

CUADERNOS INTEMAC

Vida útil de las estructuras de hormigón

Service life of concrete structures

Steen Rostam
MSc PhD
Cowi A/S Denmark



METIRE UT SCIAS

INTEMAC

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

N.º 61

1.º TRIMESTRE '06

INTEMAC



METIRE UT SCIAS

INTEMAC

INSTITUTO TÉCNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

CONTROL DE PROYECTO

CONTROL DE OBRA

GARANTÍA DE CALIDAD

(O.C.T.) CONTROL PARA EL SEGURO DE DAÑOS

INFORMES DE PATOLOGÍA, REHABILITACIÓN Y REFUERZOS DE CONSTRUCCIONES

OBRAS PÚBLICAS
EDIFICACIÓN
INSTALACIONES



INTEMAC
A U D I T

AUDITORIA TÉCNICO-ECONÓMICA DE CONSTRUCCIONES

- ASESORÍA EN EL PLANTEAMIENTO Y EN LA CONTRATACIÓN DE LA OBRA
- SEGUIMIENTO DE COSTOS Y PLAZOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN
- VALORACIONES DE TERRENOS, INMUEBLES Y CONSTRUCCIONES
- AUDITORÍAS DE TRABAJOS PARCIALES Y DE LIQUIDACIÓN DE LA OBRA



INTEMAC
E C O

AUDITORÍA TÉCNICA MEDIOAMBIENTAL

CONTROL DE IMPACTO AMBIENTAL

Obras Públicas
Edificación
Instalaciones

CONTROL DE CALIDAD AMBIENTAL

Aire
Agua
Ruido

AUDITORÍA MEDIOAMBIENTAL

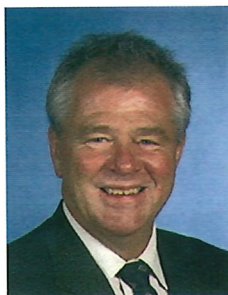
ASESORAMIENTO EN MATERIA DE MEDIO AMBIENTE

VIDA ÚTIL DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

SERVICE LIFE OF CONCRETE STRUCTURES

A este trabajo del Dr. Rostam le fue concedido el premio internacional
José Calavera 2004, patrocinado por ANIFER

This document has been awarded with the international prize
José Calavera 2004, exponsored by ANIFER



Steen Rostam
MSc PhD
COWI A/S
Denmark

Copyright © 2006, 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-49879-2004

Invoprint, s.l.

CONTENTS

1. INTRODUCTION AND BACKGROUND
 - 1.1 TODAY'S CORROSION PREVENTION
 - 1.2 ALTERNATIVE MEANS OF CORROSION PREVENTION
 - 1.3 THE FOCUS OF THIS PAPER
2. HIGH PERFORMANCE CONCRETE AS CORROSION PREVENTION
 - 2.1 MONOPOLISED RESEARCH
 - 2.2 SELF COMPACTING CONCRETE (SCC)
 - 2.3 PERMEABILITY CONTROLLED FORMWORK LINER (PFL)
3. DURABILITY AND THE SERVICE LIFE DESIGN CONCEPT
 - 3.1 DEEM-TO-SATISFY DESIGN FOR DURABILITY
 - 3.2 ST GENERATION SLD STRATEGY: MULTI-STAGE PROTECTION
 - 3.3 2ND GENERATION SLD STRATEGY: RELIABILITY-BASED METHODOLOGY
 - 3.4 3.4 CRACKED CONCRETE
 - 3.5 3.5 RELIABILITY UPDATING, AND THE "BIRTH CERTIFICATE"
4. CORROSION PREVENTION THROUGH OTHER MEANS THAN CONCRETE
 - 4.1 COATINGS OF CONCRETE OR REINFORCEMENT
 - 4.1.1 R4.1.1 COATING OF CONCRETE
 - 4.1.2 R4.1.2 EPOXY COATING OF REINFORCEMENT
 - 4.1.3 RHOT-DIP GALVANISED REINFORCEMENT
 - 4.2 CORROSION INHIBITORS
 - 4.3 CATHODIC PREVENTION
 - 4.4 NON-METALLIC REINFORCEMENT
5. CORROSION RESISTANT STEEL REINFORCEMENT (CRSR)
 - 5.1 STAINLESS STEEL REINFORCEMENT (SSR)
 - 5.2 STAINLESS STEEL CLADDED BLACK STEEL REINFORCEMENT
 - 5.3 MICROCOMPOSITE MULTISTRUCTURAL FORMABLE STEEL ("MMFX")
 - 5.4 SPECIALLY ALLOYED STEELS
 - 5.4.1 "TOP 12"
 - 5.4.2 "LEAN DUPLEX"
6. DURABILITY MONITORING AS PART OF PREVENTIVE MAINTENANCE
 - 6.1 PRELIMINARY EXPERIENCE WITH POST-INSTALLED SENSORS
7. INITIAL COSTING AND LIFE CYCLE COSTING (LCC)
8. CONCLUSION
9. REFERENCES

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO
 - 1.1 LA PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN EN LA ACTUALIDAD
 - 1.2 MEDIOS ALTERNATIVOS DE PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN
 - 1.3 OBJETIVO DEL PRESENTE ESTUDIO
2. EL HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES COMO MEDIDA DE PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN
 - 2.1 UNA INVESTIGACIÓN MONOPOLIZADA
 - 2.2 EL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE (SCC)
 - 2.3 REVESTIMIENTOS DE ENCOFRADOS DE PERMEABILIDAD CONTROLADA (PFL)
3. LA DURABILIDAD Y EL CONCEPTO DE PREVISIÓN DE VIDA ÚTIL
 - 3.1 REGLAS DE BUENA PRÁCTICA PARA LA DURABILIDAD
 - 3.2 ESTRATEGIA SLD DE PRIMERA GENERACIÓN: PROTECCIÓN POR FASES MÚLTIPLES
 - 3.3 ESTRATEGIA SLD DE SEGUNDA GENERACIÓN: METODOLOGÍA BASADA EN LA FIABILIDAD
 - 3.4 FISURAS EN EL HORMIGÓN
 - 3.5 LA ACTUALIZACIÓN DE LA FIABILIDAD Y LA "PARTIDA DE NACIMIENTO"
4. LA PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN A TRAVÉS DE OTROS MEDIOS DISTINTOS DEL HORMIGÓN
 - 4.1 REVESTIMIENTOS DEL HORMIGÓN O DE LA ARMADURA
 - 4.1.1 REVESTIMIENTO DEL HORMIGÓN
 - 4.1.2 REVESTIMIENTO DE LA ARMADURA CON EPOXY
 - 4.1.3 ARMADURA GALVANIZADA EN BAÑO CALIENTE
 - 4.2 INHIBIDORES DE CORROSIÓN
 - 4.3 PROTECCIÓN CATÓDICA
 - 4.4 ARMADURAS NO METÁLICAS
5. ARMADURA DE ACERO RESISTENTE A LA CORROSIÓN (CRSR)
 - 5.1 ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE (SSR)
 - 5.2 ARMADURAS DE ACERO NEGRO REVESTIDAS DE ACERO INOXIDABLE
 - 5.3 ARMADURAS DE ACERO "MICROCOMPOSITE" ("MMFX")
 - 5.4 ACEROS DE ALEACIONES ESPECIALES
 - 5.4.1 "TOP 12"
 - 5.4.2 "LEAN DUPLEX"
6. EL SEGUIMIENTO DE LA DURABILIDAD COMO PARTE DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO
 - 6.1 EXPERIENCIA PRELIMINAR CON SENSORES INSTALADOS A POSTERIORI
7. LOS COSTES INICIALES Y EL COSTE DEL CICLO DE VIDA (LCC)
8. CONCLUSIÓN
9. REFERENCIAS

PREAMBLE

When looking back at the past three decades of research and industrial development within the design and construction of well-performing long lasting concrete structures the areas of development seem to be well represented by the cartoon-type description below:

In the evening a man is seen bent forward looking around on the sidewalk beneath a lamp post, seemingly seeking for something he has lost.

Another man comes by and asks what the first man is looking for. "My door keys which I lost" the first man replies. "Well, let me help you" the second man answers.

After some time when both men have been seeking in vain, the second man asks the first man "Can't you remember precisely where you lost your keys?"

"Oh yes" the first man replies, "I lost them over there on the other side of the street, by my front door".

Disturbed the second man reacts "but why are you then looking for your keys here?"

"Because there is light here under the lamp post, - I can't see anything over there in the dark in front of my door where there is no lamp"

Attempts to solve the durability and service life aspects of concrete structures seem to have been "seeking solutions where it was easy to look" - and not necessarily where the real problems occurred.

1. INTRODUCTION AND BACKGROUND

The scope of structural design should be to create structures to serve society in general and to serve the owner and users in particular.

In this perspective the specific focus on either the types and performance of concrete or on the types and performance of reinforcement are isolated issues by themselves and as such not sufficient in an integrated design of structures. This would correspond to look for "solutions" where there is light - where it is easy - and not where the real problem occurs - where it is difficult.

However, optimising the materials composition together with the composite action of the two key components of structural concrete, namely concrete and reinforcement, can create highly attractive and very well performing reinforced concrete structures in both a short-term and a long-term perspective. This will also be a precondition to ensure the overall future competitiveness of structural concrete compared to other construction materials, especially structural steel.

The occasional - but often spectacular - mal-performance of concrete structures, particularly with respect to durability, illustrates well the conflict occurring when each component, concrete and reinforcement, is developed, and optimised independently of each other. This problem is particularly evident when considering the durability performance in environments being corrosive for reinforcement.

PREÁMBULO

Si se echa una mirada retrospectiva a las tres últimas décadas de investigación y desarrollo industrial en el ámbito del cálculo y ejecución de estructuras de hormigón duraderas y con altas prestaciones, los aspectos objeto de desarrollo parecen quedar bien reflejados en el siguiente chiste:

Es de noche y hay un hombre agachado junto a una farola, al parecer buscando en la acera algo que ha perdido.

Se acerca otro hombre y le pregunta qué está buscando. «Las llaves de mi casa, que se me han perdido», responde el hombre. «Permítame que le ayude», contesta el otro.

Cuando los dos hombres llevan un rato buscando en vano, el que había llegado en segundo lugar le pregunta al primero: «¿Se acuerda usted de dónde se le han caído las llaves?»

«Sí, claro», responde, «se me han caído al otro lado de la calle, junto a la puerta de mi casa».

«Entonces, ¿por qué las está buscando aquí?»», replica molesto el otro hombre.

«Porque aquí, debajo de la farola, hay luz, mientras que allí, delante de mi puerta, como no hay bombilla no se ve nada»

Los intentos de resolver los aspectos de la durabilidad y vida útil de las estructuras de hormigón parecen haber estado «buscando soluciones donde era fácil buscar» y no necesariamente donde realmente se producían los problemas.

1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

La finalidad del cálculo estructural debería ser la de crear estructuras que sean útiles para la sociedad en general y para los propietarios y los usuarios en particular.

Desde este punto de vista, analizar específicamente los tipos de hormigón y su comportamiento o bien los tipos de armadura y su comportamiento supone centrarse en cuestiones aisladas que, como tales, no son suficientes para el cálculo integral de estructuras. Esto equivaldría a buscar «soluciones» donde hay luz, allí donde es fácil, en vez de buscarlas donde se produce el verdadero problema, allí donde es difícil buscar.

En cambio, optimizar la composición de los materiales así como la acción conjunta de los dos componentes esenciales del hormigón estructural, esto es, el hormigón y la armadura, puede dar lugar a unas estructuras de hormigón armado muy atractivas y de muy buen rendimiento tanto a corto como a largo plazo. Esta postura constituye, además, una condición previa para garantizar la competitividad general del hormigón estructural en el futuro frente a otros materiales de construcción, especialmente frente al acero estructural.

El ocasional (pero, a menudo espectacular) bajo rendimiento de las estructuras de hormigón, en particular en lo que respecta a durabilidad, sirve para ilustrar el conflicto que se produce cuando cada uno de los componentes, el hormigón y la armadura, se desarrolla y se optimiza por separado. Este problema queda especialmente de manifiesto al analizar la durabilidad en entornos corrosivos para la armadura.

1.1. LA PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN EN LA ACTUALIDAD

La corrosión de la armadura se ha convertido en la causa más importante del deterioro prematuro y costoso de las

1.1. TODAY'S CORROSION PREVENTION

Reinforcement corrosion has developed into the most serious cause of costly premature deterioration of concrete structures. The "lucky shot" when reinforced concrete was invented by Monièr for his flowerpots a century and a half ago was the very effective corrosion protection of cast-in iron which was created by the alkaline Portland cement concrete surrounding the iron. Nevertheless it was realised with time that the passivating effect of the alkaline environment was eliminated when either a carbonation front or chlorides in sufficient quantity reached the level of the reinforcement. With sufficient moisture availability corrosion could in either case develop and the usually expansive rust products caused cracking, delamination and spalling of the concrete cover. The falling pieces of concrete created hazards to people and the reduced concrete and steel sections reduced the structural safety.

The effect of the ingress of carbon dioxide, chlorides and water drew attention to the need to prevent or delay the ingress of deleterious substance. This led to a dominating focus on the quality of the concrete in the cover (permeability, diffusivity and capillarity) and the thickness of the cover on the reinforcement. This has been the main fuel for research and development of very dense and impermeable concrete, so-called high performance concrete (HPC). This development has dominated concrete research up through the 80'ies and 90'ies. The results have technically been successful. However, the practical use of such concretes on site have often posed serious difficulties, resulting in at times very low performance concrete structures although HPC was specified. The discrepancy between concrete quality reached in the laboratory, what is being specified in the design and what can realistically be achieved on site is seldom in balance.

No matter how trivial the above account of the development of efforts to ensure durable concrete structures is, it still point to a development that seems to have been very one-sided, namely to rely mainly on the concrete mix, in the form of so-called high performance concrete, and concrete cover, to protect the reinforcement against corrosion, no matter what type and how corrosive the environment was.

In short: High performance concrete does not necessarily provide high performance concrete structures, [1].

1.2. ALTERNATIVE MEANS OF CORROSION PREVENTION

Other protective measures such as coatings of reinforcement or concrete, cathodic prevention, corrosion inhibiting admixtures, and non-metallic reinforcement are being used but until now with limited success, probably because of the practical complications, and for some measures because of uncertain reliability of the long-term performance.

Corrosion resistant steel reinforcement (CRSR), in particular stainless steel reinforcement (SSR), is now the new and very reliable corrosion preventive measure being available to the designer. This measure can be shown to only solve the corrosion problems and having no influence on the structural design.

1.3. THE FOCUS OF THIS PAPER

In the following the consequences of the development of the different corrosion preventive measures are highlighted and the alternative measures discussed, with particular reference to steel reinforcement.

A key issue to consider is the fact that most durability enhancing measures assume á priori that the concrete in the structure remains uncracked, which is in obvious disharmony with reality. In fact, it shall be recalled that reinforced concrete is designed by assuming the sections to be cracked. The designer shall just control the cracking.

The paper will focus on the current challenges - and the future stimulating possibilities - for the steel based reinforcement industry. It presents the overall long-term performance requirements of concrete structures and thus provides a reference background to allow this industry to adjust future focus towards satisfying more integrated performance based service life demands in the creation and use of reinforced concretes structures. In short, it also leads to an enhancement of the competitiveness of structural concrete.

2. HIGH PERFORMANCE CONCRETE AS CORROSION PREVENTION

The focus on concrete penetrability has nourished the past several decades' research and development of very dense and impermeable concrete by focusing on the type of cementitious binder and the water-binder ratio. Inclusion of pozzolanas, in particular special hydraulic mineral admixtures like silica fume, fly ash and ground

estructuras de hormigón. Cuando Monièr inventó el hormigón armado para sus macetas hace un siglo y medio, la «suerte» fue que el cemento alcalino Portland que empleó para rodear el hierro proporcionaba a éste una muy eficaz protección contra la corrosión. No obstante, con el tiempo se observó que el efecto de pasivación por el entorno alcalino quedaba eliminado en el momento en que el frente de carbonatación o una cantidad suficiente de cloruros alcanzaba el nivel de la armadura. Cuando existía una cierta humedad, en cualquiera de los dos casos, surgía la corrosión y los productos oxidantes, normalmente expansivos, causaban agrietamiento, delaminación y desconchado del recubrimiento de hormigón. La caída de trozos del hormigón suponía un riesgo para las personas y, a su vez, la menor cantidad de hormigón y acero restante disminuía la seguridad estructural.

Las consecuencias de la entrada de dióxido de carbono, cloruros y agua subrayaron la necesidad de impedir o retrasar esta entrada de sustancias dañinas, haciendo así que el acento se pusiera sobre todo en la calidad del recubrimiento de hormigón (permeabilidad, capacidad de difusión y capilaridad) y en el grosor del recubrimiento de la armadura. Este fue el motivo principal que impulsó la investigación y el desarrollo de un hormigón muy denso e impermeable, llamado hormigón de altas prestaciones (HPC, según sus siglas en inglés), el cual dominó la investigación en materia de hormigón a lo largo de la década de los ochenta y los noventa. Los resultados han sido un éxito desde el punto de vista técnico. Sin embargo, el uso de este tipo de hormigón en la práctica ha planteado a menudo graves dificultades y, en ocasiones, ha dado lugar a unas estructuras de hormigón de muy escasa resistencia, a pesar de estar especificado como HPC. Casi siempre se produce una discrepancia entre la calidad del hormigón conseguida en el laboratorio, la que se especifica en el proyecto y la que puede en realidad lograrse en la práctica.

Por muy superficial que resulte la explicación que se acaba de ofrecer sobre la evolución de los esfuerzos dirigidos a conseguir estructuras de hormigón duraderas, lo cierto es que tales esfuerzos parecen, en gran medida, haber ido en un único sentido: centrarse principalmente en la mezcla del hormigón, esto es, en el llamado hormigón de altas prestaciones y en el recubrimiento de hormigón, para proteger la armadura de la corrosión, con independencia del tipo de entorno y de lo corrosivo que éste fuera.

Dicho de manera muy sucinta: el hormigón de altas prestaciones no proporciona necesariamente estructuras de hormigón altamente resistentes [1].

1.2. MEDIOS ALTERNATIVOS DE PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN

Se están utilizando otras medidas protectoras tales como el revestimiento de la armadura o del hormigón, la protección catódica, los aditivos inhibidores de la corrosión y las armaduras no metálicas; pero hasta la fecha han tenido escaso éxito, probablemente debido a las complicaciones prácticas y, en el caso de algunas de estas medidas, a la incierta fiabilidad del comportamiento a largo plazo.

Las armaduras de acero resistente a la corrosión (CRSR, según sus siglas en inglés), y en particular, las de acero inoxidable (SSR), constituyen un medio nuevo y muy fiable de prevenir la corrosión que se brinda al proyectista de hoy. Puede demostrarse, además, que esta medida sólo resuelve los problemas de corrosión y no afecta en modo alguno al cálculo estructural.

1.3. OBJETIVO DEL PRESENTE ESTUDIO

A continuación, se señalan las consecuencias derivadas del desarrollo de las diferentes medidas de prevención de la corrosión y se analizan las alternativas, con especial referencia a las armaduras de acero.

Una cuestión clave que ha de tenerse en cuenta es el hecho de que la mayoría de las medidas de mejora de la durabilidad asume a priori que el hormigón de la estructura se mantiene sin grietas, lo cual está en evidente contradicción con la realidad. De hecho, ha de recordarse que el hormigón armado se proyecta asumiendo que se va a fisurar y que lo único que debe hacer el proyectista es intentar controlar esa fisuración.

En el presente estudio se analizan los retos actuales (y las alentadoras posibilidades futuras) que tiene ante sí el sector de las armaduras de acero. Se exponen, asimismo, los requisitos generales de comportamiento a largo plazo de las estructuras de hormigón, con el fin de ofrecer un referente que permita al sector adaptar en el futuro sus objetivos a la satisfacción de demandas de una vida útil basada en el rendimiento integral de las estructuras de hormigón armado, a la hora de la creación y utilización de las mismas. En resumen, una estrategia que conduce también a la mejora de la competitividad del hormigón estructural.

2. EL HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES COMO MEDIDA DE PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN

La permeabilidad del hormigón ha centrado la atención de los investigadores durante varias décadas y ha dado lugar

granulated blast furnace slag have dominated this development. In addition, the introduction of chemical plasticisers and superplasticisers have allowed the water-binder ratio to be lowered to very extreme values, in practice between 0.3 and 0.4, and still provide workable concretes. The results of this development are the high performance concretes (HPC).

