frecuencia  $\omega$

## 2.5. Procedimiento de inspección

comprendidos entre 0 a  $\infty$ , se obtienen resultados, cuyos valores pueden ser representados en los comúnmente llamados diagramas de Nyquist y de Bode. A continuación en la Figura 2.14 y la Figura 2.15 se muestran como ejemplo, los gráficos obtenidos para un caso teórico particular. A partir de estos gráficos, se observa, que es posible determinar los valores de  $R_{\Omega}$  y  $R_p$ , en correspondencia con los extremos de bajas y altas frecuencias (Andrade et al., [13]).

El parámetro  $C_{dl}$  tiene la siguiente expresión (Song et al., [53]):

$$C_{dl} = \frac{1}{(2.\pi.R_p.f_o)} \quad (2.28)$$

Siendo:

$f_o$  - frecuencia correspondiente al punto más alto del semicírculo del diagrama de Nyquist (ver Figura 2.14).

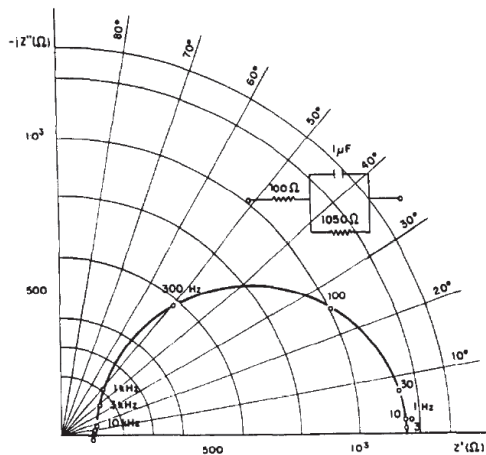


Figura 2.14. Diagrama de Nyquist. Representación de impedancias en el plano complejo. Tomado de (Andrade et al., [13])

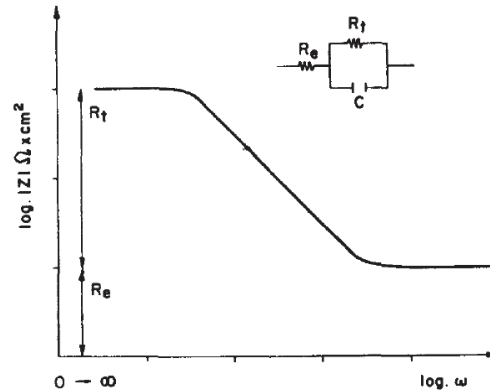


Figura 2.15. Diagrama de Bode. Módulo de impedancia vs. frecuencia. Tomado de (Andrade et al., [13])

Una vez hallado  $R_p$ , es posible calcular  $I_{corr}$ . a partir de la ecuación de Stern y Geary.

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

En la práctica, estas curvas, se obtienen parcialmente, o de forma distorsionada, difícilmente son obtenidas en forma completa (Andrade et al., [13]). Esto es debido a que el comportamiento eléctrico de la celda no se ajusta de forma exacta al circuito de Randle. Se obtienen varios semicírculos superpuestos debido a que el comportamiento real del sistema, corresponde a varios circuitos RC en paralelo, que responden a los diversos efectos de capa en el electrodo de estudio (Song et al., [53]).

La desventaja de esta técnica para obtener la  $R_p$ , frente a las de corriente directa, es que insume mucho tiempo, especialmente para los ensayos con bajas frecuencias. Se requieren equipos muy sofisticados, ya que deben incluir o sino conjugar un generador de frecuencias, un potenciostato y un analizador de frecuencias.

Uno de los aspectos favorables, de esta técnica, es su carácter no destructivo, ya que introduce a la pieza de estudio una polarización del orden de 10 a 20 mV.

Un complemento relativamente nuevo a esta técnica, es el análisis armónico de las señales obtenidas, que constituye un camino más rápido y directo para la obtención de los resultados.

Esta técnica, se refiere a la aplicación de una perturbación al electrodo de trabajo, consistente en un potencial eléctrico alterno  $\tilde{E}$ , del orden de 10 mV, con una única frecuencia, y la correspondiente medición de la amplitud de la intensidad de corriente correspondiente a la frecuencia fundamental  $I_f$  y la de sus primeros dos armónicos,  $I_{2f}$  e  $I_{3f}$ . Luego se llega a que la velocidad de corrosión es posible calcularla mediante la siguiente expresión (Song et al., [53]):

$$I_{corr.} = \frac{I_f^2}{\sqrt{48} \cdot \sqrt{(2 \cdot I_f \cdot I_{3f} - I_{2f}^2)}} \quad (2.29)$$

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

Siendo:

$I_f$  - intensidad de corriente en la celda, amplitud de la frecuencia fundamental,

$I_{2f}$  - intensidad de corriente en la celda, amplitud del segundo armónico,

$I_{3f}$  - intensidad de corriente en la celda, amplitud del tercer armónico.

También se obtiene como resultado la siguiente expresión de las constantes de Tafel (Song et al., [53]):

$$\frac{1}{\beta_a} \text{ o } \frac{1}{\beta_c} = \frac{1}{2 \cdot \tilde{E} \left( \frac{I_f}{I_{corr.}} + \frac{4 \cdot I_{2f}}{I_f} \right)} \quad (2.30)$$

Siendo:

$\beta_a, \beta_c$  - constantes de Tafel,

$\tilde{E}$  - potencial eléctrico alterno aplicado a la pieza.

Luego, conociendo el valor de las constantes de Tafel es posible calcular el valor B de la ecuación de Stern y Geary, según la siguiente expresión (Stern et al., [54]):

$$B = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,3 \cdot (\beta_a + \beta_c)} \quad (2.31)$$

Esta técnica, tiene como ventaja, que es rápida, y que permite el cálculo de las constantes de Tafel, directamente del sistema bajo estudio.

Al igual que en otras técnicas basadas en la polarización lineal, esta se basa en la consideración, que el fenómeno de corrosión se desarrolla en forma uniforme.

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

### 2.5.6.2.5 Ruido electroquímico

Sin entrar en un desarrollo en profundidad de esta técnica, en términos generales se basa en el análisis del registro de las variaciones de potencial o corriente de muy baja amplitud, originadas por la corrosión, en torno al potencial de corrosión.

Este comportamiento, fue especialmente observado en estudios de corrosión por picaduras (Andrade et al., [13]).

Una vez realizados dichos registros, con equipos muy sensibles y precisos, se convierten las señales del dominio del tiempo, al de las frecuencias, mediante la transformada de Fourier. En la Figura 2.16 puede observarse un ejemplo de este

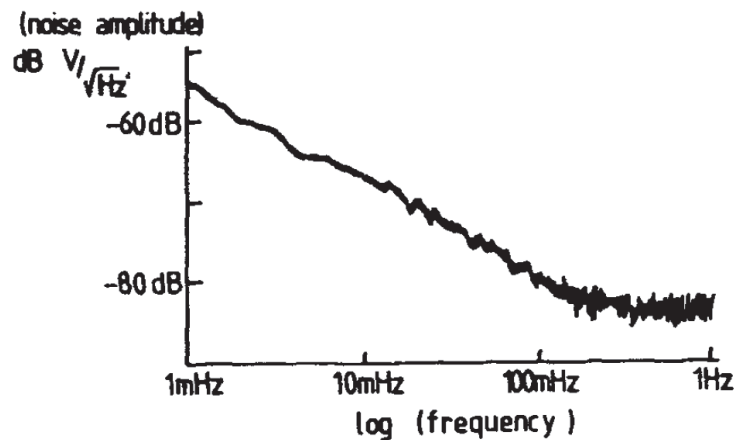


Figura 2.16. Espectro de ruido electroquímico de una barra de acero inmersa en hormigón. Tomado de (Andrade et al., [13])

tipo de registros.

Existe una correspondencia entre la desviación del ruido del potencial y la velocidad de corrosión (Song et al., [52]).

Uno de los aspectos destacables de esta técnica, es que no produce ninguna



## 2.5. Procedimiento de inspección

---

perturbación al sistema, ya que sólo se reduce al registro de los parámetros de potencial y corriente asociados al propio proceso, sin necesidad de aplicar excitaciones eléctricas externas (Song et al., [53]).

## 2.5. Procedimiento de inspección

---

# Capítulo 3

## Estudio experimental

El estudio se desarrolló sobre la base de ejemplares prismáticos de hormigón de 15 cm x 15 cm x 30 cm, con y sin armaduras, con dos tipos de relación  $a/c$ : 0,45 y 0,65, y recubrimiento de las armaduras de 1,5, 2,0 y 3,0 cm, habitualmente utilizados en obras edilicias convencionales (DURACON, [26]), los cuales fueron expuestos a un ambiente urbano y otro marino. Las armaduras fueron dispuestas sobre los paramentos o caras laterales de las probetas, cuya orientación se eligió de tal forma que resulte una expuesta a los vientos dominantes, y la otra resguardada a éstos. Se entiende por dirección de viento dominante, a aquella que corresponde al promedio de las direcciones en que incide, ponderadas según la permanencia de las mismas. El propósito de esto fue valorar una posible diferencia de comportamiento entre la cara expuesta y la resguardada a los vientos dominantes. Los valores de la relación  $a/c$  considerados, corresponden a los extremos de un rango comúnmente utilizado en estructuras convencionales de hormigón armado.

Para el estudio de las probetas se tomó registro de los principales parámetros que inciden en el fenómeno, entre ellos:

- características físico-químicas del hormigón utilizado,
- condiciones climático - ambientales del lugar de exposición de los ejemplares (temperatura, insolación, precipitación, humedad, régimen de

### 3. Estudio experimental

---

viento y tiempo de humectación),

- contenido de ión  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$  en la atmósfera,
- contenido de las principales sustancias contaminantes (ión  $\text{Cl}^-$  y  $\text{CO}_2$ ) en los ejemplares,
- parámetros electroquímicos del hormigón y de las armaduras (resistividad, potencial y velocidad de corrosión (Andrade et al., [14])).

Las probetas con armaduras, fueron utilizadas principalmente para el registro de los parámetros electroquímicos, y las sin armadura para evaluar la contaminación del hormigón con el ión  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{CO}_2$ . Para esto último, fue necesario extraer muestras de hormigón de las probetas.

La información así obtenida, se analizó a efectos de caracterizar el comportamiento de los ejemplares frente a la corrosión y su vinculación con los parámetros involucrados. En particular por ser la relación a/c y el recubrimiento de las armaduras los parámetros de mayor sensibilidad que desencadenan la corrosión en las piezas estructurales, se buscó enfocar los resultados en relación a éstos. En aquellos ejemplares donde las armaduras sufrieron corrosión, se evaluó la pérdida de sección de las mismas, a partir de los resultados electroquímicos. También se evaluó el coeficiente de difusión de ión  $\text{Cl}^-$ , en los ejemplares sin armaduras (T. de Rincón et al., [55]).

El experimento abarcó diversas tareas, asociadas básicamente a los siguientes puntos:

- estaciones de ensayo natural,
- elaboración de las probetas,
- exposición y seguimiento de las probetas.

En las siguientes secciones, se desarrolla el contenido de cada uno de dichos puntos.

### **3.1. Estaciones de ensayo natural**

#### **3.1.1 Implantación y caracterización de las estaciones de ensayo natural**

Como lugares para la implantación de las estaciones de ensayo natural, se buscaron aquellos que correspondan con un ambiente urbano y otro marino, y que a su vez coincidieran preferentemente con estaciones meteorológicas, a efectos que las condiciones ambientales de exposición, correspondieran con los puntos donde se hacen los registros meteorológicos, y se cuente con una caracterización histórica del clima. Con este último propósito, para la implantación de la estación del tipo urbano, se contó con la colaboración de la Dirección Nacional de Meteorología (DNM), que facilitó el predio de la estación meteorológica del Prado, en el departamento de Montevideo. A esta estación se le denominó “Prado”.

Para la implantación de la estación del tipo marina, se contó con la colaboración del Servicio de Oceanografía Hidrografía y Meteorología de la Armada, (SOHMA), que facilitó el predio de la Base Naval ubicada en el balneario La Paloma del departamento de Rocha. A esta estación se le denominó “La Paloma”.

En la Figura 3.1, se aprecia la ubicación donde se implantaron las dos estaciones de ensayo natural.

Como caracterización climática general del país, se destaca que Uruguay esta situado íntegramente en la zona templada, presentando ausencias de sistemas orográficos importantes, lo cual contribuye a que las variaciones horizontales de temperatura, precipitación y otras variables climáticas sean pequeñas. Dentro de los factores oceanográficos, la presencia de la corriente cálida del Brasil produce una inestabilidad de las capas bajas de la atmósfera con un aporte importante de temperatura y humedad en las zonas costeras. La corriente fría de las Malvinas genera una estabilización y un enfriamiento de las masas de aire que circulan

### 3.1. Estaciones de ensayo natural

---

sobre ella.

El anticiclón semipermanente del océano Atlántico influye sobre el desarrollo del tiempo en el Uruguay. La circulación horizontal que origina establece que las direcciones predominantes del viento sean del noreste al este, aportando masas de aire de origen tropical. El anticiclón del Pacífico provoca los empujes de aire de origen polar con dirección predominante del suroeste. La interacción de ambas influencias provoca la ocurrencia de precipitaciones de carácter frontal (Severova, [51]).



Figura 3.1. Ubicación de las estaciones de ensayo natural.

#### Estación Prado

En la Figura 3.2 se puede apreciar la ubicación de la estación dentro del departamento de Montevideo y su posición respecto de la Bahía. Esta estación, se encuentra en un parque amplio, de escasa forestación de gran altura, en una zona netamente urbana rodeada por importantes avenidas.

### 3.1. Estaciones de ensayo natural



Figura 3.2. Ubicación de la Estación Prado en Montevideo

En la Figura 3.3 a la Figura 3.6 se presenta una caracterización histórica de los valores promedio, mensuales, del período 1961-1990, correspondiente a los parámetros: temperatura, precipitación, días con precipitación > 1mm y humedad relativa.(DNM, [25]).

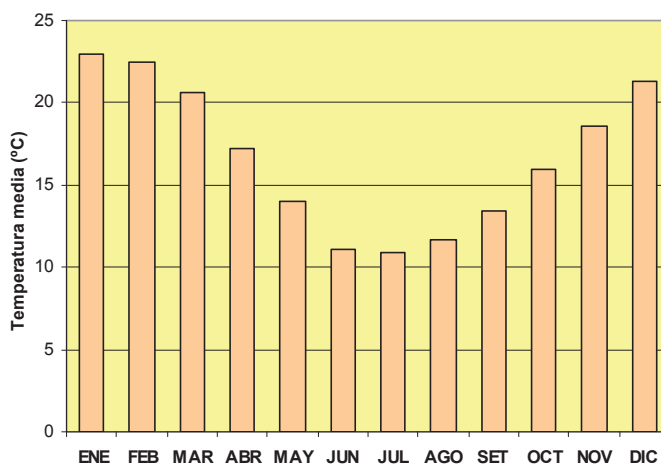


Figura 3.3. Temperatura media.

### 3.1. Estaciones de ensayo natural

---

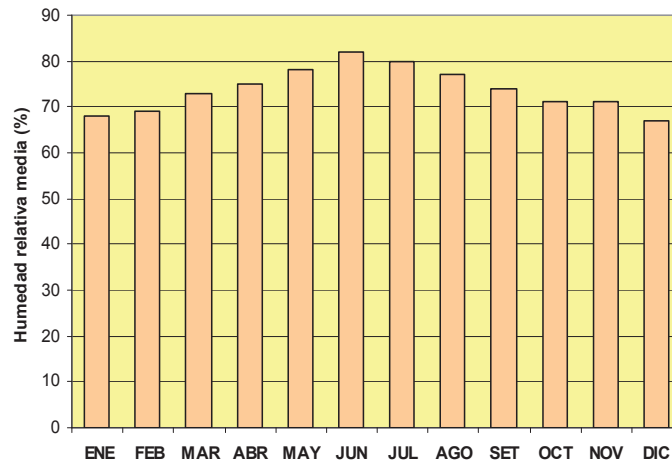


Figura 3.4. Humedad relativa media

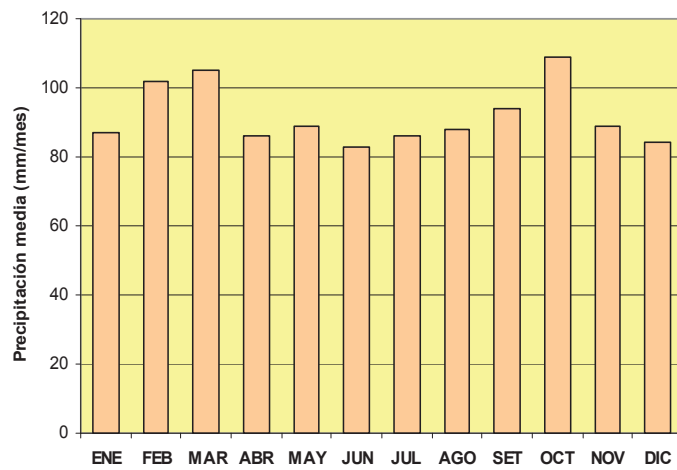


Figura 3.5. Precipitación media



### 3.1. Estaciones de ensayo natural

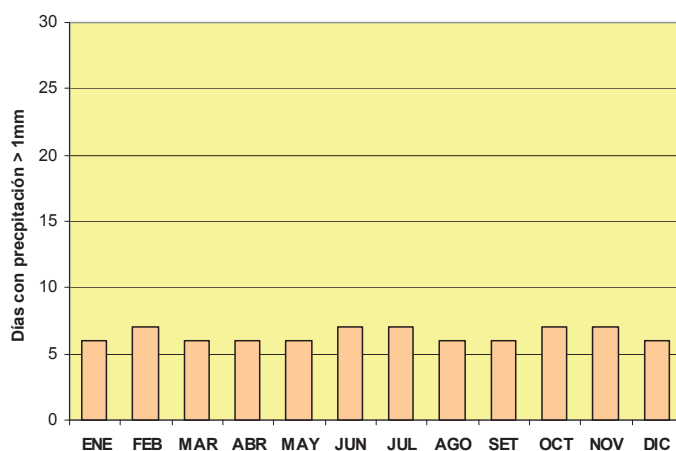


Figura 3.6. Días con precipitación > 1mm.

#### Estación La Paloma

Como puede apreciarse en la Figura 3.7, esta estación, está sobre la costa del Océano Atlántico, próxima a la zona portuaria, y alejado del área urbana del balneario. A su vez, el balneario La Paloma tiene poca población residente, y una extensión urbana de pocas manzanas con escaso tránsito vehicular. En base a estos aspectos, se considera que la atmósfera de esta estación es netamente marina.



Figura 3.7. Ubicación de la Estación La Paloma.

### 3.1. Estaciones de ensayo natural

---

En la Figura 3.8 a la Figura 3.11, se presenta una caracterización histórica de los valores promedio, mensuales, del periodo 1961-1990, correspondiente a los parámetros: temperatura, precipitación, días con precipitación >1mm y humedad relativa, de la estación meteorológica Rocha, próxima a la estación La Paloma.(DNM, [25]).

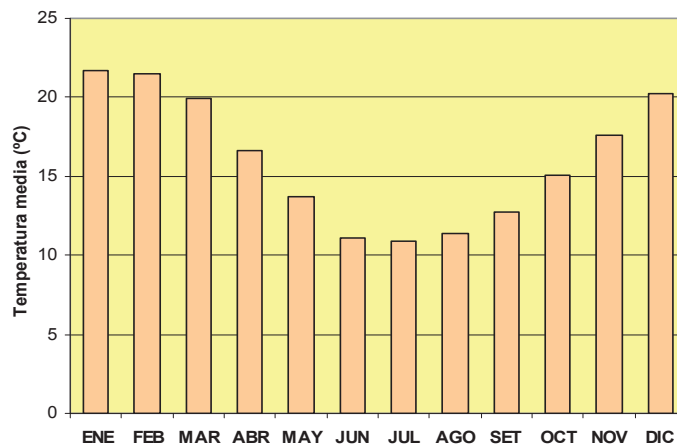


Figura 3.8. Temperatura media.

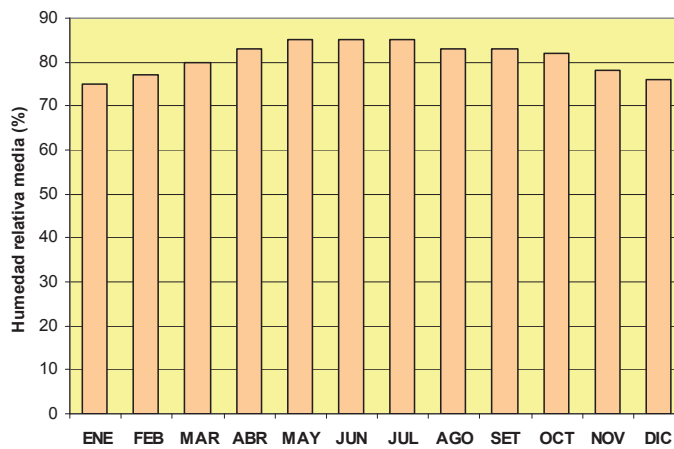


Figura 3.9. Humedad relativa media.

### 3.1. Estaciones de ensayo natural

---

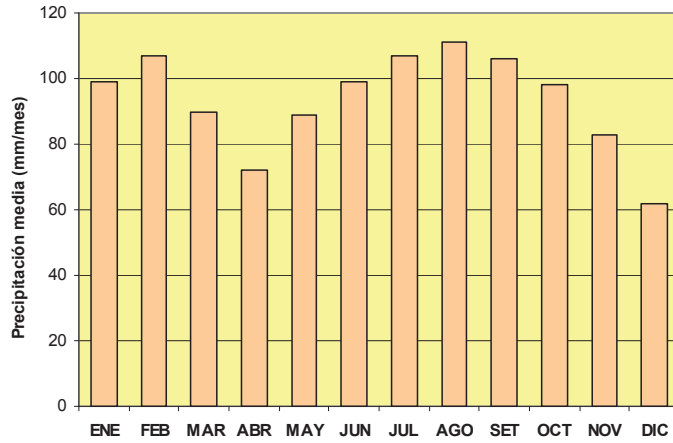


Figura 3.10. Precipitación media

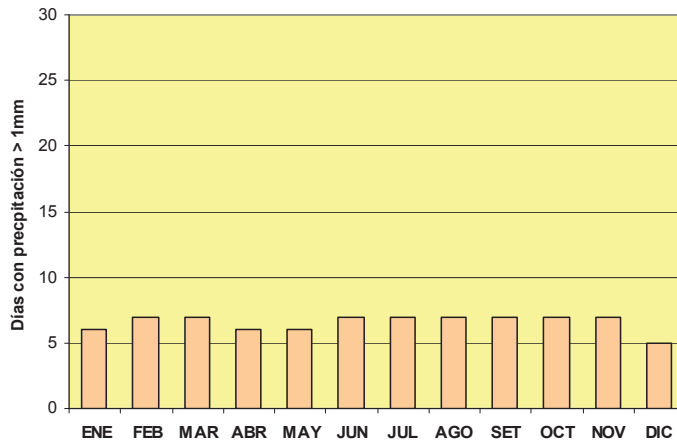


Figura 3.11. Días con precipitación > 1mm.

#### 3.1.2 Evaluación de los parámetros climático - ambientales

En cada una de las estaciones meteorológicas, se registraron durante el estudio, los siguientes parámetros climático - ambientales:

### 3.1. Estaciones de ensayo natural

---

- temperatura (valor medio mensual),
- régimen de vientos, intensidad y dirección (media mensual),
- tiempo de humectación. Consiste en el registro de las horas donde la condición ambiental de humedad relativa es mayor a 80% y la temperatura superior a 0°C, (valor mensual).
- insolación. Consiste en el registro de las horas de sol, mediante el quemado de bandas en heliógrafo (valor mensual acumulado),
- humedad ambiental (valor medio mensual),
- precipitación (valor mensual acumulado).

Dicha información fue suministrada por la DNM en el caso de la “Estación Prado”, y por el SHOMA para la “Estación La Paloma”.

Además de los parámetros anteriores se tomó registro de los siguientes contaminantes atmosféricos:

- anhídrido carbónico (una determinación mensual),
- ión Cl<sup>-</sup> (valor medio mensual),
- dióxido de azufre (valor medio mensual) .

Estos parámetros no son registrados por las estaciones meteorológicas elegidas, por lo tanto para su registro, fue necesario instalar casetas construidas especialmente a esos efectos, con equipamiento para su determinación de acuerdo a las instrucciones de las respectivas normas. Para el registro del ión Cl<sup>-</sup> y el anhídrido carbónico se construyeron las casetas y el equipo de muestreo según las directivas de la normas ISO 9225 (ISO, [36]).

En las siguientes secciones se describe el procedimiento que se llevó adelante para la determinación de los contaminantes atmosféricos anteriormente mencionados.

### 3.1. Estaciones de ensayo natural

---

#### 3.1.2.1 Contaminación atmosférica con CO<sub>2</sub>

La toma de muestras de aire para el análisis de contenido de CO<sub>2</sub> atmosférico se realizó utilizando una botella de vidrio como se observa en la Foto 3.1. Luego la determinación del contenido de CO<sub>2</sub> se realizó según la técnica de Pettenkoffer (Pettenkofer, [46]), tomando registro de la temperatura y la presión en el momento del muestreo. Los resultados obtenidos se expresan como la relación entre la masa de CO<sub>2</sub> y el volumen de aire de la muestra.



Foto 3.1. Toma de muestras de aire para la determinación del contenido de CO<sub>2</sub> atmosférico.

#### 3.1.2.2 Contaminación atmosférica con ión Cl<sup>-</sup>

En la Foto 3.2 se observa la caseta donde se instaló el equipo de muestreo de contenido de ión Cl<sup>-</sup> en la atmósfera, el cual básicamente consiste en una vela para la captación de los mismos. El análisis del contenido de ión Cl<sup>-</sup> captado por dicho equipo, se realizó por el método de Mohr (Christian, [24]). Los resultados obtenidos se expresan como una relación por unidad de tiempo, entre la masa de ión Cl<sup>-</sup> y la superficie de la vela donde fueron captados.

#### 3.1.2.3 Contaminación atmosférica con SO<sub>2</sub>

En la Foto 3.3 se observa la caseta donde se instaló el equipo de muestreo

### 3.1. Estaciones de ensayo natural

---

de contenido de  $\text{SO}_2$  en la atmósfera, el cual básicamente consiste en una vela para la captación de los mismos. El análisis del contenido de  $\text{SO}_2$  captado por dicho equipo, se realizó según la norma ASTM D516.(ASTM, [12]). Los resultados obtenidos se expresan como una relación por unidad de tiempo, entre la masa de  $\text{SO}_2$  y la superficie de la vela donde fueron captados.



Foto 3.2. Caseta con vela para muestreo del contenido de ión  $\text{Cl}^-$  en la atmósfera.



Foto 3.3. Caseta con vela para muestreo del contenido de  $\text{SO}_2$  en la atmósfera.

## 3.2. Elaboración de los ejemplares

### 3.2.1 Diseño de los ejemplares de ensayo.

Los ejemplares instalados en las estaciones de ensayo natural, son piezas prismáticas de hormigón, de 15cm x 15cm x 30cm, unas sin armaduras y otras con ellas, con recubrimiento de 1,5; 2,0 y 3,0cm. El hormigón se elaboró con relaciones en peso, agua / cemento de: 0,45 y 0,65. En cada estación, se instaló un total de 12 ejemplares, cuyas principales características se presentan en el Cuadro 3.1 que sigue a continuación.:

Cuadro 3.1. Características básicas de los ejemplares

cantidad ejemplares	dimensiones exteriores (cm)	hormigón, relación a/c en peso	armaduras	recubrimiento de las armaduras (cm)
3	15 x 15 x 30	0,45	NO	-----
3	15 x 15 x 30	0,45	SI	1,5, 2,0 y 3,0
3	15 x 15 x 30	0,65	NO	-----
3	15 x 15 x 30	0,65	SI	1,5, 2,0 y 3,0

Las armaduras utilizadas son de acero con tensión de fluencia 420 MPa, diámetro nominal  $\Phi 12$ , estriadas y conformadas por laminación en caliente.

Dichas armaduras fueron dispuestas de forma simétrica respecto del eje longitudinal de la probeta.

Para poder medir los parámetros electroquímicos en cada una de las barras, de forma controlada, fue necesario aislar una parte de las mismas, cuya geometría es conocida. Es así que en cada una de las barras se dejó descubierto un tramo central de 15 cm de largo y se protegió el resto de las mismas con pintura epoxi.

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

En el extremo de cada barra, fuera del hormigón, se conectó un conductor para poder efectuar las conexiones para los registros electroquímicos. Dicho contacto, se protegió del medio ambiente para asegurar una buena conexión eléctrica con los equipos de medida, durante todo el período de exposición. A continuación en la Figura 3.12 y la Figura 3.13 se muestra en detalle la geometría de los ejemplares, la posición de exposición de los mismos al medio ambiente, la posición de las armaduras en su interior y las zonas protegidas de las mismas mediante pintura epoxi.

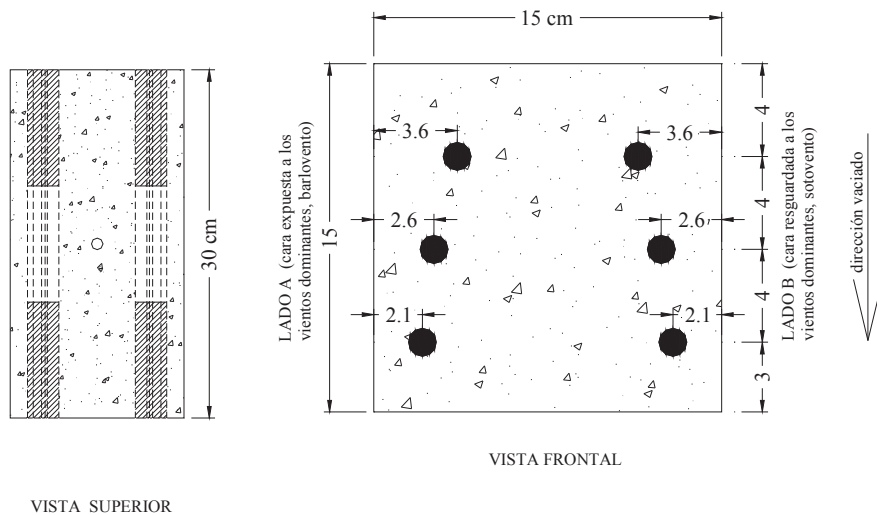


Figura 3.12. Detalle de la geometría de los ejemplares. Vistas superior y frontal

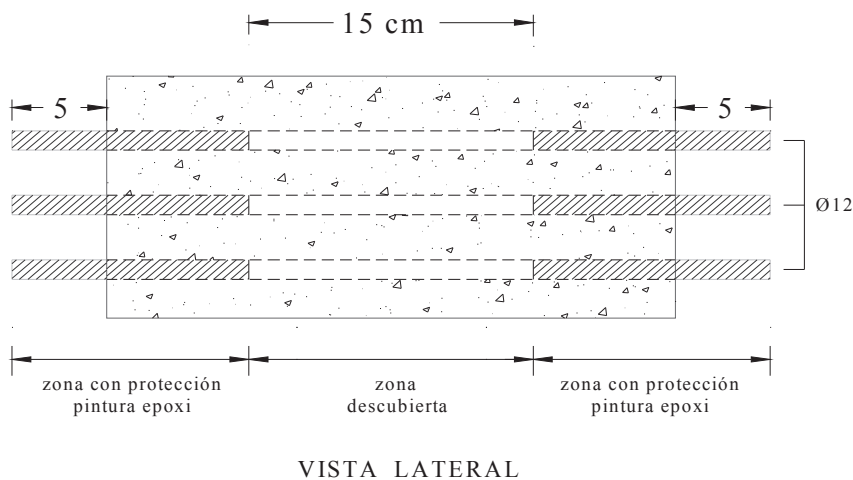


Figura 3.13. Detalle de la geometría de los ejemplares. Vista lateral



### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

A continuación en la Foto 3.4 y la Foto 3.5, se muestran vistas con los moldes metálicos, y con la preparación y la disposición de las armaduras en cada ejemplar. Para el posicionamiento de las armaduras se utilizaron planchas de poliestireno expandido, que resultaron de fácil retiro una vez endurecido el hormigón. De esta forma se logró no lastimar la protección de las barras con pintura epoxi.

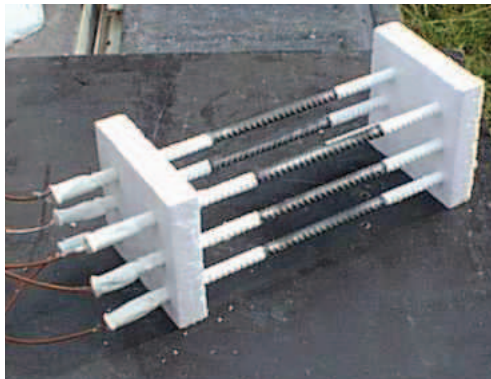


Foto 3.4. Disposición de las armaduras.



Foto 3.5. Colocación de las armaduras dentro de los moldes metálicos.

#### 3.2.2 Hormigón elaborado para los ejemplares a ensayar

Los hormigones para los ejemplares a ensayar, se elaboraron con dos mezclas: una con relación agua / cemento (a/c) de 0,45 y otra con 0,65. A su vez, se estableció que dichos hormigones, cumplan las siguientes características:

- para la mezcla con  $a/c=0,45$ , un contenido mínimo de 400 kg de cemento/ $m^3$  de hormigón,

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

- para la mezcla con  $a/c=0,65$ , una resistencia característica a compresión a los 28 días, de 21,0 Mpa como mínimo,
- tamaño máximo nominal de agregado, 13 mm,
- asentamiento de las mezclas  $10\pm 1$  cm,
- tipo de árido: silíceo triturado,
- tipo de arena: cuarzosa,
- adición de plastificante a la mezcla con  $a/c = 0,45$ , para lograr un asentamiento de  $10 \pm 1$  cm,
- encofrados metálicos,
- curado de los ejemplares durante 7 días, mediante inmersión en agua de cal, según norma ASTM. C192-98 (ASTM, [2]).

En ambas mezclas se utilizó cemento Pórtland nacional marca ANCAP, tipo CP40 (bajo álcali), fabricado en la planta ubicada en el departamento de Paysandú.

A efecto de poder cumplir con las exigencias planteadas para cada una de las mezclas, fue necesario realizar varios pastones de prueba con diferentes dosificaciones.

Para ajustar la relación  $a/c$ , fue necesario realizar ensayos de exudación (ASTM, [7]). En particular para la mezcla con relación  $a/c=0.45$ , para alcanzar el asentamiento previsto, fue necesario utilizar plastificante en base a lignosulfonato.

## 3.2. Elaboración de los ejemplares

### 3.2.3 Caracterización de los materiales utilizados en la elaboración de los hormigones

La caracterización de los materiales empleados en la elaboración de los hormigones, consistió en evaluar las siguientes propiedades de los mismos:

- físico-química y mecánica del cemento utilizado, (composición química, tiempo de fraguado, retenido en tamiz 74  $\mu\text{m}$ , expansión en autoclave, superficie específica (Blaine), resistencia a compresión )
- granulometría de los agregados fino y grueso (tamaño de los agregados, módulo de finura).

Los resultados de los análisis físico-químicos y mecánicos del cemento, se resumen a continuación en el Cuadro 3.2 y Cuadro 3.3.

Cuadro 3.2. Características físico-químicas del cemento.

Composición química (% en masa)												
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O <sub>eq.</sub>	SO <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	P.P.C.
21,66	3,12	3,32	64,86	3,46	0,04	0,19	0,16	1,63	(*)	(*)	(*)	1,64

Composición química (% en masa)					Tiempo de fraguado (hh:mm)		retenido tamiz 74 $\mu\text{m}$ (%)	expansión en autoclave (%)	Sup.esp. (Blaine) (m <sup>2</sup> /kg)
Cal Libre	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> AF	C <sub>3</sub> A	inicial	final			
(*)	69,08	9,99	10,10	2,65	4:17	5:48	4,3	0,10	343

(\*) valores no disponibles

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

Cuadro 3.3. Características mecánicas del cemento

Resistencia a compresión (MPa)		
2 días	7 días	28 días
21,7	37,8	53,2

Para ambos hormigones se usaron los mismos agregados, cuyas propiedades son descritas a continuación.

El agregado grueso fue obtenido a partir de la trituración de leucogranodiorita proveniente de una localidad de Montevideo. Corresponde a una roca granítica de grano fino o medio con biotita como mineral accesorio. El agregado fino de origen fluvial corresponde a una arena de tipo silíceo.

Los agregados se caracterizaron según las normas de caracterización física de los agregados ASTM C33 (ASTM C33, [1]) y la norma de tamizado ASTM C136 (ASTM, [5]). En el Cuadro 3.4 se presentan los resultados obtenidos para la granulometría del agregado grueso.

Cuadro 3.4. Resultados obtenidos de la granulometría del agregado grueso.

	Abertura tamiz								Peso total muestra (g)
	19 (mm)	12,5 (mm)	9,5 (mm)	4,75 (mm)	2,36 (mm)	1,18 (mm)	0,3 (mm)	< 0,3 (mm)	
Retiene (g)	0.0	69,9	406,4	1569,4	324,2	1,2	27,1	28,9	2472,5
Pasa (g)	2472.5	2402,6	1996,2	426,8	102,6	101,5	74,4	45.5	
Pasa (% del total)	<b>100</b>	<b>97</b>	<b>81</b>	<b>17</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1.8</b>	

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

En la Figura 3.14 se muestra la curva granulométrica obtenida para la muestra de agregado grueso estudiada, y los husos #7, #8 y #89 definidos en la norma para la clasificación de los tamaños nominales de agregado.

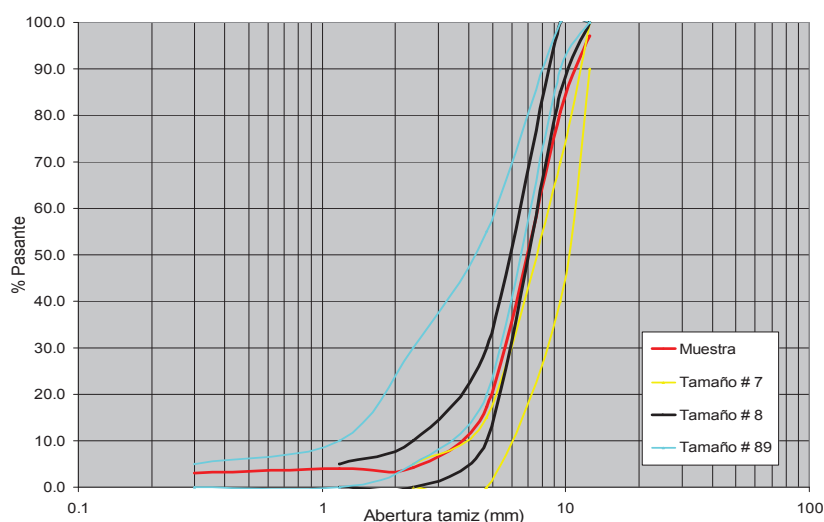


Figura 3.14. Granulometría del agregado grueso

Si bien la curva no se sitúa en un huso determinado, se puede decir que está entre los husos #7 y #8 según norma. El tamaño nominal del huso #7 está entre 12,5 mm y 4,75 mm y el del #8 entre 9,5 mm y 2,36 mm. Entonces el tamaño nominal de este agregado grueso está en el rango de 12,5 mm a 2,36 mm, no superando los 13,00 mm. En el Cuadro 3.5 se presentan los resultados de dos determinaciones del módulo de finura del agregado fino utilizado en ambas mezclas. Los resultados se sitúan dentro del rango 2,3 a 3,1.

Se elaboró la totalidad de las mezclas, para confeccionar la totalidad de las probetas a instalar en las estaciones de ensayo natural, y para los ensayos de caracterización. Las dosificaciones de las mezclas utilizadas para cada relación agua/cemento se detallan en el Cuadro 3.6. Ambos hormigones fueron elaborados en cinco pastones (canchadas) de 40 litros, en una hormigonera de tambor basculante, con el mismo personal y procedimiento. Por lo cual se considera que los hormigones a pesar de haber sido confeccionados en pastones son

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

suficientemente homogéneos y nominalmente iguales. El procedimiento seguido de mezclado, fue el indicado por la norma ASTM C192 (ASTM, [2]).

Cuadro 3.5. Resultados obtenidos del módulo de finura del agregado fino.

	Abertura tamiz									Peso total (g)	Módulo de finura
	9,5 (mm)	4,75 (mm)	2,36 (mm)	1,18 (mm)	0,60 (mm)	0,30 (mm)	0,15 (mm)	0,075 (mm)	< 0,075 (mm)		
Retenido (g)	0,0	5,6	31,7	71,0	127,6	156,7	77,4	23,2	5,3	500,0	<b>2,50</b>
Retenido (% del total)	<b>0,0</b>	<b>1,1</b>	<b>7,5</b>	<b>21,7</b>	<b>47,2</b>	<b>78,5</b>	<b>94,0</b>	-----	-----		
Pasa (g)	498,6	493,0	461,3	390,3	262,6	106,0	28,6	5,3	-----		
Retenido (g)	0,0	3,2	36,4	81,4	148,2	178,8	100,8	27,0	5,4	583,5	<b>2,45</b>
Retenido (% del total)	<b>0,0</b>	<b>0,6</b>	<b>6,8</b>	<b>20,7</b>	<b>46,1</b>	<b>76,8</b>	<b>94,1</b>	-----	-----		
Pasa (g)	581,1	577,9	541,5	460,1	311,9	133,1	32,3	5,4	-----		

Cuadro 3.6. Dosificación de las mezclas utilizadas.

a/c	Contenido / m <sup>3</sup> hormigón				
	Cemento (kg)	Agua (l)	Agr. Grueso (kg)	Agr. Fino (kg)	Aditivo (l)
0,45	<b>400,0</b>	<b>180,0</b>	<b>780,0</b>	<b>865,0</b>	<b>3,20</b>
0,65	<b>323,8</b>	<b>210,4</b>	<b>780,0</b>	<b>948,6</b>	-

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

Nótese que para la dosificación con  $a/c=0,45$  se verifica un contenido de 400 kg de cemento /  $m^3$  de hormigón.

Se realizó la medida de la humedad sólo sobre el agregado fino, resultando un valor de 6,5% que cumple con la norma nacional UNIT 84 (UNIT, [32]) (máximo aceptable de humedad para el agregado: 6-8% en peso). El aporte proveniente del árido grueso es menor al 1%, el cual se considera despreciable.

El aporte de agua debido a la humedad del agregado fino se descontó del volumen de agua teórico necesario para la realización de cada una de las mezclas.

Tanto las probetas prismáticas como las cilíndricas fueron vaciadas según norma ASTM C 192 (ASTM, [2]).

Se elaboró la totalidad de las mezclas, para confeccionar la totalidad de las probetas, a instalar en las estaciones de ensayo natural, y para los ensayos de caracterización.

Durante la confección de las probetas se realizaron ensayos de asentamiento de acuerdo con las normas ASTM C 143 (ASTM, [6]) y de exudación aplicando la norma ASTM C 232 (ASTM, [7]).

Con respecto al ensayo de exudación, se realizó tanto para la relación  $a/c=0,45$  como para la 0,65. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada caso:

*Relación  $a/c = 0,45$*

No se observó exudación alguna durante 40'.

Se considera que no hubo segregación de agua y que el hormigón mantiene la relación 0,45 programada.

*Relación  $a/c = 0,65$*

El ensayo se realizó durante 4 hs., 30 mín., momento en que se consideró que el volumen exudado en los últimos 30 mín. era despreciable.

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

Volumen total exudado por unidad de área:  $V = 0,5 \text{ ml/cm}^2$

La velocidad de exudación comenzó siendo de  $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ ml/10 min.}$  en los primeros 10 min., llegó a un máximo de  $3,5 \cdot 10^{-2} \text{ ml/10 min.}$  y el ensayo finalizó al volverse a obtener la velocidad inicial.

