

Evaluación del estado estructural de los puentes del Principado de Andorra frente al ataque por cloruros provenientes de las sales de deshielo

J.L. González Brunat
AUREA Enginyeria, Principat d'Andorra.
jlgb@aurea.ad

RESUMEN

Las carreteras del Principado de Andorra están sometidas a rigurosas condiciones climáticas de frío y nieve durante varios meses al año.

Durante estos meses, y con objeto de garantizar la seguridad viaria, se aportan importantes cantidades de sales de deshielo a las carreteras. Estas sales constituyen una fuente de iones cloruro que alcanzan las estructuras y las someten a procesos de agresión favoreciendo las corrosiones localizadas en armaduras y elementos metálicos.

El artículo identifica los principales factores influyentes en el proceso y presenta los resultados de la campaña de ensayos "Control de penetración de cloruros y procesos de carbonatación" que el "Ministeri d'Economia i Territori" ha llevado a cabo durante el ejercicio 2013 y que ha consistido en el estudio de ocho puentes de edades comprendidas entre los 10 y los 44 años, todos ellos situados en carreteras generales o vías principales a altitudes de entre 900 y 1500 m.

Los resultados han permitido valorar el estado de conservación de los tableros de hormigón frente a los procesos de carbonatación y ataque por cloruros y ha puesto de manifiesto la importancia de los detalles de diseño de la plataforma así como la adecuada elección de los parámetros de dosificación utilizados.

1. GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

El presente artículo recoge y analiza los resultados de la campaña de "Control de penetración de cloruros y procesos de carbonatación" que el *Ministeri d'Economia i Territori* del Principado de Andorra ha realizado a lo largo de los meses de Abril y Mayo del año 2013 en el marco de las actuaciones de mantenimiento y conservación de estructuras previstas para dicho ejercicio.

La Campaña ha consistido en el estudio de un total de 8 puentes de hormigón armado o pretensado de distintas edades, tipologías y localizaciones.

Para cada puente se han extraído entre 4 y 10 testigos, según conveniencia, hasta completar un total de 48 testigos. Cada testigo se ha sometido a los siguientes ensayos:

- *Perfil de pH* en profundidad midiendo 5 puntos a profundidades de entre 0,5 y 10 cm.
- *Perfil de contenido de cloruros* en profundidad midiendo también el contenido en cloruros en 5 puntos entre 0,5 y 10 cm.
- *Resistencia a compresión simple* del hormigón.

En base a los periodos de construcción, las edades de los puentes estudiados son:

1 puente construido en 1969, con 44 años de antigüedad.

2 puentes construidos en 1976 con 37 años de antigüedad.

4 puentes construidos entre 1983 y 1988 con 25-30 años de antigüedad.

1 puente y una ampliación de un puente existente construidos entre los años 2003 – 2004 con 9-10 años de antigüedad

Tabla 1 – Relación de puentes estudiados.

Nombre	Localización		Tipología y Edad	Luz (m)	Ancho (m)	Testigos
	Crta.	Z(m)				
Pont d'Aubinyà	CG1 Pk 8+120	890	Puente de bigas doble T construido en 2003	10	34	6 ut's
Pont de Tobira	CG1 Pk 1+250	995	Puente de bigas U de 1976 ampliado por ambos lados con vigas doble T en 2004	23	25+13+30	10 ut's
Pont de Casadet	CG1 Pk 1+020	995	Losa postesada construida en 1969	23	11	4 ut's
Pont de St. Antoni	CG3. Pk 3+600	1140	Puente de bigas doble T construido en 1983	24	15	4 ut's
Pont d'Ordino	CG3. Pk 7+450	1260	Puente de bigas doble T construido en 1985	14	21	4 ut's
Viaducte del Torrent Pregó	CG2. Pk 7+510	1400	Puente de 3 vanos de bigas prefabricadas en T construido en 1976	12+22+12	19	4 ut's
Pont nou de Molleres	CG2. Pk 8+370	1410	Losa postesada de 4 vanos construida en 1988	18+29+19+14	18,1	8 ut's
Pont nou de Mereig	CG2. Pk 9+050	1480	Losa postesada de 2 vanos construida en 1984	23+23	20	8 ut's

Todos los puentes están ubicados en carreteras generales o vías urbanas principales, a altitudes comprendidas entre los 890 m y los 1480 m, y sometidos a vertidos abundantes de sales de deshielo durante los meses de Noviembre a Abril de cada año.

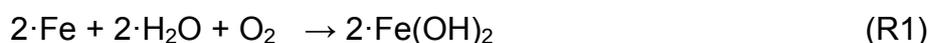
1.2 Objeto

El objeto del artículo es presentar y analizar los resultados derivados de la campaña realizada [1], obteniendo, por un lado, una aproximación al estado de deterioro del parque de puentes del Principado de Andorra frente a los procesos de carbonatación y ataque de los cloruros provenientes de las sales de deshielo y, por otro lado, identificar los parámetros de diseño más influyentes con objeto de poder concretar políticas preventivas y de mantenimiento.

2. MECANISMOS DE CORROSIÓN. FACTORES INFLUYENTES.

2.1 El Mecanismo de Corrosión en el Hormigón. Pasivación y Carbonatación

Es bien sabido que en condiciones de oxígeno y agua, el hierro se oxida de acuerdo a la reacción química:

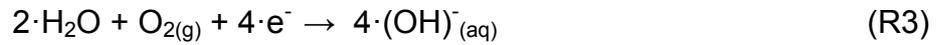


La reacción se produce en forma de dos semireacciones localizadas en puntos distintos denominados ánodo y cátodo entre los cuales se produce una corriente eléctrica.

