

# CUADERNOS INTEMAC

**Tecnología moderna de durabilidad**

**Modern durability technology**

---

Dr. Steen Rostam



**INTEMAC**

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

**N.º 5**

**1.º TRIMESTRE '92**

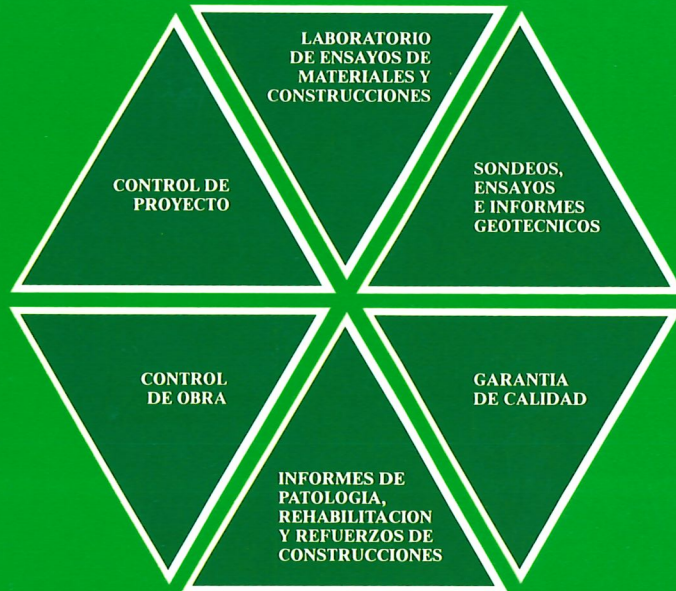




# INTEMAC

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

OBRAS PUBLICAS  
EDIFICACION  
INSTALACIONES



**INTEMAC**  
AUDIT



AUDITORIA TECNICO-ECONOMICA  
DE CONSTRUCCIONES

---

TECNOLOGÍA MODERNA DE DURABILIDAD (\*)  
MODERN DURABILITY TECHNOLOGY (\*)

*Dedicado al*  
**Profesor José Calavera Ruiz**  
*en su 60 aniversario*  
*23 de Octubre de 1991*



Dr. Steen Rostam  
Dr. Ingeniero Civil.  
Ingeniero Jefe de COWI-consult,  
Ingenieros Consultores (Copenhague).  
Ex-profesor de la Universidad Técnica  
de Dinamarca.  
Presidente del Grupo de Trabajo  
«Durabilidad» del CEB.  
Preside actualmente la Comisión V  
«Uso y Mantenimiento» del CEB.

Prof. Dr. Steen Rostam  
Dr. Civil Engineer.  
Engineer of COWI-consult, Consulting  
Engineers (Copenhague).  
Ex-Professor of the Technical University  
of Denmark.  
President of the Task Group «Durability»  
of the CEB.  
At Present, President of the  
Commission V Use and Maintenance of  
the CEB.

---

(\*) Esta Publicación recoge el texto de la Conferencia pronunciada el 23 de octubre de 1991 por el Dr. Rostam en el Ciclo de Conferencias «PATOLOGÍA, REHABILITACIÓN Y REFUERZO DE OBRAS DE HORMIGÓN ARMADO» que organizado por INTEMAC, tuvo lugar en Barcelona, del 21 al 25 de octubre de 1991, en coincidencia con el curso de Patología organizado por el Instituto en esas mismas fechas.

(\*) This Publication includes the paper from the Conference given on the 23th. October 1991 by Dr. Rostam during the Series of Conferences organized by INTEMAC on «PATHOLOGY, REHABILITATION AND STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES» which were held in Barcelona, from the 21 to 25 October 1991, in coincidence with the course on Pathology organized by the Institute on the same days.

---

Copyright © 1992, 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.