Resultó un valor de exudación de 9,4 %. Dicho valor se obtuvo luego de realizar una pequeña corrección en el volumen exudado debido a la presencia de sólidos.

Realizada la corrección de la relación a/c en función del porcentaje de exudación, se concluye que el hormigón con  $a/c = 0,65$  tiene en realidad una relación  $a/c = 0,59$

El curado de la totalidad de las probetas se realizó las primeras cuarenta y ocho horas en los moldes cubiertos con nylon, luego se desmoldaron y se prosiguió el proceso por inmersión en agua de cal durante siete días, según norma ASTM C192 (ASTM, [2]).

El aditivo utilizado es un plastificante, en base a lignosulfonato de calcio (similar a BB40 de SIKA).

#### 3.2.4 Caracterización física y mecánica del hormigón

En este capítulo, se presentan los ensayos realizados para la caracterización física y mecánica de los hormigones elaborados para la confección de los ejemplares instalados en las estaciones de ensayo natural.

Cada uno de los hormigones con relación  $a/c=0,45$  y  $0,65$ , fueron elaborados a partir de cinco pastones (canchadas) de 40 litros, en una hormigonera de tambor basculante, con el mismo personal y procedimiento. Por este motivo, se consideró que los hormigones a pesar de haber sido confeccionados en diferentes pastones, son suficientemente homogéneos, por lo cual se asumieron nominalmente iguales.

Para la caracterización física y mecánica de los hormigones elaborados, se



### 3.2. Elaboración de los ejemplares

prepararon muestras normalizadas (probetas) a partir de los pastones, las cuales se ensayaron a los 28 días de edad. Para los ensayos que requirieron probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, se utilizaron moldes específicos. Para otros ensayos que requirieron probetas cilíndricas con otras dimensiones o en algunos casos prismáticas, fue necesario confeccionar probetas prismáticas de 15 cm x 15 cm x 60 cm, a partir de las cuales, mediante herramienta de corte, se extrajeron los tipos de probeta requeridos. En todos los casos para cada ensayo, se utilizaron tres probetas.

A continuación, en el Cuadro 3.7 a el Cuadro 3.10 se detallan para cada uno de los hormigones con relación a/c=0,45 y 0,65, los tipos de probetas elaboradas, la nomenclatura adoptada para cada una, los tipos de ensayos para las cual fueron destinadas, y el pastón del cual provinieron.

Cuadro 3.7. Nomenclatura y destino de las probetas con mezcla a/c = 0,45.

	Probeta tipo	Pastón	Probeta	Ensayo
Hormigón a/c = 0,45	Cilíndrica	1	1 /45	Resistencia a la compresión 90 días
			2 /45	Módulo de Elasticidad
		2	3 /45	Resistencia a la compresión 28 días
		3	4 /45	Resistividad y Tracción
			5 /45	Módulo de Elasticidad
			6 /45	Resistencia a la compresión 28 días
			7 /45	Resistencia a la compresión 90 días
		4	8 /45	Resistividad y Tracción
			9 /45	Resistencia a la compresión 28 días
		5	10 /45	Resistencia a la compresión 90 días
			11 /45	Resistividad y Tracción

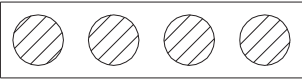

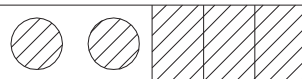

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

		12 /45	Módulo de Elasticidad		
Prismática sin armadura	1	1 s/45	Exposición en estación de ensayo natural. Dimensiones: 15 cm x 15 cm x 30 cm.  A partir de estas se obtienen otras probetas, (ver Cuadro 3.8). Dimensiones: 15 cm x 15 cm x 60 cm.		
		2 s/45			
	2	3 s/45			
		4 s/45			
	4	5 s/45			
		6 s/45			
	5	7 s/45			
		11 s/45			
	Prismática con armadura	1		1 c/45	Exposición en estación de ensayo natural. Dimensiones: 15 cm x 15 cm x 30 cm.
				2 c/45	
3		3 c/45			
		4 c/45			
5		5 c/45			
		6 c/45			

En el Cuadro 3.8 se muestra la nomenclatura y el destino de las probetas elaboradas con la mezcla de  $a/c = 0,45$ , extraídas a partir de las probetas 7s/45 y 11s/45. Dichas probetas, se destinaron a la realización de los ensayos de penetración de cloruros, absorción capilar (Fagerlund), densidad, absorción total y porosidad.

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

Cuadro 3.8. Nomenclatura y destino de las probetas extraídas a partir de 7s/45 y 11s/45.

	Probeta de origen	Esquema	Dimensiones	Probeta	Ensayo		
Hormigón a/c = 0,45	7 s/45			Cilíndrica $\phi = 10 \text{ cm}$ , $h = 5 \text{ cm}$	7 s/45	Perm. Cloruros	
					8 s/45		
					9 s/45		
					10 s/45		
	11 s/45			Prismática $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$	11 s/45	Fagerlund	
					12 s/45		
					13 s/45		Abs. total, densidad y porosidad
					14 s/45		
15 s/45							

A continuación, se presentan para el hormigón con relación a/c = 0,65, el Cuadro 3.9 y el Cuadro 3.10, análogos al Cuadro 3.7 y Cuadro 3.8 para el hormigón con a/c = 0,45.

Cuadro 3.9. Nomenclatura y destino de las probetas con mezcla a/c = 0,65.

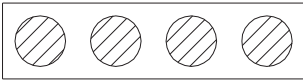

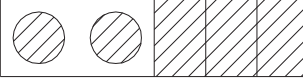

	Probeta tipo	Pastón	Probeta	Ensayo
Hormigón a/c = 0,65	Cilíndrica	1	1 /65	Resistencia a la compresión 90 días
			2 /65	Módulo de Elasticidad
		2	3 /65	Resistencia a la compresión 28 días
		3	4 /65	Resistividad y Tracción

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

			5 /65	Módulo de Elasticidad	
			6 /65	Resistencia a la compresión 28 días	
			7 /65	Resistencia a la compresión 90 días	
		4		8 /65	Resistividad y Tracción
				9 /65	Resistencia a la compresión 28 días
		5		10 /65	Resistencia a la compresión 90 días
				11 /65	Resistividad y Tracción
				12 /65	Módulo de Elasticidad
		Prismática sin armadura	1	1 s/65	Exposición en estación de ensayo natural. Dimensiones: 15 cm x 15 cm x 30 cm.
				2 s/65	
			2	3 s/65	
				4 s/65	
4	5 s/65				
	6 s/65				
	7 s/65		A partir de estas se obtienen otras probetas, (ver Cuadro 3.10).		
5	11 s/65	Dimensiones: 15 cm x 15 cm x 60 cm.			
Prismática con armadura	2	1 c/65	Exposición en estación de ensayo natural. Dimensiones: 15 cm x 15 cm x 30 cm.		
		2 c/65			
	3	3 c/65			
		4 c/65			
	5	5 c/65			
		6 c/65			

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

Cuadro 3.10. Nomenclatura y destino de las probetas extraídas a partir de 7s/65 y 11s/65.

	Probeta de origen	Esquema	Dimensiones	Probeta	Ensayo	
Hormigón a/c = 0,65	7 s/65			Cilíndrica $\phi = 10 \text{ cm}$ , $h = 5 \text{ cm}$	7 s/65	Perm. Cloruros
					8 s/65	
					9 s/65	
					10 s/65	
					11 s/65	
	12 s/65					
	11 s/65			Prismática $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$	13 s/65	Abs. total, densidad y porosidad
					14 s/65	
					15 s/65	

#### 3.2.4.1 Ensayo de absorción total, porosidad total y densidad

Estos ensayos se realizaron según la norma ASTM C 642 (ASTM, [11]) a ambos tipo de hormigón, a los 28 días de fabricados. Se realizaron sobre probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 5 cm de altura. Para cada dosificación se realizaron tres ensayos, constatándose una gran concordancia entre los valores individuales. En el Cuadro 3.11 se presentan los resultados obtenidos.

Según los criterios de evaluación establecidos en el manual DURAR (T. de Rincón et al., [55]) en ambos casos se trata de hormigones de moderada calidad (porosidad entre 10 y 15%).

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

Cuadro 3.11. Resultados obtenidos para los ensayos de absorción total, porosidad total y peso unitario

a/c	Absorción total (%) <sup>i</sup>	Porosidad total (%)	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )
0,45	5,24	11,8	2473
0,65	6,45	14,0	2433

<sup>i</sup> Corresponde a la absorción total (peso constante) de agua fría.

#### 3.2.4.2 Ensayo de Fagerlund

Este ensayo, se realizó según el procedimiento propuesto por Fagerlund G. en publicación titulada “On the Capillarity of Concrete” (Fagerlund, [27])

Para la expresión de los resultados y los criterios de evaluación se siguió lo establecido en el Manual de DURAR (T. de Rincón et al., [55]).

El ensayo se realizó sobre los dos tipos de hormigones fabricados. Las medidas se hicieron por triplicado para cada formulación, sobre probetas cilíndricas de 9,4 cm de diámetro y 5 cm de altura nominales, constatándose una gran concordancia entre los valores individuales. En la Foto 3.6, se muestra el montaje del ensayo.



Foto 3.6. Probetas utilizadas en el ensayo de Fagerlund.

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

En la Figura 3.15 y la Figura 3.16 se presentan los gráficos obtenidos para las relaciones  $a/c = 0,45$  y  $0,65$  respectivamente.

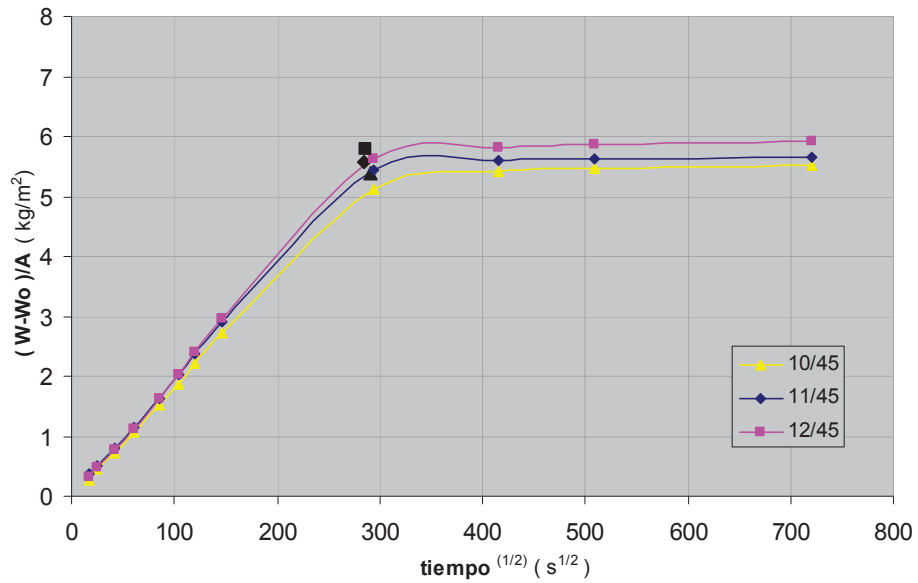


Figura 3.15. Ensayo de Fagerlund para  $a/c=0,45$ .

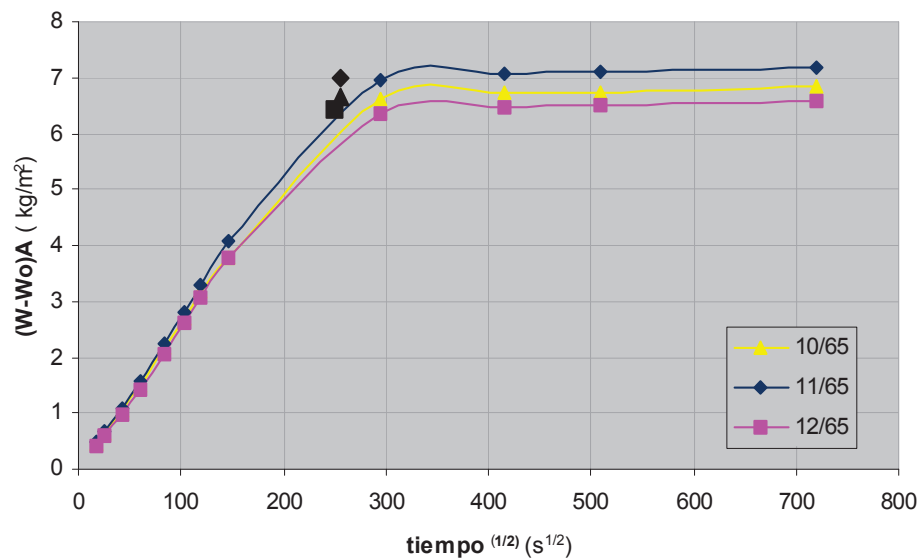


Figura 3.16. Ensayo de Fagerlund para  $a/c=0,65$ .

En el Cuadro 3.12 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

cada relación agua cemento. El valor del tiempo necesario para el cálculo de la resistencia a la penetración del agua y la sorción capilar (Feliu et al., [28]) para cada probeta se obtuvo como el punto de corte de las rectas obtenidas por regresión lineal de las zonas izquierda y derecha representados en las figuras anteriores (los valores del punto de corte se representan con indicadores negros) También para estos parámetros se obtuvieron valores individuales concordantes y lo que se indica es el valor de la media.

Cuadro 3.12. Resultados para el ensayo de Fagerlund

a/c	Absorción capilar (kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> )	Resistencia a la penetración del agua (s/m <sup>2</sup> )	Sorción capilar (m/s <sup>1/2</sup> )
0,45	0,0196	3,3.10 <sup>7</sup>	1,7.10 <sup>-4</sup>
0,65	0,0267	3,2.10 <sup>7</sup>	1,8.10 <sup>-4</sup>

Según los criterios de evaluación recomendados en DURAR (T. de Rincón et al., [55]) referentes al valor de la sorción capilar para un recubrimiento de armadura de 3 cm en ambiente severo, ésta debe ser menor a  $5.10^{-05}$  y para ambiente menos severo debe ser menor a  $10^{-04}$ .

Los hormigones fabricados no cumplen con la recomendación para ninguno de los 2 ambientes en el caso de considerar la condición de mayor profundidad en las probetas armadas.

#### 3.2.4.3 Ensayo de penetración forzada de ión Cl<sup>-</sup>

Los ensayos de penetración forzada de ión Cl<sup>-</sup> se realizaron según la norma ASTM C1202 (ASTM, [4]). Dado que el diámetro nominal de las probetas extraídas resultó en todos los casos de 9,3 cm, que es menor que el diámetro indicado por la norma (9,5 cm), se efectuó en todos los casos la corrección



### 3.2. Elaboración de los ejemplares

prescrita por ésta.

En el Cuadro 3.13 al Cuadro 3.18 se presentan los resultados de este ensayo para cada una de las probetas, junto con las observaciones más relevantes.

Cuadro 3.13. Resultados del ensayo de penetración forzada de cloruros para la probeta 9/45.

	Tiempo (s)	Potencial (V)	Intensidad corriente (A)	Temperatura solución (°C)		Carga (C)	Observaciones
				Celda NaCl	Celda NaOH		
Probeta 9/45	0	60,01	0,1302	22	22	4.945	-----
	1.800	59,98	0,1519	25	28		
	3.600	60,00	0,1611	28	30		
	5.400	59,99	0,1748	30	32		
	7.200	60,01	0,1928	34	36		
	9.000	59,99	0,2150	37	38		
	10.800	59,99	0,2371	40	40		
	12.600	59,99	0,2521	42	42		
	14.400	59,90	0,2611	45	45		
	16.200	60,00	0,2633	47	46		
	18.000	60,01	0,2619	49	46		
	19.800	60,02	0,2566	50	46		
21.600	60,02	0,2527	51	48			

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

Cuadro 3.14. Resultados del ensayo de penetración forzada de cloruros para la probeta 7/45.

	Tiempo (s)	Potencial (V)	Intensidad corriente (A)	Temperatura solución (°C)		Carga (C)	Observaciones
				Celda NaCl	Celda NaOH		
Probeta 7/45	0	60,00	0,1207	20	19	4.302	Falta la lectura de 7200 segundos, en su lugar se tomaron medidas a los 8700 segundos.
	1.800	59,99	0,1352	22	21		
	3.900	59,93	0,1457	26	24		
	5.700	59,99	0,1530	28	26		
	8.700	59,99	0,1752	32	31		
	9.300	59,99	0,1796	33	32		
	11.100	59,95	0,1937	35	34		
	12.600	60,04	0,2048	37	35		
	14.400	59,98	0,2179	39	37		
	16.200	60,01	0,2273	41	39		
	18.000	60,03	0,2327	43	40		
	19.800	60,04	0,2349	40	42		
21.600	60,02	0,2362	42	43			

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

Cuadro 3.15. Resultados del ensayo de penetración forzada de cloruros para la probeta 8/45.

	Tiempo (s)	Potencial (V)	Intensidad corriente (A)	Temperatura solución (°C)		Carga (C)	Observaciones
				Celda NaCl	Celda NaOH		
Probeta 8/45	0	60,00	0,1224	19	19	4.578	La medida correspondiente a 18000 segundos, no corresponde al rango ( $60 \pm 0,1V$ ) de valores de voltaje admitido por la norma ASTM 1202-97.
	1.800	60,05	0,1422	22	21		
	3.600	60,03	0,1588	25	24		
	5.400	60,03	0,1615	28	27		
	7.200	60,01	0,1754	30	29		
	9.000	59,99	0,1883	29	29		
	10.800	59,95	0,2067	35	34		
	12.600	59,96	0,2242	39	36		
	14.400	59,94	0,2381	41	38		
	16.200	59,93	0,2461	42	42		
	18.000	59,77	0,2488	43	42		
	19.800	59,94	0,2497	45	43		
	21.600	59,96	0,2475	47	45		

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

Cuadro 3.16. Resultados del ensayo de penetración forzada de cloruros para la probeta 7/65.

	Tiempo (s)	Potencial (V)	Intensidad corriente (A)	Temperatura solución (°C)		Carga (C)	Observaciones
				Celda NaCl	Celda NaOH		
Probeta 7/65	0	60,00	0,2035	20	20	9.409	Para la lectura correspondiente a 19800 segundos la temperatura de uno de los extremos superó la temperatura máxima admitida por la norma de 90°C.  Por lo tanto esa lectura de intensidad se descarta y el ensayo se suspendió en ese momento.
	1.800	60,00	0,2522	26	25		
	3.600	59,98	0,3071	32	31		
	5.400	59,98	0,3998	38	38		
	7.200	59,99	0,5045	44	44		
	9.000	60,02	0,6130	54	52		
	10.800	60,03	0,6620	65	62		
	12.600	59,99	0,6580	74	68		
	14.400	60,01	0,6130	79	78		
	16.200	60,04	0,5830	81	80		
	18.000	60,02	0,5780	84	85		
	19.800	60,04	0,5940	87	91		

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

Cuadro 3.17. Resultados del ensayo de penetración forzada de cloruros para la probeta 8/65.

	Tiempo (s)	Potencial (V)	Intensidad corriente (A)	Temperatura solución (°C)		Carga (C)	Observaciones
				Celda NaCl	Celda NaOH		
Probeta 8/65	0	60,01	0,1588	21	20	7.824	Fue sustituida la malla del extremo negativo (NaCl), por otra de igual calibre con alambres de menor diámetro que los de la anterior.
	1.800	60,03	0,1912	24	23		
	3.600	60,00	0,2100	28	27		
	5.400	59,93	0,2401	34	32		
	7.200	59,95	0,2856	37	36		
	9.000	59,90	0,3412	42	41		
	10.800	59,95	0,3922	45	46		
	12.600	60,00	0,4290	51	51		
	14.400	60,00	0,4430	56	55		
	16.200	60,00	0,4430	61	59		
	18.000	60,01	0,4370	65	62		
	19.800	60,05	0,4340	68	64		
	21.600	60,08	0,4360	69	65		

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

Cuadro 3.18. Resultados del ensayo de penetración forzada de cloruros para la probeta 9/65.

	Tiempo (s)	Potencial (V)	Intensidad corriente (A)	Temperatura solución (°C)		Carga (C)	Observaciones
				Celda NaCl	Celda NaOH		
Probeta 9/65	0	60,00	0,1587	18	19	10.305	El ensayo realizado con la probeta obtenida de los 5cm superiores de la probeta original, quedó inconcluso, por lo cual los resultados que se muestran son los que corresponden a la probeta obtenida de los 5 cm centrales de la probeta original.
	1.800	60,00	0,2062	23	25		
	3.600	60,00	0,2438	28	29		
	5.400	60,00	0,3029	32	34		
	7.200	60,00	0,3897	38	40		
	9.000	60,00	0,4680	45	47		
	10.800	60,00	0,5250	52	53		
	12.600	60,03	0,5490	59	58		
	14.400	60,05	0,5680	65	64		
	16.200	60,05	0,5860	70	68		
	18.000	59,90	0,5980	72	74		
	19.800	59,95	0,6210	76	77		
21.600	59,99	0,6420	79	82			

De acuerdo a lo establecido en la norma se concluye que los resultados obtenidos para todas las probetas, para ambas dosificaciones corresponden a hormigones de alta permeabilidad al ión Cl<sup>-</sup> ya que la carga total obtenida fue mayor a 4000 Culombios (C).

Un aspecto que podría haber contribuido en reducir la permeabilidad al ión

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

CI, podría haber sido que el cemento utilizado hubiera tenido un elevado contenido de aluminato tricálcico, que se combina con los mismos y es capaz de retenerlos. El cemento utilizado, provino de la planta Paysandú, con un contenido de  $C_3A$  de 2,65 % (m/m). Según estudios que realizó la Ing. Patricia Vila, en su tesis de Maestría (Vila, [59]), en los cementos estudiados, observó que el contenido de  $C_3A$  del cemento Paysandú es significativamente más bajo al de la planta Minas con 6,68 % (m/m). También concluyó que el comportamiento de las armaduras frente a la corrosión en los hormigones con el cemento Paysandú, resultó peor que en el cemento de la planta Minas. Entre otros, encontró que el inicio de la corrosión se producía en menor tiempo para los cementos de la planta Paysandú que para los de Minas.

En la Figura 3.17 se muestra la gráfica de intensidad de corriente en función del tiempo con los resultados de las probetas ensayadas.

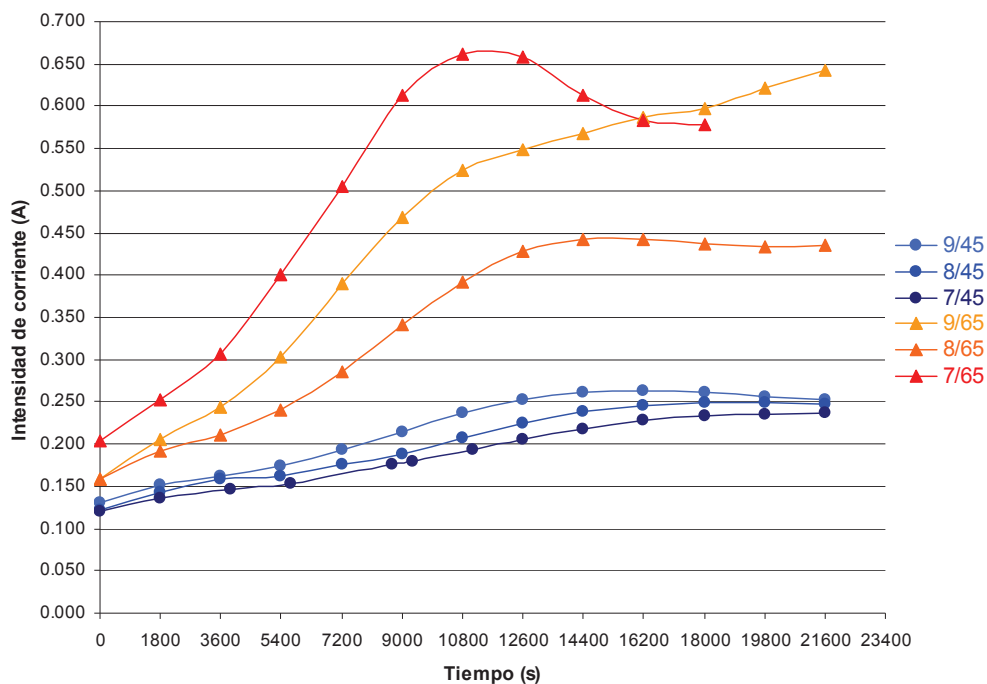


Figura 3.17. Ensayos de penetración forzada para ambas mezclas.

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

Como ya fue indicado en la columna de observaciones, el ensayo realizado con la probeta obtenida de los 5 cm superiores de la probeta 9s/65 (coredrill de 15 cm de alto) quedó inconcluso, por lo cual los resultados que se muestran son los correspondientes a la probeta obtenida de los 5 cm centrales de la mencionada probeta.

En la Foto 3.7 se muestra el montaje del ensayo de penetración forzada de ión  $Cl^-$ . A la izquierda de la fotografía puede apreciarse la fuente de 60 V y sobre ésta el voltímetro y el amperímetro utilizados. Sobre la derecha se observan las celdas de acrílico confeccionadas según la norma ASTM C1202 (ASTM, [4]), para este ensayo. En la Foto 3.8 pueden apreciarse con detalle dichas celdas.



Foto 3.7. Montaje para el ensayo de penetración forzada de ión  $Cl^-$ .

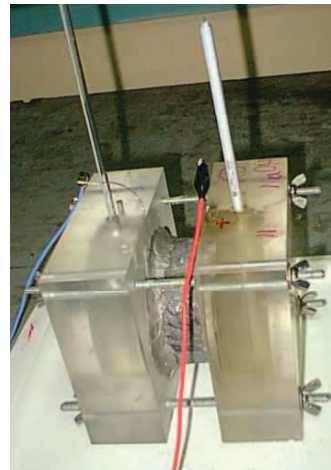


Foto 3.8. Celdas para ensayo de penetración forzada de ión  $Cl^-$

En las fotos se distinguen los termómetros utilizados para controlar la temperatura en cada celda.

Como elemento de sellado entre la probeta y el acrílico de las celdas se utilizó masilla sintética para sellado de carrocerías del tipo “siempre viva”. Se optó por utilizar dicho material ya que no fue posible realizar el sellado con



### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

anillos de goma del tipo “o-ring”.

Al final del ensayo de la probeta 7/65, se sustituyeron los electrodos de ambas celdas debido a su deterioro. La nueva malla utilizada para los electrodos fue de igual calibre pero con alambres de menor diámetro. Esta nueva malla resistía un solo ensayo, entonces para los restantes se debió sustituir los electrodos al final de cada ensayo. En la Foto 3.9 y la Foto 3.10 se puede apreciar el estado final de una de las mallas que se utilizó en una probeta con relación  $a/c=0,65$ .



Foto 3.9. Estado de la malla una vez finalizado el ensayo de una probeta con relación  $a/c=0,65$ .



Foto 3.10. Estado final de un electrodo en celda de NaOH para probeta con rel.  $a/c=0,65$ .

#### 3.2.4.4 Ensayo de resistividad eléctrica

Este ensayo se realizó según las instrucciones del proyecto de norma española PrUNE “Determinación de la resistividad eléctrica de probetas y testigos de hormigón endurecido, Parte I: Método directo”, 2001 (PrUNE, [58]). El mismo se realizó sobre las probetas cilíndricas destinadas a ser ensayadas a tracción aprovechando que no era necesario encabezarlas. Este ensayo requiere medir la intensidad de corriente que circula por la probeta. Para las probetas del estudio,

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

dicha corriente resultó muy baja y por lo tanto con un error asociado grande. Para subsanar este aspecto, se tuvo en cuenta que en general las medidas de potencial eléctrico poseen menor error que las de intensidad de corriente. Por esta razón se intercaló al circuito una resistencia conocida ( $R_1 = 1\text{K}\Omega$ ), en serie con la probeta, de forma de medir el potencial sobre la resistencia  $R_1$  y calcular así la intensidad que circula por la probeta. Además, se realizó el ensayo sin probeta, solo con las dos almohadillas para encontrar la resistencia de las mismas. Luego al valor obtenido para el conjunto probeta más almohadillas, se le descontó el valor de la resistencia de las almohadillas, obteniendo así, solamente el valor que corresponde a la resistencia de la probeta. Finalmente, con este resultado, y el valor de factor de forma que corresponde a una probeta cilíndrica, se calculó la resistividad de las probetas.

Los ensayos se realizaron sobre probetas con 28 y 90 días de edad. En la Figura 3.18 se puede observar el esquema del circuito eléctrico montado para este ensayo.

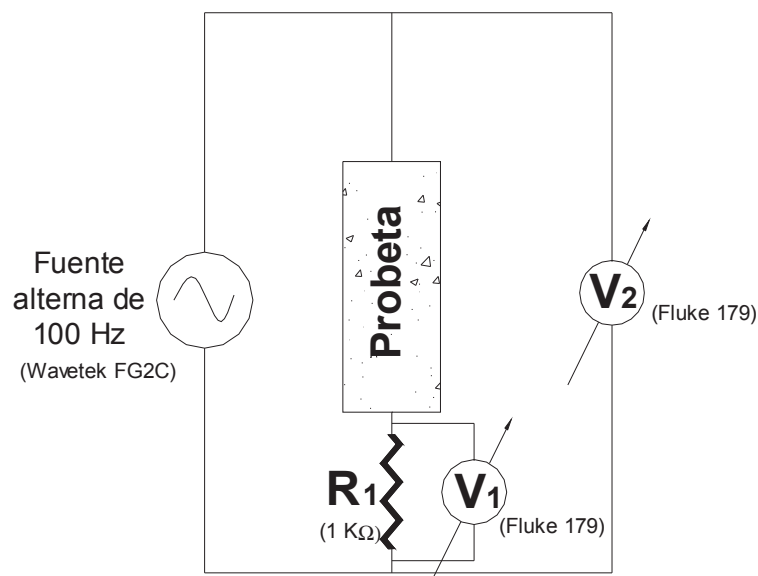


Figura 3.18. Circuito utilizado para el ensayo de resistividad.

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

En el Cuadro 3.19 y el Cuadro 3.20 se presentan los registros de las distintas magnitudes que intervienen en el ensayo, y los resultados finales obtenidos sobre cada una de las probeta con 28 y 90 días de edad respectivamente.

Cuadro 3.19. Resultados obtenidos para el ensayo de resistividad a los 28 días.

Probeta	Diámetro (cm)	Largo probeta (cm)	V <sub>1</sub> (V)	V <sub>2</sub> (V)	Intensidad corriente (A)	Resistencia probeta (Ω)	Resistividad (KΩ.cm)
4/45	14,9	29,9	4,20	7,45	0,004	754,2	4,4
8/45	14,6	30,0	4,15	7,46	0,004	778,0	4,4
11/45	14,8	29,8	4,24	7,40	0,004	725,7	4,2
1/45	15,1	29,9	4,20	7,45	0,004	754,2	4,5
7/45	14,8	29,9	4,11	7,44	0,004	790,6	4,6
10/45	14,9	30,0	4,12	7,43	0,004	783,8	4,5
4/65	14,8	29,7	4,41	7,40	0,004	658,4	3,8
8/65	14,8	29,8	4,52	7,41	0,005	619,8	3,6
11/65	14,8	29,9	4,64	7,42	0,005	579,5	3,3
1/65	14,7	29,7	4,40	7,47	0,004	678,1	3,9
7/65	14,8	29,5	4,46	7,46	0,004	653,0	3,8
10/65	14,8	29,6	4,55	7,44	0,005	615,6	3,6
Resistencia de 2 esponjas sin probeta			1,53	1,56	0,002	19,6	

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

Cuadro 3.20. Resultados obtenidos para el ensayo de resistividad a los 90 días

Probeta	Diámetro (cm)	Largo probeta (cm)	V <sub>1</sub> (V)	V <sub>2</sub> (V)	Intensidad corriente (A)	Resistencia probeta (Ω)	Resistividad (KΩ.cm)
1/45	15,1	29,9	2,95	7,47	0,003	1519,5	9,1
7/45	14,8	29,9	2,88	7,48	0,003	1584,5	9,1
10/45	14,9	30,0	2,93	7,46	0,003	1533,4	8,9
1/65	14,7	29,7	3,09	7,46	0,003	1401,5	8,0
7/65	14,8	29,5	3,28	7,46	0,003	1261,7	7,4
10/65	14,8	29,6	3,37	7,45	0,003	1198,0	6,9
Resistencia de 2 esponjas sin probeta			7,16	7,25	0,007	12,7	

Obsérvese que las resistividades de un mismo hormigón aumentaron de los 28 días a los 90 días. En ambos casos se obtuvieron valores de resistividad inferiores a 10 KΩ.cm que según el manual DURAR (T. de Rincón et al., [55]) corresponden a hormigones con alto riesgo de corrosión de las armaduras.

Las probetas ensayadas a los 28 días fueron curadas por inmersión en agua de cal durante 7 días y luego embolsadas hasta el día de ensayo. Las ensayadas a los 90 días además, luego de los 28 días, se dejaron en la atmósfera del laboratorio para finalmente sumergirlas en agua de cal 24 hs antes del ensayo.

#### 3.2.4.5 Ensayo de resistencia a tracción

Los ensayos de resistencia a tracción se realizaron a los 28 días, según la norma ASTM C496 (ASTM, [10]). En el Cuadro 3.21 se presentan los resultados obtenidos.

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

Cuadro 3.21. Resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

Probeta	Diámetro medio (cm)	Largo medio (cm)	Carga de rotura (N)	Tensión de rotura (MPa)
4/45	14,85	29,90	205.000	2,94
8/45	14,60	29,95	187.000	2,72
11/45	14,80	29,80	228.000	3,29
4/65	14,83	29,70	179.000	2,59
8/65	14,75	29,75	140.000	2,03
11/65	14,80	29,85	174.000	2,51

El resultado obtenido para la probeta 8/45 se descartó debido a la forma de rotura de la misma. En la Foto 3.11 y la Foto 3.12, se observa que la rotura no fue según un plano meridiano, característica de este ensayo.



Foto 3.11. Foto de la rotura de la probeta 8/45.



Foto 3.12. Foto de la rotura de la probeta 8/45.

## 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

### 3.2.4.6 Ensayo de módulo de elasticidad 28 días, norma ASTM C469

Los ensayos de determinación del módulo de elasticidad estático se realizaron a los 28 días según la norma ASTM 469 (ASTM, [9]). En la Foto 3.13 y la Foto 3.14 se muestra el aparato utilizado para medir el acortamiento de las probetas. Dicho acortamiento es leído directamente en el comparador adecuadamente graduado.



Foto 3.13. Dispositivo que permite medir el acortamiento de la probeta.

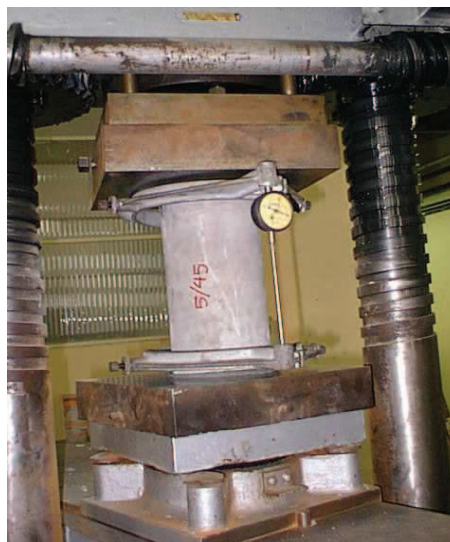


Foto 3.14. Ensayo de módulo de elasticidad.

En el Cuadro 3.22 se presentan los resultados obtenidos para los ensayos de módulo de elasticidad estático para ambas dosificaciones. A su vez, la Figura 3.19 contiene las curvas tensión-deformación unitaria obtenidas para todas las probetas, donde la tensión final que se muestra está en el entorno del 40% de la tensión de rotura a compresión de cada probeta, valor entendido como límite de las lecturas en este ensayo.

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

Cuadro 3.22. Resultados de ensayos de Módulo de elasticidad a los 28 días.

Probeta	Diámetro medio (cm)	Long. Inicial (in)	Carga de rotura (N)	Tensión de rotura (MPa)	Tensión para $\epsilon = 0,05 \text{ ‰}$ (MPa)	Deformación unitaria para $\sigma = 0,4 \sigma_{rot}$ (‰)	Módulo de Elasticidad (GPa)
2/45	14,90	10,00	672.000	38,54	2,71	0,489	28,91
5/45	14,83	10,00	811.000	46,95	3,04	0,583	29,52
12/45	14,70	10,00	713.000	42,01	2,42	0,486	32,96
2/65	14,75	9,98	506.000	29,61	2,93	0,395	25,86
5/65	14,85	10,00	452.000	26,10	2,31	0,328	29,23
12/65	14,75	10,00	520.000	30,43	2,93	0,391	27,14

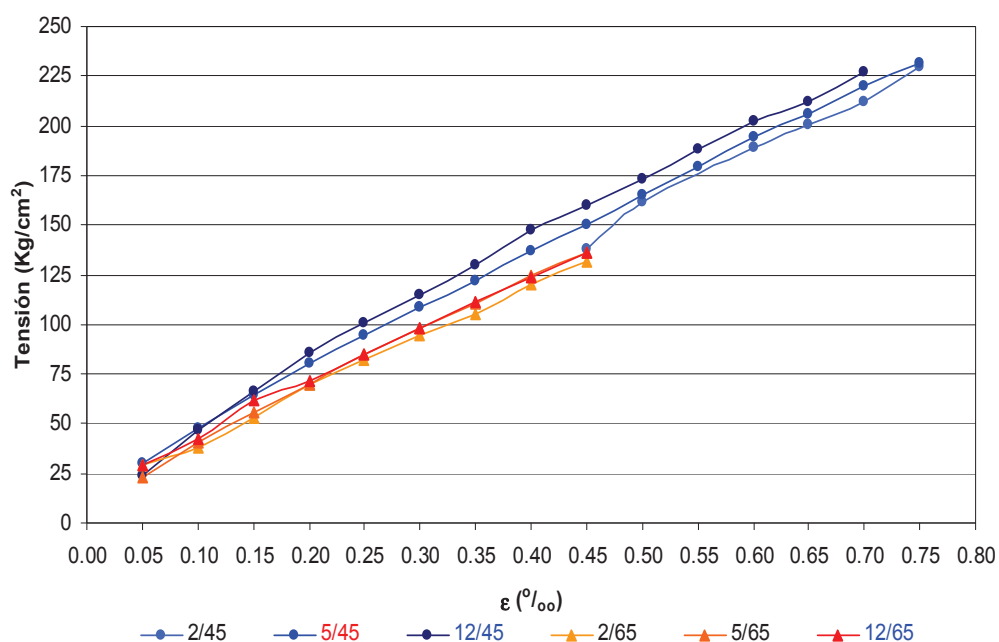


Figura 3.19. Curvas tensión-deformación unitaria para ambas mezclas.

## 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

### 3.2.4.7 Ensayo de resistencia a compresión

Los ensayos de resistencia a compresión se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C39 (ASTM, [8]), en ejemplares con 28 y 90 días de edad. En el Cuadro 3.23 y el Cuadro 3.24 se presentan para cada una de las mezclas y ejemplares, los resultados de resistencia a la compresión a los 28 días.

Cuadro 3.23. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días, para la relación a/c=0,45.

Probeta	Pastón	Diámetro (cm)	Carga de rotura (N)	Tensión de rotura (MPa)
2/45	1-45	14,90	672.000	38,54
3/45	2-45	14,80	815.000	47,37
6/45	3-45	14,85	810.000	46,77
5/45	3-45	14,83	811.000	46,95
9/45	4-45	14,85	512.000	29,56
12/45	5-45	14,70	713.000	42,01

Cuadro 3.24. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días, para la relación a/c=0,65

Probeta	Pastón	Diámetro (cm)	Carga de rotura (N)	Tensión de rotura (MPa)
2/65	1-65	14,75	506.000	29,61
3/65	2-65	14,85	500.000	28,87
6/65	3-65	14,75	320.000	18,73
5/65	3-65	14,85	452.000	26,10
9/65	4-65	14,90	470.000	26,95
12/65	5-65	14,75	520.000	30,43



### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

Los valores de las probetas 9/45 y 6/65 son apreciablemente diferentes que el resto de los valores de su misma dosificación.

En el Cuadro 3.25 se presentan los resultados de resistencia a la compresión a los 90 días para ambas mezclas.

Cuadro 3.25. Resistencia a la compresión para ambos hormigones a los 90 días

Probeta	Pastón	Diámetro (cm)	Carga de rotura (N)	Tensión de rotura (MPa)
1/45	1-45	15,1	930.000	52,28
7/45	3-45	14,8	885.000	51,44
10/45	4-45	14,9	616.000	35,57
1/65	1-65	14,7	570.000	33,59
7/65	3-65	14,9	609.000	34,93
10/65	5-65	14,8	590.000	34,53

El valor de la probeta 10/45, es apreciablemente diferente al resto de los valores de su misma dosificación.

Los valores de la resistencia a la compresión, tanto a los 28 días como a los 90 días, de las probetas elaboradas con el pastón 4 del hormigón con relación  $a/c=0.45$ , resultaron mucho menores que los valores obtenidos para los otros pastones, que son similares entre sí. En los demás ensayos en que aparecen probetas fabricadas con el pastón 4 (Fagerlund y resistividad), los valores obtenidos son similares al del resto de los pastones con igual  $a/c$ . Por tanto no parece razonable atribuir estos resultados anómalos a la falta de homogeneidad en el hormigón de ese pastón ya que ella debería haberse manifestado también en el resto de los ensayos.

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

Como se destacó anteriormente, se dieron resultados aislados, tanto en los ensayos a los 28 como los 90 días, donde se encontraron valores marcadamente apartados del resto. Esto llevó a suponer que hubo algún error en dichos ensayos o en la confección de esas probetas, por lo cual se descartaron dichos valores para obtener un valor promedio del ensayo.

#### 3.2.4.8 Resumen de las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones elaborados

En el Cuadro 3.26 se resumen los resultados obtenidos de las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones de las probetas elaboradas.

Cuadro 3.26. Resumen de las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones de las probetas.

Ensayo		Hormigón a/c = 0,45	Hormigón a/c = 0,65
Penetración forzada de cloruros	Carga (C)	4609	9180
	Clasificación según norma	Alta permeabilidad al ión Cl <sup>-</sup>	Alta permeabilidad al ión Cl <sup>-</sup>
Resistividad (KΩ.cm)		4,4	3,7
Absorción total (%)		5,2	6,5
Porosidad total (%)		11,8	14,0
Absorción Capilar (kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> )		0,0196	0,0267
Resistencia penetración de agua (s/m <sup>2</sup> )		3,3.10 <sup>7</sup>	3,2.10 <sup>7</sup>
Sorci3n Capilar (m/s <sup>1/2</sup> )		1,7.10 <sup>-4</sup>	1,8.10 <sup>-4</sup>

### 3.2. Elaboración de los ejemplares

---

Peso Unitario (kg/m <sup>3</sup> )	2473	2433
Resistencia a tracción, 28 días (MPa)	3,1	2,4
Resistencia a compresión, 28 días (MPa)	44,3	28,4
Resistencia a compresión, 90 días (MPa)	46,4	34,3
Módulo de elasticidad, 28 días (GPa)	30,46	27,41

#### 3.2.5 Llenado de los moldes para los ejemplares y las muestras a ensayar

El vaciado de los moldes para los ejemplares y las probetas se realizó según prescripción de la norma ASTM C192 (ASTM, [2]). Con respecto al vibrado, de los moldes, se optó por el método manual el cual se entiende es más representativo como procedimiento seguido en muchas obras de nuestro medio.

A cada tipo de hormigón se le realizó un ensayo de exudación según la norma ASTM C232 (ASTM, [7]), a efectos de controlar la relación a/c con la que efectivamente resultó.

Para la elaboración de los hormigones se contó con colaboración de la empresa CONCREXUR S.A., que dispuso de sus instalaciones, personal y materiales necesarios.