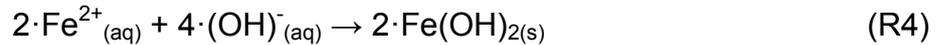
En el ánodo, se produce la semireacción de disolución del Fe, liberando electrones:



mientras que en el cátodo se produce la semireacción de consumo de electrones:



Finalmente, los dos elementos diluidos en agua se combinan y precipitan:



El compuesto puede recombinarse con más hidróxilos u oxígeno para formar hidróxidos férricos u óxidos férricos o ferrosos. En cualquier caso, la consecuencia es la formación de compuestos del tipo $\text{Fe}_x(\text{OH})_y$ o Fe_xO_y que ocupan de 2, 4 o hasta 6 veces el volumen de los componentes iniciales.

Afortunadamente, en el interior de la masa de hormigón, las condiciones tienden a frenar el proceso de oxidación debido a:

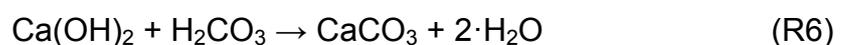
1. Los compuestos de oxidación primigenios que se producen precipitan en la piel de la armadura y forman una barrera física que dificulta la llegada de agua y oxígeno al cátodo.
2. La alta alcalinidad del hormigón (con pH del orden de 12,4 o superiores) conlleva una alta concentración de OH^{-} en el medio que, por efecto del ion común, frena la semireacción que se produce en el cátodo (R3).

La consecuencia es que la velocidad de reacción de oxidación se reduce a valores despreciables y las armaduras se conservan pasivadas, en buen estado, mientras se conserven las condiciones.

A la vista del proceso, se identifican 2 elementos necesarios para que progrese la oxidación de las armaduras:

1. Disponibilidad de agua i oxígeno en las inmediaciones de la armadura: Se deriva que las condiciones pésimas son las de alternancia de mojado y secado de la piel del hormigón en condiciones de humedad relativa alta, hormigón permeable a estos elementos y poco recubrimiento.
2. pH suficientemente bajo para desbloquear la semireacción en el cátodo. Existen experiencias que indican que, en ausencia de iones despasivantes como el Cl^{-} , el pH superior a 11,7 garantiza el estado pasivado de las armaduras. Si el pH está comprendido entre 11,4 y 11,7, el estado pasivado es inestable y, para pH inferiores a 11,4 los procesos de corrosión se activan.

Como se ha comentado, los niveles de pH en el interior del hormigón son habitualmente del orden de 12,4 – 13,5 favoreciendo el estado pasivado de las armaduras. Sin embargo, la penetración del $\text{CO}_{2(g)}$ atmosférico a través de los poros de la piel del hormigón provoca la reacción de carbonatación, que sigue el siguiente proceso:



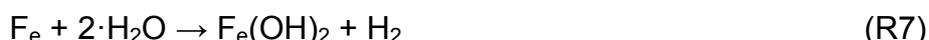
La reacción requiere la presencia simultánea de CO_2 y H_2O para producirse. El proceso genera ácido carbónico que reacciona con la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para formar carbonato cálcico y agua. El consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reduce el pH del hormigón a valores incluso inferiores a 9. Cuando la carbonatación alcanza la zona donde están alojadas las

armaduras, las condiciones dejan de ser las adecuadas para mantener las armaduras pasivadas y el proceso de corrosión se reactiva. Una vez reiniciado, el incremento de volumen de los compuestos que se forman produce tensiones internas que acaban fisurando el hormigón provocando a menudo fisuras importantes a lo largo de las armaduras y, finalmente, el desconchamiento del recubrimiento. Una vez la armadura queda desnuda, la reacción de oxidación se acelera consumiendo la sección de armadura y provocando la consiguiente pérdida de capacidad estructural.

2.2 El Mecanismo de Corrosión en el Hormigón en presencia de Cloruros.

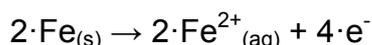
El mecanismo de corrosión de las armaduras de acero embebidas en hormigón en presencia de cloruros está tratado ampliamente en los reglamentos técnicos especializados [2], [3], [4].

El proceso consiste en la formación de una micropila con un pequeño ánodo en donde se produce la disolución del Fe y un amplio cátodo en donde se forma hidrógeno gaseoso. A los efectos que interesan, la reacción es la siguiente:



La reacción implica un consumo directo de hierro y agua para formar el compuesto oxidado e hidrógeno. A diferencia de la reacción (R1) descrita anteriormente, ésta requiere de un pH significativamente más bajo para producirse. Este pH bajo es posible por la presencia de cloruros que intervienen en la semireacción anódica de la siguiente manera:

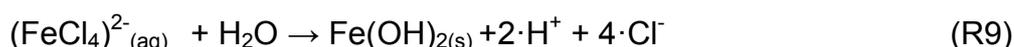
El proceso en el ánodo se inicia con la disolución del hierro:



Pero ahora los cationes de hierro se combinan con los iones cloruro para formar un compuesto intermedio soluble.



El compuesto se difunde movido por la diferencia de concentraciones hasta alcanzar regiones donde el pH todavía es alto. En estas nuevas condiciones, el compuesto deja de ser estable y precipita de acuerdo con la reacción:



La presencia de oxígeno cataliza el mecanismo ya que también inestabiliza el compuesto [5] provocando su descomposición según:



En cualquier caso, (R9) o (R10) la descomposición del compuesto acidifica el medio y libera los cloruros que son atraídos de nuevo por los cationes de hierro allí donde se ha iniciado la disolución del mismo para formar el compuesto intermedio y realimentar la semireacción.

