

# Durabilidad de los hormigones fabricados con cementos resistentes al agua de mar expuestos a los ambientes marinos

*Durability of concrete made with seawater resistant cement exposed to marine environments*

Miguel-Ángel Sanjuán-Barbudo<sup>1</sup> y Cristina Argiz-Lucio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (España)

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9025>

La Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08 [1], en su Artículo 37.3.6, exige que los hormigones que vayan a estar expuestos al agua de mar, en los ambientes IIIb (totalmente sumergidos) y IIIc (en carrera de mareas) se fabriquen con cementos que sean, al menos, resistentes al agua de mar. Las razones son:

- El agua de mar contiene elementos agresivos para la pasta cementante y armadura (Fig. 1).
- España tiene un desarrollo costero de unos 8.000 km (5.000 km peninsular y 3.000 km insular).

La Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-16) destaca que "todos los cementos SR y SRC son, además de resistentes a los sulfatos, resistentes al agua de mar. Por tanto, cuando se especifique la utilización de un cemento resistente al agua de mar, MR, se podrá emplear un cemento SR o SRC en su lugar" [2].

En la literatura se ha abordado el estudio de estos cementos desde un punto de vista termodinámico [3] y durable [4-9] y, en general, se ha destacado su buen comportamiento en ambientes marinos [10-13].

## 1. ESCENARIO DEL PROBLEMA

### 1.1 CEMENTOS NECESARIOS PARA REDUCIR EL EFECTO DEL AGUA DE MAR

El agua de mar es un agente muy agresivo para los metales, por su contenido en iones cloruro, y para la pasta cementante

del hormigón en los casos en los que no se hubiera fabricado con un cemento resistente al agua de mar. Por tanto, la primera actuación que se debe hacer cuando se diseña un elemento estructural de hormigón en ambiente marino es la elección de un cemento resistente al agua de mar que se designan como MR, SRC o SR:

- Cementos resistentes al agua de mar, MR (UNE 80.303-2:2017).
- Cementos resistentes a los sulfatos, SRC (UNE 80.303-1:2017).
- Cementos resistentes a los sulfatos, SR (UNE-EN 197-1:2011).

Los cementos MR y SRC están sujetos al Real Decreto 1313/1988, ya que la característica adicional no está definida en la norma europea armonizada, pero, a su vez, tienen marcado CE. Por tanto, tienen

una designación conforme con dicho R.D. y otra conforme con el mercado CE. Para simplificar, podrá aparecer únicamente la designación conforme a la norma UNE.

### 1.2 ESPECIFICACIONES DE LOS CEMENTOS RESISTENTES AL AGUA DE MAR

Los cementos MR de la UNE 80.303-2:2017 se fabrican con un clínker que cumple los requisitos de la Tabla 1, además de las prescripciones de la UNE-EN 197-1:2011. Por otro lado, los cementos SRC (UNE 80.303-1:2017) deben cumplir los requisitos de la Tabla 2 y los SR (UNE-EN 197-1:2011) los de la Tabla 3.

### 1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS AMBIENTES MARINOS

Los ambientes marinos se definen en la EHE-08 [1] como una clase general de exposición III "ambiente marino" subdividida en:

- IIIa: atmósferas marinas con humedad y salinidad ambientales (Fig. 2a).
- IIIb: inmersión total en el mar.
- IIIc: intermitencia periódica de las

