

CUADERNOS INTEMAC

**Durabilidad del hormigón
en ambiente marino**

**Concrete durability
in marine environment**

Pedro López Sánchez
Licenciado en Ciencias Químicas



INTEMAC

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

N.º 31
3.º TRIMESTRE '98

INTEMAC



METIRE UT SCIAS

INTEMAC

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

CONTROL DE PROYECTO

CONTROL DE OBRA

GARANTIA DE CALIDAD

SONDEOS, ENSAYOS E INFORMES GEOTECNICOS

INFORMES DE PATOLOGIA, REHABILITACION Y REFUERZOS DE CONSTRUCCIONES

OBRAS PUBLICAS
EDIFICACION
INSTALACIONES



INTEMAC
AUDIT

AUDITORIA TECNICO-ECONOMICA DE CONSTRUCCIONES

- ASESORIA EN EL PLANTEAMIENTO Y EN LA CONTRATACION DE LA OBRA
- SEGUIMIENTO DE COSTOS Y PLAZOS DURANTE LA CONSTRUCCION
- VALORACIONES DE TERRENOS, INMUEBLES Y CONSTRUCCIONES
- AUDITORIAS DE TRABAJOS PARCIALES Y DE LIQUIDACION DE LA OBRA



INTEMAC
ECO

AUDITORIA TECNICA MEDIOAMBIENTAL

CONTROL DE IMPACTO AMBIENTAL

Obras Públicas
Edificación
Instalaciones

CONTROL DE CALIDAD AMBIENTAL

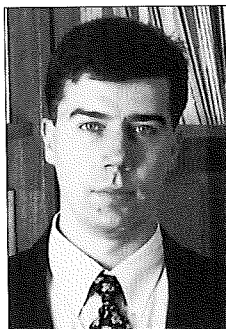
Aire
Agua
Ruido

AUDITORIA MEDIOAMBIENTAL

ASESORAMIENTO EN MATERIA DE MEDIO AMBIENTE

**DURABILIDAD DEL HORMIGÓN
EN AMBIENTE MARINO**

**CONCRETE DURABILITY
IN MARINE ENVIRONMENT**



D. Pedro López Sánchez
Licenciado en Ciencias Químicas
Jefe de la Sección de Ensayos
Químicos del Laboratorio Central
de INTEMAC
BSc Chemistry. Head of Chemical
Testing Department, INTEMAC
Central Laboratory

Copyright © 1998, INTEMAC

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida o distribuida de ninguna manera ni por ningún medio, ni almacenada en base de datos o sistema de recuperación, sin el previo permiso escrito del editor.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

ISSN 1133-9365

Depósito legal: M - 39.893-1998
Infoprint, S.A. - San Vicente Ferrer, 40

INDEX

1. INTRODUCTION
2. REQUIREMENTS APPLICABLE TO CONCRETE IN MARINE ENVIRONMENT
 - 2.1. DESCRIPTION OF ENVIRONMENTAL AGGRESSION
 - 2.2. CONCRETE IN MARINE ENVIRONMENT
3. DETERIORATION MECHANISMS
4. CRITERIA FOR SELECTION OF CEMENT FOR MARINE ENVIRONMENT
 - 4.1. CEMENT CLASSIFICATION BY COMPOSITION
 - 4.2. SPECIAL CEMENTS FOR AGGRESSIVE ENVIRONMENTS
5. EVALUATION PROCEDURES FOR DURABILITY CONTROL
 - 5.1. METHODS FOR EVALUATING CHEMICAL RESISTANCE OF CEMENTITIOUS MATERIALS
 - 5.1.1. ANSTETT Text
 - 5.1.2. KOCH AND STEINEGGER Test
 - 5.1.3. ASTM C-452-95 Test
 - 5.1.4. pr ENV 196-(X):1995 Test
 - 5.1.5. ASTM C-1012-95 Test
 - 5.1.6. Criteria for applying procedures
 - 5.2. METHODS FOR EVALUATING CONCRETE PERMEABILITY

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. CONSIDERACIONES SOBRE LOS REQUISITOS APLICABLES A LOS HORMIGONES EJECUTADOS EN AMBIENTE MARINO
 - 2.1. DESCRIPCIÓN DE LA AGRESIVIDAD AMBIENTAL
 - 2.2. EL HORMIGÓN EN AMBIENTE MARINO
3. MECANISMOS DE DEGRADACIÓN
4. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE CEMENTOS PARA AMBIENTE MARINO
 - 4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS POR SU COMPOSICIÓN
 - 4.2. CEMENTOS ESPECIALES PARA AMBIENTES AGRESIVOS
5. PROCEDIMIENTOS DE EVALUACIÓN PARA EL CONTROL DE LA DURABILIDAD
 - 5.1. MÉTODOS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA QUÍMICA DEL CONGLOMERANTE
 - 5.1.1. Ensayo de ANSTETT
 - 5.1.2. Ensayo de KOCH y STEINEGGER
 - 5.1.3. Ensayo ASTM C-452-95
 - 5.1.4. Ensayo pr ENV 196-(X):1995
 - 5.1.5. Ensayo ASTM C-1012-95
 - 5.1.6. Criterios de aplicación de los procedimientos
 - 5.2. MÉTODOS PARA EVALUAR LA IMPERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN

SUMMARY

This paper reviews the basic principles of concrete performance in marine environments and the criteria requisite to durability in sea water.

On the basis of that discussion, the criteria applicable for assessing the chemical susceptibility of cementitious materials to degrading agents is appraised (to establish a valid criterion for selecting cements for use in aggressive environments) along with the validity of water permeability tests as a procedure for monitoring concrete durability in terms of sufficient waterproofing and closeness.

1. INTRODUCTION

Any attempt to assess the chemical resistance of concrete in marine environments encounters serious difficulties, primarily because of the variety of kinds of aggression involved and of the many factors contributing to concrete deterioration or making it possible, from those inherent in proportioning, pouring and curing, to those occasioned by the aggressive surroundings. The latter impact different members exposed to one and the same overall environment differently depending on their precise location (due to factors such as prevailing wind direction, whether or not the concrete is submerged or located in the tidal range or in areas above the high tide).

This is not a new issue, as the earliest studies on concrete resistance to sea water were undertaken in the mid-Nineteenth Century, when the first symptoms of degradation were observed in maritime works (port facilities at Algiers). No significant progress in an understanding of such chemical aggression was made, however, until the middle of this century, when the development of analytical techniques and the dissemination of the reports on long-term laboratory research and follow-up studies on structures exposed to marine environments gave rise to the publication of the earliest recommendations or technical observations for the use of concrete in sea water.

Concrete resistance to chemical action depends not only on the resistance of cementitious materials to aggressive agents, but on the closeness of the concrete member and, therefore, on its impermeability.

Whereas the former consideration is related to the kind of cement used (primarily the mineral composition of the clinker and the kind and proportion of additive it contains), the latter (concrete closeness) is achieved by adopting appropriate production methods (high cement content, low water/cement ratio, adequate compaction and curing and a sufficient thickness of concrete cover).

Nonetheless, the damage observed in many deteriorated structures is caused by failure to comply with the above requirements (readily met with today's knowledge and technology), i.e., to the placement of concrete whose porosity and permeability makes it susceptible to attack.

Reviewing the causes of concrete deterioration and underlying mechanisms, it soon becomes evident that despite the wide variety of such causes and mechanisms, they all have a common origin: the penetration of the concrete members by external aggressive agents. The immediate deduction is that the first kind of protection against attack and therefore the main requisite to ensure concrete chemical resistance should be to prevent or reduce such penetration as far as possible.

There is, however, yet a second way to minimise the risk of degradation (indispensable in where the aggressive agents are contributed from the ingredients or have already penetrated and are spreading inside the concrete),

RESUMEN

Se presentan en este Cuaderno los principios básicos del comportamiento del hormigón expuesto al ambiente marino y los criterios exigibles para garantizar su durabilidad en agua de mar.

En base a estos parámetros se expone una valoración de los criterios aplicables para evaluar la susceptibilidad química de los conglomerantes frente a los agentes de degradación (con objeto de disponer de un criterio válido de selección de cementos para su empleo en medios agresivos) y el rango de validez de los ensayos de permeabilidad al agua como procedimiento de control de la durabilidad del hormigón que permita garantizar una suficiente estanquidad y compacidad del mismo.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la resistencia química del hormigón en ambiente marino presenta un elevado grado de dificultad, principalmente debido a la variedad de tipos de agresión que pueden manifestarse de forma simultánea, y a los múltiples factores que pueden posibilitar o favorecer el deterioro del hormigón, tanto los inherentes a su dosificación, puesta en obra y curado, como los ocasionados por el medio agresivo, que puede actuar de forma diferente en función de la localización del elemento a evaluar, aunque éste esté expuesto a un mismo ambiente global (según cual sea la orientación de los vientos dominantes, o según se trate de hormigón sumergido, o situado en la carrera de mareas, o en zonas por encima del nivel de pleamar).

Esta problemática es muy antigua, puesto que los estudios sobre la resistencia química del hormigón en agua de mar fueron iniciados a partir de mediados del siglo pasado, cuando se detectaron los primeros síntomas de degradación en obras marítimas (instalaciones portuarias de Argel), pero no se empezaron a obtener grandes avances en el conocimiento de las agresiones químicas producidas hasta mediados de este siglo, fecha en la cual el desarrollo de las técnicas de análisis y la difusión de los informes correspondientes a los estudios a largo plazo, desarrollados mediante ensayos en laboratorio, y al seguimiento del deterioro de estructuras expuestas en ambiente marino dieron lugar a la publicación de las primeras recomendaciones u observaciones técnicas para el empleo de hormigón en agua de mar.

La resistencia del hormigón al ataque químico depende no sólo de la resistencia del conglomerante a los agentes agresivos, sino también de la compacidad del elemento ejecutado y, por consiguiente, de su impermeabilidad.

Mientras que el primer factor es función de los cementos empleados (fundamentalmente de la composición mineralógica del clínker y del tipo y proporción de la adición que contenga), la segunda condición (compacidad del hormigón) puede ser conseguida adoptando los medios de producción adecuados: elevado contenido de cemento, relación agua/cemento reducida, compactación y curado adecuados, y espesores de recubrimiento suficientes.

Sin embargo, los daños observados en muchas estructuras deterioradas tienen su origen en el incumplimiento de los requisitos citados (fácilmente alcanzables con el nivel de conocimiento y la tecnología disponibles actualmente), habiendo ejecutado hormigones porosos y permeables, susceptibles de ataque.

Si se realiza un estudio de las diversas causas y mecanismos de deterioro del hormigón resulta evidente, a pesar de su gran variedad, que todos tienen un origen común: la penetración de agentes agresivos dentro del hormigón desde el exterior. De aquí se deduce que la primera línea de defensa contra el ataque y por ello la principal condición para garantizar la resistencia química del hormigón, debe ser prevenir o disminuir en lo posible esa penetración.

No obstante, se dispone de una segunda barrera para minimizar el riesgo de degradación, imprescindible en el caso de que los agentes agresivos hubieran difundido hacia el interior del hormigón o hubieran sido aportados por los

which consists of the use of a kind of cementitious material whose composition is not susceptible to attack under the conditions of exposure of the member involved.

Any assessment of the effectiveness of these two protective barriers is complex because of the lack of appropriate direct monitoring methods able to ensure, on the one hand, concrete closeness or impermeability and, on the other, the susceptibility of the cementitious material to attack once the concrete is in place. Both measurements, in fact, must be taken indirectly. Thus, concrete permeability to water, although monitored via specimens representative of the material placed in the structure to be assessed, is studied under conditions of extreme exposure (up to 7 kp cm² of water pressure applied to the concrete during the test) which are necessary to define a threshold between permeable and impermeable concretes; the susceptibility of the cementitious material, in turn, is monitored either by chemical characterisation of the anhydrous cement components (primarily tricalcium aluminate) or through expansion, flexural strength or surface deterioration tests on mortar specimens (which take no account of on-site proportioning, placement or curing conditions). Since the latter have neither the same microstructure or degree of hydration as the concrete under study, the validity of such tests is essentially restricted to comparing the chemical resistance of one cementitious material to another. A discussion of INTEMAC laboratory experience with the use and application of the various monitoring methods follows, along with comments on the limitations to each procedure.

2. REQUIREMENTS APPLICABLE TO CONCRETE IN MARINE ENVIRONMENTS

2.1. DESCRIPTION OF ENVIRONMENTAL AGGRESSION

Contemporary knowledge of the performance of concrete members placed in locations subjected to different degrees of weathering has been taken as the grounds for the attempts, in various building code documents, to define levels of environmental aggression. Establishing such a classification is no easy task, since a full interpretation of the variables involved should not only address possible deteriorating agents, but also reflect the existence of different microclimates within each of the environments studied.

Examples of some environmental classifications contained in building codes and specifications follow:

- Spanish code EH-91 on the design and execution of bulk or reinforced concrete (Article 13.3) describes three kinds of overall environments and specifies the minimum toppings required in each case.

TABLE No. 1
DESCRIPTION OF AGGRESSIVE ENVIRONMENTS (EH-91)

DESCRIPTION OF KINDS OF ENVIRONMENT		CONCRETE COVER THICKNESS (mm) ⁽¹⁾
Environment I	Structures inside buildings or outdoors in dry climates (relative humidity does not exceed 60% more than 90 days per year)	20
Environment II	Structures in normal (non-aggressive) outdoors environments or in contact with normal water or ordinary soil	30
Environment III	Structures in aggressive industrial or marine environments or in contact with aggressive soil or salt or slightly acid water	40

This classification is expanded in Article 24.4, where environments II and III are broken down into IIh and IIIh, for members subjected to frost and IIlf and IIIlf, for members exposed to deicing salts; a "chemically aggressive" environment is likewise defined in terms of the existence of aggressive sulfates (≥ 400 mg of SO₄²⁻ per litre of water or ≥ 3000 mg of SO₄²⁻ per kilogram of soil). The following table shows the water/cement ratio and cement content requirements applicable in each environment.

⁽¹⁾ The above values may be lowered:

- In sheets, parts with surfaces protected and precast parts: 5 mm.
- In concrete with $250 \leq f_{ck} < 400$ kp/cm²: 5 mm.
- In concrete with $f_{ck} \geq 400$ kp/cm²: 10 mm.

But under no circumstances may the resulting covering layer be under 15 mm, 20 mm or 25 mm for cases I, II y III, respectively.

materiales componentes, basada en el empleo de un tipo de conglomerante con una composición que no fuera susceptible de ataque en las condiciones de exposición del elemento afectado.

La evaluación de la eficacia de ambas barreras de protección es compleja debido a que no se dispone de métodos de control directos que sean adecuados para garantizar, por un lado, la compacidad o impermeabilidad del hormigón, y por otro, la susceptibilidad del conglomerante a ser atacado una vez empleado en la ejecución de hormigón. Esto se debe a que ambas medidas se hacen de forma indirecta, dado que el control de la permeabilidad al agua, aunque se estudia sobre probetas de hormigón representativas del material ejecutado en la estructura a evaluar, se efectúa bajo condiciones de exposición extremas (hasta 7 kp/cm² de presión de agua aplicada sobre el hormigón durante la realización del ensayo) que son necesarias para definir un umbral entre hormigones permeables o impermeables, y el control de la susceptibilidad de ataque del conglomerante se realiza o mediante la caracterización química de los componentes del cemento anhidro (aluminato tricálcico principalmente), o mediante ensayos de expansión, resistencia a flexión o deterioro superficial, sobre probetas de mortero (no considerando la dosificación ni las condiciones de ejecución y curado en obra), que no presentan la microestructura ni el grado de hidratación que pueda tener el hormigón objeto de estudio, por lo que los ensayos son válidos, fundamentalmente, para comparar la resistencia química de un conglomerante respecto a otro. Más adelante se exponen los métodos de control aplicables, en base a las experiencias obtenidas mediante su empleo y aplicación en los laboratorios de INTEMAC, indicando las limitaciones de cada procedimiento, en su caso.

2. CONSIDERACIONES SOBRE LOS REQUISITOS APLICABLES A LOS HORMIGONES EJECUTADOS EN AMBIENTE MARINO

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA AGRESIVIDAD AMBIENTAL

A partir de los conocimientos adquiridos en base al comportamiento de los elementos de hormigón ejecutados en localizaciones sometidas a diferentes grados de exposición ambiental, se ha intentado definir en distintos documentos normativos los niveles de agresividad ambiental. Esta clasificación no resulta nada fácil, ya que una interpretación completa de las variables que intervienen no sólo debe contar con todos los posibles agentes de deterioro, sino también reflejar la existencia de microclimas diferentes dentro de cada una de las exposiciones ambientales.

A título de ejemplo se exponen a continuación algunas clasificaciones ambientales contenidas en la normativa:

- La Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado (EH-91) describe, en su Artículo 13.3, tres tipos de ambiente global, incluyendo los recubrimientos mínimos aplicables a cada caso.

**TABLA Nº 1
DESCRIPCIÓN DE LOS AMBIENTES AGRESIVOS (EH-91)**

DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE AMBIENTE		ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (mm) ⁽¹⁾
Ambiente I	Estructuras en interiores de edificios o medios exteriores de baja humedad (no se sobrepasa el 60 % de humedad relativa más de 90 días al año)	20
Ambiente II	Estructuras en exteriores normales (no agresivos) o en contacto con aguas normales o terreno ordinario	30
Ambiente III	Estructuras en atmósfera agresiva industrial o marina, o en contacto con terrenos agresivos o con aguas salinas o ligeramente ácidas	40

Esta clasificación se amplía en el Artículo 24.4, donde se desdoblán los ambientes II y III en IIh y IIIh, en el caso de elementos sometidos a heladas, y IIl y IIIl, en caso de elementos expuestos en zonas con utilización de sales fundentes, y se define un ambiente "Químicamente agresivo", en base a la presencia de sulfatos agresivos al hormigón (≥ 400 mg de SO₄²⁻ por litro de agua o ≥ 3000 mg de SO₄ por kilogramo de suelo). A continuación se presentan los requisitos exigidos de relación agua/cemento y contenido de cemento aplicables a cada uno de los ambientes.

(1) Los valores anteriores podrán disminuirse:

- En láminas, piezas con paramentos protegidos y piezas prefabricadas: 5 mm.
- Con hormigones de $250 \leq f_{ck} < 400$ kp/cm²: 5 mm.
- Con hormigones de $f_{ck} \geq 400$ kp/cm²: 10 mm.

Sin que en ningún caso resulten recubrimientos inferiores a 15 mm, 20 mm o 25 mm para los casos I, II y III, respectivamente.

**TABLE No. 2
PROPORTIONING PARAMETERS BY KIND OF ENVIRONMENT (EH-91)**

ENVIRONMENT	MAXIMUM W/C RATIO	MINIMUM CEMENT CONTENT (kg/m ³)	
		Bulk concrete	Reinforced concrete
I	0.65	150	250
II	0.60	175	275
II h	0.55	175	300
II f (2)	0.50	200	300
III	0.55	200	300
III h	0.50	200	300
III f (2)	0.50	200	325
Chemically aggressive (3)	0.50	200	325

At this time, however, the most widely accepted classification of environmental aggression in the context of construction is the one formulated by Comité Euro-international du Béton Task Group No. 20 and published in 1989 as CEB Bulletin No. 182 under the title "Durable Concrete Structures. CEB Design Guide".

**TABLE No 3
EXPOSURE CLASSES (CEB GUIDE) FOR THE DESIGN OF DURABLE CONCRETE STRUCTURES**

EXPOSURE CLASS	ENVIRONMENTAL CONDITIONS
1	Dry environment, e.g. – interior of buildings for normal habitation or offices – exterior components not exposed to wind and weather or soil or water
2	a Humid environment without frost, e.g.: – interior of buildings where humidity is high – exterior components exposed to wind and weather but not exposed to frost – components in non-aggressive soil and/or water not exposed to frost
	b Humid environment with frost, e.g.: – exterior components exposed to wind and weather or non-aggressive soil and/or water and frost
3	Humid environment with frost and de-icing agents, e.g.: – exterior components exposed to wind and weather or non-aggressive soil and/or water and frost and de-icing chemicals
4	a Sea-water environment, e.g.: – components in splash zone or submerged in sea water with one face exposed to air – components in saturated salt air (direct coast area)
	b Sea water environment with frost, e.g.: – components in splash zone or submerged in sea water with one face exposed to air – components in saturated salt air (direct coast area)
5 ⁽⁴⁾	a Slightly aggressive chemical environment (gas, liquid or solid)
	b Moderately aggressive chemical environment (gas, liquid or solid)
	c Highly aggressive chemical environment (gas, liquid or solid)

(2) In these cases, aerating admixtures should be used to reach an entrained air content of at least 4.5%.

(3) In the specific case of sulfates, the minimum cement content in bulk concrete should be raised to 250 kg/m³. Furthermore, both for bulk and reinforced concrete, the cement should be sulfate-resistant if the sulfate content is greater than or equal to 400 mg/l in the water, or 3000 mg/kg in the soil

(4) Class 5 may occur alone or in combination with the preceding environments; the classification of the aggressive environments referred in 5a, 5b or 5c is given in Table 4. Any of the parameters suffices in itself to be classified as a severe attack, regardless of whether or not the remaining parameters are aggressive.