En estas condiciones de pH ácido ($\text{pH} < 7$) la semireacción que se produce en el cátodo es la formación de hidrógeno:



Se observa que el ánodo adopta un comportamiento similar a un pozo de potencial para los cloruros que son liberados cuando se alejan de él por encontrar condiciones de pH no adecuadas y son atraídos al punto de disolución del Fe. En consecuencia el ataque progresa en profundidad generando lo que se conoce como corrosión por picadura.

Al progresar en profundidad, la armadura pierde su sección mucho más rápidamente que si el ataque se produce de forma distribuida. Por tanto, es un mecanismo de corrosión mucho más agresivo desde el punto de vista estructural.

Las condiciones necesarias para que se inicie el proceso requieren de una combinación adecuada de diversos factores:

1. Disponibilidad simultánea de agua y oxígeno en las proximidades de la armadura. De nuevo, las peores condiciones para la progresión del proceso son las alternancias de mojado y secado en condiciones de humedad relativa alta.
2. Concentración suficiente de cloruros en un hormigón con pH suficientemente bajo. Al respecto, existen en la literatura [5], multitud de estudios que arrojan diversos valores para el valor umbral de la relación (Cl^-/OH^-) que desencadena el inicio de la corrosión. La mayor parte de los resultados oscilan entre $(Cl^-/OH^-) = 0.25 - 0.8$ pero también hay valores más extremos de hasta 0.12 por la parte inferior y 3 por la parte superior. Como referencia, la guía ACI 222.R adopta valores de $(Cl^-/OH^-) = 0.29-0.30$ para pH comprendidos entre 12.6 i 13.3.

Dada la gravedad estructural del proceso, los distintos reglamentos estructurales de hormigón armado y pretensado limitan cada vez de forma más estricta el contenido de cloruros en el hormigón en el momento de la fabricación y puesta en obra. A efectos prácticos, los valores críticos del contenido de cloruros no se comparan con el contenido en ión hidróxilo, sino con el contenido de cemento en el hormigón como principal responsable de la generación de iones hidróxilos.

La Guía de Diseño de Durabilidad de Estructuras de Hormigón del CEB [4] establece como valor de referencia una concentración máxima de iones cloruro de 0,4% en peso de cemento para estructuras de hormigón armado y 0,2% para estructuras de hormigón pretensado. Estos valores son los que hereda la actual normativa española.

Cabe destacar que, de igual modo que no existe un valor universalmente aceptado para la relación (Cl^- /OH^-) crítica, tampoco existe un criterio único entre los distintos reglamentos para el máximo contenido de Cl^- admitido. Como se observa en la siguiente tabla, las discrepancias son importantes siendo las limitaciones reglamentarias norteamericanas del orden de dos o tres veces más estrictas que las europeas y las recomendaciones de tres a cinco veces más estrictas que las guías europeas.

Tabla 2.- Contenido máximo en peso de iones Cl^- en relación al contenido de cemento según diversos reglamentos y guías de durabilidad.

Reglamento	País	Hormigón Armado	Hormigón Pretensado
Instrucción de Hormigón Estructural (Contenido inicial en el hormigón)	España	0.4 %	0.2 %
Instrucción de Hormigón Estructural (verificación del Estado Límite Anejo nº9)	España	0.6%	0.3%
Guía de Durabilidad CEB – 1995	Europa	0.4 %	0.2 %
Guía de Durabilidad ACI 222.R – 2011	USA	0.08 %	0.06 %
Reglamento de diseño ACI 318	USA	0.16 %	0.06 %

2.3 Factores Influyentes y limitativos.

A los efectos de identificar los factores influyentes en el proceso, y a la vista de los mecanismos descritos, conviene segmentar el proceso de ataque por cloruros en las siguientes fases:

Fase 1: Desde la redacción del proyecto hasta el inicio de la corrosión.

Fase 2: Progreso de la corrosión.

En cada una de las fases, los factores influyentes son:

Fase 1: Proyecto a Inicio de la Corrosión:

- *Contenido de cloruros de origen interno (Cl_i):* Son los cloruros existentes en origen en los componentes de fabricación del hormigón y cuyo contenido está limitado por las normativas correspondientes.
- *Contenido de cloruros de origen externo (Cl_e):* Son los cloruros que han sido aportados desde el exterior y han alcanzado, en una primera etapa, la piel del hormigón y, en una segunda etapa, la piel de la armadura atravesando el recubrimiento por difusión. Los factores limitativos serán la cantidad de cloruros aportados externamente, la resistencia que ofrezca el hormigón a su penetración y la distancia a recorrer o recubrimiento.
- *Contenido de agua i oxígeno en la piel de la armadura en la proporción adecuada.* La accesibilidad de estos elementos vendrá regulada por las condiciones climáticas ambientales y por la permeabilidad del hormigón al agua.
- *pH suficientemente bajo.* En este caso el proceso natural que tiende a bajar el pH es la carbonatación. Por tanto, habrá que regular la permeabilidad del hormigón al agua.

Fase 2: Progreso de la corrosión:

- *Suficiente aporte de reactivos H_2O i O_2 en las proporciones adecuadas.*

Es importante destacar que la propia reacción disminuye el pH i que los cloruros no se consumen, de manera que las variables limitativas de la velocidad de reacción es la combinación de agua y oxígeno que alcanzan la armadura. De nuevo se identifica la permeabilidad al agua como parámetro limitativo del proceso. A efectos prácticos y de diseño, la impermeabilidad del hormigón se regula mediante algunos de los parámetros de dosificación, fundamentalmente la relación agua/cemento y el contenido de cemento por metro cúbico de hormigón. También aquí, los diferentes reglamentos y guías establecen limitaciones o recomendaciones y, de nuevo, los valores norteamericanos son más estrictos que los europeos.