The development of such HPC has had a number of less noticed adverse effects regarding the corrosion protection of reinforcement. The main adverse effect is the unavoidable lowering of the total content of calcium hydroxide in the concrete stemming from the reaction of the Portland cement clinker with water. A smaller or larger part of the calcium hydroxide is consumed to activate the pozzolanas. This leads only to a small lowering of the alkalinity (pH) of the porewater in the concrete but to a substantial lowering of the available buffer capacity, in the form of crystals available, to resist carbonation. The effective threshold value for chloride induced corrosion is also reduced following the reduced alkalinity. The lost inherent chemical protection must therefore be compensated by ensuring a truly achievable less penetrable concrete cover in the final structure.

This latter effect then draws attention to the dominating influence of the execution process to achieve HPC in practice.

HPC has proven much more sensitive to the quality and details of the execution process. In particular the risks of early age cracking such as plastic shrinkage cracking and thermal cracking are much more pronounced for HPC than for the more traditional concretes. The large chemical shrinkage (autogenous shrinkage) of HPC has "consumed" parts of the available early strain capacity making the hardening concrete brittle and sensitive to the unavoidable early age strains. Such strains develop due to water evaporation after finishing trowelling exposed concrete surfaces and when the concrete is exposed to strains caused by temperature differences during heating of the concrete due to hydration of the cement followed by a cooling to ambient temperature. This much increased sensitivity of HPC compared to more traditional or classical concrete is an often overlooked problem in practice. It highlights the serious difference between laboratory testing and practice - or between research and in situ works.

2.1. MONOPOLISED RESEARCH

It should therefore be noted that when focusing on the concrete quality in the cover to protect the reinforcement against ingressing corrosive substance, this quality concrete must in practice be used in the whole concrete section for the members in question. Such bulk concrete therefore unnecessarily also satisfies these often very local - and extreme - requirements.



Figure 1: "Cocktail Concrete". An illustration of the mix composition of an actual HPC with water/binder ratio of 0.35. In addition to aggregates and water the mix contains Portland cement, silica fume, fly ash, plasticiser, superplasticiser and air entrainer.

al desarrollo de un hormigón muy denso e impermeable, al hacerse hincapié en el tipo de conglomerante cementante y la relación agua - conglomerante. La inclusión de puzolanas, en particular de aditivos minerales hidráulicos especiales, como el humo de sílice, la ceniza volante y la escoria granulada de alto horno, ha dominado este tipo de desarrollos. Asimismo, la introducción de plastificantes y superplastificantes químicos ha permitido reducir la proporción de agua respecto del conglomerante a valores muy bajos, que oscilan en la práctica entre 0,3 y 0,4, y aún así conseguir hormigones viables. Los resultados de este desarrollo lo constituyen los hormigones de altas prestaciones (HPC).

El desarrollo de estos HPC ha tenido también una serie de efectos negativos de los que se ha hablado menos y que tienen que ver con la protección de la armadura frente a la corrosión. El principal efecto negativo es la inevitable reducción del contenido total de hidróxido de calcio derivada de la reacción con el agua del clinker del cemento Portland. Una parte, mayor o menor, del hidróxido de calcio se consume para activar las puzolanas. Esto produce tan sólo una pequeña reducción de la alcalinidad (pH) del agua intersticial del hormigón, pero, en cambio, una importante disminución de la capacidad de tamponamiento, en forma de fases cristalinas disponibles para resistir la carbonatación. El valor umbral efectivo para la corrosión por cloruros también se reduce como consecuencia de la disminución de la alcalinidad. La pérdida de protección química inherente debe, por tanto, ser compensada mediante un recubrimiento de hormigón de la estructura final que sea verdaderamente menos permeable.

Este último efecto traslada la atención a la importancia predominante que tiene el proceso de ejecución para la obtención en la práctica de un hormigón de altas prestaciones.

El HPC ha resultado ser especialmente sensible a la calidad y los detalles del proceso de ejecución. En concreto, los riesgos de agrietamiento prematuro, como la fisuración térmica y por retracción plástica, son mucho más pronunciadas en el caso del HPC que en el del hormigón tradicional. El alto grado de retracción química (retracción autógena) del HPC «consume» parte de la capacidad de deformación de que se disponía previamente, haciendo así que durante el proceso de endurecimiento el hormigón sea frágil y sensible a las inevitables deformaciones prematuras. Dichas deformaciones surgen como consecuencia de la evaporación de agua que se produce una vez pasada la llana o el fratás en las superficies expuestas de hormigón y cuando éste se expone a deformaciones causadas por las diferencias de temperatura provocadas por el calor desprendido en el proceso de hidratación del cemento, seguido del enfriamiento del material hasta la temperatura ambiente. Esta sensibilidad mucho mayor del HPC en comparación con el hormigón tradicional o clásico es un problema que suele pasarse por alto en la práctica, pero pone de manifiesto la importante diferencia entre las pruebas de laboratorio y la realidad (es decir, entre la investigación y las condiciones reales de obra).

2.1. UNA INVESTIGACIÓN MONOPOLIZADA

Por consiguiente, debe señalarse que cuando la protección de la armadura frente a la entrada de sustancias corrosivas se basa en la calidad del hormigón que lo recubre, esto obliga, en la práctica, a emplear dicho hormigón en la ejecución de una parte importante de los elementos en cuestión.

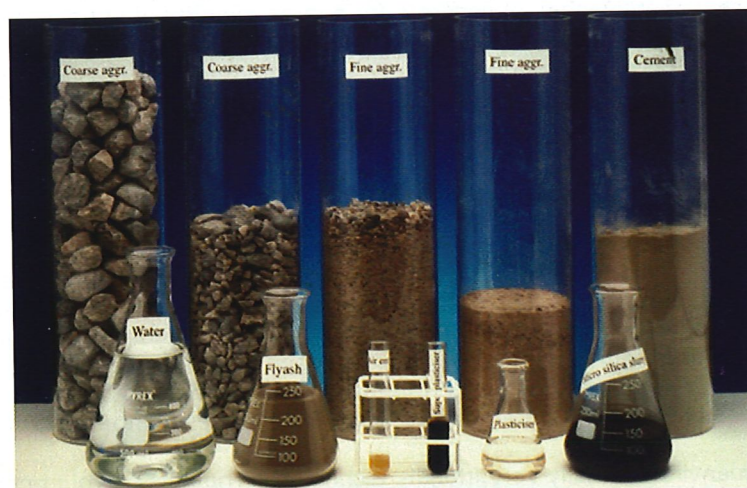


Figura 1: 'Cóctel de hormigón'. Ejemplo de composición de un HPC real con una relación agua - conglomerante de 0,35. Además del árido y el agua, la mezcla contiene cemento Portland, humo de sílice, ceniza volante, plastificante, superplastificante y aireante.

El resultado es la utilización de una gran cantidad de hormigón de alta calidad que satisface en todo el conjunto de la obra, e innecesariamente, determinados requisitos muy locales (y muy exigentes). La investigación realizada para desarrollar la mayoría de los HPC ha dado lugar a un hormigón de una composición muy sofisticada que incluye una diver-

The research performed towards developing most HPC has led to very sophisticated concrete compositions containing a variety of chemical and mineral admixtures leading to so-called "Cocktail Concretes", for which an example from practice is illustrated in Figure 1. These refinements have raised the costs of concrete considerably and at the same time the execution becomes much more demanding, as mentioned above.

Of even greater importance is the fact that usually the bulk of the concrete need not have the same HPC-properties as the concrete cover, as long as its required strength and integrity are satisfied. Hence, the increased costs are to a large extent fully wasted. Even more unfortunate is the fact that the execution complications often leads to unsatisfactory quality achieved in practice needing early repairs, as exemplified in Figure 2.



Figure 2: Typical honeycombing in a new construction. Such execution defects leads to repairs of most large scale new concrete structures.

In fact most new concrete structures are handed over to the owner as repaired structures. This is not satisfactory and should not be accepted as being a "necessity inherently associated with the construction with concrete".

All in all the one-sided research focus on the concrete quality to solve the reinforcement corrosion problems has unnecessarily reduced the competitiveness of concrete for a large majority of structures.

Hence the impression is developing, that the cement, concrete and admixture community seems to have managed to monopolise research and development to focus only on the concrete and its components when solving durability problems, also when the problems are localised to corrosion of the reinforcement.

2.2. SELF COMPACTING CONCRETE (SCC)

The development of a concrete mix where the placing and compaction has minimal dependence on the available workmanship on site would improve the true quality of the concrete in the final structure. This has been a main driving force in recent year's development of SCC. With the aid of a range of chemical admixtures and optimal grading of the aggregates, concrete with low water/cement ratio can be made to flow through complicated form geometry and around complex reinforcement layout, without segregation. The flowing concrete may exert an increased pressure on the form, and will escape the form through any small slots and holes if the form is not sufficiently tight. Such effects shall be taken carefully into account when designing the formwork.

The use of SCC is also an environmentally very friendly technology. The noise level from vibrators is nearly eliminated and the concrete workers need no or only minimal work with the vibrators. This eliminates all the adverse effects vibrating concrete has on the body ("white fingers") as well as on the surrounding environment. In this respect the sophistication - and thus increased costs - of such concrete is well warranted.

The main current drawback with this technology is the sensitivity of such concrete to the precise dosing, mixing and transporting of the concrete and the critical dependence on the moisture contents in the aggregates and on the weather conditions while casting the concrete. However, once the SCC has become a more robust and reli-

idad de mezclas químicas y minerales que ha producido los llamados «cócteles de hormigón», de los cuales puede apreciarse un ejemplo en la Figura 1. Esta sofisticación ha aumentado considerablemente el coste del hormigón y, a su vez, ha hecho que la ejecución sea mucho más exigente, tal y como se ha expuesto anteriormente.

Incluso mayor importancia reviste el hecho de que normalmente el grueso del hormigón no tiene por qué presentar las mismas propiedades de altas prestaciones que el recubrimiento de hormigón, siempre y cuando reúna la resistencia e integridad requeridas. De este modo, los mayores costes en que se ha incurrido en gran medida no sirven para nada. Más desafortunado aún es que las complicaciones de la ejecución suelen dar lugar, en la práctica, a una calidad insuficiente, que hace muy pronto necesarias reparaciones como la que se indica en la Figura 2.



Figura 2: Coqueras típicas en una construcción nueva. Estos defectos de construcción obligan a reparar la mayoría de las grandes estructuras de hormigón de construcción reciente.

De hecho, la mayoría de las nuevas estructuras de hormigón se entregan al propietario reparadas. Esto no es satisfactorio y no debería aceptarse como «una necesidad inherentemente asociada a la construcción en hormigón».

En resumen, el hecho de que la investigación dirigida a resolver los problemas de corrosión de la armadura haya estado dirigida en un solo sentido, el de la calidad del hormigón, ha reducido de manera innecesaria la competitividad del hormigón para una gran mayoría de las estructuras.

Por este motivo, está surgiendo la impresión de que los sectores del cemento, el hormigón y los aditivos parecen haber conseguido monopolizar la investigación y el desarrollo de tal forma que se centren únicamente en el hormigón y en sus componentes a la hora de intentar resolver los problemas de durabilidad o los relacionados con la corrosión de las armaduras.

2.2 EL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE (SCC)

El desarrollo de hormigones en que la colocación y la compactación apenas dependieran de la pericia de los trabajadores in situ mejoraría la verdadera calidad del hormigón en la estructura definitiva. Esto es lo que ha impulsado en los últimos años al desarrollo del hormigón autocompactante (SCC). Con la ayuda de una serie de aditivos químicos y de una granulometría óptima del árido, puede lograrse que un hormigón con una baja proporción agua/cemento fluya por espacios de geometría complicada y alrededor de complejas armaduras, sin sufrir segregación. En el momento de su colocación, el hormigón puede ejercer una mayor presión sobre el encofrado y escapar a través de cualquier pequeño agujero o ranura en el mismo si no es suficientemente hermético. Deben tenerse debidamente en cuenta dichos efectos al proyectar el encofrado.

El uso del SCC es, además, una tecnología muy respetuosa con el medio ambiente. El nivel de ruidos procedente de los vibradores queda prácticamente eliminado y los operarios apenas tienen que trabajar con estos equipos, lo cual elimina las repercusiones negativas que el hormigón vibrado produce en el cuerpo humano (enfermedad de los «dedos blancos») así como en el entorno medioambiental. En este sentido, la sofisticación (y, por tanto, los mayores costes) de esta clase de hormigón está justificada.

El principal inconveniente que presenta en la actualidad este tipo de tecnología es la precisión que se requiere en las dosis, el amasado y transporte del hormigón, y la fuerte dependencia que se crea del estado higrométrico del árido y de las condiciones meteorológicas en el momento de colocar el hormigón. Sin embargo, una vez que el SCC se demuestre un hormigón más robusto y fiable, sus potenciales ventajas son muy importantes en lo que respecta a la uniformidad del hormigón en la estructura acabada, así como en la crucial zona de recubrimiento.

able type of concrete the beneficial potentials are very large with respect to uniformity of the concrete in the finished structure - also in the critical cover zone.

2.3. PERMEABILITY CONTROLLED FORMWORK LINER (PFL)

The quality of the outer concrete skin - or the concrete cover - has a dominating influence on the protection of the concrete as well as protecting the reinforcement against penetration of aggressive substance. This recognition has led to the development of a special permeable formwork liner, which can be either flexible and tissue-like, or stiff like a plastic board. Such liners are able to improve the quality of the outer few mm or cm of the concrete cover. This is achieved by initially draining possible excess water out of the outer layer of concrete, but keeping it available if needed by the later hydration to avoid cracking due to chemical shrinkage. This reduces the local water/cement ratio and enhances the curing of this thin outer zone. The use of PFL also eliminates the development of blowholes at the concrete surface. Such blowholes are noticeably more frequent and larger when HPC is used than when normal type concrete is used due to the usually higher tixotropy and stickiness of HPC.

Numerous tests and practical experience have demonstrated the beneficial effects of PFL. From a technical point of view this technology is considered one of the most durability enhancing achievements related to the concrete itself and to the execution process within the past couple of decades.

In particular this measure addresses only the outer protective layer of concrete where this enhancement of quality is needed, and does not impose wasted additions to the bulk of the concrete.

A combination of PFL with SCC would have a valuable synergy effect in improving the durability of concrete structures.

3. DURABILITY AND THE SERVICE LIFE DESIGN CONCEPT

What is meant by a durable structure is in practice very subjective and difficult to define precisely [2]. It should refer to a structure maintaining a satisfactory performance over a predetermined period of time without requiring unexpected high costs for maintenance. Therefore, the term service life design (SLD) has replaced the term durability, being a quantifiable and measurable quantity (years). This clarification was introduced by Fagerlund in 1979, [3].

In principle two basically different design strategies to ensure a required service life can be followed, [4]:

- A: Avoid the degradation threatening the structure due to the type and aggressivity of the environment.
- B: Select an optimal material composition and structural detailing to resist, for a specified period of use, the degradation threatening the structure.

Strategy A can be subdivided into three different types of measures:

- A.1: Change the micro-environment, e.g. by tanking, membranes, coatings, structural measures, etc.
- A.2: Select non-reactive, or inert, materials, e.g. corrosion resistant steel reinforcement, nonmetallic reinforcement, non-reactive aggregates, sulphate resistant cements, low alkali cements.
- A.3: Inhibit the reactions, e.g. cathodic protection, corrosion inhibitors. The avoidance of frost attack by air entrainment is also classified in this category.

Most of the measures indicated above do not provide a total protection. The effect, the duration and the reliability of the measures depends on a number of factors. For example, the efficiency of a coating depends on the thickness of the coating, and on the permeability of the coating relative to the permeability of the concrete.

Strategy B allows for different types of interventions. For example, corrosion protection could be achieved by selecting appropriate cover and concrete mix, this being the usual design measure adopted. In addition, the structure can be made more robust against aggressive environments through appropriate detailing.

The modelling of the deterioration mechanisms is in principle applicable both for design **Strategy A** and design **Strategy B**. However, only limited knowledge is available today for the long-term efficiency of the various protective measures. The issue of modelling and quantifying the effects of these protective measures represents the

2.3 REVESTIMIENTOS DE ENCOFRADOS DE PERMEABILIDAD CONTROLADA (PFL)

La calidad de la capa exterior de hormigón afecta de modo esencial a la protección, tanto del propio hormigón como de la armadura, frente a la penetración de sustancias agresivas. Esta conclusión ha dado lugar al desarrollo de revestimientos de encofrado permeables que pueden ser flexibles y con textura de tejido, o bien rígidos como una plancha de plástico. Estos revestimientos logran mejorar la calidad de la capa superficial – cuyo espesor se mide en milímetros o centímetros - de los recubrimientos de hormigón. Esto se consigue drenando inicialmente el posible exceso de agua de la capa exterior del hormigón, pero manteniendo esa agua disponible por si fuera necesario después en la hidratación con el fin de evitar que se produzcan grietas debidas a la retracción autógena. De este modo, se reduce la relación agua/cemento, mejorando el curado de esta fina capa exterior. Asimismo, el uso del PFL evita que surjan oquedades en la superficie del hormigón. Estas oquedades son considerablemente más frecuentes y de mayor tamaño cuando se utiliza HPC que cuando se utiliza el tipo normal de hormigón debido a que la tixotropía y la viscosidad del HPC suelen ser mayores.

Numerosos ensayos y experiencias prácticas han demostrado las ventajas del PFL. Desde el punto de vista técnico, esta tecnología está considerada uno de los mayores logros de las últimas décadas por el aumento que ha significado de la durabilidad del hormigón en cuanto al material propiamente dicho así como a su colocación in situ.

En concreto, esta medida actúa sólo en la capa protectora exterior del hormigón, allí donde es necesario el aumento de la calidad, y no impone añadidos superfluos al grueso del mismo.

Una combinación del PFL y el SCC produciría una sinergia de mucha utilidad para la mejora de la durabilidad de las estructuras de hormigón.

3. LA DURABILIDAD Y EL CONCEPTO DE PREVISIÓN DE VIDA ÚTIL

El concepto de estructura duradera es, en la práctica, muy subjetivo y difícil de definir con precisión [2]. Por tal debería entenderse aquella estructura que mantiene un comportamiento satisfactorio a lo largo de un período de tiempo predeterminado, sin requerir unos costes de mantenimiento imprevistos y elevados. De este modo, el término de vida útil de proyecto ("service life design" o (SLD) ha sustituido al de durabilidad, aludiendo a una cantidad (de años) medible y cuantificable. Esta clarificación fue introducida por Fagerlund en 1979 [3].

En principio, se pueden adoptar dos diferentes estrategias a la hora de proyectar para garantizar la vida útil requerida [4]:

- A:** Evitar la degradación que amenaza la estructura y que se debe al tipo de medio ambiente y a su agresividad.
- B:** Elegir una composición de materiales óptimos y elaborar los detalles constructivos con esmero para que la estructura, durante un período de uso determinado, pueda resistir la degradación que la amenaza.

La **estrategia A** puede subdividirse en tres tipos diferentes de medidas:

- A.1:** Modificar el micro-entorno, por ejemplo, mediante sellado, membranas, revestimientos, medidas estructurales, etc.
- A.2:** Elegir materiales no reactivos o inertes, por ejemplo, armaduras de aluminio resistentes a la corrosión, armaduras no metálicas, áridos no reactivos, cementos resistentes a los sulfatos o cementos de bajo contenido en álcalis.
- A.3:** Inhibir las reacciones, por ejemplo, mediante protección catódica o inhibidores de la corrosión. En esta categoría se englobarían también las medidas dirigidas a evitar la acción de las heladas por aire atrapado.

La mayoría de las medidas que se acaban de señalar no proporciona una protección total. El efecto, la duración y la fiabilidad de las medidas dependen de diversos factores. Por ejemplo, la eficacia de un revestimiento depende de su grosor y de su permeabilidad relativa respecto de la permeabilidad del hormigón.

La **estrategia B** permite diferentes tipos de intervención. Por ejemplo, la protección frente a la corrosión podría conseguirse mediante la elección de mezclas apropiadas para recubrimiento y hormigón, siendo ésta la medida habitualmente adoptada por el proyectista. Asimismo, puede fortalecerse la estructura, en el caso de entornos agresivos, elaborando los detalles con el debido esmero.

La modelización de los mecanismos de deterioro es, en principio, aplicable tanto a la **estrategia** de cálculo **A** como la **B**.

greatest challenge to the research community, but requires a shift in current research practice by incorporation experience from practice to a much larger extent than hitherto.

3.1. DEEM-TO-SATISFY DESIGN FOR DURABILITY

The deem-to-satisfy approach means to specify requirements to parameters such as the cement type and quantity, maximum water-binder ratio, minimum air content, concrete cover, type of curing, control of early age cracking, limitation of crack widths, etc. The values chosen depend on the assumed aggressivity of the environment.