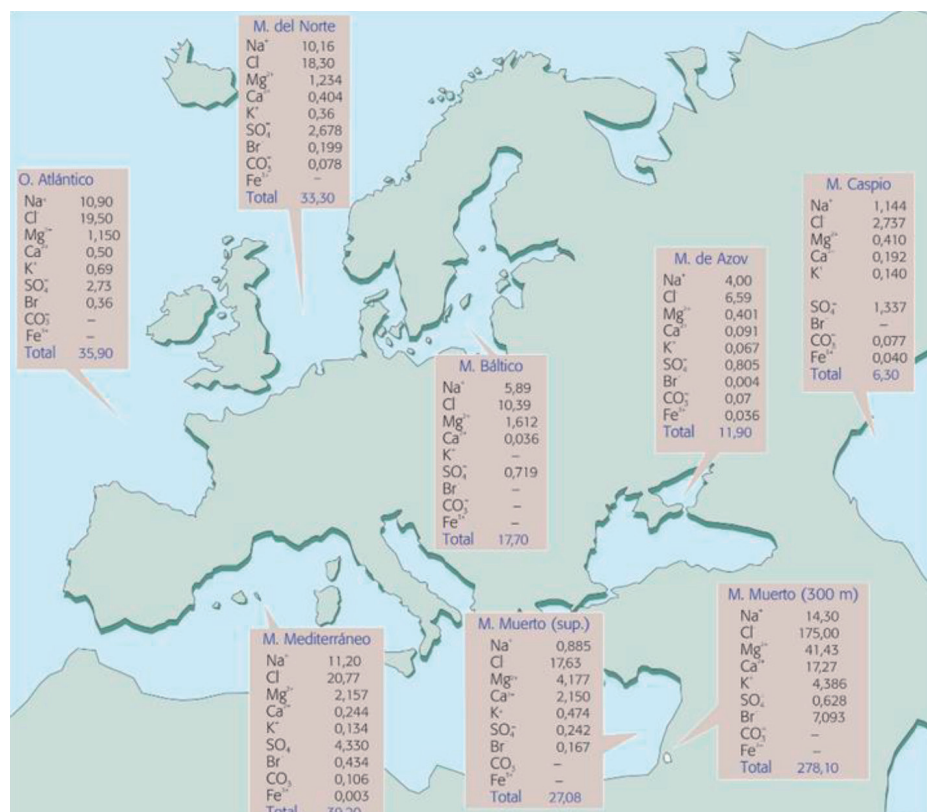


Fig. 1. Composición química del agua de mar en partes por mil (‰) [11]

Tipos	Denominaciones	Designaciones C <sub>3</sub> A%	Especificaciones del clinker de los cementos resistentes a agua de mar (MR)		
			C <sub>3</sub> A% + C <sub>4</sub> AF%		
I	Cementos pórtland resistentes a agua de mar	I	≤ 5,0	≤ 22,0	
II	Cementos Portland con adiciones, resistentes a agua de mar	Con escoria de horno alto (S)	II/A-S	≤ 8,0	≤ 25,0
II			II/B-S		
II		Con humo de sílice (D)	II/A-D		
II		Con puzolana natural (P)	II/A-P		
II			II/B-P		
II		Con ceniza volante (V)	II/A-V		
II			II/B-V		
III	Cementos con adiciones, resistentes a agua de mar	Con escoria de horno alto (S)	III/A	≤ 10,0	≤ 25,0
III			III/B	Ninguna	
III			III/C	Ninguna	
IV		Cementos Pozolánicos (D+P+V)	IV/A	≤ 8,0	≤ 25,0
IV			IV/B	≤ 10,0	≤ 25,0
V		Cementos compuestos (S+P+V)	V/A		

Las prescripciones sobre C<sub>3</sub>A y (C<sub>3</sub>A + C<sub>4</sub>AF) se refieren a porcentajes en masa de **clinker**. Los contenidos de C<sub>3</sub>A y C<sub>4</sub>AF se determinarán por cálculo, según la norma UNE 80304.

Tabla I: Prescripciones del clinker de los cementos MR (UNE 80303-2:2017)

Tipos	Denominaciones	Designaciones C <sub>3</sub> A%	Especificaciones del clinker de los cementos resistentes a los sulfatos (SRC)		
			C <sub>3</sub> A% + C <sub>4</sub> AF%		
II	Cementos Portland con adiciones, resistentes a sulfatos	Con escoria de horno alto (S)	II/A-S	≤ 6,0	≤ 22,0
II			II/B-S		
II		Con humo de sílice (D)	II/A-D		
II		Con Puzolana Natural (P)	II/A-P		
II			II/B-P		
II		Con ceniza volante (V)	II/A-V		
II			II/B-V		
III	Cementos con adiciones, resistentes a sulfatos	Con escoria de horno alto (S)	III/A	≤ 8,0	≤ 25,0
V		Cementos compuestos (S+P+V)	V/A	≤ 8,0	≤ 25,0

Las prescripciones sobre C<sub>3</sub>A y (C<sub>3</sub>A + C<sub>4</sub>AF) se refieren a porcentajes en masa de **clinker**. Los contenidos de C<sub>3</sub>A y C<sub>4</sub>AF se determinarán por cálculo, según la norma UNE 80304.