## 3.3. Exposición y seguimiento de los ejemplares

### 3.3.1 Exposición de los ejemplares en las estaciones de ensayo natural

Los ejemplares prismáticos de 15cm x 15cm x 30cm fueron instalados en las estaciones de ensayo, a los 28 días de edad. El emplazamiento de los mismos fue sobre soportes de madera especialmente diseñados de tal forma que mantienen los ejemplares a 1m sobre el nivel del suelo, y con una de las caras expuesta a los vientos dominantes, que en el caso de ambas estaciones, provienen de la dirección NE. Además de los ejemplares, se instalaron dos casetas para el registro de los contenidos atmosféricos de ión  $Cl^-$  y los óxidos de azufre.

A continuación, en la Foto 3.15 y Foto 3.16, se muestra el emplazamiento de los ejemplares y las casetas de monitoreo atmosférico en las estaciones “Prado” y “La Paloma”.



Foto 3.15. Exposición de los ejemplares en la Estación “Prado”.



Foto 3.16. Exposición de los ejemplares en la Estación “La Paloma”.

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

A continuación, en la Figura 3.20 se muestra un corte transversal, donde se detalla el esquema de apoyo de los ejemplares. Las bases de apoyo fueron confeccionados en madera dura previendo con este diseño no obstaculizar el escurrimiento del agua de lluvia, ni reducir el área expuesta a la atmósfera de los ejemplares.

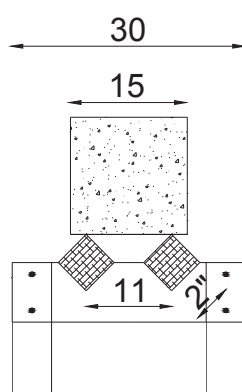


Figura 3.20. Apoyo de las probetas. Corte transversal

En la Figura 3.21 se presenta en relación a la dirección del viento dominante, el emplazamiento general en planta de las bases para los ejemplares y las casetas donde se instalaron los dispositivos para registrar el ión  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{SO}_2$  en la atmósfera.

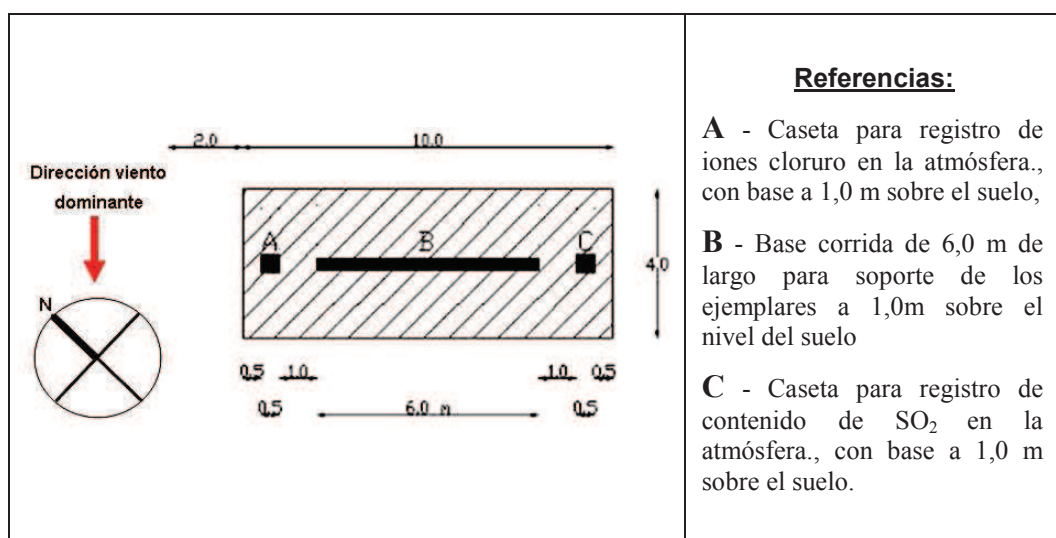


Figura 3.21. Ubicación en planta de las bases para los ejemplares y las casetas.

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

#### 3.3.2 Seguimiento de parámetros de durabilidad y corrosión

En cada una de las estaciones de ensayo natural, se realizó un seguimiento periódico de varios parámetros vinculados a la durabilidad y la corrosión de los ejemplares. A continuación se presenta el Cuadro 3.27 donde se detalla: los ensayos y la frecuencia con que se realizaron los mismos, los espécimen o muestras utilizadas; y las técnicas empleadas.

Cuadro 3.27. Ensayos para el seguimiento de los parámetros de durabilidad y corrosión.

<b>Ensayo</b>	<b>Frecuencia de realización</b>	<b>Espécimen / muestra de ensayo</b>	<b>Técnicas utilizados</b>
Profundidad de carbonatación	Anual	Rebanada de 5cm de espesor extraída de los ejemplares de 15 cm x 15 cm x 30 cm sin armadura	Tinción con fenolftaleína sobre la cara expuesta que resulta del corte del hormigón (T. de Rincón et al., [55]) .
Perfil de penetración del ión Cl <sup>-</sup> libre en el hormigón	Anual	Rebanada de 5 cm de espesor extraída de los ejemplares de 15 cm x 15 cm x 30 cm sin armadura	Química analítica. Método de Volhard (RILEM, [38]) (RILEM, [37]) sobre muestras de polvo de hormigón extraído en intervalos de 5 mm de profundidad, de la cara expuesta y resguardado de cada rebanada, hasta 3 cm de profundidad.

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

Resistividad del hormigón	Mensual	Ejemplares 15 cm x 15 cm x 30 cm con armaduras	Electroquímica. Pulso potencioestático aplicado con disco circular a las armaduras. (Luping, [42]).
Velocidad de corrosión	Mensual	Ejemplares 15 cm x 15 cm x 30 cm con armaduras	Electroquímica. Pulso potencioestático aplicado a las armaduras. (Andrade et al., [13]).
Potencial de corrosión	Mensual	Ejemplares 15 cm x 15 cm x 30 cm con armaduras	Medición del potencial eléctrico de las armaduras con electrodo de referencia. norma ASTM C876 (ASTM, [3]).
Contenido de ión Cl <sup>-</sup> en la atmósfera	Registro continuo. Análisis de resultados mensual	Vela de muestreo en contacto con la atmósfera	Química analítica. Método de Mohr (Christian, [24]).
Contenido de CO <sub>2</sub> en la atmósfera	Mensual	Muestra de aire	Química analítica. Método de Pettenkoffer (Pettenkofer, [46]).
Contenido de SO <sub>2</sub> en la atmósfera	Registro continuo. Análisis de resultados mensual	Vela de muestreo en contacto con la atmósfera.	Química analítica. norma ASTM D 516 (ASTM, [12]).

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

#### 3.3.2.1 Velocidad y potencial de corrosión

La velocidad de corrosión de las armaduras, habitualmente expresada como densidad superficial de corriente de corrosión ( $i_{corr.}$ ), se obtuvo a partir de un ensayo electroquímico. Dicho ensayo en términos generales, consistió en aplicar mediante un electrodo auxiliar (contraelectrodo), un pulso potencioestático a la barra objeto de estudio y medir su comportamiento electroquímico. Esta técnica permite obtener la intensidad de corriente de corrosión ( $I_{corr.}$ ) y finalmente la densidad superficial de corriente de corrosión ( $i_{corr.}$ ). Para ello se asumió que el modelo de comportamiento eléctrico del sistema hormigón – armadura corroyéndose (celda de corrosión), se ajusta al circuito equivalente de Randle (Andrade et al., [13]), (Luping, [42]).

En la Figura 3.22, se muestra la correspondencia entre los elementos de la probeta de estudio, y el modelo eléctrico adoptado.

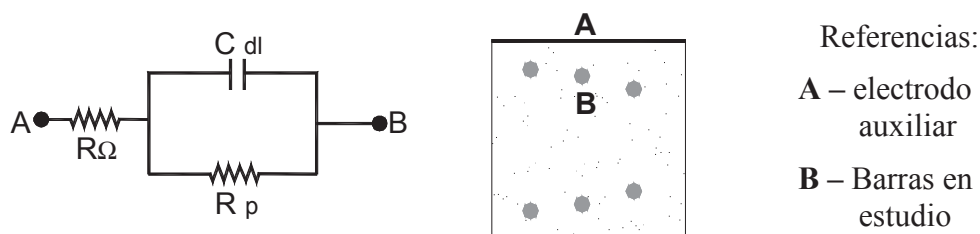


Figura 3.22. Circuito de Randle. Modelo equivalente de la celda de corrosión.

En dicho circuito  $R_{\Omega}$  representa la resistencia eléctrica del hormigón (electrolito),  $R_p$  la resistencia de polarización de la armadura y  $C_{dl}$  la capacitancia de la doble capa debida a la polarización de esta última.

En la Figura 3.23 se muestra el esquema del circuito eléctrico montado para la realización del ensayo de velocidad y potencial de corrosión. Para la medida del potencial de corrosión, no se utilizó el electrodo auxiliar, sólo se utilizó el electrodo de referencia y el electrodo de trabajo.



### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

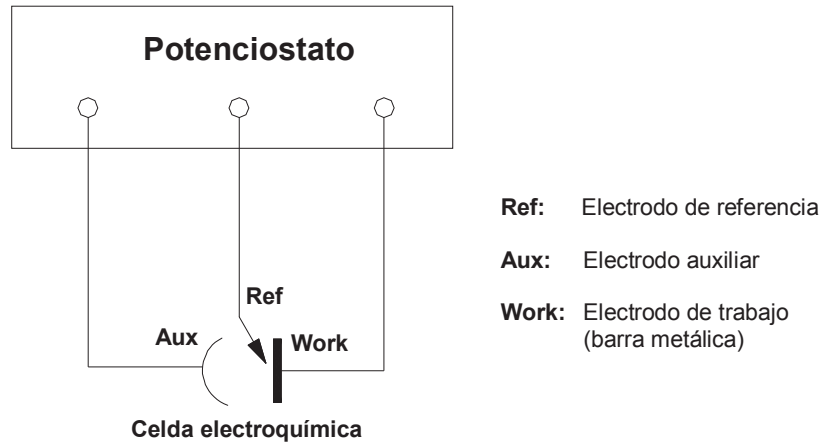


Figura 3.23. Esquema del circuito eléctrico montado para el ensayo de  $I_{corr}$ .

Para ambas medidas, se usó un potencióstato/galvanostato marca Radiometer-Copenhagen, modelo PGP 201 controlado por el software Voltmaster 4, versión 5.1.0.1, (Radiometer, [49]). El electrodo de referencia utilizado en ambos casos fue de Hg/Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>/KCl (calomelanos). El electrodo auxiliar (contraelectrodo) se materializó con una malla de latón calibre N°20 de dimensiones 15cm x 30cm, que cuenta con tres orificios circulares, de diámetro algo mayor al del electrodo de referencia, que permiten alojarlo, para la medida de cada una de las barras.

Tanto para el ensayo de potencial como de velocidad de corrosión, se aplicó un pulso potencióstático, que produce una polarización de las armaduras de 10 mv, la cual permite conservar el comportamiento del fenómeno dentro del rango lineal. La malla se apoyó sobre una almohadilla húmeda en contacto directo con el hormigón para lograr una buena conducción eléctrica entre ambos.

En la Figura 3.24 se presenta el esquema del montaje para la realización de dichos ensayos. El detalle del contacto entre el electrodo de referencia, el electrodo auxiliar y la probeta puede observarse en la Figura 3.25.

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

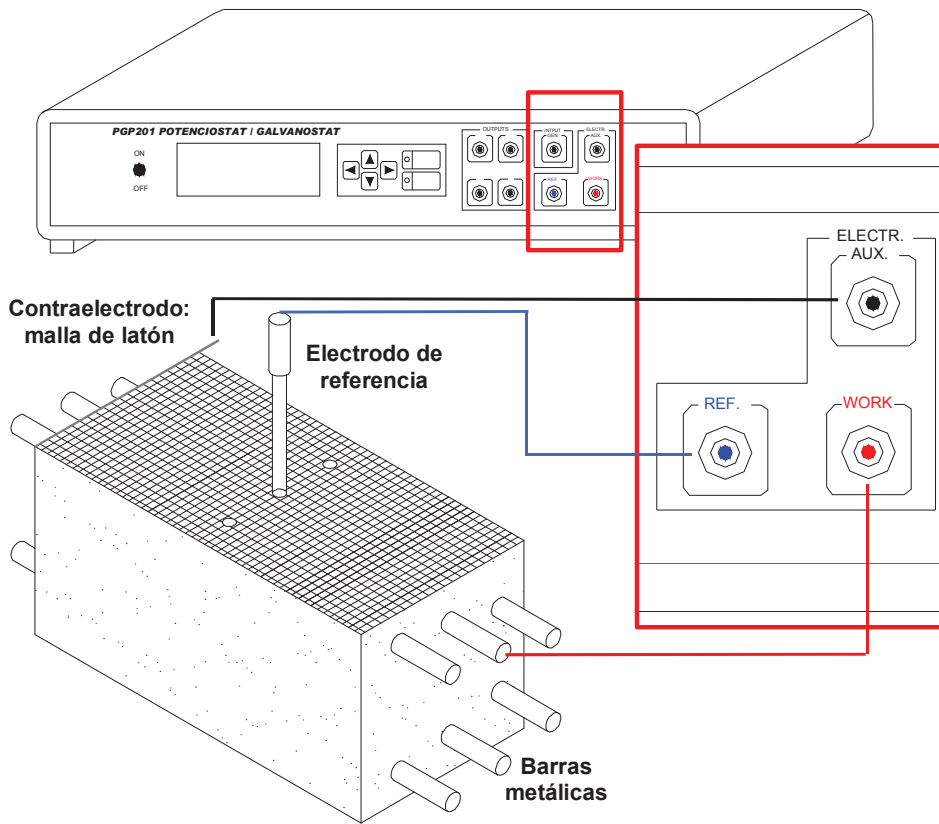


Figura 3.24. Esquema del montaje para el ensayo de  $I_{corr}$  y  $E_{corr}$ .

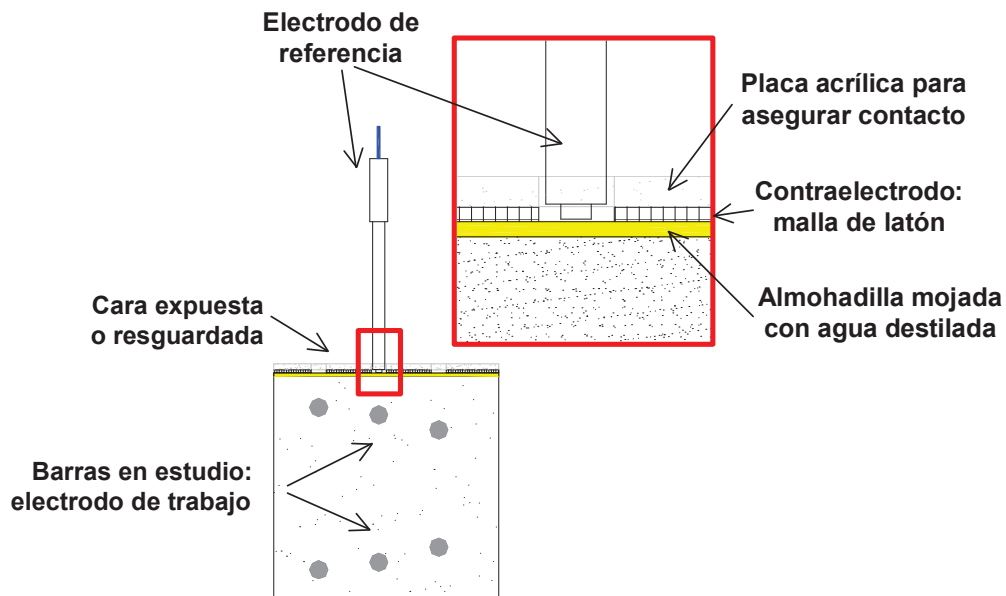


Figura 3.25. Detalle del apoyo del electrodo de referencia.

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

En la Foto 3.17 se presenta la instrumentación de una de las probetas para el registro de  $I_{corr}$  y  $E_{corr}$ .

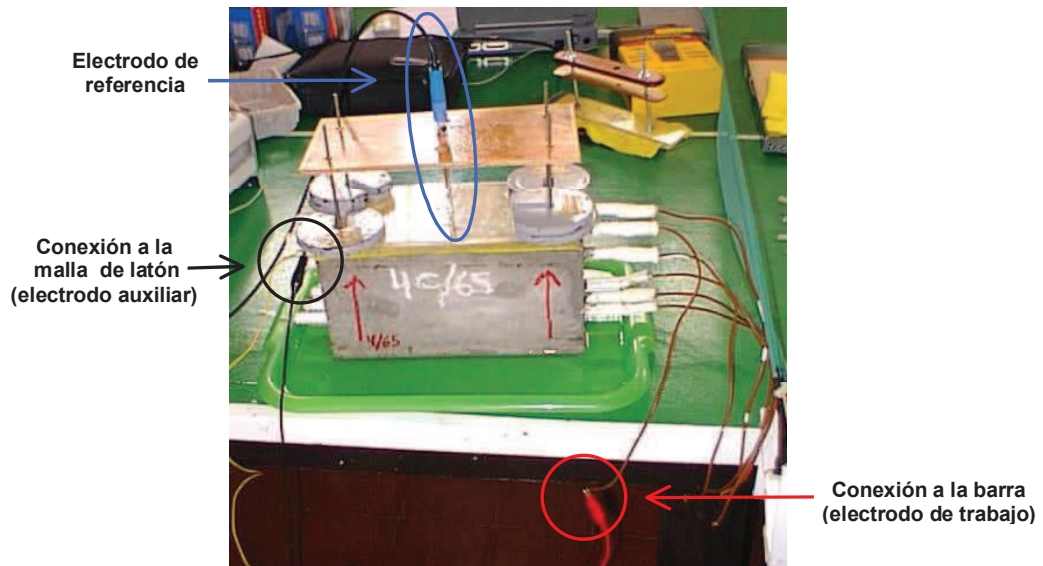


Foto 3.17. Instrumentación para los ensayos de  $I_{corr}$  y  $E_{corr}$ .

En la Foto 3.18 se observa el dispositivo construido para sostener el electrodo de referencia, y mejorar el contacto del electrodo auxiliar con la superficie del hormigón, mediante el uso de pesas que lo presionan.



Foto 3.18. Dispositivo para soporte del electrodo de referencia.

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

Este ensayo se repite para cada una de las barras y consta de tres fases, en las cuales se somete a la celda conformada por el electrodo de trabajo (barra), electrodo auxiliar y el hormigón en contacto con estos, a diferentes condiciones eléctricas que se describen más adelante. Durante el desarrollo de dichas fases, se registra en función del tiempo, el potencial eléctrico de la barra respecto del electrodo de referencia y la intensidad de corriente que circula por la celda (ver Figura 3.26). Luego para hallar los parámetros eléctricos del circuito equivalente de Randle, se resuelve el mismo con los resultados obtenidos de cada fase.

En la primer fase del ensayo, sin aplicar polarización a la celda, se registran los valores del potencial libre o de corrosión ( $E_{corr}$ ), el cual se mantiene constante durante un tiempo  $t_1$  (aproximadamente 40 y 60 segundos), mientras la intensidad de corriente en la celda se estabiliza a un valor constante  $I_1$ . (ver Figura 3.26). En esta fase, una vez que la corriente se estabiliza en  $I_1$ , significa que no circula corriente por el condensador. Por lo cual el circuito es equivalente a las resistencias  $R_\Omega$  en serie con la  $R_p$  sometidas a una diferencia de potencial igual a  $E_{corr}$  y a una corriente  $I_1$ . Luego aplicando la ley de Ohm se tiene que:

$$E_{corr}=(R_\Omega+R_p)\cdot I_1 \quad (3.1)$$

Al fin del período  $t_1$  el potenciostato eleva instantáneamente el potencial libre de la barra ( $E_{corr}$ ) en 10 mV, alcanzándose una intensidad máxima  $I_2$  (ver Figura 3.26). Durante el salto de potencial se admite que el condensador se carga, rápidamente, por lo que se comporta aproximadamente como un conductor, quedando cortocircuitada  $R_p$ . Por lo tanto el circuito se reduce a la resistencia  $R_\Omega$  sometida a una diferencia de potencial de 10 mV y una corriente ( $I_2-I_1$ ). Entonces aplicando la ley de Ohm se tiene que:

$$R_\Omega=10 \text{ mV}/(I_2-I_1) \quad (3.2)$$

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

Finalmente durante el período ( $t_2-t_1$ ) (generalmente 120 segundos) se mantiene elevado el potencial de la barra en ( $E_{corr}+10\text{ mV}$ ), mientras que se alcanza la estabilización de la corriente que circula por la celda en un valor  $I_3$  (ver Figura 3.26). En esta situación, no circula intensidad de corriente por el condensador, entonces el circuito se reduce a la resistencia  $R_\Omega$  en serie con la  $R_p$  sometidas a una diferencia de potencial ( $E_{corr}+10\text{ mV}$ ) y corriente  $I_3$ . Por la ley de Ohm se tiene que:

$$E_{corr}+10\text{ mV}=(R_\Omega+R_p).I_3 \quad (3.3)$$

Luego, resolviendo el sistema de ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3), se llega a que la resistencia de polarización de la barra tiene la siguiente expresión:

$$R_p=(10\text{ mV})/(I_3-I_1)-R_\Omega. \quad (3.4)$$

A continuación la intensidad de corriente de corrosión ( $I_{corr.}$ ) se obtiene de la fórmula de Stern y Geary que tiene la siguiente expresión:

$$I_{corr.}=B/R_p \quad (3.5)$$

Siendo:

$B = 26\text{ mV}$  para corrosión iniciada o,  $52\text{ mV}$  para corrosión incipiente (Andrade et al., [13]).

Finalmente, la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr.}$ ) se obtiene como:

$$i_{corr.}=I_{corr.}/\Omega_{exp}. \quad (3.6)$$

Siendo:

$\Omega_{exp.}$  = área de la superficie expuesta de la varilla objeto de estudio.

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

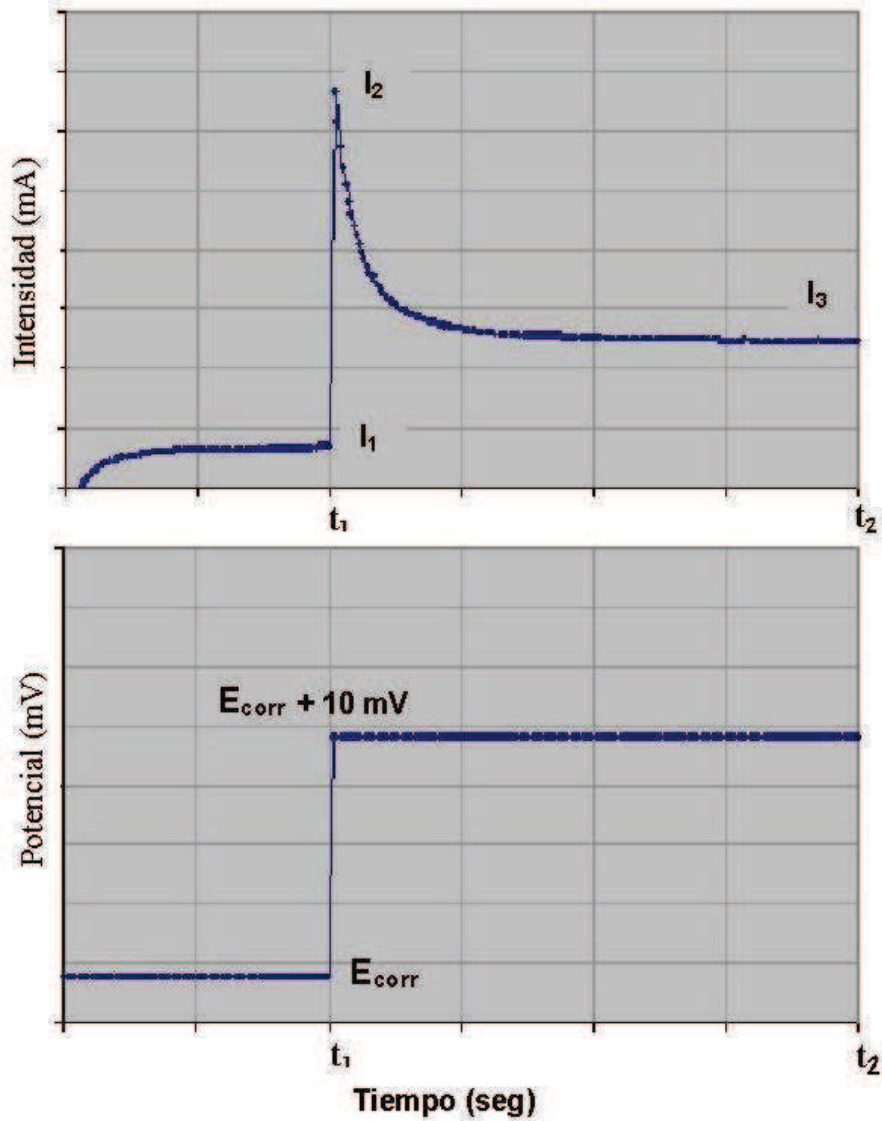


Figura 3.26. Gráficas tipo de  $I$  y  $E$  vs tiempo, en barras objeto de estudio

La medida del potencial de corrosión de las armaduras, se realizó según la norma ASTM C 876 (ASTM, [3]), utilizando el mismo electrodo de referencia  $Hg/Hg_2Cl_2/KCl$  que en el ensayo de velocidad de corrosión. Dicho ensayo se realizó previamente al de velocidad de corrosión, para evitar el registro de valores distorsionados, debido a que el ensayo de velocidad de corrosión, polariza las armaduras, modificando los valores de  $E_{corr}$ .

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

#### 3.3.2.2 Resistividad eléctrica del hormigón

Para determinar la resistividad eléctrica del hormigón, se implementó cambiando la geometría del electrodo auxiliar, el mismo ensayo electroquímico de pulso potencioestático (Luping, [42]) que se usó en el ensayo de velocidad de corrosión. En este caso, se utilizó un disco de malla de latón, calibre N°20, de 2 cm de diámetro (Feliu et al., [29]), del cual se conoce el factor de forma  $K$  que permite vincular la resistencia eléctrica entre este y la barra, con la resistividad del hormigón. La expresión de  $K$  es la siguiente:

$$K = 2.\Phi \quad (3.7)$$

Siendo:

$\Phi$  = diámetro del disco.

La disposición de los electrodos de trabajo, auxiliar y de referencia es la que se muestra en la

Figura 3.27.

El valor de la resistencia eléctrica  $R_{\Omega}$ , es la que se obtiene en la segunda fase del experimento, por lo que no es necesario culminar la tercera, reduciéndose el ensayo a un intervalo de tiempo de 5 segundos.

Finalmente la resistividad eléctrica del hormigón de la probeta tiene la expresión:

$$\rho = K.R_{\Omega} \quad (3.8)$$

Este procedimiento se repitió para cada una de las barras de la probeta, lo cual requirió enfrentar el disco con cada barra que se ensayó.

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

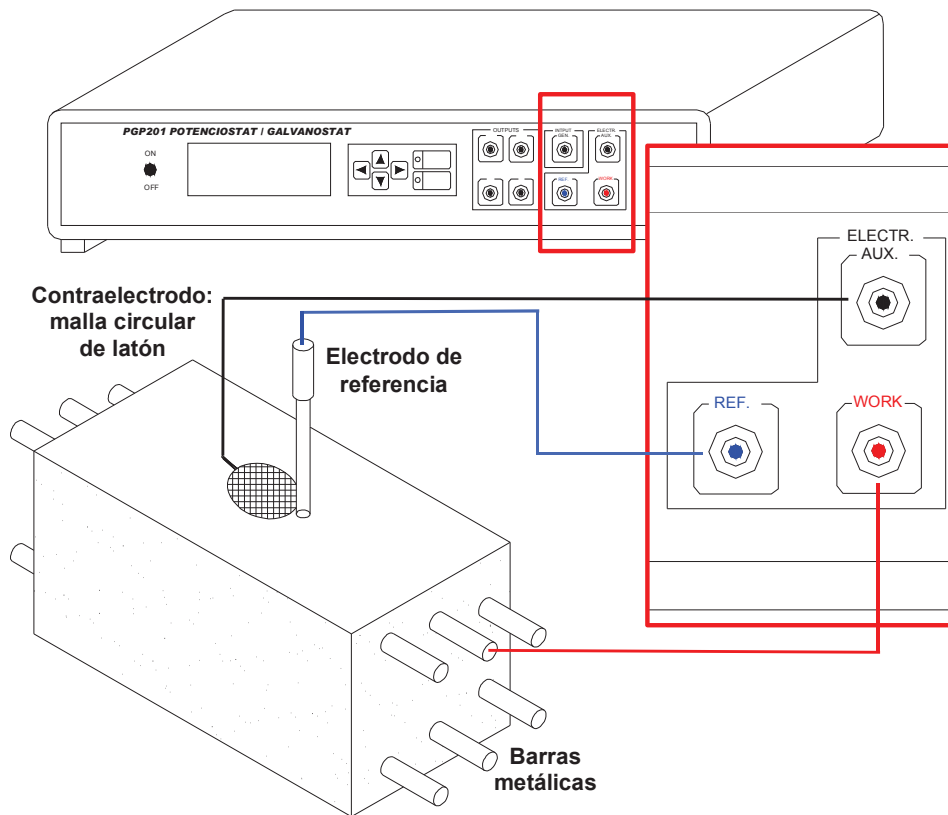


Figura 3.27. Montaje utilizado para medir la resistividad del hormigón.

Tanto el electrodo de referencia como el electrodo auxiliar, no se colocan directamente sobre la probeta, sino que el contacto entre ellos se realiza a través de una almohadilla humedecida con agua destilada.

En la Foto 3.19 se muestra la probeta 4/65 instrumentada para medir la resistividad eléctrica en el hormigón. En la Foto 3.20, se observa en detalle el dispositivo utilizado para sostén del electrodo de referencia, y mejora del contacto del disco con la superficie del hormigón, de forma similar al dispositivo para el ensayo de velocidad de corrosión.



### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

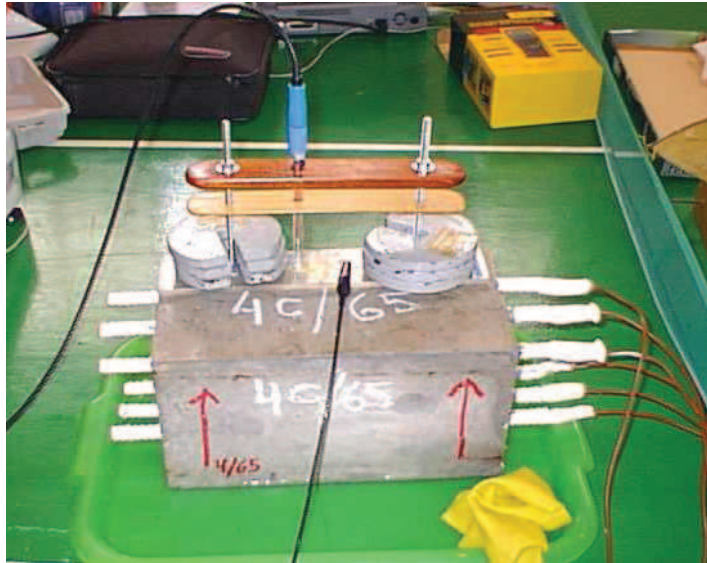


Foto 3.19. Instrumentación para el ensayo de resistividad.



Foto 3.20. Dispositivo para contacto del disco con el hormigón, y soporte del electrodo de referencia.

#### 3.3.2.3 Contaminación de los ejemplares con $\text{CO}_2$

Para efectuar la medida de la profundidad de contaminación de los ejemplares con  $\text{CO}_2$ , carbonatación, se utilizó el ensayo de tinción con fenolftaleína (T. de Rincón et al., [55]). Para ello, fue necesario acceder al interior de la masa de hormigón utilizando técnicas de corte que no lo contaminen. De este modo, se utilizó una máquina (Rodríguez et al., [50]) que permitió extraer

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

rebanadas de 5 cm de espesor a partir de probetas de hormigón sin armadura, con sección 15 cm x 15 cm. A continuación, en la Foto 3.21 y la Foto 3.22, se muestran la máquina y las rebanadas que son obtenidas.

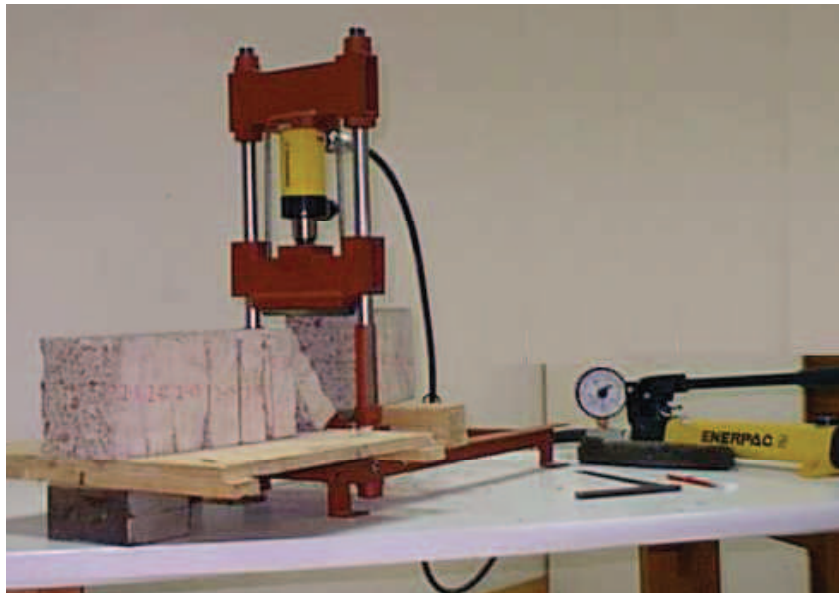


Foto 3.21. Máquina cortadora de rebanadas de hormigón.



Foto 3.22. Rebanadas de hormigón obtenidas.

Inmediatamente obtenida la rebanada de hormigón, de 5 cm de espesor y 15 cm x 15 cm de sección, producida a partir del corte de la probeta expuesta, se realizó sobre la misma, la detección del frente de carbonatación. Para ello, se aplicó la

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

solución preparada de fenolftaleína sobre la cara expuesta que resultó del corte, y luego de esperar aproximadamente 15 a 20 minutos, se obtuvo un patrón de tinción como el que se presenta en la Foto 3.23. Finalmente, las zonas incoloras, corresponden al hormigón carbonatado, que presenta un pH inferior a 9,5. El resto del hormigón, no carbonatado, presenta un color lila con pH superior.



Foto 3.23. Tinción de rebanada de hormigón con fenolftaleína.

A efectos de predecir la profundidad de carbonatación del hormigón en función del tiempo de exposición, uno de los modelos más sencillos utilizados para esto, es la siguiente función (T. de Rincón et al., [55]):

$$X_{CO_2} = K_{CO_2} \cdot \sqrt{t} \quad (3.9)$$

Siendo:

$X_{CO_2}$  - profundidad de carbonatación del hormigón según el eje x,

$K_{CO_2}$  - coeficiente de propagación del anhídrido carbónico,

$t$  - tiempo.

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

#### 3.3.2.4 Contaminación de los ejemplares con ión Cl<sup>-</sup>

##### 3.3.2.4.1 Extracción de las muestras para los ensayos

Durante el período de exposición de las probetas, se hicieron aproximadamente cada un año, determinaciones del perfil de contaminación del hormigón, con el ión Cl<sup>-</sup>. Dichas determinaciones, se hicieron en todas las probetas y para ambas caras de exposición. Para ello, se extrajo de cada una de las probetas, una rebanada de 5 cm de espesor y 15 cm x 15 cm de sección, utilizando una máquina construida a tales efectos (Rodríguez et al., [50]). Luego, de cada rebanada y para cada una de las caras, se tomaron muestras de polvo de hormigón, a profundidades sucesivas cada 5 mm como máximo, hasta una profundidad de 30 mm. Finalmente, dichas muestras, fueron analizadas para conocer el contenido de ión Cl<sup>-</sup>.

Para la extracción de las muestras de polvo, se utilizó como herramienta de desbaste, una fresa frontal. Esta herramienta, al ser accionada mediante un taladro, provoca por fricción la disgregación del hormigón, hasta un grado de polvo fino, que es recogido en bolsas de plástico para su posterior análisis. Ver Foto 3.24.



Foto 3.24. Extracción de polvo de hormigón con fresa.

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

#### 3.3.2.4.2 Determinación del contenido de ión Cl<sup>-</sup> libre en el hormigón

La determinación del contenido de ión Cl<sup>-</sup> libre en las muestras de polvo de hormigón se realizó por química analítica. Para ello, se utilizaron muestras de polvo de hormigón, con un grado de molienda que pase por el tamiz de abertura 0.16 mm.

La extracción del ión Cl<sup>-</sup> libre de las muestras de polvo se realizó según la recomendación RILEM TC 178- TMC “Analysis of Water Soluble Chloride in Concrete” (RILEM, [38]), que plantea una técnica basada en la disolución de dichas muestras en agua destilada. Finalmente se filtró la disolución resultante de la muestra y en ella se determinó el contenido de ión Cl<sup>-</sup>, que corresponde al del ión Cl<sup>-</sup> libre por la técnica de extracción que se empleó. Para esta última determinación, se utilizó el método de Volhard, de volumetría de precipitación, descrito en la recomendación RILEM TC 178- TMC “Analysis of total Chloride Content in Concrete” (RILEM, [37]).

El método de Volhard consiste básicamente en agregar a la disolución un exceso de nitrato de plata (AgNO<sub>3</sub>), de concentración conocida, que precipita el ión Cl<sup>-</sup>. Finalmente el exceso de AgNO<sub>3</sub> es valorado contra tiosianato de amonio (NH<sub>4</sub>SCN), lo que permite hallar por diferencia el consumo en la precipitación del ión Cl<sup>-</sup> y por ende su concentración. La valoración se realizó por colorimetría, utilizando Fe<sup>3+</sup> como indicador, que forma un complejo coloreado con el SCN<sup>-</sup>.

El resultado final de concentración se expresó como una relación porcentual entre el peso del ión Cl<sup>-</sup> y el de la muestra respectiva de hormigón donde se halló. A su vez, a partir de la dosificación del hormigón se pudo expresar la concentración del ión Cl<sup>-</sup> en relación al peso del cemento.

#### 3.3.2.4.3 Ajuste numérico de resultados por mínimos cuadrados

De acuerdo al objetivo planteado, se buscó una curva teórica, con la expresión de la solución de la segunda ley de Fick, que logre el mejor ajuste de los

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

resultados experimentales obtenidos. Recordamos, dicha solución, tiene la siguiente expresión:

$$C(x,t) = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (3.10)$$

Luego mediante la teoría de ajuste por mínimos cuadrados, se buscaron los valores de  $C_s$  y  $D$  que logran el mejor ajuste de la mencionada función. Para ello comenzamos definiendo una función  $F_{aux.}$ , que corresponde a la suma de la diferencia al cuadrado entre los valores de concentración de ión  $\text{Cl}^-$ , obtenidos experimentalmente y los obtenidos en forma teórica a partir de la solución de la segunda ley de Fick. Así la función  $F_{aux.}$  resulta con la siguiente expresión:

$$F_{aux.}(C_s, D) = \sum_{i,j,k} [C_{ijk} - C_{Tij}(C_s, D)]^2 = \sum_{i,j,k} [C_{ijk} - C_s(1 - \operatorname{erf}(D, t_i, x_j))]^2 \quad (3.11)$$

Donde:

$F_{aux.}$  = función auxiliar. Corresponde a la suma de las diferencias al cuadrado, entre los valores de concentración de ión  $\text{Cl}^-$ , obtenidos experimentalmente y los obtenidos en forma teórica a partir de la solución de la segunda ley de Fick,

$i$  = 1, ..., 4; índice correspondiente al año de realización del ensayo,

$j$  = 1, ...,  $n$ ; índice correspondiente a la profundidad que se realizó el ensayo,

$k$  = 1, 2, 3; índice correspondiente a la probeta estudiada,

$C_{ijk}$  = concentración de ión  $\text{Cl}^-$ , obtenida experimentalmente,

$C_{Tij}$  = concentración de ión  $\text{Cl}^-$ , obtenida de forma teórica,

$t_i$  = tiempo correspondiente al subíndice  $i$ ,

$x_j$  = profundidad donde se realizó el ensayo, correspondiente al subíndice  $j$ .

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

Los valores de  $C_S$  y  $D$  para los cuales se logra el mejor ajuste de la solución, son los que hacen mínima la función  $F_{aux.}$ . Así se busca cumplir las siguientes dos condiciones:

$$\frac{dF_{aux.}(C_S, D)}{dC_S} = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{dF_{aux.}(C_S, D)}{dD} = 0 \quad (3.13)$$

Desarrollando la ecuación (3.12), queda:

$$\frac{dF_{aux.}(C_S, D)}{dC_S} = -2 \sum_{i,j,k} [C_{ijk} - C_S(1 - erf(D, t_i, x_j))] (1 - erf(D, t_i, x_j)) = 0 \quad (3.14)$$

A partir de la ecuación (3.14), se obtiene  $C_S$  que tiene la siguiente expresión:

$$C_S = \frac{\sum_{i,j,k} C_{ijk} (1 - erf(D, t_i, x_j))}{\sum_{i,j,k} (1 - erf(D, t_i, x_j))^2} \quad (3.15)$$

Luego habría que desarrollar la ecuación (3.13), pero como es muy complejo su cálculo, se optó por sustituir el valor de  $C_S$  en la expresión de la función  $F_{aux.}$ , para así hallar numéricamente el valor de  $D$  que la hace mínima.

Finalmente, con el procedimiento seguido, se obtienen los valores de  $C_S$  y  $D$  que hacen mínima a la función  $F_{aux.}$ , y por lo tanto para los cuales se logra el mejor ajuste de la curva teórica con los datos experimentales.

### 3.3 Exposición y seguimiento de los ejemplares

---

Para cuantificar el grado de ajuste logrado, o calidad del modelo empleado, se calculó el coeficiente de correlación  $R^2$ , que tiene la siguiente expresión:

$$R^2 = 1 - \frac{SCR}{SCT} \quad (3.16)$$

Siendo:

$$SCR = \sum_{i,j,k} (C_{ijk} - C_{Tij})^2 \quad : \text{ suma de los cuadrados reducidos,}$$

$$SCT = \sum_{i,j,k} (C_{ijk} - C_{prom.})^2 \quad : \text{ suma de los cuadrados totales.}$$



# Capítulo 4

## Resultados

En este capítulo se presentan para cada estación, los resultados obtenidos en relación a los parámetros de durabilidad estudiados y los comentarios sobre los mismos. A recordar, parámetros climático - ambientales, y los químicos y electroquímicos de las probetas, correspondientes al período de estudio.

Para cada relación a/c, se estudiaron tres probetas nominalmente iguales, expuestas a las mismas condiciones ambientales. Esto permitió obtener por triplicado los resultados de los parámetros químicos y electroquímicos estudiados, y obtener valores promedio en cada caso, que se presentan gráficamente, según la cara de exposición a los vientos dominantes.

### 4.1. Probetas estación “Prado”

#### 4.1.1 Parámetros climático - ambientales

- **Temperatura:** media del período 16°C, promedio mínimas 11°C, promedio máximas 24°C, .
- **Humedad:** media del período 72%, promedio mínimas 60%, promedio máximas 75%.

#### 4.1. Probetas estación “Prado”

---

- **Cl<sup>-</sup>**: media del período 9,4 (mg / m<sup>2</sup>.día), extremos: mín. despreciable, máx. 80 (mg / m<sup>2</sup>.día).
- **CO<sub>2</sub>**: media del período 0,7 (mg / l), extremos: mínimo 0,4 (mg / l), máximo 1,1 (mg/l).
- **SO<sub>2</sub>**: media del período 6,6 (mg / m<sup>2</sup>.día)

#### 4.1.2 Potencial de corrosión

A continuación se presenta mediante gráficos la evolución en el tiempo del parámetro electroquímico: potencial de corrosión ( ver Figura 4.1 a Figura 4.6).