Tabla 3.- Valores de dosificación de hormigón en ambientes con heladas y sales de deshielo según diversos reglamentos y guías de durabilidad.

Reglamento	País	Relación a/c		Contenido de cemento (Kg cem./m ³ hormigón)
Instrucción de Hormigón Estructural	España	H.A	0.5	325
		H.P	0.45	
Guía de Durabilidad CEB – 1995	Europa	H.A	0.55	300
		H.P	--	
Guía de Durabilidad ACI 222.R – 2011	USA	0.4		--
Reglamento de diseño ACI 318	USA	0.4		--

Se constata que en las condiciones reales de las obras de fábrica, sometidas a climas rigurosos de montaña con precipitaciones frecuentes y aportaciones masivas de sales de deshielo en los meses de invierno, el proceso es inevitable. Por tanto, y dejando aparte medidas de protección activas, debemos actuar intentando demorar el inicio del proceso.

El siguiente cuadro recoge los factores influyentes con las medidas preventivas en combinación con las variables y agentes de control.

Tabla 4.- Factores influyentes. Medidas preventivas.

Etapa	Factor influyente	Medida preventiva / correctiva	Agente
Proyecto	Contenido de cloruros inicial	1. Limitar el contenido de cloruros inicial. 2. Armaduras protegidas en zonas especialmente expuestas	Proyectista, Propiedad.
	Contenido de cloruros externos	3. Extremar los detalles en el diseño de la plataforma: protección zonas expuestas, drenajes, impermeabilización,....	Proyectista, Propiedad
	Acceso agua y oxígeno.	4. Parámetros de dosificación estrictos. 5. Recubrimientos generosos. 6. Revestimientos de protección en zonas especialmente expuestas. 7. Protección catódica preventiva.	
Construcción	Todos	8. Realización de pruebas de control de calidad correspondientes.	Director de Obra, Propiedad.
		9. Esmerar la ejecución.	Director de Obra, Constructor.
Explotación y Mantenim.	Todos	10. Prácticas de vertido de sales controladas. 11. Políticas de mantenimiento: Inspección visual, técnicas electroquímicas de detección. 12. Protección catódica correctiva. 13. Recalaminización. 14. Extracción electroquímica de cloruros.	Propiedad. Empresas espec.

Se hace necesario hacer hincapié en que, de todos los factores influyentes, uno de los más importantes, sino el que más, es el asociado al cuidado en el diseño de los detalles de la plataforma. La experiencia en la inspección de puentes muestra que en un altísimo porcentaje de los puentes inspeccionados, las estructuras se han diseñado sin prestar la atención adecuada a estos aspectos. Cuando esto no es así, y la estructura presenta detalles de diseño específicamente pensados para protegerla, el estado de conservación de la misma es muy superior al caso habitual.

3. CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA.

La muestra está formada por 48 testimonios extraídos a rotación de la parte superior de los tableros de las diferentes obras de fábrica. El procedimiento consiste en descubrir el paramento superior del tablero mediante la extracción de un testimonio de aglomerado de 125 mm de diámetro. Una vez descubierto del tablero estructural se obtiene un testigo a rotación de 75 mm de diámetro y altura mínima de 150 mm. Una vez obtenidos los testimonios, se restituye la geometría del tablero rellenando el hormigón con mortero de resinas y, pasadas 24 h, restituyendo la capa de pavimento con aglomerado.

A los efectos de las variables de interés identificadas en el punto anterior, los puentes estudiados presentan las siguientes características

Tabla 5 – Valores de proyecto de las variables significativas asociadas a los hormigones de los puentes estudiados. (n.d: No disponible)

Puente	Edad (años)	Dosificación		f _{ck} (MPa)	Testigos
		c (Kg/m ³ hormigón)	a/c		
Pont de Tobira (ampliació)	9	325	0,55	30	6 ut's
Pont d'Aubinyà	10	275 - 400	< 0,6	25	6 ut's
Pont nou de Molleres	25	n.d	n.d.	35	8 ut's
Pont d'Ordino	28	n.d	n.d	25	4 ut's
Pont nou de Mereig	29	n.d	n.d.	35	8 ut's
Pont de St. Antoni	30	350	n.d.	27	4 ut's
Pont de Tobira (original)	37	400	n.d	32.5	4 ut's
Viaducte del Torrent Pregó	37	400	n.d.	32.5	4 ut's
Pont de Casadet	44	n.d			4 ut's

4. RESULTADOS

4.1 Metodología de los Ensayos.

Una vez en el laboratorio, la secuencia de ensayos ha sido la siguiente:

- Se realiza el ensayo de carbonatación con fenolftaleína.
- Se fotografían y se miden los testigos indicando las barras de acero interceptadas u otras incidencias.
- Se marcan las profundidades de los puntos a los que se va a obtener el pH i el contenido de cloruros. Las profundidades son:

1 cm , 2 cm , 3,5 cm , 5,5 cm i 10 cm.