ISBN: 84-87892-03-5

Depósito legal: M-11.560-1992  
Torreangulo Arte Gráfico, S. A. - Batalla de Belchite, 19



## INDEX

### Synopsis

- 1 PRINCIPLES OF MODERN DURABILITY TECHNOLOGY
- 2 DETERIORATION MECHANISMS AND GOVERNING PARAMETERS
  - 2.1. Water
  - 2.2. Salt
  - 2.3. Time Development
  - 2.4. Transport Phenomena
- 3 CONSEQUENCES FOR DURABLE DESIGNS FOR THE FUTURE
  - 3.1. Gross-Error Problems, a Challenge to Education, Information and Quality Assurance
  - 3.2. Durable Designs Following the CIB-FIP Model Code 1990 (MC 90)
    - 3.2.1. Basic Requirements
  - 3.3. Service Life Design
  - 3.4. Building Should Grow Old Gracefully
  - 3.5. Multi-stage Protection Strategy
  - 3.6. Inspectable and Maintainable Structures
  - 3.7. Structural Form
  - 3.8. Concrete Cover and Spacers
  - 3.9. Prestressed Structures
  - 3.10 Special Protective Measures
- 4 EXECUTION
- 5 MAINTENANCE
- 6 STRUCTURES MANAGEMENT SYSTEMS
  - 6.1. The «Law of fives»
  - 6.2. The «Low-Bid Syndrome»
  - 6.3. The Build Environment as a «Political Yo-Yo»
- 7 THE GREAT BELT LINK, DENMARK
  - 7.1 100 Year Service Life Design
  - 7.2. Eastern Tunnel
  - 7.3. West Bridge
  - 7.4. East Bridge
- 8 REFERENCES

## INDICE

### Sinopsis

- 1 PRINCIPIOS DE LA TECNOLOGIA MODERNA DE DURABILIDAD
2. MECANISMO DE DETERIORO Y PARAMETROS REGULADORES
  - 2.1 Agua
  - 2.2 Sal
  - 2.3 Desarrollo temporal
  - 2.4 Fenómenos transporte
- 3 CONSECUENCIAS PARA PROYECTOS DURABLES PARA EL FUTURO
  - 3.1 Problemas de errores graves. Un desafío a la educación, información y garantía de calidad
  - 3.2 Proyectos durables según el CEB-FIP Model Code 1990 (MC 90)
    - 3.2.1 Requisitos básicos
  - 3.3 Proyecto de vida útil
  - 3.4 Los edificios deberían envejecer elegantemente
  - 3.5 Estrategia de protección multigrado
  - 3.6 Estructuras inspeccionables y mantenibles
  - 3.7 Forma estructural
  - 3.8 Recubrimiento de hormigón y separadores
  - 3.9 Estructuras pretensadas
  - 3.10 Medidas de protección especiales
- 4 EJECUCION
- 5 MANTENIMIENTO
- 6 SISTEMAS DE GESTION DE ESTRUCTURAS
  - 6.1 La «Ley de los Cincos»
  - 6.2 El «Síndrome de la oferta baja»
  - 6.3 El ambiente de la construcción como «yo-yo político»
- 7 EL ENLACE DE GRAN BELT, DINAMARCA
  - 7.1 Diseño dirigido a 100 años de vida útil
  - 7.2 El Túnel del Este
  - 7.3 Puente del Oeste
  - 7.4 Puente del Este
- 8 BIBLIOGRAFIA

---

## Synopsis

The fundamentals of Modern Durability Technology is to develop consistent engineering models describing the deterioration mechanisms threatening safety, serviceability and durability of concrete structures.

Based on these models, durability aspects can be developed to include the whole range of structural engineering problems from operation, maintenance, inspection, assessment, repair and redesign of existing structures to design and execution of new structures.

Past experience from inspection, maintenance and repair of existing structures shall be utilized to identify and calibrate the critical parameters governing these engineering models.

The 18 km long, 3 billion USD Great Belt Link in Denmark constitutes an 8 km twin bored railway tunnel, a 6.6 km low level combined road and railway bridge and a 6.8 km long high level road bridge with a record suspension span of 1,624 m. A 100 year service life design has been specified. The measures adopted to fulfill this requirement are presented.

---

Keywords: Concrete, Durability, Service Life Design, Maintenance Strategy, Management Systems.