Tabla II. Prescripciones del clinker de los cementos SRC (UNE 80303-1:2017)

Tipos Principales	Denominación	Designación	Contenido de C <sub>3</sub> A (%) <sup>1)</sup>
CEM I	Cemento Portland resistente a los sulfatos	CEM I-SR 0	= 0
		CEM I-SR 3	≤ 3
		CEM I-SR 5	≤ 5
CEM III <sup>2)</sup>	Cemento de horno alto resistente a los sulfatos	CEM III/B-SR	-
		CEM III/C-SR	-
CEM IV	Cemento puzolánico resistente a los sulfatos <sup>2)</sup>	CEM IV/A-SR	≤ 9
		CEM IV/B-SR	≤ 9

1) Analizado en el **clinker**.2) En el caso de los cementos de horno alto resistentes a los sulfatos, CEM III/B-SR y CEM III/C-SR, no existe requisito relativo al contenido de C<sub>3</sub>A en el **clinker**.

Tabla III. Cementos comunes resistentes a los sulfatos de la norma UNE-EN 197-1:2011

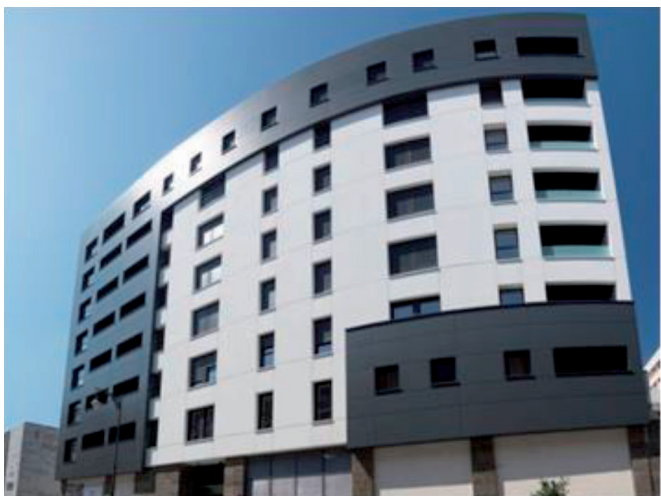


Fig. 2a. Edificio en ambiente marino, clase de exposición IIIa. Residencial El Carmen, Málaga. Hormigón fabricado con un IV/A (V) 42,5 R/MR de la fábrica de Málaga



Fig. 2b. Clase de exposición IIIc. Ampliación del Puente de Rande en Vigo realizada con un CEM IV/A (V) N-SR de la fábrica de Toral de los Vados y CEM IV/A(V) 42,5 R-SR de las fábricas de Toral de los Vados y Oural

mareas (alternancia de IIIa y IIIb) (Fig. 2b).

La EHE-08 [1] reglamenta (Artículos 37.3.5 y 37.3.6) que se debe emplear un cemento SR o SRC cuando el contenido de sulfatos sea igual o mayor que 600 mg/l en el caso de aguas, o igual o mayor que 3000 mg/kg, en el caso de suelos. Por otro lado, se debe emplear un cemento resistente al agua de mar (MR, SR o SRC) cuando el ambiente sea del tipo IIIb ó IIIc. Además, es recomendable la utilización de estos cementos en los ambientes IIIa.

## 2. DISCUSIÓN SOBRE EL PROBLEMA

### 2.1. ACCIÓN DEL AGUA DE MAR EN EL HORMIGÓN

Un hormigón bien dosificado y puesto en obra adecuadamente, fabricado con un cemento resistente al agua de mar, suele presentar unas buenas prestaciones en el ambiente marino [5]. El ataque del hormigón debido al agua de mar se debe a varios parámetros que actúan conjuntamente [10-12]:

- Parámetros químicos (iones agresivos);
- Parámetros geofísicos (mareas y fluctuación del nivel del mar);
- Parámetros físicos (ciclos hielo-des-hielo, elevada temperatura);
- Parámetros mecánicos (abrasión).