TABLA Nº 2
PARÁMETROS DE DOSIFICACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIPO DE AMBIENTE (EH-91)

AMBIENTE	RELACIÓN MÁXIMA a/c	CONTENIDO MÍNIMO EN CEMENTO (kg/m ³)	
		Hormigón en masa	Hormigón armado
I	0.65	150	250
II	0.60	175	275
II h	0.55	175	300
II f (2)	0.50	200	300
III	0.55	200	300
III h	0.50	200	300
III f (2)	0.50	200	325
Químicamente agresivo (3)	0.50	200	325

No obstante, en la actualidad la clasificación de agresividad ambiental más consensuada en el ámbito de la construcción es la elaborada por el Grupo de Trabajo nº 20 del Comité Eurointernacional del Hormigón (CEB) "Durabilidad y vida de servicio de estructuras de hormigón", publicada en 1989 como Boletín nº 182 del CEB con el Título "Durable Concrete Structures. CEB Design Guide".

TABLA Nº 3
TIPOS DE EXPOSICIÓN (GUÍA CEB) PARA DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN DURABLES

TIPO DE EXPOSICIÓN	CONDICIONES AMBIENTALES
1	Ambiente seco, por ejemplo: - Interior de edificios de viviendas. - Exterior de edificios no expuestos al viento y a la intemperie o suelo o agua.
2	a Ambiente húmedo sin hielo, por ejemplo: - Interior de edificios donde la humedad es alta. - Elementos exteriores expuestos al viento y a la intemperie pero no expuestos a las heladas. - Elementos en suelos no agresivos y/o agua no expuestos a heladas.
	b Ambiente húmedo con hielo, por ejemplo: - Elementos exteriores expuestos al viento y a la intemperie o suelos no agresivos y/o agua y hielo.
3	Ambiente húmedo con hielo y agentes de deshielo, por ejemplo: - Elementos exteriores expuestos al viento y a la intemperie o suelos no agresivos y/o agua y hielo y sales de deshielo.
4	a Ambiente de agua de mar, por ejemplo: - Elementos en la zona de salpicadura o sumergidos en agua de mar con una cara expuesta al aire. - Elementos en áreas costeras con condensaciones.
	b Ambiente de agua de mar con hielo, por ejemplo: - Elementos en la zona de salpicaduras o sumergidos en agua de mar con una cara expuesta al aire. - Elementos en áreas costeras con condensaciones.
5 ⁽⁴⁾	a Ambiente químico ligeramente agresivo.
	b Ambiente químico moderadamente agresivo.
	c Ambiente químico altamente agresivo.

(2) En estos casos, deberán utilizarse aireantes, que produzcan un contenido de aire ocluido mayor o igual que el 4,5%.

(3) En el caso particular de existencia de sulfatos, el contenido mínimo en cementos de los hormigones en masa se elevará a 250 kg/m³. Además, tanto para hormigones en masa como para los armados, el cemento deberá ser resistente a los sulfatos si el contenido de sulfatos del agua es mayor o igual que 400 mg/l, o si en suelos es mayor o igual que 3000 mg/kg

(4) El ambiente tipo 5 puede presentarse sólo o en combinación con los tipos anteriores; la clasificación del ambiente agresivo como 5a, 5b o 5c se define en la Tabla nº 4. Cualquiera de los parámetros es suficiente por sí sólo para obtener la clasificación del grado de ataque más severo, independientemente de que los demás parámetros sean no agresivos.

TABLE No. 4
CHEMICAL PARAMETERS OF ASSESS THE DEGREE OF CHEMICAL ATTACK
BY WATERS AND SOILS DEFINING EXPOSURE CLASS 5 (CEB)

CHEMICAL AGGRESSIVITY PARAMETERS	EXPOSURE CLASS			
	5a	5b	5c	
	Weak attack	Moderate attack	Strong attack	Very strong attack
Water:				
- pH value (units)	6.5-5.5	5.5-4.5	4.5-4.0	< 4.0
- Aggressive CO ₂ (mg CO ₂ /l)	15-30	30-60	60-100	> 100
- Ammonium (mg NH ₄ ⁺ /l)	15-30	30-60	60-100	> 100
- Magnesium (mg Mg ²⁺ /l)	100-300	300-1500	1500-3000	> 3000
- Sulfate (mg SO ₄ ²⁻ /l)	200-600	600-3000	3000-6000	> 6000
Soil:				
- Degree of acidity according to Baumann-Gully	> 20	-	-	-
- Sulfate (mg SO ₄ ²⁻ /kg of dry soil)	2000-6000	6000-12000	12000	-

The following are the CEB Guide requirements for obtaining durable concrete in chemically aggressive and sea water environments.

TABLE No. 5
REQUIREMENTS TO OBTAIN DURABLE CONCRETE IN CHEMICALLY
AGGRESSIVE ENVIRONMENTS ⁽⁵⁾ (CEB)

Exposure class	4a	4b	5a			5b	5c	
Degree of attack	—	—	weak			mdrte	strong	very strong
- Type of cement	SRC ⁽⁶⁾	SRC ⁽⁶⁾	OPC ⁽⁷⁾	OPC ⁽⁷⁾	SRC ⁽⁶⁾	SRC ⁽⁶⁾	SRC ⁽⁶⁾	SRC ⁽⁶⁾
- Maximum W/C ratio	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45	0,45
- Minimum cement content (kg/m ³)	300	300	300	330	300	330	370	370
- Maximum water penetration (mm).....	30	30	50			30	50	Not applicable
- Additional protection of concrete	Not necessary							Necessary ⁽⁸⁾

Finally, it should be noted that in the last two years, the Standing Committee on Concrete has been working on a project to revise codes EH-91 and EH-93 (future code EHE), in which durability criteria are taken very particularly into account. For this reason, it is anticipated that shortly, when the EHE is published, the requisites listed at the beginning of this Section will be substantially enlarged, with a view to partial harmonisation with the parameters required on the CEB Design Guide or draft European standard pr ENV 206, which are essentially the same. Although other existing aggression classifications, such as the American Concrete Institute's (ACI) "Guide to durable concrete", are based on the kind of attack causing degradation (in lieu of the description of the environment to which the concrete is exposed), the criteria and recommendations established in each case lead to analogous requirements for concrete placement.

2.2. CONCRETE IN MARINE ENVIRONMENTS

The aggression caused by marine environments is primarily due to the salt dissolved in sea water, namely: sodium chloride, magnesium chloride, magnesium sulfate, calcium sulfate, calcium chloride, potassium chloride, potassium sulfate and calcium bicarbonate. Magnesium and sulfate salts are the most harmful agents for concrete subjected to the action of sea water, although the damage occasioned is caused by long-term action.

Generally speaking, it may be sustained that the relative proportion of the different kinds of salts dissolved in sea water remains constant, whereas the total concentration varies depending on geography. It should be noted that sea water consists primarily of chlorides, which account for 88-90% of the salt content and sulfates, which account for 8-10%.

⁽⁵⁾ When the sulfate content is > 400 mg/litre in the water or > 3000 mg/kg in the soil

⁽⁶⁾ Cements with special "SRC" characteristics, as classified in UNE 80303:1996 standard.

⁽⁷⁾ Common "OPC" type cement, as classified in UNE 80301: 1996 standard, meeting no special compositions requirements.

⁽⁸⁾ Examples of some such protection products are discussed in Section 5.

TABLA Nº 4
PARÁMETROS QUÍMICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA AGRESIVIDAD DE AGUAS Y SUELOS
QUE DEFINEN LOS NIVELES DE LA EXPOSICIÓN AMBIENTAL TIPO 5 (CEB)

PARÁMETROS QUÍMICOS DE AGRESIVIDAD	TIPO DE EXPOSICIÓN			
	5a	5b	5c	
	Ataque débil	Ataque moderado	Ataque fuerte	Ataque muy fuerte
Agua:				
- Valor del pH (uds.).....	6.5-5.5	5.5-4.5	4.5-4.0	< 4.0
- CO ₂ agresivo (mg CO ₂ /l)	15-30	30-60	60-100	> 100
- Ión amonio (mg NH ₄ ⁺ /l)	15-30	30-60	60-100	> 100
- Ión magnesio (mg Mg ²⁺ /l)	100-300	300-1500	1500-3000	> 3000
- Ión sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /l)	200-600	600-3000	3000-6000	> 6000
Suelo:				
- Grado de acidez según Baumann-Gully.....	> 20	-	-	-
- Ión sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /kg de suelo seco)	2000-6000	6000-12000	12000	-

A continuación se presentan los requisitos exigidos en la citada Guía del CEB para la obtención de hormigones durables en ambientes químicos agresivos y en agua de mar.

TABLA Nº 5
REQUISITOS PARA LA OBTENCIÓN DE HORMIGONES DURABLES
EN AMBIENTES QUÍMICOS AGRESIVOS ⁽⁵⁾ (CEB)

Tipos de exposición.....	4a	4b	5a			5b	5c	
	—	—	débil			medio	fuerte	muy fuerte
- Tipo de cemento.....	MR ⁽⁶⁾	MR ⁽⁶⁾	CEM ⁽⁷⁾	CEM ⁽⁷⁾	SR ⁽⁶⁾	SR ⁽⁶⁾	SR ⁽⁶⁾	SR ⁽⁶⁾
- Relación a/c máxima	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45	0,45
- Contenido mínimo de cemento (kg/m ³) ..	300	300	300	330	300	330	370	370
- Penetración de agua máxima (mm)	30	30	50			30	50	No procede
- Protección adicional del hormigón	No necesaria						Necesaria ⁽⁸⁾	

Por último conviene reseñar que, durante los últimos dos años, la Comisión Permanente del Hormigón ha procedido a la elaboración del proyecto de revisión de las Instrucciones EH-91 y EP-93 (futura Instrucción EHE) en el cual se tienen en cuenta de forma muy relevante los criterios de durabilidad, por lo que se debe considerar que en breve, con la próxima publicación de la EHE, los requisitos indicados al inicio de este Apartado serán ampliados de forma notoria, tendiendo hacia una armonización parcial con los parámetros exigidos en la Guía de Diseño del CEB o con los del proyecto de norma europea pr ENV 206, básicamente coincidentes. No obstante, existe en la actualidad otro tipo de clasificaciones de agresividad basadas en el tipo de ataque que produce la degradación (en lugar de la descripción del medio al que está expuesto el hormigón), como la publicada por el American Concrete Institute (ACI) "Guide to durable concrete", si bien los criterios y recomendaciones establecidos en cada caso conducen a exigencias análogas para la ejecución del hormigón.

2.2. EL HORMIGÓN EN AMBIENTE MARINO

La agresividad del ambiente marino se debe fundamentalmente a las sales que lleva disueltas el agua de mar, como son: cloruro sódico, cloruro magnésico, sulfato magnésico, sulfato cálcico, cloruro cálcico, cloruro potásico, sulfato potásico y bicarbonato cálcico. Para un hormigón sometido a la acción del agua de mar son perjudiciales, en primer lugar, las sales magnésicas y los sulfatos, si bien su acción se ejerce a largo plazo.

Es verdad que en general, en el agua de mar las proporciones relativas de sales disueltas se mantienen constantes, pero su concentración total en el agua varía en función de su localización geográfica. Debe observarse que las aguas de mar están formadas mayoritariamente por cloruros, en un 88-90 %, y por sulfatos, en un 8-10 %.

⁽⁵⁾ Cuando el contenido de sulfatos es en el agua > 400 mg/litro ó en suelos > 3000 mg/kg.

⁽⁶⁾ Cementos con características especiales "SR" o "MR", según UNE 80303:1996.

⁽⁷⁾ Cemento común "CEM", según UNE 80301:1996, sin requisitos especiales en su composición.

⁽⁸⁾ En el Apartado 5 se citan algunos de los productos de protección aplicables.

The salt content (g/l) in different seas is shown below:

Mediterranean Sea	38
Baltic Sea	7
North Sea.....	35
Atlantic Ocean.....	35
Black Sea.....	18
Dead Sea.....	53

In coastal areas where only small amounts of fresh water flow into the sea, the total salt concentration is greater than in the oceans due to evaporation. By contrast, coasts with ample river flow have a lower salt concentration, whereby the impact of environmental aggression in these areas (brackish water) differs.

Brackish water corrodes concrete and steel intensely due to its high CO₂ content and low pH. Sea water, on the contrary, contains relatively small amounts of aggressive CO₂ and its pH is at least 8. Moreover, the amount of substances dissolved in the water along the coast also differs with depth. For these reasons, studies must be conducted on a case-by-case basis: thus, for instance, proportioning that has yielded optimum results in maritime structures in the Atlantic Ocean has been known to perform poorly in the Baltic Sea.

Figure 1 provides a comparison of ion composition in the Baltic Sea, North Sea and the Atlantic Ocean.

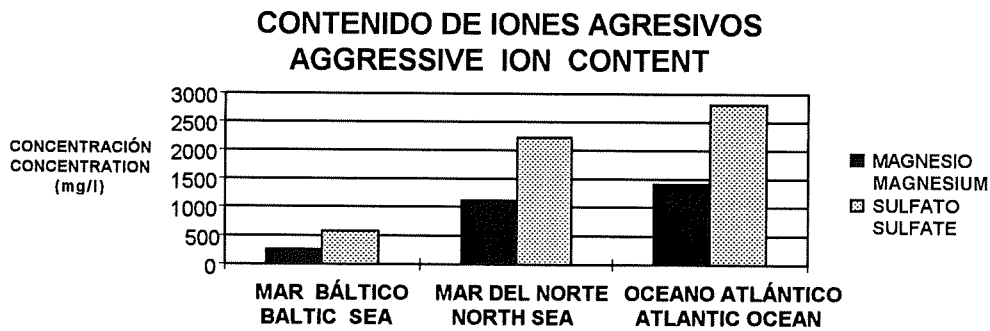


Figure 1

Marine environment aggression is broken down into two totally different kinds of attack, one relating to concrete degradation from aggressive salts and the other to corrosion processes fostered by high relative humidity and primarily to the existence of chlorides. Although the subject of this Review is the former, Figure 2 shows how the two degradation phenomena are interrelated with respect to the different zones of marine environment influence. According to this, the various kinds of exposure to which a concrete member may be subjected, in terms of its location in the marine environment, are as follows ⁽⁹⁾:

- Atmospheric zone*: area in which the structure, although not in contact with the water, is subject to the high salt concentration in the water vapour-saturated coastal air, due to which saline deposits may form in areas of the structure exposed to moistening-drying cycles. Even though salt concentration is inversely related to the distance from the sea and altitude, depending on the speed and direction of the prevailing winds such saline deposits may be observed several kilometres inland. The damage caused by this kind of aggression is due to ion chloride corrosion of reinforcing steel.
- Splash zone*: area directly impacted by the sea due to spray from waves. The most significant damage is due to ion chloride-related pitting and fetch.
- Tidal range zone*: area delimited by the low and high tide marks, so the concrete may be nearly permanently saturated (depending on climate) and accumulate salt. The most common kinds of deterioration are caused by aggressive salts (chemical action), chlorides (reinforcement corrosion), wave action, sand and other suspended substances (abrasion) and micro-organisms (biological incrustations).
- Submerged zone*: area below sea level and, therefore, continually covered by sea water. The most significant damage is caused by the chemical attack of aggressive salts and micro-organisms fostering the development of biological incrustations which, in extreme cases, may give rise to biological corrosion of the reinforcing steel.
- Seabed zone*: part of the structure buried in the sea bed. The kind of degradation is similar to that described for the zone underwater, although more extensive.

⁽⁹⁾ The effect of frost is not considered, given the climate prevailing on the Mainland, Balearic Isles and Canary Islands.

El contenido total de sales (g/l) en el agua de diferentes mares es el siguiente:

En el Mar Mediterráneo	38
En el Mar Báltico.....	7
En el Mar del Norte	35
En el Océano Atlántico	35
En el Mar Negro	18
En el Mar Muerto.....	53

En zonas costeras que reciben un reducido aporte de agua dulce se observa una mayor concentración total de sales que en los océanos, por fenómenos de mayor evaporación. En cambio, las costas que reciben un gran caudal de los ríos que afluyen presentan menor concentración de sales, por lo que el nivel de agresividad ambiental en estas áreas (aguas salobres) es diferente.

El agua salobre corroe intensamente el hormigón y el acero, debido a su alto contenido de CO₂ y bajo pH. Por el contrario, el agua de mar contiene una cantidad relativamente pequeña de CO₂ agresivo, y su pH es igual o superior a 8. También pueden observarse a lo largo de la costa y a distintas profundidades, notables diferencias en las cantidades de sustancias disueltas en el agua. Por ello, en cada caso, es necesario llevar a cabo un estudio particular, dado que las dosificaciones que han dado resultados óptimos en estructuras marítimas en el Océano Atlántico han manifestado un comportamiento deficiente en el Mar Báltico.

En la Figura nº 1 se presenta comparativamente la composición de iones del Mar Báltico en relación a la del Mar del Norte y Océano Atlántico.

La agresividad del ambiente marino se debe dividir en dos tipologías de ataque totalmente diferenciadas, una relativa a la degradación del hormigón por la acción de las sales agresivas y otra a los procesos de corrosión facilitados por la elevada humedad ambiental y, fundamentalmente, por el aporte de cloruros. Aunque este Cuaderno tiene por objeto el estudio de la primera tipología citada, en la Figura nº 2 se expone cómo se interrelacionan ambos fenómenos de degradación en lo referente a las distintas zonas de influencia del ambiente marino. Según esto, los distintos tipos de exposición a que puede verse sometido un elemento de hormigón en función de su localización en el ambiente marino son los siguientes ⁽⁹⁾:

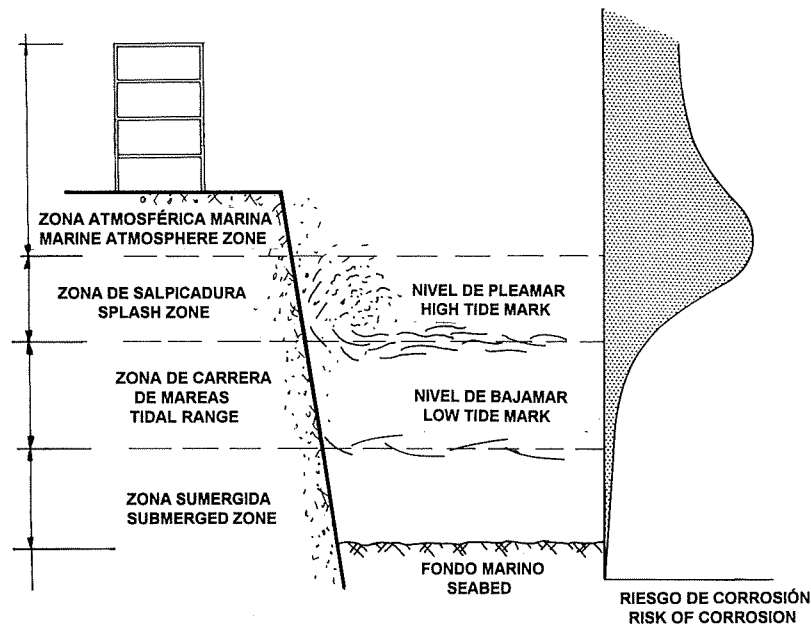


Figura 2

- a) *Zona atmosférica:* Es aquella en la que la estructura recibe, aún a pesar de no estar en contacto con el agua, un aporte elevado de sales, originado por el nivel de saturación de vapor de agua que presenta el aire en zonas costeras, capaz de producir depósitos salinos en zonas de la estructura donde se producen ciclos de humectación y secado. El nivel de sales va disminuyendo en función de la distancia al mar y de la altura, si bien según la velocidad y la dirección de los vientos dominantes este efecto puede llegar a reproducirse varios kilómetros tierra adentro. Los daños que pueden manifestarse en esa zona son los ocasionados por la corrosión de armaduras por acción de los iones cloruro.

⁽⁹⁾ No se considera la acción de las heladas por la climatología habitual de la Península, Baleares y Canarias.

The variation in the risk of corrosion of the reinforcing steel is illustrated in Figure 2, which shows that the highest risk is recorded in the splash zone, followed by the atmospheric zone; in the latter, however, the likelihood of corrosion declines with the altitude of the structure above sea level or its distance from the coastline (American Concrete Institute recommendations, for instance, allow proportioning with higher W/C ratios when the structure is over eight metres above sea level or more than thirty metres inland from the coastline).

3. DETERIORATION MECHANISMS

The process whereby concrete is destroyed due to the action of sea water entails a number of different more or less simultaneous reactions. The validity of this statement is apparent considering that sea water contains chlorides and sulfates, bound to both alkalis and magnesium which also absorb carbon dioxide from the atmosphere. Continual wave movement must not be disregarded, since it reinforces sea water attacks, tending to tear away soft or loose bits of concrete and expose new areas to the chemical action of the water.

According to most research, concrete degradation due to aggressive marine agents may act in any of the following ways:

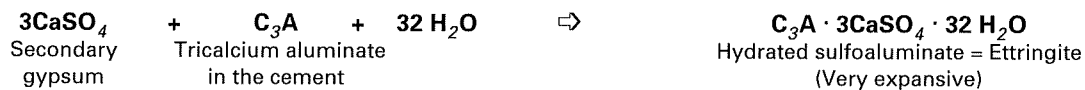
- Deterioration due to leaching or lixiviation, i.e., to the dissolution of the lime released by cement hydration and hydrolysis of the silicates with the highest calcium content.
- Degradation processes due to the formation of readily soluble products as a result of the interchange between cement ingredients and magnesium salts in the water.
- Degradation due to the formation of expansive components that may result from the reaction of certain ingredients of hydrated cement (calcium aluminates) with sea water sulfates.