## 1 PRINCIPLES OF MODERN DURABILITY TECHNOLOGY

Handling durability problems for concrete structures has proven to cover a very wide range of technical disciplines, such as:

- Design (structural form, codes)
- Structural analysis (structural behaviour, statics)
- Materials technology (materials composition)
- Execution (workmanship, local traditions)
- Statistics (probabilities, reliability theory)
- Economy

This knowledge shall be implemented in different ways, e.g.:

- Maintaining structures in use requires knowledge of:
  - Deterioration mechanisms
  - Environmental aggressivity (micro environment)
  - Structural and materials testing
  - Assessment
  - Maintenance
  - Repair and upgrading (selecting a strategy)
  - Instrumentation and monitoring
  - Safety and reliability
  
- Design of new structures requires knowledge of:
  - Deterioration mechanisms
  - Environmental aggressivity
  - Protective measures (selecting a strategy)
  - Design and execution
  - Maintenance

The present author has presented a number of papers on the above topics (Ref. 1, 2, 3, 4).



## Sinopsis

La idea fundamental de la Tecnología Moderna de Durabilidad es desarrollar modelos de ingeniería consistentes, describiendo los mecanismos de deterioro que amenazan la seguridad, serviceabilidad y durabilidad de las estructuras de hormigón.

Basados en estos modelos, los aspectos de la durabilidad pueden ser desarrollados para incluir toda la gama de problemas de ingeniería estructural desde el uso, mantenimiento, inspección, evaluación, reparación y rediseño de estructuras existentes, al diseño y ejecución de nuevas estructuras.

La experiencia pasada de inspección, mantenimiento y reparación de estructuras existentes será aplicada para identificar y calibrar los parámetros críticos que gobiernan estos modelos de ingeniería.

El Enlace del Gran Belt en Dinamarca, de 18 km. y de 3.000 millones de dólares (340.000 millones de ptas.) incluye un túnel doble perforado para ferrocarril de 8 km., un puente de bajo nivel combinado para tráfico de carretera y ferrocarril de 6,6 km., y un puente colgante de alto nivel de 6,8 km. para el tráfico de carretera, con luz récord de suspensión de 1.624 m. Un diseño de vida útil de 100 años ha sido prescrito para este proyecto. Las medidas adoptadas para lograr este requisito son presentadas en este artículo.

---

Palabras clave: Hormigón, Durabilidad, Diseño de Vida Útil, Estrategia de Mantenimiento, Sistemas de Gestión.

## 1 PRINCIPIOS DE LA TECNOLOGIA MODERNA DE DURABILIDAD

El tratamiento de los problemas de durabilidad para estructuras de hormigón cubre una gama muy amplia de disciplinas técnicas, como:

- Proyecto (forma estructural, normas)
- Análisis estructural (comportamiento estructural, estática)
- Tecnología de materiales (composición de materiales)
- Ejecución (competencia de la mano de obra, tradiciones locales)
- Estadística (probabilidades, teoría de la fiabilidad)
- Economía

Este conocimiento será implementado de diferentes maneras. Por ejemplo:

- El mantenimiento de estructuras en uso requiere el conocimiento de:
  - Mecanismos de deterioro
  - Agresividad ambiental (microambiente)
  - Pruebas estructurales y de materiales
  - Evaluación
  - Mantenimiento
  - Reparación y puesta al día (seleccionando una estrategia)
  - Instrumentación y supervisión
  - Seguridad y fiabilidad
- El diseño de nuevas estructuras requiere el conocimiento de:
  - Mecanismos de deterioro
  - Agresividad ambiental
  - Medidas protectoras (seleccionando una estrategia)
  - Proyecto y ejecución
  - Mantenimiento

El autor de este artículo ha publicado anteriormente artículos sobre los temas arriba mencionados (Ref. 1, 2, 3, 4).

## 2 DETERIORATION MECHANISMS AND GOVERNING PARAMETERS

In view of the year-long intensive discussions about the insufficient durability of concrete, it is interesting that there are only four really important mechanisms, i.e.

- Reinforcement corrosion
- Alkali-silica reactions
- Chemical attacks (e.g. sulphate)
- Freeze-thaw bursting

Corrosion destroys primarily the reinforcement and the three others destroy primarily the concrete.