The currently used means of ensuring durability and service life in national codes as well as according to the CEB-FIP Model Code 1990 (MC 90), [5] and the Eurocode [6], will to a large extent maintain the well-known deem-to-satisfy design approach.

3.2. 1st GENERATION SLD STRATEGY: MULTI-STAGE PROTECTION

The approach of the service life design following **Strategy B** is to select intelligently an appropriate number and types of co-operating measures to ensure the required service life. This is considered a multi-stage protection design strategy, or a multiøbarrier approach, [7 - 8]:

1. Identify the type and aggressivity of the environment in which the structure shall operate
2. Forecast the possible movement and accumulation of the aggressive substance
3. Determine which transport mechanism govern (permeation, diffusion, capillary action) and which parameters control the mechanisms
4. Select barriers that can co-operate in slowing down or prevent the transport and accumulation process.

This was a so-called 1st - Generation service life design approach introduced first time for the Great Belt Link in Denmark, Figure 3, [9]. Later this design has been evaluated using the reliability-based service life design (2nd - Generation service life design approach, see below). Recent updating of the residual service life based on in-situ testing indicates that a 150 years service life could be expected for the Great Belt Link.



Figure 3: The Great Belt Link, East Bridge. Denmark

3.3. 2st GENERATION SLD STRATEGY: RELIABILITY-BASED METHODOLOGY

The theories of probability and reliability in structural design have been developed and matured remarkably during the past five years. These theories have been transformed from the level of research and development into being directly applicable in practical engineering design. The methodology has been internationally recognised and used for many decades as basis for the structural safety design through the well-known load-and-resistance-factor design, (LRFD). However, the factors governing the durability and performance of structures throughout their service life have only recently been developed in similar ways. This has been achieved through a European

Sin embargo, en la actualidad se sabe poco acerca de la eficacia a largo plazo de las diversas medidas protectoras. La cuestión del modelizado y la cuantificación de los efectos de estas medidas protectoras representan hoy en día el mayor reto para los investigadores, pero requieren un cambio en los planteamientos de investigación actuales que permita incorporar la experiencia práctica en una medida mucho mayor de lo que se ha hecho hasta ahora.

3.1 REGLAS DE BUENA PRÁCTICA PARA LA DURABILIDAD

Por reglas de buena práctica se entiende la especificación de requisitos según parámetros tales como el tipo y la cantidad de cemento, la relación máxima agua/cemento, el contenido de aire, el recubrimiento de hormigón, el tipo de curado, el control de la fisuración prematura, la limitación de la anchura de las fisuras, etc. La elección de los valores depende de las hipótesis de partida sobre la agresividad del entorno.

Los medios de garantizar la durabilidad y la vida útil que se emplean en la actualidad en las instrucciones nacionales y conforme al Código Modelo CEB-FIB 1990 (MC 90) [5], y al Eurocódigo [6], se basan, en gran medida, en reglas de buena práctica.

3.2 ESTRATEGIA SLD DE PRIMERA GENERACIÓN: PROTECCIÓN POR FASES MÚLTIPLES

La **estrategia B** de proyecto para una vida útil (SLD) supone elegir adecuadamente el número y tipo de medidas coadyuvantes para garantizar la vida útil requerida. Esto se denomina estrategia de protección por fases o barreras múltiples [7-8]:

1. Identificar el tipo y la agresividad del entorno en el que se va a ubicar la estructura.
2. Prever los eventuales desplazamientos y la acumulación de la sustancia agresiva.
3. Determinar qué mecanismo de transporte rige (permeación, difusión, acción capilar) y qué parámetros controlan los mecanismos.
4. Seleccionar barreras que contribuyan a frenar o impedir el proceso de transporte y acumulación.

Esta estrategia, que se denomina planteamiento de proyecto para una vida útil de primera generación, fue aplicada por primera vez en el enlace Storebaelt (Gran Cinturón) en Dinamarca (véase la Figura 3 [9]). Posteriormente, el proyecto fue evaluado utilizando el método de la vida útil de proyecto basado en la fiabilidad (el planteamiento de proyecto para la vida útil de segunda generación, del que se habla a continuación). Un reciente estudio actualizado de la vida útil residual basado en ensayos realizados in situ indica que podría esperarse para el enlace Storebaelt una vida útil de 150 años.



Figura 3: El enlace Storebaelt (Gran Cinturón). Puente del Este. Dinamarca.

3.3 ESTRATEGIA SLD DE SEGUNDA GENERACIÓN: METODOLOGÍA BASADA EN LA FIABILIDAD

Las teorías de probabilidad y fiabilidad en el campo del cálculo estructural han experimentado una notable evolución a lo largo de los últimos cinco años. Estas teorías han pasado del ámbito de la investigación y el desarrollo a la aplicación directa en los proyectos de ingeniería. Desde hace muchas décadas dicha metodología ha sido internacionalmente reconocida y utilizada como base del cálculo de la seguridad estructural a través del conocido método de factores parciales (en inglés, "load and resistance factor design, LRFD). Sin embargo, los factores que rigen la durabilidad y el comportamiento de las estructuras a lo largo de su vida útil no se han desarrollado de una manera similar hasta muy recientemente.

Brite-EuRam project termed "DuraCrete", [10].

This has allowed the treatment of transport and deterioration mechanisms to be modelled on a probabilistic level and introduced in the general design of structures. Thus, design for safety and for durability can be performed using similar scientifically based procedures. This opens the eyes of the owners now being able to - or forced to - take decisions regarding acceptable long-term performance and the consequences regarding future maintenance and the total life cycle costs.

This new durability design methodology is based on the reliability theory as traditionally used in structural design. The purpose of a reliability analysis is to determine the probability of a given event, e.g. the event, which marks the end of the service life. This formal - or design - end of service life may not necessarily be the real end of the useful life of the structure. Depassivation is such an example, and this stage is often used as the formal end of the design life for the design of a new structure, a service life limit state. The DuraCrete methodology is developed taking into account:

- The geometry of the structure
- The materials used for construction
- The environment in which the structure is located
- The quality of the execution of concrete works
- The main deterioration mechanisms, but especially highlighting reinforcement corrosion
- The planned inspection of the structure

Figure 4 shows in principle the performance of a concrete structure with respect to reinforcement corrosion and related events. The following events can be used to identify the service life:

1. Depassivation of reinforcement
2. Cracking of concrete cover
2. Spalling of concrete cover
4. Collapse

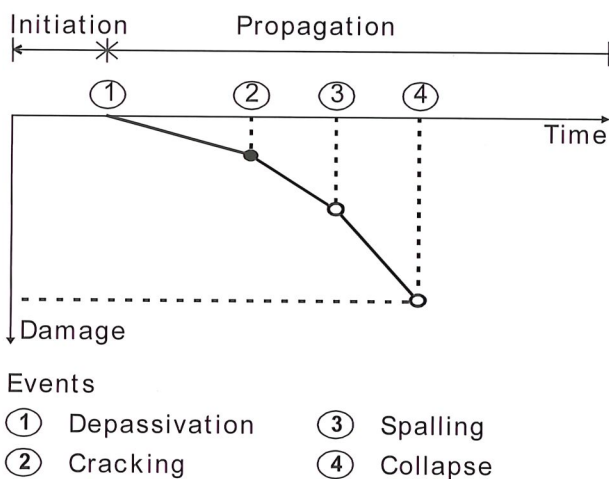


Figure 4: Events related to the service life limit states.

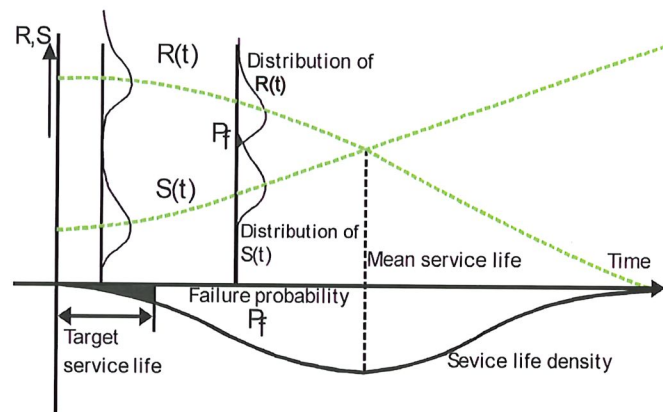


Figure 5: Probability of corrosion initiation and target service life

In general points 1 and 2 represent events related to the serviceability of the structure; point 3 is related to both serviceability and ultimate limit states and point 4 represents collapse of the structure.

Having identified the failure event relevant for a design the second step of the durability design is to analyse the

te. Este desarrollo se ha logrado gracias a un proyecto europeo, en el marco del programa Brite-EuRam, denominado «DuraCrete» [10].

Esto ha permitido que el tratamiento de los mecanismos de transporte y deterioro sea modelizado en el ámbito probabilístico e introducido en el cálculo general de estructuras. De esta forma, el cálculo de la seguridad y de la durabilidad pueden realizarse empleando procedimientos científicos similares. Este hecho ha permitido a la propiedad y a los promotores darse cuenta de que ahora pueden (o deben) adoptar decisiones sobre el comportamiento aceptable a largo plazo y sobre las consecuencias futuras en cuanto a costes de mantenimiento y costes totales a lo largo de la vida útil.

Esta nueva metodología de proyecto para la durabilidad se basa en la teoría de la fiabilidad tradicionalmente aplicada en el cálculo estructural. El propósito de un análisis de fiabilidad consiste en determinar la probabilidad de un determinado hecho, por ejemplo, del hecho que marque el final de la vida útil de la estructura. Este final nominal (o de proyecto) de la vida útil puede no suponer necesariamente el verdadero final de la vida útil de la estructura. La despasivación constituye un ejemplo de lo que se acaba de afirmar y esta etapa suele considerarse como el final formal de la vida prevista en el proyecto de una nueva estructura, un estado límite de servicio. La metodología DuraCrete se desarrolla teniendo en cuenta:

- La geometría de la estructura
- Los materiales empleados en su construcción
- El entorno en el que se ubica la estructura
- La calidad de la ejecución de los trabajos de hormigón
- Los principales mecanismos de deterioro, con hincapié en la corrosión de la armadura
- La inspección prevista de la estructura

La Figura 4 muestra en principio el comportamiento de una estructura de hormigón respecto de la corrosión de la armadura y hechos relacionados. Para identificar la vida útil, pueden emplearse los siguientes hitos:

1. La despasivación de la armadura
2. El agrietamiento del recubrimiento de hormigón
3. El desconchado del recubrimiento de hormigón
4. El hundimiento

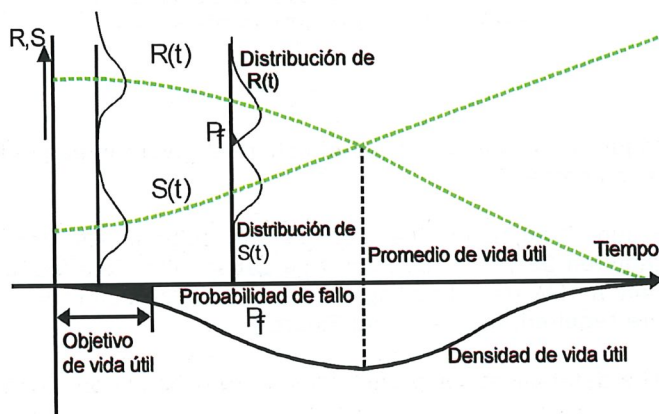
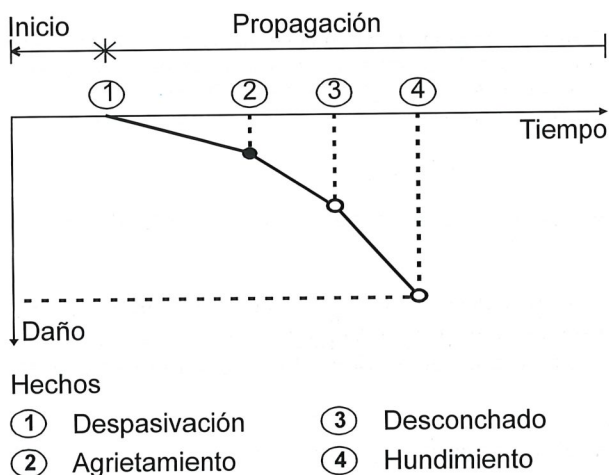


Figura 4: Hechos relacionados con los estados límites de vida útil

Figura 5: Probabilidad de inicio de la corrosión y objetivo de vida útil

En general, los puntos 1 y 2 representan hitos relacionados con la utilidad de la estructura; el punto 3 está relacionado tanto con la utilidad como con los estados límites últimos, y el punto 4 representa el hundimiento de la estructura.

Una vez identificado el hito relevante desde la perspectiva del proyectista, el segundo paso en el proyecto para la durabilidad es analizar las acciones del entorno e identificar los mecanismos de degradación pertinentes.

Alcanzar el estado límite contemplado se describe según una función de estado límite $g(x,t)$ en la que x denota el vec-

environmental actions and to identify the relevant degradation mechanisms.

Reaching the considered limit state is described in terms of a limit state function, $g(x,t)$, where x denotes the vector of basic variables and t is time.

The limit state function is defined such that it is negative if and only if the considered event occurs. The limit state function can e.g. be written as $g(x,t) = R(t) - S(t)$, where $R(t)$ and $S(t)$ denote a time-variant resistance (resistance against ingress of aggressive substance and resistance against deterioration) and a load variable (quantified aggressivity of the environment), respectively. In Figure 5 a schematic representation of the problem is shown.

The problem can be solved by reliability methods described in e.g. [11].

The merit of the probabilistic approach to durability design is illustrated by the following example of a marine structure. Two different environments are considered, representing yearly average temperatures of 10°C (exemplified by Northern Europe) and 30°C (exemplified by the Middle East) respectively. The design requirement is 50 years service life. The service life is here for simplicity defined as the length of the initiation period, i.e. the time until depassivation of the reinforcement due to chloride ingress, as also represented by point 1 in Figure 4.

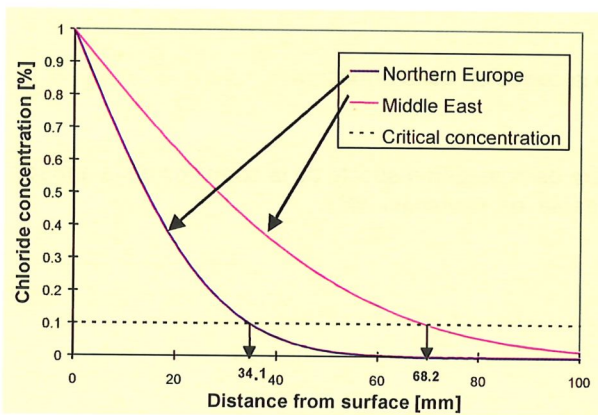


Figure 6: Deterministic approach. Required concrete cover to ensure 50 years service life and assuming a chloride threshold value of 0.1% by weight of concrete.

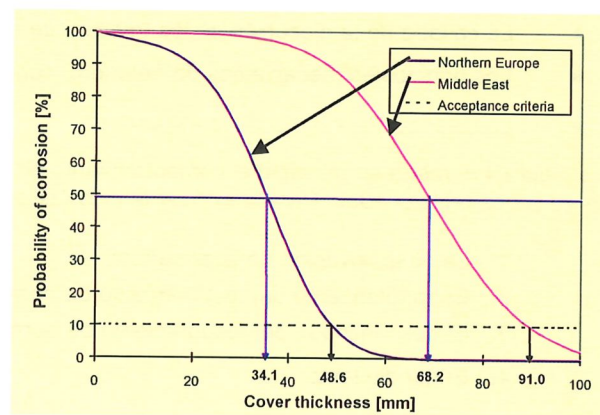


Figure 7: Probabilistic approach. The deterministic approach provides only 50% probability of avoiding corrosion at the age of 50 years. Accepting 10% probability of having corrosion initiated after 50 years, results in considerably larger covers.

Figure 6 depicts the required concrete covers in each of the two environments, based on a traditional deterministic approach.

Figure 7 highlights the fact that the deterministic approach only provides a 50% probability of achieving the required 50 years corrosion free service life. This fact is often overlooked in usual designs for durability. If, say only a 10% risk of having corrosion initiated before 50 years is considered acceptable, then much larger covers are required, as seen from Figure 7.

The deterministic approach used here is based on mean values of the governing parameters.

In the probabilistic approach the mean values and their known or assumed standard deviations are used together with the relevant distribution functions. This latter approach makes it not only possible to relate cover thickness to probability of corrosion but also to quantify the consequences of differently chosen risks of corrosion. These consequences relate not only to concrete quality and cover thickness, but more importantly also to the combined short- and long-term economic consequences. Hence, such a reliability based service life design approach is closely linked to an evaluation of the life cycle costing of the creation and use of a structure.

3.4. CRACKED CONCRETE

It is often required to limit crack widths to prescribed small values, typically 0.3 - 0.1mm depending on the sever-

tor de las variables básicas y t , el tiempo. La función del estado límite se define de forma que sólo es negativa en el caso de que se produzca el hecho contemplado. La función del estado límite puede, por ejemplo, formularse como $g(x,t) = R(t) - S(t)$, donde $R(t)$ y $S(t)$ denotan respectivamente una resistencia variable con el tiempo (resistencia a la entrada de sustancias agresivas y resistencia al deterioro) y una variable de carga (agresividad cuantificada del entorno). En la Figura 5 se recoge una representación esquemática del problema.

El problema puede resolverse por los métodos de fiabilidad descritos por ejemplo en [11].

Las ventajas del enfoque probabilístico cuando se proyecta para la durabilidad se manifiestan en el siguiente ejemplo de una estructura marina. Se consideran dos entornos que representan temperaturas medias de 10° (típicas del Norte de Europa) y de 30° (típicas de Oriente Medio), respectivamente. El requisito de partida es una vida útil de 50 años. En este caso, con el objetivo de simplificar, la vida útil se define como la duración del período inicial, esto es, el período de tiempo hasta que se produce la despasivación de la armadura como consecuencia de la penetración de cloruros, según lo representado también en el punto 1 de la Figura 4.

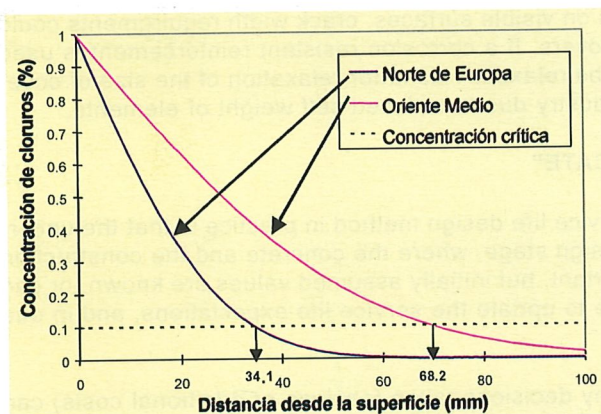


Figura 6: Enfoque determinista. Recubrimiento de hormigón necesario para garantizar una vida útil de 50 años, suponiendo un valor umbral de cloruros de 0,1 % (en peso del hormigón)

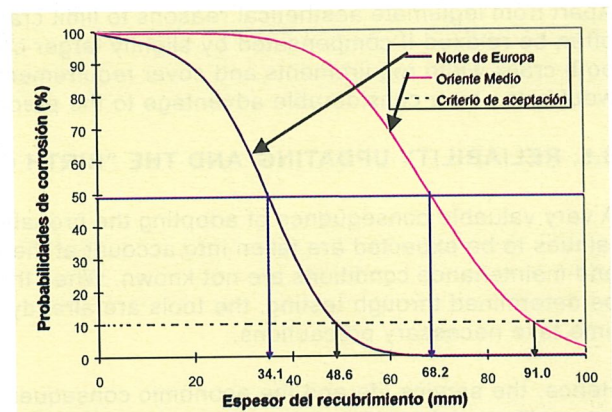


Figura 7: Enfoque probabilístico. El enfoque determinista sólo proporciona un 50% de probabilidad de evitar la corrosión a los 50 años. Si se exige que la probabilidad de que se inicie la corrosión después de los 50 años no supere el 10%, serán necesarios unos recubrimientos considerablemente mayores

En la Figura 6 se indican los espesores del recubrimiento de hormigón requeridos en cada uno de los dos entornos, sobre la base de un enfoque tradicional determinista.