La alteración del hormigón en ambiente marino puede producirse muy rápidamente (en menos de 10 años) en las obras realizadas con un hormigón de mala calidad, es decir, cuando no se ha utilizado un cemento adecuado (MR, SR o SRC), o cuando la relación agua/cemento sea muy

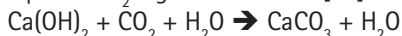
elevada, o cuando el contenido de cemento o el recubrimiento de las armaduras, esté por debajo del mínimo requerido.

#### 2.1.1 Acción química

El agua de mar puede dañar al hormigón mediante mecanismos fisicoquímicos que producen expansión y pérdida de las propiedades conglomerantes del gel C-S-H [5, 6, 10-12].

##### 2.1.1.1 Acción del CO<sub>2</sub>

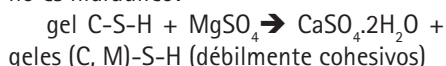
La carbonatación del hormigón se produce por el CO<sub>2</sub> según la reacción [14]:



Esta acción es leve debido a la baja solubilidad de los gases en los líquidos, la cual disminuye cuando aumenta la temperatura.

##### 2.1.1.2 Acción del ion Mg (II)

La portlandita en contacto con el magnesio del agua de mar forma hidróxido de magnesio o brucita, Mg(OH)<sub>2</sub>, que ejerce presiones que podrían provocar fisuración y disminución de la adherencia pasta-árido. Además, la transformación del gel C-S-H cálcico en magnesiano, reduce la resistencia mecánica ya que éste no es hidráulico:



##### 2.1.1.3 Acción del ion cloro (I)

Los cloruros producen un ataque localizado en la armadura formando productos voluminosos y poco adherentes que provocan fisuración en el hormigón. Para evitarlo, hay que reducir la entrada de los cloruros en el hormigón. Éste ofrece dos métodos de protección: de naturaleza química y física.

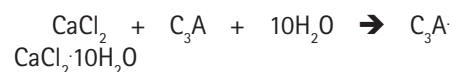
El método de naturaleza química consiste en que los cloruros reaccionen con los cationes calcio y los aluminatos de calcio de la pasta cementante, para formar cloruro de calcio y cloroaluminato de calcio hidratado (sal de Friedel). Sin embargo, la presencia de sulfatos en el agua de mar y su reacción con el aluminato tricálcico para producir ettringita hace que los cementos con elevado contenido de C<sub>3</sub>A no se recomienden para fabricar hormigones en ambiente marino.

En función de que el catión sea magnesio o calcio las reacciones que se producen son:

- Sustitución del Mg<sup>2+</sup> por Ca<sup>2+</sup> (poco agresiva para el hormigón):



- Formación de sal de Friedel (cloroaluminato de calcio) que no afecta negativamente al hormigón.



El método de protección de naturaleza física consiste en la propia compacidad e impermeabilidad del hormigón. Ésta es la mejor defensa de un hormigón frente a los ataques de agresivos externos.

##### 2.1.1.4 Acción de los sulfatos

La acción de los sulfatos depende de la concentración y del tipo de sulfato. Ésta puede iniciarse con un hinchamiento seguido de la formación de compuestos expansivos [5, 6].