Amongst the main governing parameters, the presence of water and salt are the two most decisive parameters for all of these mechanisms.

### 2.1 Water

All deterioration mechanisms require the presence of water in sufficient amounts. Only cracks caused by imposed deformations (e.g. differential settlements and temperature differences) and mechanical wear can take place without water. Such cracking is not necessarily to be considered deterioration as such, but can open the concrete for ingress of other harmful materials.

Any kind of dry-keeping of the concrete will reduce the rate of damage development. Indoor concrete is normally sufficiently dry that damage will not develop under normal usages, even if all other conditions for the development of damage are present.

### 2.2 Salt

Chloride based salts are some of the most harmful materials to which concrete can be exposed, either when mixed into the fresh concrete or when sprayed on to the concrete surface from which it can enter into the concrete.

Salt has a fourfold harmful effect on concrete structures:

- Chloride based salts provide serious risk for local pit corrosion of the bars when the chlorides ( $\text{Cl}^-$ ) reach the reinforcement. This has been the most serious threat for concrete structures in the eighties and will remain so during the nineties.
- If the salt contains alkali-metal ions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), they also enter the concrete. The concrete's total alkali content is thereby increased with added risk for alkali-silica reactions in cases where concrete contains reactive particles.
- As de-icing agent, salting causes a freezing shock of the concrete surfaces when ice is forced to thaw. This can result in thermo cracks which open the concrete for subsequent ingress of water, salts or other materials. Furthermore, scaling of the concrete can occur due to combined salting and frost-thaw effects.
- Salt is hygroscopic. With salt in the concrete —mixed in or entered into— it is more difficult to dry up the concrete and in this manner stop possible development of the deterioration.

The individual mechanisms are thoroughly described in the literature, i.e. in Ref. 5.

### 2.3 Time Development

In overall terms nearly all deterioration mechanisms develop in time along the broken curve illustrated in Fig. 1.

Regardless of how crude this curve looks it illustrates the very important fact that deterioration passes through two different phases, that is:



## 2 MECANISMO DE DETERIORO Y PARAMETROS REGULADORES

En vista de las intensas discusiones sostenidas durante años sobre la insuficiente durabilidad del hormigón, es interesante constatar que realmente sólo existen cuatro mecanismos realmente importantes (Ref. 5 y 8):

- La corrosión de la armadura
- Las reacciones álcali-sílice
- Ataques químicos
- Daños por ciclos hielo/deshielo

La corrosión destruye primordialmente la armadura y los tres restantes destruyen principalmente el hormigón.

Entre los parámetros reguladores, la presencia del agua y sal son los dos parámetros más decisivos para todos estos mecanismos.

### 2.1 Agua

Todos los mecanismos de deterioro requieren la presencia de agua en cantidades suficientes. Sólo las fisuras causadas por deformaciones impuestas (v. g. asentamientos diferenciales y diferencias de temperatura) y desgaste mecánico pueden ocurrir sin la presencia del agua. Esta fisuración no es necesario considerarla deterioro como tal, pero puede abrir el hormigón a la penetración de otras sustancias nocivas.

Cualquier tipo de protección seca del hormigón reducirá el grado de desarrollo de los daños. El hormigón en interiores es normalmente suficientemente seco para que el daño no se manifieste bajo condiciones de uso normales, aunque todas las otras condiciones para el desarrollo de los daños estén presentes.

### 2.2 Sal

Las sales basadas en cloruro son una de las sustancias más nocivas a las que el hormigón pueda estar expuesto, ya sea cuando están mezcladas en el hormigón fresco o salpicadas sobre la superficie de la estructura a través de la cual pueden penetrar en el hormigón.