En cada gráfico se incluyen simultáneamente los resultados que corresponden a las dos relaciones a/c.

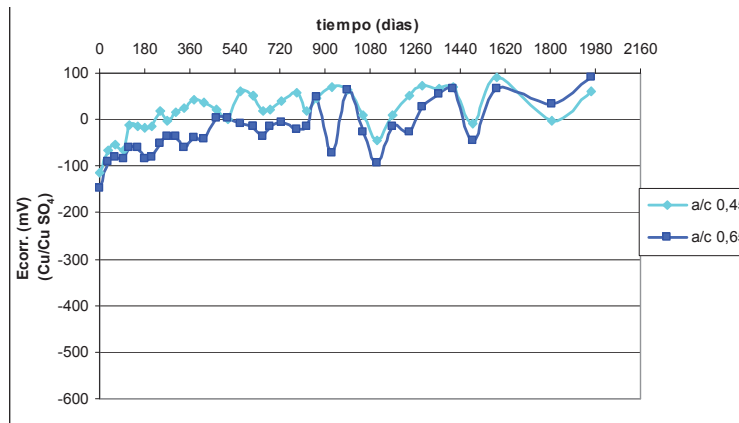


Figura 4.1.  $E_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 1,5cm.

#### 4.1. Probetas estación “Prado”

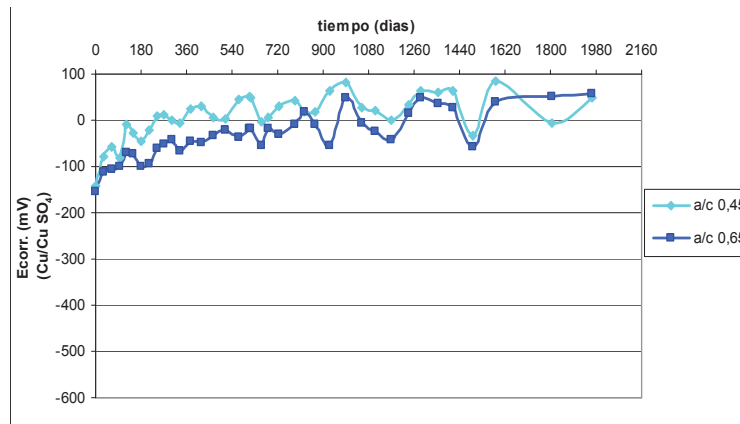


Figura 4.2.  $E_{corr}$ , cara expuesta, rec. 2,0cm.

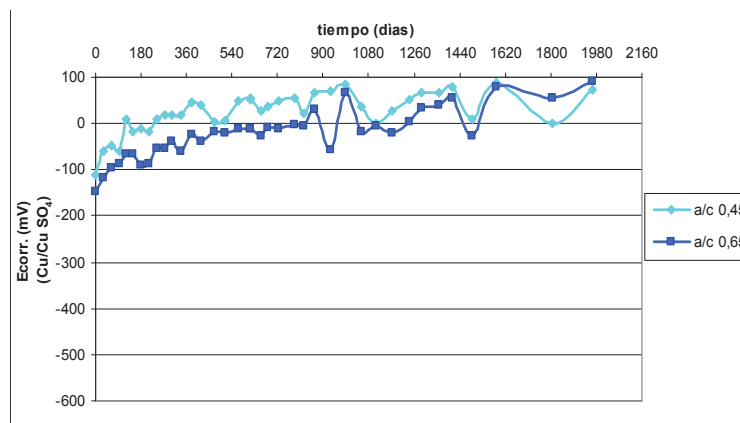


Figura 4.3.  $E_{corr}$ , cara expuesta, rec. 3,0cm.

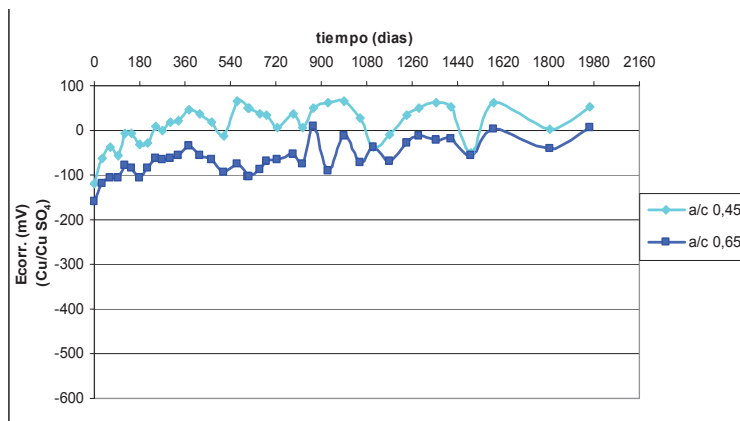


Figura 4.4.  $E_{corr}$ , cara resguardada, rec. 1,5cm.

#### 4.1. Probetas estación “Prado”

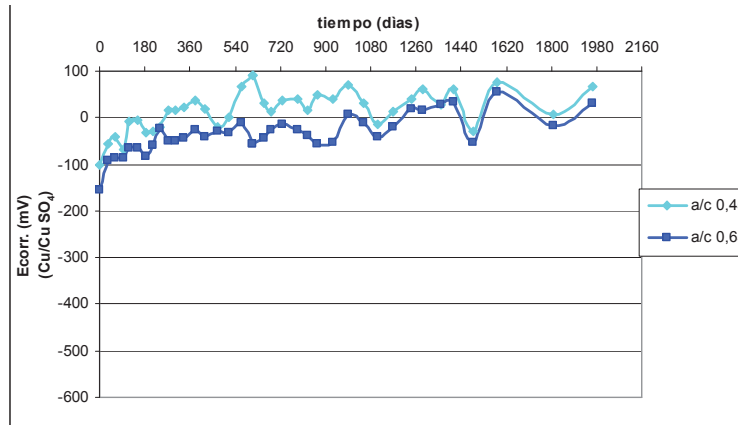


Figura 4.5.  $E_{corr}$ , cara resguardada, rec. 2,0cm.

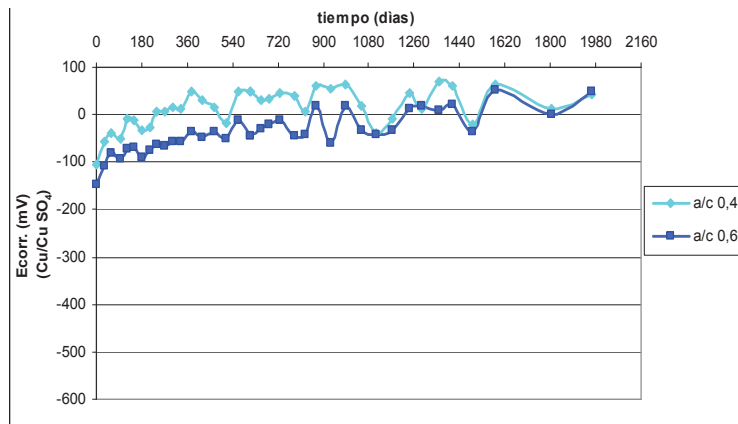


Figura 4.6.  $E_{corr}$ , cara resguardada, rec. 3,0cm.

Para los tres recubrimientos e independientemente de la relación  $a/c$ , en todos los casos, las armaduras parten en el instante de la instalación con un potencial de corrosión de aproximadamente  $-150$  mV,  $(Cu/CuSO_4)$ , que luego con el transcurso del tiempo prosigue desplazándose hacia valores cada vez mayores llegando con apariencia asintótica al final del período evaluado al orden de  $0$  mV. Este potencial según la norma ASTM C876, (ASTM, [3]) corresponde a un 90%

#### 4.1. Probetas estación “Prado”

---

de probabilidad de que no existe corrosión.

Del mismo modo para los tres recubrimientos se observa que en todos los casos los potenciales registrados en las probetas con hormigón de relación  $a/c=0,45$ , son levemente superiores a los correspondientes a aquellas con  $a/c=0,65$ .

Todos los registros a lo largo del período de exposición presentan similares andamientos y fluctuaciones, no observándose una incidencia significativa del comportamiento estacional del clima.

##### 4.1.3 Velocidad de corrosión

A continuación se presenta mediante gráficos, la evolución en el tiempo del parámetro electroquímico: velocidad de corrosión, registrado como densidad superficial de corriente de corrosión ( $i_{corr.}$ ) ( ver Figura 4.7 a Figura 4.12 ).

En cada gráfico se incluyen simultáneamente los resultados que corresponden a las dos relaciones  $a/c$ .

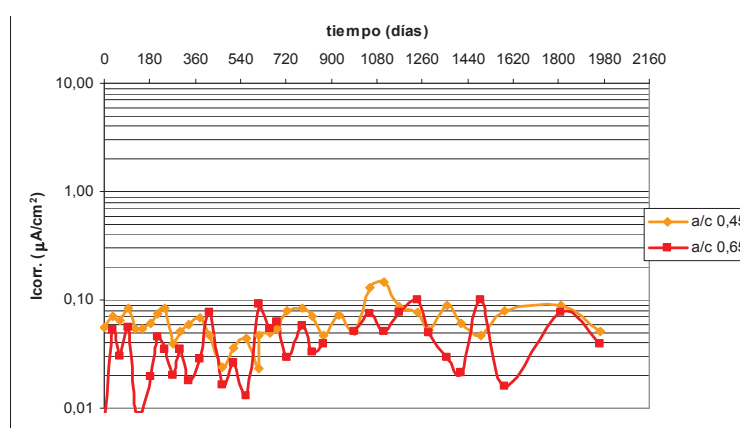


Figura 4.7.  $i_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 1,5cm.

#### 4.1. Probetas estación "Prado"

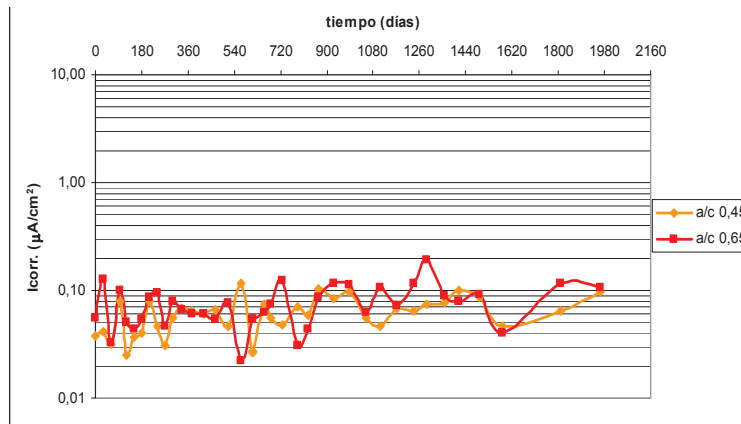


Figura 4.8.  $i_{corr}$ , cara expuesta, rec. 2,0cm.

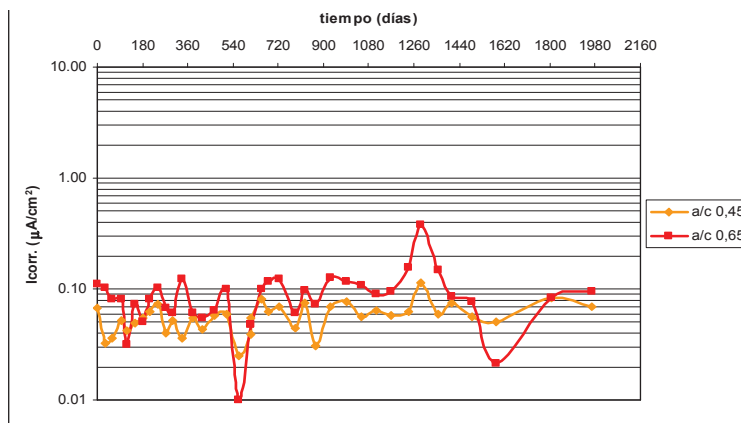


Figura 4.9.  $i_{corr}$ , cara expuesta, rec. 3,0cm.

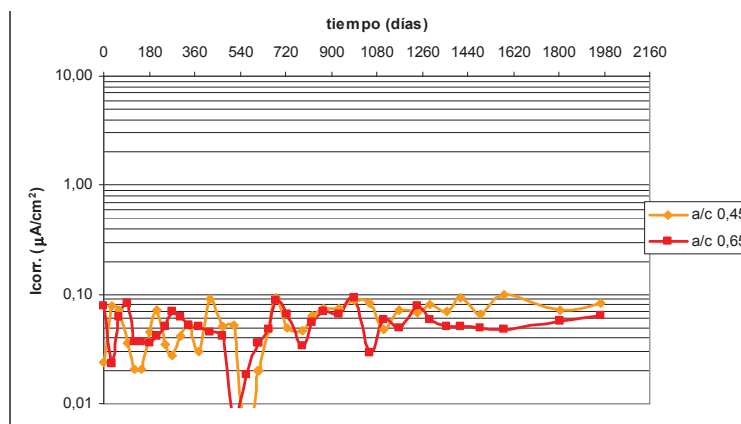


Figura 4.10.  $i_{corr}$ , cara resguardada, rec. 1,5cm.

#### 4.1. Probetas estación “Prado”

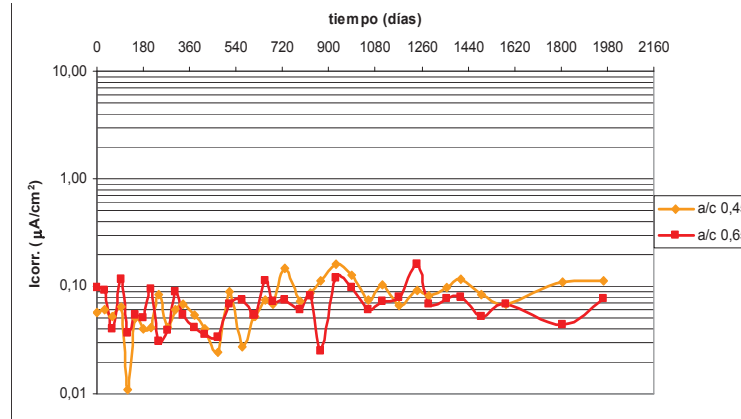


Figura 4.11.  $i_{corr}$ , cara resguardada, rec. 2,0cm.

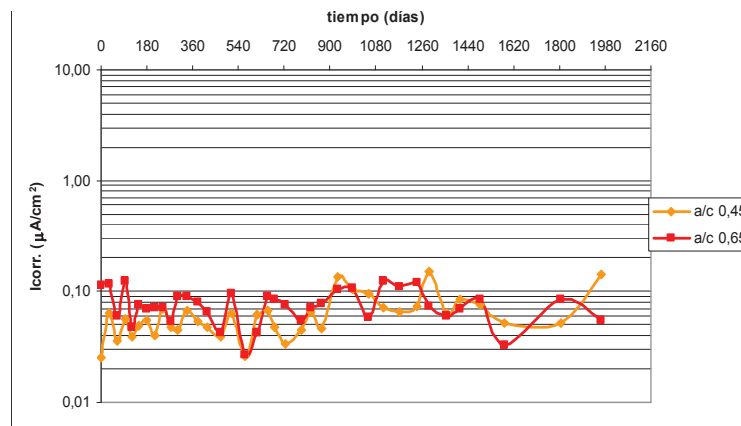


Figura 4.12.  $i_{corr}$ , cara resguardada, rec. 3,0cm.

Para los tres recubrimientos e independientemente de la cara expuesta o resguardada a los vientos dominantes, en todos los casos, se observó que hasta el final del período estudiado, los niveles registrados de densidad de corrosión son relativamente uniformes, y marcadamente inferiores a  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , lo que indica a la luz de éste parámetro, que no existe corrosión (Andrade et al., [13]). No se observan diferencias significativas de los valores en relación a la relación a/c del hormigón. Tampoco se observó una periodicidad significativa de los valores vinculada con la variación estacional del clima.

#### 4.1. Probetas estación “Prado”

##### 4.1.4 Resistividad

A continuación se presenta mediante gráficos la evolución en el tiempo del parámetro electroquímico: resistividad del hormigón ( ver Figura 4.13 a Figura 4.18 )

En cada gráfico se incluyen simultáneamente los resultados que corresponden a las dos relaciones a/c.

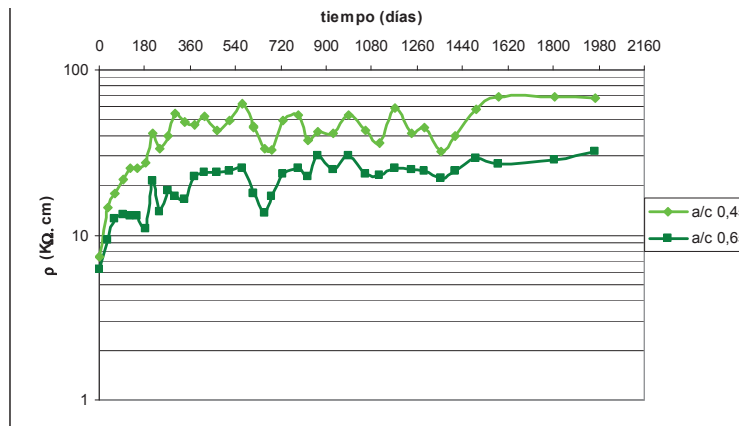


Figura 4.13.  $\rho$ , cara expuesta, rec. 1,5cm.

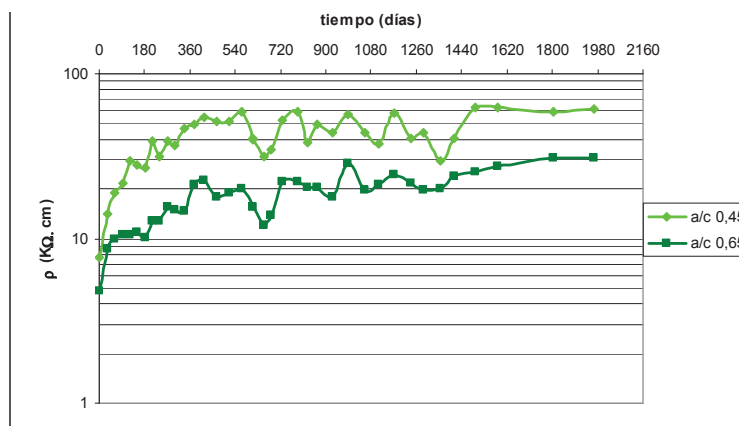


Figura 4.14.  $\rho$ , cara expuesta, rec. 2,0cm.



#### 4.1. Probetas estación “Prado”

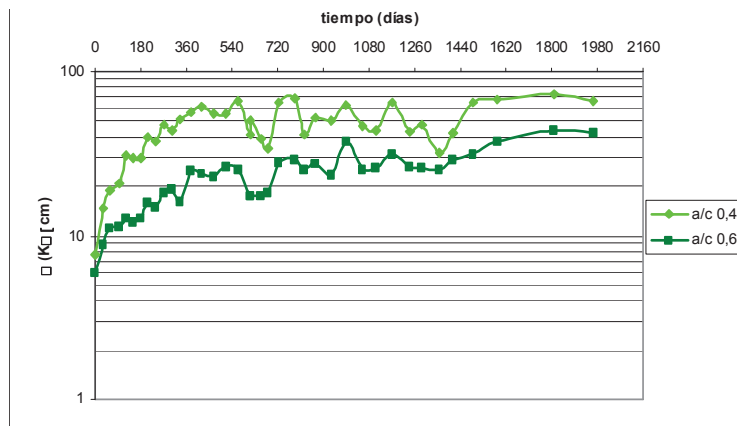


Figura 4.15.  $\rho$ , cara expuesta, rec. 3,0cm.

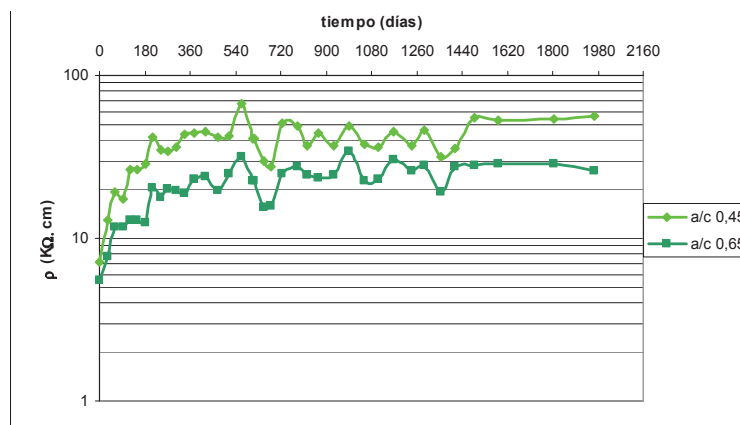


Figura 4.16.  $\rho$ , cara resguardada, rec. 1,5cm.

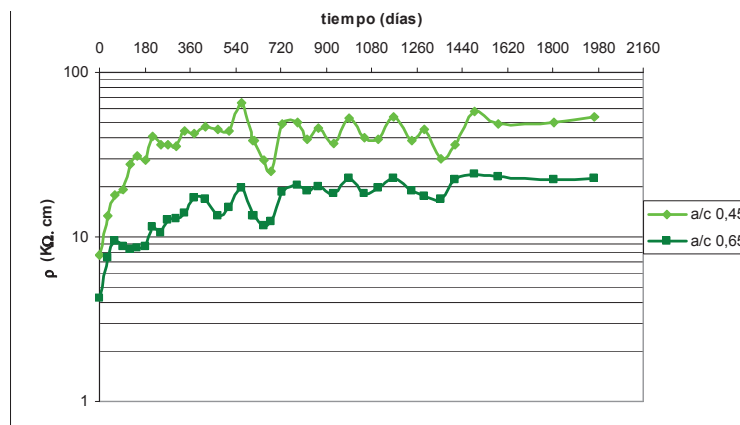


Figura 4.17.  $\rho$ , cara resguardada, rec. 2,0cm.

#### 4.1. Probetas estación “Prado”

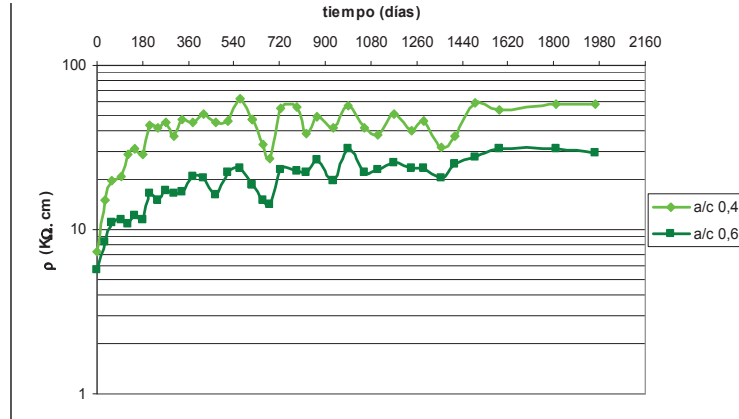


Figura 4.18.  $\rho$ , cara resguardada, rec. 3,0cm.

Para los tres recubrimientos y ambas relaciones a/c, se observa que los valores registrados al inicio de la instalación de las probetas, son del mismo orden, oscilando los mismos en el entorno de los 4 a 5 K $\Omega$ .cm. Estos valores, según Polder (Polder, [47]), corresponden a hormigones con alto riesgo a la corrosión.

Luego, con el transcurso del tiempo, los valores crecen fuertemente en el primer año de exposición, tendiendo luego a estabilizarse en una misma asíntota. Con posterioridad al primer año de exposición, para los tres casos de recubrimiento, se presenta una cierta diferencia de los valores en relación al a/c, la cual se mantiene relativamente uniforme.

Para el caso de a/c=0.65, y los tres recubrimientos, se llega a valores próximos a 30 K $\Omega$ .cm, que según Polder (Polder, [47]), corresponde a un riesgo moderado a la corrosión, mientras que para a/c=0,45, se llega a valores próximos a 60 K $\Omega$ .cm, para los cuales se considera un riesgo bajo. En todos los casos, se observa que la diferencia de valores en función de la relación a/c pasó a ser de aproximadamente 25% al comienzo del ensayo para terminar en un orden del 100%. Para ambas relaciones a/c, la evolución de este parámetro tiene básicamente el mismo andamio. No se observó una periodicidad significativa

#### 4.1. Probetas estación “Prado”

---

de los valores vinculada con la variación estacional del clima

##### 4.1.5 Pérdida de masa

A partir de los registros electroquímicos de densidad de corriente de corrosión de las armaduras, se calculó utilizando la Ley de Faraday la pérdida de masa superficial promedio, que sufrieron las mismas (T. de Rincón et al., [55]). Este resultado permitió calcular la pérdida de radio de las armaduras y por lo tanto la pérdida de sección que sufrieron. Los resultados así obtenidos, se presentan a continuación, de forma gráfica, (ver Figura 4.19 a Figura 4.21), mostrando para cada profundidad de recubrimiento, la evolución porcentual de pérdida de sección de las armaduras en función del tiempo, según la relación a/c del hormigón y la cara de exposición en cuestión. El período que abarcan dichas gráficas, se corresponde con el período durante el cual se obtuvieron registros de contaminación de los hormigones con ión Cl<sup>-</sup>. En las mismas la nomenclatura utilizada denomina: PR a la estación Prado, R corresponde a la cara resguardada y E a la cara expuesta; 45 a la relación a/c=0,45, y 65 para la relación a/c=0,65.

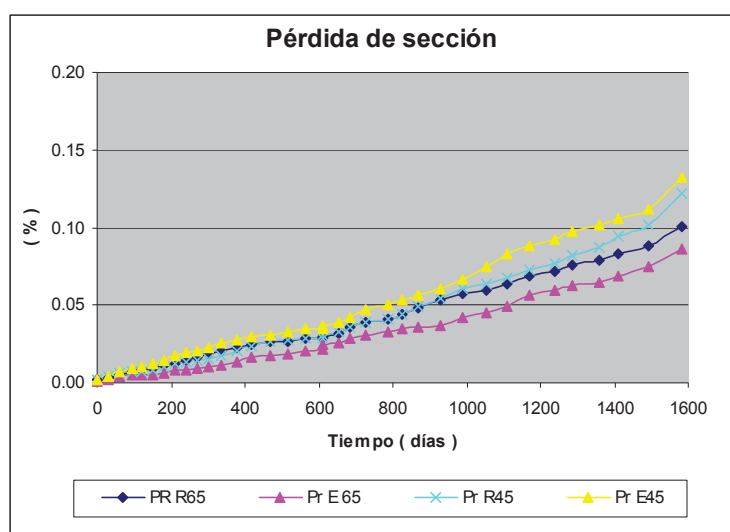


Figura 4.19. Perdida secc. estación Prado. (rec.=1,5 cm).

#### 4.1. Probetas estación “Prado”

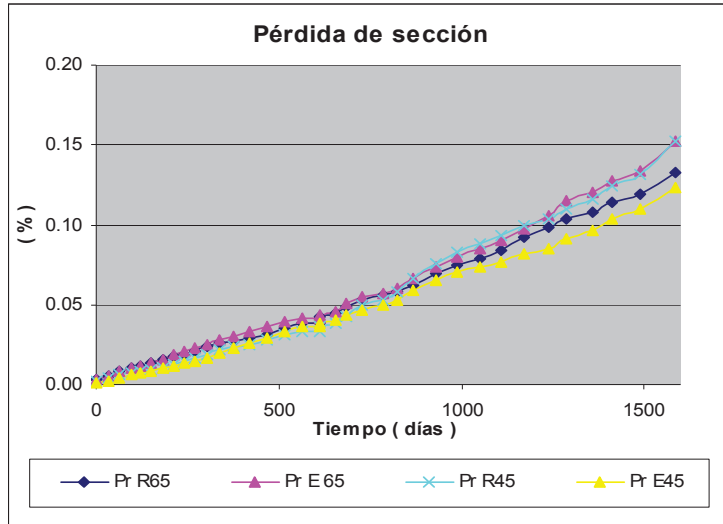


Figura 4.20. Pérdida secc. estación Prado, (rec.=2,0cm).

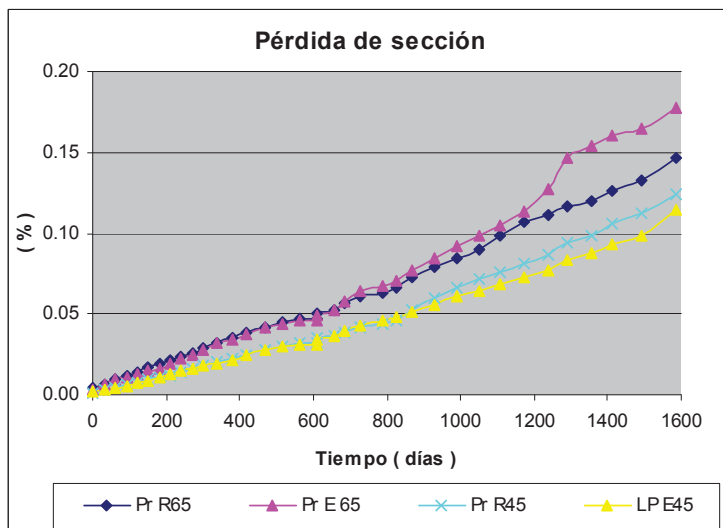


Figura 4.21. Pérdida secc. estación Prado, (rec.=3,0cm).

Para las velocidades de corrosión registradas, observando los gráficos de pérdida de sección de las armaduras en función del tiempo, se confirma que para ambas caras de exposición y relación a/c, las pérdidas de masa en todas las

#### 4.1. Probetas estación “Prado”

---

armaduras significaron en cada una de ellas, una tasa de pérdida de sección promedio de aproximadamente de 0,02 (% / año), la cual es considerada despreciable. (T. de Rincón et al., [55]).

A su vez se observa que para todos los recubrimientos, las curvas tienen similar andamio, y las pérdidas de masa son del mismo orden en ambas caras, existiendo una escasa diferencia según la relación a/c.

#### 4.1.6 Contaminación del hormigón con CO<sub>2</sub> y el ión Cl<sup>-</sup>

Los resultados obtenidos de contaminación del hormigón con CO<sub>2</sub> y el ión Cl<sup>-</sup>, son los siguientes:

**CO<sub>2</sub>:** De acuerdo a la última determinación realizada a los 4,2 años de exposición, se obtuvieron los siguientes resultados promedio para las caras expuesta y resguardada. Ver Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Contaminación por CO<sub>2</sub>

Cara probeta	prof. carbonatación (cm)				$K_{CO_2}$ ( mm/año <sup>-1/2</sup> )			
expuesta	a/c 0,45	0,0	a/c 0,65	0,5	a/c 0,45	0,00	a/c 0,65	2,44
resguardada	a/c 0,45	0,0	a/c 0,65	0,5	a/c 0,45	0,00	a/c 0,65	2,44

Analizando los resultados de contaminación con CO<sub>2</sub>, se observa que para el período estudiado, en el hormigón con relación a/c=0,45 no se produjo su carbonatación. Por el contrario, para el hormigón con relación a/c=0,65, sí se produjo su carbonatación en ambas caras, con una misma profundidad de 0,5 cm.

**Cl<sup>-</sup>:** No se registró contaminación con ión Cl<sup>-</sup> en las probetas de esta estación para el período estudiado.

### 4.1.7 Resumen

Si bien desde el punto de vista de la resistividad del hormigón, el valor alcanzado luego del primer año de exposición de las probetas, con relación  $a/c=0,65$ , es considerado de riesgo moderado, se observa que aún no se ha disparado la corrosión de las armaduras por el  $CO_2$ , principal contaminante atmosférico en dicha estación. Esta afirmación se basa en los valores de potencial y velocidad de corrosión registrados, que reflejan en ambos casos de forma coincidente la ausencia de corrosión.

Este resultado también es coincidente con la estimación (Broomfield, J. P., [22]), -según resultados de ensayo realizado a los 4,2 años (ver Cuadro 4.1)-, que la carbonatación, recién llegaría a las armaduras con menor recubrimiento aproximadamente a los 38 años. Esta ausencia de corrosión, permite que actúe el efecto pasivante del hormigón sobre las armaduras, provocando que los potenciales se hayan desplazado hacia valores positivos próximos a 0 mV.

En relación a la influencia de la relación  $a/c$ , esta se ve reflejada en el comportamiento del potencial y la resistividad de manera coincidente, o sea en ambos casos, para  $a/c=0,45$  se obtuvieron mayores valores que para  $a/c=0,65$ , situación que es coincidente con un resumen de múltiples registros presentados en publicación realizada por los investigadores C. Andrade y C. Alonso (Andrade et al., [14]).

## 4.2. Probetas estación “La Paloma”

### 4.2.1 Parámetros climático - ambientales

- **Temperatura:** media del período 16°C, promedio mínimas 11 °C, promedio máximas 22°C.
- **Humedad:** media del período 78%, promedio mínimas 70%, promedio máximas 85%.
- **Cl:** media del período 999 (mg / m<sup>2</sup>.día), extremos: mínimo de 250 (mg / m<sup>2</sup>.día), máximo 2750 (mg / m<sup>2</sup>.día).
- **CO<sub>2</sub>:** media del período 0,7 (mg / l), extremos: mínimo 0,4 (mg / l), máximo de 1,0 (mg/l).
- **SO<sub>2</sub>:** media del período 6,6 (mg / m<sup>2</sup>.día)

### 4.2.2 Potencial de corrosión

A continuación se presenta mediante gráficos la evolución en el tiempo del parámetro electroquímico: potencial de corrosión (ver Figura 4.22 a Figura 4.27),

En cada gráfico se incluyen simultáneamente los resultados que corresponden a las dos relaciones a/c.

## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

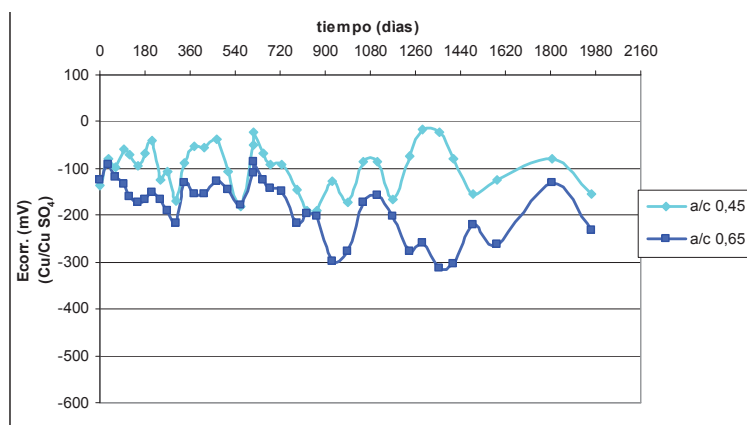


Figura 4.22.  $E_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 1,5cm.

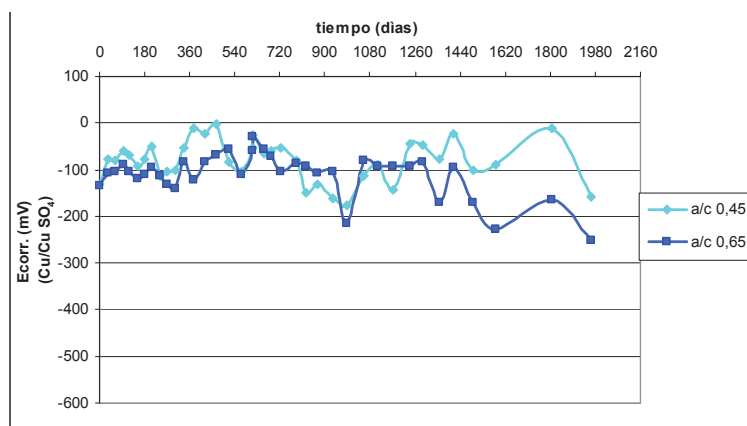


Figura 4.23.  $E_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 2,0cm.

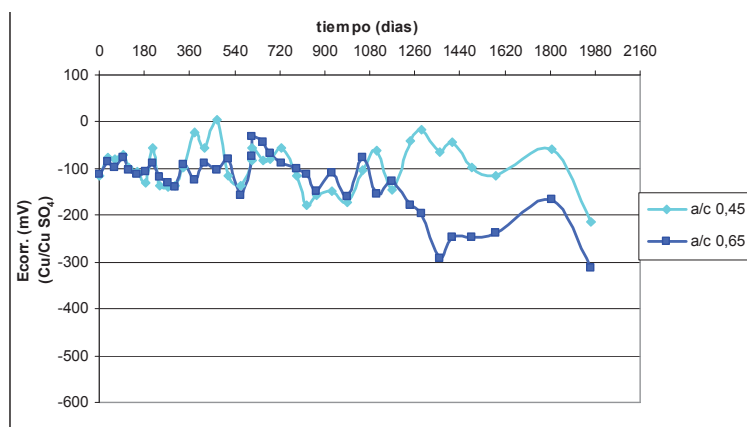


Figura 4.24.  $E_{corr.}$ , cara expuesta, rec. 3,0cm.



## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

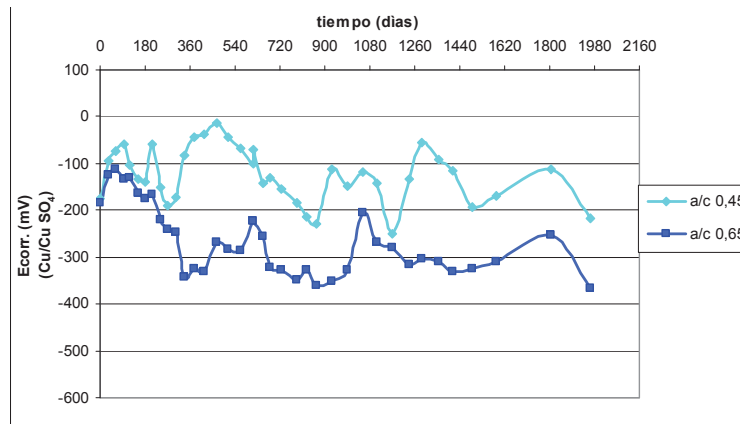


Figura 4.25.  $E_{corr}$ , cara resguardada, rec. 1,5cm.

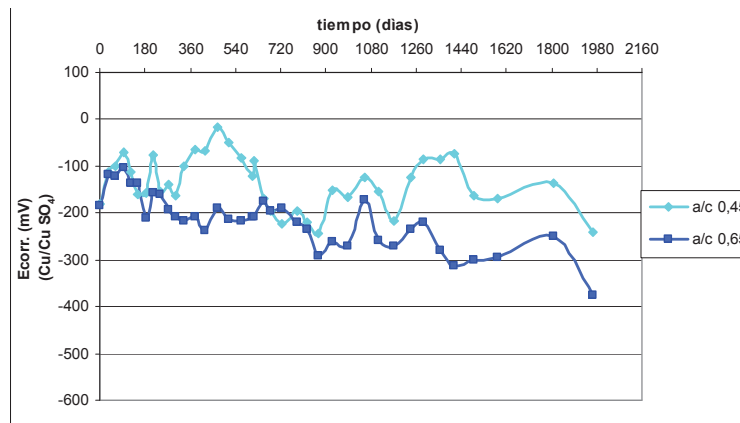


Figura 4.26.  $E_{corr}$ , cara resguardada, rec. 2,0cm.

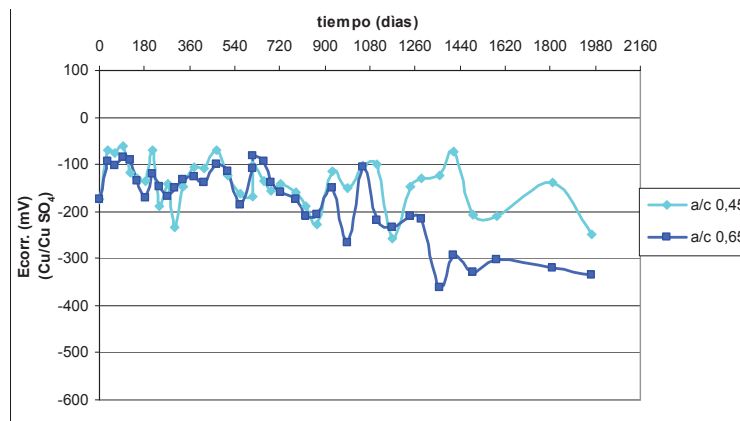


Figura 4.27.  $E_{corr}$ , cara resguardada, rec. 3,0cm.

Para los tres recubrimientos e independientemente de la relación a/c, en todos los casos, las armaduras en el instante de la instalación presentan un potencial de corrosión aproximadamente en el rango de  $-100$  a  $-200\text{mV}$  (CSE). Luego con el transcurso del tiempo, se verifica en todos los casos un desplazamiento hacia valores más negativos en el entorno de los  $-200$  a  $-350\text{mV}$ , los cuales según la norma ASTM C876 (ASTM, [3]) corresponde a una situación de incertidumbre respecto a la corrosión.

Para los tres recubrimientos también se observa que en todos los casos los potenciales registrados en las probetas con  $a/c=0,45$ , son levemente superiores a los correspondientes a  $a/c=0,65$ . Esta tendencia se acentúa principalmente hacia el final del período estudiado.

Todos los registros a lo largo del período de exposición presentan similares andamientos y fluctuaciones, no observándose una incidencia significativa del comportamiento estacional del clima.

### 4.2.3 Velocidad de corrosión

A continuación se presenta mediante gráficos la evolución en el tiempo del parámetro electroquímico: velocidad de corrosión, registrado como densidad superficial de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ )(ver Figura 4.28 a Figura 4.33).

En cada gráfico se incluyen simultáneamente los resultados que corresponden a las dos relaciones a/c.

## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

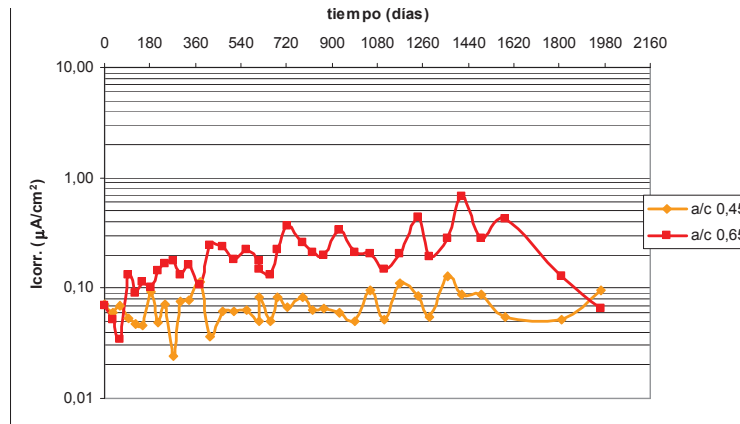


Figura 4.28.  $i_{corr}$ , cara expuesta, rec. 1,5cm.

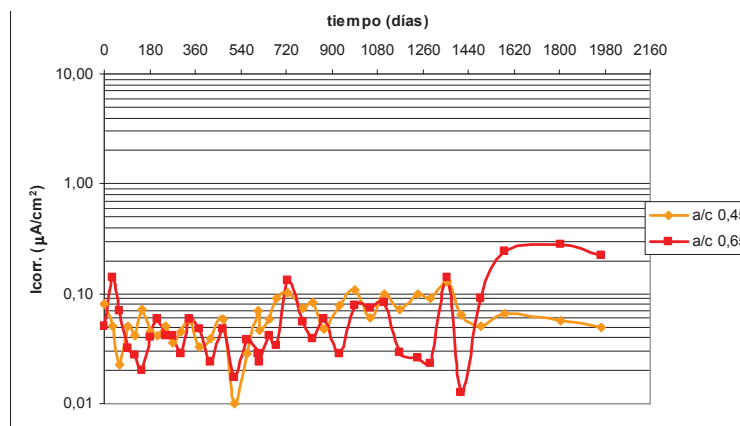


Figura 4.29.  $i_{corr}$ , cara expuesta, rec. 2,0cm.