La Figura 7 pone de manifiesto que el enfoque determinista sólo proporciona un 50% de probabilidad de conseguir los 50 años requeridos de vida útil sin corrosión. Este hecho suele pasarse por alto en los proyectos que habitualmente se realizan para la durabilidad. Si sólo se considera aceptable un riesgo de que la corrosión se inicie antes de 50 años de, por ejemplo, el 10%, serán necesarios recubrimientos mucho mayores, tal y como se aprecia en la Figura 7.

El enfoque determinista aplicado en este caso se basa en los valores medios de los parámetros determinantes.

En el enfoque probabilístico, los valores medios y sus desviaciones típicas, conocidas o supuestas, se usan junto con las funciones de distribución correspondientes. Este último enfoque no sólo hace posible relacionar el recubrimiento con la probabilidad de corrosión, sino también cuantificar las consecuencias de unos riesgos de corrosión elegidos de manera diferente. Tales consecuencias no sólo se refieren a la calidad del hormigón y al recubrimiento sino también a las consecuencias económicas tanto a corto como a largo plazo, lo cual es incluso más importante. Por tanto, un planteamiento de este tipo, de proyecto para la vida útil, basado en la fiabilidad, está estrechamente relacionado con una evaluación de los costes de vida útil derivados del proyecto y la función de una estructura.

3.4 FISURAS EN EL HORMIGÓN

Suele exigirse que la anchura de las fisuras se limite a unos pequeños valores establecidos, normalmente entre 0,1 y 0,3 mm, según la agresividad del entorno y la vida útil requerida.

En la práctica, las estrictas limitaciones del tamaño de las fisuras se basan en una suposición no cuantificada según la cual

ity of the environment and the required service life.

In practice the strict limitations of crack width is based on some non-quantified assumption that large crack widths increases the risks of early corrosion and deterioration. In many cases - depending on the code system applied - the strict crack width requirements and the prescribed calculation methods become decisive when determining the quantity of reinforcement needed. In many case such requirements leads to very substantial increased quantities of reinforcement. In the short term this may satisfy the producers and suppliers of reinforcement, but the adverse consequences regarding complication of reinforcement execution and casting and compaction of the concrete, together with the increased cost of the construction, may later have negative repercussions. This relates to reduced reputation and reduced economic competitiveness of concrete structures.

The reality is that the consequences of cracking should be evaluated in detail in each case. Often a larger concrete cover is much more beneficial - accepting the resulting larger surface crack width - than trying to reduce cover to satisfy strict crack width requirements. This is an area where the usual code requirements probably have done more harm than good to the concrete construction industry and to societal expenditure on construction.

Apart from legitimate aesthetical reasons to limit crack widths on visible surfaces, crack width requirements could often be relaxed if compensated by slightly larger concrete covers. If a corrosion resistant reinforcement is used both crack width requirements and cover requirements could be relaxed. This latter relaxation of the size of cover would also be a considerable advantage to the precasting industry due to reduced self weight of elements.

3.5. RELIABILITY UPDATING, AND THE "BIRTH CERTIFICATE"

A very valuable consequence of adopting the probabilistic service life design method in practice is that the uncertainties to be expected are taken into account at the initial design stage, where the concrete and the construction and maintenance conditions are not known. When these important, but initially assumed values are known, or can be determined through testing, the tools are already available to update the service life expectations, and in due time take necessary precautions.

Hence, the service life and the economic consequences of any decisions taken (savings or additional costs) can be readily updated when inspections are made and additional information becomes available.

Therefore, when the real qualities of the concrete in the structures have been achieved, which is after the execution and hardening have taken place, on site determination of key durability related parameters can be made. At handing over of the structure to the Client such base line data, and a recalculation of the expected service life can be made. This should then be presented in the form of a "**Birth Certificate**" of the structure [2 & 12]. Later this renewed service life calculation can be followed up during the regular inspections where new data can be obtained. This will allow an updating of the service life forecast at regular intervals and can lead to an ever-increasing reliability of the calculated remaining service life.

These new possibilities may lead to much more well-performing structures as well as to very considerable savings in future maintenance and repair costs of concrete structures.

However, the durability enhancing measures described focus mainly on the corrosion protective measure achieved by nursing the concrete and the concrete cover.

Some of the available alternative measures described in the following should receive much more attention, and should include the level of reliability of the measures as a key element of the decision basis when designing for service life.

4. CORROSION PREVENTION THROUGH OTHER MEANS THAN CONCRETE

A number of corrosion preventive measures, not relating to the concrete or the cover, may be considered when ensuring long service life of concrete structures. The most common measures are:

1. Coatings to concrete or to the reinforcement
2. Corrosion inhibitors
3. Cathodic prevention
4. Non-metallic reinforcements
5. Corrosion resistant steel reinforcements.

una anchura importante de las fisuras aumenta los riesgos de corrosión y deterioro prematuros. En muchos casos (dependiendo del sistema de instrucciones aplicado), los estrictos requisitos en cuanto al tamaño de las fisuras y los métodos de cálculo prescritos son decisivos a la hora de determinar las cuantías necesarias. En muchas ocasiones, estos requisitos dan lugar a un aumento muy considerable de las mismas. A corto plazo, esto puede complacer a los fabricantes y suministradores de armadura, pero las consecuencias adversas en cuanto a complicación de la ejecución de la armadura y de realización y compactación del hormigón, unidas a los mayores costes de construcción, pueden posteriormente tener repercusiones negativas. Esto daña la reputación de las estructuras de hormigón y reduce su competitividad económica.

La realidad es que las consecuencias de la fisuración deberían evaluarse detenidamente en cada caso. Con frecuencia, es más conveniente prever un recubrimiento mayor de hormigón (aceptando el consiguiente mayor tamaño de las fisuras superficiales) que intentar reducir el recubrimiento para cumplir con los estrictos requisitos de tamaño de fisura. Se trata de un aspecto en el que los requisitos habituales de las instrucciones probablemente hayan perjudicado más que beneficiado al sector de la construcción en hormigón y al gasto social en la edificación.

Aparte de los legítimos motivos estéticos que explican la limitación de tamaño de fisura en las superficies vistas, los requisitos relativos a tal tamaño podrían muchas veces relajarse si se compensaran con unos recubrimientos de hormigón ligeramente mayores. Si se utiliza una armadura resistente a la corrosión, podrían relajarse los requisitos tanto de tamaño de fisuras como de recubrimiento. Esta atenuación de los requisitos aplicables al recubrimiento tendría a su vez considerables ventajas para el sector del hormigón prefabricado gracias a la reducción del peso propio de los elementos.

3.5 LA ACTUALIZACIÓN DE LA FIABILIDAD Y LA «PARTIDA DE NACIMIENTO»

Una consecuencia muy útil de la adopción del método probabilístico de proyecto para la vida útil en la práctica es que las incertidumbres previsibles se tienen en cuenta en la fase inicial del proyecto, cuando las condiciones del hormigón y de la construcción y mantenimiento se desconocen. Una vez que estos valores importantes, inicialmente supuestos, se conocen o pueden determinarse mediante ensayos, ya se dispone de las herramientas para actualizar las expectativas de vida útil y, a su debido tiempo, para adoptar las precauciones necesarias.

De este modo, la vida útil y las consecuencias económicas de las decisiones que se tomen (ahorro o costes adicionales) pueden actualizarse fácilmente cuando se realizan inspecciones y se dispone de información complementaria.

Por consiguiente, una vez que se han conseguido las verdaderas cualidades del hormigón en las obras, es decir, después de la ejecución y endurecimiento, puede efectuarse la determinación in situ de parámetros esenciales relativos a la durabilidad. Cuando se vaya a entregar la estructura al cliente, pueden obtenerse estos datos básicos y volverse a realizar un cálculo de la vida útil esperada, todo lo cual se presentará en forma de «Partida de nacimiento» de la estructura [2 y 12]. Posteriormente, este cálculo revisado de la vida útil puede irse comprobando durante las inspecciones periódicas en las que se obtengan nuevos datos. Esto permitirá actualizar la previsión de vida útil a intervalos periódicos y puede proporcionar también una fiabilidad cada vez mayor del cálculo de la vida útil restante.

Estas nuevas posibilidades pueden hacer que mejoren en gran medida el comportamiento de las estructuras y que se consigan ahorros muy importantes en los costes de mantenimiento y reparación futuros de las estructuras de hormigón.

No obstante, las medidas destinadas a mejorar la durabilidad que se acaban de describir se centran principalmente en la protección frente a la corrosión que deriva de un cuidado esmerado del hormigón y del recubrimiento.

Algunas de las medidas alternativas disponibles que se explican a continuación deberían recibir mucha mayor atención. Asimismo, debería incluirse el nivel de fiabilidad de las medidas como elemento clave de la toma de decisiones cuando se proyecta para la vida útil.

4. LA PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN A TRAVÉS DE OTROS MEDIOS DISTINTOS DEL HORMIGÓN

Para garantizar una larga vida útil de las estructuras de hormigón, puede tenerse en cuenta una serie de medidas de prevención de la corrosión que no están relacionadas con el hormigón ni con el recubrimiento. Las más comunes de estas medidas son las siguientes:

1. Revestimientos para el hormigón o la armadura
2. Inhibidores de la corrosión
3. Protección catódica
4. Armaduras no metálicas
5. Armaduras de acero resistentes a la corrosión

Of the above listed durability enhancing measures the first four are only evaluated in summary in the following sections. The fifth, on corrosion resistant steel reinforcement, is given a more in-depth treatment due to the novelty of introducing this - many other connections - very well-known technology in the construction industry.

There are very substantial owner and societal benefits if corrosion can be prevented for the anticipated service life of structures exposed to highly corrosive environments, which primarily would be hot humid chloride containing regions or areas with extensive use of de-icing salts. Some of the initial benefits would relate to the conditions of execution:

- a) There would be no need to introduce particularly dense and impermeable concretes and special blended cements to provide a reliable barrier against the ingress of chlorides, water and oxygen. HPC would in general not be a special requirement, apart from ensuring strength and avoidance of deterioration of the concrete itself.
- b) Sulphate resistant cements can be used in sulphate containing soil even when the soil contains both sulphates and chlorides.
- c) The concrete mix could be tolerant to the use of local aggregates and mixing water, even when they may be somewhat contaminated with chlorides.
- d) A robust concrete being tolerant to the execution conditions on the specific sites can be developed, thus enhancing the overall quality and service life reliability of the structure.

This latter benefit would mean reducing the quantities of chemical and mineral admixtures achieving the required workability by increasing the water/cement ratio to say 0.45 and maybe 0.50. In most cases this would lead to considerable savings in the cost of the concrete itself and at the same time provide a more robust site-friendly concrete.

A general remark of curiosity, as seen from a structural engineer's point of view, is the extensive urge from producers to rely on organic materials to ensure a long and reliable service life of our inorganic concrete structures. Basically organic materials are not necessarily long-term stable in an alkaline environment - the pH of concrete is of the order 12.5 - 13.5. Organic materials are also prone to degeneration when exposed to UV-light. Hence, in the majority of cases where organic durability enhancing materials are used, some future maintenance or redoing of the treatment must be expected within a foreseeable future being shorter than the anticipated service life.

Another observation is the interesting experience that each time a new waste material with claimed pozzolanic properties is becoming a burden from an environmental point of view there is a public push towards depositing it in our concrete structures. This relates to silica fume, flyash, slag, and sulphur - and the next such waste seems to be based on organic material (dead animals!) added as combustible material in the cement kiln. The potential benefits to durability and maybe to cost reduction of adding such materials to concrete are of course acknowledged, but the strongest arguments have often been the environmental benefits of avoiding depositing such materials in nature.

4.1. COATINGS OF CONCRETE OR REINFORCEMENT

4.1.1. COATING OF CONCRETE

Surface treatment and coatings to concrete are available in many types and qualities, from invisible hydrophobic silane impregnations to thick pigmented acrylic, polyurethane or epoxy based coatings.

The experience with silane impregnations vary from country to country. In some countries such treatment is compulsory for bridges exposed to de-icing salts. In other countries the hydrophobic effect cannot be verified after just a few months or years and silanes are not generally used.

Coatings may have durability enhancing effects by slowing down the rate of carbonation or chloride ingress. However, the verification of the beneficial effects is very difficult in practice. It has been demonstrated that pinholes in a thick carbonation resistant coating reduces the protective ability to just fractions of the effect of a pinhole-free coating - and it is not realistic to make pinhole-free coatings on concrete - even after having applied a surface wash using a smooth polymer modified cementitious material. The producer-claimed effect of coatings corresponding to adding several meters of concrete cover to the structure is based on effects tested in the laboratory with no relevance to real concrete structures.

In addition, surface treatment to concrete is exposed to degrading effects from the environment and from UV light. Hence such coatings shall be maintained or re-done after a limited number of years, depending on the type of

De estas cinco medidas dirigidas a mejorar la durabilidad, las primeras cuatro sólo se analizan de manera breve en los siguientes apartados. En cambio, la quinta, referida a la utilización de armaduras de acero resistentes a la corrosión, se estudia con mayor detenimiento debido a la novedad que supone la introducción en la industria de la construcción de esta tecnología sobradamente conocida en muchos otros ámbitos.

Las ventajas que obtienen la propiedad y la sociedad son muy importantes si puede prevenirse la corrosión durante la vida útil prevista de las estructuras expuestas a entornos muy corrosivos, que serían fundamentalmente las regiones calurosas y húmedas que contienen cloruros o las zonas en las que se haga mucho uso de la sal para el deshielo. Algunas de las ventajas iniciales afectarían a las condiciones de ejecución:

- a) No habría necesidad de introducir hormigones particularmente densos e impermeables ni mezclas especiales de cemento para lograr una barrera fiable contra la penetración de cloruros, agua y oxígeno. El HPC no sería, en general, un requisito especial, salvo para garantizar la resistencia y evitar el deterioro del propio hormigón.
- b) Los cementos resistentes al sulfato podrían utilizarse en suelos que contienen sulfatos incluso cuando el suelo contenga también cloruros.
- c) El hormigón toleraría el empleo de áridos y de agua de mezcla locales, incluso cuando puedan estar contaminados en alguna medida con cloruros.
- d) Podría desarrollarse un hormigón sólido, que tolere las condiciones de ejecución en lugares concretos, mejorándose así la calidad general y la fiabilidad de la vida útil de la estructura.

Esta última ventaja supondría reducir las cantidades de aditivos químicos y minerales. La trabajabilidad requerida se conseguiría mediante el aumento de la relación agua/cemento hasta, por ejemplo, 0,45 y quizás 0,50. En la mayoría de los casos, esto conllevaría un considerable ahorro en el coste del propio hormigón y, a su vez, daría lugar a un hormigón más resistente y más respetuoso con el medio.

Hay que resaltar como hecho curioso, desde el punto de vista del cálculo de estructuras, el extendido afán de los fabricantes por basarse en materiales orgánicos para asegurar una larga y fiable vida útil de las estructuras de hormigón inorgánico. En esencia, los materiales orgánicos no son necesariamente estables a largo plazo en un entorno alcalino (siendo el pH del hormigón del orden de 12,5 a 13,5). Los materiales orgánicos son, además, propensos a la degeneración cuando se exponen a la luz ultravioleta. Por ello, en la mayor parte de los casos en que se emplean materiales orgánicos para mejorar la durabilidad, cabe esperar la necesidad futura de mantenimiento o de repetición del tratamiento en un tiempo previsiblemente más breve que la vida útil estimada.

Cabe señalar también la interesante tendencia según la cual, cada vez que un nuevo material de desecho al que se suponen propiedades puzolánicas se convierte en una carga desde el punto de vista medioambiental, exista una insistencia pública en que ese nuevo material se deposite en nuestras estructuras de hormigón. Así ocurre con el humo de sílice, la ceniza volante, la escoria o el azufre; y los próximos residuos de este tipo parece que se basarán en material orgánico (¡animales muertos!) añadido como combustible al horno de cemento. Hay que reconocer, desde luego, las potenciales ventajas para la durabilidad, y tal vez para la reducción de costes, que derivan de añadir tales materiales al hormigón, pero con frecuencia los argumentos más firmes a su favor han sido los relativos a las ventajas medioambientales que supone evitar el depósito de tales materiales en el ambiente.

4.1 REVESTIMIENTOS DEL HORMIGÓN O DE LA ARMADURA

4.1.1 REVESTIMIENTO DEL HORMIGÓN

Existen muchas clases y calidades de tratamientos de la superficie y de revestimientos para el hormigón, desde las impregnaciones invisibles de silano hidrófobo hasta los revestimientos de gran espesor formados por acrílicos pigmentados o basados en poliuretano o epoxy.

La experiencia con las impregnaciones de silano varía de unos países a otros. En algunos, este tratamiento es obligatorio para los puentes expuestos a la sal para el deshielo. En otros, el efecto hidrófobo no puede verificarse transcurridos tan sólo unos pocos meses o años, por lo que no suelen utilizarse silanos.

Los revestimientos pueden aumentar la durabilidad al frenar el ritmo de carbonatación o la penetración de cloruros. Sin embargo, la comprobación de los efectos positivos resulta muy difícil en la práctica. Se ha demostrado que los poros en un revestimiento grueso resistente a la carbonatación reducen la capacidad protectora hasta meras fracciones del efecto que tendría el mismo revestimiento sin poros (y no es realista hacer revestimientos sin poros en el hormigón), incluso después de haber aplicado a la superficie una capa de material cementante suave modificado con polí-

material and exposure.

4.1.2. EPOXY COATING OF REINFORCEMENT

Epoxy coating of reinforcement was a new protective measure against chloride induced corrosion introduced in North America in the mid 70'ies. Fusion bonded epoxy coating has since then been used extensively in North America, and later in other countries. However, from the early 90'ies reports began to emerge indicating that an undercutting chloride induced corrosion may develop from local pinholes and damages in the coating without necessarily causing cracking and spalling of concrete cover, just slowly disintegrating the reinforcement. The first examples were from the bridges on the Florida Keys, Figure 8.



Figure 8: Bridges on the Florida Keys: Critical damage of piers due to corrosion of epoxy coated reinforcement.

The first report that became public was from January 10th 1992 [13], which concluded that the “**Epoxy coated rebar technology is flawed**”. This caused a major disturbance within the North American Continent due to pure commercial and biased reactions from the producers of epoxy coated reinforcement and their organisations. At that time the technology was slowly spreading to Europe, the Middle East, see Figure 9, and to some parts of the Far East.



Figure 9: Two pictures illustrating the adverse corrosion protection performance of epoxy coated reinforcement in the vicinity of the saline waters of the Arabic or Persian Gulf under hot and humid environments.

meros. Las afirmaciones de los fabricantes de que los revestimientos producen el efecto de añadir varios metros de recubrimiento de hormigón a la estructura se basa en ensayos de laboratorio que carecen de relevancia en las estructuras de hormigón reales.

Por otra parte, el tratamiento de la superficie del hormigón está expuesto a los efectos degradantes del medio ambiente y de la luz ultravioleta. Por tanto, estos revestimientos habrán de ser objeto de mantenimiento o deberán repetirse pasados unos pocos años, dependiendo del tipo de material y de las condiciones del medio.

4.1. 2. REVESTIMIENTO DE LA ARMADURA CON EPOXY

Revestir la armadura con epoxy fue una medida protectora contra la corrosión provocada por los cloruros que se introdujo en Norteamérica a mediados de la década de los setenta. Desde entonces, los revestimientos de epoxy por fusión se han utilizado ampliamente en Norteamérica y posteriormente en otros lugares. Sin embargo, a partir del inicio de los años noventa empezaron a aparecer informes que indicaban que podía producirse una corrosión debilitante provocada por los cloruros a partir de los poros locales y de los daños en el revestimiento sin que causara necesariamente el agrietamiento y desconchado del recubrimiento de hormigón, sino tan sólo desintegrando lentamente la armadura. Los primeros ejemplos correspondían a los puentes de los Cayos de Florida (Figura 8). El primer informe, que se hizo público el 10 de enero de 1992 [13], concluía que la «**tecnología de las barras de armadura revestida de epoxy es defectuosa**». Esta conclusión provocó un gran revuelo en el continente norteamericano debido a las reacciones sesgadas y puramente mercantilistas de los productores de armaduras revestidas de epoxy y de sus asociaciones. En aquel momento, la tecnología se estaba extendiendo lentamente en Europa, Oriente Medio (véase la Figura 9) y algunas zonas del Lejano Oriente.



Figura 8: Puentes en los Cayos de Florida: daños críticos en los pilares debidos a la corrosión de la armadura revestida de epoxy.



Figura 9: Estas dos fotografías muestran la falta de efectividad protectora frente a la corrosión de la armadura revestida con epoxy en las inmediaciones de las aguas salinas del Golfo Árabe o del Golfo Pérsico, en entornos calurosos y húmedos.