- Se realiza el perfil de pH mediante un equipo calibrado de precisión 0,01 pH, obteniendo los pH a las 5 profundidades de interés.
- Se corta la muestra con disco a las profundidades de 1cm ,2 cm 3,5 cm i 5,5 cm obteniendo 4 discos de testigo de los cuales se obtiene la muestra de material para realizar el ensayo de contenido de cloruros. El resto del testigo se prepara para realizar un ensayo de rotura a compresión.
- Una vez roto a compresión se corta a la profundidad de 10 cm y se obtiene la quinta muestra de material para realizar el ensayo de contenido de cloruros.
- Se realizan los cinco ensayos de contenido de cloruros por el método Volhard. (Referencia UNE EN 114629)

4.2. Resultados principales

Los siguientes cuadros agrupan los resultados obtenidos para cada uno de los puentes. Al respecto conviene remarcar algunos puntos:

En relación a las concentraciones de cloruros, cabe indicar que las concentraciones de cloruros que se obtienen del ensayo de laboratorio están referidas al peso de la muestra de hormigón ($[Cl]_m$), mientras que los valores de referencia de los reglamentos están referidos al peso de cemento ($[Cl]_c$). Para poder comparar adecuadamente con los valores de referencia, los valores de laboratorio se han transformado a concentraciones en relación al peso de cemento de acuerdo con la expresión:

$$[Cl]_c = [Cl]_m \cdot (2350/c)$$

En donde c es el contenido de cemento por metro cúbico de hormigón y se ha supuesto una densidad del hormigón de 2350 Kg/m³.

En los casos en que el contenido de cemento por metro cúbico se ha estimado, se ha indicado en el encabezamiento de la tabla

En relación a la resistencia a compresión simple de los testigos, sólo se han presentado los resultados asociados a testigos que no contenían barras de armado. No se ha realizado ninguna corrección por tamaño de probeta. Las dimensiones de las mismas son de 75 mm de diámetro y entre 75 y 150 mm de altura.

Los resultados se presentan atendiendo al orden de antigüedad de los puentes.

Tabla 6.1- Resultados Ampliación Pont de Tobira.

Pont de Tobira (ampliación)			
Edad: 9 años; Hormigón de proyecto: $f_{ck}=30$ MPa ; Dosificación: $c= 325$ Kg/m ³			
Tamaño de la muestra: 6 testigos			
Profundidad (cm)	Ph (min – med – máx)	$[Cl]_c$ (min – med – max)	f_{cj} (MPa) (min - med – max)
1,0	9,45 – 9,59 – 9,73	0,29 – 0,29 – 0,29	32,8 - 40,60 - 48,4
2,0	9,48 – 9,65 – 9,78	0,29 – 0,58 – 0,94	
3,5	9,48 – 9,68 – 9,85	0,29 – 0,51 – 0,65	
5,5	9,62 – 9,83 – 10,00	0,29 – 0,36 – 0,51	
10,0	9,58 – 9,85 – 10,06	0,29 – 0,51 – 0,65	

Tabla 6.2 – Resultados Pont d'Aubinyà.

Pont Aubinyà			
Edad: 10 años; Hormigón de proyecto: $f_{ck}=25$ MPa ; Dosificación (est): $c = 275$ Kg/m ³			
Tamaño de la muestra: 6 testigos			
Profundidad (cm)	Ph (min – med – máx)	$[Cl]_c$ (min – med – max)	f_{cm} (MPa) (min - med – max)
1,0	10,2 – 10,80 – 11,39	0,17 – 0,42 – 0,85	29,9 - 34,8 - 39,8
2,0	10,31 – 10,90 – 11,66	0,17 – 0,42 – 0,85	
3,5	10,55 – 10,74 – 11,33	0,17 – 0,42 – 0,76	
5,5	10,48 – 11,02 – 11,51	0,17 – 0,51 – 0,85	
10,0	10,34 – 10,86 – 11,35	0,17 – 0,59 – 1,01	

Tabla 6.3.- Resultados Viaducto de Molleres (est): Valor estimado.

Viaducto de Molleres			
Edad: 25 años; Hormigón de proyecto: $f_{ck}=35$ MPa ; Dosificación (est.): $c= 350$ Kg/m ³			
Tamaño de la muestra: 8 testigos			
Profundidad (cm)	Ph (min – med – máx)	$[Cl]_c$ (min – med – max)	f_{cj} (MPa) (min - med – max)
1,0	9,62 – 10,19 – 10,60	0,47 – 0,67 – 0,87	44,2 - 50,8 - 62,2
2,0	9,83 – 10,36 – 11,23	0,27 – 0,67 – 1,14	
3,5	9,93 – 10,47 – 11,64	0,27 – 0,54 – 1,27	
5,5	9,86 – 10,59 – 11,28	0,21 – 0,54 – 0,99	
10,0	9,85 – 10,50 – 11,23	0,40 – 0,60 – 0,87	

Tabla 6.4.- Resultados Pont d'Ordino. (est): Valor estimado.

Pont d'Ordino			
Edad: 28 años; Hormigón de proyecto: $f_{ck}=25$ MPa ; Dosificación (est): $c=275$ Kg/m ³			
Tamaño de la muestra: 4 testigos			
Profundidad (cm)	Ph (min – med – máx)	$[Cl]_c$ (min – med – max)	f_{cj} (MPa) (min - med – max)
1,0	9,14 – 9,49 – 10,03	0,34 – 0,60 – 0,94	23,3 - 26,48 - 28,0
2,0	9,11 – 9,53 – 10,00	0,34 – 0,60 – 0,77	
3,5	9,46 – 9,64 – 9,74	0,34 – 0,60 – 0,94	
5,5	9,33 – 9,60 – 9,89	0,51 – 0,69 – 0,94	
10,0	9,17 – 9,76 – 10,20	0,34 – 0,51 – 0,77	

Tabla 6.5.- Resultados Viaducto de Mereig (est): Valor estimado.