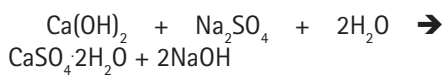
La portlandita, Ca(OH)<sub>2</sub>, en contacto con los sulfatos del agua de mar primero forma sulfato de calcio dihidrato o yeso,

Fábrica	Cemento	Número del Certificado AENOR
MATAPORQUERA	CEM III/B 32,5 N-SR	015/001356
	III/A 42,5 N/SRC	015/001990
DOS HERMANAS	CEM I 42,5 R-SR 3	015/002012
	CEM I 52,5 R-SR 3	015/002082
NIEBLA	CEM I 52,5 N-SR 5	015/001670
TENERIFE	IV/A (P) 42,5 R/MR	015/002079
TORAL DE LOS VADOS	CEM I 52,5 N-SR 5	015/001982
	CEM IV/A (V) 42,5 N-SR	015/001983
ARGUINEGUÍN	IV/A (P) 42,5 R/MR	015/002078
LEMONA	CEM I 52,5 N-SR 5	015/002088
	CEM IV/B (V) 32,5 N-SR	015/002019
SANT VICENÇ DELS HORTS	CEM I 42,5 R-SR 5	015/001991
ALCALÁ DE GUADAIRA	CEM I 42,5 R-SR 0 Especificación adicional: Na <sub>2</sub> O equiv.<0,60%	015/002039
	CEM I 42,5 R-SR 3 Especificación adicional: Na <sub>2</sub> O equiv.<0,60%	015/002016
	CEM I 52,5 R-SR 3 Especificación adicional: Na <sub>2</sub> O equiv.<0,60%	015/001986
	CEM IV/B (V) 32,5 N-LH/SR	015/002035
HONTORIA	CEM I 52,5 N-SR 5	015/001993
MORATA DE TAJUÑA	CEM I 52,5 N-SR 5 Especificación adicional: Na <sub>2</sub> O equiv.<0,60%	015/001783
OLAZAGUTÍA	CEM I 42,5 R-SR 5	015/001875
STA. MARGARIDA I ELS MONJOS	CEM I 42,5 N-SR 5	015/001709
	CEM I 52,5 R-SR 5	015/002077
ABOÑO	CEM I 52,5 N-SR 5	015/001971
	CEM I 52,5 N-SR 5 (ba) Especificación adicional: Na <sub>2</sub> O equiv.<0,60%	015/001997
	CEM III/B 32,5 N-SR	015/001381
	II/A-V 42,5 R/MR	015/002032
	III/A 42,5 N/SRC	015/001379
LA ROBLA	CEM I 52,5 N-SR 5 Especificación adicional: Na <sub>2</sub> O equiv.<0,60%	015/002085
	CEM IV/B (V) 32,5 N-SR	015/002084
ALICANTE	III/A 42,5 N/SRC	015/001937
GADOR	CEM I 42,5 R-SR 5	015/002081
LLOSETA	CEM I 52,5 N-SR 5	015/001957
	II/A-V 42,5 R/MR	015/001962
	IV/B (V) 32,5 N/MR	015/002017
	IV/A (V) 42,5 R/MR	015/002112
MORATA DE JALÓN	CEM I 52,5 R-SR 5	015/002095
	II/A-V 42,5 N/SRC	015/001690
CARBONERAS	CEM I 52,5 R-SR 3	015/001966
	II/A-S 42,5 N/SRC	015/001445
	II/A-S 42,5 N/SRC	015/001445
	III/A 42,5 N/SRC	015/001912
JEREZ DE LA FRONTERA	CEM I 42,5 N-SR 5	015/002015
	CEM IV/A (V) 42,5 R-SR	015/002101
SAGUNTO	CEM I 42,5 R-SR 5 Especificación adicional: Lim. Inf. R2d ≥ 40 MPa	015/001293
VILLALUENGA DE LA SAGRA	CEM I 52,5 R-SR 5	015/001871
AÑORGA	CEM I 52,5 R-SR 5	015/001884
ARRIGORRIAGA	III/A 42,5 N/SRC	015/001753
	V/A (S-V) 32,5 N/SRC	015/001754
MÁLAGA	CEM I 42,5 R-SR 5	015/001352
	IV/A (V) 42,5 R/MR	015/002008

Tabla IV. Cementos MR, SR y SRC con Marca N de AENOR de producto en septiembre de 2017, suponen el 25% de los tipos de cemento de la Marca N de AENOR

CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, cuya cristalización ejerce una presión que puede fisurar la pasta de cemento y reducir su adherencia con el árido. El aluminato tricálcico, C<sub>3</sub>A, del cemento anhidro se hidrata combinándose con una parte de la portlandita formada, dando lugar al aluminato de calcio hidratado, C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>, el cual puede reaccionar con el yeso para formar ettringita, C<sub>3</sub>A·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O, la cual, si se forma por los sulfatos que penetran desde el exterior en la pasta endurecida se denomina "secundaria" y es agresiva [8]. Cuando se forma durante el fraguado, es decir, durante la fase "plástica", se denomina ettringita "primaria" y no es perjudicial.