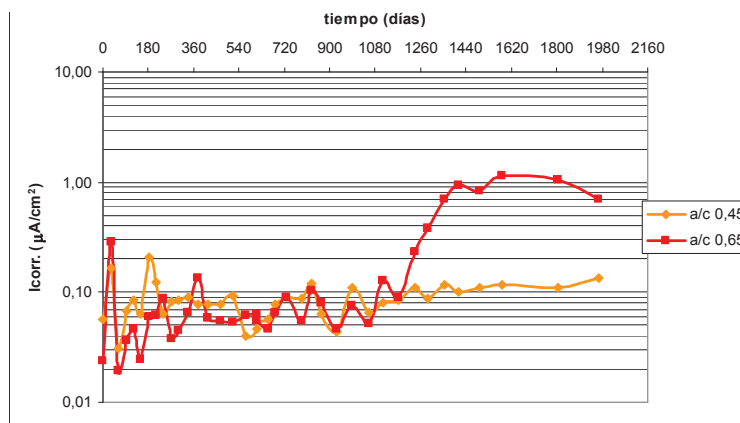


Figura 4.30.  $i_{corr}$ , cara expuesta, rec. 3,0cm.

## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

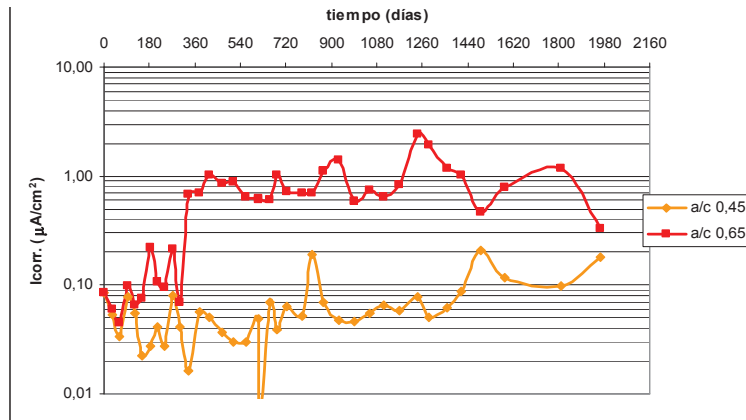


Figura 4.31.  $i_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 1,5cm.

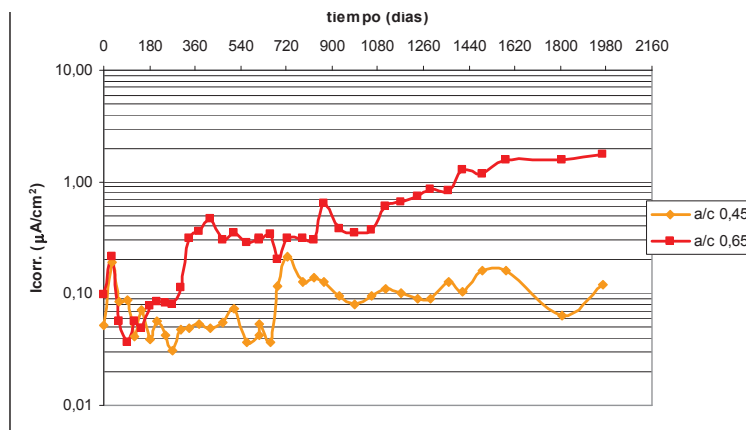


Figura 4.32.  $i_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 2,0cm.

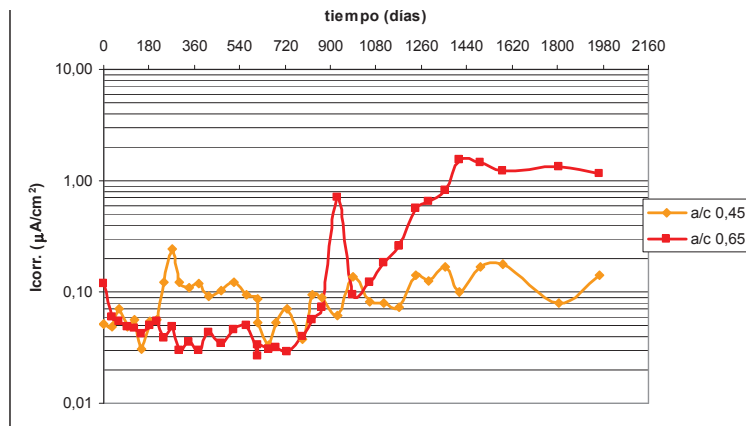


Figura 4.33.  $i_{corr.}$ , cara resguardada, rec. 3,0cm.

## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

---

Para este parámetro, se observa un comportamiento diferente según la relación a/c. En el caso de los hormigones con relación a/c=0,45, los valores registrados se encuentran próximos a  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , lo cual indica ausencia de corrosión (T. de Rincón et al., [55]).

Para los hormigones con relación a/c=0,65 este parámetro comienza con valores correspondientes a corrosión despreciable, y luego aumenta según el recubrimiento de la armadura hasta llegar a niveles aproximadamente correspondientes al rango de corrosión moderada a alto  $0,5$  a  $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (T. de Rincón et al., [55]). Esta evolución ocurre de forma relativamente temprana, aproximadamente al año, para las armaduras con recubrimiento 1,5cm, y por último, aproximadamente a los 3 años, para aquellas con recubrimiento de 3,0cm, aproximadamente.

En los registros no se pudo observar una clara incidencia debida a la variación estacional del clima.

### 4.2.4 Resistividad

A continuación se presenta mediante gráficos la evolución en el tiempo del parámetro electroquímico resistividad del hormigón ( ver Figura 4.34 a Figura 4.39 )

En cada gráfico se incluyen simultáneamente los resultados que corresponden a las dos relaciones a/c.

## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

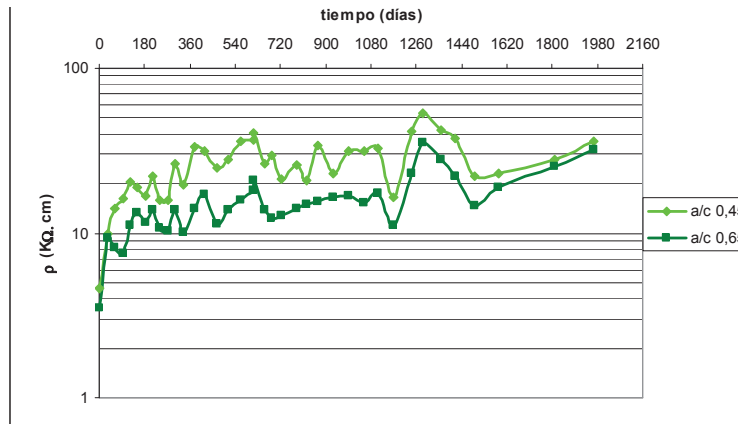


Figura 4.34.  $\rho$ , cara expuesta, rec. 1,5cm

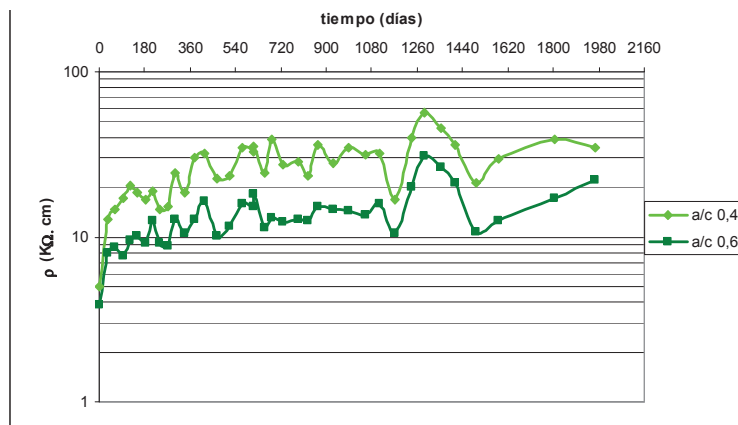


Figura 4.35.  $\rho$ , cara expuesta, rec. 2,0cm

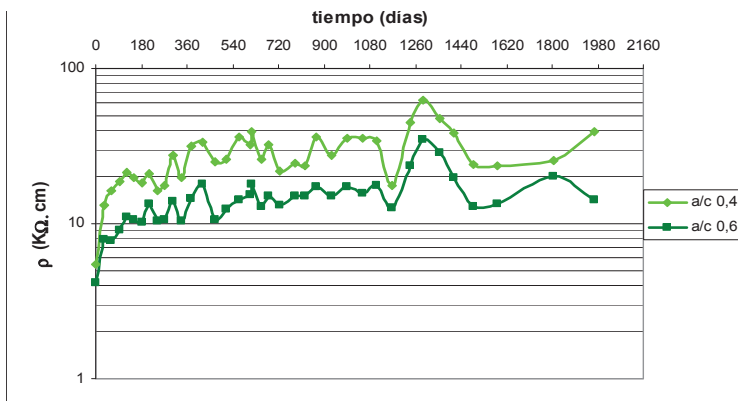


Figura 4.36.  $\rho$ , cara expuesta, rec. 3,0cm

## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

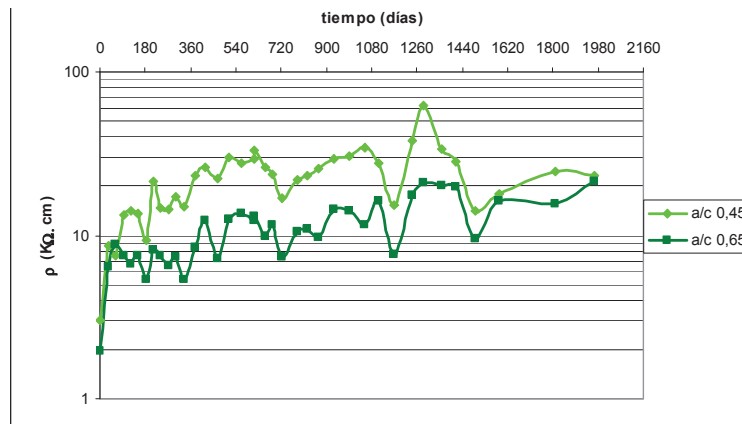


Figura 4.37.  $\rho$ , cara resguardada, rec. 1,5cm

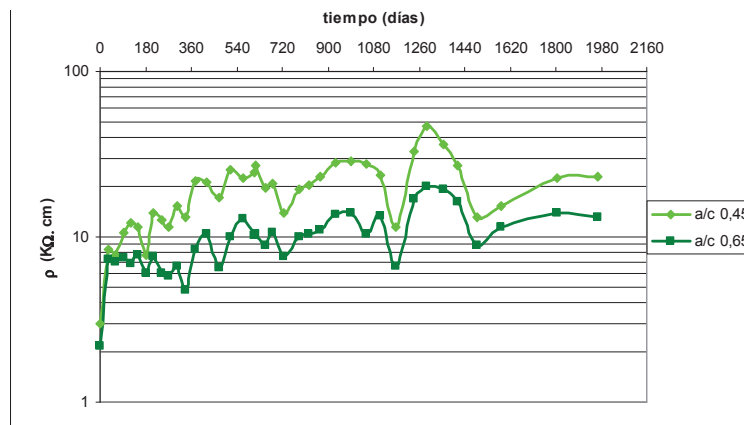


Figura 4.38.  $\rho$ , cara resguardada, rec. 2,0cm

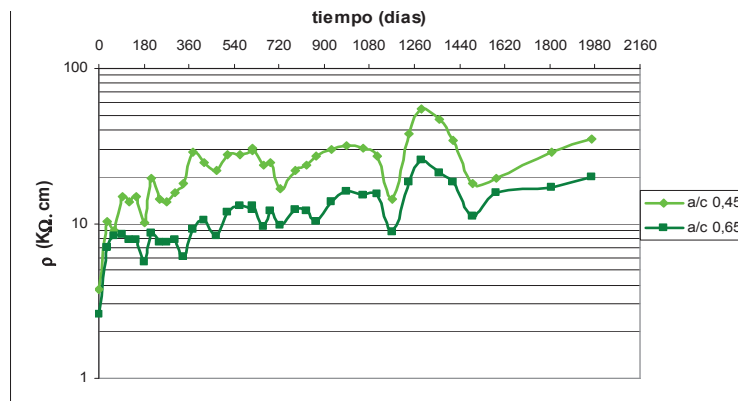


Figura 4.39.  $\rho$ , cara resguardada, rec. 3,0cm

## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

---

En el inicio de la exposición de las probetas, se observa una cierta diferencia en los rangos de valores en función de la cara en cuestión. Para la cara expuesta, los valores correspondientes a ambas relaciones  $a/c$ , se sitúan en el rango de los 3 a 5  $K\Omega.cm$ , mientras que para la cara resguardada entre 2 a 4  $K\Omega.cm$ . En ambos casos se trata del mismo orden de valores, que corresponden a hormigones con alto riesgo a la corrosión (Polder, [47]).

Durante el primer año de exposición, los valores sufren un marcado escalón de ascenso, y luego prosiguen creciendo con una tendencia relativamente uniforme. En este escalón, para  $a/c=0,45$ , se alcanzan valores próximos a los 20  $K\Omega.cm$  que corresponden a un riesgo moderado de corrosión, mientras que para  $a/c=0,65$ , quedan con valores próximos hasta los 10  $K\Omega.cm$ , que corresponden a alto riesgo para la corrosión. Luego del primer año de exposición, para los tres casos de recubrimiento, se presenta una cierta diferencia de los valores en relación al  $a/c$ , la cual se mantiene relativamente uniforme pese a ciertas fluctuaciones.

Al final del período, para todas las probetas y recubrimientos, se llega a valores en el rango de 10 a 40  $K\Omega.cm$ , que corresponden a un riesgo moderado de corrosión (Polder, [47]).

Para ambas relaciones  $a/c$ , este parámetro evoluciona básicamente con el mismo andamio, no observándose una influencia significativa debida a la variación estacional del clima.

### 4.2.5 Pérdida de masa

A partir de los registros electroquímicos de densidad de corriente de corrosión de las armaduras, se calculó utilizando la Ley de Faraday la pérdida de masa superficial promedio, que sufrieron las mismas (T. de Rincón et al., [55]). Este resultado permitió calcular la pérdida de radio de las armaduras y por lo tanto la pérdida de sección que sufrieron.



## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

Los resultados así obtenidos, se presentan a continuación, de forma gráfica, en la Figura 4.40 a la Figura 4.42, mostrando para cada profundidad de recubrimiento, la evolución porcentual de pérdida de sección de las armaduras en función del tiempo, según la relación a/c del hormigón y la cara de exposición. El período que abarcan dichas gráficas, se corresponde con el período durante el cual se obtuvieron registros de contaminación de los hormigones con ión Cl<sup>-</sup>. En las mismas la nomenclatura utilizada denomina: LP a las probetas de la estación La Paloma; R corresponde a la cara resguardada y E a la cara expuesta; 45 a la relación a/c=0,45, y 65 para la relación a/c=0,65.

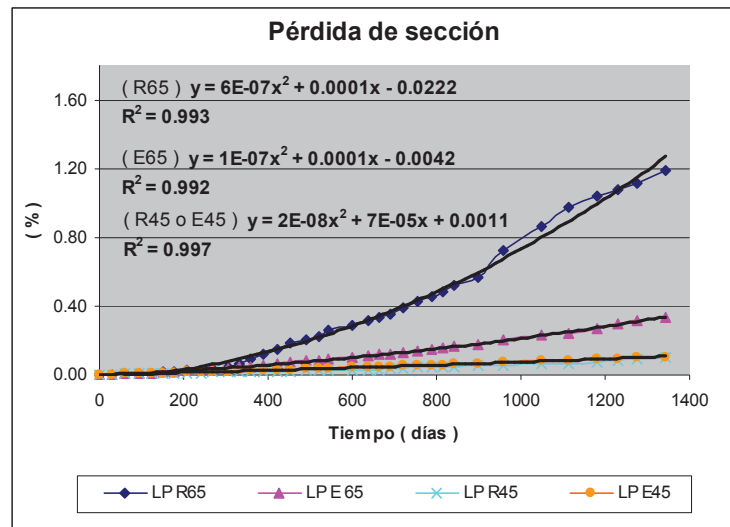


Figura 4.40. Pérdida porcentual de sección de las armaduras con 1,5 cm de recubrimiento.

4.2 Probetas estación “La Paloma”

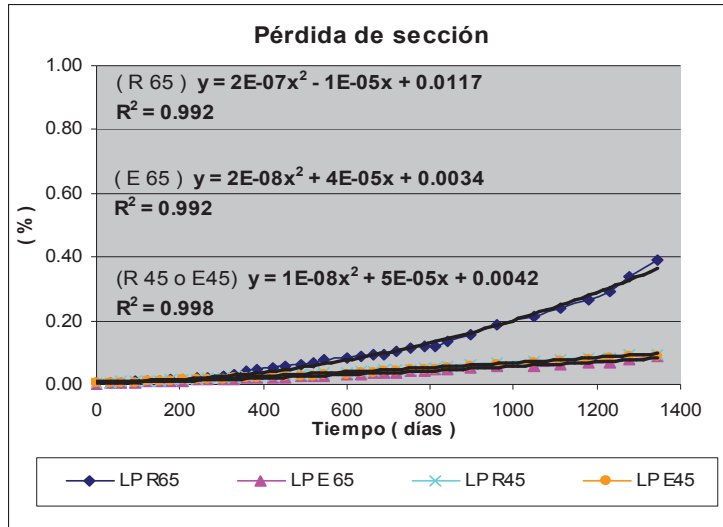


Figura 4.41. Pérdida porcentual de sección de las armaduras con 2,0 cm de recubrimiento.

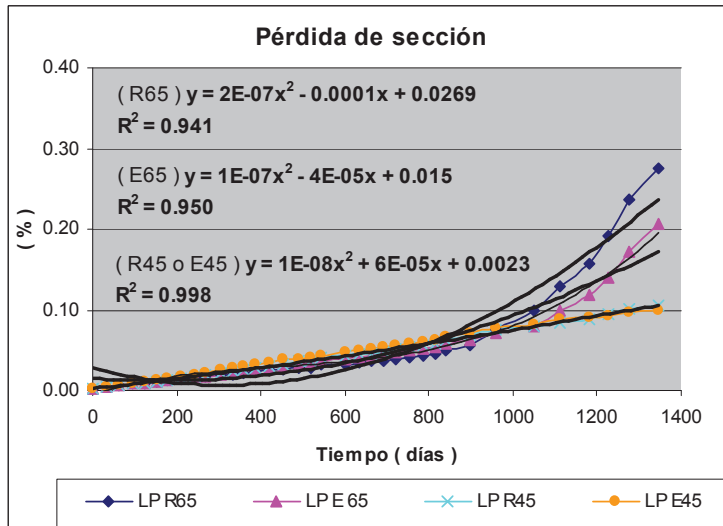


Figura 4.42. Pérdida porcentual de sección de las armaduras con 3,0 cm de recubrimiento.

A efectos de poder realizar estimaciones de pérdida de sección en períodos de tiempo superiores a los del estudio realizado, se ajustaron por mínimos cuadrados los resultados obtenidos a curvas de tipo parabólico (ver en la Figura

## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

---

4.40 a la Figura 4.42, las fórmulas con sus correspondientes coeficientes de ajuste  $R^2$ ). Los resultados tanto para la cara expuesta como la resguardada de las probetas con relación  $a/c=0,45$  son similares, por lo cual se optó por una única fórmula de ajuste. En todos los casos, los coeficientes de ajuste obtenidos fueron buenos, superiores a 0,9.

### 4.2.6 Contaminación del hormigón con $\text{CO}_2$ y el ión $\text{Cl}^-$

Los resultados obtenidos de contaminación del hormigón, son los siguientes:

**$\text{CO}_2$ :** No se encontró frente de carbonatación en las probetas.

**$\text{Cl}^-$ :** Se presentan los gráficos del perfil promedio de penetración de ión  $\text{Cl}^-$  libre, a partir de los resultados obtenidos de las probetas para cada relación  $a/c$ . Dichos resultados, se organizaron según el instante en que se realizaron las determinaciones y la relación  $a/c$ . En cada gráfico se presentan simultáneamente los resultados para la cara expuesta y la resguardada.

A continuación, en la Figura 4.43 y la Figura 4.44, se presentan los resultados del perfil de ión  $\text{Cl}^-$  libre a los 2,2 años de exposición.

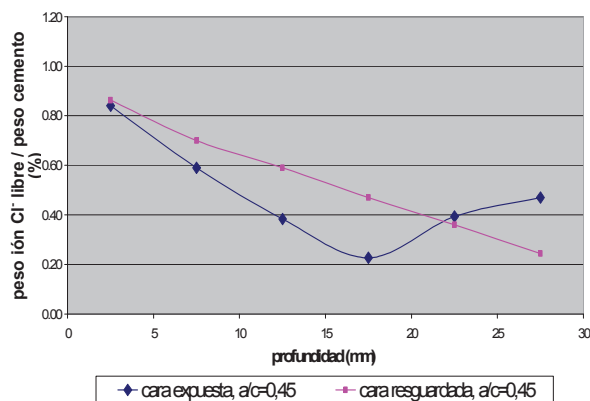


Figura 4.43. 2º año, perfil ión  $\text{Cl}^-$  libre,  $a/c=0,45$

## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

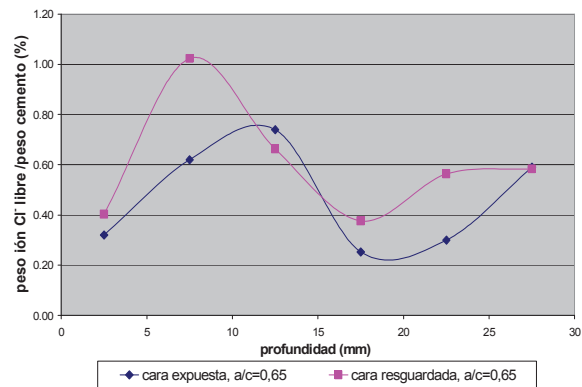


Figura 4.44. 2º año, perfil ión  $\text{Cl}^-$  libre,  $a/c=0,65$

En la Figura 4.45 y la Figura 4.46 se presenta el perfil de ión  $\text{Cl}^-$  libre a los 3,4 años de exposición..

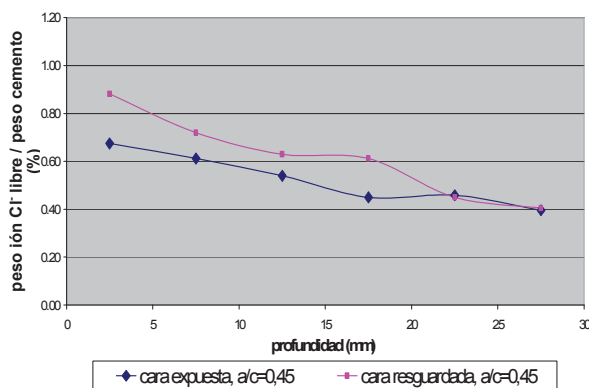


Figura 4.45. 3º año, perfil ión  $\text{Cl}^-$  libre,  $a/c=0,45$

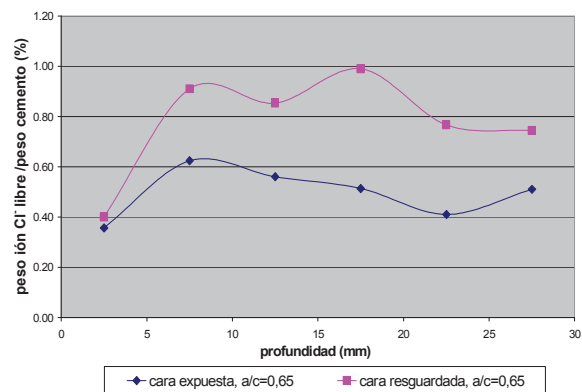


Figura 4.46. 3º año, perfil ión  $\text{Cl}^-$  libre  $a/c=0,65$

## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

En la Figura 4.47 se presenta el perfil de ión  $\text{Cl}^-$  libre a los 4,3 años de exposición.

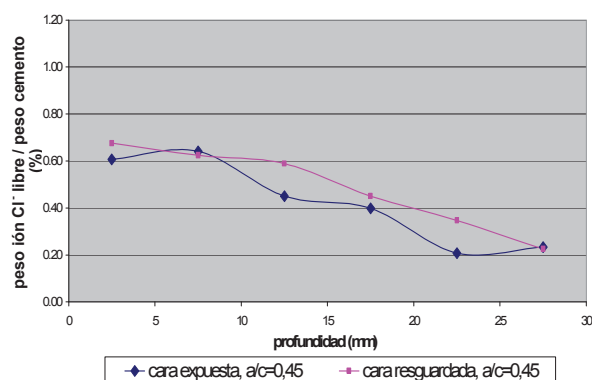


Figura 4.47. 4º año, perfil ión  $\text{Cl}^-$  libre,  $a/c=0,45$

Observando en conjunto los perfiles anteriores de contaminación de las probetas con el ión  $\text{Cl}^-$ , se encuentra que en general para ambas relaciones  $a/c$ , los valores correspondientes a la cara resguardada, son superiores a los de la cara expuesta.

### 4.2.7 Resumen:

En todas las armaduras, durante el período de exposición, se observa coherencia entre los comportamientos de los tres parámetros electroquímicos registrados, y a su vez una marcada dependencia respecto de la relación  $a/c$ . Si seguimos la evolución de la velocidad de corrosión, de las armaduras, para el hormigón con relación  $a/c=0,65$ , se observa que una vez alcanzado un potencial del orden de los  $-200\text{mV}$  (CSE), los valores de  $i_{corr.}$  sufren un marcado ascenso desde niveles de corrosión despreciable hasta alta. Esta situación concuerda con el rango ( $-200$  a  $-350\text{mV}$ , CSE) que hace referencia la norma ASTM C876 (ASTM, [3]) donde es posible la existencia de corrosión.

En relación a la resistividad, al inicio de la instalación de las probetas, los

## 4.2 Probetas estación “La Paloma”

---

valores registrados corresponden a un riesgo alto de corrosión, y luego, hacia el final del período de estudio, a un riesgo moderado. Esta situación, es consistente con la aparición de corrosión en las armaduras, del hormigón con relación  $a/c=0,65$ .

Con respecto a las armaduras en los hormigones con  $a/c=0,45$ , los valores registrados de velocidad de corrosión se mantienen en niveles de ausencia de corrosión. Esta situación es consistente con los registros de potencial cuyo rango de valores, es aproximadamente superior a los  $-200$  mV (CSE), lo cual corresponde según norma ASTM C876 (ASTM, [3]) con una situación de 90% de probabilidad que no exista corrosión.

# Capítulo 5

## Análisis de resultados

En este capítulo, se analizaron diversos aspectos vinculados al problema de la corrosión de las armaduras, entre ellos, evolución de los parámetros electroquímicos, pérdida de masa que sufren las armaduras, contaminación del hormigón con los agentes agresivos, obtención de los coeficientes  $C_s$  y  $D$ , que caracterizan la vulnerabilidad de los hormigones al ingreso de los agentes contaminantes, incidencia de los materiales e influencia del ambiente.

### 5.1. Parámetros electroquímicos

El comportamiento del potencial de corrosión en la estación Prado, es esencialmente diferente al de la estación La Paloma. En Prado los potenciales en todos los casos, marcan una tendencia con el transcurso del tiempo a estabilizarse de forma asintótica a un valor próximo a 0mV (CSE), mientras que en La Paloma, los valores tienden a volverse cada vez más negativos. Estos comportamientos pueden interpretarse, a partir del grado de contaminación que presentan las probetas en cada caso.

En Prado, el frente de carbonatación, según estimaciones hechas a partir de registros realizados, aún no ha llegado en ningún caso al nivel de las armaduras. Esta situación, ha permitido que durante el período de estudio las armaduras en

## 5.1 Parámetros electroquímicos

---

todos los casos, estuvieran bajo la acción pasivante de un hormigón no contaminado en contacto con las mismas. Como consecuencia de ello, los potenciales se desplazan hacia valores que corresponden a la pasividad, y los registros de densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr.}$ ), no evidencian activación.

En La Paloma, el principal agente contaminante, es el ión  $Cl^-$ , el cual según registros realizados a los 2,2 años de exposición, ya presenta un cierto perfil de ingreso que alcanza valores de concentración mínimos, superiores al 0,2 % en las armaduras con mayor recubrimiento (ver Figura 4.43 y Figura 4.44 ). Este aspecto, se entiende es el que ha provocado un proceso de despasivación de las armaduras, que se manifiesta provocando que los potenciales se hayan desplazado hacia valores más negativos.

Con respecto a la diferencia en el comportamiento de la velocidad de corrosión, según la relación a/c, se observa una cierta vinculación con los perfiles de concentración de ión  $Cl^-$ , y la resistividad. O sea, según los perfiles de ión  $Cl^-$ , a iguales profundidades, estos valores son relativamente algo superiores para la relación a/c=0,65 que para la a/c=0,45, y respecto a la resistividad, son superiores para a/c=0,45 frente a a/c=0,65.

En resumen, se tiene que comparativamente para los hormigones con relación a/c=0,65 respecto de los 0,45, son mayores las concentraciones de ión  $Cl^-$  a nivel de las armaduras, y menor la resistividad, por lo tanto, esto se ve reflejado en la densidad de corriente de corrosión donde se registraron valores correspondientes a corrosión activa para los hormigones con a/c=0,65, mientras que para aquellos con a/c=0,45, aún no se registró un inicio de la corrosión.

Con respecto al comportamiento electroquímico de las armaduras de la cara expuesta contra la resguardada, en la estación Prado no se observa prácticamente diferencia mientras que en la estación La Paloma, es observada una diferencia que se evidencia con bajo grado, manifestándose a través de potenciales más negativos,  $i_{corr.}$  más altas y resistividades más bajas.



### 5.2. Pérdida de masa en las armaduras

En todas las probetas de la estación Prado, la pérdida de masa por corrosión de las armaduras resultó despreciable. Esto es debido a los bajos niveles de contaminación con  $\text{CO}_2$  y  $\text{Cl}^-$  alcanzados a nivel de las armaduras, que no llegaron a romper la capa pasiva. También, se observó que los valores que corresponden a las probetas con relación  $a/c=0,45$ , son levemente superiores a los de la relación  $a/c=0,65$ . En principio, hubiera sido de esperar que los valores menores correspondieran con las probetas de relación  $a/c=0,45$ , por tener menor porosidad, y por ende mayor resistencia al ingreso de los agentes contaminantes.

En relación a los resultados de la estación La Paloma, observando las gráficas de pérdida de sección en función del tiempo (Figura 4.40 a la Figura 4.42), se observa una diferencia en el andamio de las curvas en función del recubrimiento, la cara de exposición y la relación  $a/c$ . Se confirma la marcada influencia de la relación  $a/c=0,45$ , frente a la  $a/c=0,65$  en la resistencia de la corrosión de las armaduras. En las probetas con relación  $a/c=0,65$ , tanto en la cara expuesta como en la resguardada, se observan pérdidas de sección significativamente mayores que en las probetas con relación  $a/c=0,45$ , que resultaron prácticamente despreciables.

En esta estación para las probetas con relación  $a/c=0,65$  se confirma que existe una significativa diferencia de valores entre la cara expuesta y la resguardada. Para los tres recubrimientos, la pérdida de sección de las armaduras de la cara resguardada, es mayor al de la cara expuesta. Esto último se explica en correspondencia con los niveles de contaminación por ión  $\text{Cl}^-$ , y demás parámetros electroquímicos, cuya combinación resultó más agresiva para la cara resguardada que la expuesta.

Estos últimos resultados motivaron profundizar el estudio de las probetas con relación  $a/c=0,65$ , evaluando en cada cara por separado y para cada

## 5.2 Pérdida de masa en las armaduras

recubrimiento, la pérdida porcentual de sección de las armaduras en función del tiempo. Los resultados obtenidos se presentan a continuación en la Figura 5.1 y la Figura 5.2.

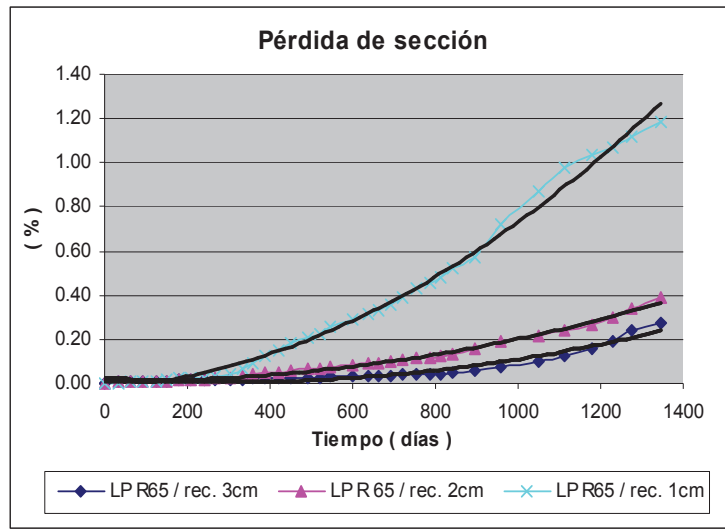


Figura 5.1. Estación La Paloma. Pérdida promedio de sección, en las armaduras de la cara resguardada de las probetas con relación  $a/c=0,65$ .

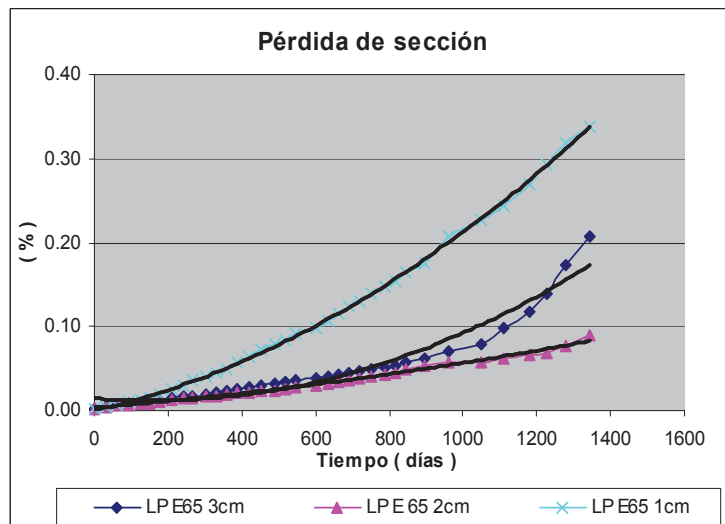


Figura 5.2. Estación La Paloma. Pérdida promedio de sección, en las armaduras de la cara expuesta de las probetas con relación  $a/c=0,65$ .

## 5.2 Pérdida de masa en las armaduras

---

De estas últimas gráficas, puede observarse que la pérdida de sección, en las armaduras con recubrimiento 1,5cm, es significativamente mayor a aquellas con mayor recubrimiento, y que las pérdidas de sección de las armaduras para los recubrimientos de 2 y 3cm son de orden similar.

Si hiciéramos la hipótesis que las armaduras y el hormigón de ambos tipos de probeta, pertenecieran a una estructura expuesta a las mismas condiciones ambientales, del estudio, tendríamos que según recomendaciones de reparación (Feliu et al., [28]), no sería necesario adicionar nuevas armaduras para reforzar el deterioro que sufrieron, ya que la pérdida de sección de las mismas, en el período estudiado, resultó inferior al 15% de su sección original. En esta situación, sólo sería suficiente realizar la reparación del hormigón que eventualmente se hubiera desprendido. No obstante, para ambas relaciones  $a/c$ , resultó de interés calcular cuál sería el período -manteniéndose la dinámica de corrosión registrada- durante el cual, según criterios de reparación anteriormente expresados, no sería necesario colocar armaduras de refuerzo, o sea para el cuál las pérdidas de masa fueran inferiores al 15% de su sección original. Para poder realizar dichas estimaciones, se ajustaron por mínimos cuadrados los resultados de pérdida de sección de las barras en función del tiempo, a una curva de tipo parabólico. (ver fórmulas y curvas de ajuste en la Figura 4.40 a la Figura 4.42). Luego con la expresión de dichas curvas de ajuste, fue posible calcular el tiempo para el cual, la pérdida de sección en las armaduras para cada recubrimiento, fuese del 15%. A continuación en la Figura 5.3 se representan gráficamente los resultados obtenidos para el hormigón con relación  $a/c=0,65$ , los tres recubrimientos y ambas caras de exposición. Siguiendo un razonamiento análogo en la Figura 5.4 se presentan los resultados obtenidos para el hormigón con relación  $a/c=0,45$ .

De acuerdo a la nomenclatura utilizada en los gráficos, “E45/65 y R45/65”, refieren a los resultados que corresponden a la cara expuesta y resguardada de las

## 5.2 Pérdida de masa en las armaduras

probetas, y al hormigón con relación  $a/c=0,45$  o  $0,65$  utilizado en las mismas.

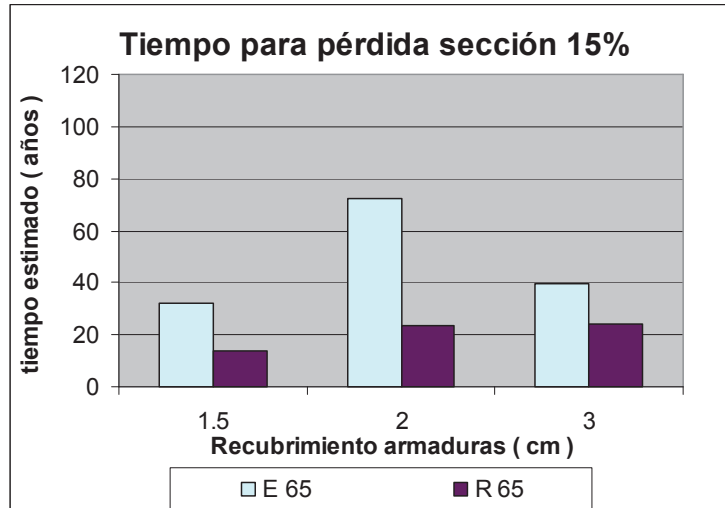


Figura 5.3. Estación La Paloma. Tiempo estimado para una pérdida de sección de las armaduras del 15%, en un hormigón con rel.  $a/c=0,65$ .

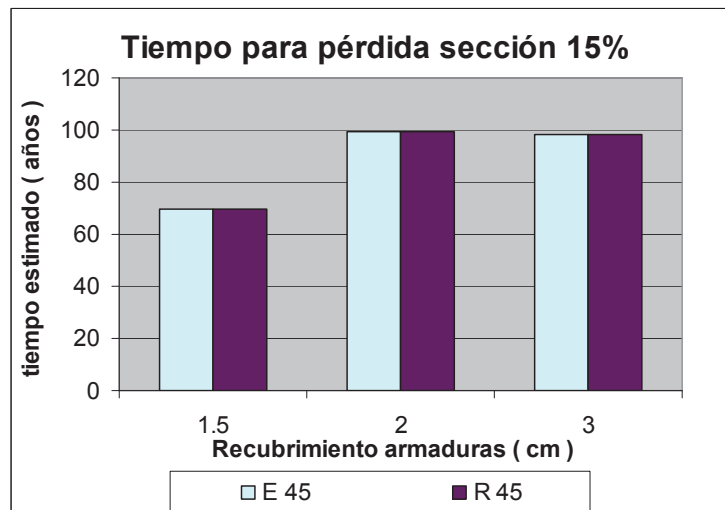


Figura 5.4. Estación La Paloma. Tiempo estimado para una pérdida de sección de las armaduras del 15%, en un hormigón con rel.  $a/c=0,45$ .

En todos los casos, se observa que el tiempo estimado para reforzar las

## 5.2 Pérdida de masa en las armaduras

---

armaduras, con pérdidas de sección del orden de 15%, es significativamente mayor en los hormigones con relación  $a/c=0,45$  que en aquellos con  $a/c=0,65$ . También se observa que dicho tiempo, es inferior para las armaduras con el menor recubrimiento (1,5 cm), que para las otras con mayor recubrimiento.

En resumen, si tomamos como hipótesis que el fenómeno de corrosión registrado durante período de estudio de las probetas de la estación La Paloma, prosigue con iguales características, se llegaría a partir de las expresiones halladas de pérdida de sección de las armaduras en función del tiempo, que para el hormigón con  $a/c=0,65$ , las armaduras más expuestas (1,5 cm de recubrimiento), sufrirían una pérdida de sección del 15 %, en aproximadamente 13 años para la cara resguardada, y en 32 años para la cara expuesta (ver . Figura 5.3). Por otro lado para el hormigón con  $a/c=0,45$ , se llegaría a que las armaduras más expuestas (1,5cm de recubrimiento) alcanzarían en ambas caras, una pérdida de sección del 15% en aproximadamente 70 años.( ver Figura 5.4).

### 5.3. Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes Cs y D

#### *Estación Prado:*

##### Contaminación con CO<sub>2</sub>

Del análisis de los resultados se observó que el hormigón con relación a/c=0,45, no presentó carbonatación.

El hormigón con relación a/c=0,65 presentó carbonatación. Se obtuvo para ambas caras de exposición un mismo coeficiente de propagación de la carbonatación,  $K_{CO_2} = 2,44$  (mm/año<sup>-1/2</sup>). Dicho valor surgió de asumir que el fenómeno de penetración de la carbonatación, se rige por el modelo simplificado, que establece que la profundidad de carbonatación del hormigón, se relaciona mediante el coeficiente  $K_{CO_2}$ , con la raíz cuadrada del tiempo que tuvo de exposición (T. de Rincón e al., [53]). Con estos resultados, si tomamos como hipótesis que se mantiene constante la dinámica de carbonatación registrada, se tendría que utilizando el modelo anteriormente mencionado, la carbonatación alcanzaría las armaduras con menor recubrimiento (1,5 cm) luego de aproximadamente 38 años. A partir de ese momento, las armaduras quedarían con riesgo de corroerse.

Según la norma EHE – 2008 (EHE, [34]), para una estructura del tipo edificio de vivienda u oficinas, o cualquier otra estructura de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media, este último hormigón, con recubrimiento de armaduras de 1,5 cm, no sería de aceptación desde el punto de vista de la durabilidad, ya que debería ser mayor a 50 años, lo cual no se cumple ya que como se concluyó a los 38 años queda en riesgo. Si por el contrario, se utilizara el mismo tipo de hormigón, pero con un recubrimiento de las armaduras de 3,0 cm, siguiendo un razonamiento análogo al anterior, se tendría que la carbonatación alcanzaría las armaduras en 151 años, período ampliamente superior a los 50 años exigidos en la norma. En este último caso, una

### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes Cs y D

---

estructura construida con el hormigón estudiado, con relación a/c=0,65 y 3,0 cm de recubrimiento de las armaduras, sí sería de aceptación desde el punto de vista de la durabilidad para la tipología de obras anteriormente mencionada.

Finalmente teniendo en cuenta que el tiempo insumido para el ingreso de un frente de carbonatación, se vincula mediante una relación del tipo parabólico con la profundidad de penetración del mismo, puede concluirse que aumentar el espesor de recubrimiento de las armaduras, constituye un recurso muy favorable para extender considerablemente, la durabilidad del hormigón.

#### Contaminación con el ión Cl<sup>-</sup>

En esta estación no se registró contaminación con el ión Cl<sup>-</sup> durante el período estudiado.

#### ***Estación La Paloma:***

#### Contaminación con CO<sub>2</sub>

En esta estación no se registró contaminación con CO<sub>2</sub> durante el período estudiado.

#### Contaminación con el ión Cl<sup>-</sup>

Observando los gráficos con los resultados de contaminación con el ión Cl<sup>-</sup>, (ver Figura 4.43 a la Figura 4.47) se encuentra que en general, los registros correspondientes al hormigón con relación a/c=0,45, son inferiores a los del hormigón con relación a/c=0,65, y que a su vez para cada tipo de hormigón, los valores correspondientes a la cara resguardada son mayores a los de la expuesta.