Viaducto de Mereig			
Edad: 29 años; Hormigón de proyecto: $f_{ck}=35$ MPa ; Dosificación (est): $c=350$ Kg/m ³			
Tamaño de la muestra: 8 testigos			
Profundidad (cm)	Ph (min – med – máx)	$[Cl]_c$ (min – med – max)	f_{cj} (MPa) (min - med – max)
1,0	8,76 – 9,12 – 9,72	0,27 – 0,47 – 0,74	45,7 - 54,1 - 62,4
2,0	8,68 – 9,16 – 9,69	0,13 – 0,40 – 1,00	
3,5	8,91 – 9,31 – 9,58	0,27 – 0,47 – 0,87	
5,5	8,71 – 9,34 – 9,90	0,13 – 0,47 – 0,74	
10,0	8,79 – 9,43 – 9,89	0,27 – 0,33 – 0,60	

Tabla 6.6.- Resultados Pont de St Antoni

Pont de St Antoni			
Edad: 30 años; Hormigón de proyecto: $f_{ck}=27$ MPa ; Dosificación: $c= 350$ Kg/m ³			
Tamaño de la muestra: 4 testigos			
Profundidad (cm)	Ph (min – med – máx)	$[Cl]_c$ (min – med – max)	f_{cj} (MPa) (min - med – max)
1,0	8,87 – 8,93 – 8,96	0,26 – 0,47 – 0,74	29,9 - 32,80 - 34,7
2,0	8,96 – 9,25 – 9,94	0,26 – 0,60 – 0,87	
3,5	8,89 – 9,02 – 9,33	0,26 – 0,74 – 1,28	
5,5	8,90 – 9,00 – 9,16	0,26 – 0,74 – 1,28	
10,0	8,96 – 9,07 – 9,26	0,29 – 0,67 – 1,00	

Tabla 6.7.- Resultados Pont de Tobira

Pont de Tobira (original)			
Edad: 37 años; Hormigón de proyecto: $f_{ck}=32,5$ MPa ; Dosificación: $c=400$ Kg/m ³			
Tamaño de la muestra: 4 testigos			
Profundidad (cm)	Ph (min – med – máx)	$[Cl]_c$ (min – med – max)	f_{cj} (MPa) (min - med – max)
1,0	9,07 – 9,55 – 10,13	0,24 – 0,47 – 0,76	26,6 - 32,95 - 39,3
2,0	9,34 – 9,46 – 9,62	0,24 – 0,47 – 0,88	
3,5	9,49 – 9,90 – 10,79	0,53 – 0,70 – 1,11	
5,5	9,70 – 9,89 – 10,33	0,47 – 0,70 – 0,88	
10,0	9,61 – 9,81 – 9,99	0,24 – 0,59 – 1,00	

Tabla 6.8.- Resultados Viaducto Torrent Pregó

Viaducto Torrent Pregó			
Edad: 37 años; Hormigón de proyecto: $f_{ck}=32,5$ MPa ; Dosificación: $c= 400$ Kg/m ³			
Tamaño de la muestra: 4 testigos			
Profundidad (cm)	Ph (min – med – máx)	$[Cl]_c$ (min – med – max)	f_{cj} (MPa) (min - med – max)
1,0	9,14 – 9,43 – 9,90	0,23 – 0,58 – 0,88	31,9 - 35,10 - 37,5
2,0	9,06 – 9,40 – 10,03	0,12 – 0,35 – 0,65	
3,5	9,31 – 9,64 – 10,06	0,23 – 0,41 – 0,65	
5,5	9,52 – 9,83 – 10,64	0,23 – 0,53 – 1,06	
10,0	9,40 – 10,12 – 11,35	0,23 – 0,29 – 0,41	

Tabla 6.9.- Resultados Pont de Casadet

Pont de Casadet			
Edat: 44 anys;			
Hormigón de proyecto (estimado) : $f_{ck}=40$ MPa ; Dosificación: $c=400$ Kg/m ³			
Tamaño de la muestra: 4 testigos			
Profundidad (cm)	Ph (min – med – máx)	$[Cl]_c$ (min – med – max)	f_{cj} (MPa) (min - med – max)
1,0	9,51 – 9,98 – 10,80	0,64 – 0,65 – 0,70	47,4 - 57.6 - 69,5
2,0	9,67 – 10,03 – 10,51	0,53 – 0,76 – 1,23	
3,5	9,75 – 10,02 – 10,42	0,11 – 0,59 – 1,23	
5,5	9,84 – 10,10 – 10,33	0,35 – 0,47 – 0,59	
10,0	9,89 – 10,39 – 11,15	0,35 – 0,47 – 0,53	

4.3. Análisis de Resultados

Es necesario analizar tanto los valores medios, como los valores extremos.

El análisis de los valores medios puede realizarse a partir de los siguientes gráficos, en donde se recogen los valores medios de pH i $[Cl]$ a 2,0 cm i a 5,5 cm de profundidad para cada uno de los puentes.