La formación de yeso secundario se puede producir por sustitución iónica:



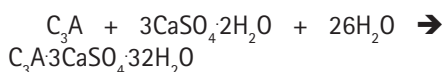
El NaOH produce una elevada alcalinidad que estabiliza al gel C-S-H, mientras que el yeso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) es expansivo, pero sólo se forma en los poros de la pasta de cemento hidratado, por lo que produce una expansión escasa o nula. Sin embargo, si los cristales no encuentran poros en donde formarse podrían ejercer una presión disruptiva.

En el caso del MgSO<sub>4</sub> la sustitución iónica es poco agresiva para el hormigón: MgSO<sub>4</sub> + Ca(OH)<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>O → CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O + Mg(OH)<sub>2</sub>

El CaSO<sub>4</sub> soluble producido se lixivia del hormigón y el sulfato cálcico precipitado, CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, produce expansión. Por otro lado, el Mg(OH)<sub>2</sub> precipitado sirve de protección al hormigón si rellena poros.

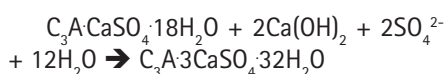
La formación de ettringita secundaria se produce [15]:

- A partir del C<sub>3</sub>A anhidro:

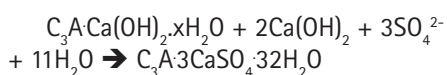


- A partir de los aluminatos cálcicos hidratados:

• Del monosulfoaluminato cálcico:



• Del C<sub>4</sub>AH<sub>x</sub>:



La precipitación rápida de la ettringita produce la formación de cristales muy finos no fibrosos de naturaleza coloidal con un volumen molar 3 - 8 veces superior al

volumen del sólido inicial, según se forme a partir de C<sub>3</sub>A o de C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>.

Los ataques descritos pueden ser externos e internos.

## 2.2 CEMENTOS EMPLEADOS EN LA CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN III Y CLASE ESPECÍFICA DE EXPOSICIÓN QB

En la selección de los cementos para una clase general de exposición III (corrosión de las armaduras por cloruros de origen marino), se debe de evitar la difusión de cloruros, por un lado, y mejorar la resistencia a los sulfatos, por otro. Aunque el contenido de aluminatos en el clínker del cemento mejora la capacidad de retención de cloruros, en estos ambientes con sulfatos se recomienda que el cemento Portland sea resistente al agua de mar, MR, SR y SRC para evitar la formación de ettringita. Además, los cementos más adecuados son los que contienen adiciones activas que dan lugar a pastas hidratadas [16], cuyos geles reducen el avance penetrante de los cloruros por difusión (cementos con puzolanas naturales, cenizas volantes y escorias granuladas de horno alto).

Para la clase específica de exposición Qb, los cementos más resistentes son los que producen pastas hidratadas con menor proporción de componentes atacables: portlandita, gel C-S-H y aluminato tricálcico. En particular, los materiales puzolánicos contienen sílice o alúmina activas capaces de reaccionar con el hidróxido de calcio, portlandita, formado un gel C-S-H secundario con una menor relación calcio/sílice que el primario que es menos atacable por los compuestos de magnesio. Además, las escorias de horno alto tienen una cierta hidraulicidad latente, especialmente cuando se activan con álcalis o sulfatos, aumentando la resistencia mecánica a medio plazo y formando productos de hidratación menos vulnerables a los ataques de los sulfatos y sales magnésicas.