Considering each of these degradation mechanisms separately, it would be assumed that sea water is an agent with such a high aggression potential that it would be virtually impossible to use Portland cement without additives for maritime works. And yet experience has shown that the simultaneous action of different kinds of ions substantially reduces the degree of deterioration that each of these agents would cause individually.

This phenomenon is readily explained by the combined impact of chloride ions and high sulfate concentrations. Chloride ions inhibit or mitigate the action of sulfates to some degree because they can react with the calcium aluminates in the cement (substrate susceptible to deterioration by sulfates), giving rise to hydrated calcium chloroaluminate (Friedel's salt), which is not expansive or at least not as expansive as ettringite (final product of the reaction between tricalcium aluminate and sulfates). The aluminate that reacts with chlorides is blocked, then, by the formation of Friedel's salt, curbing the production of the much more expansive ettringite and thereby reducing the expansion potential considerably.



- In the absence of chlorides (gypsum-bearing water): the secondary gypsum can evolve if there are no chlorides in the medium to react with the C₃A in the cement.



- In the presence of chlorides (sea water): the latter react with the C₃A in the cement, curbing the aluminate-gypsum reaction.



Nonetheless, if the clinker contains large quantities of tricalcium aluminate, under conditions of high saturation the chloride ions in the sea water cannot impede the formation of hydrated calcium sulfoaluminate (ettringite). It is for this reason that cement with a low tricalcium aluminate content is recommended for concrete intended for marine environments.

⁽¹⁰⁾ It may also be the result of the reaction of magnesium chloride in the sea water with portlandite in the cement, occasioning leaching and generating CaCl₂ y Mg(OH)₂.

- b) *Zona de salpicaduras*: Es el área donde se produce una acción directa del mar, a causa del oleaje y de las salpicaduras. Los daños más significativos son producidos por corrosión por picaduras debido a los iones cloruro y a la erosión, por el oleaje.
- c) *Zona de carrera de mareas*: Está limitada por los niveles mínimo y máximo alcanzados por las mareas, por lo que el hormigón puede estar saturado de forma casi permanente (en función de las condiciones climatológicas) y con una acumulación creciente de sales. Las tipologías de deterioro habituales son las ocasionadas por las sales agresivas (ataque químico), cloruros (corrosión de armaduras), oleaje, arena y otras sustancias en suspensión (abrasión) y microorganismos (incrustaciones biológicas).
- d) *Zona sumergida*: Es la que está por debajo del nivel de la marea baja y, por tanto, en régimen de inmersión permanente. Los daños más significativos son producidos por el ataque químico de las sales agresivas y por los microorganismos que favorecen el desarrollo de las incrustaciones biológicas y que en casos extremos pueden dar lugar a procesos de corrosión biológica sobre las armaduras.
- e) *Zona de lecho marino*: Es la parte de la estructura enterrada en el lecho marino. El tipo de degradación es análogo al de las zonas sumergidas, aunque en menor extensión.

La variación del riesgo de corrosión de las armaduras se ha ilustrado en la Figura nº 2, donde se observa que el riesgo es máximo en la zona de salpicaduras, y elevado en la zona atmosférica, si bien en ésta se produce una disminución de la probabilidad de corrosión con la altura de la estructura sobre el nivel del mar o con la distancia a partir de la línea de costa (por ejemplo, las recomendaciones del American Concrete Institute (ACI) permiten el empleo de dosificaciones con mayor relación a/c cuando la estructura se sitúa a más de ocho metros por encima del nivel de mar, o a más de treinta metros en horizontal a partir de la franja costera).

3. MECANISMOS DE DEGRADACIÓN

El proceso de destrucción del hormigón debido a los ataques del agua de mar está constituido por una gran cantidad de reacciones diferentes, más o menos simultáneas. La validez de esta afirmación se reconoce si se considera que el agua de mar contiene cloruros y sulfatos, unidos tanto a los álcalis como al magnesio, y que, además, también absorbe el anhídrido carbónico de la atmósfera. El hecho de que las aguas de mar se encuentren sometidas a un movimiento perpetuo debe también tenerse en cuenta, pues cada uno de sus ataques al hormigón va reforzado por la acción del oleaje, que tiende a arrancar los trozos reblandecidos o disgregados de hormigón atacado, exponiendo a la acción química de las aguas las nuevas partes que quedan al descubierto.

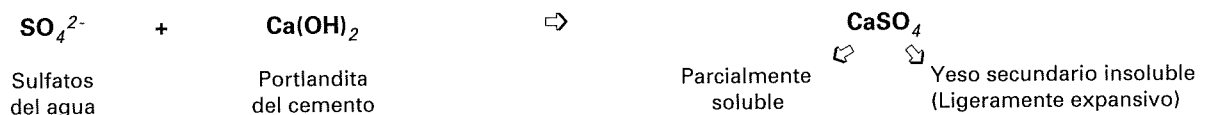
Según la mayoría de las investigaciones la degradación del hormigón por agentes agresivos marinos puede tener las siguientes formas de actuación:

- a) Deterioro por "deslavado" o lixiviación, esto es por la disolución de la cal liberada por la hidratación del cemento y por la hidrólisis de los silicatos más ricos en calcio.
- b) Procesos de degradación por la formación de productos fácilmente solubles mediante intercambios entre los componentes del cemento y las sales magnésicas del agua.
- c) Degradación por la formación de componentes expansivos que pueden formarse por reacción de algunos componentes del cemento hidratado (aluminatos cálcicos) con los sulfatos del agua de mar.

Considerando estos tres mecanismos de degradación de forma independiente, debería suponerse que el agua de mar es un agente con un grado potencial de agresividad tan elevado, que prácticamente imposibilitaría el empleo del cemento portland sin adiciones en la ejecución de obras marítimas. Sin embargo, la experiencia ha puesto de manifiesto que la presencia simultánea de otro tipo de iones en disolución hace que el nivel de deterioro al que darían lugar de forma independiente estos agentes agresivos quede reducido sustancialmente.

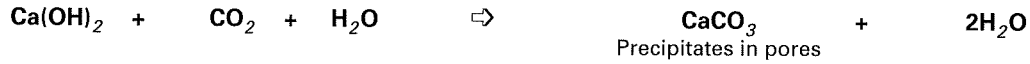
Para entender este fenómeno es conveniente considerar el efecto de la presencia de iones cloruro conjuntamente a la concentración de sulfatos. Los iones cloruro inhiben o atenúan en cierta medida la acción de los sulfatos, ya que son capaces de reaccionar con los aluminatos cálcicos del cemento (sustrato susceptible de deterioro por el ataque de los sulfatos), dando lugar a un cloroaluminato de calcio hidratado (sal de Friedel), que no es expansivo, o no lo es en la misma medida que la ettringita (producto final de la reacción entre el aluminato tricálcico y los sulfatos). Por lo tanto, el aluminato que reacciona con los cloruros queda bloqueado por formación de la sal de Friedel, e impedido para formar ettringita, mucho más expansiva, con lo cual la potencialidad de la expansión queda muy reducida.

Acción de los sulfatos:

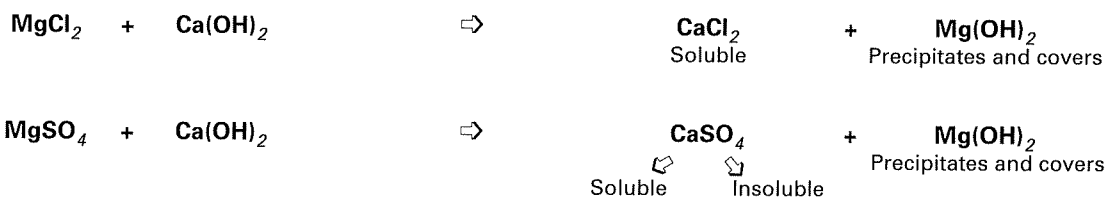


Although this kind of degradation is the most harmful, different kinds of alterations arise depending on how deeply the agents penetrate into the concrete (see Figure 3).

With respect to the effect of the action of carbon dioxide dissolved in the water on the outside surface of the concrete (zone A) (aggressive carbonic acid in brackish water), it should be stressed, on the one hand, that the greater the depth, the lower the proportion of dissolved gas, substantially lessening the impact on members under the low tide mark, and on the other, that when the calcium hydroxide dissolved in the pores becomes carbonated, it gives rise to a more impermeable barrier, obstructing the hydrolysis of calcium silicates. The chemical reaction would be as follows:



In the strip inside the member (zone B) adjacent to the carbonated layer, the magnesium salts (chlorides and sulfates) react with portlandite (calcium hydroxide released by the cement during hydration), giving rise to soluble calcium chloride or calcium sulfate (secondary, insoluble gypsum), respectively.



Consequently, interchange reactions take place in this strip. The reaction products obtained from magnesium sulfate (soluble CaSO_4) and magnesium chloride (CaCl_2) seep outside the member and the rest are deposited in the concrete pores and cracks, forming a milky white mass.



Fotografía nº 1: Análisis por microscopía electrónica (sección fotografiada=0,08 x 0,12 mm). Cristales de cloruro magnésico y ettringita en los poros del hormigón de una tubería sumergida en zona costera

Photograph No. 1: Electronic microscope analysis (section photographed = 0.8 x 0.12 mm). Magnesium chloride and ettringite crystals in an underwater concrete pipe laid near the coast.

The remaining sulfates and those that do not combine with magnesium continue to seep in and form a third strip (zone C) in which expansion takes place only if the cement has a high tricalcium aluminate content and the chloride ions have been unable to prevent the formation of hydrated calcium sulfoaluminate. It should be borne in mind that in both zone B, where magnesium interchange reactions occur, and in the boundary between it and zone C, the presence of magnesium salts leads to the formation of gypsum only, and not ettringite.

- a) En ausencia de cloruros (agua yesífera): El yeso secundario puede evolucionar si no hay cloruros en el medio, reaccionando con el C_3A del cemento.



- b) En presencia de cloruros (agua de mar): Éstos reaccionan con el C_3A del cemento, relegando la reacción entre éste y el yeso.



No obstante, si el clínker contiene gran cantidad de aluminato tricálcico y el grado de saturación es elevado, los cloruros existentes en el agua de mar no pueden evitar la formación del sulfoaluminato cálcico hidratado (ettringita). Por ello se recomienda para la ejecución de hormigones en ambiente marino el empleo de cementos con bajo contenido de aluminato tricálcico.

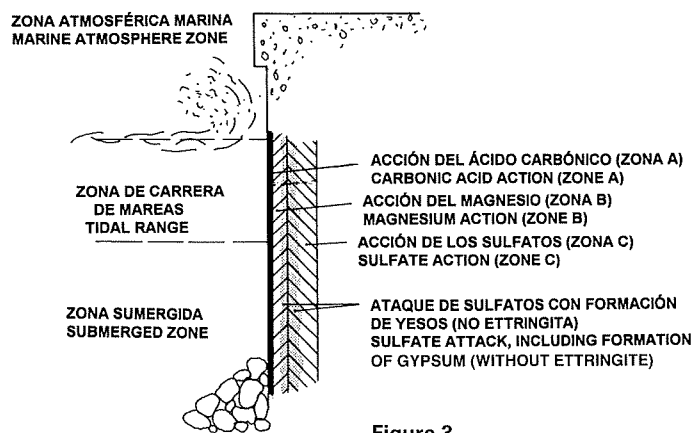
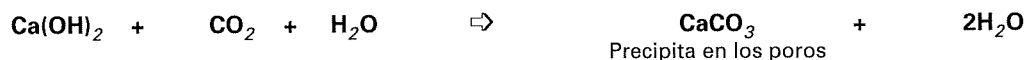


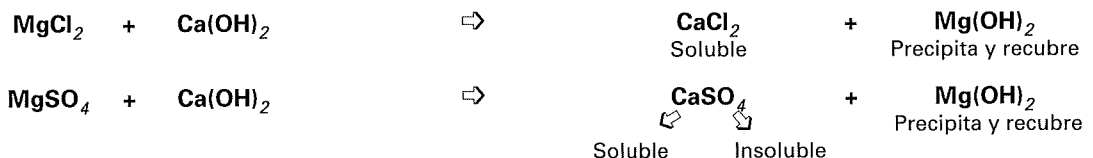
Figure 3

Aunque esta forma de degradación es la más dañina, se producen distintas tipologías de alteración a medida que los agentes profundizan en el hormigón (véase Figura nº 3).

En relación al efecto producido en la superficie exterior del hormigón (zona A) por la acción del anhídrido carbónico disuelto en el agua (ácido carbónico agresivo, en aguas salobres), conviene reseñar, por un lado, que a medida que la profundidad aumenta, la proporción de gases disueltos se reduce sustancialmente, por lo que el efecto es muy reducido en cuanto el elemento queda sumergido por debajo del nivel de bajamar, y por otro, que al carbonatarse el hidróxido cálcico disuelto en los poros, se obtiene una barrera más impermeable, lo cual dificulta la hidrólisis de los silicatos cálcicos. El proceso desarrollado sería:



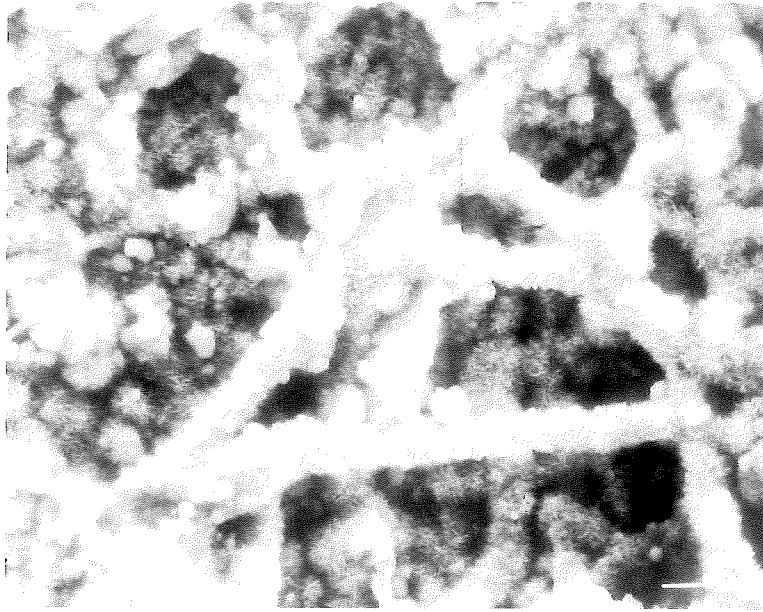
En la franja interior adyacente a la capa carbonatada (zona B), las sales de magnesio (cloruros y sulfatos) reaccionan con la portlandita (hidróxido cálcico liberado por el cemento durante su hidratación) dando lugar a cloruro cálcico soluble, o sulfato cálcico (yeso secundario, insoluble) respectivamente.



En esa franja se producen por tanto reacciones de intercambio. Los productos de reacción obtenidos a partir del sulfato magnésico ($CaSO_4$ soluble) y del cloruro magnésico ($CaCl_2$), afloran hacia el exterior y el resto se depositan en los poros y fisuras del hormigón, formando una masa blanca y lechosa.

Los sulfatos sobrantes y los no combinados con el magnesio continúan introduciéndose y forman una tercera franja (zona C), con procesos de expansión, que tienen lugar sólo en el caso de que el cemento presente un contenido

⁽¹⁰⁾ También puede proceder de la reacción del cloruro magnésico del agua marina con la portlandita del cemento, produciendo su deslavado, y generando $CaCl_2$ y $Mg(OH)_2$.



Fotografía nº 2: Análisis por microscopía electrónica (sección fotografiada=0,16 x 0,24 mm). Crecimientos bacterianos (corrosión biológica, por bacterias reductoras de sulfatos) cubiertos por cristales de sulfuro ferroso en los restos de las armaduras de una tubería sumergida en zona costera.

Photograph No. 2: Electronic microscope analysis (section photographed = 0.16 x 0.24 mm). Bacterial growth (biological corrosion from sulfate-reducing bacteria) covered by ferrous sulfide in remains of reinforcing steel from an underwater concrete pipe laid near the coast.

Nonetheless, the water released from the carbonic acid, magnesium salts and sulfates continues to seep into the concrete, where leaching occurs due to equilibrium between such water and the aqueous phase of the pores.

The boundaries between these zones are not permanent, but vary as concrete destruction advances inward, although their relative positions remain unchanged.

The explanation to why sulfoaluminate crystals so seldom appear in concrete, even under conditions that would seem to favour their formation lies in the distribution of these zones. Calcium sulfoaluminate crystals are known to disintegrate relatively readily in a magnesium salt solution, which forms as soon as the magnesium degradation zone moves in the direction of the sulfate corrosion zone. This takes place when the diffusion of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ from the inner layers of the concrete declines, allowing sea water with a high magnesium salt concentration to seep into the new inner zone of the concrete.

It should also be noted that physical factors, in particular concrete homogeneity, closeness and impermeability can hasten or curb corrosion as much or more than the cement's resistance to aggressive agents.

4. CRITERIA FOR SELECTING CEMENT FOR MARINE ENVIRONMENTS

4.1. CEMENT CLASSIFICATION BY COMPOSITION

The Commission for the European Communities, on the basis of criteria agreed among the countries signing the Single Act in 1992, prepared a directive on building materials which lays down the criteria for standardising and certifying products, cement amongst them.

Since then the various countries of what is now the European Union (EU) have been trying to bring their national standards more or less into line with experimental European standard ENV 197-1:1992 for future compliance with European Commission mandates (harmonised standards).

As a result of the work conducted in this regard, at the request of various Spanish governmental bodies, UNE cement standards, convergent with ENV 197-1, were drawn up in 1996; on the basis of these standards, the present Cement Acceptance Code (RC-97) was formulated and adopted by Royal Decree 776/1997 on 30 May.

The above code amended the previous classification of cement resistance, as set out in the following table:

elevado en aluminato tricálcico y el cloruro no haya sido capaz de evitar la formación del sulfoaluminato cálcico hidratado. Debe tenerse en cuenta que tanto en la zona B, de reacciones de intercambio del magnesio, como en el límite de ésta con la zona C, la presencia de sales magnésicas hace que sólo se forme yeso y no ettringita.

No obstante, el agua liberada ya del ácido carbónico, de las sales magnésicas y de los sulfatos, continúa penetrando en el interior del hormigón, en el que por su equilibrio con la fase acuosa de los poros, produce un proceso de lixiviación.

Los límites de estas zonas no permanecen fijos, sino que varían constantemente al progresar la destrucción del hormigón, desplazándose hacia el interior, pero manteniendo su orden relativo.

La distribución de las zonas citadas explica por qué los cristales de sulfoaluminato aparecen con tan poca frecuencia en el hormigón, incluso en circunstancias que parecen propicias para su formación. Como se sabe, los cristales de sulfoaluminato cálcico se destruyen con relativa rapidez en una solución de sales magnésicas, lo cual sucede tan pronto como la zona de degradación por magnesio se desplaza en la dirección de la corrosión sulfática. Esto ocurre cuando disminuye la difusión del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ procedente de las capas internas del hormigón, penetrando el agua de mar, cargada de sales magnésicas, en la parte interna del hormigón.

Debe indicarse, además, que también factores físicos, especialmente la homogeneidad, la compacidad e impermeabilidad del hormigón influyen acelerando o frenando en el tiempo la marcha de los fenómenos de la corrosión, tanto o más que la resistencia del cemento a los agentes agresivos.

4. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE CEMENTOS PARA AMBIENTE MARINO

4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS POR SU COMPOSICIÓN

La Comisión de la Comunidad Europea preparó, en base a los criterios establecidos entre los países firmantes del Acta Única en 1992, la Directiva sobre Productos de la Construcción, en la cual se fijan los criterios para la normalización y la certificación de productos, entre ellos el cemento.

Desde entonces los distintos países de la actual Unión Europea (UE) fueron tratando de aproximar, más o menos, sus normas nacionales a la norma europea experimental ENV 197-1:1992, para el futuro cumplimiento de los mandatos de la Comisión Europea (normas armonizadas).

Como resultado de los trabajos desarrollados a tal efecto, a instancias de los organismos componentes de la Administración española, han visto la luz en 1996 las normas UNE para cementos, consensuadas con la ENV 197-1 y a partir de éstas ha sido elaborada la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-97), aprobada por Real Decreto 776/1997 de 30 de mayo.

Esta Instrucción modificó las tipologías y categorías resistentes de los cementos, según se describe en la Tabla nº 6.

4.2. CEMENTOS ESPECIALES PARA AMBIENTES AGRESIVOS

En el caso concreto de la clasificación de cementos para empleo en obras marítimas, hay que contemplar las características especiales descritas en la Norma UNE 80303:1996.

Los cementos resistentes a sulfatos (SR) y al agua de mar (MR) pueden ser los de todos los tipos, subtipos y variantes, incluidos en la norma UNE 80301:1996, si su clínker cumple ciertas condiciones de composición, en cuanto a límites porcentuales de C_3A y $\text{C}_3\text{A}+\text{C}_4\text{AF}$, salvo en el caso del cemento CEM III/B, el cual es, por sí mismo, siempre resistente a ambos medios agresivos. En cuanto a los demás, las condiciones son las señaladas en la Tabla nº 7.