The first major application in Europe was for the precast concrete segments for the twin bored East Tunnel of the Great Belt Link in Denmark where the design was made in 1988 [14]. However, already then the traditional technology of epoxy coating was questioned by the designers, particularly with respect to the effect of all bars being electrically isolated from each other, thus preventing the use of cathodic protection some time in the future, should the need arise. The large number of pinholes allowed by the original specification for epoxy coating was also of concern, as was the need for patch repairs of all cut ends and of cracks formed at sharply bent coated bars. Using epoxy coated single bars would be to “**put all the eggs in one basket**” as it was termed then. Hence, after several full scale tests it was decided to use fusion bonded epoxy coating using - for the first time recorded - the fluidized bed dipping technique of 3D full size welded reinforcement cages, [8] and [14]. A special cleaning, heating, coating and testing plant was incorporated in the indoor concrete segment production plant, and out of 62.000 concrete segments 60.000 came out without any pinholes, and the remaining had only one or two small pinholes detected by the wet sponge method.

Hence, before the problems with epoxy coated reinforcement became public in North America, a viable and reliable technology for precasting plants was developed in Europe to eliminate cutting, bending and patch repairing of coated bars, and at the same time maintaining the possibility of introducing cathodic protection if corrosion was initiated after all. In connection with the Great Belt Link corrosion sensors were also introduced to provide warning of oncoming risks of corrosion of the reinforcement by tracking the penetration of specifically the corrosion threshold concentration of chlorides - whichever this is in each case - from the exposed surface towards the level of the reinforcement.

The North American experience with the traditional technology of epoxy coating together with additional testing and site investigations, among others in Ontario, Canada [15], has lead to this technology not gaining foothold in Europe, and the technology is now slowly being phased out, also in the Middle East and Gulf Countries, see Figure 9.

4.1.3. HOT-DIP GALVANISED REINFORCEMENT

With respect to hot-dip galvanised reinforcement (HDG) not much practical experience is available regarding enhanced performance in very aggressive environment. However, it has been shown in tests that HDG steels may have a higher threshold value for chloride induced corrosion (initiation) compared to black steel. The protective ability depends on the reactions at the iron-zinc interface. The risk of pit corrosion is considered to increase for such HDG steel if exposed to chloride attack.

An evaluation of the available data and practical experience indicate that galvanising of well controlled quality and thickness and applied to appropriate reinforcing steel alloy, will provide:

- Reliable corrosion protection to reinforcing steel in concrete exposed to carbonation but without chlorides and sulphates.
- Increased threshold level for chloride induced corrosion compared to non-coated steel. However, once corrosion starts the rate of pitting corrosion may be higher, and at times much higher, than for uncoated black steel. For immersed conditions this effect may be further aggravated.

4.2. CORROSION INHIBITORS

The newest addition to the concrete mix is the introduction of corrosion inhibitors. They can be anodic-, cathodic- or mixed inhibitors. The corrosion inhibitor technology is well-known within the chemical industries. However, adding inhibitors to concrete has resulted in diverging reports on their efficiency. It also seems that adding too small quantities of some inhibitor compared to the future concentration of chlorides may even cause increased corrosion rates. The most usual inhibitors also act as accelerators, which are not always an advantage, particularly in hot environments, where high environmental temperatures often cause execution difficulties due to rapid loss of workability and early hardening.

The risk of the inhibitor being washed out of concrete exposed to splash water is also an issue under discussion as the inhibitors seems more mobile than chlorides. Some tests in the laboratory have not verified the effect of washing out of inhibitor, but in situ verifications after long-term exposure are still missing. In this connection it shall be recalled that inhibitors are dormant in the concrete until inhibitor and chlorides are present at the same time at the surface of the steel reinforcement.

The inhibitor must, for several reasons, be added to all the concrete in the exposed components although it is only

La primera aplicación importante en Europa fue en los tramos de hormigón prefabricado para el túnel doble del Este en el enlace Storebaelt en Dinamarca, cuyo proyecto data de 1988 [14]. No obstante, en aquel momento la tecnología tradicional del revestimiento de epoxy ya era cuestionada por los proyectistas, particularmente en cuanto al efecto de que todas las barras estuvieran eléctricamente aisladas unas de otras, impidiendo así el uso de protección catódica en algún momento futuro, en caso necesario. El gran número de poros que permitía la especificación original del revestimiento de epoxy causaba también preocupación, al igual que la necesidad de reparar con parches todos los extremos cortados y las fisuras formadas en las barras dobladas con radios reducidos. La utilización de barras simples revestidas de epoxy sería «jugárselo todo a una sola carta», según la expresión utilizada entonces. Por ello, tras varias pruebas a gran escala, se decidió utilizar un revestimiento de epoxy unida por fusión empleando (por primera vez) la técnica de inmersión en lecho fluidizado de jaulas de armadura soldadas de tres dimensiones y en tamaño real [8] y [14]. Una planta especial de limpieza, calentamiento, revestimiento y ensayo fue incorporada a la planta interior de producción de los tramos de hormigón, y de 62.000 tramos, 60.000 salieron sin ningún poro y en el resto se detectaron tan sólo uno o dos pequeños poros mediante el método de la esponja mojada.

Por tanto, antes de que los problemas de las armaduras revestidas con epoxy se hicieran públicos en Norteamérica, se había desarrollado una tecnología viable y fiable para las plantas europeas de prefabricados con el fin de eliminar el corte, doblado y reparación con parches de las barras revestidas y mantener, a la vez, la posibilidad de introducir protección catódica en caso de que surgiera realmente la corrosión. En relación con el enlace Storebaelt, se introdujeron también sensores destinados a avisar de los riesgos de corrosión que surgieran en la armadura mediante un control del grado de penetración del recubrimiento por cloruros – medido en función de la concentración umbral de los mismos, que puede variar según el caso- desde la superficie expuesta hacia el interior donde se encuentra la armadura.

La experiencia norteamericana con la tecnología tradicional de revestimiento de epoxy, así como otros ensayos e investigaciones in situ realizadas, entre otros lugares en Ontario (Canadá) [15], han hecho que esta tecnología no arraigara en Europa y que, en la actualidad, también se esté abandonando en Oriente Medio y en los países del Golfo (véase la Figura 9).

4.1.3. ARMADURA GALVANIZADA EN BAÑO CALIENTE

Es escasa la experiencia práctica de que se dispone acerca del comportamiento en entornos muy agresivos de la armadura galvanizada en caliente (HDG). Sin embargo, diversos ensayos han demostrado que los aceros HDG pueden tener un valor umbral superior que el acero negro en lo que respecta a la corrosión por cloruros (inicio). La capacidad protectora depende de las reacciones en el contacto entre el acero y el cinc. Se cree que el riesgo de corrosión intersticial de este acero HDG aumenta si se expone a la acción de los cloruros.

Una evaluación de los datos disponibles y de las experiencias prácticas indica que el galvanizado de una aleación de acero de una calidad y un grosor bien controlados y aplicada a una armadura adecuada, proporcionará:

- Una protección fiable frente a la corrosión para la armadura de acero del hormigón expuesto a carbonatación, pero sin cloruros ni sulfatos.
- Un umbral más elevado para la corrosión por cloruros en comparación con el acero sin revestimiento. Sin embargo, una vez que se inicia la corrosión, el ritmo de corrosión intersticial puede ser superior y, en ocasiones, muy superior, que en el caso del acero negro sin revestimiento. En condiciones de inmersión, este efecto puede agravarse.

4.2. INHIBIDORES DE CORROSIÓN

La última novedad en aditivos para el hormigón son los inhibidores de corrosión. Éstos pueden ser anódicos, catódicos o mixtos. La tecnología de inhibidores de corrosión es muy conocida en la industria química. Sin embargo, existen discrepancias entre los informes disponibles acerca de la eficacia de incorporar inhibidores al hormigón. Asimismo, parece que el introducir cantidades demasiado pequeñas de algún inhibidor en comparación con la futura concentración de cloruros puede incluso aumentar las tasas de corrosión. Los inhibidores más habituales también actúan como aceleradores del fraguado, lo cual no siempre supone una ventaja, especialmente en entornos calurosos donde las altas temperaturas suelen causar dificultades de ejecución debido a la rápida pérdida de trabajabilidad y al endurecimiento prematuro.

El riesgo de que el inhibidor desaparezca del hormigón expuesto al agua de curado es otra cuestión que está siendo analizada, puesto que los inhibidores parecen más móviles que los cloruros. Los ensayos de laboratorio no han verificado el efecto de desaparición del inhibidor, pero todavía se carece de comprobaciones realizadas in situ tras una exposición prolongada. A este respecto, hay que recordar que los inhibidores permanecen inactivos en el hormigón hasta que el inhibidor y los cloruros están presentes al mismo tiempo en la superficie de la armadura de acero.

Por varias razones, el inhibidor debe incorporarse a todo el hormigón empleado para ejecutar los elementos sometidos

needed in the vicinity of the reinforcement. This is again a measure being completely wasted for the most part, and it will have noticeable adverse cost implications for the concrete.

4.3. CATHODIC PREVENTION

Cathodic prevention has become an interesting option to protect the parts of structures to be exposed to high chloride concentrations. In this way a cathodic protection system is installed already within the new structure ready to be used to protect the reinforcement against chloride corrosion. This option seems most promising in marine structures as a sacrificial anode system may be installed simply by placing anodes in the water near or on the structure and link them up to the reinforcement. Similarly, also impressed current systems may be used, but they will impose on the owner or operator a permanent monitoring of current and of protection level. Preventive cathodic protection is also used in special cases, where inert anodes mesh or bands are cast into the concrete of new structures. This allows energizing early or late as needed, to prevent corrosion initiation up front.

4.4. NON-METALLIC REINFORCEMENT

Fibre reinforcing bars have been developed and it is recognised that corrosion resistance is achieved with such reinforcing bars. At present such non-metallic bars are based on glass, aramid or carbon fibres.

However, the different mechanical characteristics between fibre reinforcement and steel reinforcement, together with the different conditions for practical use on site, seems to indicate only rather limited or special applications in concrete structures. Fibre reinforcing bars have very limited strength when loaded transversely to the direction of the fibres. This is an issue for the connection between main bars and stirrups. Some bars are also very sensitive to hard impacts. Carbon fibre bars may fracture if hit by a falling hammer or a dropped vibrator. During casting of concrete the workers cannot walk on the reinforcement, temporary work bridges must be used.

Currently the precast industry seems to present the largest potential use of fibre reinforcing bars.

5. CORROSION RESISTANT STEEL REINFORCEMENT (CRSR)

Current developments within the design and construction industry has begun to focus on the advantages of solving the corrosion problems selectively where the corrosion occurs, particularly for structures exposed to high chloride containing environments as marine structures and structures exposed to de-icing salts.

The focus has been on choosing CRSR, and this interest from the construction industry has triggered very interesting developments. The main types of products currently being marketed are:

1. Stainless steel reinforcement
2. Stainless steel clad black steel reinforcement
3. Microcomposit steel reinforcement ("MMFX")
4. Specially alloyed steels similar in principle to stainless steel but with reduced quantities of the main alloys and with revised steel compositions. Examples are:
 - 4.1. "TOP 12"
 - 4.2. "Lean Duplex".

These products are becoming extremely interesting in the fight against reinforcement corrosion by addressing the problems at the source and not through substitute measures as concrete composition and concrete covers - assuming a priori that concrete is uncracked.

5.1. STAINLESS STEEL REINFORCEMENT (SSR)

During the past few years stainless steel reinforcement has become commercially available in dimensions, strengths and alloy types which are fully compatible with normal structural requirements for reinforced concrete structures, and at competitive prices - relatively speaking.

In this paper the metallurgical characteristics of the different types of stainless steels are not presented in detail, only the general principles are mentioned.

dos a la acción del cloruro, aunque sólo se necesite en las zonas próximas a la armadura. Una vez más, se trata de una medida en la que hay un gran desperdicio, lo cual influiría muy negativamente en los costes del hormigón.

4.3 PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica se ha convertido en una opción interesante para proteger las partes de las estructuras que van a estar expuestas a elevadas concentraciones de cloruros. Consiste en instalar un sistema de protección catódica ya en la nueva estructura, que estará así lista para proteger la armadura ante la posible acción de los cloruros. Esta opción parece más prometedora en las estructuras marinas ya que puede instalarse un sistema de protección por ánodo perdido simplemente colocando ánodos en el agua cerca de la estructura o sobre ésta y enlazándolos con la armadura. De modo similar pueden emplearse también los sistemas de protección catódica por diferencia de potencial eléctrico, pero éstos obligarán a la propiedad o al operador a un control permanente del potencial y del nivel de protección. La protección catódica preventiva también se utiliza en casos especiales, en los que se incorpora una malla o una serie de bandas de ánodos inertes en el hormigón de estructuras nuevas. Esto permite activar los ánodos antes o después, según se necesite, para impedir el inicio mismo de la corrosión.

4.4 ARMADURAS NO METÁLICAS

Se han desarrollado armaduras de fibra que se han demostrado capaces de resistir la corrosión. En la actualidad, estas armaduras no metálicas se fabrican con fibras de vidrio, arámida o carbono.

Sin embargo, las diferencias en cuanto a características mecánicas entre las armaduras de fibra y las de acero, así como las diferentes condiciones para su uso in situ, parecen indicar que las armaduras de fibra tienen sólo aplicaciones muy limitadas o especiales en las estructuras de hormigón. Las armaduras de fibra presentan una resistencia muy baja cuando se cargan transversalmente en la dirección de las fibras. Esto supone un problema para la unión entre las barras principales y los estribos. Algunas barras son, además, muy sensibles a impactos fuertes. Las barras de fibra de carbono pueden fracturarse si reciben un golpe fortuito de un martillo o de un vibrador. Durante la colocación del hormigón, los operarios no pueden andar sobre la armadura; deben utilizarse puentes provisionales para trabajar.

Actualmente, la industria del prefabricado parece ser la que presenta mayor potencial para el uso de las armaduras de fibra.

5. ARMADURA DE ACERO RESISTENTE A LA CORROSIÓN (CRSR)

La actual evolución del sector de la construcción ha hecho que este empiece a centrarse en las ventajas de resolver los problemas de corrosión de manera selectiva, allí donde se producen, en particular, en el caso de estructuras sometidas a entornos con un alto contenido en cloruros tales como las estructuras marinas o las expuestas a sal para el deshielo.

El interés del sector de la construcción se ha decantado por el CRSR y esto ha dado lugar a novedades muy interesantes. Los principales tipos de productos que se están comercializando en la actualidad son los siguientes:

1. Armaduras de acero inoxidable
2. Armaduras de acero negro revestidas de acero inoxidable
3. Armaduras de acero «microcomposite» («MMFX»)
4. Aceros de aleación especial similares en principio al acero inoxidable, pero con cantidades reducidas de las principales aleaciones y con nuevas composiciones del acero. Como ejemplos, pueden citarse:
 - 4.1. «TOP 12»
 - 4.2. «Lean Duplex»

Estos productos están adquiriendo un gran interés en la lucha contra la corrosión de las armaduras puesto que atacan el problema en su origen, y no mediante medidas sustitutivas como las relativas a la composición del hormigón y los recubrimientos de hormigón, en las que se presupone que el hormigón no se va a agrietar.

5.1 ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE (SSR)

Desde hace algunos años están disponibles comercialmente armaduras de acero inoxidable con dimensiones, capacidad y configuración plenamente compatibles con las exigencias estructurales normales de las estructuras de hormigón armado y a precios relativamente competitivos.

Stainless steels are chromium containing steel alloys. The minimum chromium content of the standardised stainless steels is 10.5%. Steel with a lower chromium content should not be termed "stainless". Chromium is the main alloy which provides the steel with improved corrosion resistance.

The improved corrosion resistance is due to a thin chromium oxide film that is formed on the steel surface. This extremely thin layer is also self-repairing under the right conditions, which includes some access of oxygen.

Besides chromium, typical alloying elements are molybdenum, nickel and nitrogen. Nickel is mostly alloyed to improve the formability and ductility of stainless steel. Alloying these elements brings out different crystal structures to enable different properties of the steel for machining, forming, welding etc.

The four major types of stainless steel are:

- Martensitic
- Ferritic
- Austenitic
- Austenitic-Ferritic (Duplex)

Martensitic steel is not of interest as reinforcement.

Ferritic stainless steel has properties similar to mild steel but with the better corrosion resistance. The most common of these steels are 12% and 17% chromium containing steels, with 12% used mostly in structural applications and 17% in housewares, boilers, washing machines and indoor architecture. Currently such steels are rated in the lower range of corrosion resistance for reinforcement.

Austenitic stainless steel is the most widely used type of stainless steel. It has a nickel content of at least 7%, which makes the steel structure fully austenitic and gives it ductility, a large scale of service temperature, non-magnetic properties and good weldability. The range of applications of austenitic stainless steel includes housewares, containers, industrial piping and vessels, architectural facades and constructional structures. Currently such steels are rated in the higher range of corrosion resistance for reinforcement.

Austenitic-Ferritic (Duplex) stainless steel has a combined ferritic and austenitic lattice structure - hence the common name: duplex stainless steel. This steel has some nickel content for a partially austenitic lattice structure. The duplex structure delivers both strength and ductility. Duplex steels are mostly used in petrochemical, paper, pulp and shipbuilding industries. Currently such steels are rated in the very high range of corrosion resistance for reinforcement.

Stainless steel reinforcements (SSR) may be corrosion resistant even in very highly chloridecontaminated environments. Used selectively in the most exposed zones of the structure the increased costs per kg steel compared to the costs of normal steel will have marginal or negligible effect on the overall initial construction costs. In addition the service life costs will be reduced due to savings in future repair and maintenance, [16 and 17].

From a practical point of view this technology is particularly interesting because it "only" solves the corrosion problem. All other techniques and technologies within design, production and execution remain unchanged, a fact that is very attractive to the traditionally very conservative construction industry.

Stainless steel reinforcement can be combined with black steel cast into concrete without risks of galvanic corrosion due to bi-metal - or galvanic - action. The reason is that the two types of steels reach nearly the same electro-chemical potentials when cast into the alkaline concrete. This is an important observation, and is the precondition for general economical application of stainless steel reinforcement used only in the parts of the structure where this protection is needed, so-called selective use, [18 and 19]. This is documented in Figure 10.

Examples where SSR could be of particular advantage are for structures in extremely aggressive environments such as the hot, arid and saline environments as found in e.g. the Middle East, particularly in the Gulf and Red Sea environments, and in similar regions of the Far East and Central America.

In addition, structures exposed to de-icing salts are excellent candidates for such selective introduction of SSR.

En el presente estudio no se explican pormenorizadamente las características metalúrgicas de los diferentes tipos de aceros inoxidable; tan sólo se mencionan sus principios generales.

Los aceros inoxidable son aleaciones de acero que contienen cromo. El contenido mínimo de cromo de los aceros inoxidable normalizados es del 10,5%. El acero con un contenido de cromo inferior no debería ser clasificado como «inoxidable». El cromo es el componente de la aleación que proporciona al acero una mejor resistencia a la corrosión.

Esta mayor resistencia a la corrosión se debe a una fina película de óxido de cromo que se forma en la superficie del acero. Esta capa extremadamente fina, además, se repara por sí sola siempre que se den las condiciones adecuadas, entre ellas, una cierta entrada de oxígeno.

Además del cromo, los elementos típicos de la aleación son el molibdeno, el níquel y el nitrógeno. El níquel se utiliza en la aleación sobre todo para mejorar la maleabilidad y ductibilidad del acero inoxidable. La mezcla de estos elementos produce diferentes estructuras cristalinas que confieren al acero distintas propiedades para su mecanización, laminado, soldadura, etc.

Los cuatro grandes tipos de acero inoxidable son:

- Martensítico
- Ferrítico
- Austenítico
- Austenítico-ferrítico (dúplex)

El acero **martensítico** no reviste interés como armadura.

El acero inoxidable **ferrítico** presenta unas propiedades similares al acero blando, pero mayor resistencia a la corrosión. Los aceros más comunes de este tipo son aquellos con un contenido de cromo del 12% y del 17%. Los aceros con un 12% de cromo se utilizan fundamentalmente para aplicaciones estructurales, mientras que los que contienen un 17% se emplean para utensilios domésticos, calderas, lavadoras y arquitectura de interior. Actualmente, estos aceros están clasificados en la gama inferior de resistencia a la corrosión para las armaduras.

El **austenítico** es el tipo de acero inoxidable más utilizado. Tiene un contenido en níquel de al menos el 7%, lo cual convierte a la estructura metalográfica en plenamente austenítica y le confiere ductilidad, una amplia gama de temperaturas de servicio, propiedades no magnéticas y una buena capacidad de soldadura. Entre las posibilidades de aplicación del acero inoxidable austenítico se encuentran los utensilios domésticos, los contenedores, las tuberías y recipientes industriales, las fachadas arquitectónicas y las estructuras de construcción. Actualmente, esta clase de aceros está clasificada en la gama superior de resistencia a la corrosión para las armaduras.