La sal tiene un efecto nocivo cuádruple en las estructuras de hormigón:

- Las sales basadas en cloruros proveen serios riesgos para la corrosión concentrada de cavidad local de las barras cuando los cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) llegan a la armadura. Esta ha sido la amenaza más seria para las estructuras de hormigón en la década de los años ochenta y va a permanecer de este modo durante la década de los noventa.
- Si la sal contiene iones álcali-metal ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), penetran también el hormigón. El contenido de álcali total del hormigón es por ello aumentado con riesgo adicional de reacciones álcali-sílice en casos donde el hormigón contenga partículas reactivas.
- Como agente deshelador, la aplicación de sal causa un «choque frío» de la superficie del hormigón cuando el hielo es obligado a deshelarse. Esto puede provocar resquebrajamientos térmicos que abren el hormigón a la subsiguiente penetración del agua, sales y otros materiales. Más aún, la formación de escamas en el hormigón puede ocurrir debido a los efectos combinados de la aplicación de la sal y a ciclos de hielo/deshielo.
- La sal es higroscópica. Con sal en el hormigón —mezclada o penetrada— es más difícil secar el hormigón y de esta manera parar el posible avance del deterioro.

Los mecanismos individuales son profundamente descritos en la literatura, entre otras en la Ref. 5

### 2.3 Desarrollo temporal

En términos generales casi todos los mecanismos de deterioro se desarrollan a través del tiempo a lo largo de la curva quebrada ilustrada en la Fig. 1.

Indiferentemente de lo cruda que pueda parecer esta curva, ilustra el hecho muy importante de que el deterioro pasa por dos fases diferentes, a saber:

- An initiation phase, during which no noticeable weakening of the material or of the function of the structure occur, but some protective barrier is broken down or overcome by the aggressive media. Carbonation (see Fig. 2), chloride penetration (see Fig. 3) and sulphate accumulation, the latter two accelerated by cyclic wetting and drying, are examples of mechanisms developing during the initiation period. The duration of the initiation period is mainly governed by the rate of capillary suction, by diffusion and by permeation.

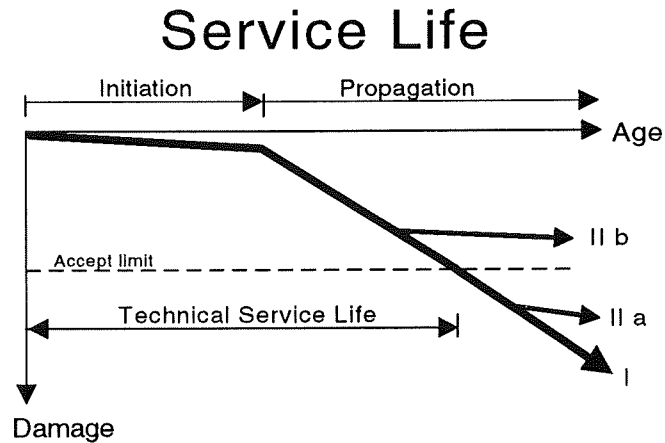


Fig. 1. Technical Service Life.

## Initiation

Example  
Carbonation

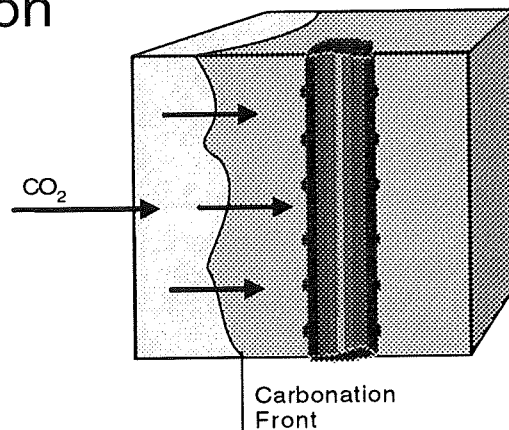


Fig. 2. Initiation by carbonation of concrete.

## Initiation

Example  
Cl<sup>-</sup> - penetration

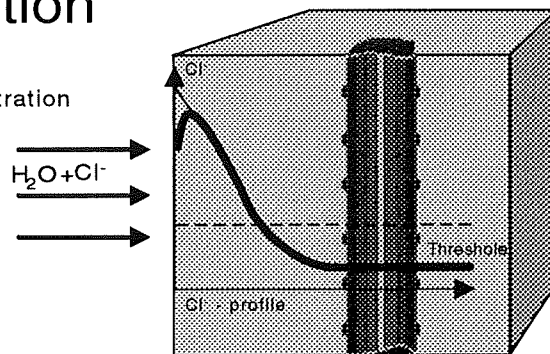


Fig. 3. Initiation by chloride penetration.