En los registros obtenidos luego de transcurridos 2,2 años de exposición, (ver Figura 4.43 y Figura 4.44), se observó para ambas relaciones a/c, que el valor mínimo registrado a nivel de las armaduras con mayor recubrimiento (3,0 cm), corresponde a una concentración de ión Cl<sup>-</sup> libre, respecto de la masa de cemento,

### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes Cs y D

---

superior a aproximadamente 0,2%. Según la norma EHE-2008 (EHE, [34]), los límites establecidos de contenido máximo de ión Cl<sup>-</sup> totales, para evitar riesgos de corrosión de las armaduras, son de 0,2% para hormigones con armaduras pretensadas y 0,4% para hormigones con armaduras pasivas. Con esta referencia, si hiciéramos la hipótesis que las armaduras de las probetas, pertenecieran a una estructura pretensada, tendríamos que para ambos hormigones, todas las armaduras estarían con riesgo de corrosión.

Observando el perfil de contaminación con el ión Cl<sup>-</sup>, a los 3,4 años de exposición (ver Figura 4.45 y Figura 4.46), se encuentra que en ambos hormigones, e independientemente de la cara de exposición, los registros son superiores a 0,4%, por lo que según la norma EHE –2008 (EHE, [34]), dichas armaduras estarían con riesgo de corrosión tanto si se tratara de una estructura con armaduras pasivas como pretensadas.

En el sección 3.3.2.4.3, se realizó un procesamiento numérico de los resultados con el propósito de obtener los valores del coeficiente de difusión  $D$  del ión Cl<sup>-</sup>, y la concentración en superficie  $C_s$  de los mismos.

Se obtuvo un total de 216 resultados de ensayos de contaminación del hormigón con el ión Cl<sup>-</sup>. Este total se discrimina en 126 que corresponden a las probetas con relación  $a/c=0,45$ , y 90 para la relación  $a/c=0,65$ . No se obtuvieron resultados correspondientes al cuarto año, para las probetas con relación  $a/c=0,65$ .

A continuación y a modo de ejemplo, se presentan dos gráficos con los resultados del perfil de penetración de ión Cl<sup>-</sup> libre en las probetas de hormigón (ver Figura 5.5 y Figura 5.6). En cada gráfico se detalla: el instante y la cara sobre la cual (expuesta o resguardada) corresponden las determinaciones, los códigos de probeta ensayadas y la relación  $a/c$  del hormigón.



### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes Cs y D

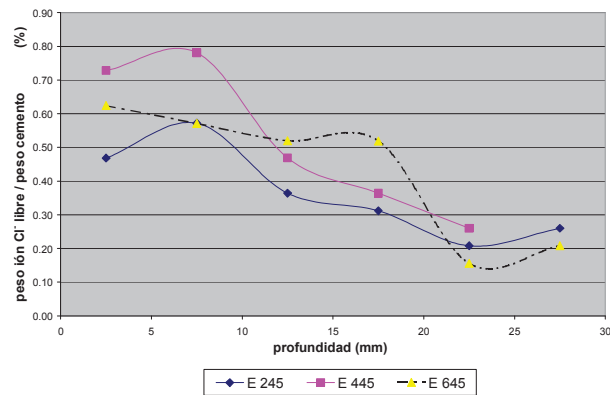


Figura 5.5. Muestras a/c=0.45, corte 4,3 años, cara expuesta, probetas código 2, 4 y 6.

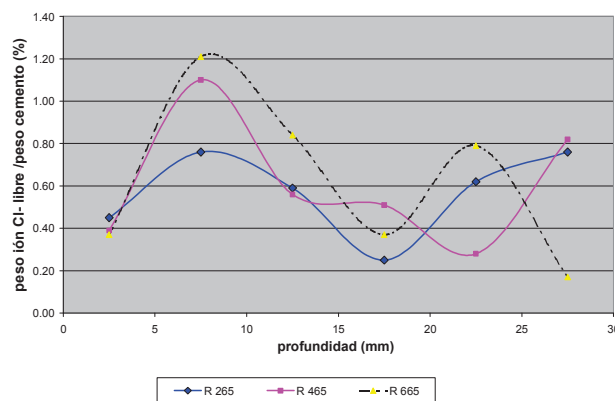


Figura 5.6. Muestras a/c=0.65, corte 2,2 años, cara resguardada, probetas código 2, 4 y 6

Previo a realizar el procesamiento numérico de ajuste de los resultados obtenidos, y con el objetivo de detectar posibles inconsistencias, se analizó gráficamente el andamio de los mismos. Como resultado, de este análisis, se observaron algunas curvas con un andamio bastante irregular, apartado del esperable para un fenómeno de difusión. Como ejemplo de esto, ver Figura 5.7 y Figura 5.8. La causa de esto podrían ser entre otros, errores experimentales, aspectos inherentes al hormigón o la actuación de otros fenómenos de transporte

### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes Cs y D

---

del ión Cl<sup>-</sup>, además de la difusión. Analizando en particular los aspectos inherentes al hormigón, se estima la causa puede responder a varios factores, entre ellos, se consideran los siguientes los de mayor relevancia:

- heterogeneidades en la red capilar, porosidad, o la estructura granular,
- heterogeneidades en el contenido y distribución de la pasta de cemento,
- heterogeneidades en el contenido de aluminato tricálcico (A<sub>3</sub>C). Sustancia principal involucrada en la retención de ión Cl<sup>-</sup> libres,

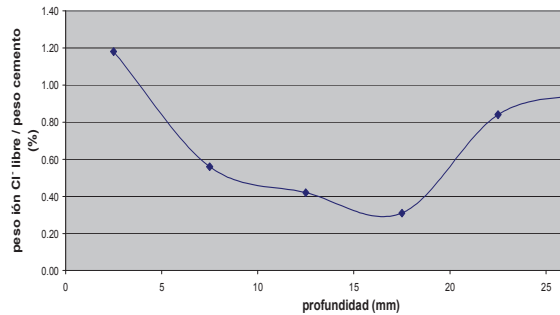


Figura 5.7. Muestra a/c=0.45, corte 2<sup>o</sup> año, cara expuesta.

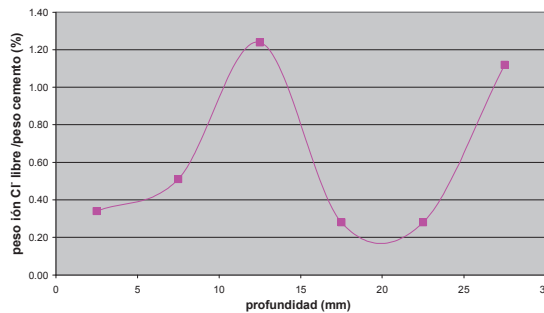


Figura 5.8. Muestra a/c=0.65, corte 2<sup>o</sup> año, cara expuesta.

También se observó para ambos tipos de hormigón, que prácticamente en todos los resultados que corresponden al intervalo de profundidad 0 a 7,5mm, perteneciente a la denominada piel del hormigón, existe un mismo patrón, donde

### 5.3 Contaminación con $\text{CO}_2$ y $\text{Cl}^-$ , coeficientes $C_s$ y $D$

los valores decrecen hacia la superficie. Esto puede apreciarse con trazos punteados de color rojo en la Figura 5.9 y la Figura 5.10.

Este fenómeno se manifestó de forma mas acentuada, en las probetas con relación  $a/c=0,65$ . Esta observación, llevó a que se descartaran los resultados correspondientes a las profundidades del intervalo 0 a 7,5mm, ya que en dicha zona, además del fenómeno de transporte por difusión, se superponen otros de marcada incidencia, como por ejemplo el fenómeno de lavado, que no serían reflejados en la fórmula de ajuste que se busca. Así, del lote general de resultados con ambas relaciones  $a/c$ , se obtuvo uno más reducido, que se denominó lote 1.

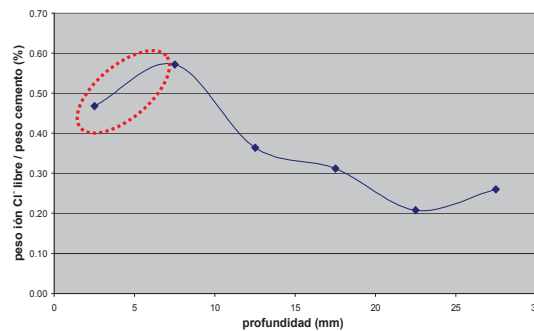


Figura 5.9. Muestra  $a/c=0.45$ , corte 4º año, cara expuesta.

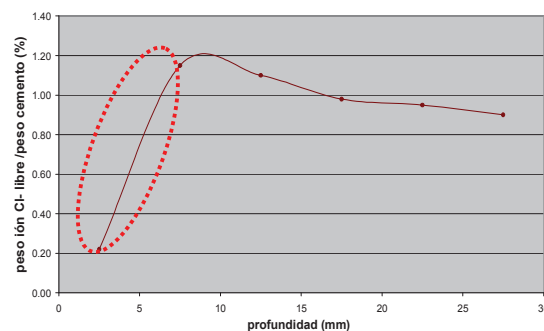


Figura 5.10. Muestra  $a/c=0.65$ , corte 3º año, cara resguardada.

Luego en el lote 1 se descartaron los resultados que se hizo referencia

### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes C<sub>s</sub> y D

---

anteriormente, que corresponden a curvas con un andamio bastante apartado del esperable y se conformó otro nuevo lote que se denominó lote 2. Motivó la conformación de este último lote, la expectativa, de lograr un mejor ajuste de los resultados.

Finalmente, como las hipótesis que se consideraron para conformar el lote 2, no son firmes, y tampoco se tiene a priori la certeza que se logre un mejor ajuste con este, se resolvió estudiar ambos lotes.

Los resultados de cada lote, se subdividieron según la relación a/c del hormigón, y la cara de exposición que corresponden. De este modo, resultaron cuatro subgrupos, que se designaron 45/E, 45/R, 65/E y 65/R, donde los números 45 o 65 corresponden a la relación a/c=0,45 o 0,65 del hormigón y las letras: E, indica cara expuesta, y R, resguardada, a la cual pertenecen.

En el lote 2, resultó insuficiente la cantidad de registros para realizar el ajuste en los subgrupos correspondientes a cada cara de exposición.

También para cada lote y relación a/c, se conformó un subgrupo más, integrado por el conjunto de los resultados de ambas caras de exposición. Cada uno de estos subgrupos se denominó 45 / E y R; y 65 / E y R, en correspondencia con las relaciones a/c=0,45 y 0,65.

Estos subgrupos de estudio, se conformaron sobre la base que para la formulación teórica de ajuste escogida, el parámetro  $D$ , es una característica intrínseca del hormigón, e independiente de la cara de exposición, y  $C_s$ , depende fundamentalmente de las condiciones ambientales.

Para cada lote y grupos de resultados considerados, se calcularon los parámetros de ajuste  $D$ ,  $C_s$ , y el coeficiente de correlación  $R^2$ , que informa la precisión del ajuste que se logra en cada caso. A continuación, en el Cuadro 5.1 y la Figura 5.11 a la Figura 5.16 se presentan los resultados obtenidos.

### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes C<sub>s</sub> y D

Cuadro 5.1. Resultados de *D*, *C<sub>s</sub>* y *R<sup>2</sup>* para cada grupo de datos y lote.

		45 / E y R	45 / E	45 / R	65 / E y R	65 / E	65 / R
<b>Lote 1</b>	<b>D</b> (mm <sup>2</sup> /año)	180.5	316.7	163.9	512.5	487.1	461.4
	<b>C<sub>s</sub></b>	0.74	0.61	0.81	0.83	0.71	0.97
	<b>R<sup>2</sup></b> (%)	27%	19%	36%	8%	8%	11%
<b>Lote 2</b>	<b>D</b> (mm <sup>2</sup> /año)	118	N.C.	N.C.	401	N.C.	N.C.
	<b>C<sub>s</sub></b>	0.79	N.C.	N.C.	0.82	N.C.	N.C.
	<b>R<sup>2</sup></b> (%)	49%	N.C.	N.C.	9%	N.C.	N.C.

**NOTAS:**  
N.C. - dato no calculado por insuficiencia de registros

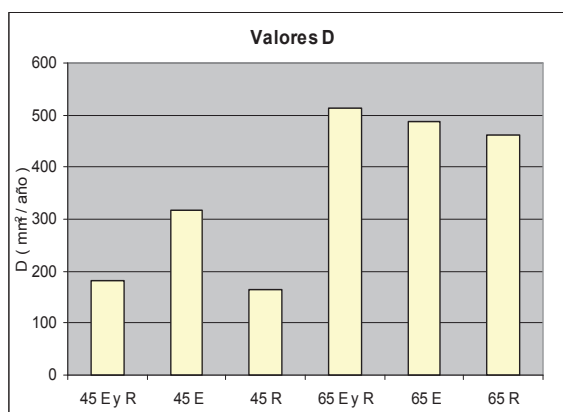


Figura 5.11. Valores de *D*, lote 1.

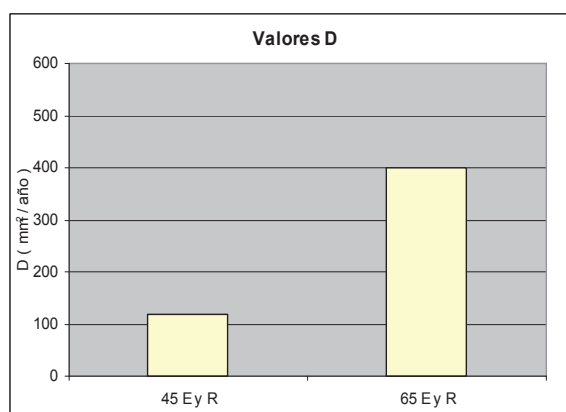


Figura 5.12. Valores de *D*, lote 2

### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes Cs y D

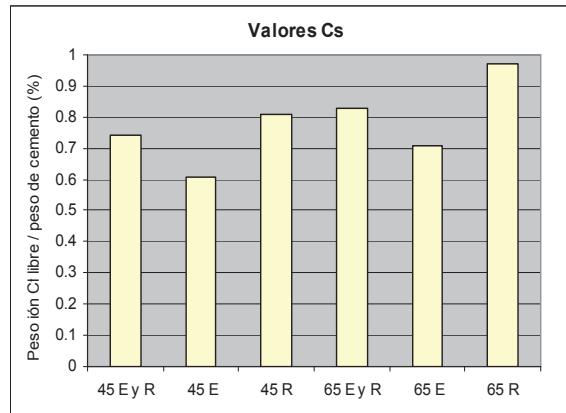


Figura 5.13. Valores de  $C_s$ , lote 1

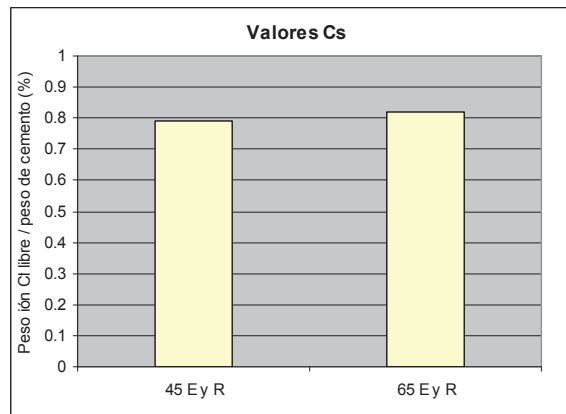


Figura 5.14. Valores de  $C_s$ , lote 2

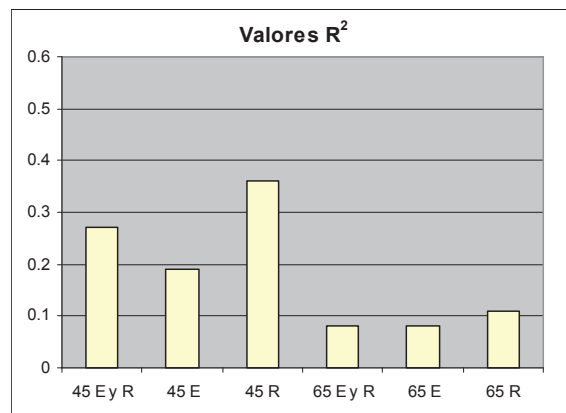


Figura 5.15. Valores de  $R^2$ , lote 1

### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes Cs y D

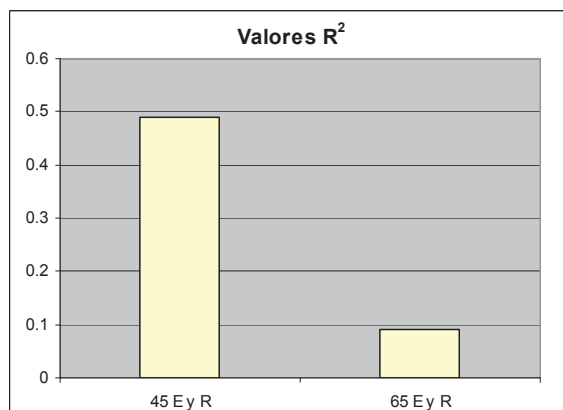


Figura 5.16. Valores de  $R^2$ , lote 2

Considerando los mismos lotes de resultados, se encontró de interés, realizar un análisis de ajuste para cada año por separado. Dada la cantidad de resultados disponible, sólo fue posible realizar el análisis para el segundo y tercer año, para los grupos denominados 45 E y R; y 65 E y R. A continuación, en el Cuadro 5.2, y la Figura 5.17 a la Figura 5.19, se resumen los resultados obtenidos.

Cuadro 5.2. Resultados de  $D$ ,  $C_s$  y  $R^2$  para el lote 1, por año y grupo de datos

		2º año	3º ño	
Lote 1	(45 E y R)	D (mm <sup>2</sup> /año)	210.8	262.2
		C <sub>s</sub>	0.75	0.78
		R <sup>2</sup> (%)	19%	52%
	(65 E y R)	D (mm <sup>2</sup> /año)	332	2002.6
		C <sub>s</sub>	0.88	0.79
		R <sup>2</sup> (%)	13%	2%

### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes Cs y D

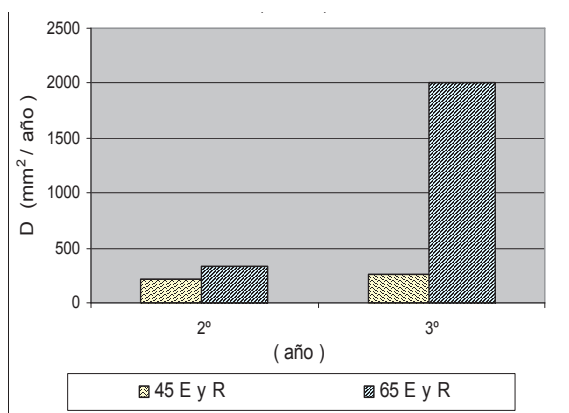


Figura 5.17. Valores de  $D$ , lote 1

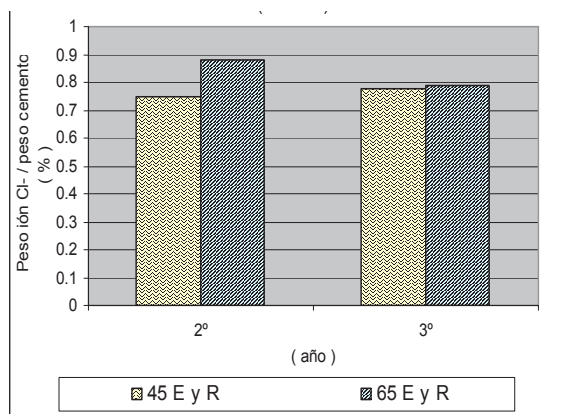


Figura 5.18. Valores de  $C_s$ , lote 1

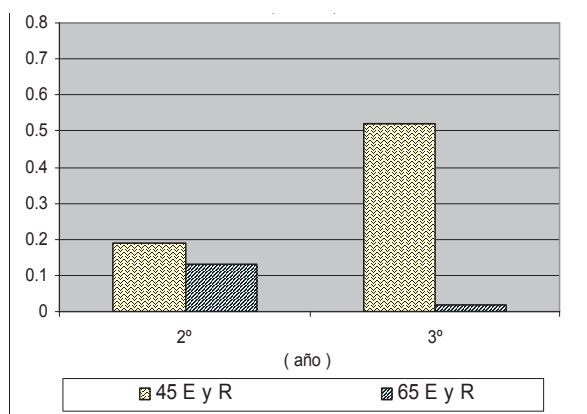


Figura 5.19. Valores de  $R^2$ , lote 1



Se observa que todos los resultados obtenidos de  $D$ , están en el rango de valores comprendidos entre  $10^{-7}$  y  $10^{-8}$  cm<sup>2</sup>/s, lo cual concuerda con resultados generales referenciados por otros autores, como por ejemplo (Bamforth, P., [20]).

Con respecto a los valores obtenidos de  $C_s$ , estos se encuentran en un rango de valores levemente superior a 0,75%, que coincide con resultados referidos por otros autores, para hormigones de cemento Pórtland (Bamforth, P., [19]).

A continuación se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos de  $D$ ,  $C_s$  y  $R^2$ , organizado por cada lote, grupo e instante que se obtuvieron.

#### ***Lote 1:***

Con respecto al parámetro  $D$ , en la Figura 5.11, se observa que todos los grupos de resultados correspondientes a los hormigones con relación  $a/c=0,45$  presentan valores inferiores a los del hormigón con  $a/c=0,65$ . A su vez, para ambos hormigones, los resultados de cada grupo correspondiente a la cara resguardada son inferiores respecto a los de la expuesta.

Analizando en la Figura 5.17 el comportamiento de este mismo parámetro en el tiempo, se observa un aumento del 2° al 3° año (Andrade et al., [15]), tanto para los resultados del hormigón con relación  $a/c=0,45$ , como para aquellos con  $a/c=0,65$ . Este fenómeno resultó más acentuado en las probetas con relación  $a/c=0,65$ , que para las otras con  $a/c=0,45$ .

En relación al parámetro  $C_s$ , en la Figura 5.13, se observa, que para ambas relaciones  $a/c$ , los valores, de la cara resguardada son superiores a los de la cara expuesta. En la misma figura, se observa que el resultado del análisis en conjunto de ambas caras, arroja valores similares para las dos relaciones  $a/c$ . Como puede observarse en la Figura 5.18, este parámetro, no muestra variaciones significativas del 2° al 3° año.

### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes Cs y D

---

En la Figura 5.15 se presentan los resultados del coeficiente de correlación  $R^2$ . Allí puede observarse que los resultados correspondientes a los hormigones con relación  $a/c=0,45$  presentan un porcentaje de ajuste sensiblemente superior a los de  $a/c=0,65$ . En dicha figura también se observa que para ambos tipos de hormigón, los resultados obtenidos para la cara resguardada son superiores a los de la cara expuesta. Por último, en la Figura 5.19, se observa que los resultados para la relación  $a/c=0,45$ , presentan una tendencia creciente con el transcurso del tiempo, mientras que los correspondientes a la  $a/c=0,65$ , es decreciente. También se observa que para ambas determinaciones en el tiempo, los valores correspondientes a la relación  $a/c=0,45$ , son superiores a los de  $a/c=0,65$ .

#### **Lote 2:**

En la Figura 5.12, se observa que el valor del parámetro  $D$ , correspondiente a la relación  $a/c=0,45$ , es menor que el correspondiente a la relación  $a/c=0,65$ .

Con respecto al parámetro  $C_s$ , en la Figura 5.14, se observa que los valores obtenidos, son similares para ambas relaciones  $a/c$ .

En relación a los resultados del coeficiente de correlación  $R^2$ , se observa en la Figura 5.16, que los resultados para la relación  $a/c=0,65$  son sensiblemente inferiores a los correspondientes a la relación  $a/c=0,45$ .

En resumen, con respecto a la caracterización del hormigón desde el punto de vista de su vulnerabilidad al ingreso del ión Cl<sup>-</sup>, medida a través del coeficiente de difusión  $D$ , se entendió razonable, extraer conclusiones en común para ambos lotes estudiados, sin discriminarlas, ya que se obtuvo un andamio similar, en los gráficos obtenidos de los parámetros  $D$ ,  $C_s$  y el coeficiente de correlación  $R^2$  (ver Figura 5.11 a Figura 5.16).

Comenzando por el parámetro  $D$ , se observó que presenta valores inferiores para el hormigón con relación  $a/c=0,45$ , que para el hormigón con

### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes C<sub>s</sub> y D

---

relación  $a/c=0,65$ . Este resultado, comprueba claramente que los hormigones con mayor relación  $a/c$ , presentan una mayor red capilar y porosidad, que en definitiva, permite una difusión mas rápida de los contaminantes en su interior. A su vez, para ambas relaciones  $a/c$ , los valores de  $D$  de la cara que hemos llamado resguardada son inferiores a los de la expuesta. Este aspecto, deja de manifiesto, que existe algún factor, cuya incidencia depende de la orientación, de exposición del hormigón.

Con respecto a la evolución creciente, observada de  $D$  en el tiempo, se concluye, que es un aspecto no considerado en la fórmula teórica de ajuste adoptada. Esto podría ser objeto de un futuro estudio, donde se incorpore la incidencia del tiempo en la expresión teórica del fenómeno.

En relación al parámetro  $C_s$  se observó, que los resultados del análisis en conjunto de ambas caras, arrojó valores similares. Esto muestra que se trata de un valor característico del ambiente, independientemente de la relación  $a/c$  del hormigón en cuestión. A su vez se observó que este parámetro permaneció prácticamente constante en el tiempo, lo cual corrobora su vinculación con las condiciones ambientales, admitidas constantes. También se observó que para ambas relaciones  $a/c$ , los valores de la cara resguardada son superiores a los de la cara expuesta. Esto se entiende responde a que la cara resguardada, tiene una mayor exposición al ión Cl<sup>-</sup>, debido a que los vientos que inciden sobre la misma, los arrastran con el aerosol marino.

En relación al coeficiente de correlación  $R^2$ , se comprueba que los hormigones con relación  $a/c=0,65$ , tienen peor ajuste que los hormigones con  $a/c = 0,45$ . Esto puede interpretarse como consecuencia de las características de porosidad y capilaridad de cada hormigón, entendiendo que en la medida que estas aumentan, otros fenómenos de transporte puedan tener mayor participación que la difusión, por lo cual disminuye este coeficiente. No se constató una evolución definida en el tiempo de este parámetro, por lo que no fue posible sacar

### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes Cs y D

---

conclusiones al respecto.

Como ya fue mencionado, los valores de  $D$  y  $C_s$ , permiten realizar a partir de la aplicación de la segunda Ley de Fick, estimaciones de durabilidad, en relación al avance de la contaminación del hormigón con el ión Cl<sup>-</sup>. En este sentido y con los resultados obtenidos, motivó interés como caso de aplicación práctica, calcular cual sería el tiempo, que tardaría la contaminación natural con ión Cl<sup>-</sup> en los hormigones estudiados, en llegar con una concentración total de 0,4% (valor límite prescrito por la norma EHE 2008 (EHE, [34]) para evitar problemas de corrosión de armaduras pasivas) referida al peso de cemento, a armaduras que estuvieran con un espesor recubrimiento, igual al prescrito por la norma “Proyecto y Ejecución de Estructuras de Hormigón en Masa o Armado”, UNIT 1050:2005 (UNIT, [33]). Dicha norma, en el capítulo “Colocación de las Armaduras”, prescribe en la sección “Distancias a los Paramentos”, los valores mínimos de recubrimiento según el tipo de elemento y la resistencia característica a compresión del hormigón utilizado. En el caso de las probetas estudiadas, corresponden a una catalogación ambiental III (atmósfera marina o industrial) para dicha norma, donde a su vez, para un hormigón con resistencia característica ( $f_{ck}$ ) menor a 25 Mpa, que corresponde con el de relación  $a/c=0.65$  estudiado, prescribe un recubrimiento mínimo de 40mm, y para un hormigón con resistencia característica  $f_{ck}$  entre 25 y 40 Mpa, que corresponde con el de relación  $a/c=0.45$  estudiado, prescribe un recubrimiento mínimo de 35mm.

Utilizando los valores hallados de  $D$  y  $C_s$ , del lote 2, que corresponden a los del mejor ajuste al fenómeno de difusión del ión Cl<sup>-</sup> (ver Cuadro 5.1), aplicando la segunda Ley de Fick, se llega a que en el hormigón con relación  $a/c=0.65$ , se tardarían 4,1 años en alcanzar un nivel de contaminación con ión Cl<sup>-</sup> de 0,4% a nivel de armaduras con 4,0 cm de recubrimiento, y para el hormigón con relación  $a/c=0.45$ , 11,7 años para alcanzar el mismo nivel de contaminación, a una profundidad de recubrimiento de 3,5 cm.

### 5.3 Contaminación con CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, coeficientes C<sub>s</sub> y D

---

Cabe aclarar que la norma UNIT 1050:2005 en la sección “Durabilidad del hormigón”, para hormigón expuesto a un ambiente tipo III, prescribe una relación a/c máxima de 0,55, que sí la cumple el hormigón estudiado con relación a/c=0,45, pero no el de relación a/c=0,65. Para poder tomar también en consideración el cumplimiento de la limitación de la relación a/c=0,55, hay que realizar una corrección del valor del coeficiente  $D$  hallado para dicho hormigón. En la norma EHE 2008 (EHE, [34]), en el capítulo “Consideraciones Adicionales sobre Durabilidad”, se presenta una tabla donde para cada tipo de cemento, entrega valores genéricos del coeficiente  $D$  en función de la relación a/c. Observando dichos valores, se encuentra que para el rango de relación a/c entre 0,50 y 0,60, existe una relación lineal con los valores del coeficiente  $D$ . A partir de esta última observación, podríamos estimar cual sería el valor del coeficiente  $D$  para una relación a/c=0,55. Siguiendo este último razonamiento, tendríamos que para el hormigón estudiado con relación a/c=0,65, para el cual se obtuvo un valor  $D = 401$  (mm<sup>2</sup>/año), si hubiera sido confeccionado con una relación a/c=0,55, le correspondería un valor  $D = 339$  (mm<sup>2</sup>/año). Luego para este valor del coeficiente  $D$ , se requeriría un tiempo de 4,9 años para que una concentración de ión Cl<sup>-</sup> de 0,4% alcance una armadura con una profundidad de recubrimiento de 4,0cm.

En resumen, para las condiciones de exposición al ión Cl<sup>-</sup> de los hormigones estudiados, se pudo estimar a partir de los resultados de los coeficientes  $D$  y  $C_s$  obtenidos, el tiempo que tardaría una concentración de ión Cl<sup>-</sup> de 0,4%, en alcanzar armaduras que estuvieran ubicadas según las prescripciones de recubrimiento mínimo para atmósfera marina, contempladas en la norma UNIT 1050:2005 (UNIT, [33]). Resultó entonces un tiempo de 4,9 años para un hormigón con relación a/c=0,55, y de 11,7 años para uno con relación a/c=0,45.

## **5.4. Caracterización mecánica y física de los hormigones.**

A partir de la observación del Cuadro 3.26, donde se resumen todos los resultados obtenidos de la caracterización física y mecánica de los hormigones ensayados, es posible extraer las siguientes conclusiones:

Todos los resultados son sensibles a la relación  $a/c$  de cada hormigón. A su vez, también se observa que los resultados de los parámetros, para los hormigones con relación  $a/c=0,65$ , corresponden a una clasificación más desfavorable, que para la relación  $a/c=0,45$ . Esta valoración relacionada a la relación  $a/c$  de los hormigones, también se corresponde con el comportamiento electroquímico y de corrosión de las armaduras.

Con respecto a la corrosión de las armaduras, la acción del medio ambiente marino con presencia de ión  $Cl^-$ , resultó más agresiva en igual lapso de tiempo, que el ambiente urbano con presencia de  $CO_2$  como principal contaminante. A su vez, y en este mismo sentido, en el ambiente marino, se evidenció, un comportamiento marcadamente vinculado a la relación  $a/c$  del hormigón. O sea, en los hormigones con relación  $a/c=0,65$  se obtuvieron registros electroquímicos que reflejan mayor actividad de corrosión de las armaduras, que en los hormigones con relación  $a/c=0,45$ .

Para las probetas ensayadas en el ambiente urbano, la relación  $a/c$  del hormigón, también generó un comportamiento diferencial. En este caso, principalmente se reflejó, en la facilidad de ingreso del frente de carbonatación provocado por el  $CO_2$ , para los hormigones con  $a/c=0,65$ , a diferencia de los otros con  $a/c=0,45$ .

## 5.5. Parámetros climático - ambientales.

Con respecto a los niveles promedio, en el período estudiado de los agentes contaminantes CO<sub>2</sub>, ión Cl<sup>-</sup> y SO<sub>2</sub>, la estación Prado fue la que resultó con los mayores registros de CO<sub>2</sub>, (0,7 (mg / l)), y La Paloma con los mayores en ión Cl<sup>-</sup> (999 mg/(m<sup>2</sup>. d)). Según la norma ISO 9223 (ISO, [35]) de clasificación del grado corrosivo de la atmósfera, dicho nivel de contaminación con el ión Cl<sup>-</sup> corresponde a una categoría S<sub>3</sub>, denominada extrema.

Con respecto a la contaminación con SO<sub>2</sub>, en ambas estaciones, los niveles promedio registrados, son inferiores a 10 mg/ (m<sup>2</sup>/d). Según la norma ISO 9223 (ISO, [35]) de clasificación del grado corrosivo de la atmósfera, dichos niveles corresponden a una concentración de fondo, clasificada con categoría P<sub>0</sub>, considerada insignificante como ataque corrosivo a los metales.

En lo que respecta a la orientación de las probetas, en la estación Prado, no se observó influencia de este aspecto en relación a los resultados electroquímicos y de contaminación química. Todos los resultados obtenidos, presentan similar andamio y valores del mismo orden para ambas caras de exposición.

Por el contrario, en la estación la Paloma, la orientación de la cara de exposición, evidenció diferencias importantes en los resultados de comportamiento electroquímico y de contaminación química. En particular la cara resguardada, resultó con la mayor contaminación con el ión Cl<sup>-</sup>, y los mayores registros de corrosión en las armaduras, a diferencia de la cara expuesta a los vientos dominantes. Esto puede interpretarse en función que los vientos dominantes, que inciden sobre la cara expuesta, tienen la mayor permanencia en el tiempo, pero para el emplazamiento de las probetas, no registran las mayores intensidades, ni arrastre de aerosol marino como la dirección SW que impacta sobre la cara resguardada. Esto deja en evidencia que el alto contenido de ión Cl<sup>-</sup> presente en la atmósfera, tiene mayor incidencia en la contaminación de los hormigones, y la corrosión de las armaduras, para aquellos expuestos a la

## 5.5 Parámetros climático - ambientales

---

orientación SW que a la NE.

Con respecto a la influencia general del ambiente, según lo constatado no se observó correspondencia en la variación de los parámetros físicos y electroquímicos estudiados, que pueda asociarse directamente al ciclo de variación climática de las estaciones, ni a los parámetros climáticos - estudiados.



# Capítulo 6

## Conclusiones

Para los emplazamientos escogidos para las probetas de estudio, el ambiente de la estación marina, resultó en igual lapso de tiempo, marcadamente más agresivo desde el punto de vista de la corrosión de las armaduras que el de la estación urbana. Esto es debido a que en la estación marina, el principal agente contaminante, el ión  $\text{Cl}^-$ , presente en la atmósfera, penetró el hormigón con relación  $a/c=0,65$  hasta la profundidad de las armaduras, llegando con un nivel de concentración tal que desencadenó la corrosión de las mismas, mientras que para los hormigones con  $a/c=0,45$  aún no se ha evidenciado activación de la corrosión. Por otro lado, en la estación urbana, el principal contaminante  $\text{CO}_2$ , presente en la atmósfera, no alcanzó a carbonatar el hormigón hasta el nivel de las armaduras, en el lapso de tiempo estudiado, por lo que no se desencadenó la corrosión de las mismas.

La influencia de la relación  $a/c$ , se manifestó en ambas estaciones en todos los parámetros estudiados, y en su interrelación. En el caso de la estación marina, el hormigón con relación  $a/c=0,65$ , facilitó un mayor ingreso de ión  $\text{Cl}^-$ , que promovió una paulatina despasivación de las armadura, lo cual se manifestó en los registros de potencial de corrosión, que fueron desplazándose con el transcurso del tiempo hacia valores más negativos correspondientes a una probabilidad de 90% que exista corrosión, según la norma ASTM C876 (ASTM, [3]). En el proceso de despasivación de las armaduras, también coadyuvó la resistividad del

hormigón, que resultó ser menor para el hormigón con relación  $a/c=0,65$ , que para el  $a/c=0,45$ , alcanzándose un valor de aproximadamente  $10 \text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$ , que representa riesgo alto de corrosión.

Con respecto a los valores de velocidad de corrosión, en el hormigón con relación  $a/c=0,65$ , tanto en la cara expuesta como la resguardada, se llegó al final del período de estudio, a velocidades de corrosión marcadamente activas, de nivel alto, mientras que para aquellas armaduras del hormigón con relación  $a/c=0,45$ , no se registró para ningunas de las caras de exposición el inicio de la corrosión. Esto responde a que para los hormigones con  $a/c=0,65$  en oposición a los de  $a/c=0,45$ , son mayores las concentraciones de ión  $\text{Cl}^-$  a nivel de las armaduras, y menor la resistividad. Esta situación, llevaría a que con el hormigón con relación  $a/c=0,65$ , se alcanzarían en las armaduras con menor recubrimiento, pérdidas de sección del 15%, que según recomendaciones de reparación (Feliu et al., [28]), implicaría el refuerzo de la armaduras, en un período de tiempo a partir de su instalación, de aproximadamente 13 años, para la cara resguardada y de 32 años para los de la cara expuesta. En ambos casos, son períodos de tiempo reducidos, para las expectativas de durabilidad de las estructuras. Por el contrario, para el hormigón con rel.  $a/c=0,45$ , dicho período, para las armaduras con menor recubrimiento, se extendería a los 70 años, tiempo razonable para una buena expectativa de durabilidad de la estructura.

Otro aspecto que en particular se presentó en la estación marina, y se manifestó en todos los resultados con marcada influencia, fue la orientación de la cara expuesta de las probetas a los vientos dominantes. La cara resguardada a los vientos dominantes, resultó más perjudicial desde el punto de vista de la durabilidad de las armaduras, que la cara expuesta. Esto se debió a que para esa localización, el contenido de ión  $\text{Cl}^-$ , presente en el aerosol marino, arrastrado por los vientos en la dirección de la cara resguardada (SW), resulta mayor al proveniente de la dirección del viento dominante (NE). Así entonces, las probetas

## 6 Conclusiones

---

expuestas a la orientación SW, resultaron con los mayores registros de contaminación de los hormigones, y pérdida de masa en las armaduras.

Para todas las probetas, profundidades de recubrimiento, e independientemente de la cara de exposición, se observó que a los hormigones con relación  $a/c=0,45$ , correspondieron mayores potenciales de corrosión, y valores de resistividad, que a los hormigones con relación  $a/c=0,65$ .

Con los registros obtenidos, no se pudo observar una periodicidad significativa de los parámetros electroquímicos estudiados, vinculado con la variación estacional del clima.

En resumen, en lo referente a la capacidad de resistir el ingreso de los agentes contaminantes y el desarrollo de la corrosión, la influencia de la relación  $a/c=0,45$  utilizada en la elaboración de los hormigones, fue determinante frente a la  $a/c=0,65$ .

En la estación marina, a partir de la segunda ley de Fick, y la obtención de los perfiles de contaminación de los hormigones con el ión  $Cl^-$ , fue posible hallar el coeficiente de difusión  $D$  de los mismos, mediante técnica de regresión lineal por mínimos cuadrados. También fue posible la obtención de un valor teórico de concentración de ión  $Cl^-$  en superficie  $C_s$ , que se observó es próximo a los valores experimentales hallados, para el caso de los hormigones con relación  $a/c=0,45$ , y superior en el caso de los hormigones con relación  $a/c=0,65$ . Esto se interpreta en razón que los hormigones con relación  $a/c=0,65$ , presentan mayor porosidad que los de relación  $a/c=0,45$ , por lo cual, además de la difusión, se acentúa la ocurrencia de otros fenómenos en la superficie, como por ejemplo el lavado, constatado hasta una profundidad de aproximadamente 1cm.

La importancia de la obtención de estos parámetros, radica en posibilitar estimaciones de durabilidad, a partir de resultados experimentales de contaminación de los hormigones con el ión  $Cl^-$  y la aplicación de la segunda ley de Fick. De este modo con los resultados obtenidos, sería posible realizar

estimaciones del período que va desde la exposición de las piezas de hormigón armado al ambiente, hasta que se alcancen a nivel de las armaduras los niveles de contaminación con el ión  $\text{Cl}^-$ , considerados límite en algunas normas, para provocar problemas de corrosión en las mismas. En el caso particular de la norma EHE 2008 (EHE, [34]) se hace referencia a un valor límite de concentración de ión  $\text{Cl}^-$  total de 0,4%, referido al peso de cemento. En este sentido se encontró de interés estimar como ejemplo de aplicación práctica, cual sería el período de tiempo de exposición en el ambiente marino estudiado, que transcurriría aproximadamente, para que una pieza de hormigón armado, construida según las prescripciones de la norma nacional UNIT 1050:2005 (UNIT, [33]) alcance a nivel de las armaduras la concentración límite de ión  $\text{Cl}^-$  anteriormente mencionada. Según las prescripciones de esta última norma, recordamos que para un hormigón con resistencia característica ( $f_{ck}$ ) menor a 25 Mpa, se exige un recubrimiento mínimo de 40mm y una relación a/c máxima de 0,55. Para estos valores, de acuerdo al análisis realizado en la sección 5.3, se llegó a que el período de tiempo hallado resultó de 4,9 años. Por otro lado, para un hormigón con resistencia característica  $f_{ck}$  entre 25 y 40 Mpa, la norma UNIT 1050:2005 exige un recubrimiento mínimo de 35 mm y una relación a/c máxima de 0,45. En este último caso de acuerdo al análisis realizado en la sección 5.3, se llegó a que el período de tiempo hallado resultó de 11,7 años. Estos últimos resultados arrojaron para los hormigones considerados, riesgo de desarrollar corrosión de las armaduras, en períodos de tiempo inferiores a 15 años, por lo cual podemos concluir que no serían convenientes para edificios industriales u obras marítimas según las exigencias de durabilidad prescriptas por ejemplo en la norma EHE 2008 (EHE, [34]), que refiere a una vida útil de entre 15 a 50 años. Cabe observar que estas últimas conclusiones no son generalizables ya que surgieron del comportamiento particular de los hormigones estudiados para el clima y los ambientes a los cuales fueron expuestos. No obstante pueden considerarse un

## 6 Conclusiones

---

aspecto que motiven profundizar los estudios en esta materia, tendientes a alcanzar nuevos aportes que quizás puedan ser incorporados en la normas nacionales al respecto.

Por último cabe destacar, que las técnicas experimentales químico – físicas y electroquímicas utilizadas para la detección de los agentes contaminantes en el hormigón y de corrosión de las armaduras, permitieron una valoración de la situación en dichos aspectos, anticipada a la manifestación de daños, como también la realización de estimaciones de durabilidad para los hormigones en cuestión.

Concluido el presente trabajo, se encuentra que el mismo puede ser base para emprender futuras líneas de investigación donde profundizar el conocimiento respecto a su actual estado del arte. Algunas de ellas por ejemplo, podrían ser las siguientes:

- Técnicas electroquímicas para minimizar y detener el proceso de corrosión,
- Técnicas electroquímicas de saneado de la contaminación del hormigón con el ión  $\text{Cl}^-$ ,
- Utilización de adiciones en los hormigones para mejorar las características de durabilidad frente a la corrosión de las armaduras y la contaminación del hormigón con  $\text{CO}_2$  y el ión  $\text{Cl}^-$ ,
- Implementación de técnicas para monitoreo en tiempo real, en estructuras existentes, de los parámetros electroquímicos y de los agentes contaminantes, vinculados al fenómeno de la corrosión de las armaduras.



# Bibliografía

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS ASTM C33 - Standard Specification for Concrete Aggregates, (1999).
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C192-98. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, (1998a).
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C 876-91 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, (1999b).
- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C1202-09. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to. Retrieved January 27, (2010c).
- [5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C136 - Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, (2001).
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C143. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. Retrieved January 27, (2010e), .
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C232-99 Standard Test Methods for Bleeding of Concrete, (1999f).
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C39 - Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, (1999g).
- [9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C469 - Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression., (1994h).
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C496 - Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, (1996i).