En el caso americano, la norma ASTM C 150, recoge al cemento tipo V (resistente a los sulfatos), el cual contiene menos del 5% de C<sub>3</sub>A y menos del 20% de la suma del C<sub>3</sub>A y C<sub>4</sub>AF; y a un tipo II (moderadamente resistente a los sulfatos) que limita el C<sub>3</sub>A al 8%. Además, para ambientes muy agresivos, recomienda el empleo del tipo V con materiales puzolánicos. (ACI 201.2R-10. *Manual for Concrete Practice*). El cemento tipo V (resistente a los sulfatos) de la ASTM C 150, es equivalente al CEM I - SR 5 de la norma europea EN 197-1:2011 ya que ambos contienen menos del 5% de C<sub>3</sub>A. Por otro lado, los

moderadamente resistente a los sulfatos (tipo II de la ASTM C 150) no son equivalentes en absoluto a los CEM II de la norma europea EN 197-1:2011. Puesto que estos últimos contienen adiciones activas de diversa índole, es de esperar que presenten un mejor comportamiento frente a los sulfatos y al agua de mar que los del tipo II de la norma americana.

## 2.3 MARCAS VOLUNTARIAS DE CALIDAD DE PRODUCTO. LA MARCA N DE AENOR

La certificación es la acción de acreditar, por medio de un documento fiable, emitido por un organismo autorizado, que un determinado producto o servicio cumple con los requisitos definidos por una norma o especificación técnica. AENOR desarrolla la certificación de cementos en su **Comité Técnico de Certificación AEN/CTC-015** que está acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) y aceptado por el Ministerio de Fomento como un **distintivo de calidad oficialmente reconocido** para todos los efectos de la Instrucción EHE-08 [1].

La **Marca N garantiza las características MR, SRC o SR** basándose en los ensayos que realizan sobre los clínkeres de cemento Portland tomados en las fábricas e inspeccionando su autocontrol con relación al contenido de C<sub>3</sub>A y C<sub>3</sub>A+C<sub>4</sub>AF.

La **Certificación de la Marca N de AENOR** garantiza un alto nivel de calidad en la producción y expedición permitiendo al usuario prescindir de la realización de los ensayos de identificación [2] potestativos previstos en el Artículo 6º de la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-16) [2]. Este hecho debiera de tenerse en cuenta en la gestión del alcance de los proyectos ya que, la buena gestión de éstos es una de las causas del éxito de los proyectos de construcción en España [17]. En particular, una de las principales restricciones en la gestión de proyectos es el tiempo [18] y la utilización de cementos certificados en las obras de construcción civil y edificación podría ayudar a minimizar el problema.

## 3. CONCLUSIÓN

Con base a los resultados presentados en este estudio, se puede concluir que el contenido de C<sub>3</sub>A y de la suma de C<sub>3</sub>A más C<sub>4</sub>AF son los parámetros controlantes para limitar el ataque por sulfatos del agua de mar al hormigón, si bien, no se evita la acción de otros agentes agresivos presentes en el ambiente marino. Los valores reco-



mendados como límites superiores para el  $C_3A$  son el 5%, 6%, 8%, 8% y 9%, para los cementos CEM I, CEM II, CEM III/A, CEM V/A, y CEM IV, respectivamente. Además, los valores recomendados como límites superiores para el  $C_4AF$  son el 22% y 25% para los cementos CEM III/A y CEM V/A. También se han discutido las razones técnicas que justifican la obligatoriedad de emplear cementos resistentes al agua de mar en los hormigones que vayan a estar expuestos a los ambientes IIIb (totalmente sumergidos) y IIIc (en carrera de mareas) conforme con la Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08. Por otro lado, se concluye que es muy recomendable la utilización de estos cementos en el ambiente IIIa (atmósferas marinas con humedad y salinidad ambientales).

La Marca N de AENOR para cementos es la mejor valorada en el mercado y es capaz de garantizar que los cementos poseen las características MR, SRC o SR con base a los ensayos realizados en los clínkeres del cemento Portland. Esta garantía es evidente y superior a los controles mínimos que son necesarios para la comercialización de cemento en Europa (marcado CE).