En aquellos cementos de la Tabla nº 7 que contengan materiales puzolánicos (puzolanas y/o cenizas volantes) como componentes principales (en proporción superior al 5 %), estos materiales deberán cumplir las siguientes condiciones, además de las que les impone la norma UNE 80301:1996.

- La relación $\text{SiO}_2/(\text{CaO} + \text{MgO})$ deberá ser superior a 3,5 donde CaO es el óxido de calcio reactivo.
- El material, molido a finura equivalente a la del cemento de referencia (I 42,5 R/SR) y mezclado con éste en proporción porcentual cemento/material igual a 75/25, deberá cumplir el ensayo de puzolanicidad (UNE-EN 196-5) a la edad de 7 días.
- Esta misma mezcla 75/25 deberá dar una resistencia a compresión a la edad de 28 días (UNE-EN 196-1), igual o superior al 80 % de la resistencia del cemento de referencia a dicha edad.

A la vista de lo indicado en la Tabla nº 7, queda patente que los requisitos aplicables a los cementos resistentes al agua de mar son menos exigentes que los requeridos a los cementos resistentes a sulfatos, como era lógico, a la vista de las consideraciones expuestas en el Apartado nº 3, donde se describía la reducción de agresividad de los sulfatos cuando existe un elevado contenido de cloruros, y también debido a que el contenido total de sulfatos en agua de mar presenta un límite superior muy por debajo del que pueden llegar a alcanzar las aguas yesíferas (por ejemplo, por concentración del nivel freático en épocas de sequía).

**TABLE No. 6
KINDS AND COMPOSITION OF CEMENT ⁽¹¹⁾**

KIND OF CEMENT	DESIGNATION	NOTATION	CLINKER K	BLAST FURNACE SLAG S	SILICA FUME D ⁽¹²⁾	NATURAL POZZOLANS P	FLY ASH V	LIME- STONE L	MINOR ADDITIONAL CONSTITUENTS ⁽¹³⁾
CEM I	Portland cement	CEM I	95 - 100	-	-	-	-	-	0 - 5
CEM II	Portland-slag cement	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	-	-	-	-	0 - 5
	Portland-silica fume cement	CEM II/A-D	90 - 94	-	6 - 10	-	-	-	0 - 5
	Portland-pozzolan cement	CEM II/A-P	80 - 94	-	-	6 - 20	-	-	0 - 5
		CEM II/B-P	65 - 79	-	-	21 - 35	-	-	0 - 5
	Portland-fly ash cement	CEM II/A-V	80 - 94	-	-	-	6 - 20	-	0 - 5
		CEM II/B-V	65 - 79	-	-	-	21 - 35	-	0 - 5
	Portland-limestone cement	CEM II/A-L	80 - 94	-	-	-	-	6 - 20	0 - 5
Portland-composite cement ⁽¹⁵⁾	CEM II/A-M	80 - 94	6 - 20 ⁽¹⁴⁾						
	CEM II/B-M	65 - 79	21 - 35 ⁽¹⁴⁾ ⁽¹⁶⁾						
CEM III	Blast furnace cement	CEM III/A	35 - 64	36 - 65	-	-	-	-	0 - 5
		CEM III/B	20 - 34	66 - 80	-	-	-	-	0 - 5
CEM IV	Pozzolan cement	CEM IV/A	65 - 89	-	11 - 35			-	0 - 5
		CEM IV/B	45 - 64	-	36 - 55			-	0 - 5
CEM V	Composite cement	CEM V/A	40 - 64	18 - 30	-	18 - 30		-	0 - 5

**TABLE No. 7
REQUISITES FOR SR AND MR CEMENTS**

TYPE	SULFATE AND SEA WATER RESISTANT "SR"		SEA WATER RESISTANT "MR"	
	C ₃ A %	C ₃ A % + C ₄ AF %	C ₃ A %	C ₃ A % + C ₄ AF %
CEM I	≤ 5.0	≤ 22.0	≤ 5.0	≤ 22.0
CEM II/A-S	≤ 6.0	≤ 22.0	≤ 8.0	≤ 25.0
CEM II/B-S				
CEM II/A-D				
CEM II/A-P				
CEM II/B-P				
CEM II/A-V				
CEM II/B-V				
CEM III/A	≤ 8.0	≤ 25.0	≤ 10.0	≤ 25.0
CEM III/B	Always resistant		Always resistant	
CEM IV/A	≤ 6.0	≤ 22.0	≤ 8.0	≤ 25.0
CEM IV/B	≤ 8.0	≤ 25.0	≤ 10.0	≤ 25.0
CEM V/A	≤ 8.0	≤ 25.0	≤ 10.0	≤ 25.0

NOTE: The C₃A and C₃A + C₄AF specifications refer to clinker and C₄AF contents are calculated (UNE standard 80304:1 1986) on the basis of analyses conducted pursuant to standard UNE-EN 196-2:1996.

4.2. SPECIAL CEMENTS FOR AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

For a more specific classification of cements recommended for use in maritime works, the special characteristics laid out in UNE standard 80303:1996 must be considered.

⁽¹¹⁾ The figures in the table refer to the cement core excluding calcium sulfate and any other additive. They represent %, in mass.

⁽¹²⁾ The proportion of silica fume may not exceed 10%.

⁽¹³⁾ The additional minority constituents may be filler or one or more of the major constituents unless already included as such in the cement.

⁽¹⁴⁾ The proportion of filler may not exceed 5%.

⁽¹⁵⁾ When some blended Portland cement, because of its composition, may be included in type II above, it should bear the denomination and designation corresponding to that type.

⁽¹⁶⁾ The proportion of limestone may not exceed 20%.



Fotografía nº 3: Degradación química del hormigón y de las armaduras en zona portuaria.

Photograph No. 3: Chemical deterioration of concrete and reinforcements in a port zone.



Fotografía nº 4: Daños por ataque químico al hormigón y posterior corrosión de armaduras en el tramo final de un emisario que desemboca en la dársena de un puerto.

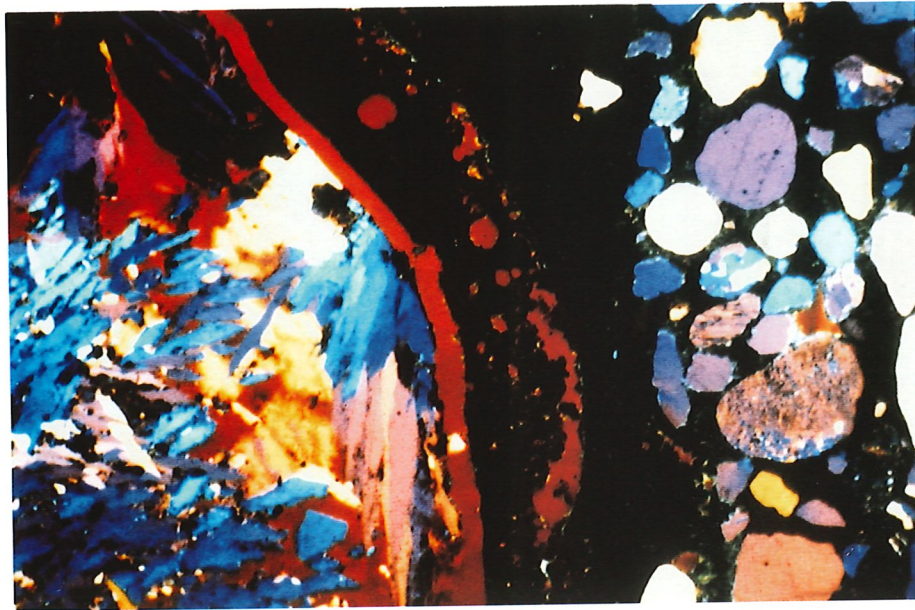
Photograph No. 4: Damage due to chemical attack on concrete and subsequent corrosion of reinforcing steel in the end run of a discharge cutlet flowing into the inner harbour of a port.



Fotografía n° 5: Detalle de los daños que presenta el hormigón armado del emisario.
Photograph No. 5: Detail of the damage to the reinforced concrete outlet.



Fotografía n° 6: Daños por lixiviación (deslavado) del hormigón y corrosión en la cara inferior del tablero de un muelle.
Photograph No. 6: Lixiviation (leaching) damage to concrete and corrosion on the under side of a pier deck.



Fotografía nº 7: Análisis por microscopía de polarización en lámina delgada (1,1 x 1,7 mm). Formaciones de yeso insoluble (alineaciones azuladas, de morfología acicular) en los poros de un hormigón expuesto en la zona de carrera de mareas de un dique.

Photograph No. 7: Thin sheet (1.1 x 1.7 mm) polarising microscopy analysis. Insoluble gypsum formations (bluish, needle-shaped streaks) in the pores of exposed concrete in a tidal range seawall.



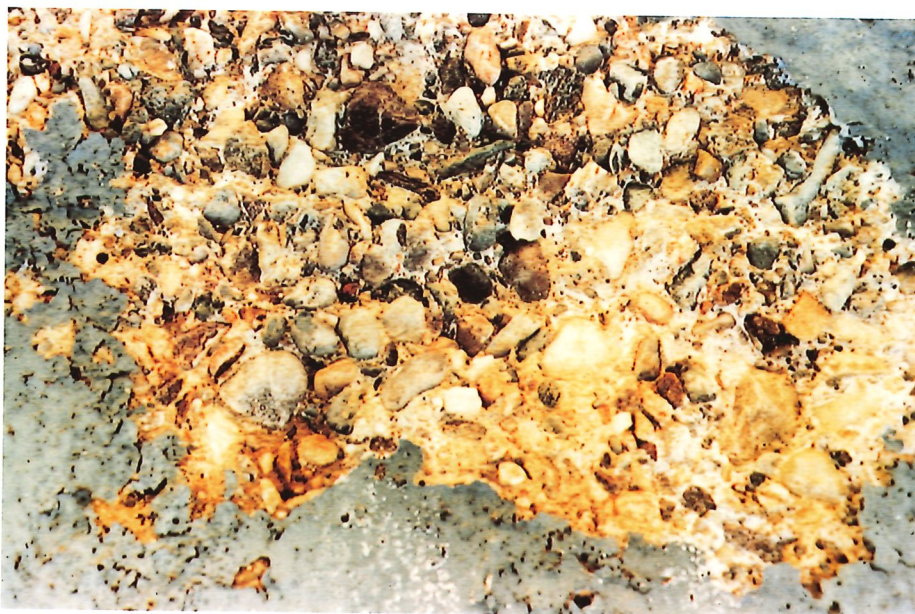
Fotografía nº 8: Detalle de un pilar de la estructura de una lonja de pescado, que presenta daños por degradación química y por corrosión de armaduras únicamente en su base, originados por la limpieza de la solera con agua de mar a presión.

Photograph No. 8: Detail of a foundation pillar in a fish market, showing damage due to chemical degradation and reinforcement corrosion at the base only, caused by the pressure seawater used to clean the floor.



Fotografía n° 9: Detalle de un pilar de la estructura de una estación depuradora de aguas salobres, deteriorado por la acción del sulfato magnésico.

Photograph No. 9: Detail of a foundation pillar in a brackish water purifying station, deteriorated due to magnesium sulfate action.



Fotografía n° 10: Degradación superficial (por formación de ettringita) del hormigón de las zapatas de un depósito de gas licuado en zona costera.

Photograph No. 10: Surface degradation (due to ettringite formation) of concrete in the footing of a coastal liquefied gas.

TABLA Nº 6
TIPOS DE CEMENTOS Y COMPOSICIONES (11)

TIPO DE CEMENTO	DENOMINACIÓN	DESIGNACIÓN	CLINKER K	ESCORIA DE ALTO HORNO S	HUMO DE SÍLICE D ⁽¹²⁾	PUZOLANAS NATURALES P	CENIZAS VOLANTES V	CALIZA L	COMPONENTES MINORITARIOS ADICIONALES ⁽¹³⁾
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95 - 100	-	-	-	-	-	0 - 5
CEM II	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	-	-	-	-	0 - 5
	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	90 - 94	-	6 - 10	-	-	-	0 - 5
	Cemento Portland con puzolana	CEM II/A-P	80 - 94	-	-	6 - 20	-	-	0 - 5
		CEM II/B-P	65 - 79	-	-	21 - 35	-	-	0 - 5
	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II/A-V	80 - 94	-	-	-	6 - 20	-	0 - 5
		CEM II/B-V	65 - 79	-	-	-	21 - 35	-	0 - 5
	Cemento Portland con caliza	CEM II/A-L	80 - 94	-	-	-	-	6 - 20	0 - 5
Cemento Portland mixto ⁽¹⁵⁾	CEM II/A-M	80 - 94	6 - 20 ⁽¹⁴⁾						
	CEM II/B-M	65 - 79	21 - 35 ⁽¹⁴⁾ ⁽¹⁶⁾						
CEM III	Cemento de horno alto	CEM III/A	35 - 64	36 - 65	-	-	-	-	0 - 5
		CEM III/B	20 - 34	66 - 80	-	-	-	-	0 - 5
CEM IV	Cemento puzolánico	CEM IV/A	65 - 89	-	11 - 35			-	0 - 5
		CEM IV/B	45 - 64	-	36 - 55			-	0 - 5
CEM V	Cemento compuesto	CEM V/A	40 - 64	18 - 30	-	18 - 30		-	0 - 5

TABLA Nº 7
REQUISITOS PARA CEMENTOS SR Y MR

TIPO	RESISTENTES A LOS SULFATOS Y AL AGUA DE MAR "SR"		RESISTENTES AL AGUA DE MAR "MR"	
	C ₃ A %	C ₃ A % + C ₄ AF %	C ₃ A %	C ₃ A % + C ₄ AF %
CEM I	≤ 5.0	≤ 22.0	≤ 5.0	≤ 22.0
CEM II/A-S	≤ 6.0	≤ 22.0	≤ 8.0	≤ 25.0
CEM II/B-S				
CEM II/A-D				
CEM II/A-P				
CEM II/B-P				
CEM II/A-V				
CEM II/B-V				
CEM III/A	≤ 8.0	≤ 25.0	≤ 10.0	≤ 25.0
CEM III/B	Lo son siempre		Lo son siempre	
CEM IV/A	≤ 6.0	≤ 22.0	≤ 8.0	≤ 25.0
CEM IV/B	≤ 8.0	≤ 25.0	≤ 10.0	≤ 25.0
CEM V/A	≤ 8.0	≤ 25.0	≤ 10.0	≤ 25.0

NOTA: Las especificaciones sobre C₃A y C₃A + C₄AF se refieren al clinker. Los contenidos de C₃A y C₄AF se determinarán por cálculo (norma UNE 80304:1986) a partir de los análisis según norma UNE-EN 196-2:1996.

- (11) Los valores del cuadro se refieren al núcleo del cemento con exclusión del sulfato de calcio y de cualquier aditivo. Representan % en masa.
- (12) La proporción de humo de sílice se limita al 10%.
- (13) Los componentes minoritarios adicionales pueden ser filler, o uno o más de los componentes principales, a menos que estén incluidos ya como tales en el cemento.
- (14) La proporción de filler se limita al 5%.
- (15) Cuando algún cemento portland mixto, en razón de su composición, se pueda incluir en alguno de los tipo II anteriores, deberá llevar la denominación y designación correspondiente a dicho tipo.
- (16) La proporción de caliza se limita al 20%.

Sulfate (SR) and sea water (MR) resistant cements may correspond to all the types, sub-types and variations included in UNE standard 80301:1996 if the clinker meets certain composition requirements with respect to the percentage limits for C₃A and C₃A+C₄AF, except in the case of cement CEM III/B which is in itself resistant to aggressive environments. With respect to all other types, the requisites are shown in Table 7 below.

In the cements shown in Table 7 that contain pozzolanic materials (pozzolans and/or fly ash) as major ingredients (proportions of over 5%), these materials must meet the following requirements, in addition to the conditions set out in UNE standard 80301:1996.

- The SiO₂/(CaO + MgO) ratio must be over 3.5 where CaO is reactive calcium oxide.
- The material, ground to a powder as fine as the reference cement (I 42.5 R/SR) and mixed with it at a rate of 3 parts of cement to 1 of material, must pass the pozzolanicity test (UNE-EN 196-5) at the age of 7 days.
- The 28-day crushing strength of this same 3-to-1 mixture must be at least 80% of the strength of the reference cement at the above age.

In view of the information in Table 7, it is obvious that the requirements applicable to sea water-resistant cements are less demanding than those for sulfate-resistant cements. This is logical in view of the comments in Section 3 on high chloride ion content mitigation of sulfate aggression and of the fact that the total peak sulfate content in sea water is much lower than the peaks recorded in gypsiferous water (due to higher concentration in the ground water table in times of drought, for instance).

Moreover, the favourable impact of the pozzolanic, slag and microsilica additives on concrete is also reflected, since the higher the proportion of such additives, the greater the calcium aluminate content allowed in the clinker.

Nonetheless, whereas the preliminary version of the draft European standard for sulfate- and sea water-resistant cements, presently under discussion, addresses two types of chemical resistance (high and moderate sulfate-resistant cements), depending on the tricalcium aluminate (C₃A) content in the clinker, no *a priori* consideration is given to a specific nomenclature for sea water-resistant cements. These will very likely be placed under the umbrella of moderate sulfate-resistant cements, detracting partly from the importance of the proportion of additives as a parameter that would allow for increasing C₃A content in the clinker. It may be sustained, however, on the basis of Spanish experience, that cements with active additives that comply with the above requirements have proved to perform satisfactorily in the maritime structures in which they have been used, a fact corroborated by experience in the USA and Canada, on which the classifications described below are based.

The United States body of standards contains two lines of action. The first refers to Portland cements without additives, described in ASTM C-150-97, in which chemical resistance gives rise to two cement typologies, those which are moderately sulfate-resistant (type II cements, with a C₃A content of under 8%) and those which are highly sulfate-resistant (type V cements, with a C₃A content of under 5%, provided also that the sum of tetracalcium aluminate ferrite (C₄AF) and tricalcium aluminate (C₃A) is under 25%)⁽¹⁷⁾.

The second line of action corresponds to blended Portland cements of the types listed below, described in ASTM-C-595 M-97:

TABLE No. 8
BLENDED PORTLAND CEMENTS FOR USE IN AGGRESSIVE CHEMICAL ENVIRONMENTS
(ASTM CLASSIFICATION)

CEMENT TYPE	PROPORTION OF SLAG (%) IN CEMENT	PROPORTION OF POZZOLAN OR FLY ASH (%) IN CEMENT
Portland-blast furnace slag cement, IS	25 to 70	0
Slag-modified Portland cement I (SM)	< 25	0
Portland-puzzolan cement, IP	(18)	15 to 40
Puzzolan-modified Portland cement, I (PM)	(18)	< 15

With respect to chemical resistance, the ASTM standard does not require these cements to have low C₃A content clinker, but rather provides that, in order to classify them as high (HS) or moderate (MS) sulfate-resistant, their 18-day expansion under the test conditions described in ASTM C-1012-95 (see Section 5.1.5) must be under 0.05% or 0.10%, respectively. If the expansion recorded for HS cement is over 0.05% after 180 days but under 0.10% after 365 days, it is also considered to be highly resistant to sulfates. Figure 4 shows the performance of a blend of CEM III/A cement (with slag) with a 20% pozzolan content, in accordance with the above. In addition to corroborating the non-susceptibility of the cementitious material, it shows that the cement expands less in the sea water solution (over-sulfated to 50 g/l) than in the presence of sodium sulfate (50 g/l) due to the beneficial effect of the chloride ions, which mitigate the sulfate attack.

⁽¹⁷⁾ An additional, optional requirement is laid down for these cements, to the effect that their 14-day expansion, after tempering with 7% SO₃ must be under 0.40% (see Section 5.1.3).

⁽¹⁸⁾ Portland cements with pozzolan additives may also contain slag, because they are manufactured from Portland or Portland-slag cement, mixed and ground together with the pozzolan.

Por otro lado, también se pone de manifiesto el efecto favorable que ejercen las adiciones puzolánicas, las escorias y la microsílíce al hormigón, puesto que, cuanto mayor es su proporción, se admite un mayor contenido de aluminatos cálcicos en el clínker.

No obstante, el proyecto de norma europea para cementos resistentes a sulfatos y al agua de mar, actualmente en fase de discusión, contempla en sus borradores previos, dos tipologías de resistencia química (cementos de alta y de moderada resistencia a sulfatos), en función de los contenidos de aluminato tricálcico (C_3A) del clínker, no considerando a priori una nomenclatura específica para cementos resistentes al agua de mar que quedarían englobados probablemente en los de moderada resistencia a sulfatos, y restando parte de la importancia a la proporción de adiciones como parámetro que admitiera aumentar el contenido de C_3A del clínker, si bien las experiencias españolas permiten afirmar que los cementos con adiciones activas que cumplan lo exigido anteriormente han manifestado un comportamiento satisfactorio en las estructuras marítimas en que han sido empleados, como corroboran a su vez las experiencias de EE.UU. y Canadá en las que se basan las clasificaciones descritas seguidamente.