- [11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C642 - Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, (1997j).
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D516-02 Standard Test Method for Sulfate Ion in Water, (2002k).
- [13] ANDRADE, C.; ALONSO, C. Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction and Building Materials*, Vol. 10, nro. 5, pag. 315–328, (1996a).
- [14] ANDRADE, C.; ALONSO, C.; GULIKERS, J. et al. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 37, nro. 273, pag. 623–643, (2004b).
- [15] ANDRADE, C.; CASTELLOTE,, M.; R, D´A. et al. Difusión de cloruros en hormigones expuestos a ambientes marinos. Estudio de 15 años de exposición. *Ediciones Técnicas Pauta, Cemento Hormigón*, Vol. 935, pag. 22–31, (2009c).
- [16] ANDRADE, C.; FELIU, S. *CORROSION Y PROTECCION METALICAS*. Vol. 1. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, (1991d).
- [17] ANDRADE, M. DEL C.; FELIÚ, S. *Corrosión y protección metálicas*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, (1991e).
- [18] ANDRADE, C. Nueva técnica electroquímica de medida de la corrosión de armaduras en hormigones armados y pretensados. Empleo de aditivos inhibidores como método de protección. Tesis Doctoral, Madrid España: Fac. de C. Químicas, Universidad Complutense de Madrid, (1973).
- [19] BAMFORTH, P. Chloride penetration and service life. . Sevilla, España, (1995a).
- [20] BAMFORTH, P. Predicting the risk of reinforcement corrosion in marine structures. *Corrosion Prevention & Control*, pag. 91–99, (1996b).
- [21] BAMFORTH, P. Definition of exposure classes and concrete mix requirements for chloride contaminated environments. Cambridge, UK, (1996c).
- [22] BROOMFIELD, J. P. *Corrosion of Steel in Concrete*. Gran Bretaña: Taylor & Francis e-Library, (2007).
- [23] COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment—Part I: Main parameters affecting chloride penetration. *Materials and Structures*, Vol. 32, pag. 252–259, (1999).
- [24] CHRISTIAN, G., D. *Química Analítica*. 6ta ed. Mac Graw Hill Publishing Company, (2009).



## Bibliografía

---

- [25] DIRECCIÓN NACIONAL DE METEOROLOGÍA. Normales Meteorológicas en el Uruguay, (1961 - 1990). .
- [26] DURACON. Influencia de la Acción del Medio Ambiente en la Durabilidad del Concreto. Proyecto del Subprograma XV, Corrosión e Impacto Ambiental sobre Materiales. CYTED, (2000).
- [27] FAGERLUND, G. On the Capillarity of Concrete. Nordic Concrete Research, Oslo, Vol. 1, nro. 6, (1986).
- [28] FELIU, S.; ANDRADE, C. Manual de Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, (1988a).
- [29] FELIU, S.; ANDRADE, M. DEL C.; GONZÁLEZ, J. A.; ALONSO., C. A New method for in-situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete. Materials and Structures, Vol. 29, pag. 362 – 365, (1996b).
- [30] FERNÁNDEZ, J. A. G. Teoría y Práctica de la lucha Contra la Corrosión. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, (1984).
- [31] FONTANA, M. G. Corrosion Engineering. Third ed. Mac Graw Hill Publishing Company, (1967).
- [32] INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS. UNIT 084:1952. Agregado fino para hormigón de cemento Pórtland, (1952a).
- [33] INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS. UNIT 1050:2005. Proyecto y Ejecución de Estructuras de Hormigón en Masa o Armado, (2005b).
- [34] INSTRUCCIÓN ESPAÑOLA DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL. EHE 2008., (2008).
- [35] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9223. Corrosion of metals and alloys -- Corrosivity of atmospheres - Classification, (1992a).
- [36] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9225. Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres, (2012b).
- [37] INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES. RILEM TC 178- TMC. Testing and Modelling Chloride Penetration in Concrete. Analysis of total Chloride. Content in Concrete, (2002a).
- [38] INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES. RILEM TC 178- TMC. Testing and Modelling Chloride Penetration in

- Concrete. Analysis of Water Soluble Chloride in Concrete. Recommendation, (2002b).
- [39] IRASSAR, E. F. Durabilidad del Hormigón Estructural. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2001).
- [40] LÓPEZ CELIS, R.; PÉREZ QUIROZ, J. T.; TORRES ACOSTA, A. A. Durabilidad de la Infraestructura de Concreto Reforzado Expuesta a Diferentes Ambientes Urbanos de México. Instituto Mexicano del Transporte, (2006).
- [41] LÓPEZ, W.; GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C. Influence of Temperature on the Service Life of Rebar. Cement and Concrete Research, Vol. vol. 23, pag. pp. 1130–1140, (1993).
- [42] LUPING, T. Calibration of the Electrochemical Methods for the Corrosion Rate Measurement of Steel in Concrete. Nordtest project no. 1531-01,. SP Swedish National Testing and Research Institute, (2002).
- [43] MELGAREJO, J. C.; PROENZA, J. A.; GALÍ, S.; LLOVET, X. Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. Volumen 62, núm. 1, 2010, p. 1-23, nro. núm. 1, pag. p. 1–23, (2010).
- [44] MÉNDEZ MENÉNDEZ, E. Análisis de presas de hormigón afectadas por procesos expansivos internos. Diferencias y similitudes entre ataque interno por sulfatos y reacción árido-álcali. Bs., As., Argentina., (2010).
- [45] O'REILLY, V. La Durabilidad del Hormigón. Su relación con la Compacidad y la Porosidad de Este. Micons, (1994).
- [46] PETTENKOFER, M. J. V. Über eine Methode die Kohlensäure in der atmosphärischen Luft zu bestimmen. Journ. Prakt. Chem., Vol. 85, pag. 165, (1862).
- [47] POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation. Construction and Building Materials, Vol. 15, nro. 2-3, pag. 125–131, (2001).
- [48] POURBAIX, M. Lecciones de Corrosión Electroquímica. Instituto Español de la Corrosión, (1987).
- [49] RADIOMETER ANALYTICAL S.A.. Voltalab 21, Electrochemical Laboratory User's Manual, (1998).
- [50] RODRÍGUEZ, G.; CARO, S.; PEDRÓN, M. Máquina para Cortar Probetas de Hormigón de Sección Cuadrada. Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estructural. Universidade de Brasília, (2002).
- [51] SEVEROVA, V. Clima del Uruguay. Unidad de Meteorología: Facultad de Ciencias, Universidad de la República, (1997).

- [52] SONG, G.; SHAYAN, A. (AHMAD); ARRB TRANSPORT RESEARCH. Corrosion of steel in concrete: causes, detection and prediction: a state-of-the-art review. Review report (ARRB Transport Research). Vermont South, Vic., (1998a).
- [53] SONG, H.-W.; SARASWANTHY, V. Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review. International Journal of Electrochemical Science, Vol. 2, pag. 1 – 28, (2007b).
- [54] STERN, M.; GEARY, A. L. Electrochemical Polarization. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves. Journal of The Electrochemical Society, Vol. 104, nro. 1, pag. 56–63, (1957).
- [55] T. DE RINCÓN, O.; DURAR NETWORK MEMBERS. Manual for inspecting, evaluating and diagnosing corrosion in reinforced concrete structures. Maracaibo, Venezuela: CYTED (1997/1998/2001) (1st ed., 2nd ed., and 3rd ed. In Spanish), (2000) (1st. ed. in English).
- [56] THOMPSON, N. G.; DUNMIRE, D. J.; YUNOVICH, M. Corrosion Costs and Maintenance Strategies -A Civil/Industrial and Government Partnership. Materials Performance Magazine, Vol. 44, nro. 9, pag. 16, (2005).
- [57] TORRENT, R. Fenómenos de Transporte y Leyes que los Gobiernan. Curso Posgrado RILEM - AASHES 2006 “Vida Útil de Estructuras de Hormigón”, . Buenos Aires, Argentina, (2006).
- [58] Asociación Española de Normalización y Certificación. PrUNE - Determinación de la resistividad eléctrica de probetas y testigos de hormigón endurecido. Parte I, método directo, (2001).
- [59] VILA, P. Evaluación del Comportamiento del Hormigón frente a la Corrosión por Cloruros. Tesis maestría. Porto Alegre: Universidad Federal de Río Grande del Sur, (2012).

## Bibliografia

---

# **Anexo A**

En este anexo se presentan para cada relación a/c, tablas con los resultados experimentales obtenidos de contaminación de los hormigones con el ión  $\text{Cl}^-$

También se presentan tablas con los resultados del cálculo de los coeficientes  $C_s$  y  $D$  para cada uno de los lotes y subgrupos de datos de estudio conformados.

Anexo A

probeta		X <sub>j</sub> (mm) ( prof. media interv. extracc. muestra )	t <sub>i</sub> (año) ( tiempo de realización del ensayo)			
a / c = 0,45	cara		cód.	1.26	2.18	3.36
				( 1º año )	( 2º año )	( 3º año )
ión Cl <sup>-</sup> libre / cemento ( relación en peso )						
E	2	2.5	-----	1.18	0.65	0.47
		3.8	0.84	-----	-----	-----
		7.5	-----	0.56	0.59	0.57
		8.8	0.48	-----	-----	-----
		12.5	-----	0.42	0.54	0.36
		17.5	-----	0.31	0.43	0.31
		22.5	-----	0.84	0.38	0.21
		27.5	-----	0.96	0.43	0.26
	4	2.5	-----	0.42	0.70	0.73
		3.8	0.41	-----	-----	-----
		7.5	-----	0.42	0.65	0.78
		8.8	0.32	-----	-----	-----
		12.5	-----	0.25	N.D.	0.47
		17.5	-----	0.23	0.43	0.36
		22.5	-----	0.14	N.D.	0.26
		27.5	-----	0.11	0.38	N.D.
	6	2.5	-----	0.92	N.D.	0.62
		3.8	0.48	-----	-----	-----
		7.5	-----	0.79	0.59	0.57
		8.8	0.32	-----	-----	-----
		12.5	-----	0.48	0.54	0.52
		17.5	-----	0.14	0.49	0.52
		22.5	-----	0.20	0.54	0.16
		27.5	-----	0.34	0.38	0.21
R	2	1.3	0.36	-----	-----	-----
		2.5	-----	0.68	1.24	0.68
		3.8	0.39	-----	-----	-----
		6.3	0.36	-----	-----	-----
		7.5	-----	0.56	0.70	N.D.
		8.8	0.29	-----	-----	-----
		12.5	-----	0.48	0.54	0.57
		17.5	-----	0.25	0.59	0.31
	22.5	-----	0.17	0.54	0.21	
	27.5	-----	0.17	N.D.	0.05	
	4	1.3	0.30	-----	-----	-----
		2.5	-----	1.01	0.70	0.73
		3.8	0.29	-----	-----	-----
		6.3	0.30	-----	-----	-----
		7.5	-----	0.37	0.65	0.68
		8.8	0.29	-----	-----	-----
		12.5	-----	0.76	0.54	0.62
		17.5	-----	0.36	0.49	0.52
	22.5	-----	0.40	0.32	0.47	
	27.5	-----	0.48	0.32	0.26	
	6	1.3	0.75	-----	-----	-----
		2.5	-----	0.90	0.70	0.62
		3.8	0.68	-----	-----	-----
		6.3	0.20	-----	-----	-----
7.5		-----	1.17	0.81	0.57	
8.8		0.68	-----	-----	-----	
12.5		-----	0.53	0.81	0.57	
17.5		-----	0.80	0.76	0.52	
22.5	-----	0.51	0.49	0.36		
27.5	-----	0.08	0.49	0.36		

Notas:

N.D. - dato no disponible, falló resultado.

Anexo A

probeta		X <sub>i</sub> (mm) ( prof. media interv. extracc. muestra )	t <sub>i</sub> (año) ( tiempo de realización del ensayo)			
a / c = 0,65	cara		cód.	1.26	2.18	3.36
				( 1º año )	( 2º año )	( 3º año )
ión Cl <sup>-</sup> libre / cemento ( relación en peso )						
E	2	2.5	-----	0.34	0.53	-----
		3.8	0.86	-----	-----	-----
		7.5	-----	0.62	0.73	-----
		8.8	0.70	-----	-----	-----
		12.5	-----	0.56	0.65	-----
		17.5	-----	0.20	0.56	-----
		22.5	-----	0.23	N.D.	-----
		27.5	-----	0.34	0.51	-----
	4	2.5	-----	0.34	0.22	-----
		3.8	0.57	-----	-----	-----
		7.5	-----	0.51	0.62	-----
		8.8	0.20	-----	-----	-----
		12.5	-----	1.24	0.62	-----
		17.5	-----	0.28	0.53	-----
		22.5	-----	0.28	0.45	-----
		27.5	-----	1.12	N.D.	-----
	6	2.5	-----	0.28	0.32	-----
		3.8	0.87	-----	-----	-----
		7.5	-----	0.73	0.52	-----
		8.8	1.04	-----	-----	-----
		12.5	-----	0.42	0.41	-----
		17.5	-----	0.28	0.45	-----
		22.5	-----	0.39	0.37	-----
		27.5	-----	0.31	N.D.	-----
R	2	1.3	0.87	-----	-----	-----
		2.5	-----	0.45	0.22	-----
		3.8	0.61	-----	-----	-----
		6.3	0.36	-----	-----	-----
		7.5	-----	0.76	1.07	-----
		8.8	0.14	-----	-----	-----
		12.5	-----	0.59	1.04	-----
		17.5	-----	0.25	1.00	-----
	22.5	-----	0.62	1.01	-----	
	27.5	-----	0.76	0.95	-----	
	4	1.3	0.37	-----	-----	-----
		2.5	-----	0.39	0.76	-----
		3.8	0.37	-----	-----	-----
		6.3	0.34	-----	-----	-----
		7.5	-----	1.10	0.51	-----
		8.8	0.39	-----	-----	-----
		12.5	-----	0.56	0.42	-----
		17.5	-----	0.51	N.D.	-----
	22.5	-----	0.28	0.34	-----	
	27.5	-----	0.82	0.38	-----	
	6	1.3	0.87	-----	-----	-----
		2.5	-----	0.37	0.22	-----
		3.8	0.40	-----	-----	-----
		6.3	0.45	-----	-----	-----
7.5		-----	1.21	1.15	-----	
8.8		0.82	-----	-----	-----	
12.5		-----	0.84	1.10	-----	
17.5		-----	0.37	0.98	-----	
22.5	-----	0.79	0.95	-----		
27.5	-----	0.17	0.90	-----		

Notas:

N.D. - dato no disponible, falló resultado.

Anexo A

LOTE: 1  
 a / c : 0,45  
 cara : expuesta y resguardada ( E y R )  
 ensayo: 1º a 4º año

cara probeta	t <sub>i</sub> (año)	X <sub>j</sub> (mm)	C <sub>ijk</sub>	erf ( X <sub>j</sub> D <sub>ijk</sub> t <sub>i</sub> )	N <sub>ijk</sub>	D <sub>ijk</sub>	C <sub>s</sub>	F (C <sub>s</sub> , D)=SCR ((C <sub>ijk</sub> - C <sub>s</sub> ) <sup>2</sup> )	dato valido	SCT ((C <sub>ijk</sub> - C <sup>*</sup> ) <sup>2</sup> )
E	2.18	7.5	0.56	0.21	0.44	0.62	0.74	0.0004	1	0.0111
E	2.18	7.5	0.42	0.21	0.33	0.62	0.74	0.0258	1	0.0012
E	2.18	7.5	0.79	0.21	0.62	0.62	0.74	0.0439	1	0.1123
R	2.18	7.5	0.56	0.21	0.44	0.62	0.74	0.0004	1	0.0111
R	2.18	7.5	0.37	0.21	0.29	0.62	0.74	0.0443	1	0.0072
R	2.18	7.5	1.17	0.21	0.92	0.62	0.74	0.3474	1	0.5114
E	3.36	7.5	0.59	0.17	0.49	0.69	0.74	0.0003	1	0.0194
E	3.36	7.5	0.65	0.17	0.54	0.69	0.74	0.0014	1	0.0372
E	3.36	7.5	0.59	0.17	0.49	0.69	0.74	0.0003	1	0.0193
R	3.36	7.5	0.70	0.17	0.58	0.69	0.74	0.0083	1	0.0609
R	3.36	7.5	0.65	0.17	0.54	0.69	0.74	0.0014	1	0.0373
R	3.36	7.5	0.81	0.17	0.67	0.69	0.74	0.0396	1	0.1256
E	4.34	7.5	0.57	0.15	0.49	0.72	0.74	0.0028	1	0.0137
E	4.34	7.5	0.78	0.15	0.66	0.72	0.74	0.0242	1	0.1064
E	4.34	7.5	0.57	0.15	0.49	0.72	0.74	0.0029	1	0.0135
R	4.34	7.5	N.D.	0.15	0.00	0.00	0.74	0.0000	0	0.0000
R	4.34	7.5	0.68	0.15	0.57	0.72	0.74	0.0026	1	0.0489
R	4.34	7.5	0.57	0.15	0.49	0.72	0.74	0.0028	1	0.0137
E	1.26	8.75	0.48	0.32	0.33	0.46	0.74	0.0005	1	0.0006
E	1.26	8.75	0.32	0.32	0.22	0.46	0.74	0.0330	1	0.0182
E	1.26	8.75	0.32	0.32	0.22	0.46	0.74	0.0330	1	0.0182
R	1.26	8.75	0.29	0.32	0.20	0.46	0.74	0.0448	1	0.0272
R	1.26	8.75	0.29	0.32	0.20	0.46	0.74	0.0448	1	0.0272
R	1.26	8.75	0.68	0.32	0.46	0.46	0.74	0.0318	1	0.0507
E	2.18	12.5	0.42	0.34	0.28	0.43	0.74	0.0039	1	0.0012
E	2.18	12.5	0.25	0.34	0.16	0.43	0.74	0.0540	1	0.0420
E	2.18	12.5	0.48	0.34	0.31	0.43	0.74	0.0000	1	0.0006
R	2.18	12.5	0.48	0.34	0.31	0.43	0.74	0.0000	1	0.0006
R	2.18	12.5	0.76	0.34	0.50	0.43	0.74	0.0771	1	0.0931
R	2.18	12.5	0.53	0.34	0.35	0.43	0.74	0.0023	1	0.0056
E	3.36	12.5	0.54	0.28	0.39	0.52	0.74	0.0001	1	0.0072
E	3.36	12.5	N.D.	0.28	0.00	0.00	0.74	0.0000	0	0.0000
E	3.36	12.5	0.54	0.28	0.39	0.52	0.74	0.0001	1	0.0072
R	3.36	12.5	0.54	0.28	0.39	0.52	0.74	0.0001	1	0.0073
R	3.36	12.5	0.54	0.28	0.39	0.52	0.74	0.0001	1	0.0073
R	3.36	12.5	0.81	0.28	0.58	0.52	0.74	0.0783	1	0.1257
E	4.34	12.5	0.36	0.25	0.27	0.57	0.74	0.0359	1	0.0083
E	4.34	12.5	0.47	0.25	0.35	0.57	0.74	0.0072	1	0.0002
E	4.34	12.5	0.52	0.25	0.39	0.57	0.74	0.0011	1	0.0042
R	4.34	12.5	0.57	0.25	0.43	0.57	0.74	0.0003	1	0.0135
R	4.34	12.5	0.62	0.25	0.47	0.57	0.74	0.0050	1	0.0286
R	4.34	12.5	0.57	0.25	0.43	0.57	0.74	0.0003	1	0.0137
E	2.18	17.5	0.31	0.47	0.17	0.28	0.74	0.0067	1	0.0210
E	2.18	17.5	0.23	0.47	0.12	0.28	0.74	0.0261	1	0.0506
E	2.18	17.5	0.14	0.47	0.07	0.28	0.74	0.0633	1	0.0991
R	2.18	17.5	0.25	0.47	0.13	0.28	0.74	0.0201	1	0.0420
R	2.18	17.5	0.36	0.47	0.19	0.28	0.74	0.0010	1	0.0090
R	2.18	17.5	0.80	0.47	0.43	0.28	0.74	0.1667	1	0.1191
R	2.18	17.5	0.51	0.47	0.27	0.28	0.74	0.0140	1	0.0030
E	3.36	17.5	0.43	0.38	0.27	0.38	0.74	0.0004	1	0.0005
E	3.36	17.5	0.43	0.38	0.27	0.38	0.74	0.0004	1	0.0005
E	3.36	17.5	0.49	0.38	0.30	0.38	0.74	0.0011	1	0.0010
R	3.36	17.5	0.59	0.38	0.37	0.38	0.74	0.0199	1	0.0193
R	3.36	17.5	0.49	0.38	0.30	0.38	0.74	0.0011	1	0.0010
R	3.36	17.5	0.76	0.38	0.47	0.38	0.74	0.0922	1	0.0909
E	4.34	17.5	0.31	0.34	0.21	0.43	0.74	0.0298	1	0.0204
E	4.34	17.5	0.36	0.34	0.24	0.43	0.74	0.0145	1	0.0083
E	4.34	17.5	0.52	0.34	0.34	0.43	0.74	0.0012	1	0.0041
R	4.34	17.5	0.31	0.34	0.21	0.43	0.74	0.0298	1	0.0204
R	4.34	17.5	0.52	0.34	0.34	0.43	0.74	0.0013	1	0.0042
R	4.34	17.5	0.52	0.34	0.34	0.43	0.74	0.0013	1	0.0042
E	2.18	22.5	0.14	0.58	0.06	0.18	0.74	0.0291	1	0.0991
E	2.18	22.5	0.20	0.58	0.08	0.18	0.74	0.0122	1	0.0650
R	2.18	22.5	0.17	0.58	0.07	0.18	0.74	0.0198	1	0.0811
R	2.18	22.5	0.40	0.58	0.17	0.18	0.74	0.0080	1	0.0030
R	2.18	22.5	0.51	0.58	0.22	0.18	0.74	0.0398	1	0.0030
E	3.36	22.5	0.38	0.48	0.20	0.27	0.74	0.0000	1	0.0059
E	3.36	22.5	N.D.	0.48	0.00	0.00	0.74	0.0000	0	0.0000
E	3.36	22.5	0.54	0.48	0.28	0.27	0.74	0.0252	1	0.0073
R	3.36	22.5	0.54	0.48	0.28	0.27	0.74	0.0251	1	0.0072
R	3.36	22.5	0.32	0.48	0.17	0.27	0.74	0.0033	1	0.0171



# Anexo A

R	3.96	22.5	0.49	0.48	0.26	0.27	0.74	0.0109	1	0.0010
S	4.34	22.5	0.21	0.43	0.12	0.32	0.74	0.0446	1	0.0609
S	4.34	22.5	0.36	0.43	0.15	0.32	0.74	0.0254	1	0.0380
S	4.34	22.5	0.16	0.43	0.09	0.32	0.74	0.0693	1	0.0993
R	4.34	22.5	0.21	0.43	0.12	0.32	0.74	0.0446	1	0.0609
R	4.34	22.5	0.47	0.43	0.27	0.32	0.74	0.0024	1	0.0002
R	4.34	22.5	0.36	0.43	0.21	0.32	0.74	0.0001	1	0.0003
S	2.18	27.5	0.36	0.67	0.31	0.11	0.74	0.5181	1	0.2652
S	2.18	27.5	0.11	0.67	0.04	0.11	0.74	0.0169	1	0.1189
S	2.18	27.5	0.34	0.67	0.11	0.11	0.74	0.0100	1	0.0132
R	2.18	27.5	0.17	0.67	0.06	0.11	0.74	0.0049	1	0.0611
R	2.18	27.5	0.48	0.67	0.16	0.11	0.74	0.0575	1	0.0006
R	2.18	27.5	0.08	0.67	0.03	0.11	0.74	0.0267	1	0.1405
S	3.96	27.5	0.43	0.57	0.19	0.18	0.74	0.0134	1	0.0005
S	3.96	27.5	0.38	0.57	0.16	0.18	0.74	0.0038	1	0.0059
S	3.96	27.5	0.38	0.57	0.16	0.18	0.74	0.0038	1	0.0059
R	3.96	27.5	N.D.	0.57	0.00	0.00	0.74	0.0000	0	0.0000
R	3.96	27.5	0.32	0.57	0.14	0.18	0.74	0.0001	1	0.0172
R	3.96	27.5	0.49	0.57	0.21	0.18	0.74	0.0288	1	0.0010
S	4.34	27.5	0.36	0.51	0.13	0.24	0.74	0.0097	1	0.0380
S	4.34	27.5	N.D.	0.51	0.00	0.00	0.74	0.0000	0	0.0000
S	4.34	27.5	0.21	0.51	0.10	0.24	0.74	0.0227	1	0.0609
R	4.34	27.5	0.06	0.51	0.03	0.24	0.74	0.0940	1	0.1623
R	4.34	27.5	0.26	0.51	0.13	0.24	0.74	0.0097	1	0.0380
R	4.34	27.5	0.36	0.51	0.18	0.24	0.74	0.0000	1	0.0083

Subtotales: 41.3918380 26.94 36.51 2.68 91.00 3.67

RESULTADOS: Prom. Cijk (C°)  
0.45

Cs	D (mm <sup>2</sup> / año)	R <sup>2</sup>
0.74	180.51	0.27

NOTAS :

$$N_{ijk} = C_{ijk} \cdot (1 - \text{erf} ( X_i, D, t_i ))$$

$$D_{ijk} = (1 - \text{erf} ( X_i, D, t_i ))^2$$

N.D. - dato no disponible

Anexo A

LOTE: 1  
a / c : 0,45  
cara : expuesta y resguardada ( E y R )  
ensayo: 2º año

cara probeta	t <sub>i</sub> (año)	X <sub>j</sub> (mm)	C <sub>ijk</sub>	erf ( X <sub>j</sub> , D, t <sub>i</sub> )	N <sub>ijk</sub>	D <sub>ijk</sub>	C <sub>s</sub>	F (C <sub>s</sub> , D)=SCR ( (C <sub>ijk</sub> - C <sub>Tij</sub> ) <sup>2</sup> )	dato valido	SCT ( (C <sub>ijk</sub> - C*) <sup>2</sup> )
E	2.18	7.5	0.56	0.20	0.45	0.65	0.75	0.0016	1	0.0165
E	2.18	7.5	0.42	0.20	0.34	0.65	0.75	0.0323	1	0.0001
E	2.18	7.5	0.79	0.20	0.64	0.65	0.75	0.0362	1	0.1284
R	2.18	7.5	0.56	0.20	0.45	0.65	0.75	0.0016	1	0.0165
R	2.18	7.5	0.37	0.20	0.30	0.65	0.75	0.0528	1	0.0038
R	2.18	7.5	1.17	0.20	0.94	0.65	0.75	0.3251	1	0.5451
E	2.18	12.5	0.42	0.32	0.29	0.46	0.75	0.0075	1	0.0001
E	2.18	12.5	0.25	0.32	0.17	0.46	0.75	0.0660	1	0.0330
E	2.18	12.5	0.48	0.32	0.33	0.46	0.75	0.0007	1	0.0023
R	2.18	12.5	0.48	0.32	0.33	0.46	0.75	0.0007	1	0.0023
R	2.18	12.5	0.76	0.32	0.52	0.46	0.75	0.0641	1	0.1078
R	2.18	12.5	0.53	0.32	0.36	0.46	0.75	0.0005	1	0.0097
E	2.18	17.5	0.31	0.44	0.17	0.32	0.75	0.0121	1	0.0148
E	2.18	17.5	0.23	0.44	0.13	0.32	0.75	0.0361	1	0.0407
E	2.18	17.5	0.14	0.44	0.08	0.32	0.75	0.0784	1	0.0851
R	2.18	17.5	0.25	0.44	0.14	0.32	0.75	0.0289	1	0.0330
R	2.18	17.5	0.36	0.44	0.20	0.32	0.75	0.0036	1	0.0051
R	2.18	17.5	0.80	0.44	0.45	0.32	0.75	0.1444	1	0.1357
E	2.18	17.5	0.51	0.44	0.29	0.32	0.75	0.0081	1	0.0061
E	2.18	22.5	0.14	0.54	0.06	0.21	0.75	0.0404	1	0.0851
E	2.18	22.5	0.20	0.54	0.09	0.21	0.75	0.0199	1	0.0537
R	2.18	22.5	0.17	0.54	0.08	0.21	0.75	0.0293	1	0.0685
R	2.18	22.5	0.40	0.54	0.18	0.21	0.75	0.0035	1	0.0010
R	2.18	22.5	0.51	0.54	0.23	0.21	0.75	0.0285	1	0.0061
E	2.18	27.5	0.96	0.64	0.35	0.13	0.75	0.4744	1	0.2791
E	2.18	27.5	0.11	0.64	0.04	0.13	0.75	0.0260	1	0.1035
E	2.18	27.5	0.34	0.64	0.12	0.13	0.75	0.0047	1	0.0084
R	2.18	27.5	0.17	0.64	0.06	0.13	0.75	0.0103	1	0.0685
R	2.18	27.5	0.48	0.64	0.17	0.13	0.75	0.0436	1	0.0023
R	2.18	27.5	0.08	0.64	0.03	0.13	0.75	0.0366	1	0.1237

Subtotales:                                      12.95                                      7.99                                      10.72                                      1.6179                                      30                                      1.9860

RESULTADOS:	Prom. C <sub>ijk</sub> (C*)	C <sub>s</sub>	D (mm <sup>2</sup> / año)	R <sup>2</sup>
	0.43	0.75	210.8	0.19

NOTAS :

$$N_{ijk} = C_{ijk} \cdot (1 - erf ( X_j, D, t_i ))$$

$$D_{ijk} = (1 - erf ( X_j, D, t_i ))^2$$

## Anexo A

LOTE: 1

a / c : 0,45

cara : expuesta y resguardada ( E y R )

ensayo: 3º año

cara probeta	t <sub>i</sub> (año)	X <sub>j</sub> (mm)	C <sub>ijk</sub>	erf ( X <sub>j</sub> , D, t <sub>i</sub> )	N <sub>ijk</sub>	D <sub>ijk</sub>	C <sub>s</sub>	F (C <sub>s</sub> , D)=SCR ( (C <sub>ijk</sub> - C <sub>Tij</sub> ) <sup>2</sup> )	dato valido	SCT ( (C <sub>ijk</sub> - C*) <sup>2</sup> )
E	3.36	7.5	0.59	0.14	0.51	0.74	0.78	0.0053	1	0.0036
E	3.36	7.5	0.65	0.14	0.56	0.74	0.78	0.0003	1	0.0130
E	3.36	7.5	0.59	0.14	0.51	0.74	0.78	0.0053	1	0.0036
R	3.36	7.5	0.70	0.14	0.60	0.74	0.78	0.0012	1	0.0281
R	3.36	7.5	0.65	0.14	0.56	0.74	0.78	0.0003	1	0.0130
R	3.36	7.5	0.81	0.14	0.69	0.74	0.78	0.0204	1	0.0759
E	3.36	12.5	0.54	0.23	0.41	0.59	0.78	0.0030	1	0.0000
E	3.36	12.5	N.D.	0.23	0.00	0.00	0.78	0.0000	0	0.0000
E	3.36	12.5	0.54	0.23	0.41	0.59	0.78	0.0030	1	0.0000
R	3.36	12.5	0.54	0.23	0.41	0.59	0.78	0.0030	1	0.0000
R	3.36	12.5	0.81	0.23	0.62	0.59	0.78	0.0460	1	0.0759
E	3.36	17.5	0.43	0.32	0.29	0.46	0.78	0.0088	1	0.0104
E	3.36	17.5	0.43	0.32	0.29	0.46	0.78	0.0087	1	0.0104
E	3.36	17.5	0.49	0.32	0.33	0.46	0.78	0.0016	1	0.0023
R	3.36	17.5	0.59	0.32	0.40	0.46	0.78	0.0046	1	0.0036
R	3.36	17.5	0.49	0.32	0.33	0.46	0.78	0.0016	1	0.0023
R	3.36	17.5	0.76	0.32	0.51	0.46	0.78	0.0533	1	0.0495
E	3.36	22.5	0.38	0.41	0.22	0.35	0.78	0.0067	1	0.0244
E	3.36	22.5	N.D.	0.41	0.00	0.00	0.78	0.0000	0	0.0000
E	3.36	22.5	0.54	0.41	0.32	0.35	0.78	0.0065	1	0.0000
R	3.36	22.5	0.54	0.41	0.32	0.35	0.78	0.0064	1	0.0000
R	3.36	22.5	0.32	0.41	0.19	0.35	0.78	0.0184	1	0.0441
R	3.36	22.5	0.49	0.41	0.29	0.35	0.78	0.0007	1	0.0023
E	3.36	27.5	0.43	0.49	0.22	0.26	0.78	0.0011	1	0.0104
E	3.36	27.5	0.38	0.49	0.19	0.26	0.78	0.0004	1	0.0243
E	3.36	27.5	0.38	0.49	0.19	0.26	0.78	0.0004	1	0.0243
R	3.36	27.5	N.D.	0.49	0.00	0.00	0.78	0.0000	0	0.0000
R	3.36	27.5	0.32	0.49	0.17	0.26	0.78	0.0055	1	0.0441
R	3.36	27.5	0.49	0.49	0.25	0.26	0.78	0.0077	1	0.0023

Subtotales: 14.42 10.22 13.16 0.22 27.00 0.47

RESULTADOS: Prom, C<sub>ijk</sub> (C\*)  
0.53

C <sub>s</sub>	D (mm <sup>2</sup> / año)	R <sup>2</sup>
0.78	262.2	0.52

NOTAS :

$$N_{ijk} = C_{ijk} \cdot (1 - \text{erf} ( X_j, D, t_i ))$$

$$D_{ijk} = (1 - \text{erf} ( X_j, D, t_i ))^2$$

N.D. - dato no disponible

Anexo A

LOTE: 1  
 a / c : 0,45  
 cara : expuesta ( E )  
 ensayo: 1º a 4º año

cara probeta	t <sub>i</sub> (año)	X <sub>i</sub> (mm)	C <sub>ijk</sub>	erf ( X <sub>i</sub> , D, t <sub>i</sub> )	N <sub>ijk</sub>	D <sub>ijk</sub>	C <sub>s</sub>	F (C <sub>s</sub> , D)=SCR ( C <sub>ijk</sub> - C <sub>Tij</sub> ) <sup>2</sup>	dato valido	SCT ( (C <sub>ijk</sub> - C <sup>+</sup> ) <sup>2</sup> )
E	2.18	7.5	0.56	0.16	0.47	0.71	0.61	0.0025	1	0.0175
E	2.18	7.5	0.42	0.16	0.35	0.71	0.61	0.0081	1	0.0001
E	2.18	7.5	0.79	0.16	0.66	0.71	0.61	0.0785	1	0.1313
E	3.36	7.5	0.59	0.13	0.52	0.76	0.61	0.0043	1	0.0277
E	3.36	7.5	0.65	0.13	0.56	0.76	0.61	0.0142	1	0.0485
E	3.36	7.5	0.59	0.13	0.52	0.76	0.61	0.0042	1	0.0276
E	4.34	7.5	0.57	0.11	0.51	0.79	0.61	0.0012	1	0.0208
E	4.34	7.5	0.78	0.11	0.69	0.79	0.61	0.0590	1	0.1249
E	4.34	7.5	0.57	0.11	0.51	0.79	0.61	0.0011	1	0.0205
E	1.26	8.75	0.48	0.24	0.36	0.57	0.61	0.0004	1	0.0027
E	1.26	8.75	0.32	0.24	0.24	0.57	0.61	0.0194	1	0.0116
E	1.26	8.75	0.32	0.24	0.24	0.57	0.61	0.0194	1	0.0116
E	2.18	12.5	0.42	0.26	0.31	0.54	0.61	0.0007	1	0.0001
E	2.18	12.5	0.25	0.26	0.18	0.54	0.61	0.0388	1	0.0316
E	2.18	12.5	0.48	0.26	0.35	0.54	0.61	0.0011	1	0.0027
E	3.36	12.5	0.54	0.21	0.42	0.62	0.61	0.0039	1	0.0126
E	3.36	12.5	N.D.	0.21	0.00	0.00	0.61	0.0000	0	0.0000
E	3.36	12.5	0.54	0.21	0.42	0.62	0.61	0.0039	1	0.0126
E	4.34	12.5	0.36	0.19	0.30	0.66	0.61	0.0166	1	0.0041
E	4.34	12.5	0.47	0.19	0.38	0.66	0.61	0.0006	1	0.0017
E	4.34	12.5	0.52	0.19	0.42	0.66	0.61	0.0007	1	0.0085
E	2.18	17.5	0.31	0.36	0.20	0.41	0.61	0.0059	1	0.0138
E	2.18	17.5	0.23	0.36	0.15	0.41	0.61	0.0246	1	0.0391
E	2.18	17.5	0.14	0.36	0.09	0.41	0.61	0.0609	1	0.0827
E	3.36	17.5	0.43	0.30	0.30	0.50	0.61	0.0000	1	0.0000
E	3.36	17.5	0.43	0.30	0.30	0.50	0.61	0.0000	1	0.0000
E	3.36	17.5	0.49	0.30	0.34	0.50	0.61	0.0034	1	0.0034
E	4.34	17.5	0.31	0.26	0.23	0.55	0.61	0.0186	1	0.0134
E	4.34	17.5	0.36	0.26	0.27	0.55	0.61	0.0071	1	0.0041
E	4.34	17.5	0.52	0.26	0.38	0.55	0.61	0.0050	1	0.0083
E	2.18	22.5	0.84	0.46	0.46	0.30	0.61	0.2596	1	0.1700
E	2.18	22.5	0.14	0.46	0.08	0.30	0.61	0.0363	1	0.0827
E	2.18	22.5	0.20	0.46	0.11	0.30	0.61	0.0170	1	0.0518
E	3.36	22.5	0.38	0.37	0.24	0.39	0.61	0.0000	1	0.0025
E	3.36	22.5	N.D.	0.37	0.00	0.00	0.61	0.0000	0	0.0000
E	3.36	22.5	0.54	0.37	0.34	0.39	0.61	0.0257	1	0.0126
E	4.34	22.5	0.21	0.33	0.14	0.45	0.61	0.0390	1	0.0482
E	4.34	22.5	0.26	0.33	0.17	0.45	0.61	0.0211	1	0.0281
E	4.34	22.5	0.16	0.33	0.10	0.45	0.61	0.0622	1	0.0738
E	2.18	27.5	0.96	0.54	0.44	0.21	0.61	0.4645	1	0.2834
E	2.18	27.5	0.11	0.54	0.05	0.21	0.61	0.0284	1	0.1009
E	2.18	27.5	0.34	0.54	0.16	0.21	0.61	0.0038	1	0.0077
E	3.36	27.5	0.43	0.45	0.24	0.30	0.61	0.0095	1	0.0000
E	3.36	27.5	0.38	0.45	0.21	0.30	0.61	0.0019	1	0.0025
E	3.36	27.5	0.38	0.45	0.21	0.30	0.61	0.0019	1	0.0025
E	4.34	27.5	0.26	0.40	0.16	0.36	0.61	0.0109	1	0.0281
E	4.34	27.5	N.D.	0.40	0.00	0.00	0.61	0.0000	0	0.0000
E	4.34	27.5	0.21	0.40	0.12	0.36	0.61	0.0244	1	0.0482

Subtotales: 19.24 0.60705411 13.91 22.92 1.41 45.00 1.63

RESULTADOS:

Prom. C<sub>ijk</sub> (C<sup>+</sup>)  
0.43

C <sub>s</sub> 0.61	D (mm <sup>2</sup> / año) 316.7	R <sup>2</sup> 0.13
------------------------	------------------------------------	------------------------

NOTAS :

$N_{ijk} = C_{ijk} \cdot (1 - erf ( X_j, D, t_i ))$

$D_{ijk} = (1 - erf ( X_j, D, t_i ))^2$

N.D. - dato no disponible

Anexo A

LOTE: 1  
a / c : 0,45  
cara : resguardada ( R )  
ensayo: 1º a 4º año

cara probeta	t <sub>i</sub> (año)	X <sub>j</sub> (mm)	C <sub>ijk</sub>	erf ( X <sub>j</sub> , D, t <sub>i</sub> )	N <sub>ijk</sub>	D <sub>ijk</sub>	C <sub>s</sub>	F (C <sub>s</sub> , D)=SCR ( (C <sub>ijk</sub> - C <sub>Tij</sub> ) <sup>2</sup> )	dato valido	SCT ( (C <sub>ijk</sub> - C*) <sup>2</sup> )
R	2.18	7.5	0.56	0.22	0.44	0.61	0.81	0.0049	1	0.0051
R	2.18	7.5	0.37	0.22	0.29	0.61	0.81	0.0676	1	0.0141
R	2.18	7.5	1.17	0.22	0.91	0.61	0.81	0.2916	1	0.4643
R	3.36	7.5	0.70	0.18	0.58	0.67	0.81	0.0014	1	0.0453
R	3.36	7.5	0.65	0.18	0.53	0.67	0.81	0.0003	1	0.0254
R	3.36	7.5	0.81	0.18	0.66	0.67	0.81	0.0210	1	0.1028
R	4.34	7.5	N.D.	0.16	0.00	0.00	0.81	0.0000	0	0.0000
R	4.34	7.5	0.68	0.16	0.57	0.71	0.81	0.0000	1	0.0351
R	4.34	7.5	0.57	0.16	0.48	0.71	0.81	0.0120	1	0.0069
R	1.26	8.75	0.29	0.33	0.19	0.44	0.81	0.0622	1	0.0395
R	1.26	8.75	0.29	0.33	0.19	0.44	0.81	0.0622	1	0.0395
H	1.26	8.75	0.88	0.33	0.48	0.71	0.81	0.0120	1	0.0366
R	2.18	12.5	0.48	0.36	0.31	0.41	0.81	0.0014	1	0.0001
R	2.18	12.5	0.76	0.36	0.49	0.41	0.81	0.0588	1	0.0736
R	2.18	12.5	0.53	0.36	0.34	0.41	0.81	0.0002	1	0.0017
R	3.36	12.5	0.54	0.29	0.38	0.50	0.81	0.0010	1	0.0026
R	3.36	12.5	0.54	0.29	0.38	0.50	0.81	0.0010	1	0.0026
R	3.36	12.5	0.81	0.29	0.57	0.50	0.81	0.0566	1	0.1029
R	4.34	12.5	0.57	0.26	0.42	0.55	0.81	0.0008	1	0.0068
R	4.34	12.5	0.62	0.26	0.46	0.55	0.81	0.0006	1	0.0183
R	4.34	12.5	0.57	0.26	0.42	0.55	0.81	0.0007	1	0.0069
R	2.18	17.5	0.25	0.49	0.13	0.26	0.81	0.0270	1	0.0569
R	2.18	17.5	0.36	0.49	0.18	0.26	0.81	0.0030	1	0.0165
R	2.18	17.5	0.80	0.49	0.41	0.26	0.81	0.1487	1	0.0969
R	3.36	17.5	0.59	0.40	0.36	0.36	0.81	0.0121	1	0.0110
R	3.36	17.5	0.49	0.40	0.29	0.36	0.81	0.0000	1	0.0000
R	3.36	17.5	0.76	0.40	0.45	0.36	0.81	0.0744	1	0.0717
R	4.34	17.5	0.31	0.36	0.20	0.41	0.81	0.0432	1	0.0312
R	4.34	17.5	0.52	0.36	0.33	0.41	0.81	0.0000	1	0.0010
R	4.34	17.5	0.52	0.36	0.33	0.41	0.81	0.0000	1	0.0010
R	2.18	22.5	0.17	0.60	0.07	0.16	0.81	0.0234	1	0.1015
R	2.18	22.5	0.40	0.60	0.16	0.16	0.81	0.0059	1	0.0079
R	2.18	22.5	0.51	0.60	0.20	0.16	0.81	0.0349	1	0.0005
R	3.36	22.5	0.54	0.50	0.27	0.25	0.81	0.0188	1	0.0026
R	3.36	22.5	0.32	0.50	0.16	0.25	0.81	0.0062	1	0.0271
R	3.36	22.5	0.49	0.50	0.24	0.25	0.81	0.0069	1	0.0000
R	4.34	22.5	0.21	0.45	0.11	0.30	0.81	0.0565	1	0.0788
R	4.34	22.5	0.47	0.45	0.26	0.30	0.81	0.0005	1	0.0004
R	4.34	22.5	0.36	0.45	0.20	0.30	0.81	0.0067	1	0.0155
R	2.18	27.5	0.17	0.70	0.05	0.09	0.81	0.0056	1	0.1015
R	2.18	27.5	0.48	0.70	0.15	0.09	0.81	0.0552	1	0.0001
R	2.18	27.5	0.08	0.70	0.02	0.09	0.81	0.0273	1	0.1670
R	3.36	27.5	N.D.	0.59	0.00	0.00	0.81	0.0000	0	0.0000
R	3.36	27.5	0.32	0.59	0.13	0.17	0.81	0.0000	1	0.0271
R	3.36	27.5	0.49	0.59	0.20	0.17	0.81	0.0245	1	0.0000
R	4.34	27.5	0.05	0.53	0.02	0.22	0.81	0.1056	1	0.1907
R	4.34	27.5	0.26	0.53	0.12	0.22	0.81	0.0137	1	0.0523
R	4.34	27.5	0.36	0.53	0.17	0.22	0.81	0.0002	1	0.0155