## REFERENCIAS

- [1] Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento. Madrid, 2008 (Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio; BOE núm. 203 del viernes 22 agosto 2008).
- [2] Real Decreto 256/2016 de 10 de junio de 2016, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos, RC-16. BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO Núm. 153 del sábado 25 de junio de 2016 Sec. I. Pág. 45755-Pág. 45824.
- [3] B. Lothenbach, E. Wieland. A thermodynamic approach to the hydration of sulphate-resisting Portland cement. *Waste Management* 26 (2006) 706-719. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.01.023>
- [4] B. Guirguis, M.H. Shehata, J. Duchesne, B. Fournier, B. Durand, P. Rivard. The application of a new oxidation mortar bar test to mixtures containing different cementing systems. *Construction and Building Materials* 173 (2018) 775-785. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.026>
- [5] R.S. Gollop, H.F.W. Taylor. microstructural and microanalytical studies of sulfate attack ill. sulfate-resisting portland cement: reactions with sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7. pp. 1581-1590. 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00151-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00151-2)
- [6] P. Brown, R.D. Hooton. Ettringite and thaumasite formation in laboratory concretes prepared using sulfate-resisting cements. *Cement and Concrete Composites* 24 (2002) 361-370. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00088-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00088-9)
- [7] Th. Dyer. Influence of cement type on resistance to attack from two carboxylic acids. *Cement and Concrete Composites* 83 (2017) 20-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.004>
- [8] E. Menéndez. Análisis del hormigón en estructuras afectadas por reacción álido-álcali, ataque por sulfatos y ciclos de hielo-deshielo". Editado por IECA, 2010.
- [9] I. Aiad, H. El-Didamony, Mohamed Heikal, S. Al-Masry. Effect of delayed addition time of synthesized SSPF condensate on the durability of sulphate resisting cement pastes incorporating micro-silica. *Construction and Building Materials* 48 (2013) 1092-1103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.067>
- [10] M.Á. Bermúdez, P. Alaejos. Permeabilidad a los cloruros del hormigón armado situado en ambiente marino sumergido. *Ingeniería de construcción* 22 (1) (2007) 15-22. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-50732007000100002>
- [11] J. Calleja, M.A. Sanjuán. Cementos recomendados para estructuras marítimas y el control de su calidad (parte 1). *Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN*. 855 (2003) 4-20.
- [12] S. M. Abdelkader, A. Moragues, E. Reyes. Influencia de la estructura porosa de hormigones utilizados en ambientes marinos frente al transporte generado por gradientes de presión. *Anales de Mecánica de la Fractura* 25 (2) (2008) 641-646. [http://oa.upm.es/1727/1/ABDELKADER\\_PON\\_2008\\_01.pdf](http://oa.upm.es/1727/1/ABDELKADER_PON_2008_01.pdf)
- [13] M. Sadaba, G. Martinez, M. Sanchez. Uso del Acero Inoxidable como Material de Refuerzo en Estructuras de Concreto Armado. *Port. Electrochim. Acta*, 23 (1) (2005) 55-7. Disponible en [http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0872-19042005000100005&lng=es&nrn=iso](http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0872-19042005000100005&lng=es&nrn=iso) accedido el 9 de enero de 2019.
- [14] M.A. Sanjuán, E. Estévez, C. Argiz, D. del Barrio, Effect of curing time on granulated blast-furnace slag cement mortars, *Cem. Concr. Compos.* 90 (2018) 257-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.04.006>
- [15] M.A. Sanjuán. Formation of chloroaluminates in calcium aluminate cements cured at high temperatures and exposed to chloride solutions. *Journal of Materials Science* 32 (1997), pp. 6207-6213. DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018624824702>
- [16] M.A. Sanjuán, C. Argiz, J.C. Gálvez, A. Moragues, Effect of silica fume fineness on the improvement of Portland cement strength performance, *Constr. Build. Mater.* 96 (2015) 55-64. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.092>
- [17] A. Cerezo, M. Otero, A. Pastor. Influence of scope management in construction industry projects. *DYNA Management* 4 (1) (2016). DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN7943>
- [18] R. Matos, T. Barboza, O. Celso. Risk analysis in schedules - evaluation of pert-risk method through the monte carlo method in a construction project of an edification. *DYNA Management* 6 (1) (2018). DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN8796>