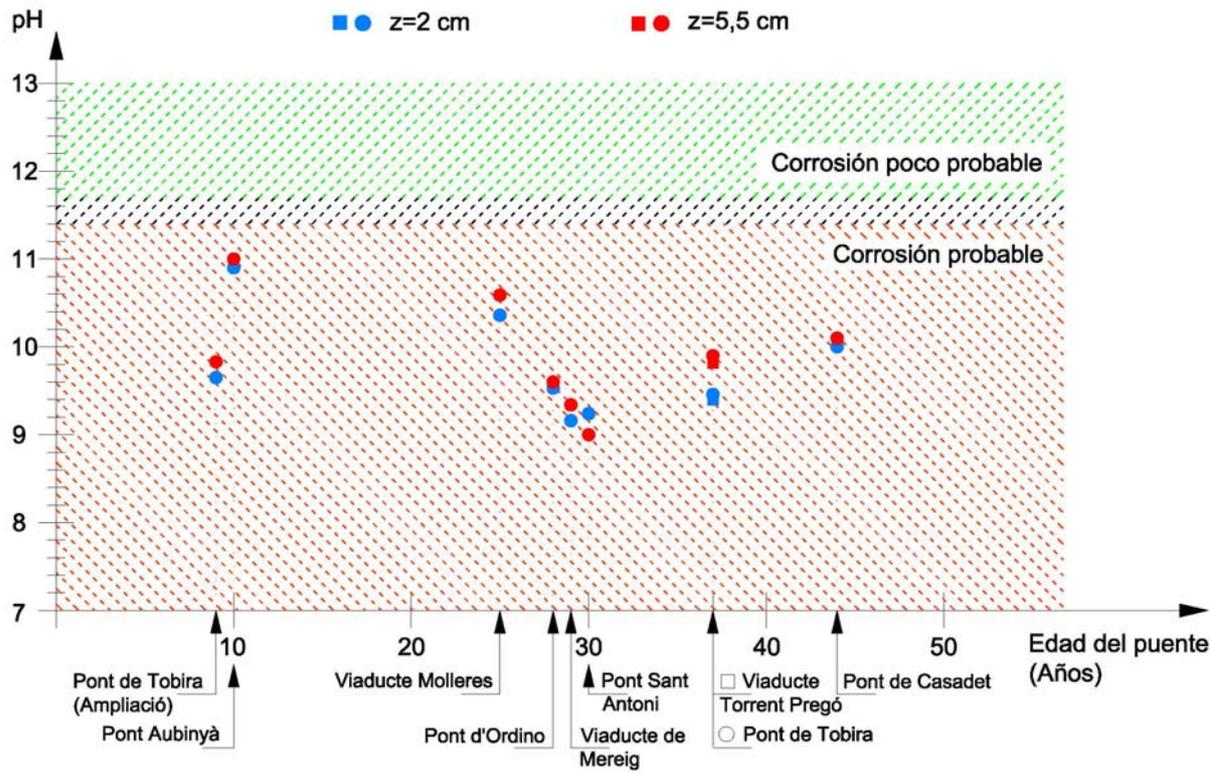


Figura 1. pH medio a 2 cm y 5,5 cm de profundidad

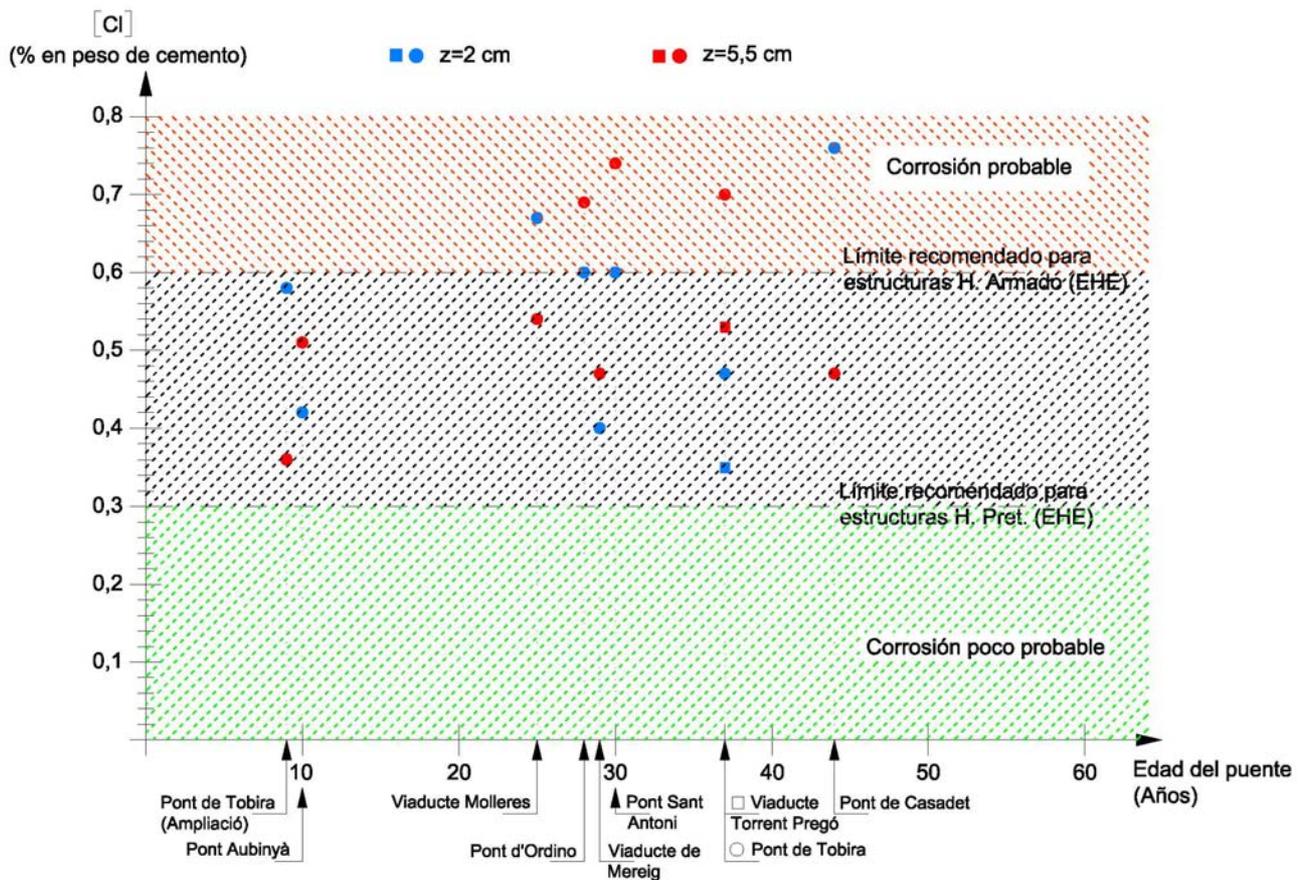


Figura 2. Concentración de cloruros media en % respecto al peso de cemento a 2 y a 5,5 cm de profundidad.

A la vista de gráficos y tablas de resultados, se observa:

1. Todos los puentes estudiados presentan una baja o muy baja alcalinidad y un alto contenido en iones cloruro. Los valores medios obtenidos a 5,5 cm de profundidad sobrepasan el 0,6% en peso de cemento en todos los puentes de edad superior a 25 años, excepto el puente más antiguo. Este es el valor máximo admitido para estructuras de hormigón armado adoptado por la normativa EHE en su anejo nº9. En el caso del puente más antiguo, si bien la concentración de cloruros a 2 cm es la más alta, el contenido a 5,5 no alcanza el 0,5%. Este buen comportamiento se debe sin duda a la excepcional calidad del hormigón utilizado ($f_{cj}=46-62$ MPa)
2. Los valores de ph son en general bajos. La evolución del pH en profundidad se corresponde con los modelos difusivos recogidos en la normativa (EHE- Anejo 9) siendo más altos a mayor profundidad, tal y como era de esperar. Incluso a 10 cm de profundidad, los valores obtenidos son significativamente inferiores a los deseables.
3. Los valores de contenido de cloruros son altos, entre 0.35-0.76% en contenido de cemento. En todos los casos se rebasa el 0.3% en peso de cemento. Este es el valor máximo admitido para estructuras de hormigón pretensado adoptado por la normativa EHE en su anejo nº9.
4. La evolución en profundidad del contenido de cloruros no obedece al modelo difusivo. Como se puede apreciar, a menudo los valores en las cercanías de las armaduras (3,5 – 5,5 cm) son superiores a los valores próximos a la superficie. Esta irregularidad puede justificarse entendiendo que los modelos difusivos no recogen la presencia de las armaduras ni las fuerzas electroquímicas que se originan una vez se han iniciado los procesos de corrosión.

5. CONCLUSIONES

Del trabajo se derivan las siguientes conclusiones:

1. Es necesario prestar mayor atención a los aspectos de durabilidad de las estructuras de hormigón frente al ataque por cloruros provenientes de las sales de deshielo en entornos de alta montaña.