- Una fase de iniciación, durante lo cual no ocurre ninguna debilitación del material o de la estructura, pero durante la cual alguna barrera protectora es vencida o superada por el medio agresivo. La carbonatación (ver Fig. 2), penetración del cloruro (ver Fig. 3) y acumulación de sulfato, los dos últimos acelerados por el mojado y secado cíclicos, son ejemplos de mecanismos en desarrollo durante el período de iniciación. La duración del período de iniciación es principalmente regulada por el grado de succión capilar, por difusión y por permeabilidad.

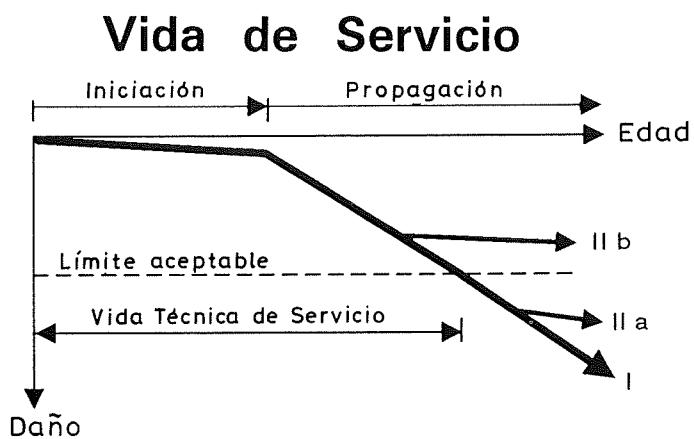


Fig. 1. Vida Util Técnica.

### Iniciación

Ejemplo de Carbonatación

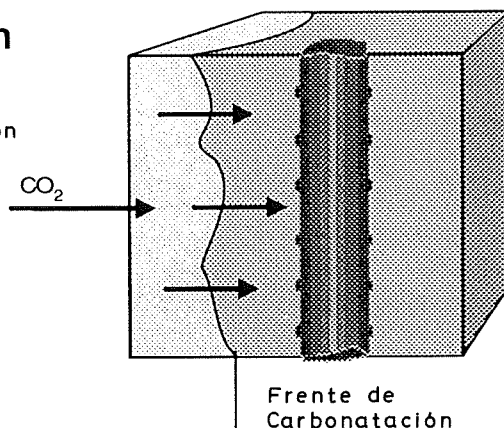


Fig. 2. Iniciación por carbonatación del hormigón.

### Iniciación

Penetración de  $Cl^-$

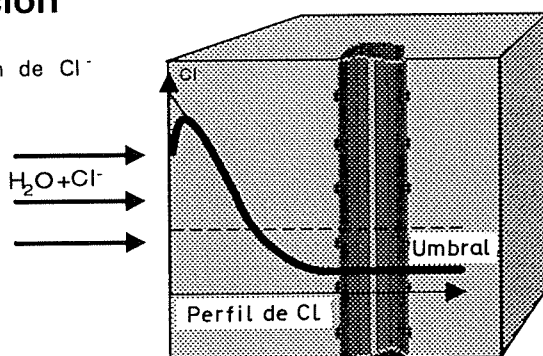


Fig. 3. Iniciación por penetración de cloruro.

- A propagation phase, during which active deterioration normally proceeds rapidly and in a number of cases at accelerating pace. Reinforcement corrosion is one such important example of propagating deterioration. The engineering mechanism for corrosion is presented in Fig. 4. The rate of propagation of corrosion is mainly governed by diffusion and electric potentials and resistivity of the concrete.