La normativa estadounidense presenta dos líneas de actuación, la primera hace referencia a los cementos portland sin adición, descritos en ASTM C-150-97, donde la resistencia química da lugar a dos tipologías de cemento, los de moderada resistencia a sulfatos (cementos tipo II, con un contenido de C_3A inferior al 8 %) y los de alta resistencia a sulfatos (cementos tipo V, con un contenido de C_3A inferior al 5%, precisando también que la suma del ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF) y el aluminato tricálcico (C_3A) sea inferior al 25 %⁽¹⁷⁾).

La segunda línea de actuación corresponde a los cementos portland compuestos, de las tipologías indicadas a continuación, descritas en ASTM-C-595 M-97:

TABLA Nº 8
CEMENTOS PORTLAND COMPUESTOS PARA EMPLEO EN AMBIENTES QUÍMICOS AGRESIVOS
(CLASIFICACIÓN ASTM)

TIPO DE CEMENTO	PROPORCIÓN DE ESCORIA (%) EN EL CEMENTO	PROPORCIÓN DE PUZOLANA O CENIZA (%) EN EL CEMENTO
Cemento portland con escoria de alto horno, IS	25 al 70	0
Cemento modificado con escoria, I (SM)	< 25	0
Cemento portland con puzolana, IP	(18)	15 al 40
Cemento portland modificado con puzolana, I (PM)..	(18)	< 15

La normativa ASTM no requiere, en relación a la resistencia química, que estos cementos contengan un clínker con reducido contenido de C_3A , sino que prescribe, para calificarlos como de alta resistencia a sulfatos (HS) o moderada resistencia a sulfatos (MS), que su expansión a 180 días tras la realización del ensayo descrito en ASTM C-1012-95 (véase Apartado 5.1.5) sea inferior al 0,05 % o al 0,10 %, respectivamente. Si el cemento HS a los 180 días presenta un valor de expansión superior al 0,05 % pero a 365 días es inferior al 0,10 %, también se considera como de alta resistencia a sulfatos. En la Figura nº 4 se pone de manifiesto el comportamiento de una mezcla de cemento CEM III/A (con escoria), con un 20 % de puzolana, mediante el procedimiento indicado. Además de corroborar la no susceptibilidad del conglomerante, se observa un menor grado de expansión en la disolución de agua de mar (sobresulfatada hasta 50 g/l), respecto a la de sulfato sódico (50 g/l), debido al efecto beneficioso que produce la presencia de cloruros, reduciendo el nivel de ataque de los sulfatos.

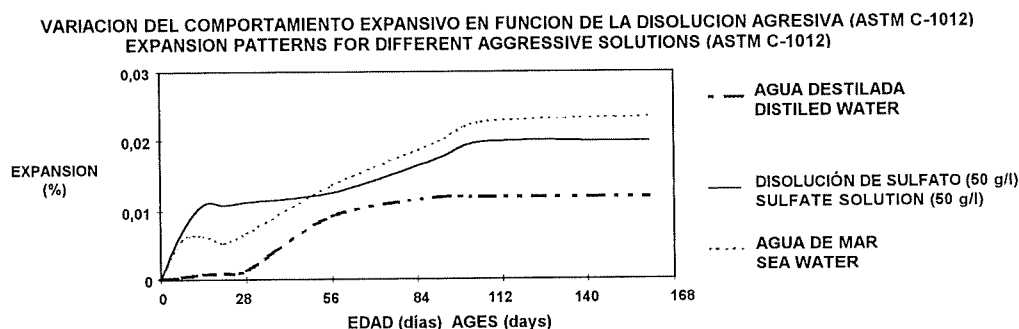


Figura 4

Aunque los cementos con reducida proporción de adición I (PM) y I (SM) puedan, de acuerdo con su clasificación, satisfacer en algún caso los requisitos MS o incluso eventualmente los HS, generalmente son los de mayor contenido de adición IS y IP los que se emplean para estas prestaciones, evaluando previamente con el citado

⁽¹⁷⁾ A estos cementos se les exige también, como requisito optativo, que se expansione a la edad de 14 días habiendo sido amasados con un 7% de SO_3 sea inferior al 0,040% (véase Apartado 5.1.3.).

⁽¹⁸⁾ Los cementos portland con adición puzolánica pueden llevar escoria, puesto que su fabricación se efectúa a partir de cementos portland o portland con escoria, mezclados y molidos conjuntamente con la puzolana.

Although cements with a low proportion of additive I (PM) and I (SM) may on occasion meet the MS or even possibly the HS requirements set out in this classification, generally those with a higher IS and IP additive content are used for these purposes, after their compliance with the above ASTM test is checked. This may be the reason that so many structures built in the Canary Islands with pozzolan cements manufactured with normal clinker (without the MR specification and therefore, *a priori*, not sea water-resistant) have proved to perform wholly satisfactorily after long periods of exposure to marine environment.

The composition of these high pozzolan- or fly ash- and/or slag-content cements is particularly well-suited to marine environment. That is, as no conditioning factor that would require its clinker to have low C_3A contents involved, and the presence of C_3A in hydrated cement paste helps prevent reinforcing steel corrosion (obstructing access by chloride ions, always present in marine atmospheres, by reacting with them to form chloroaluminates), the use of these additive cements which do not require reducing the C_3A content enhances reinforcement durability.

All of this leads to a compromise in the choice of C_3A content in cements to be used in marine environments (lower to enhance concrete durability and higher to prevent chloride ion-related reinforcing steel corrosion as far as possible).

Figure 5 analyses the effect of the C_3A content of cement in concrete cracking due to reinforcing steel corrosion in marine environments. The results are based on an experimental study conducted on splash zone reinforced concrete pillars executed with 22 types of cement, each with a different C_3A content, but with the same proportioning and concrete cover thickness.

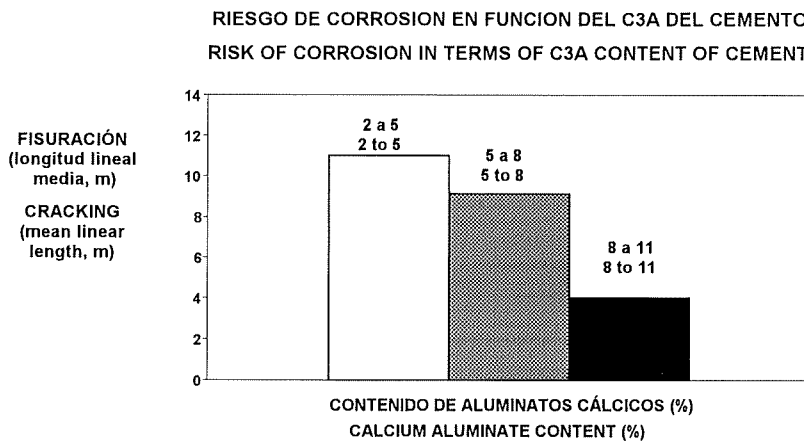


Figure 5

5. EVALUATION PROCEDURES FOR DURABILITY CONTROL

As discussed in the Introduction, concrete durability control in marine environment is generally established in terms of two entirely different parameters:

- Susceptibility of the cementitious material to the attack of aggressive agents.
- Concrete closeness as a barrier that obstructs the accessibility of aggressive agents, i.e., concrete impermeability.

To obtain compact, non-porous concrete, the water/cement ratio must be as small as the workability of the mixture and cement hydration permit.

A small water/cementitious material ratio and an appropriate cement content are the two foremost measures to be taken to protect concrete from aggressive agents. Section 2 discusses the recommendations in this regard.

Such precautions protect the concrete against what is defined as a weak attack, regardless of the kind of aggression. Where such measures, while valid, prove to be insufficient to curb the environmental attack, special cements, specifically resistant to the prevailing type of attack, should be used.

When the attack is so strong that neither the use of low permeability concrete or of special cement is able to withstand it, special facing should be applied to enhance concrete durability; the purpose of such facing is to prevent the concrete from coming into direct contact with the aggressive agents.

Depending on the circumstances, facing may consist of a surface film (polymer primers: with a polyurethane, acrylic, epoxy base, etc.; or tar-based facing: epoxy tar, epoxy bitumen, oxy-bitumen, etc.) or impregnants (acrylic or other polymers in solution with impermeabilising and/or hydrophobic features).

ensayo el cumplimiento de las mismas. Esta puede ser una explicación de por qué numerosas estructuras en servicio ejecutadas en las Islas Canarias con cementos puzolánicos elaborados con clínkeres normales (sin la característica MR y por ello, a priori, no resistentes al agua de mar) han presentado un comportamiento totalmente satisfactorio tras períodos muy prolongados de exposición marina.

La concepción de estos cementos con alto contenido de puzolanas o cenizas volantes y/o escorias para ambiente marino es especialmente ventajosa, dado que, como que no se exige ningún condicionante para que su clínker presente reducidos contenidos de C_3A , y para evitar la corrosión de las armaduras la presencia del C_3A en la pasta de cemento hidratado es beneficiosa (dificulta el acceso de los iones cloruro, siempre presentes en el ambiente marino, por reacción entre ambos dando lugar a cloroaluminatos), el empleo de estos cementos de adición sin exigencia de reducido C_3A es favorable para aumentar la durabilidad de las armaduras.

Todo ello conduce a una situación de compromiso en la elección del contenido de C_3A en los cementos a emplear en ambiente marino (reducido para potenciar la durabilidad del hormigón y elevado para evitar en lo posible la corrosión de armaduras por acción de cloruros).

En la Figura nº 5 se analiza el efecto del contenido de C_3A del cemento en la fisuración del hormigón originada por la corrosión de armaduras en ambiente marino. Los resultados se basan en un estudio experimental efectuado sobre pilares de hormigón armado, expuestos en zona de salpicaduras, que habían sido ejecutados con igual dosificación y espesor de recubrimiento, empleando 22 tipos de cemento con diferentes contenidos en C_3A .

5. PROCEDIMIENTOS DE EVALUACIÓN PARA EL CONTROL DE LA DURABILIDAD

Según se expuso en la introducción, el control de la durabilidad del hormigón en ambiente marino suele establecerse en función de dos parámetros totalmente diferentes:

- La susceptibilidad del conglomerante respecto a los ataques de los agentes agresivos.
- La compacidad del hormigón como barrera que dificulte la accesibilidad de los agentes agresivos, es decir, la impermeabilidad del hormigón.

Para obtener hormigones compactos y pocos porosos, la relación agua/cemento debería ser reducida lo máximo posible, de forma compatible con la trabajabilidad de la mezcla y la hidratación del cemento.

Una proporción agua/cemento reducida y un contenido adecuado de cemento son de hecho las primeras medidas para la protección del hormigón frente al ataque de los agentes agresivos. En el Apartado nº 2 se han presentando las recomendaciones aplicables a estos efectos.

Si se toman estas precauciones, el hormigón resistirá lo que se define como un ataque débil, cualquiera que sea el tipo de agresión. Si estas medidas fueran insuficientes ante el ataque ambiental, aunque sigan siendo válidas, deberían utilizarse cementos especiales que tengan una resistencia específica al tipo de ataque predominante.

Cuando el ataque es tan fuerte que ni el uso de hormigones de permeabilidad muy baja ni el uso de cementos especiales lo puedan resistir, se deben aplicar revestimientos especiales para hacer el hormigón más duradero; dichos recubrimientos tienen como objetivo mantener al hormigón fuera del contacto directo con los agentes agresivos.

Dependiendo de las circunstancias, estos revestimientos pueden ser películas superficiales (imprimaciones poliméricas: de poliuretano, acrílicas, epoxi, etc.; o recubrimientos bituminosos: brea epoxi, alquitrán epoxi, oxiasfalto fundido, etc.) o impregnaciones (acrílicas u otras dispersiones de polímeros en disolución con características impermeabilizantes y/o hidrófobas).

Respecto al control y evaluación de cada una de las barreras citadas, la última de ellas, correspondiente a los revestimientos de protección exterior, necesarios en casos límite, se evalúan de forma concreta según el diseño de cada estructura objeto de protección, por lo que su control no puede considerarse de modo genérico al ser soluciones individuales en cada caso.

En relación a la segunda barrera (empleo de cementos especiales resistentes al tipo de ataque predominante), en el apartado siguiente se presentan los procedimientos disponibles para determinar la resistencia química de los conglomerantes con objeto de proceder a su selección para empleo en las obras susceptibles de ataque químico.

Hay que considerar que no hay ningún ensayo normalizado que esté consensuado para el estudio de la susceptibilidad de los cementos frente a la acción de los agentes agresivos (sean o no del agua de mar). Por ello, en muchas ocasiones, los criterios establecidos para la selección del tipo de conglomerante no tienen una base experimental que fundamente la elección, sólo se atienden a la composición mineralógica del cemento.

Y por último, el control de los parámetros de calidad y compacidad del hormigón es muy complejo. La determinación sobre hormigón endurecido del contenido de cemento y de la relación agua/cemento entraña una gran dificultad y los resultados son poco reproducibles. Por ello, era especialmente necesario un procedimiento indirecto que pudiera constatar tanto los parámetros de elevado contenido de cemento y reducida relación agua/cemento, como una ejecución adecuada, con reducida porosidad capilar y suficiente grado de compactación, como el descrito en el Apartado 5.2.

With regard to monitoring and evaluation of each of the above barriers, the last one mentioned, i.e. the outside protective facing necessary in extreme cases, is specifically assessed in accordance with the design of each structure to be protected; generic monitoring is ineffectual for this reason, since the solutions are specific to each case.

As far as the second barrier is concerned (use of special cements resistant to the prevailing kind of attack), the following section discusses the procedures available to determine the chemical resistance of cementitious materials as a basis for selecting the most suitable components for use in works subject to chemical attack.

Since there is no generally accepted test for studying the susceptibility of cement to the action of aggressive agents (sea water or otherwise), the criteria established for the choice of cementitious material are often lacking any experimental grounds and are based, rather, on the mineral composition of the cement.

Finally, monitoring concrete quality and closeness parameters is very complex. The determination of cement content and the water/cement ratio in hardened concrete is extremely difficult and the results hard to reproduce. It thus became particularly necessary to devise an indirect procedure, as described in Section 5.2 below, able to ascertain high concrete content and low water/cement ratio parameters as well as appropriate execution with low capillary porosity and sufficient compaction.

5.1. METHODS FOR EVALUATING THE CHEMICAL RESISTANCE OF CEMENTITIOUS MATERIALS

As indicated, resistance to chemical attack is an extraordinarily complex issue.

Many attempts have been made to develop an appropriate technical method to study chemical degradation processes. The choice of an adequate research procedure is of paramount importance for an understanding of the basic conditions of any deterioration process, to determine the causes and to be able to apply the results obtained. Conducting these studies is further hindered by the slow pace at which these processes take place naturally. Methods are therefore needed to accelerate such processes to be able to reproduce them under laboratory conditions as they actually occur in concrete exposed to an aggressive agent.

The final goal is the development of a research technique whereby the test period can be reduced to a few weeks without interfering with the deterioration process *per se*. This would enable a relatively speedy choice of the different kinds of applicable cement and make it possible to determine the quality of the most appropriate cementitious material for works subject to exceptionally aggressive conditions.

The conditions that such a research method should meet can be summarised as follows:

- 1) Appropriate to check the chemical resistance of the cement to the aggressive agents in the environment in question.
- 2) Able to yield reproducible values within a relatively short period so its use is acceptable for both cement manufacturers and users.
- 3) Able to produce laboratory appraisals that correspond to cement performance in real-life situations.

5.1.1. ANSTETT Test

Under this procedure, the cement to be tested is ground to a powder fine enough for the 100% of the sample to pass through a 4900-mesh/cm² sieve. The sample is then mixed with 50% of distilled water, by weight, and stored in a moist atmosphere for 24 h and subsequently for in water for 14 days. Once the specimen is hydrated, it is mixed with 50% gypsum, by weight (i.e., 50 parts of gypsum to 100 parts of dry hydrated paste) and is ground fine enough for 100% of the resulting powder to pass through a 900-mesh/cm²sieve.

The product obtained is mixed with 6% of distilled water and 8-cm diameter by 3-cm high cylindrical specimens are made by applying a pressure of 20 kp/cm for one minute. These specimens are placed on filter paper soaked in water and the diameter and height measured at the outset and every 24 h. The dimensions are thus checked for 28 days in an atmosphere with a relative humidity of over 95%. In parallel, specimens of the same form and size, but made with sand instead of gypsum, are subjected to the same treatment. The maximum increase in volume observed in the gypsum-containing specimens should not be over 1.25% of the increase recorded for the sand specimens.

5.1.2. KOCH AND STEINEGGER Test

The procedure calls for making 28 1x1x6 cm prismatic mortar specimens, proportioned to 1:1:2 (cement: fine sand⁽¹⁹⁾:coarse sand⁽²⁰⁾ by weight) with a water/cement ratio of 0.6. The aggressive agent is a 0.3M sodium sulfate solution, obtained from 4.4% (by weight) anhydric sodium sulfate. The 28 specimens are kept in distilled water at 20° C for 21 days. Four of them are then tested for flexural strength and the other 24 are divided into two groups, with 12 submerged in the aggressive solution and the other 12 in distilled water.

⁽¹⁹⁾ DIN 1164 type I.

⁽²⁰⁾ DIN 1164 type II.

5.1. MÉTODOS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA QUÍMICA DEL CONGLOMERANTE

Según se ha indicado, la resistencia frente a un ataque químico constituye un problema de extraordinaria complejidad.

En múltiples ocasiones se ha intentado desarrollar un método técnico apropiado para la investigación de los procesos de degradación química. La elección de un procedimiento de investigación adecuado es de una importancia capital para el conocimiento de las condiciones básicas de un proceso de deterioro, para la determinación de sus causas, así como para la aplicación de los resultados obtenidos. La realización de estos estudios se ve dificultada, además, por la lentitud con que los procesos se desarrollan en la naturaleza. Por tanto, es necesario disponer de métodos para acelerar el desarrollo de dichos procesos, de modo que puedan ser reproducidos en laboratorio de la misma forma en que realmente tienen lugar en el hormigón expuesto a la acción de un agente agresivo.

La meta final es el desarrollo de una técnica de investigación, mediante la cual se pueda disminuir el plazo de los ensayos a algunas semanas, sin influir en el proceso mismo de deterioro. Si se alcanzase esta meta, se podría proceder rápidamente a la selección de los distintos tipos de cementos aplicables, y emitir un juicio sobre la calidad del conglomerante adecuado para las obras sometidas a condiciones singulares de agresividad.

Las condiciones que este método de investigación debe reunir, pueden resumirse en la forma siguiente:

- 1) Ser apropiado para poder comprobar la resistencia química de los cementos a los agentes agresivos del ambiente en cuestión.
- 2) Poder dar valores reproducibles dentro de un plazo relativamente reducido para que sea aceptable su empleo tanto por los fabricantes de cementos como por los usuarios.
- 3) Las valoraciones obtenidas en el laboratorio mediante el empleo del método en cuestión deben tener una correspondencia con el comportamiento del cemento en el elemento ejecutado.

5.1.1. Ensayo de ANSTETT

Según este procedimiento, el cemento a ensayar se muele hasta un grado de finura tal que la totalidad de la muestra atraviese sin dejar residuo alguno el tamiz de 4900 mallas/cm². La muestra se mezcla con un 50 % en peso de agua destilada, permaneciendo luego 24 h en atmósfera húmeda y 14 días en agua. Una vez hidratada la probeta, se mezcla con un 50 % en peso de yeso (es decir, 50 partes de yeso, con 100 partes de la pasta hidratada seca) y se muele hasta que todo el conjunto atraviese sin residuo el tamiz de 900 mallas/cm².

El producto obtenido se mezcla con un 6 % en peso de agua destilada, fabricando probetas cilíndricas de 8 cm de diámetro y 3 cm de altura, por aplicación de una presión de 20 kp/cm² mantenida durante un minuto. Estas probetas se depositan sobre un papel de filtro empapado en agua, midiendo el diámetro y la altura de las mismas al principio y cada 24 h. Esta comprobación de dimensiones se efectúa durante 28 días en atmósfera con humedad relativa superior al 95 %. Paralelamente, se preparan probetas de la misma forma y dimensiones con arena en lugar de yeso, a las que se somete al mismo tratamiento. El aumento máximo de volumen observado en las probetas fabricadas con yeso no debe ser superior al 1,25 % del observado en las amasadas con arena.

5.1.2. Ensayo de KOCH Y STEINEGGER

El procedimiento precisa de la fabricación de 28 probetas prismáticas de 1x1x6 cm de mortero con una dosificación 1:1:2 (cemento: arena fina⁽¹⁹⁾: arena gruesa⁽²⁰⁾ en peso) y una relación agua/cemento de 0,6. El agente agresivo es una disolución de sulfato sódico 0,3 molar, obtenida a partir de sulfato sódico anhidro al 4,4 % en peso. Las 28 probetas fabricadas se mantienen durante los primeros 21 días en agua destilada a 20° C. A continuación se ensayan 4 de ellas a flexotracción y se dividen las 24 restantes en dos grupos, 12 se sumergen en la disolución agresiva y las otras 12 se mantienen en agua destilada.

En la Tabla nº 9 se indican las edades de rotura a flexotracción de las probetas, considerando como fecha de inicio la finalización del curado previo de 21 días de duración.

A cada una de las edades de ensayo indicadas se calcula el índice de actividad resistente, expresado como el cociente de la media de resultados obtenidos en las probetas conservadas en la disolución agresiva respecto a la media de los valores de las probetas patrón en agua destilada.