2. Estos esfuerzos deben originarse en proyecto, dedicando especial atención a los detalles de la plataforma y respetando generosamente las indicaciones de las guías y reglamentos relativas a los aspectos tanto de dosificación como de recubrimientos. En este sentido, las guías norteamericanas son significativamente más exigentes que las europeas.
3. El esfuerzo debe continuar en fase de construcción realizando los ensayos necesarios para garantizar la adecuada calidad de todos y cada uno de los componentes del hormigón. El estudio ha puesto de manifiesto como un puente bien diseñado con 47 años de antigüedad está significativamente en mejores condiciones que varios puentes con 25-30 años de antigüedad.
4. Finalmente, la etapa de explotación debe incluir los programas de inspección y mantenimiento adecuados a una estructura sometida a un entorno agresivo.
5. De los ocho puentes estudiados, todos presentan bajas o muy bajas alcalinidades y altos contenidos en iones cloruro. En consecuencia, puede afirmarse que el parque de puentes está expuesto a condiciones muy propensas a la corrosión por cloruros a tanto a corto como a medio plazo.
6. Los datos de contenido de cloruros obtenidos no son compatibles con los modelos difusivos recogidos en los reglamentos. Al respecto, cabe indicar que los modelos

difusivos no contemplan la presencia de las armaduras, ni las fuerzas electroquímicas que se originan una vez se ha iniciado el proceso corrosivo. Desde esta interpretación, puede argumentarse que el alejamiento de los datos obtenidos respecto los correspondientes al modelo difusivo, puede ser indicativo de la existencia de procesos de corrosión activos.

REFERENCIAS

1. Pirineu Inspecció i Control (2013). Treballs de caracterització dels taulers de les obres de fàbrica de la xarxa de carreteres d'Andorra enfront l'atac per clorurs. Informe sobre taulers d'obres de fàbrica nº30980/1.
2. ACI 222R-01.(2001). Protection of Metals in concrete against corrosion.
3. ACI 201.2R-01 (2001). Guía para la durabilidad del Hormigón.
4. GEHO – CEB.(1996). Durabilidad de Estructuras de Hormigón. Guía de diseño CEB.
5. Moreno Fernández, E. (2008). Corrosión de Armaduras en estructuras de hormigón: Estudio Experimental de la variación de la ductilidad en armaduras corroídas aplicando el criterio de acero equivalente. Tesis Doctoral Universidad Carlos III de Madrid. pp 53.
6. Cordero, M. (2005). Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a corrosión por cloruros. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Catalunya.