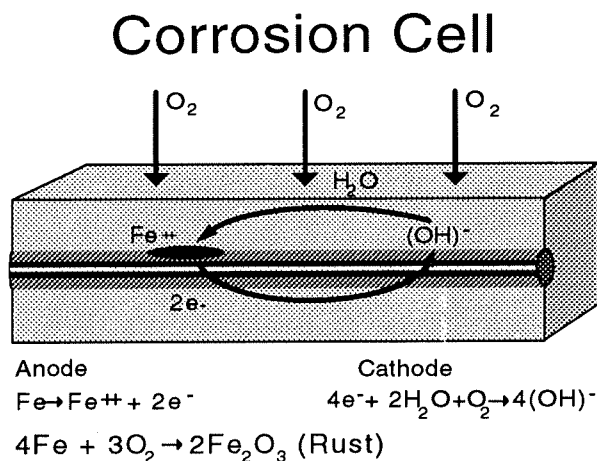


Fig. 4. Propagation by corrosion of reinforcement.

## 2.4 Transport Phenomena

From the above description one very decisive fact comes clear:

All important deterioration processes depend on some substance penetrating from the outside into the bulk of the concrete through the surface.

It is important to realize the consequences of these transport mechanisms when assessing structures, when selecting repair methods, and when designing and constructing new and durable structures, i.e. see Fig. 5.

### Parameters

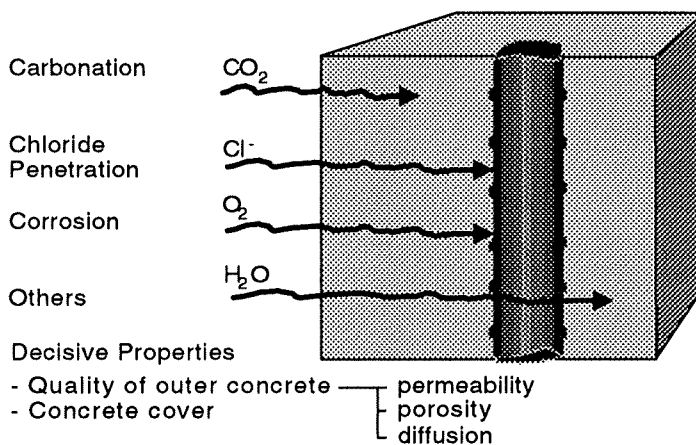


Fig. 5. Transport mechanisms: governing parameters.



— Una fase de propagación, durante la cual el deterioro activo normalmente avanza rápidamente y en muchos casos a un ritmo acelerado. La corrosión de la armadura es uno de tales importantes ejemplos del deterioro propagado. El mecanismo teórico de la corrosión es presentado en la Fig. 4.

El grado de propagación de la corrosión es principalmente regulado por la difusión y potenciales eléctricos y resistividad del hormigón.

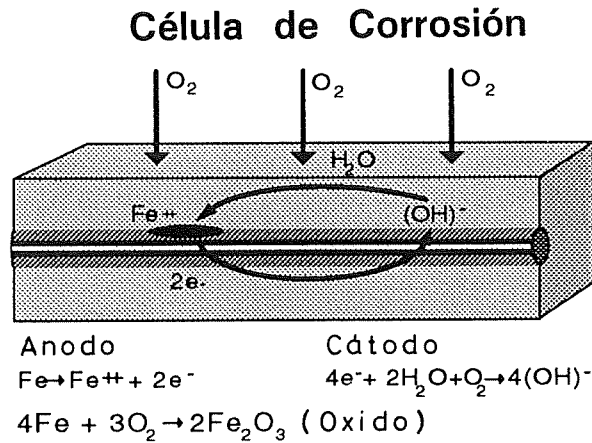


Fig. 4. Propagación por corrosión de la armadura.