⁽¹⁹⁾ Tipo I DIN 1164.

⁽²⁰⁾ Tipo II DIN 1164.

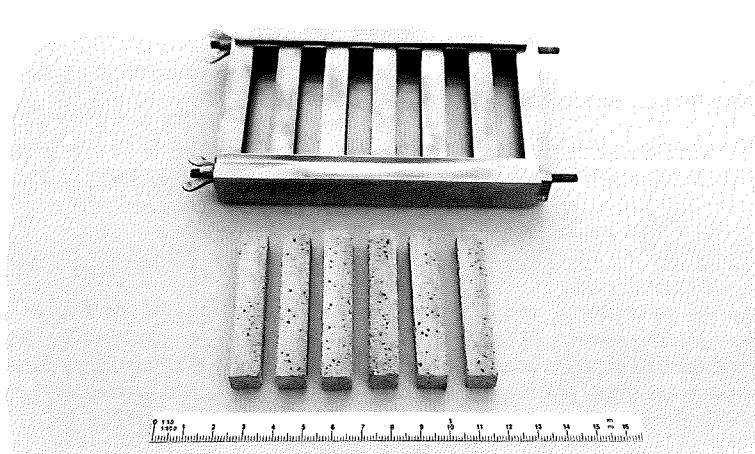
Table 9 shows the flexural fracture ages for the specimens, where the initial date is considered to be the end of the 21-day curing period.

TABLE 9
TESTING FREQUENCY. KOCH AND STEINEGGER METHOD

AGE (days)	SPECIMENS KEPT IN AGGRESSIVE SOLUTION	SPECIMENS KEPT IN DISTILLED WATER
15	4	4
56	4	4
96	4	4

The resistance rate is computed at each of the test ages shown and expressed as the quotient of the mean of the results obtained in the specimens covered by the aggressive solution divided by the mean of the values of the control specimens in distilled water.

Under this procedure, cementitious materials with a resistance rate of over 0.7 at the age of 56 days are considered to be resistant.



Fotografía n° 11: Moldes y probetas (60 x 10 x 10 mm) para el Ensayo de Koch y Steinegger.

Photograph No. 11: Moulds and specimens (60 x 10 x 10 mm) for the Koch and Steinegger Test.

5.1.3 ASTM C-452-95 TEST

This procedure, first published in 1960 although revised in 1995, consists of determining the expansion of mortar bars made from a batch of Portland cement and gypsum proportioned so that the resulting mixture has a sulfur trioxide content of 7.0 mass %.

To conduct this test, six 25x25x285 mm specimens are made from two analogous batches (3 specimens per batch) and poured into moulds equipped with base plates that are screwed on so that, when the specimens are demoulded, the bases embedded at the ends of the specimens can be used for fastening the gauge studs that fit into the length comparator.

The batch is made with 400 g of the (cement + gypsum) mixture and 1100 g of graded standard sand as provided in ASTM Specification C-778 with a water/cementitious material ratio of 0.46. In preparing the cement-gypsum mixture the SO₃ content of both must be determined to ensure that the mixture of the two cementitious materials has a total SO₃ content of 7.0 mass %. The mortar should be mixed essentially as described in ASTM Practice C-305.

The specimens obtained are cured in moulds in a moist room at 23° C for 22 to 23 hours. They are then demoulded, duly identified and stored in distilled water at a temperature of 23° C. At 24h ± 15 min from the time the cement and water are mixed, the initial length measurement of each specimen is taken. A second measurement is taken after 14 days and the mean increase in length over the initial value is computed for the six specimens, expressed in percentage of total length (length between the two bases of the measuring gauge studs embedded at the ends of the specimens).

Cement is considered to be resistant to sulfates if the expansion observed after 14 days is less than 0.040%.

TABLA N° 9
FRECUENCIA DE ENSAYO. MÉTODO KOCH Y STEINEGGER

EDAD (días)	PROBETAS CONSERVADAS EN DISOLUCIÓN AGRESIVA	PROBETAS CONSERVADAS EN AGUA DESTILADA
15	4	4
56	4	4
96	4	4

De acuerdo con el procedimiento, se consideran resistentes los conglomerantes cuyo índice de actividad resistente a la edad de 56 días sea superior a 0,7.

5.1.3. Ensayo ASTM C-452-95

Este procedimiento, que aunque haya sido revisado en 1995 fue publicado en 1960, consiste en la determinación de la expansión de barras de mortero fabricadas a partir de una amasada de cemento portland y yeso en proporciones tales que la mezcla resultante contenga un 7 %, en peso de trióxido de azufre.

Para la realización del ensayo se elaboran seis probetas de 25x25x285 mm, en dos amasadas análogas (se fabrican 3 probetas por amasada), en moldes preparados con bases roscadas para que al desmoldar, queden embebidas en los extremos de las probetas y sirvan para aplicar los puntales que encajen en el dispositivo de medida de longitud.

La amasada se efectúa con 400 g de mezcla (cemento + yeso) y 1100 g de arena normalizada ASTM C-778, y relación agua/conglomerantes = 0,46. Para preparar la mezcla cemento-yeso debe determinarse el contenido en SO₃ de ambos para que la mezcla de los dos conglomerantes contenga un 7% de SO₃. La amasada del mortero se efectúa básicamente según lo indicado en ASTM-C-305.

Las probetas obtenidas se curan en los moldes en cámara húmeda a 23°C durante 22 a 23 horas. A continuación se desmoldan, se marcan y se sumergen en agua destilada a 23°C. Transcurridas 24 h ± 15 minutos a partir de la mezcla con el agua, se procede a la realización de la medida inicial de longitud de cada probeta. Se efectúa una segunda medida a los 14 días de edad, y se calcula el incremento de longitud medio de las seis probetas respecto a la medida inicial, referido en porcentaje a la longitud total (longitud entre las dos bases de los puntales de medida embebidos en los extremos de las probetas).

Se considera que el cemento es resistente a los sulfatos si la expansión observada a los 14 días es inferior al 0,040 %.

5.1.4. Ensayo por ENV 196-(X):1995

La prenorma europea pr ENV 196-(X):1995 "*Métodos de ensayo de cementos - Determinación de la resistencia de los cementos al ataque por disoluciones de sulfato o por agua de mar*", ha sido elaborada por el Comité Técnico n° 51 del CEN (Comité Europeo para Normalización). No obstante, desde que fue editado el borrador de esta prenorma experimental no se han producido avances en su elaboración, y por el momento, su publicación ha quedado en suspenso, sin fecha límite.

El ensayo consiste en la determinación de los cambios de longitud de probetas prismáticas de 20 x 20 x 160 mm, mediante la realización de medidas periódicas mientras se conservan en una disolución de sulfato sódico o magnésico o en agua de mar artificial. Las disoluciones de sulfato que propone la norma presentan una concentración de 16 g/l de SO₄²⁻, y el agua de mar artificial la composición por litro resultante de mezclar: 30 g de cloruro sódico, 6 g de cloruro magnésico hexahidrato, 5 g de sulfato magnésico heptahidrato, 1,5 g de sulfato cálcico dihidrato y 0,2 g de bicarbonato potásico.

Para el desarrollo experimental del ensayo se precisa la fabricación de seis probetas de las dimensiones indicadas, confeccionadas según el procedimiento normalizado de resistencias mecánicas de cementos (UNE-EN 196-1:1996), habitualmente empleado en España.

Los moldes van preparados con bases roscadas que quedan embebidas en el mortero, para que en ambos extremos de cada una de las probetas puedan ubicarse los puntales o terminales necesarios para el equipo de medida de longitud. El mortero se fabrica con la dosificación normalizada (una parte de cemento con 3 de arena normalizada, en peso, y relación agua/cemento = 0,5).

La compactación es análoga a la de la norma de resistencias mecánicas, salvo en que se efectúan 10 sacudidas en lugar de las dos series de 60.

5.1.4. pr ENV 196-(X):1995 Test

European prestandard pr ENV 196-(X): 1995 titled "Methods of testing cement: Determination of the resistance of cements to attack by sulfate solution or by sea water" was drafted by CEN (European Committee for Standardization) Technical Committee 51. Nonetheless, no further progress has been made on the formulation of this experimental prestandard since the draft was issued and for the time being publication has been suspended *sine die*.

The test consists of determining the changes in the length of 20x20x160 mm prismatic specimens by taking periodic measurements during storage in a sodium or magnesium sulfate solution or in artificial sea water. The sulfate solutions proposed in the standard have an SO_4^{2-} concentration of 16 g/l and the artificial sea water a composition per litre resulting from mixing: 30 g of sodium chloride, 6 g of hexahydrate magnesium chloride, 5 g of heptahydrate magnesium sulfate, 1.5 g of dihydrate calcium sulfate and 0.2 g of potassium bicarbonate.

Experimentation under this test calls for six specimens of the above dimensions manufactured pursuant to the standardised cement mechanical strength procedures (UNE EN 196-1:1996) normally used in Spain.

The moulds are prepared with bases with screws that are embedded in the mortar so the gauge studs or terminals needed for the length comparator can be attached to both ends of the specimens. The mortar is proportioned to standard (one part of cement to 3 of standard sand, by weight, and a water/cement ratio of 0.5).

Compaction is performed as specified in the mechanical strength standard, except that 10 jolts instead of the two series of 60 are effected.

The specimens are kept in a moist room for from 20 to 24 hours, after which they are demoulded and marked for identification; subsequently they are immersed in distilled water tanks at a temperature of 20° C. The length of the six specimens is determined after 28 days, when three of them are placed in aggressive sulfate solution or sea water and the other three covered with distilled water. From that time on both groups are measured after 4, 8, 12, 16, 20, 28, 40 and 52 weeks and any surface deterioration observed is recorded.

The increase in length in each specimen is determined at each age as the difference between the length at the age measured and the length after the first 28 days of standard curing, expressed as a percentage of the nominal length, i.e., 160 mm.

The evaluation of cement chemical resistance to the aggressive agents chosen is effected by comparison of the graphic representation of the mean value of the increase in length at age of the specimens stored in the aggressive solution, compared to the mean value of specimens covered by distilled water.

5.1.5. ASTM C-1012-95 Test

This test is designed to determine changes in the length of mortar bars stored in an aggressive sulfate solution (50 g/l of Na_2SO_4) or in solutions with other agents (such as MgSO_4 , sea water, etc.).

Test experimentation calls for making six prismatic specimens in moulds similar to those described in the procedure discussed under 5.1.3. The mortar for the test is composed of one part of cement per 2.75 parts of graded standard sand as per ASTM Specification C-778, by weight and a water/cement ratio of 0.485. In addition to the mortar bars, other standard specimens are needed to determine crushing strength. The moulds of both kinds of specimens are sealed and stored in water at a temperature of 25° C for 23 hours and 30 minutes.

Thereafter the specimens are demoulded, marked for identification and placed in a tank of saturated limewater at a temperature of 23° C. Specimens are removed one at a time and subjected to the crushing test until the mortar's mechanical strength is found to be at least 20 MPa (the respective test should be conducted at intervals in keeping with the values obtained). Once this degree of maturity (strength) is reached, the specimens prepared for the mechanical tests that were not used are discarded, the initial length of the mortar bars made for the expansion test is recorded and the specimens are covered by the aggressive solution chosen.

The specimens stored in the aggressive agent are measured for expansion after 1, 2, 3, 4, 8, 13 and 15 weeks and 4, 6, 9 and 12 months from the date they were initially covered.

The outside appearance of the specimens is examined at those ages as well and the mean increase of the six specimens with respect to their initial length is determined, expressed in percentage of the total length (distance between the two gauge stud bases screwed on to the ends of the specimens).

The cement is considered to be resistant to the aggressive solution if the expansion found after 180 days is under 0.10%.

5.1.6. Criteria for applying procedures

Support for the Anstett test has waned, since various objections have arisen with respect to its practical value. Firstly, the use of hardened and ground cement paste exposes non-hydrated grains of cement which under real conditions would be inert in the concrete, but which in the test give rise to deferred hydration in the mixture with the gypsum. Another objection is that the internal cohesion of the ground material mixed with gypsum and pressed is

Las probetas se conservan en cámara húmeda durante 20 a 24 horas, transcurrido este plazo se desmoldan y se marcan; posteriormente se sumergen en depósitos de agua destilada a 20°C. A la edad de 28 días se determina la longitud de las seis probetas, y tres de ellas se sumergen en la disolución agresiva de sulfatos o agua de mar, y las otras tres se mantienen en agua destilada. A partir de este momento se van realizando medidas sobre ambos grupos de probetas a 4, 8, 12, 16, 20, 28, 40 y 52 semanas, anotando cualquier deterioro superficial, en caso de producirse.

A cada edad se determina el incremento de longitud de cada probeta por diferencia entre la longitud a la edad de medida y la longitud tras los primeros 28 días de curado estándar, referida en porcentaje a la longitud nominal de 160 mm.

La evaluación de la resistencia química del cemento a los agentes agresivos elegidos se efectúa mediante la comparación de las representaciones gráficas del valor medio del incremento de longitud en función de la edad, de las probetas sumergidas en disolución agresiva respecto al valor medio de las probetas conservadas en agua destilada.

5.1.5. Ensayo ASTM C-1012-95

Este ensayo cubre la determinación de los cambios de longitud de barras de mortero sumergidas en una disolución agresiva de sulfatos (50 g/l de Na_2SO_4) u otros agentes (como MgSO_4 , agua de mar, etc).

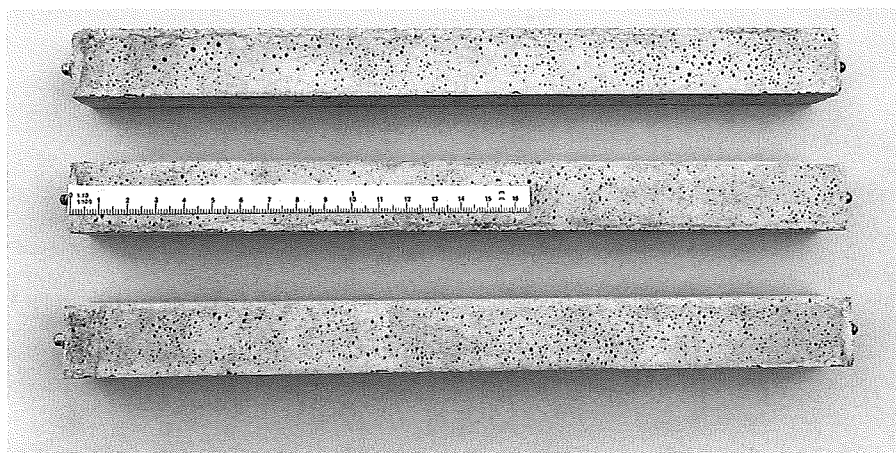
Para el desarrollo experimental del método se precisa la fabricación de seis probetas prismáticas en moldes análogos a los indicados en el procedimiento descrito en 5.1.3. El mortero para ensayo se compone de una parte de cemento por cada 2,75 de arena normalizada ASTM C-778, en peso, con una relación agua/cemento de 0,485. En paralelo a la fabricación de las barras de mortero deben fabricarse probetas normalizadas destinadas a la determinación de la resistencia a compresión. Los moldes de ambos tipos de probetas se sellan y se sumergen en agua a 35°C durante 23 horas y 30 minutos.

Después de este período las probetas se desmoldan, se marcan y se sumergen en un tanque de agua destilada saturada en cal a 23°C. Se van extrayendo probetas destinadas al ensayo a compresión y procediendo a su rotura hasta determinar que la resistencia mecánica del mortero sea igual o superior a 20 MPa (las roturas deben ser espaciadas en el tiempo según los valores que vayan siendo obtenidos). Una vez verificado este grado de madurez (resistencia), se prescinde de las probetas para ensayos mecánicos que no hayan sido empleadas aún, y se procede a la determinación de la longitud inicial de las barras de mortero elaboradas para los ensayos de expansión y a la inmersión de las probetas en la disolución agresiva elegida.

El proceso de medida de expansión en las probetas ya sumergidas en el agente agresivo se efectúa a 1, 2, 3, 4, 8, 13 y 15 semanas y a 4, 6, 9 y 12 meses a partir de la fecha de inmersión.

A estas edades se examina el aspecto exterior de las probetas y se determina el incremento de longitud medio de las seis probetas respecto a su medida inicial, referido en porcentaje a la longitud total (distancia entre las dos bases de los puntales de medida embebidos en los extremos de las probetas).

Se considera que el cemento es resistente a la disolución agresiva si la expansión manifestada a los 180 días es inferior al 0,10 %.



Fotografía n° 12: Probetas de Ensayo ASTM C-1012 (285 x 25 x 25 mm), con los puntales roscados en los extremos de los prismas para efectuar las medidas de expansión

Photograph No. 12: ASTM C-1012 (285 x 25 x 25 mm) Test specimens, showing gauge studs screwed on to ends of prisms to take expansion measurements.

not at all similar to the hydrated cement paste in a real structure. Finally, it has been objected that, at the age of 14 days, when grinding takes place, it is not likely that blended cements have reached sufficient maturity to be brought into contact with an aggressive agent.

The Koch and Steinegger test has none of the above drawbacks, although it is most unlikely that at the age of 21 days (which is when the specimens are subjected to the aggressive agent) cements with a high blast furnace slag content have reached the necessary maturity to correctly evaluate their performance. The advantage to this method is it is not restricted to the sodium sulfate solution prescribed, but may be extended to any other kind of agent (sea water, magnesium sulfate, mixtures, etc.). However, the small size of the specimens often gives rise to a wide range of flexural strength values which distort the results if they are close to the resistance rate established as the cut-off value for determining whether or not the cement is resistant to the aggression studied.

This explains why, when establishing the mean value of flexural strength of specimens with a section of 1x1 cm as a standard for comparison, the presence of a microcrack in the area adjacent to the fracture area has a much greater impact than the deterioration of the material as a whole on the final result. One defect of the method is, then, that it does not assess the overall performance of the specimen.

The procedure described in standard ASTM C-452 is very beneficial in so far as the testing period is very short, although the treatment conditions cannot be correlated to actual practice, since the aggressive agent is added as the cement is mixed. Other drawbacks are that it makes no provision for evaluating the chemical resistance of the cementitious material to agents other than sulfates, nor is it applicable to blended cements or Portland-pozzolan, Portland-fly ash or Portland-slag cements. The reason for the latter is that the additive can barely develop its pozzolanic or hydraulic features because the attack takes place from the first cement reaction, before the clinker hydration products have reached sufficient maturity for the lime to react with the soluble silica from the additives, nor have they become associated with or interpenetrated the additive hydration products, which have latent hydraulic properties (primarily slag).

The grounds for the procedures described in experimental European standard pr ENV 196-(X) and ASTM standard C-1012 are similar. Both obviate the drawbacks of the above methods since the specimens are not placed in the aggressive solution until the hydrated paste reaches sufficient maturity, making them ideal for blended cements or cement/ additive mixtures, the test conditions are representative of real conditions, the performance of the specimens is assessed as a whole as opposed to at specific points and, finally, these procedures are valid for confirming the chemical resistance of the cementitious material not only to sulfates but to any kind of aggressive solution. The drawback is that the test period is very long, because no sufficiently valid approximation of material expansion is available until three months have lapsed and no definitive results on the chemical resistance of the cement or the mixture are forthcoming until after six months.

Comparing the two procedures, it should be stressed that the draft European standard has been suspended for the time being and very few experiments have been conducted with it. There is, then a paucity of information about the method's repeatability and reproducibility, while the lack of evidence correlating the values obtained to the results found using other methods has hindered the establishment of even provisional specifications for evaluating chemical resistance with this method. The procedure described in ASTM standard C-1012, by contrast, fully addresses all the issues raised around the European standard: not only is there a large amount of information to validate it, but it was drawn up in an attempt to fill in all the gaps existing in earlier methods. It is, then, the most satisfactory procedure to ensure the chemical durability of cementitious materials or mixtures of these materials with additives by means of laboratory tests.

5.2. METHODS FOR EVALUATING CONCRETE IMPERMEABILITY

Concrete resistance to chemical attack depends not only on cement resistance, but on its closeness and, therefore, its impermeability.

Concrete penetrability depends on the structure of its micropores and microcracks that may arise when it is placed or during its service life. Reduction of porosity is, for this reason, the first measure to be taken to produce a long-lasting concrete, regardless of the kind of attack to which it is subjected.

Hardened cement paste and, therefore, concrete, has a series of pores that are conventionally broken down into the following three types:

- Gel pores, with a very small diameter (10^{-9} to 10^{-8} m) located inside the hydration products.
- Capillary pores, which have a much larger diameter, from 10^{-7} to 10^{-5} m, located in-between hydration products and visible under an electronic microscope. Capillary pores form a kind of vascular system within the hardened paste similar to the system in the human body. Many of the fundamental properties of the cement paste, and therefore, indirectly, the properties of the concrete depend on this system. This is particularly true of permeability and resistance to aggressive agents. Capillary pores are originally the outcome of the difference between the volume of the anhydric cement plus the water required for the reaction and the lesser volume of the hydration products.