El acero inoxidable **austenítico-ferrítico (dúplex)** presenta una estructura metalográfica mixta ferrítica y austenítica, de ahí su nombre común: acero inoxidable dúplex. Su contenido en níquel le confiere su estructura parcialmente austenítica. La estructura dúplex proporciona tanto resistencia como ductilidad. Los aceros dúplex se usan principalmente en las industrias petroquímicas, papeleras, de la pulpa y de la construcción naval. Actualmente, esta clase de aceros está clasificada en la gama muy alta de resistencia a la corrosión para las armaduras.

Las armaduras de acero inoxidable (SSR) pueden ser resistentes a la corrosión incluso en entornos muy contaminados con cloruros. Si se usan de manera selectiva en las zonas más expuestas de la estructura, el aumento de costes por kilo de acero en comparación con los costes del acero normal tendrá un efecto marginal o insignificante en los costes totales de la construcción. Además, los costes a lo largo de la vida útil se reducirán gracias al ahorro en mantenimiento y futuras reparaciones [16 y 17].

Desde un punto de vista práctico, esta tecnología resulta especialmente interesante porque «sólo» resuelve el problema de la corrosión. No cambia ninguna de las otras técnicas y tecnologías empleadas en el proyecto, producción y ejecución, lo cual resulta muy atractivo para el sector de la construcción, tradicionalmente muy conservador.

Las armaduras de acero inoxidable pueden combinarse con acero negro embebido en el hormigón sin riesgo de corrosión galvánica derivada de la acción bimetalica (o galvánica). Ello se debe a que los dos tipos de acero alcanzan prácticamente los mismos potenciales electroquímicos cuando se colocan en el hormigón alcalino. Este es un factor importante y constituye una condición previa para una aplicación rentable general de las armaduras de acero inoxidable, que se utilizarán únicamente en las partes de la estructura donde la protección sea necesaria, lo que se denomina uso selectivo [18 y 19]. Así puede apreciarse en la Figura 10.



Figure 10: Two pictures illustrating the combination of stainless steel reinforcement and ordinary black steel reinforcement. Above only the deck part later to be exposed to a marine environment is SSR. To the right a shift in the two types of reinforcement is made in a column at a height where chlorides from the environment are no longer expected to enter the concrete



Figure 11: 65 year old Pier at Progreso, Mexico.

A very convincing documentation of the performance of stainless steel reinforcement in highly chloride contaminated concrete is presented by the 65 year old 2.2 km long concrete pier out into the Mexican Gulf at Progreso on the Yucatan Peninsula in Mexico reinforced - 65 years ago! - with stainless steel reinforcing bars, see Figure 11. No corrosion has taken place within the structure, despite the harsh environment and poor quality materials used in the construction, see figure 12. The chloride levels, at the surface of the reinforcement were more than 20 times the traditionally assumed corrosion threshold level, see Figure 12, [21]. A newer, only 35 years old parallel pier has already perished due to reinforcement corrosion of the ordinary carbon steel reinforcement used in this structure, as seen in the foreground of Figure 13.

A further documentation of the adoption of stainless steel reinforcement is the Guest Palace Complex currently under construction in the Sultanate of Oman. SSR was introduced from somewhat below groundwater level to level +5m in the outermost structures directly exposed to the salty ground water and seawater spray of the Gulf of Oman. All remaining parts are reinforced with normal carbon steel, see Figure 14.



Figura 10: Ejemplos de la combinación de armadura de acero inoxidable y armadura de acero negro. En la imagen superior, sólo la parte del recubrimiento que estará expuesta posteriormente a un entorno marino es de acero inoxidable (SSR). En la fotografía de la derecha se aprecia el paso de un tipo de armadura al otro, efectuado en un pilar ubicado donde ya no se prevé que los cloruros del entorno penetren en el hormigón.



Figura 11: El muelle de Progreso, (Méjico) de 65 años de antigüedad

El SSR podría ser especialmente ventajoso, por ejemplo, para las estructuras situadas en un medio ambiente muy agresivo como lo son los entornos calurosos, áridos y salinos de Oriente Medio, en particular, los del Golfo y el mar Rojo, y en regiones similares del Lejano Oriente y América Central.

Asimismo, las estructuras expuestas a sal para el deshielo son excelentes candidatas para la introducción selectiva de SSR.

Una prueba muy convincente del comportamiento de la armadura de acero inoxidable en hormigón muy contaminado con cloruros la ofrece el muelle de hormigón de Progreso en la Península del Yucatán, de 65 años de antigüedad y de 2,2 km de longitud que se adentra en el Golfo de Méjico. El muelle fue reforzado (hace nada menos que 65 años) con barras de acero inoxidable (véase la Figura 11) y hasta la fecha no se ha producido corrosión dentro de la estructura, a pesar de la dureza del entorno y de la mala calidad de los materiales empleados en la construcción (véase la Figura 12). Los niveles de cloruro en la superficie de la armadura superaban en más de 20 veces el umbral de corrosión tradicionalmente aplicado a nivel de proyecto (véase la Figura 12) [21]. Otro muelle más reciente, de tan sólo 35 años, que corría en paralelo al anterior ya ha sucumbido como consecuencia de la corrosión de la armadura ordinaria de acero al carbono utilizado en su estructura, según puede apreciarse en primer plano en la Figura 13.

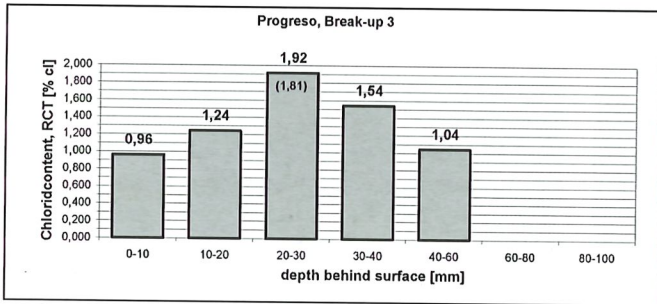


Figure 12: Two pictures showing chloride profile and breakout exposing non-corroding shiny stainless steel reinforcement in spite of 1.92% chloride ion by weight of concrete at the level of the reinforcement.



Figure 13: The "new" shorter Progresso Pier build about 1972, demolished in about 1983 due to extensive corrosion of the reinforcement. In this case ordinary black steel reinforcement was used as can be seen on the picture to the right.



Figure 14: The Guest Palace Complex in Oman. Stainless steel reinforcement is only used in the outer exposed structures from below ground water level up to level +5m. The remaining reinforcement is black steel.

At the same time the reinforced concrete seawall protecting both the Sultan's Palace and the adjacent Guest Palace Complex is being replaced using SSR throughout, see Figure 15.

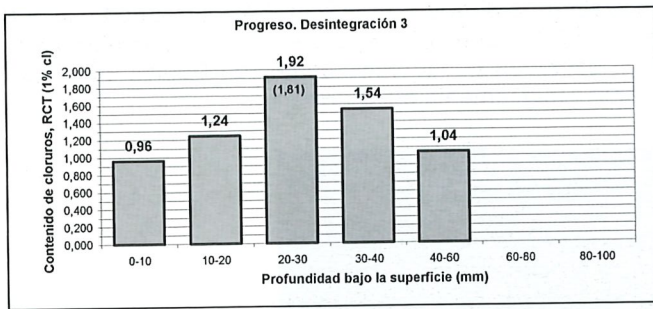


Figura 12: El gráfico muestra el perfil de cloruros y la fotografía una rotura que deja a la vista la armadura brillante de acero inoxidable que no se corroe a pesar del contenido de ión cloruro de 1,92% (en peso del hormigón) a nivel de la armadura.



Figura 13: El 'nuevo' muelle de Progreso, de menor longitud, construido en 1974 y demolido en 1983 debido a la intensa corrosión de la armadura. En este caso, se había utilizado una armadura ordinaria de acero negro, tal y como se aprecia en la fotografía de la derecha.



Figura 14: El complejo destinado al Palacio de Invitados de Omán. La armadura de acero inoxidable sólo se utiliza en las estructuras exteriores expuestas, desde debajo del nivel freático hasta 5 metros sobre rasante. El resto de la armadura es de acero negro.

Otro ejemplo de la aplicación de la armadura de acero inoxidable es el complejo destinado al Palacio de Invitados que se está construyendo actualmente en el Sultanato de Omán. El SSR fue introducido desde debajo del nivel freático hasta 5 metros sobre rasante en las estructuras exteriores directamente expuestas a la salada agua subterránea y a las salpicaduras del agua marina del Golfo de Omán. El resto de la estructura está reforzado con acero ordinario al carbono (véase la Figura 14).

Finally, an additional benefit of using SSR is the fact that stainless steel is a poorer cathode than carbon steel [18]. Therefore, SSR can be beneficial in those repair cases where ordinary carbon steel has corroded to such an extent that local replacement or added reinforcement is needed as part of a repair. A current example of such replacements can be seen in the replacement of corrosion damaged bridge edge beams on Danish motor- and highways using stainless steel in the edge beam and parapet replacements see Figure 16.



Figure 15: Stainless steel reinforcement used in the precast structural members to replace a corrosion damaged seawall protecting the Palace and the new Guest Palace Complex (Figure 14) from the Gulf of Oman.



Figure 16: Replacing edge beams and parapets on bridges in Denmark exposed to de-icing salt. Stainless steel reinforcement is introduced to avoid future repairs causing major traffic disturbances. Also new structures are being provided with stainless reinforcement in the edge beams and parapets as they are highly exposed to de-icing salts during winters.

As it is generally recognised that the most serious durability problem for concrete structures is the reinforcement corrosion problem it becomes obvious that, [1]: **The reliable and readily availability of stainless steel reinforcement at reasonable and foreseeable prices may change - or revolutionise - major parts of the building sector in corrosive environments, simply by solving the corrosion problem.**

The main reason is also the added value which follows from the possibility of accepting the use of locally available materials, even with chloride contamination, and also accepting the qualifications of the local workforce as it is, and still produce highly durable long lasting reinforced concrete structures.

5.2. STAINLESS STEEL CLADDED BLACK STEEL REINFORCEMENT

Recently a hybrid solution has emerged, this being stainless steel cladded carbon steel reinforcement, "Nuovinox", produced by Stelax Industries Ltd.



Figura 15: Uso de la armadura de acero inoxidable en los elementos estructurales prefabricados para sustituir un dique dañado por la corrosión que protege el Palacio y el nuevo complejo destinado al Palacio de Invitados (Figura 14) del Golfo de Omán.



Figura 16: Sustitución de las vigas del borde y de los petos de los puentes de Dinamarca expuestos a la sal para el deshielo. Se introduce armadura de acero inoxidable para evitar futuras reparaciones que podrían causar graves problemas de tráfico. Asimismo, las nuevas estructuras están incorporando armadura inoxidable en las vigas del borde y los petos dado que están muy expuestas a las sales para el deshielo en los meses de invierno.

Al mismo tiempo, el dique de hormigón armado que protege tanto el Palacio del Sultán como el complejo destinado al Palacio de Invitados adyacente, está siendo reemplazado por otro, utilizándose en su totalidad SSR (véase la Figura 15).

Por último, otra ventaja de usar el SSR es que el acero inoxidable es peor cátodo que el acero al carbono [18]. Por tanto, el SSR puede ser beneficioso en los casos en que el acero ordinario al carbono haya sufrido tal grado de corrosión que sea necesario sustituir partes o añadir armadura para repararlo. Un ejemplo actual de este tipo de reparación lo constituye la sustitución de las vigas de los bordes de los puentes de las carreteras y autopistas danesas, que han resultado dañadas por la corrosión. Para esta reparación se está utilizando acero inoxidable en la viga del borde y se están sustituyendo los petos (véase la Figura 16).

Dado que está generalmente admitido que el problema más grave para la durabilidad de las estructuras de hormigón es la corrosión de la armadura, resulta evidente que [1]: **La existencia de armaduras de acero inoxidable fiables y fácilmente disponibles a unos precios razonables y previsibles puede cambiar (o revolucionar) muchos aspectos del sector de la construcción en entornos corrosivos, sencillamente porque resuelve el problema de la corrosión.**

Otra razón fundamental a favor del acero inoxidable es el valor añadido que deriva de la posibilidad de aceptar el uso de los materiales localmente disponibles, incluso si están contaminados de cloruros, así como de emplear la mano de obra local sin necesidad de que adquiera nuevos conocimientos, y seguir produciendo unas estructuras de hormigón armado muy duraderas.

The stainless layer provides it with the corrosion resistance and the inner carbon steel core gives the necessary physical and mechanical properties. According to the information from the producers the outer stainless steel layer meets the normal corrosion standards for stainless steel of the different grades, and depending on the composition of the inner carbon core and the rolling conditions the final product should meet the minimum yield and strength levels required for structural use.

However, three main drawbacks can be identified:

1. The reinforcement can only be produced in short lengths: Usually 6m and by special order 11.6m.
2. The reinforcement cannot be produced in coils, which would have given major simplifications for the on site automatic production of prescribed lengths and bending of stirrups and links.
3. The cut ends exposes the carbon steel core and would therefore be exposed to local chloride ingress. Therefore it is recommended by the producer to provide such bar end with a stainless steel cap as illustrated in Figure 17. This could be considered a major practical drawback of this technology.



Figure 17: Stainless steel clad carbon steel reinforcement provided with a stainless steel cap at the cut ends.

5.3. MICROCOMPOSITE MULTISTRUCTURAL FORMABLE STEEL (“MMFX”)

MMFX steel reinforcement is claimed to be highly corrosion resistant as a result of the patented chemical composition and proprietary steel microstructure that is formed during their production associated with controlled rolling and cooling of the steels. The technical explanation of the corrosion resistance is that this unique physical feature minimizes the formation of micro galvanic cells in the steel structure, hence minimizing corrosion initiation.

MMFX steel has low carbon content, less than 1%, and contains around 8-10% chrome. The company claims that the negligible amount of nickel, present in the composition, makes this steel economical to produce.

The steel is claimed to have an up to 9 time's higher threshold value for chloride induced corrosion initiation. However, when comparing the published data with European experience this increased threshold value would only be about 2-4 times higher when adopting a critical value of 0.10 - 0.05% total chloride contents by weight of dry concrete.

5.4. SPECIALLY ALLOYED STEELS

5.4.1. “TOP 12”

Based on tests in Switzerland this steel should have threshold value of 3-10 times higher than ordinary black steel. The factor 10 refers to sandblasted surfaces and is therefore not characteristic for reinforcement. The steel should compare to the stainless steel grade 1.4003 (EN 10088) and the microstructure is a combined ferritic-martensitic structure.

5.2. ARMADURAS DE ACERO NEGRO REVESTIDAS DE ACERO INOXIDABLE

Recientemente ha surgido una solución híbrida: las armaduras de acero al carbono revestidas de acero inoxidable, «Nuovinox», producidos por Stelax Industries Ltd.

La capa inoxidable proporciona la resistencia a la corrosión, y el núcleo interior de acero al carbono las necesarias propiedades físicas y mecánicas. Según la información facilitada por los fabricantes, la capa externa de acero inoxidable reúne los requisitos normales en materia de corrosión establecidos para el acero inoxidable de diferentes grados y, en función de la composición del núcleo interno de acero al carbono y de las condiciones de laminación, el producto final debería alcanzar los niveles mínimos de elasticidad y resistencia exigidos para la utilización en estructuras.

Sin embargo, hay que señalar tres inconvenientes principales:

1. La armadura sólo puede fabricarse en piezas de escasa longitud: normalmente 6 metros y, mediante pedido especial, 11, 6 metros.
2. La armadura no puede fabricarse en bobinas, lo cual habría simplificado mucho la producción automática in situ de las longitudes prescritas y el doblado de los estribos y cercos.
3. En los extremos cortados queda expuesto el núcleo de acero negro y, por tanto, estaría expuesto a la entrada de cloruros. Por este motivo, el fabricante recomienda dotar a este extremo de la barra de una tapa de acero inoxidable, tal y como se aprecia en la Figura 17. Esta circunstancia podría considerarse un gran inconveniente práctico de esta tecnología.

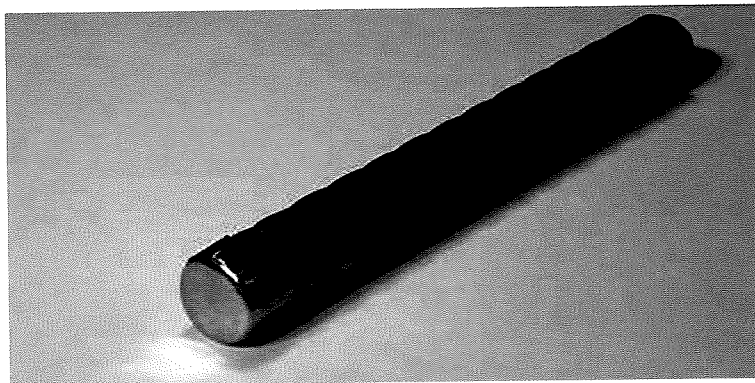


Figura 17: Armaduras de acero al carbono revestidas de acero inoxidable provistas de una tapa de acero inoxidable en los extremos.

5.3. ARMADURAS DE ACERO «MICROCOMPOSITE» («MMFX»)

Los fabricantes afirman que la armadura de acero MMFX es muy resistente a la corrosión gracias a su composición química patentada y a la microestructura metalográfica propia que se forma durante su producción y que se asocia a una laminación y un enfriamiento controlados de los aceros. La explicación técnica de la resistencia a la corrosión estriba en que esta característica física singular minimiza la formación de células micro-galvánicas en la estructura de acero, reduciendo así el inicio de la corrosión.

El acero MMFX tiene un bajo contenido en carbono, inferior al 1%, y contiene entre un 8% y un 10% de cromo, aproximadamente. La empresa fabricante sostiene que la insignificante cantidad de níquel presente en la composición hace que la producción de este acero resulte rentable.

Se afirma que el acero presenta un valor umbral hasta 9 veces superior al del acero normal para el inicio de la corrosión por cloruros. Sin embargo, al comparar estos datos con los publicados en la literatura sobre la experiencia europea, este valor umbral sería sólo entre 2 y 4 veces superior si se adopta un valor crítico de 0,05 – 0,10% de contenido total de cloruros en peso de hormigón seco.

5.4. ACEROS DE ALEACIONES ESPECIALES

5.4.1. «TOP 12»

Según ensayos realizados en Suiza, este acero tendría un valor umbral entre 3 y 10 veces superior al acero negro

Details of this relatively new product is available from von Moos Stahl in Switzerland, and based on a list of references the first application in practice should have been in 1998 and most references are from 2003 and 2004. Hence very limited experience of general nature is available yet, see [22].

5.4.2. "LEAN DUPLEX"

Lean Duplex Stainless Steel is a low alloyed steel with a commercial name of LDX 2101. It is produced by Outokompu and based on their tests the corrosion resistance of LDX 2101 lies between the resistance of the well known stainless steels 1.4301 (also termed 304 according to AISI) and 1.4436 (316 according to AISI). LDX 2101 has a very high chromium content of 21.5% but a very low Nickel content of 1.5% which contributes to the economic competitiveness of the steel.

Because its composition lies within the known range of stainless steels this new type steel reinforcement has some very interesting features and the development thereof shall be followed closely, see [23].

6. DURABILITY MONITORING AS PART OF PREVENTIVE MAINTENANCE

For existing structures it is recognised that in order to minimise maintenance and repair costs a regular and systematic inspection and recording of the performance is needed. It is being investigated in detail whether this can be based partly or solely on remote sensing, which could lead to considerable economic savings.



Figure 18: Mounting with proprietary corrosion sensors in existing structures. The system is a further development from the six step ladder system used for the Great Belt Link in Denmark [8]

The rate of chloride penetration and the local threshold value for chloride initiation constitute the two most important parameters. Three existing quays have been monitored with special corrosion sensors in order to determine the values of these two critical parameters in the marine environment in question.

The corrosion sensors constitute six separate thin steel rings spaced at 10mm and mounted in a stainless steel cylinder in such a way that they are electrically isolated from each other but wired up to a socket at the end surface, see Figure 18. The sensor is placed in a hole drilled into the concrete at the place selected for monitoring. A platinised titanium pin is inserted into a bore hole adjacent to the sensor. By measuring the electric currents between the pin (cathode) and the individual rings of the sensor, using a micro-amp-meter, it can be determined when chlorides above the threshold value have reached the level of the active rings.