Subtotales: 22.48 14.33 17.72 1.36 46.00 2.11

RESULTADOS:	Prom, Cijk (C') 0.49	Cs 0.81	D (mm <sup>2</sup> / año) 163.9	R <sup>2</sup> 0.36
-------------	-------------------------	------------	------------------------------------	------------------------

NOTAS :

$$N_{ijk} = C_{ijk} \cdot (1 - erf ( X_j, D, t_i ))$$

$$D_{ijk} = (1 - erf ( X_j, D, t_i ))^2$$

N.D. - dato no disponible

Anexo A

LOTE: 1  
a / c : 0,65  
cara : expuesta y resguardada ( E y R )  
ensayo: 1º a 3º año

cara probeta	t <sub>i</sub> (año)	X <sub>i</sub> (mm)	C <sub>ijk</sub>	erf ( X <sub>i</sub> , D, t <sub>i</sub> )	N <sub>ijk</sub>	D <sub>ijk</sub>	C <sub>s</sub>	F (C <sub>s</sub> , D)=SCR ( (C <sub>ijk</sub> - C <sub>Tij</sub> ) <sup>2</sup> )	dato valido	SCT ( (C <sub>ijk</sub> - C <sup>*</sup> ) <sup>2</sup> )
E	2.18	7.5	0.62	0.13	0.54	0.76	0.83	0.0111	1	0.0000
E	2.18	7.5	0.51	0.13	0.45	0.76	0.83	0.0464	1	0.0129
E	2.18	7.5	0.73	0.13	0.64	0.76	0.83	0.0000	1	0.0114
R	2.18	7.5	0.76	0.13	0.66	0.76	0.83	0.0012	1	0.0187
R	2.18	7.5	1.10	0.13	0.96	0.76	0.83	0.1403	1	0.2272
R	2.18	7.5	1.21	0.13	1.06	0.76	0.83	0.2349	1	0.3441
E	3.36	7.5	0.73	0.10	0.66	0.81	0.83	0.0002	1	0.0114
E	3.36	7.5	0.62	0.10	0.56	0.81	0.83	0.0158	1	0.0000
E	3.36	7.5	0.52	0.10	0.47	0.81	0.83	0.0510	1	0.0107
R	3.36	7.5	1.07	0.10	0.96	0.81	0.83	0.1052	1	0.1995
R	3.36	7.5	0.51	0.10	0.46	0.81	0.83	0.0556	1	0.0129
R	3.36	7.5	1.15	0.10	1.03	0.81	0.83	0.1634	1	0.2773
E	1.26	8.75	0.70	0.19	0.57	0.65	0.83	0.0009	1	0.0059
E	1.26	8.75	0.2	0.19	0.16	0.65	0.83	0.2213	1	0.1793
E	1.26	8.75	1.04	0.19	0.84	0.65	0.83	0.1366	1	0.1736
R	1.26	8.75	0.14	0.19	0.11	0.65	0.83	0.2814	1	0.2337
R	1.26	8.75	0.39	0.19	0.31	0.65	0.83	0.0787	1	0.0545
R	1.26	8.75	0.82	0.19	0.66	0.65	0.83	0.0224	1	0.0387
E	2.18	12.5	0.56	0.21	0.44	0.63	0.83	0.0094	1	0.0040
E	2.18	12.5	1.24	0.21	0.98	0.63	0.83	0.3401	1	0.3802
E	2.18	12.5	0.42	0.21	0.33	0.63	0.83	0.0561	1	0.0414
R	2.18	12.5	0.59	0.21	0.47	0.63	0.83	0.0045	1	0.0011
R	2.18	12.5	0.56	0.21	0.44	0.63	0.83	0.0094	1	0.0040
R	2.18	12.5	0.84	0.21	0.66	0.63	0.83	0.0336	1	0.0469
E	3.36	12.5	0.65	0.17	0.54	0.69	0.83	0.0016	1	0.0007
E	3.36	12.5	0.62	0.17	0.52	0.69	0.83	0.0049	1	0.0000
E	3.36	12.5	0.41	0.17	0.34	0.69	0.83	0.0785	1	0.0455
R	3.36	12.5	1.04	0.17	0.86	0.69	0.83	0.1224	1	0.1736
R	3.36	12.5	0.42	0.17	0.35	0.69	0.83	0.0730	1	0.0414
R	3.36	12.5	1.10	0.17	0.91	0.69	0.83	0.1680	1	0.2272
E	2.18	17.5	0.20	0.29	0.14	0.51	0.83	0.1522	1	0.1793
E	2.18	17.5	0.28	0.29	0.20	0.51	0.83	0.0962	1	0.1179
E	2.18	17.5	0.28	0.29	0.20	0.51	0.83	0.0962	1	0.1179
R	2.18	17.5	0.25	0.29	0.18	0.51	0.83	0.1157	1	0.1394
R	2.18	17.5	0.51	0.29	0.36	0.51	0.83	0.0064	1	0.0129
R	2.18	17.5	0.37	0.29	0.26	0.51	0.83	0.0485	1	0.0642
E	3.36	17.5	0.56	0.23	0.43	0.59	0.83	0.0057	1	0.0040
E	3.36	17.5	0.53	0.23	0.41	0.59	0.83	0.0111	1	0.0087
E	3.36	17.5	0.45	0.23	0.34	0.59	0.83	0.0344	1	0.0301
R	3.36	17.5	1.00	0.23	0.77	0.59	0.83	0.1328	1	0.1418
R	3.36	17.5	N.D.	0.23	0.00	0.00	0.83	0.0000	0	0.0000
R	3.36	17.5	0.98	0.23	0.75	0.59	0.83	0.1187	1	0.1272
E	2.18	22.5	0.23	0.37	0.15	0.40	0.83	0.0877	1	0.1548
E	2.18	22.5	0.28	0.37	0.18	0.40	0.83	0.0605	1	0.1179
E	2.18	22.5	0.39	0.37	0.25	0.40	0.83	0.0185	1	0.0545
R	2.18	22.5	0.62	0.37	0.39	0.40	0.83	0.0088	1	0.0000
R	2.18	22.5	0.28	0.37	0.18	0.40	0.83	0.0605	1	0.1179
R	2.18	22.5	0.79	0.37	0.50	0.40	0.83	0.0697	1	0.0278
E	3.36	22.5	N.D.	0.30	0.00	0.00	0.83	0.0000	0	0.0000
E	3.36	22.5	0.45	0.30	0.32	0.49	0.83	0.0175	1	0.0301
E	3.36	22.5	0.37	0.30	0.26	0.49	0.83	0.0451	1	0.0642
R	3.36	22.5	1.01	0.30	0.71	0.49	0.83	0.1829	1	0.1495
R	3.36	22.5	0.34	0.30	0.24	0.49	0.83	0.0587	1	0.0803
R	3.36	22.5	0.95	0.30	0.67	0.49	0.83	0.1352	1	0.1067
E	2.18	27.5	0.34	0.44	0.19	0.31	0.83	0.0157	1	0.0803
E	2.18	27.5	1.12	0.44	0.63	0.31	0.83	0.4289	1	0.2466
E	2.18	27.5	0.31	0.44	0.17	0.31	0.83	0.0241	1	0.0982
R	2.18	27.5	0.76	0.44	0.43	0.31	0.83	0.0870	1	0.0187
R	2.18	27.5	0.82	0.44	0.46	0.31	0.83	0.1259	1	0.0387
R	2.18	27.5	0.17	0.44	0.10	0.31	0.83	0.0871	1	0.2056

## Anexo A

E	3.36	27.5	0.51	0.36	0.33	0.41	0.83	0.0004	1	0.0129
E	3.36	27.5	N.D.	0.36	0.00	0.00	0.83	0.0000	0	0.0000
E	3.36	27.5	N.D.	0.36	0.00	0.00	0.83	0.0000	0	0.0000
R	3.36	27.5	0.06	0.36	0.61	0.41	0.83	0.1768	1	0.1067
R	3.36	27.5	0.38	0.36	0.24	0.41	0.83	0.0227	1	0.0592
R	3.36	27.5	0.90	0.36	0.58	0.41	0.83	0.1363	1	0.0765

Subtotales: 38.65 29.55 35.59 5.13 62.00 5.57

RESULTADOS:

Prom, Cijk (C\*)  
0.62

Cs	D (mm <sup>2</sup> / año)
0.83	512.5

R <sup>2</sup>
0.08

NOTAS :

$$N_{ijk} = C_{ijk} \cdot (1 - \text{erf} ( X_p, D, t_i ))$$

$$D_{ijk} = (1 - \text{erf} ( X_p, D, t_i ))^2$$

N.D. - dato no disponible

## Anexo A

LOTE: 1  
 a / c : 0,65  
 cara : expuesta y resguardada ( E y R )  
 ensayo: 2º año

cara probeta	t <sub>i</sub> (año)	X <sub>j</sub> (mm)	C <sub>ijk</sub>	erf ( X <sub>j</sub> , D, t <sub>i</sub> )	N <sub>ijk</sub>	D <sub>ijk</sub>	C <sub>s</sub>	F (C <sub>s</sub> , D)=SCR ( (C <sub>ijk</sub> - C <sub>Tij</sub> ) <sup>2</sup> )	dato valido	SCT ( (C <sub>ijk</sub> - C <sup>*</sup> ) <sup>2</sup> )
E	2.18	7.5	0.62	0.16	0.52	0.71	0.88	0.0141	1	0.0024
E	2.18	7.5	0.51	0.16	0.43	0.71	0.88	0.0523	1	0.0038
E	2.10	7.5	0.70	0.10	0.02	0.71	0.00	0.0001	1	0.0252
R	2.18	7.5	0.76	0.16	0.64	0.71	0.88	0.0005	1	0.0356
R	2.18	7.5	1.10	0.16	0.93	0.71	0.88	0.1305	1	0.2795
R	2.18	7.5	1.21	0.16	1.02	0.71	0.88	0.2221	1	0.4079
E	2.10	12.5	0.56	0.26	0.42	0.55	0.00	0.0001	1	0.0001
E	2.18	12.5	1.24	0.26	0.92	0.55	0.88	0.3481	1	0.4471
E	2.18	12.5	0.42	0.26	0.31	0.55	0.88	0.0529	1	0.0229
R	2.18	12.5	0.59	0.26	0.44	0.55	0.88	0.0036	1	0.0003
R	2.18	12.5	0.56	0.26	0.42	0.55	0.88	0.0081	1	0.0001
R	2.18	12.5	0.84	0.26	0.62	0.55	0.88	0.0361	1	0.0722
E	2.18	17.5	0.20	0.35	0.13	0.42	0.88	0.1332	1	0.1379
E	2.18	17.5	0.28	0.35	0.18	0.42	0.88	0.0812	1	0.0849
C	2.10	17.5	0.20	0.35	0.10	0.42	0.00	0.0012	1	0.0640
R	2.18	17.5	0.25	0.35	0.16	0.42	0.88	0.0992	1	0.1033
R	2.18	17.5	0.51	0.35	0.33	0.42	0.88	0.0030	1	0.0038
R	2.18	17.5	0.37	0.35	0.24	0.42	0.88	0.0380	1	0.0405
E	2.18	22.5	0.23	0.45	0.13	0.31	0.88	0.0650	1	0.1165
E	2.18	22.5	0.28	0.45	0.16	0.31	0.88	0.0420	1	0.0849
E	2.18	22.5	0.39	0.45	0.22	0.31	0.88	0.0090	1	0.0329
R	2.18	22.5	0.62	0.45	0.34	0.31	0.88	0.0182	1	0.0024
R	2.18	22.5	0.28	0.45	0.16	0.31	0.88	0.0420	1	0.0840
R	2.18	22.5	0.79	0.45	0.44	0.31	0.88	0.0930	1	0.0478
E	2.18	27.5	0.34	0.53	0.16	0.22	0.88	0.0050	1	0.0535
E	2.18	27.5	1.12	0.53	0.53	0.22	0.88	0.5027	1	0.3010
E	2.18	27.5	0.31	0.53	0.15	0.22	0.88	0.0102	1	0.0683
R	2.18	27.5	0.76	0.53	0.36	0.22	0.88	0.1218	1	0.0356
R	2.18	27.5	0.82	0.53	0.38	0.22	0.88	0.1673	1	0.0618
R	2.18	27.5	0.17	0.53	0.08	0.22	0.88	0.0581	1	0.1611

Subtotales: 17.14 11.59 13.23 2.45 30.00 2.80

RESULTADOS: Prom, C<sub>ijk</sub> (C<sup>\*</sup>)  
 0.57

C <sub>s</sub>	D (mm <sup>2</sup> / año)	R <sup>2</sup>
0.88	332.0	0.13

NOTAS :

$$N_{ijk} = C_{ijk} \cdot (1 - \text{erf} ( X_j, D, t_i ))$$

$$D_{ijk} = (1 - \text{erf} ( X_j, D, t_i ))^2$$



## Anexo A

LOTE: 1  
 a / c : 0,65  
 cara : expuesta y resguardada ( E y R )  
 ensayo: 3º año

cara probeta	t <sub>i</sub> (año)	X <sub>j</sub> (mm)	C <sub>ijk</sub>	erf ( X <sub>j</sub> , D, t <sub>i</sub> )	N <sub>ijk</sub>	D <sub>ijk</sub>	C <sub>s</sub>	F (C <sub>s</sub> , D)=SCR ( (C <sub>ijk</sub> - C <sub>Tij</sub> ) <sup>2</sup> )	dato valido	SCT ( (C <sub>ijk</sub> - C <sup>*</sup> ) <sup>2</sup> )
E	3.36	7.5	0.73	0.05	0.69	0.90	0.79	0.0004	1	0.0009
E	3.36	7.5	0.62	0.05	0.59	0.90	0.79	0.0168	1	0.0065
E	3.36	7.5	0.92	0.09	0.49	0.90	0.79	0.0526	1	0.0327
R	3.36	7.5	1.07	0.05	1.01	0.90	0.79	0.1028	1	0.1363
R	3.36	7.5	0.51	0.05	0.48	0.90	0.79	0.0573	1	0.0364
R	3.36	7.5	1.15	0.05	1.09	0.90	0.79	0.1604	1	0.2018
E	3.36	12.5	0.65	0.09	0.59	0.84	0.79	0.0052	1	0.0026
E	3.36	12.5	0.62	0.09	0.57	0.84	0.79	0.0105	1	0.0065
E	3.36	12.5	0.41	0.09	0.37	0.84	0.79	0.0976	1	0.0845
R	3.36	12.5	1.04	0.09	0.95	0.84	0.79	0.1009	1	0.1151
R	3.36	12.5	0.42	0.09	0.38	0.84	0.79	0.0914	1	0.0788
R	3.36	12.5	1.10	0.09	1.01	0.84	0.79	0.1426	1	0.1594
E	3.36	17.5	0.56	0.12	0.49	0.77	0.79	0.0183	1	0.0198
E	3.36	17.5	0.53	0.12	0.47	0.77	0.79	0.0274	1	0.0292
E	3.36	17.5	0.45	0.12	0.40	0.77	0.79	0.0602	1	0.0629
R	3.36	17.5	1.00	0.12	0.88	0.77	0.79	0.0928	1	0.0895
R	3.36	17.5	N.D.	0.12	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
R	3.36	17.5	0.98	0.12	0.86	0.77	0.79	0.0810	1	0.0780
E	3.36	22.5	N.D.	0.15	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	3.36	22.5	0.45	0.15	0.38	0.72	0.79	0.0478	1	0.0629
E	3.36	22.5	0.37	0.15	0.31	0.72	0.79	0.0892	1	0.1094
R	3.36	22.5	1.01	0.15	0.85	0.72	0.79	0.1165	1	0.0956
R	3.36	22.5	0.34	0.15	0.29	0.72	0.79	0.1080	1	0.1302
R	3.36	22.5	0.95	0.15	0.80	0.72	0.79	0.0792	1	0.0621
E	3.36	27.5	0.51	0.19	0.41	0.66	0.79	0.0175	1	0.0364
E	3.36	27.5	N.D.	0.19	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	3.36	27.5	N.D.	0.19	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
R	3.36	27.5	0.95	0.19	0.77	0.66	0.79	0.0948	1	0.0621
R	3.36	27.5	0.38	0.19	0.31	0.66	0.79	0.0687	1	0.1029
R	3.36	27.5	0.90	0.19	0.73	0.66	0.79	0.0665	1	0.0397

Subtotales: 18.22 16.20 20.51 1.81 26.00 1.84

RESULTADOS: Prom. C<sub>ijk</sub> (C<sup>\*</sup>)  
 0.70

C <sub>s</sub>	D (mm <sup>2</sup> / año)	R <sup>2</sup>
0.79	2002.6	0.02

NOTAS :

$$N_{ijk} = C_{ijk} \cdot (1 - \text{erf} ( X_j, D, t_i ))$$

$$D_{ijk} = (1 - \text{erf} ( X_j, D, t_i ))^2$$

N.D. - dato no disponible

# Anexo A

LOTE: 1  
 a / c : 0,65  
 cara : expuesta ( E )  
 ensayo: 1º a 3º año

cara probeta	t <sub>i</sub> (año)	X <sub>i</sub> (mm)	C <sub>ijk</sub>	erf ( X <sub>i</sub> , D, t <sub>i</sub> )	N <sub>ijk</sub>	D <sub>ijk</sub>	C <sub>s</sub>	F (C <sub>s</sub> , D)=SCR ( (C <sub>ijk</sub> - C <sub>Tij</sub> ) <sup>2</sup> )	dato valido	SCT ( (C <sub>ijk</sub> - C <sup>*</sup> ) <sup>2</sup> )
E	2.18	7.5	0.62	0.13	0.54	0.76	0.71	0.0000	1	0.0083
E	2.18	7.5	0.51	0.13	0.44	0.76	0.71	0.0108	1	0.0004
E	2.18	7.5	0.73	0.13	0.64	0.76	0.71	0.0134	1	0.0404
E	3.36	7.5	0.73	0.10	0.65	0.80	0.71	0.0096	1	0.0404
E	3.36	7.5	0.62	0.10	0.56	0.80	0.71	0.0001	1	0.0083
E	3.36	7.5	0.52	0.10	0.47	0.80	0.71	0.0125	1	0.0001
E	1.26	8.75	0.70	0.20	0.56	0.64	0.71	0.0179	1	0.0292
E	1.26	8.75	0.2	0.20	0.16	0.64	0.71	0.1342	1	0.1082
E	1.26	8.75	1.04	0.20	0.83	0.64	0.71	0.2244	1	0.2611
E	2.18	12.5	0.56	0.21	0.44	0.62	0.71	0.0000	1	0.0010
E	2.18	12.5	1.24	0.21	0.97	0.62	0.71	0.4700	1	0.5055
E	2.18	12.5	0.42	0.21	0.33	0.62	0.71	0.0181	1	0.0119
E	3.36	12.5	0.65	0.17	0.54	0.68	0.71	0.0044	1	0.0146
E	3.36	12.5	0.62	0.17	0.51	0.68	0.71	0.0013	1	0.0082
E	3.36	12.5	0.41	0.17	0.34	0.68	0.71	0.0301	1	0.0142
E	2.18	17.5	0.20	0.30	0.14	0.50	0.71	0.0879	1	0.1082
E	2.18	17.5	0.28	0.30	0.20	0.50	0.71	0.0469	1	0.0620
E	2.18	17.5	0.28	0.30	0.20	0.50	0.71	0.0469	1	0.0620
E	3.36	17.5	0.56	0.24	0.43	0.58	0.71	0.0006	1	0.0010
E	3.36	17.5	0.53	0.24	0.40	0.58	0.71	0.0000	1	0.0000
E	3.36	17.5	0.45	0.24	0.34	0.58	0.71	0.0074	1	0.0062
E	2.18	22.5	0.23	0.38	0.14	0.39	0.71	0.0445	1	0.0894
E	2.18	22.5	0.28	0.38	0.17	0.39	0.71	0.0259	1	0.0620
E	2.18	22.5	0.39	0.38	0.24	0.39	0.71	0.0026	1	0.0193
E	3.36	22.5	N.D.	0.31	0.00	0.00	0.71	0.0000	0	0.0000
E	3.36	22.5	0.45	0.31	0.31	0.48	0.71	0.0016	1	0.0062
E	3.36	22.5	0.37	0.31	0.26	0.48	0.71	0.0143	1	0.0253
E	2.18	27.5	0.34	0.45	0.19	0.30	0.71	0.0023	1	0.0357
E	2.18	27.5	1.12	0.45	0.62	0.30	0.71	0.5356	1	0.3493
E	2.18	27.5	0.31	0.45	0.17	0.30	0.71	0.0061	1	0.0480
E	3.36	27.5	0.51	0.37	0.32	0.40	0.71	0.0042	1	0.0004
E	3.36	27.5	N.D.	0.37	0.00	0.00	0.71	0.0000	0	0.0000
E	3.36	27.5	N.D.	0.37	0.00	0.00	0.71	0.0000	0	0.0000

Subtotales: 15.87 12.12 17.18 1.7737 30 1.9269

RESULTADOS: Prom. C<sub>ijk</sub> (C\*) 0.53      Cs 0.71      D (mm<sup>2</sup> / año) 487.1      R<sup>2</sup> 0.08

NOTAS :

$$N_{ijk} = C_{ijk} \cdot (1 - \text{erf} ( X_i, D, t_i ))$$

$$D_{ijk} = (1 - \text{erf} ( X_i, D, t_i ))^2$$

N.D. - dato no disponible

## Anexo A

LOTE: 1  
 a / c : 0,65  
 cara : resguardada ( R )  
 ensayo: 1º a 3º año

cara probeta	t <sub>i</sub> (año)	X <sub>j</sub> (mm)	C <sub>ijk</sub>	erf ( X <sub>j</sub> , D, t <sub>i</sub> )	N <sub>ijk</sub>	D <sub>ijk</sub>	C <sub>s</sub>	F (C <sub>s</sub> , D)=SCR ((C <sub>ijk</sub> - C <sub>Tij</sub> ) <sup>2</sup> )	dato valido	SCT ((C <sub>ijk</sub> - C <sup>*</sup> ) <sup>2</sup> )
R	2.18	7.5	0.76	0.13	0.66	0.75	0.97	0.0066	1	0.0023
R	2.18	7.5	1.10	0.13	0.95	0.75	0.97	0.0668	1	0.1506
R	2.18	7.5	1.21	0.13	1.05	0.75	0.97	0.1356	1	0.2401
R	3.36	7.5	1.07	0.11	0.96	0.80	0.97	0.0414	1	0.1283
R	3.36	7.5	0.51	0.11	0.46	0.80	0.97	0.1271	1	0.0408
R	3.36	7.5	1.15	0.11	1.03	0.80	0.97	0.0804	1	0.1920
R	1.26	8.75	0.14	0.20	0.11	0.64	0.97	0.4019	1	0.3270
R	1.26	8.75	0.39	0.20	0.31	0.64	0.97	0.1474	1	0.1036
R	1.26	8.75	0.82	0.20	0.65	0.64	0.97	0.0021	1	0.0117
R	2.18	12.5	0.59	0.22	0.46	0.61	0.97	0.0280	1	0.0149
R	2.18	12.5	0.56	0.22	0.44	0.61	0.97	0.0389	1	0.0231
R	2.18	12.5	0.84	0.22	0.66	0.61	0.97	0.0069	1	0.0164
R	3.36	12.5	1.04	0.18	0.86	0.68	0.97	0.0585	1	0.1077
R	3.36	12.5	0.42	0.18	0.35	0.68	0.97	0.1430	1	0.0852
R	3.36	12.5	1.10	0.18	0.90	0.68	0.97	0.0911	1	0.1506
R	2.18	17.5	0.25	0.30	0.17	0.48	0.97	0.1811	1	0.2133
R	2.18	17.5	0.51	0.30	0.35	0.48	0.97	0.0274	1	0.0408
R	2.18	17.5	0.37	0.30	0.26	0.48	0.97	0.0934	1	0.1169
R	3.36	17.5	1.00	0.25	0.75	0.57	0.97	0.0723	1	0.0630
R	3.36	17.5	N.D.	0.25	0.00	0.00	0.97	0.0000	0	0.0000
R	3.36	17.5	0.98	0.25	0.74	0.57	0.97	0.0620	1	0.0719
R	2.18	22.5	0.62	0.38	0.38	0.38	0.97	0.0005	1	0.0084
R	2.18	22.5	0.28	0.38	0.17	0.38	0.97	0.1007	1	0.1865
R	2.18	22.5	0.79	0.38	0.49	0.38	0.97	0.0371	1	0.0061
R	3.36	22.5	1.01	0.31	0.69	0.47	0.97	0.1184	1	0.0889
R	3.36	22.5	0.34	0.31	0.23	0.47	0.97	0.1062	1	0.1383
R	3.36	22.5	0.95	0.31	0.65	0.47	0.97	0.0807	1	0.0567
R	2.18	27.5	0.76	0.46	0.41	0.29	0.97	0.0560	1	0.0023
R	2.18	27.5	0.82	0.46	0.44	0.29	0.97	0.0880	1	0.0117
R	2.18	27.5	0.17	0.46	0.09	0.29	0.97	0.1249	1	0.2936
R	3.36	27.5	0.95	0.36	0.59	0.39	0.97	0.1204	1	0.0567
R	3.36	27.5	0.38	0.38	0.24	0.39	0.97	0.0498	1	0.1101
R	3.36	27.5	0.90	0.38	0.56	0.39	0.97	0.0882	1	0.0354

Subtotales: 22.78 17.06 17.58 2.7828 32 3.1229

RESULTADOS: Prom. C<sub>ijk</sub> (C<sup>\*</sup>)  
0.71

C <sub>s</sub> 0.97	D (mm <sup>2</sup> / año) 461.4	R <sup>2</sup> 0.11
------------------------	------------------------------------	------------------------

NOTAS :

$$N_{ijk} = C_{ijk} \cdot (1 - \text{erf} ( X_j, D, t_i ))$$

$$D_{ijk} = (1 - \text{erf} ( X_j, D, t_i ))^2$$

N.D. - dato no disponible

# Anexo A

LOTE: 2  
 a / c : 0,45  
 cara : expuesta y resguardada ( E y R )  
 ensayo: 1º a 4º año

cara probeta	t <sub>i</sub> (año)	X <sub>i</sub> (mm)	C <sub>ijk</sub>	erf ( X <sub>i</sub> , D, t <sub>i</sub> )	N <sub>ijk</sub>	D <sub>ijk</sub>	C <sub>s</sub>	F (C <sub>s</sub> , D)=SCR ((C <sub>ijk</sub> - C <sub>Tij</sub> ) <sup>2</sup> )	dato valido	SCT ((C <sub>ijk</sub> - C*) <sup>2</sup> )
E	2.18	7.5	D.D.	0.26	0	0	0.79	0.0000	0	0.0000
E	2.18	7.5	0.42	0.26	0.31	0.55	0.79	0.0261	1	0.0003
E	2.18	7.5	0.79	0.26	0.58	0.55	0.79	0.0435	1	0.1250
R	2.18	7.5	0.56	0.26	0.41	0.55	0.79	0.0005	1	0.0153
R	2.18	7.5	D.D.	0.26	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
R	2.18	7.5	D.D.	0.26	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	3.36	7.5	0.39	0.21	0.47	0.62	0.79	0.0007	1	0.0248
E	3.36	7.5	0.65	0.21	0.51	0.62	0.79	0.0008	1	0.0447
E	3.36	7.5	0.59	0.21	0.47	0.62	0.79	0.0007	1	0.0248
R	3.36	7.5	0.70	0.21	0.55	0.62	0.79	0.0066	1	0.0703
R	3.36	7.5	0.65	0.21	0.51	0.62	0.79	0.0000	1	0.0440
R	3.36	7.5	0.81	0.21	0.64	0.62	0.79	0.0357	1	0.1390
E	4.34	7.5	0.57	0.19	0.47	0.66	0.79	0.0046	1	0.0184
E	4.34	7.5	0.78	0.19	0.64	0.66	0.79	0.0200	1	0.1187
E	4.34	7.5	0.57	0.19	0.47	0.66	0.79	0.0047	1	0.0181
R	4.34	7.5	N.D.	0.19	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
R	4.34	7.5	0.68	0.19	0.55	0.66	0.79	0.0013	1	0.0574
R	4.34	7.5	0.57	0.19	0.47	0.66	0.79	0.0046	1	0.0184
C	1.26	8.75	0.40	0.39	0.29	0.37	0.79	0.0000	1	0.0019
E	1.26	8.75	0.32	0.39	0.20	0.37	0.79	0.0257	1	0.0136
E	1.26	8.75	0.32	0.39	0.20	0.37	0.79	0.0257	1	0.0136
R	1.26	8.75	0.29	0.39	0.18	0.37	0.79	0.0362	1	0.0215
R	1.26	8.75	0.29	0.39	0.18	0.37	0.79	0.0362	1	0.0215
R	1.26	8.75	0.68	0.39	0.42	0.37	0.79	0.0399	1	0.0593
E	2.18	12.5	D.D.	0.42	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	2.18	12.5	0.25	0.42	0.15	0.34	0.79	0.0425	1	0.0348
E	2.18	12.6	0.48	0.42	0.28	0.34	0.79	0.0006	1	0.0019
R	2.18	12.5	0.48	0.42	0.28	0.34	0.79	0.0006	1	0.0019
R	2.18	12.5	D.D.	0.42	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
R	2.18	12.5	D.D.	0.42	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	3.36	12.5	0.54	0.34	0.35	0.43	0.79	0.0006	1	0.0107
E	3.36	12.5	N.D.	0.34	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	3.36	12.5	0.54	0.34	0.35	0.43	0.79	0.0006	1	0.0107
R	3.36	12.5	0.54	0.34	0.35	0.43	0.79	0.0006	1	0.0107
R	3.36	12.5	0.54	0.34	0.35	0.43	0.79	0.0006	1	0.0107
R	3.36	12.5	0.81	0.34	0.53	0.43	0.79	0.0861	1	0.1391
E	4.34	12.5	0.36	0.30	0.25	0.48	0.79	0.0333	1	0.0053
E	4.34	12.5	0.47	0.30	0.33	0.48	0.79	0.0061	1	0.0010
E	4.34	12.5	0.52	0.30	0.36	0.48	0.79	0.0007	1	0.0070
R	4.34	12.5	0.57	0.30	0.40	0.48	0.79	0.0006	1	0.0181
R	4.34	12.5	0.62	0.30	0.43	0.48	0.79	0.0060	1	0.0352
R	4.34	12.5	0.57	0.30	0.40	0.48	0.79	0.0006	1	0.0184
E	2.18	17.5	D.D.	0.56	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	2.18	17.5	0.23	0.56	0.10	0.19	0.79	0.0133	1	0.0426
E	2.18	17.5	0.14	0.56	0.06	0.19	0.79	0.0421	1	0.0879
R	2.18	17.5	0.25	0.56	0.11	0.19	0.79	0.0091	1	0.0348
R	2.18	17.5	D.D.	0.56	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
R	2.18	17.5	D.D.	0.56	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	3.36	17.5	0.43	0.47	0.23	0.29	0.79	0.0002	1	0.0000
E	3.36	17.5	0.43	0.47	0.23	0.29	0.79	0.0002	1	0.0000
E	3.36	17.5	0.49	0.47	0.26	0.29	0.79	0.0044	1	0.0025
R	3.36	17.5	0.59	0.47	0.32	0.29	0.79	0.0304	1	0.0247
R	3.36	17.5	0.49	0.47	0.26	0.29	0.79	0.0044	1	0.0024
R	3.36	17.5	0.76	0.47	0.40	0.29	0.79	0.1136	1	0.1024
E	4.34	17.5	0.31	0.42	0.18	0.34	0.79	0.0216	1	0.0155
E	4.34	17.5	0.36	0.42	0.21	0.34	0.79	0.0090	1	0.0053
E	4.34	17.5	0.52	0.42	0.30	0.34	0.79	0.0036	1	0.0068
R	4.34	17.5	0.31	0.42	0.18	0.34	0.79	0.0216	1	0.0155
R	4.34	17.5	0.52	0.42	0.30	0.34	0.79	0.0037	1	0.0070
R	4.34	17.5	0.52	0.42	0.30	0.34	0.79	0.0037	1	0.0070
E	2.18	22.5	D.D.	0.68	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	2.18	22.5	0.14	0.68	0.04	0.10	0.79	0.0125	1	0.0879
E	2.18	22.5	0.20	0.68	0.06	0.10	0.79	0.0027	1	0.0559
R	2.18	22.5	0.17	0.68	0.05	0.10	0.79	0.0067	1	0.0710
R	2.18	22.5	D.D.	0.68	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
R	2.18	22.5	D.D.	0.68	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	3.36	22.5	0.38	0.58	0.16	0.18	0.79	0.0020	1	0.0034
E	3.36	22.5	N.D.	0.58	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
R	3.36	22.5	0.54	0.58	0.23	0.18	0.79	0.0429	1	0.0107
R	3.36	22.5	0.54	0.58	0.23	0.18	0.79	0.0428	1	0.0107
R	3.36	22.5	0.32	0.58	0.14	0.18	0.79	0.0001	1	0.0127

## Anexo A

R	3.36	22.5	0.49	0.58	0.21	0.18	0.79	0.0234	1	0.0025
E	4.34	22.5	0.21	0.52	0.10	0.23	0.79	0.0290	1	0.0522
E	4.34	22.5	0.26	0.52	0.13	0.23	0.79	0.0140	1	0.0311
E	4.34	22.6	0.16	0.52	0.08	0.23	0.79	0.0494	1	0.0787
R	4.34	22.5	0.21	0.52	0.10	0.23	0.79	0.0290	1	0.0522
R	4.34	22.5	0.47	0.52	0.23	0.23	0.79	0.0080	1	0.0010
R	4.34	22.5	0.36	0.52	0.18	0.23	0.79	0.0002	1	0.0053
E	2.18	27.5	D.D.	0.78	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	2.18	27.5	0.11	0.78	0.02	0.05	0.79	0.0044	1	0.1066
E	2.18	27.5	0.34	0.78	0.08	0.05	0.79	0.0268	1	0.0093
R	2.18	27.5	0.17	0.78	0.04	0.05	0.79	0.0000	1	0.0710
R	2.18	27.5	D.D.	0.78	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
R	2.18	27.5	D.D.	0.78	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	3.36	27.5	0.43	0.67	0.14	0.11	0.79	0.0302	1	0.0000
E	3.36	27.5	0.38	0.67	0.12	0.11	0.79	0.0144	1	0.0034
E	3.36	27.5	0.38	0.67	0.12	0.11	0.79	0.0144	1	0.0034
R	3.36	27.5	N.D.	0.67	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
R	3.36	27.5	0.32	0.67	0.11	0.11	0.79	0.0043	1	0.0127
R	3.36	27.5	0.49	0.67	0.16	0.11	0.79	0.0520	1	0.0024
E	4.34	27.5	0.26	0.61	0.10	0.15	0.79	0.0021	1	0.0311
E	4.34	27.5	N.D.	0.61	0.00	0.00	0.79	0.0000	0	0.0000
E	4.34	27.5	0.21	0.61	0.08	0.15	0.79	0.0096	1	0.0522
R	4.34	27.5	0.05	0.61	0.02	0.15	0.79	0.0646	1	0.1478
R	4.34	27.5	0.26	0.61	0.10	0.15	0.79	0.0021	1	0.0311
R	4.34	27.5	0.36	0.61	0.14	0.15	0.79	0.0033	1	0.0053

Subtotales: 33.17 19.96 25.42 1.2656 76 2.4624

RESULTADOS:

Prom. Cijk (C')  
0.44

Cs
0.79

D (mm <sup>2</sup> / año)
117.9

R <sup>2</sup>
0.49

NOTAS :

$$N_{ijk} = C_{ijk} \cdot (1 - \text{erf} ( X_j, D, t_i ))$$

$$D_{ijk} = (1 - \text{erf} ( X_j, D, t_i ))^2$$

N.D. - dato no disponible

D.D. - dato descartado

Anexo A

**LOTE: 2**  
**a / c : 0,65**  
**cara : expuesta y resguardada ( E y R )**  
**ensayo: 1º a 3º año**

cara probeta	t <sub>i</sub> (año)	X <sub>i</sub> (mm)	C <sub>ijk</sub>	erf ( X <sub>i</sub> , D, t <sub>i</sub> )	N <sub>ijk</sub>	D <sub>ijk</sub>	C <sub>s</sub>	F (C <sub>s</sub> , D)=SCR ((C <sub>ijk</sub> - C <sub>Tij</sub> ) <sup>2</sup> )	dato valido	SCT ((C <sub>ijk</sub> - C*) <sup>2</sup> )
E	2.18	7.5	0.62	0.14	0.53	0.74	0.82	0.0067	1	0.0003
E	2.18	7.5	D.D.	0.14	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
E	2.18	7.5	0.73	0.14	0.63	0.74	0.82	0.0008	1	0.0158
R	2.18	7.5	D.D.	0.14	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
R	2.18	7.5	D.D.	0.14	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
R	2.18	7.5	D.D.	0.14	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
E	3.36	7.5	0.73	0.11	0.65	0.78	0.82	0.0000	1	0.0158
E	3.36	7.5	0.62	0.11	0.55	0.78	0.82	0.0109	1	0.0003
E	3.36	7.5	0.52	0.11	0.46	0.78	0.82	0.0418	1	0.0071
R	3.36	7.5	1.07	0.11	0.95	0.78	0.82	0.1195	1	0.2170
R	3.36	7.5	0.51	0.11	0.45	0.78	0.82	0.0459	1	0.0089
R	3.36	7.5	1.15	0.11	1.02	0.78	0.82	0.1812	1	0.2980
E	1.26	8.75	0.70	0.22	0.55	0.61	0.82	0.0035	1	0.0092
E	1.26	8.75	0.2	0.22	0.16	0.61	0.82	0.1944	1	0.1633
E	1.26	8.75	1.04	0.22	0.81	0.61	0.82	0.1593	1	0.1900
R	1.26	8.75	0.14	0.22	0.11	0.61	0.82	0.2509	1	0.2154
R	1.26	8.75	0.39	0.22	0.31	0.61	0.82	0.0629	1	0.0459
R	1.26	8.75	D.D.	0.22	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
E	2.18	12.5	0.56	0.24	0.43	0.58	0.82	0.0043	1	0.0019
E	2.18	12.5	D.D.	0.24	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
E	2.18	12.5	0.42	0.24	0.32	0.58	0.82	0.0424	1	0.0339
R	2.18	12.5	D.D.	0.24	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
R	2.18	12.5	D.D.	0.24	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
R	2.18	12.5	D.D.	0.24	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
E	3.36	12.5	0.65	0.19	0.53	0.66	0.82	0.0002	1	0.0021
E	3.36	12.5	0.62	0.19	0.50	0.66	0.82	0.0018	1	0.0003
E	3.36	12.5	0.41	0.19	0.33	0.66	0.82	0.0638	1	0.0377
R	3.36	12.5	1.04	0.19	0.84	0.66	0.82	0.1424	1	0.1900
R	3.36	12.5	0.42	0.19	0.34	0.66	0.82	0.0589	1	0.0339
R	3.36	12.5	1.10	0.19	0.89	0.66	0.82	0.1913	1	0.2459
E	2.18	17.5	0.20	0.32	0.14	0.46	0.82	0.1243	1	0.1633
E	2.18	17.5	D.D.	0.32	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
E	2.18	17.5	0.28	0.32	0.19	0.46	0.82	0.0743	1	0.1051
R	2.18	17.5	D.D.	0.32	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
R	2.18	17.5	D.D.	0.32	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
R	2.18	17.5	D.D.	0.32	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
E	3.36	17.5	0.56	0.26	0.41	0.54	0.82	0.0018	1	0.0019
E	3.36	17.5	0.53	0.26	0.39	0.54	0.82	0.0052	1	0.0055
E	3.36	17.5	0.45	0.26	0.33	0.54	0.82	0.0232	1	0.0238
R	3.36	17.5	1.00	0.26	0.74	0.54	0.82	0.1582	1	0.1567
R	3.36	17.5	N.D.	0.26	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
R	3.36	17.5	0.98	0.26	0.72	0.54	0.82	0.1426	1	0.1413
E	2.18	22.5	0.23	0.41	0.14	0.35	0.82	0.0639	1	0.1400
E	2.18	22.5	D.D.	0.41	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
E	2.18	22.5	0.39	0.41	0.23	0.35	0.82	0.0086	1	0.0459
R	2.18	22.5	D.D.	0.41	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
R	2.18	22.5	D.D.	0.41	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
R	2.18	22.5	D.D.	0.41	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
E	3.36	22.5	N.D.	0.34	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
E	3.36	22.5	0.45	0.34	0.30	0.44	0.82	0.0088	1	0.0238
E	3.36	22.5	0.37	0.34	0.25	0.44	0.82	0.0303	1	0.0548
R	3.36	22.5	1.01	0.34	0.67	0.44	0.82	0.2172	1	0.1647
R	3.36	22.5	0.34	0.34	0.23	0.44	0.82	0.0416	1	0.0698
R	3.36	22.5	0.95	0.34	0.63	0.44	0.82	0.1649	1	0.1196
E	2.18	27.5	0.34	0.49	0.17	0.26	0.82	0.0060	1	0.0698
E	2.18	27.5	D.D.	0.49	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
E	2.18	27.5	0.31	0.49	0.16	0.26	0.82	0.0116	1	0.0865
R	2.18	27.5	D.D.	0.49	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
R	2.18	27.5	D.D.	0.49	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
R	2.18	27.5	D.D.	0.49	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000

## Anexo A

---

<b>E</b>	3.36	27.5	0.51	0.40	0.30	0.36	0.82	0.0005	1	0.0089
<b>E</b>	3.36	27.5	N.D.	0.40	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
<b>E</b>	3.36	27.5	N.D.	0.40	0.00	0.00	0.82	0.0000	0	0.0000
<b>R</b>	3.36	27.5	0.95	0.40	0.57	0.36	0.82	0.2135	1	0.1196
<b>R</b>	3.36	27.5	0.38	0.40	0.23	0.36	0.82	0.0117	1	0.0502
<b>R</b>	3.36	27.5	0.90	0.40	0.54	0.36	0.82	0.1698	1	0.0875

**Subtotales:**    24.77    18.67    22.81    3.0607    41    3.3712

**RESULTADOS:**    Prom, Cijk (C')    

Cs
0.82

D (mm <sup>2</sup> / año)
401.0

R <sup>2</sup>
0.09

**NOTAS :**

$N_{ijk} = C_{ijk} \cdot (1 - \operatorname{erf}(X_j, D, t_j))$

$D_{ijk} = (1 - \operatorname{erf}(X_j, D, t_j))^2$

N.D. - dato no disponible

D.D. - dato descartado