5.1.6. Criterios de aplicación de los procedimientos

El ensayo de Anstett ha perdido parte de su aceptación, pues se han presentado diversas objeciones en contra de su valor práctico. Por un lado, el emplear pasta endurecida de cemento que ha sido triturada, se dejan accesibles granos de cemento no hidratado que en las condiciones reales de ejecución del hormigón serían inertes, pero en el ensayo dan lugar a una hidratación diferida en la mezcla con el yeso. Otro inconveniente reside en el hecho de que la cohesión interna del material triturado aglomerado con yeso y prensado no es en absoluto semejante a la de la pasta hidratada de cemento en una estructura real, y, por último, a la edad de 14 días en la que se produce la molturación, es probable que los cementos compuestos no hayan obtenido un grado de madurez suficiente para ponerse en contacto con el agresivo.

El ensayo de Koch y Steinegger no presenta ninguno de los inconvenientes citados anteriormente, si bien es probable que algunos cementos con un alto contenido de escoria de alto horno no hayan conseguido a la edad de 21 días (a la que se someten las probetas al agente agresivo), el grado de madurez necesario para una correcta evaluación de su comportamiento. Presenta la ventaja de que las probetas pueden ser expuestas a cualquier otro agresivo (agua de mar, sulfato magnésico, mezclas, etc.) no sólo a la disolución de sulfato sódico indicada, pero las reducidas dimensiones de las probetas dan lugar en muchos casos a dispersiones elevadas en la resistencia a flexión que desvirtúan los resultados si éstos están cercanos al valor del índice de actividad resistente establecido para evaluar si el cemento es resistente o no a la agresión objeto de estudio.

Esto se explica porque, al establecer como pauta de comparación el valor medio de la resistencia a flexión con probetas de 1x1 cm de sección, la presencia de alguna microfisura adyacente a la zona de rotura incide mucho más en el resultado final que el deterioro del material en su conjunto, por lo que el método tiene como defecto que no se evalúa globalmente el comportamiento de la probeta.

El procedimiento descrito en la norma ASTM C-452 es muy ventajoso en cuanto a que el plazo de ensayo es reducido, sin embargo, las condiciones del tratamiento no pueden ser correlacionadas con la práctica, dado que el agresivo se introduce durante el amasado del cemento. Otros inconvenientes son que no permite la evaluación de la resistencia química del conglomerante a otro agresivo que no sean los sulfatos y que no es aplicable a cementos compuestos, ni a mezclas de cemento portland con puzolanas, cenizas volantes o escorias, ya que la adición apenas puede desarrollar su carácter puzolánico o hidráulico porque el ataque se produce desde el inicio de la reacción del cemento, sin que los productos de hidratación del clínker hayan alcanzado el grado de madurez suficiente para que la cal reaccione con la sílice soluble de las adiciones ni se hayan asociado o interpenetrado con los productos de hidratación de las adiciones con carácter hidráulico latente (escoria principalmente).

Los procedimientos descritos en el proyecto de norma europea experimental pr ENV 196-(X) y en la norma ASTM C-1012 tienen un fundamento análogo. En ambos casos se subsanan los inconvenientes de los métodos anteriores, ya que las probetas no son sumergidas en la disolución agresiva hasta que la pasta hidratada presenta un grado de madurez suficiente, por lo que son óptimos para cementos compuestos o mezclas cemento/adición, las condiciones de ensayo son reproducibles con las dadas en la práctica, se evalúa el comportamiento de las probetas en su conjunto, no en puntos singulares, y por último, son procedimientos válidos para confirmar la resistencia química del conglomerante no solo a los sulfatos sino a cualquier tipo de disolución agresiva. El inconveniente que tiene es que el plazo de ensayo es muy dilatado, porque hasta transcurridos 3 meses no se dispone de una aproximación suficientemente válida al comportamiento expansivo del material, y hasta los seis meses no se puede sancionar de forma definitiva la resistencia química del cemento o de la mezcla.

Comparando los dos procedimientos entre sí, conviene resaltar que el proyecto de norma europea por el momento ha quedado en suspenso, y apenas se ha experimentado con este método, por lo que no se dispone de información suficiente acerca de su repetibilidad ni reproducibilidad, ni tampoco de valores correlacionables con los resultados obtenidos por otros procedimientos, por lo que no se han establecido ni siquiera especificaciones provisionales para la evaluación de la resistencia química con este método. En cambio, el procedimiento descrito en la norma ASTM C-1012 cubre por completo todas las dudas planteadas por el proyecto de norma europea, y no sólo hay gran número de datos que permiten su validación, sino que ha sido elaborado intentando cubrir todos los vacíos que dejaban los procedimientos anteriores, por lo que se configura como el método más satisfactorio para garantizar, mediante estudios en laboratorio, la durabilidad química de los conglomerantes o mezclas de éstos y adiciones.

5.2. MÉTODOS PARA EVALUAR LA IMPERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN

La resistencia del hormigón al ataque químico depende no sólo de la resistencia del cemento, sino también de su compacidad y, por consiguiente, de su impermeabilidad.

La penetrabilidad de un hormigón dependerá de su estructura de microporos y de las microfisuras que puedan generarse en su colocación o en su vida de servicio. La reducción de su porosidad es pues la primera medida a ser tomada para producir un hormigón duradero, sea cual sea el tipo de ataque al que se vea sometido.

La pasta de cemento endurecida y, por consiguiente, el hormigón, tiene una serie de poros que se dividen convencionalmente en tres tipos:

- Compaction pores or macropores, with diameters of from 10^{-4} to 10^{-3} mm formed due to deficient compaction or to an excess of water over the amount actually needed for hydration, added to the mixture to enhance workability and facility on-site placement.

It may be readily deduced, in view of the causes of the formation of capillary pores and macropores, that making compact, low porosity concrete entails the use of small water/cement ratios and high cement contents, as well as adequate execution (compaction and curing). Once concrete is placed, monitoring the cement content and the water/cement ratio is a rather complex problem, so concrete durability in terms of these two parameters is normally evaluated on the basis of permeability, which allows for an indirect analysis of the porous structure of the concrete deriving from proportioning and placement.

With regard to procedures designed to monitor concrete permeability, monographic reviews and articles on this issue have been published in our country over the last decade, based on both theoretical and experimental studies, largely under the auspices of the Ministry of Public Works' Directorate General of Roads.

One outcome of these studies, conducted primarily by the CEDEX Central Laboratory of Structures and Materials, was the publication of UNE standard 83:309:1990 titled "*Determinación de la profundidad de penetración de agua a presión en el hormigón*" "*Determination of the depth of penetration of pressure water in concrete*", essentially similar to ISO/DIS standard 7031 and RILEM recommendation CPC-13.1.

Based on this procedure, presently regarded as a non-requisite commentary, article 24.4. of Code EH-91 recommends that the maximum and mean water depths should not exceed 50 and 30 mm, respectively, to ensure the durability and sufficient impermeability of concrete exposed to particularly aggressive environments.

The Test consists of measuring the depth of the penetration front reached by water in concrete after applying water at a range of pressures (from an initial 1 kp/cm^2 to 7 kp/cm^2) to the finished surface of 15-cm diameter core specimens with a slenderness of 2; these specimens are removed from hardened concrete members whose impermeability needs to be ascertained or durability assessed using that parameter. It is also applicable, for the same purposes, to moulded specimens taken from freshly supplied concrete before pouring. In the latter case, the procedure obviously provides no information on execution conditions (placement, compacting and curing). The device used to apply pressure carries the water to a 7.5-cm diameter cylindrical chamber fitted with an O-ring gasket which is placed flush against the finished surface of the concrete specimen (which acts like a lid for the chamber).

Prior to conducting the test, the concrete should be partially dried to eliminate any capillary water that may be in the pores. To do so, it suffices to place the specimen to be tested in a drying chamber for at least 24 hours. As it is highly important to avoid any alteration of the structure of the concrete to be tested, the chamber temperature should not exceed 50° C under any circumstances, nor should all the humidity be removed from the concrete, since otherwise, in addition to the flow injected under pressure, water would be able to seep in through capillary suction.

Once the specimen is removed from the drying stove and cooled to room temperature, the test surface is prepared, avoiding high relative humidity environments at all times. The finished surface of the specimen is polished or clacked until the surface layer of the mortar is stripped away.

Each specimen is then placed on the chambers that constitute the permeability cells. The O-rings are carefully fitted into place to avoid possible leakage at the test specimen surface.

Once the fixtures that attach each specimen to its respective cell are in place and water-tight, pressure is applied to initiate the Test *per se*. In the first phase a pressure of 1 bar is applied for 48 hours, followed by 3- and 7-bar pressure phases, lasting 24 hours each.

After the last phase, the specimens are removed from the cells and broken under an indirect tensile strength test. Consequently, they break along a plane that passes through two opposite generating lines, giving rise to two surfaces on which the mark left by the pressure water injected into the concrete can subsequently be assessed for both maximum and mean penetration (the latter as the quotient of the area, in mm^2 , covered by the stain divided by the diameter of the specimen, in mm).

A series of practical objections may be raised to the rules or recommendations to be followed to conduct this Test, which may seriously affect the feasibility of the test itself. A summary of the major points to be considered follows:

- If the concrete has a substantial degree of internal humidity, it may be difficult to visualise the stain made by the injected water, rendering the quantification of results in terms of penetration depth impossible.
- Moreover, if the drying process eliminates the equilibrium humidity in the concrete pores, two overlapping penetration fronts are observed, one corresponding to the pressure water flow and a second, very diffuse front running over the first one, produced by capillary suction.

- Poros de gel, muy pequeños de diámetro (10^{-9} a 10^{-8} m), localizados dentro de los productos de hidratación.
- Poros capilares, mucho mayores de diámetro, entre 10^{-7} y 10^{-5} m, localizados entre los productos de hidratación, y observables al microscopio electrónico. Los poros capilares forman una especie de sistema vascular dentro de la pasta endurecida, similar al del cuerpo humano. Muchas de las propiedades fundamentales de la pasta de cemento dependen de este sistema, así que, indirectamente, las propiedades del hormigón también dependen de él. Esto incluye especialmente la permeabilidad y la resistencia a los agentes agresivos. El origen primario de los poros capilares está en la diferencia entre el volumen del cemento anhidro más el agua que precisa para reaccionar, y el volumen menor de los productos de hidratación.
- Poros de compactación o macroporos, de 10^{-4} a 10^{-3} m de diámetro, formados por deficiente compactación o a causa del exceso de agua en relación a la que se necesita para la hidratación, y que se ha añadido a la mezcla para mejorar su trabajabilidad y facilitar su puesta en obra.

A la vista de las causas de la formación de los poros capilares y de los macroporos, resulta evidente que para obtener hormigones compactos y de reducida porosidad hay que utilizar relaciones agua/cemento reducidas y contenidos de cemento elevados, con una ejecución (compactación y curado) adecuada. El control, una vez ejecutado el hormigón, del contenido de cemento y relación agua/cemento es un problema de cierta complejidad, por lo que la evaluación de la durabilidad del hormigón, en relación a ambos parámetros, suele llevarse a cabo mediante el control de su permeabilidad, que permite analizar de modo indirecto la estructura porosa del hormigón como efecto resultante de la dosificación y ejecución del mismo.

Respecto a los procedimientos destinados al control de la permeabilidad del hormigón, en la última década se han publicado en nuestro país monografías y artículos relevantes respecto a este tema, basados tanto en estudios teóricos como experimentales potenciados en gran medida por la Dirección General de Carreteras del actual Ministerio de Fomento.

Como resultado de estos trabajos, desarrollados principalmente por el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, se ha publicado la norma UNE 83.309:1990, "*Determinación de la profundidad de penetración de agua a presión en el hormigón*", análoga en el fundamento a la norma ISO/DIS 7031 y a la recomendación RILEM CPC-13.1.

En base a este procedimiento, actualmente contemplado a modo de comentario, no preceptivo, en el artículo 24.4 de la Instrucción EH-91, se recomienda, para asegurar la durabilidad de los hormigones expuestos a ambientes de especial agresividad, que los valores de profundidad de agua máxima y media no excedan de 50 y 30 mm respectivamente, garantizando, con estos límites, una suficiente impermeabilidad del hormigón.

El Ensayo consiste en medir la profundidad del frente de penetración alcanzado por el agua en el hormigón después de la aplicación de una presión de agua variable (inicialmente 1 kp/cm^2 hasta llegar a 7 kp/cm^2), sobre la cara de acabado de probetas testigo de 15 cm de diámetro y esbeltez 2, extraídas de elementos de hormigón endurecido sobre los que se precise conocer su impermeabilidad o evaluar, con este parámetro, la durabilidad. También es aplicable con los mismos objetivos, sobre probetas moldeadas, tomadas del hormigón fresco suministrado, previamente a su puesta en obra. En este caso, el procedimiento no aporta información sobre las condiciones de ejecución (colocación, compactación y curado). Para la aplicación de la presión se utiliza un dispositivo que conduce el agua hasta una cámara cilíndrica de 7,5 cm de diámetro, que se coloca concéntricamente sobre la cara de acabado de la probeta de hormigón (que actúa a modo de tapadera de la cámara), situando una junta tórica en la zona de contacto entre la cámara y la probeta.

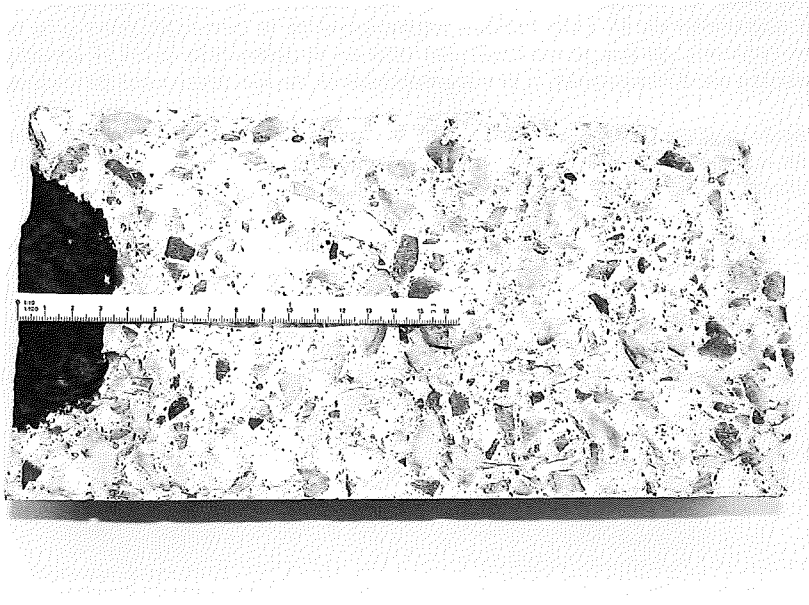
Previamente a la realización del ensayo, se debe proceder al secado parcial del hormigón para la eliminación del agua capilar que pueda existir en los poros. Para ello, se estima suficiente introducir la probeta que se va a ensayar en una cámara de secado durante un período no inferior a 24 horas. Es de gran importancia no alterar la estructura interna del hormigón que se pretende ensayar, por lo que, en ningún caso, se deben superar los 50°C , ni tampoco eliminar toda la humedad del hormigón, pues en caso contrario se producirá el acceso de agua por succión capilar adicionalmente al flujo inyectado por la presión de agua.

Una vez extraída la probeta de la estufa de secado, se deja enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente. Conseguida ésta, y evitando en cualquier caso ambientes de elevada humedad relativa, se procede a la preparación de la superficie de ensayo. Para ello, se recurre a un pulido o repicado de la superficie de acabado de la probeta hasta conseguir eliminar la capa superficial del mortero.

A continuación se procede a la colocación de cada probeta sobre las cámaras que constituyen la célula de permeabilidad. Se acopla cuidadosamente la junta tórica, de forma que evite la posibilidad de fugas por la superficie de ensayo de la probeta.

Una vez situadas las fijaciones que acoplan de forma estanca cada probeta a cada célula, se procede a la aplicación de la presión, iniciando el Ensayo propiamente dicho. Se aplica un primer escalón de presión de 1 bar durante un período de 48 horas, para continuar con otros dos escalones de 3 y 7 bares durante períodos de 24 horas cada uno.

To avoid such problems the procedure followed in INTEMAC laboratories differs depending on whether moulded or extracted specimens are involved. The former, kept in a moist cabinet for 28 days, are completely saturated, and are therefore subjected to drying in a blast draft stove for 72 hours at $50\pm 2^\circ$ C. Thereafter they are placed in the permeability unit and the test is begun.



Fotografía nº 13: Probetas de hormigón (15 x 30 cm) posteriormente a su rotura a tracción indirecta (Ensayo Brasileño), en las que se observa el frente de penetración de agua resultante del ensayo de permeabilidad.

Photograph No. 13: Concrete specimens (15 x 30 cm) after indirect tensile failure (Brazilian Test), showing the permeability test water penetration front.

Core specimens, bored out of the member with a diamond coring drilling machine, on the contrary, are generally humid on the outside (due to the probe coolant water) and dry inside. To obtain reproducible and valid results they must first be stored in water at $20\pm 2^\circ$ C for 48 hours and thereafter dried as described for moulded specimens before the test may be undertaken.

If these precautions are taken and the testing conditions indicated in the standard strictly followed, the method constitutes a very effective tool to study concrete durability. In research conducted at INTEMAC, the method has proven to be suitable for laboratory-manufactured test concrete for use in the study of the impact of the water/cement ratio, cement content, addition of different kinds of inorganic pigments and performance of concrete exposed to thermal cycles, weathering and humidity-dryness cycles for a period of 12 months.

Using concrete specimens taken from control batches, it has likewise been found that the maximum and mean depths recorded for concrete manufactured with the maximum water/cement ratio and the minimum cement content specified in Code EH-91 (see Table 2) for concrete in aggressive environments are lower than the ceilings recommended in that document (50 mm and 30 mm, respectively). Such values are therefore considered to be valid to guarantee sufficient concrete impermeability and, consequently, durability.

At this time, work is nearing completion on research which uses permeability testing to study, among other parameters, the impact of compaction and curing defects on concrete durability. One of the preliminary conclusions of this study is that the test results can be used to quantify curing defects, since the values obtained correlate perfectly to the failures induced in the specimens studied.

Concluido el último escalón de presión, se desacopla cada probeta y se rompe mediante un ensayo a tracción indirecta, según el método brasileño. La probeta, en consecuencia, se rompe por un plano que pasa por dos de sus generatrices opuestas, originándose dos superficies donde se puede posteriormente evaluar la mancha originada por el agua inyectada en el hormigón, tanto la penetración máxima, como la media (cociente entre el área, en mm², ocupada por la mancha y el diámetro de la probeta, en mm).

Siguiendo estas normas o recomendaciones para la realización del Ensayo, se puede encontrar una serie de inconvenientes de orden práctico, que pueden originar graves trastornos en relación con la operatividad del propio ensayo. En resumen, los principales puntos que hay que considerar son los siguientes:

- Si el hormigón posee una humedad interna considerable, puede impedir la visualización adecuada de la mancha producida por el agua penetrada, por lo que la cuantificación de resultados en forma de profundidades de penetración puede ser imposible.
- Por otro lado, si el secado llega a eliminar la humedad de equilibrio de los poros de hormigón, se observan dos frentes de penetración solapados, uno que corresponde al flujo de agua por la presión, y otro que asciende sobre el primero, muy difuso, producido por succión capilar.

Para evitar ambos problemas la pauta seguida en los Laboratorios de INTEMAC es diferente para probetas enmoldadas y probetas testigo extraídas. En el primer caso, al haber sido conservadas durante un plazo de 28 días en cámara húmeda, se encuentran totalmente saturadas, por lo que se procede a realizar un proceso de secado en estufa de tiro forzado durante 72 horas a $50\pm 2^{\circ}\text{C}$. Transcurrido este plazo se ubican directamente en el equipo de permeabilidad y se inicia el ensayo.

En el caso de las probetas testigo, extraídas con sonda rotativa con corona de diamante éstas suelen estar húmedas en su contorno (por el agua de refrigeración de la sonda) y secas en su interior. Para obtener resultados reproducibles y válidos debe procederse inicialmente a su inmersión en agua a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 48 horas, y transcurrido este plazo, efectuar el secado descrito para las probetas moldeadas, e iniciar el ensayo.

Considerado estas precauciones y siguiendo detenidamente las condiciones de ensayo indicadas en la norma, el método se constituye como una herramienta muy eficaz para el estudio de la durabilidad de hormigones. En investigaciones desarrolladas por INTEMAC se ha comprobado la idoneidad del método sobre hormigones de prueba, fabricados en laboratorio para el estudio de la influencia de la relación agua/cemento, del contenido de cemento, de la incorporación de distintos tipos de pigmentos inorgánicos y del comportamiento de hormigones expuesto a ciclos térmicos, a la intemperie y a ciclos de humedad-sequedad durante 12 meses, obteniendo resultados muy satisfactorios.

También se ha constatado sobre probetas de hormigón, tomadas de amasadas patrón, que los hormigones fabricados con la relación agua/cemento máxima y los contenidos de cemento mínimos indicados como preceptivos en la Instrucción EH-91 (véase Tabla n° 2) para hormigones en ambientes agresivos, dan lugar a profundidades de penetración máxima y media inferiores a las máximas recomendadas en el citado documento (50 mm y 30 mm, respectivamente), por lo que dichos valores se consideran válidos para garantizar una suficiente impermeabilidad del hormigón y por ello, su durabilidad.