6.1. PRELIMINARY EXPERIENCE WITH POST-INSTALLED SENSORS

Data collected during regular inspection and measuring campaigns during the past 2-3 years have provided very mixed information.

First of all, the first generation set of sensors installed has proven too sensitive to the installation process.

ordinario. El factor 10 se refiere a las superficies pulidas al chorro de arena y, por tanto, no es característico de la armadura. Este acero sería comparable al acero inoxidable de grado 14.003 (EN 10088) y la microestructura es mixta, ferrítico-martensítica.

Los detalles acerca de este producto relativamente nuevo pueden obtenerse de von Moos Stahl, en Suiza. Según una lista de referencias, la primera aplicación práctica debió de producirse en 1998 y la mayoría de las referencias corresponden a los años 2003 y 2004, por tanto, aún se dispone de una experiencia de carácter general muy limitada (véase [22]).

5.4.2. «LEAN DUPLEX»

El acero inoxidable «Lean Duplex» es un acero de baja aleación cuyo nombre comercial es LDX 2101. Lo fabrica Outokompu y, según sus ensayos, la resistencia a la corrosión del LDX 2101 se encuentra entre los niveles de resistencia de los muy conocidos aceros inoxidables 14.301 (también denominados 304, según la nomenclatura de AISI) y 14.316 (316 según AISI). El LDX 2101 presenta un muy alto contenido en cromo, el 21,5%, pero muy bajo en níquel, el 1,5%, lo cual contribuye a su competitividad económica.

Dado que su composición se encuentra entre la conocida gama de aceros inoxidables, este nuevo tipo de armadura de acero posee algunas características muy interesantes, por lo que habrá que seguir de cerca su desarrollo (véase [23]).

6. EL SEGUIMIENTO DE LA DURABILIDAD COMO PARTE DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO

En el caso de las estructuras existentes, se opina en general que para reducir los costes de mantenimiento y reparación es necesario realizar una inspección sistemática y periódica y registrar el comportamiento. Se está investigando si tal inspección puede basarse total o parcialmente en sensores remotos, lo cual supondría un considerable ahorro desde el punto de vista económico.



Figura 18: Montaje en estructuras existentes de sensores de corrosión patentados. El sistema se inspira en el sistema de seis etapas utilizado para el enlace Storebaelt (Gran Cinturón) de Dinamarca [8].

La tasa de penetración de cloruros y el valor umbral local respecto del inicio de su acción constituyen los dos parámetros más importantes. Tres muelles ya construidos han sido objeto de un seguimiento mediante sensores especiales de corrosión con el fin de determinar los valores de estos dos parámetros fundamentales en el entorno marino en cuestión.

Los sensores de corrosión consisten en seis aros finos de acero separados por un espacio de 10 mm y montados sobre un cilindro de acero inoxidable de tal forma que quedan eléctricamente aislados unos de otros, pero conectados a una toma de corriente en la superficie final (véase la Figura 18). El sensor se coloca en un hueco previamente taladrado en el hormigón, en el lugar elegido para realizar el seguimiento. Un perno de titanio revestido de platino se inserta en un taladro realizado junto al sensor. Mediante la medición, con un microamperímetro, de las corrientes eléctricas entre el perno (cátodo) y cada uno de los anillos del sensor, puede determinarse el momento en que los cloruros que superan el valor umbral han alcanzado el nivel de los aros activos.

6.1. EXPERIENCIA PRELIMINAR CON SENSORES INSTALADOS A POSTERIORI

Los datos recabados durante las campañas periódicas de inspección y medición llevadas a cabo en los últimos dos o tres años han proporcionado una información muy desigual.

De entrada, la primera generación de sensores instalados resultó ser demasiado sensible al proceso de instalación. Prácticamente la totalidad de estos primeros sensores sufrieron una rotura parcial o total del cableado interno durante el proceso de instalación. Estas roturas eran irreparables y los sensores irrecuperables. En vista de este problema, se fabricó una segunda generación de sensores que solventaba esta debilidad física.

En segundo lugar, se percibió que el hueco en el que había de colocarse el sensor debía ser muy preciso en cuanto a alineación y diámetro libre. Se estableció una tolerancia para el diámetro de +/- 5 mm. Basta con pasar muy pocas veces la broca para que el hormigón se desgaste, dando lugar a que el diámetro libre supere los límites de tolerancia.

En tercer lugar, los datos obtenidos con los sensores que aparentemente no habían resultado dañados han mostrado unas variaciones considerables entre unas lecturas y otras sin que exista, al parecer, correlación entre flujo de corriente, voltaje y resistividad eléctrica. Todavía no ha podido identificarse un valor umbral para la corrosión por cloruros, a pesar de más de dos años de ensayos y recopilación de datos. Esto podría deberse, sin embargo, a que los sensores parecen no ser operativos en condiciones de inmersión, en caso de mareas o en otras condiciones de saturación por agua casi continua.

7. LOS COSTES INICIALES Y EL COSTE DEL CICLO DE VIDA (LCC)

Dado que el cálculo de la vida útil se refiere al comportamiento de la estructura durante un largo período de tiempo, es pertinente analizar también los costes durante ese largo período de tiempo que, de hecho, coincide con la vida de proyecto prevista para las estructuras.

Si el coste del ciclo de vida (LCC) no se tiene seriamente en cuenta, el concepto mismo de exigencia de una vida útil se convierte en algo casi obsoleto. Ello se debe a que las diversas medidas que mejoran considerablemente a lo largo del tiempo el comportamiento en cuanto a durabilidad y que van a reducir de manera espectacular los futuros costes de mantenimiento de nuestro creciente stock de estructuras pueden imponer unos costes iniciales algo mayores. Si prevalece el tradicional síndrome de la «oferta más barata», todos los esfuerzos destinados a proyectar estructuras para una vida útil adecuada se harán en vano.

Con frecuencia, el aumento de los costes iniciales acaba siendo marginal. Así lo ponen de manifiesto los cálculos de coste inicial correspondientes a tres estructuras marinas reales proyectadas y construidas en Noruega durante el período 1995-1996 (véase la Figura 19).

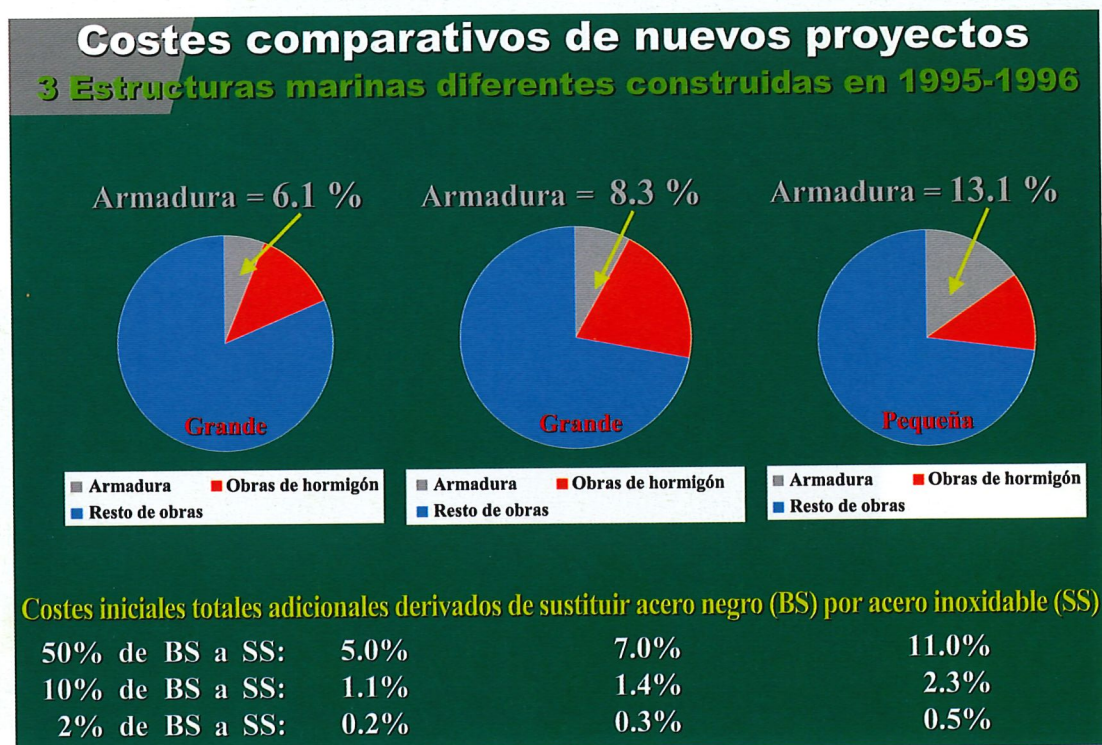


Figura 19: Ejemplo del aumento inicial de los costes totales de proyecto y construcción de tres estructuras marinas diferentes si el 50%, el 10% o el 2% de la armadura de acero ordinario negro hubiera sido sustituido por armadura de acero inoxidable. Se ha utilizado un factor 5 para representar el aumento del coste por kg de armadura de acero inoxidable ya recortado, doblado y colocado en el encofrado.

In Figure 19 change in overall total costs for these structures have been calculated if a replacement had been made of 50%, 10% or 2% of the ordinary black steel reinforcement (BS) to stainless steel reinforcement (SS) is illustrated. The costs for avoiding future extensive and costly repair works due to reinforcement corrosion seem very limited. In many ordinary structures, bridges and buildings, the reinforcement needing replacement would often be as low as 1-2% or even less. This ought to be taken seriously into account, in particular when selecting solutions for important infrastructure constructions.

8. CONCLUSION

Based on the information in this paper there are currently appearing very challenging new solutions to solve the serious reinforcement corrosion problems for reinforced concrete structures.

The merits of adopting corrosion resistant steel reinforcement of one or the other types mention here are that this will not introduce any serious -or noticeable - changes in the design and execution procedures for the our concrete structures; it will only solve the corrosion problem, and this achievement will be dramatic enough by itself.

The one main precondition is that the owners take true life cycle costs into account in one way or the other, so the long-term economic and performance based benefits can be quantified and enter as part of the decision basis.

The other main precondition is that the reinforcing steel producers shall take up this challenge and seriously focus on solutions that can be considered reliable in both corrosion resistance, in availability and in foreseeable costs.

Because of the obvious benefits for the owner, the user, the industry - except maybe the repair industry! - and for our whole society, this challenge must not be whipped under the carpet. The train has started to roll, see Figure 20, and either the industry contributes actively - or the concrete construction profession will loose out against other both classical and new solutions to obtain durable and cost effective constructions.

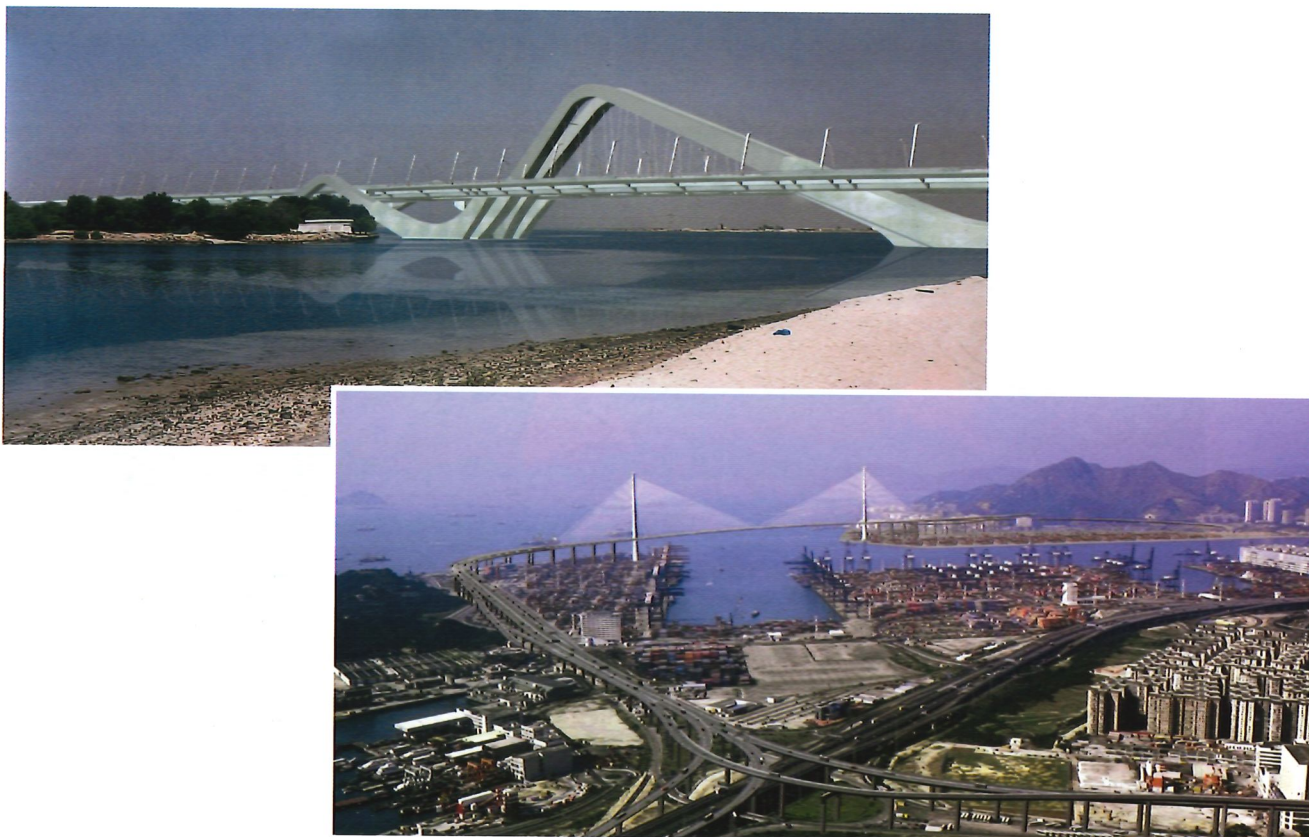


Figure 20: To the left: Stonecutters Bridge in Hong Kong. To the right Sheikh Zayed Bridge in Abu Dhabi. Both structure have high aesthetical values and the design life is 120 years for both. Stainless steel reinforcement has been chosen selectively as the outer layer of reinforcement in the pylons of the Stonecutters Bridge and in the lower concrete parts of the piers of the Shaik Zayed Bridge.

En la Figura 19, se ha calculado la diferencia que se habría producido en los costes totales de estas estructuras si el 50%, el 10% o el 2% de la armadura de acero ordinario negro (BS) hubiera sido sustituido por armadura de acero inoxidable (SS). Los costes necesarios para evitar en el futuro importantes y costosas obras de reparación debidas a la corrosión de la armadura parecen muy bajos. En muchas estructuras ordinarias, como los puentes y edificios, la armadura que habría de ser sustituida sería tan sólo el 1% o el 2%, o incluso menos. Esto ha de tenerse en cuenta seriamente, sobre todo al elegir soluciones para infraestructuras importantes.

8. Conclusión

Según se ha expuesto en el presente estudio, están apareciendo en la actualidad nuevas soluciones muy atractivas para los graves problemas de corrosión de la armadura de las estructuras de hormigón armado.

La ventaja de adoptar cualquiera de los tipos de armadura de acero resistente a la corrosión aquí mencionados es que ello no introducirá cambios importantes (ni perceptibles) en los procesos de proyecto y ejecución de nuestras estructuras de hormigón; tan sólo resolverá el problema de la corrosión, lo cual es ya de por sí bastante crucial.

Una de las condiciones previas esenciales es que la propiedad tenga verdaderamente en cuenta los costes del ciclo de vida de un modo u otro, de tal forma que las ventajas económicas y de resistencia a largo plazo puedan cuantificarse y tomarse en consideración a la hora de adoptar las decisiones.

La otra condición previa esencial es que los productores de acero para armaduras asuman el reto y se centren verdaderamente en soluciones que puedan ser consideradas fiables en cuanto a resistencia a la corrosión, disponibilidad y costes previsibles.

Dados los evidentes beneficios para la propiedad, el usuario, el sector (con la excepción quizás, del subsector de la reparación) y el conjunto de la sociedad, no debe correrse un velo sobre este reto. El tren se ha puesto en marcha (véase la Figura 20), por lo que o el sector del hormigón contribuye activamente, o la industria de la construcción en hormigón perderá terreno respecto a otras soluciones, tanto clásicas como novedosas, dirigidas a lograr unas construcciones duraderas y rentables.



Figura 20: A la izquierda, el puente de los Canteros, en Hong Kong. A la derecha, el puente Sheikh Zayed, en Abu Dabi. Tanto una como otra estructura tienen un elevado valor estético y la vida útil prevista de proyecto en ambos casos es de 120 años. Se han utilizado selectivamente armaduras de acero inoxidable en la capa exterior de los pilones del puente de los Canteros y en las partes inferiores de hormigón de los pilares del puente Sheikh Zayed.

9 References

- [1] Steen Rostam, Does High Performance Concrete Provide High Performance Concrete Structures?. Proceedings of the PCI/FHWA/fib International Symposium "High Performance Concrete", 24-27 September 2000, Orlando, USA.
- [2] Steen Rostam presented in fib Bulletin 3 Structural Concrete Textbook on Behaviour, Design and Performance. Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990 Volume 3, Chapter 5, pp 1-54, 1999.
- [3] G. Fagerlund, Service Life of Structures. General Report, Session 2.3, Proceedings, Rilem Symposium on Quality Control of Structures, June 1979, Stockholm, Sweden.
- [4] Steen Rostam and P. Schiessl, Service life design in practice - today and tomorrow. Proceedings of the International Conference 1994: Concrete across borders, Odense, Denmark 1994.
- [5] CEB-FIP, "Model Code 1990", 1992.
- [6] CEN, EN 1992, Eurocode 2, 1999.
- [7] Steen Rostam, Service Life Design - The European Approach. ACI Concrete International, July 1993.
- [8] Storebælt, East Tunnel, The Storebælt Publications. Published by A/S Storebæltsforbindelsen, 1997.
- [9] Steen Rostam, High performance concrete cover - why it is needed, and how to achieve it in practice. Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5. ELSEVIER SCIENCE LTD, 1996.
- [10] DuraCrete, General Guidelines for Durability Design and Redesign. The European Union - Brite EuRam III, Project No. BE95-1347, Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, Report No. R15, February 2000.
- [11] A.J.M. Siemes, and Steen Rostam, Durable Safety and Serviceability. A Performance Based Design. IABSE Colloquium 'Basis of Design and Actions on Structures'. March 27-29, 1996, Delft, the Netherlands. TNO-report 96-BT-R0437-001.
- [12] Steen Rostam, Aesthetics and Service Life Performance of Concrete Bridges. Bouwkroniek, Special Edition, Belgian concrete day 22 Oct. 1998.
- [13] Kenneth C. Clear, Effectiveness of Epoxy Coated Reinforcing Steel, Memorandum summarising findings and experience with Epoxy coated reinforcing steel sent to clients, associates, fellow researchers and engineers, Kenneth C. Clear Inc., January 10th, 1992, incl. reply by CRSI Concrete Reinforcing Institute by Theodore L. Neff., February 1992. pp 17.
- [14] Steen Rostam, Service life design for the next century. Proceedings of the International Workshop 'Rational Design of Concrete Structures under Severe Conditions'. K. Sakai, Editor. E & FN SPON, London, 1996.
- [15] D.G. Manning, Corrosion performance of epoxy-coated reinforcing steel: North American experience. Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, 1996, Elsevier Science Ltd. pp 349-365.
- [16] G. Markeset, Steen Rostam and T. Skovsgaard, Stainless steel reinforcement - an Owner's, a Designer's and a Producer's viewpoint, Proceedings, International Conference "6th International Conference on Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Arabian Gulf", November 2000, Bahrain.
- [17] U. Nürnberger, The Corrosion Properties of Stainless Steel Reinforcement, contribution to the Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Rolf Eligehausen anlässlich seines 60.Geburstages, "Befestigungstechnik, Bewehrungstechnik, und ...", ibidem-Verlag, Stuttgart 2002, pp 439-456.
- [18] O. Klinghoffer, Corrosion aspects of galvanic coupling between carbon steel and stainless steel in concrete, 21st May 1999, FORCE Institute, Denmark. pp 14.
- [19] P. Pedefferri et al, Behaviour of stainless steels in concrete. Repair and rehabilitation of reinforced structures:

9. Referencias

- [1] Steen Rostam, Does High Performance Concrete Provide High Performance Concrete Structures?. Proceedings of the PCI/FHWA/*fib* International Symposium "High Performance Concrete", 24-27 de septiembre de 2000, Orlando (EEUU).
- [2] Presentado por Steen Rostam en *fib* Bulletin 3 *Structural Concrete* Textbook on Behaviour, Design and Performance. Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990 Volume 3, Chapter 5, pp 1-54, 1999.
- [3] G. Fagerlund, Service Life of Structures. General Report, Session 2.3, Proceedings, *Rilem Symposium on Quality Control of Structures*, junio de 1979, Estocolmo (Suecia).
- [4] Steen Rostam and P. Schiessl, Service life design in practice - today and tomorrow. Proceedings of the International Conference 1994: *Concrete across borders*, Odense, (Dinamarca) 1994.
- [5] CEB-FIP, "Model Code 1990", 1992.
- [6] CEN, EN 1992, *Eurocode 2*, 1999.
- [7] Steen Rostam, Service Life Design - The European Approach. *ACI Concrete International*, julio de 1993.
- [8] Storebælt, East Tunnel, *The Storebælt Publications*. Published by A/S Storebæltsforbindelsen, 1997.
- [9] Steen Rostam, High performance concrete cover - why it is needed, and how to achieve it in practice. *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 5. ELSEVIER SCIENCE LTD, 1996.
- [10] DuraCrete, General Guidelines for Durability Design and Redesign. The European Union – Brite EuRam III, Project No. BE95-1347, *Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures*, Report No. R15, febrero de 2000.
- [11] A.J.M. Siemes, and Steen Rostam, Durable Safety and Serviceability. A Performance Based Design. IABSE Colloquium 'Basis of Design and Actions on Structures'. March 27-29, 1996, Delft (Países Bajos) . TNO-report 96-BT-R0437-001.
- [12] Steen Rostam, Aesthetics and Service Life Performance of Concrete Bridges. *Bouwkronek, Special Edition*, Belgian concrete day 22 de octubre de 1998.
- [13] Kenneth C. Clear, Effectiveness of Epoxy Coated Reinforcing Steel, Memorandum summarising findings and experience with Epoxy coated reinforcing steel sent to clients, associates, fellow researchers and engineers, Kenneth C. Clear Inc., 10 de enero de 1992, incl. reply by CRSI Concrete Reinforcing Institute by Theodore L. Neff., febrero de 1992. pp 17.
- [14] Steen Rostam, Service life design for the next century. Proceedings of the International Workshop 'Rational Design of Concrete Structures under Severe Conditions'. K. Sakai, Editor. E & FN SPON, Londres, 1996.
- [15] D.G. Manning, Corrosion performance of epoxy-coated reinforcing steel: North American experience. *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 5, 1996, Elsevier Science Ltd. pp 349-365.
- [16] G. Markeset, Steen Rostam and T. Skovsgaard, Stainless steel reinforcement - an Owner's, a Designer's and a Producer's viewpoint, Proceedings, International Conference "6th International Conference on Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Arabian Gulf", noviembre de 2000, Bahrain.
- [17] U. Nürnberger, The Corrosion Properties of Stainless Steel Reinforcement, contribution to the Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Rolf Eligehausen anlässlich seines 60. Geburtstag, "Befestigungstechnik, Bewehrungstechnik, und .", ibidem-Verlag, Stuttgart 2002, pp 439-456.
- [18] O. Klinghoffer, Corrosion aspects of galvanic coupling between carbon steel and stainless steel in concrete, 21st May 1999, FORCE Institute (Dinamarca). pp 14.
- [19] P. Pedferri et al, Behaviour of stainless steels in concrete. Repair and rehabilitation of reinforced structures: the

the state of the art, Ed: Silva Araya, WF et al, American Society of Civil Engineers, 1998, pp. 192-206.

- [20] **fib** Bulletin 1-3 Structural Concrete Textbook on Behaviour, Design and Performance. Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990 Volume 1-3, 1998-1999.
- [21] A. Knudsen, O. Klinghoffer and T. Skovsgaard, Pier in Progreso, Mexico. Inspection Report, pp. 40. Arminox Denmark, 1999.
- [22] Y. Schiegg, Initiation and Corrosion Propagation of Stainless Steel Reinforcement in Concrete Structures, Proceedings of the Congress of the European Federation of Corrosion, EUROCORR 2004, Nice, France, September 2004.
- [23] Edward James, New stainless steel alloy with implications for reinforced concrete, Concrete Engineering International, Winter 2004, pp24-25.

state of the art, Ed: Silva Araya, WF et al, *American Society of Civil Engineers*, 1998, pp. 192-206.

- [20] **fib** Bulletin 1-3 *Structural Concrete* Textbook on Behaviour, Design and Performance. Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990 Volume 1-3, 1998-1999.
- [21] A. Knudsen, O. Klinghoffer and T. Skovsgaard, Pier in Progreso, Mexico. Inspection Report, pp. 40. Arminox (Dinamarca), 1999.
- [22] Y. Schiegg, Initiation and Corrosion Propagation of Stainless Steel Reinforcement in Concrete Structures, Proceedings of the Congress of the European Federation of Corrosion, EUROCORR 2004, Nice (Francia), septiembre de 2004.
- [23] Edward James, New stainless steel alloy with implications for reinforced concrete, *Concrete Engineering International*, Invierno de 2004, pp24-25.

Relación de Personal Titulado de INTEMAC

Arquitectos

Fernández Sáez, Ana María
Fraile Mora, Serafín
González Balseyro, María José
López-Nava Muñoz, Alberto Ignacio
Luzón Cánovas, José M^a
Sánchez Arroyo, Jesús M^a
Sicilia Mañá, Beatriz

Ingeniero Aeronáutico

París Loreiro, Angel

Ingenieros de Caminos

Ayats Calsat, Juan
Baena Alonso, Eva
Barrios Corpa, Jorge
Barrios Corpa, Roberto
Beteta Cejudo, M^a Carmen
* Calavera Ruiz, José
Calderón Bello, Enrique
Castillo Fernández, Luis Javier
Corbacho Vicioso, José Angel
Cortés Bretón, Juan María
Corral Folgado, Claudio
De la Cuerda del Olmo, Francisco Javier
De la Fuente Gómez, Ana Isabel
Dávila Sánchez-Toscano, Suyapa
Díaz Heredia, Elena
Díaz Lozano, Justo
Díaz Pavón Cuaresma, Eduardo
Encinar Arroyo, Antonio
Fernández García, Susana
* Fernández Gómez, Jaime Antonio
García de Diego Cano, Eva María
González González, Juan José
González Reyeró, Carlos
* González Valle, Enrique
* Hostalet Alba, Francisco
* Izquierdo Bernaldo de Quirós, José M^a
Jiménez Ortiz, Gonzalo
* Ley Urzaiz, Jorge
Munugarren Martínez, Miguel Angel
Penadés Olaso, Sergio
Pérez García, Noemí
Prieto Tomé, Alfonso
Recio Cañadas, Alba
Rodríguez Escribano, Raúl Rubén
* Rodríguez Romero, Jesús M^a
Rueda Contreras, Jorge Ladislao
Ruiz Fuentes, María Josefa
Ruiz Jiménez-Alfaro, Felipe
Sanz Pérez, Lorenzo
Sirvent Sirvent, Enrique
Tapia Menéndez, José
Torre Cobo, María Carmen
Torres Pérez, Elisa
Valdés Fernández de Alarcón, Pablo
Villanueva Ramírez, Santiago

Ingeniero en Cartografía y Geodesia

López-Canti Casas, Elisa

Ingenieros Civiles

Almeida da Silva, Pedro Miguel
Teixeira Martins, Hermano Tiago

Ingeniero Geólogo

Catalán Navarro, Antonio

Ingeniero I.C.A.I.

Marín Estévez, Gonzalo

Ingenieros Industriales

- * Alvarez Cabal, Ramón Amado
- Aníbarro Pérez, Paula
- Arroyo Arroyo, José Ramón
- Bayonne Sopo, Enrique
- De la Cruz Morón, Diego
- Estrada Gómez, Rafael
- García Malpartida, Javier
- González Carmona, Manuel
- Liébana Ramos, Miguel Angel
- López Bravo, Soraya
- Martos Ojanguren, Víctor
- Suárez Fernández, Antonio
- Torruella Martínez, Josep M^a
- * Valenciano Carles, Federico

Ingeniero de Minas

Ramos Sánchez, Adelina

Ingeniero de Montes

Pérez Fuentes, María Esther

Ingeniero Químico

Andrade Grande, Alba María

Dra. en Geografía e Historia

Calavera Vayá, Ana María

Licenciada en Administración y Dirección de Empresas

Perales Gómez, Natalia

Licenciado en Ciencias Ambientales

Gil Esteban, Luis Miguel

Licenciado en C. Económicas y Empresariales

González Chavero, Antonio

Licenciado en Ciencias Físicas

Salas Roa, Luis David

Licenciados en Ciencias Químicas

Fernández Sendino, Marta
Grandes Velasco, Sylvia María
Iglesias Hernaiz, María Angeles
López Sánchez, Pedro
Morgado Sánchez, José Carlos

Licenciados en Derecho

González del Olmo, Alfredo
Jarillo Cerrato, Pedro

Licenciada en Filología Hispánica

Valentín Sierra, M^a Consuelo

NOTA: Todo el personal de INTEMAC trabaja en dedicación completa y exclusiva, con la excepción de las personas arriba indicadas con * a las que se autoriza la dedicación a la Enseñanza Universitaria en régimen de dedicación parcial.

Licenciados en Geología

Blanco Zorroza, Alberto
Casado Chinarro, Alejandro
Catalán Navarro, Antonio
Díaz Castañeda, Esteban
Fernández Carretero, Carlos Javier
López Velilla, Oscar
Pedrosa Ortiz, Germán
Salado Rodilla, Luis
Usillos Espín, Pablo

Arquitectos Técnicos

Carrato Moñino, Rosa M^a
Fernández Jiménez, Amelia
Galán Rivera, Sofía
Gallego Castro, Sergio
Montejano Jiménez, María del Carmen
Muñoz Mesto, Angel
Muñoz Ortega, Andrés
Sanz Burgueño, Miguel Angel
Vaquero Navarro, Carlos
Vicente Minguela, Francisco

Ingenieros Técnicos Industriales

Alcubilla Villanueva, Rubén
Alvarez Pascual, Javier
Campano Pérez, María Josefa
Díaz-Trechuelo Laffón, Antonio
García Campos, María de la Luz
Madueño López, Javier
Madueño Moraño, Antonio
Muñoz Garijo, Francisco Javier
Pérez Berenguer, José Gil
Piñeiro Herrero, Alberto
Rodríguez Luque, Ana María
Sáez Comet, Carlos
Sánchez Bueno, Juan Jesús
Santos Barrero, Francisco Javier
Villar Riñones, Jesús

Ingeniero Técnico en Informática de Gestión

Esteban Pérez, Ramón

Ingeniero Técnico de Minas

Sillero Arroyo, Andrés

Ingenieros Técnicos Obras Públicas

Carrero Crespo, Rafael

Galán de Cáceres, M^a del Puerto
García Ramos, Enrique
González Isabel, Germán
González Nuño, Luis
Gutiérrez Garrosa, Raul
Hernández Velasco, M^a Concepción
Mata Soriano, Juan Carlos
Mazuecos Salas, Ildefonso
Montiel Sánchez, Ernesto
Muñoz Martín, Jesús
Muñoz Mesto, Angel
Ortiz del Campo, Natalia
Pino Vaquero, José Angel
Prieto Malillos, Raquel
Ramos Valdés, Raquel
Rivera Jiménez, Marta
Romero García, Daniel
Romero Panizo, José Fernando
Rosa Moreno, José Andrés
Rozas Hernando, José Juan
Sánchez Tomé, Elena
Sánchez Vicente, Andrés
Sillero Olmedo, Rafael
Soto López, Elena del
Vicente Girón, Susana

Ingeniero Técnico de Telecomunicación

Vicent Cantero, Francisco José

Ingenieros Técnicos Topógrafos

Barragán Bermejo, M^a Vicenta
Carreras Ruiz, Francisco
Lana Campos, Rebeca
López Jiménez, Luis
Molero Vicente, M^a Isabel
Sánchez Martín, María de la O
Torés Campos, Ana M^a
Vicente Conde, M^a Isabel

Técnicos en Administración de Empresas

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

Técnico en Publicidad

Blanco Armas, Cristina

Topógrafo

Alquézar Falceto, Ricardo

NOTA: Todo el personal de INTEMAC trabaja en dedicación completa y exclusiva, con la excepción de las personas arriba indicadas con * a las que se autoriza la dedicación a la Enseñanza Universitaria en régimen de dedicación parcial.

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.

Precio de la suscripción Año 2005: 27 €



ULTIMOS TITULOS PUBLICADOS

Cuaderno Nº 60

"Recintos y huecos para instalaciones en edificios de viviendas".

Autores: **G. MARTÍ ESTÉVEZ;**
Ing. ICI

F. VALENCIANO CARLES.
Ing. Industrial

Cuaderno nº 61

"Vida útil de las estructuras de hormigón"

Autor: **STEEN ROSTAM**
Civil Engineer

CUADERNOS DE PROXIMA APARICION

Cuaderno Nº 62

"Recomendaciones para el proyecto de muros de sótano sometidos a cargas verticales originadas por pilares de fachada"

Autor: **A. DE LA PEÑA**

Consulte lista completa de la Colección

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 Nº 5

"Mantenimiento y reparación de paramentos de hormigón".

Autores: **R. Barrios Corpa, C. Beteta Cejudo, E. Díaz Heredia,**
Prof. J. Fernández Gómez, J. M. Rodríguez Romero.

Precio de la Monografía 33 €

MONOGRAFÍA INTEMAC Nº 6

"Patología, técnicas de intervención y limpieza de fábricas de ladrillo".

Autores: **P. López Sánchez, J. M. Luzón Cánovas, I. Martínez Pérez,**
A. Muñoz Mesto, A. Fernández Sáez.

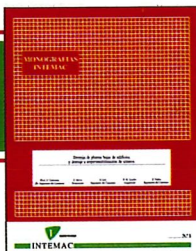
Precio de la Monografía 33 €

MONOGRAFÍA INTEMAC Nº 7

"Estructuras de madera".

Autores: **J. M. Izquierdo y Bernaldo de Quirós.**

Precio de la Monografía 33 €



NOTAS DE INFORMACIÓN TÉCNICA NIT

En INTEMAC se producen, con frecuencia, notas de información sobre temas que pensamos que no solamente tienen una utilidad interna sino que pueden resultar interesantes para muchos Técnicos de la Construcción.

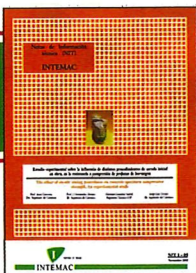
NOTAS DE INFORMACIÓN TÉCNICA NIT 1 (05)

"Estudio experimental sobre la influencia de distintos procedimientos de curado inicial en obra, en la resistencia a compresión de probetas de hormigón".

Autores: **J. Calavera Ruiz, J. Fernández Gómez,**
G. González Isabel, J. Ley Urzaiz

Edición bilingüe (español e inglés) en color.

Precio 11 €



NOTAS DE INFORMACIÓN TÉCNICA NIT 2 (05)

"El Incendio del Edificio Windsor de Madrid. Investigación del comportamiento al fuego y de la capacidad resistente residual de la estructura tras el incendio".

Autores: **J. Calavera Ruiz, E. González Valle, J. Díaz Lozano, J. L. Cano Muñoz,**
J. Fernández Gómez, J. M. Izquierdo y Bernaldo de Quirós, J. Ley Urzaiz.

Edición bilingüe (español e inglés) en color.

Precio 15,5 €

VÍDEOS TÉCNICOS Y DVD'S

Muestreo de hormigón fresco. Fabricación y ensayo de probetas de hormigón.

Nº 2001 (1-1)

Contempla de forma completa y detallada el proceso de toma de muestras de hormigón fresco en obra, la medida de la consistencia con el Cono de Abrams, fabricación de probetas, curado en obra, transporte al laboratorio, curado en cámara, refrentado y ensayo a compresión.

Esta nueva versión del vídeo 8801 (1), introduce las modificaciones de EHE y un sistema de estudio de la distribución de presiones de la prensa sobre la probeta así como los aspectos particulares del ensayo de hormigones de alta resistencia.

30 minutos - 25 €



Fabricación y control de calidad de barras y mallas para hormigón armado.

Nº 2002 (1-2)

Muestra el proceso de laminación en fábrica de las barras y alambres, la fabricación de mallas y los ensayos de tracción, doblado, arrancamiento de nudos y determinación de las características geométricas del corrugado y el ensayo de Beam-test para la determinación de las características de adherencia.

30 minutos - 25 €



Compresión centrada en hormigón armado.

Nº 2002 (1-4)

Contempla la rotura de siete pilares a escala real, variando resistencias de hormigón desde 25 N/mm² a 100N/mm², las cuantías de armaduras, la separación de estribos y la velocidad de carga conectando todo ello con las fórmulas de cálculo.

35 minutos - 25 €

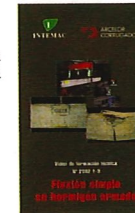


Flexión simple en hormigón armado.

Nº 2002 (1-3)

Incluye el ensayo a rotura de cinco vigas a escala real, con diferentes cuantías y diferentes desarrollos de adherencia conectando todo ello con las fórmulas de cálculo.

35 minutos - 25 €

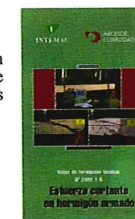


Esfuerzo cortante en hormigón armado.

Nº 2002 (1-5)

Muestra el ensayo a rotura de cinco vigas a escala real, con diferentes formas de rotura por corte (Tracción diagonal, corte flexión, compresión diagonal, etc.) conectando todo ello con las fórmulas de cálculo.

25 minutos - 25 €



BOLETÍN BIBLIOGRÁFICO

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.

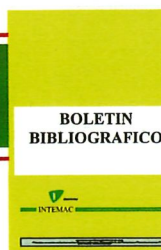
EL BOLETIN BIBLIOGRAFICO incluye:

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) 152 €



Consulte otras publicaciones

www.intemac.es



Nueva edición

Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado

2ª edición (2 tomos)

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 120 €



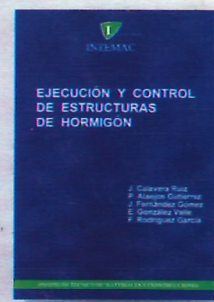
Nueva publicación

Fichas de ejecución de obras de hormigón

2ª edición

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 50 €



Nueva publicación

Ejecución y control de estructuras de hormigón

J. Calavera, P. Alaejos Gutiérrez,
J. Fernández Gómez, E. González Valle,
F. Rodríguez García

Precio: 100 €



Manual para la redacción de informes técnicos en construcción

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 72 €



Manual de Ferralla

3ª edición

J. Calavera, E. González Valle,
J. Fernández Gómez, F. Valenciano

Precio: 38 €



Proyecto de estructuras de hormigón con armaduras industrializadas

J. Calavera, E. González Valle,
J. Fernández Gómez, F. Valenciano

Precio: 47 €

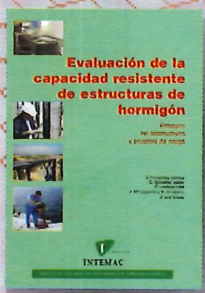


Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificación

5ª edición

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 100 €



Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón

J. Fernández Gómez, G. González Isabel,
F. Hostalet Alba, J. Mª Izquierdo, J. Ley Urzaiz

Precio: 58 €

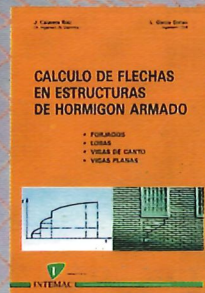


Muros de contención y muros de sótano

3ª edición

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 71 €



Cálculo de flechas en estructuras de hormigón armado

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)
L. García Dutari (Ingeniero Civil)

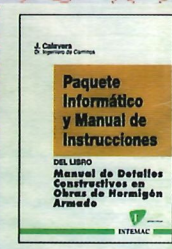
Precio: 50 €



Manual de detalles constructivos en obras del hormigón armado

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Libro: 112 € - Paquete informático: 198 €



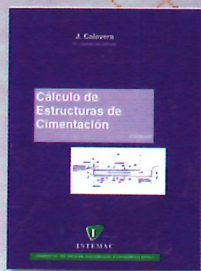
INTEMAC

Mario Roso de Luna, 29, Ed. 12 - 28022 MADRID

TEL.: 91 327 74 00 • FAX: 91 327 74 20

e-mail: intemac@intemac.es

www.intemac.es



Cálculo de estructuras de cimentación

4ª edición

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 71 €



Hormigón de alta resistencia

G. González-Isabel (Ingeniero Técnico de O. P.)

Precio: 44 €



Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón

A. Delibes (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 54 €