En la actualidad está llegando a término un trabajo de investigación que, entre otros parámetros, estudia la influencia en la durabilidad del hormigón de los defectos de compactación y curado, mediante ensayos de permeabilidad. Entre las conclusiones preliminares de dicha investigación, se ha constatado que los resultados del ensayo permiten la cuantificación de la magnitud de los defectos de curado, pues los valores obtenidos se correlacionan perfectamente con los fallos inducidos sobre las probetas en estudio.

BIBLIOGRAPHY

- AENOR. UNE 93900 IN: "Hormigón, prestaciones, fabricación, puesta en obra y criterios de aceptación" (ENV 206 y pr EN 206). 1996.
- CEB: "Durable Concrete Structures - CEB Design Guide". CEB Bull. nº 182, 1989.
- CEB-RILEM: "Durability of Concrete Structures". CEB Bull. nº 152, 1984
- CEB: "Draft CEB-GUIDE To Durable Concrete Structures". CEB Bull. nº 166, 1985.
- Perepérez, B., Barberá, E. y Andrade, C.: "La agresividad ambiental y la durabilidad de las estructuras de hormigón". Informes de la Construcción, Vol. 38, nº 388, Marzo/Abril 1987.
- Lauer, K.R.: "Classification of concrete damage caused by chemical attack". Materials and Structures, Vol. 23, 1990.
- Río, A.: "La durabilidad de las estructuras de hormigón". Cemento-Hormigón nº 648, Nov. 1987.
- Biczok, I.: "La corrosión del hormigón y su protección". Ed. Urmo, 1972.
- Polder, R. and Larbi, J.; "Seawater submersion of concrete". Heron, Vol. 40, 1995.
- Eglinton, M.S.: Concrete and its chemical behaviour. Thomas Telford, 1987.
- Mehta, P.K. and Haynes, H.H.: "Durability of concrete in sea water". Proc. Amer. Soc. for Civil Engineers, Vol. 101, 1975.
- Wong, G. and Poole, T.: "The Effect of pozzolans and slags on the sulfate resistance of hydraulic cement mortars". ACI SP 100, Vol. 2, 1987.
- García de Paredes, P.: "Durabilidad del hormigón. Resistencia química de los cementos". Materiales de Construcción nº 170.
- ASTM C 452-95: "Potential Expansion of Portland Cement mortars exposed to sulfate". 1997 Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Cement, Lime, Gypsum.
- CEN pr ENV 196-X: European prestandard draft. Methods of testing cement-Part X: *Determination of the resistance of cements to attack by sulfate solution or by sea water*. CEN, 1995.
- ASTM C 1012-95: "Length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution". 1997 Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Cement, Lime, Gypsum.
- Patzias, T.: "The development of ASTM C-1012 with recommended acceptance limits for sulfate resistance of hydraulic cements". Cement, Concrete and Aggregates. Vol. 13, nº 1, 1991.
- Gálligo, J.M. y Rodríguez, F.: "El ensayo de penetración de agua como método para el control de la durabilidad de un hormigón utilizado en estructuras de puentes de carreteras". Hormigón y Acero, nº 171, 1989.

BIBLIOGRAFIA

- AENOR. UNE 93900 IN: "Hormigón, prestaciones, fabricación, puesta en obra y criterios de aceptación" (ENV 206 y pr EN 206). 1996.
- CEB: "Durable Concrete Structures - CEB Design Guide". CEB Bull. nº 182, 1989.
- CEB-RILEM: "Durability of Concrete Structures". CEB Bull. nº 152, 1984
- CEB: "Draft CEB-GUIDE To Durable Concrete Structures". CEB Bull. nº 166, 1985.
- Perepérez, B., Barberá, E. y Andrade, C.: "La agresividad ambiental y la durabilidad de las estructuras de hormigón". Informes de la Construcción, Vol. 38, nº 388, Marzo/Abril 1987.
- Lauer, K.R.: "Classification of concrete damage caused by chemical attack". Materials and Structures, Vol. 23, 1990.
- Río, A.: "La durabilidad de las estructuras de hormigón". Cemento-Hormigón nº 648, Nov. 1987.
- Biczok, I.: "La corrosión del hormigón y su protección". Ed. Urmo, 1972.
- Polder, R. and Larbi, J.; "Seawater submersion of concrete". Heron, Vol. 40, 1995.
- Eglinton, M.S.: Concrete and its chemical behaviour. Thomas Telford, 1987.
- Mehta, P.K. and Haynes, H.H.: "Durability of concrete in sea water". Proc. Amer. Soc. for Civil Engineers, Vol. 101, 1975.
- Wong, G. and Poole, T.: "The Effect of pozzolans and slags on the sulfate resistance of hydraulic cement mortars". ACI SP 100, Vol. 2, 1987.
- García de Paredes, P.: "Durabilidad del hormigón. Resistencia química de los cementos". Materiales de Construcción nº 170.
- ASTM C 452-95: "Potential Expansion of Portland Cement mortars exposed to sulfate". 1997 Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Cement, Lime, Gypsum.
- CEN pr ENV 196-X: European prestandard draft. Methods of testing cement-Part X: *Determination of the resistance of cements to attack by sulfate solution or by sea water*. CEN, 1995.
- ASTM C 1012-95: "Length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution". 1997 Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Cement, Lime, Gypsum.
- Patzias, T.: "The development of ASTM C-1012 with recommended acceptance limits for sulfate resistance of hydraulic cements". Cement, Concrete and Aggregates. Vol. 13, nº 1, 1991.
- Gálligo, J.M. y Rodríguez, F.: "El ensayo de penetración de agua como método para el control de la durabilidad de un hormigón utilizado en estructuras de puentes de carreteras". Hormigón y Acero, nº 171, 1989.

Relación de Personal Titulado de INTEMAC

Arquitectos

Jalvo García, Jaime
Luzón Cánovas, José M^a

Ingenieros de Caminos

Barrios Corpa, Roberto
Bauzá Ortúñez, Andrés
Calavera Ruiz, José
Calderón Apolo, Juan Carlos
Cortés Bretón, Juan María
Corral Folgado, Claudio
Cuesta Martín, José Ignacio
Díaz Lozano, Justo
Fernández Gómez, Jaime Antonio
González González, Juan José
González Tojo, Julio Antonio
González Valle, Enrique
Hostalet Alba, Francisco
Izquierdo Bernaldo de Quirós, José M^a
Jordán de Urríes de la Riva, Jorge
Ley Urzaiz, Jorge
Rodríguez Escribano, Raul Rubén
Rodríguez Romero, Jesús M^a
Sanz Pérez, Lorenzo
Sirvent Sirvent, Enrique
Tapia Menéndez, José
Torre Cobo, María Carmen
Vilardell Carbonell, Jordi

Ingeniero I.C.A.I.

Marín Estévez, Gonzalo
Escarpizo-Lorenzana Martínez, Jorge

Ingenieros Industriales

Alvarez Cabal, Ramón Amado
Arroyo Arroyo, José Ramón
Bueno Bueno, Jorge
Durán Boldova, José Miguel
Santos Olalla, Francisco
Valenciano Carles, Federico

Ingeniero de Telecomunicación

San José Arribas, José

Licenciados en Ciencias Geológicas

Blanco Zorroza, Alberto

Licenciados en Ciencias Químicas

Grandes Velasco, Sylvia María
López Sánchez, Pedro
Morgado Sánchez, José Carlos

Licenciada en Geografía e Historia

Calavera Vayá, Ana María

Arquitectos Técnicos

Custodio Sánchez, José M^a
Díez García, Francisco Javier
Miranda Valdés, Javier
Montaña del Hoyo, Noelia
Montejano Jiménez, María del Carmen
Muñoz Mesto, Angel
París Sánchez, Eva María
Villacián Fernández, Aránzazu

Ingenieros Técnicos Industriales

Díaz-Trechuelo Laffón, Antonio
González Carmona, Manuel
Madueño Moraño, Antonio

Ingenieros Técnicos Obras Públicas

Aranda Cabezas, Lluís
Carrero Crespo, Rafael
Galán de Cáceres, M^a del Puerto
González Isabel, Germán
González Nuño, Luis
Mata Soriano, Juan Carlos
Montiel Sánchez, Ernesto
Muñoz Mesto, Angel
Rosa Moreno, José Andrés
Rozas Hernando, José Juan
Sánchez Vicente, Andrés

Ingenieros Técnicos Topógrafos

Carreras Ruiz, Francisco
Molero Vicente, M^a Isabel

Profesores Mercantiles

González Alvarez, Vicente
Sampedro Portas, Arturo

Técnico en Administración de Empresas

González del Olmo, M^a de la Peña de F.

Técnico en Informática

García Rodríguez, Juan Tomás

Técnico en Publicidad

Blanco Armas, Cristina

Topógrafo

Alquézar Falceto, Ricardo

CUADERNOS INTEMAC

CUADERNOS INTEMAC es una publicación trimestral, bilingüe en español e inglés, en forma de monografías que recogen trabajos realizados por los técnicos del Instituto o presentados en los Cursos y Conferencias organizados por el mismo.

Los temas tratados cubren tanto el campo de las Obras Públicas como el de la Edificación y sus Instalaciones.

• **Tarifa de suscripción anual 2.800 ptas.**



ULTIMOS TITULOS PUBLICADOS

Cuaderno Nº 30

“Una investigación sobre la eficacia de los distintos sistemas de reparación de estructuras de hormigón dañados por corrosión”
Autores: **Prof. Adolfo DELIBES LINERS. (†)**

Dr. Ing. de Caminos.
Prof. Jaime FERNÁNDEZ GÓMEZ.

Dr. Ing. de Caminos.
Pedro LÓPEZ SÁNCHEZ.
Ldo. en Ciencias Químicas.

Cuaderno Nº 31

“Durabilidad del hormigón en ambientes marinos”
Autor: **Pedro LÓPEZ SÁNCHEZ.**
Ldo. en Ciencias Químicas.

CUADERNOS DE PROXIMA APARICION

Cuaderno Nº 32

“Cálculo de muros cortina”
Autores: **Prof. Ramón ÁLVAREZ CABAL.**

Dr. Ing. Industrial.
José Ramón ARROYO ARROYO.
Ing. Industrial.
Francisco SANTOS OLALLA.
Ing. Industrial.

MONOGRAFÍAS INTEMAC

A partir de junio de 1998 INTEMAC emprendió una nueva línea de publicaciones con un carácter eminentemente práctico, destinadas a tratar temas muy concretos que, o bien presentan un nivel de problemas acusados en la práctica, o bien están insuficientemente cubiertos por la Normativa y la documentación técnica existente.

MONOGRAFÍA INTEMAC Nº1

“Drenaje de plantas bajas de edificios y drenaje e impermeabilización de sótanos”
Autores: **Prof. J. Calavera, J. Jalvo, J. Ley, J.Mª. Luzón y J. Tapiá**

Precio de la Monografía 3.200 Ptas.

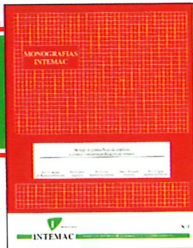
MONOGRAFIA DE PRÓXIMA APARICIÓN (NOV. 98)

MONOGRAFÍA INTEMAC Nº2

“Puntos críticos en la impermeabilidad de azoteas y fachadas”

Autores: **J. Jordán de Urriés, J. Jalvo, J.Mª. Luzón y A. Muñoz Mesto**

Precio de la Monografía 3.200 Ptas.



VIDEOS TECNICOS

INTEMAC, dentro de sus actividades en el campo de la formación, ha iniciado la edición de una serie de VIDEOS TECNICOS, analizando distintos campos de la construcción.

SERIE OBRAS DE HORMIGON EN MASA, ARMADO Y PRETENSADO.

REFERENCIA	TITULO	CONTENIDO	DURACION	PRECIO
Nº 8801 (1)	FABRICACION Y ENSAYO DE PRÓBETAS DE HORMIGON	Contempla, de forma completa y detallada, el proceso de toma de muestras de hormigón fresco en obra, medida de consistencia con el cono de Abrams, fabricación de probetas, curado en obra, transporte al laboratorio, curado en cámara, refrentado y ensayo a compresión.	27 min.	80.000 ptas* IVA INCLUIDO

* PRECIO para entregas dentro del territorio español



BOLETIN BIBLIOGRAFICO

BOLETIN BIBLIOGRAFICO
9207
SERVICIO DE DOCUMENTACION

INTEMAC viene realizando desde su fundación un BOLETIN BIBLIOGRAFICO para uso interno, que ofrece, en una lectura rápida, un panorama general de todas las publicaciones técnicas disponibles. Desde 1991, esta publicación bimestral, ha sido puesta a disposición del público.

EL BOLETIN BIBLIOGRAFICO incluye:

- Fotocopia del índice y de los resúmenes de los artículos contenidos en las 105 revistas técnicas que se reciben en el Instituto referentes a los campos de la Edificación, Instalaciones, Obras Públicas y Urbanismo.
 - Una sección de Normativa reciente, nacional y extranjera.
 - Secciones de Bibliografía y Cursos.
 - Una sección de Congresos, Reuniones Técnicas y Ferias de próxima celebración en todo el mundo.
- **Tarifa de suscripción anual (6 números) 18.000 ptas.**



CONSULTAS E INFORMES BIBLIOGRAFICOS

EL INSTITUTO tiene un SERVICIO DE DOCUMENTACION, que pone a su disposición y que le puede informar sobre cualquier tema relacionado con la Edificación, Instalaciones, Obra Civil y Urbanismo. Se efectúan CONSULTAS BIBLIOGRAFICAS sobre cualquiera de los temas indicados anteriormente, de acuerdo con las siguientes tarifas:

Apertura de expediente	2000 ptas.
Cantidad a abonar por referencia	60 ptas.
Cantidad a abonar por hoja de fotocopia de documento	25 ptas

Además de la Consulta Bibliográfica correspondiente, el INFORME BIBLIOGRAFICO contiene un breve documento redactado por un especialista en el tema, miembro de INTEMAC, con una serie de recomendaciones sobre la Bibliografía básica, así como los comentarios correspondientes.

Tarifa correspondiente al Informe Bibliográfico: 15.000 ptas. más la tarifa de la consulta.

ARTICULOS TECNICOS

INTEMAC dispone de una amplia serie de trabajos publicados por nuestros técnicos en diferentes revistas. A continuación incluimos la lista de los últimos. Si está Vd. interesado, solicite relación completa de títulos.

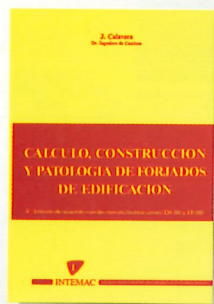
- 66 INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD Y LA CUANTÍA DE COSIDO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS PIEZAS COMPUESTAS SOLICITADAS A FLEXIÓN
Enrique González Valle; Jaime Gálvez Ruiz; Luis García Dutari; Ramón Álvarez Caval.
- 67 EL HORMIGON DE ALTA RESISTENCIA (HSC): LAS CARACTERÍSTICAS QUE CONDICIONAN EL CALCULO ESTRUCTURAL. Enrique González Valle.
- 68 LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE INFORMACIÓN EN LAS OBRAS. Adolfo Delibes Liniers.
- 69 INVESTIGACIÓN SOBRE REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO DAÑADAS POR CORROSIÓN DE ARMADURAS. Adolfo Delibes Liniers; Jaime Fernández Gómez.
- 70 HORMIGONADO EN CONDICIONES METEOROLÓGICAS ADVERSAS: ESTUDIO DE LOS ACCIDENTES OCURRIDOS DURANTE EL HORMIGONADO DE UN TABLERO POSTENSADO. Adolfo Delibes Liniers; Jaime Fernández Gómez; Miguel Ángel Acón Robleña.
- 71 LA INFLUENCIA DEL DIAGRAMA TENSIÓN DEFORMACIÓN EN EL CÁLCULO A FLEXIÓN DE SECCIONES REALIZADAS CON HORMIGONADO DE ALTA RESISTENCIA. Enrique González Valle; José Mª Izquierdo; Bernaldo de Quirós.
- 72 EFECTOS DINÁMICOS EN PUENTES. VARIACION DEL COEFICIENTE DE IMPACTO. Enrique López del Hierro Fernández; Juan José Benito Muñoz; Javier Gallego Valarde; Ramón Álvarez Cabal.
- 73 CUBIERTAS METÁLICAS DE GRAN LUZ. Mercedes Gómez Álvarez; Justo Díaz Lozano; Ramón Álvarez Cabal.
- 74 LA INSPECCIÓN Y ENSAYO. ORGANIZACIONES DE CONTROL DE CALIDAD Y LABORATORIOS. José Calavera Ruiz.

P.V.P. 400 ptas./ ejemplar.

ARTICULOS TECNICOS
SERVICIO DE DOCUMENTACION



AGOTADO



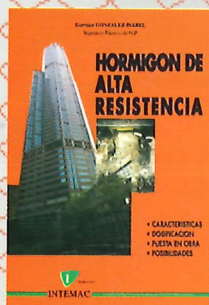
CÁLCULO, CONSTRUCCIÓN Y PATOLOGÍA DE FORJADOS DE EDIFICACIÓN

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

4ª Edición (1988)

- 678 páginas
- Encuadernación en guaflex

Precio: 7.900 Pta.



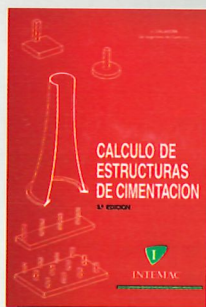
HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

G. GONZÁLEZ-ISABEL
(Ingeniero Técnico de O. P.)

- 316 páginas
- Encuadernación en guaflex

Precio: 6.500 Pta.

AGOTADO



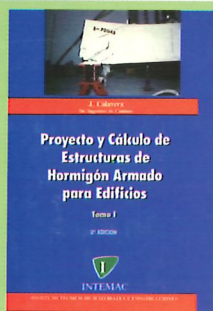
CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE CIMENTACIÓN

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

3ª Edición (1991)

- 418 páginas

Precio: 8.000 Pta.

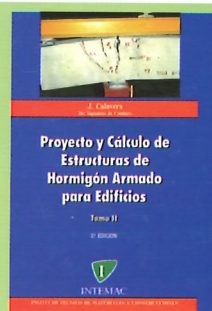


PROYECTO Y CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO PARA EDIFICIOS (TOMO I)

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

2ª Edición (1991)

- Tomo I - Cálculo de esfuerzos
- 568 páginas
- Encuadernación en guaflex



PROYECTO Y CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO PARA EDIFICIOS (TOMO II)

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

2ª Edición (1991)

- Tomo II - Dimensionamiento y detalles constructivos
- 871 páginas
- Encuadernación en guaflex

Precio obra completa: 17.500 Pta.



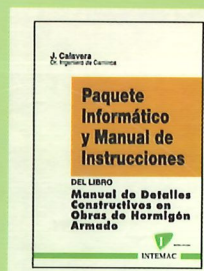
MANUAL DE DETALLES CONSTRUCTIVOS EN OBRAS DE HORMIGÓN ARMADO

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

- 506 páginas, tamaño UNE A-4 • 210 detalles constructivos • 210 páginas de comentarios y recomendaciones • Encuadernación en guaflex

Precio: - Libro: 16.000 Pta. - Paquete informático: 30.000 Pta.
(Manual de Instrucciones y Disquetes)

El libro y el programa se venden por separado



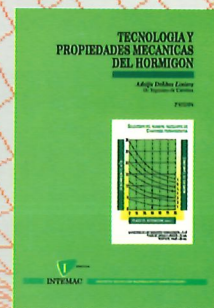
MUROS DE CONTENCIÓN Y MUROS DE SÓTANO

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

2ª Edición (1989)

- 307 páginas
- Encuadernación en guaflex

Precio: 7.000 Pta.



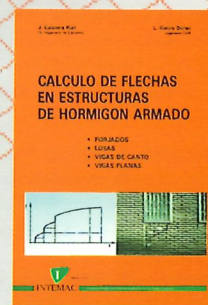
TECNOLOGÍA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

A. DELIBES (Dr. Ingeniero de Caminos)

2ª Edición (1993)

- 396 páginas
- Encuadernación en guaflex

Precio: 7.500 Pta.



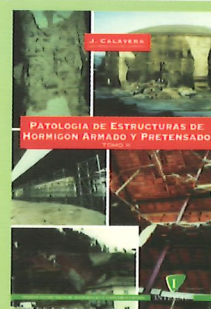
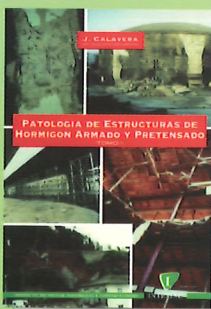
CÁLCULO DE FLECHAS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

L. GARCÍA DUTARI (Ingeniero Civil)

- 336 páginas
- 312 tablas de comprobación de Forjados, Losas, Vigas de Canto y Vigas Planas
- Un disquete conteniendo tres programas informáticos de Cálculo de Flechas, para secciones de forma cualquiera
- Encuadernación en guaflex

Precio: 7.400 Pta.
(Libro más paquete Informático)



PATOLOGÍA DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO Y PRETENSADO

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

- Tomo I - Capítulos 1 a 12 • Tomo II - Atlas de fisuras - Ábacos de cálculo
- 680 páginas • 231 fotografías • 258 figuras • 118 referencias bibliográficas
- Encuadernación en guaflex

Precio de la obra completa: 16.000 Pta.