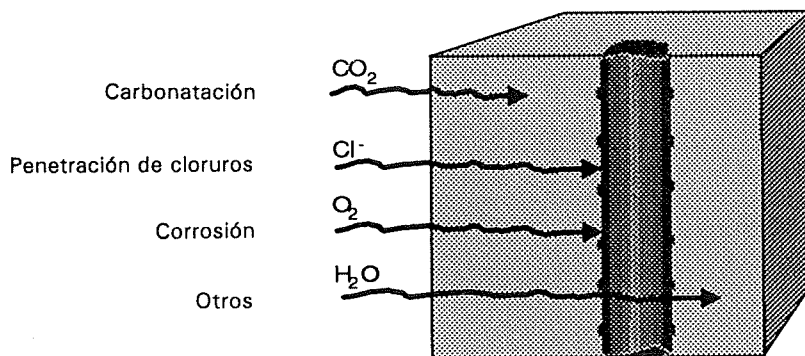
## 2.4 Fenómenos de transporte

De la anterior descripción se deduce un hecho decisivo:

Todos los procesos importantes de deterioro dependen de alguna sustancia que penetra desde el exterior hasta la masa del hormigón a través de la superficie.

Es importante el reconocer las consecuencias de estos mecanismos de transporte al evaluar estructuras, al seleccionar métodos de reparación, y al diseñar y construir estructuras nuevas y durables, ver Fig. 5.

## Parámetros



### Propiedades decisivas

- Calidad del recubrimiento
  - Recubrimiento
- $\left. \begin{array}{l} \text{Permeabilidad} \\ \text{Porosidad} \\ \text{Difusión} \end{array} \right\}$

Fig. 5. Mecanismo de transporte: parámetros reguladores.

Cyclic wetting and drying will strongly accelerate the rate at which dissolved aggressive substance enters the concrete and concentrates near the surface of evaporation.

Most transport mechanisms in porous materials like concrete are non-linear by nature. This must be considered when evaluating the consequences of a given aggressive environment, see for example Fig. 6.

In an actual case, also illustrated in Fig. 6, this would mean that a 35 mm design cover of high quality could result in a 100 year duration before the carbonation front reaches the reinforcement. If the execution of the structure results in some parts of the reinforcement having only half the design cover, it will only take 15 years for the carbonation front to reach the reinforcement in these areas and corrosion may start.

### Parameters

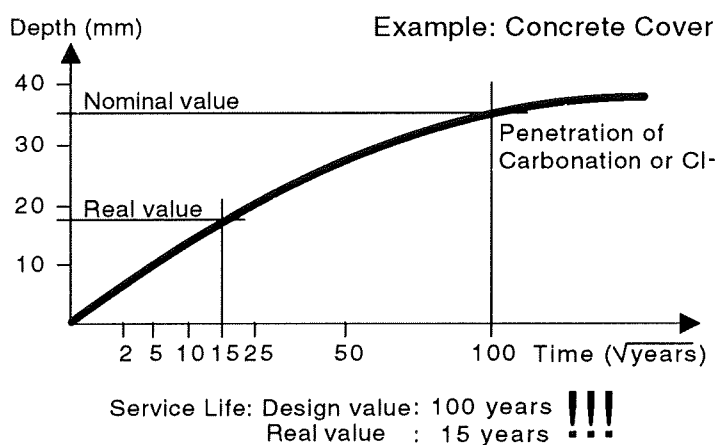


Fig. 6. Non-linear rate of transport and deterioration.

In practice even much lower covers have been experienced, down to a few mm! So, no wonder that cases have been reported where corrosion damage is observed in very young structures. Thus, the main cause of such premature deterioration is lousy workmanship resulting in hidden weaknesses in the structure, and it is not necessarily the concrete which is inadequate to cope with the environment in question.

What we in this case have failed to realize is the dramatic consequences of such banale faults in execution.

### 3 CONSEQUENCES FOR DURABLE DESIGNS FOR THE FUTURE

It is the prime concern during the design process to consider the above mentioned transport and concentration phenomena and ensure that they are kept under control. This is the key to designing for long service life.

Consequently, much effort shall be made during the execution stage to ensure an appropriate quality of the concrete in the outer layer of the concrete structures, i.e. a well compacted strong concrete «skin» is needed with low permeability, low diffusivity and without map cracking. Besides, an adequate thickness of concrete cover to the reinforcement shall be provided. These requirements emphasize the need for careful and controlled curing of the structure, as well as avoiding thermo cracking caused by heat of hidration.

El mojado y secado cíclico acelerará fuertemente el grado de penetración en el hormigón y concentración próxima a la superficie de evaporación de las sustancias agresivas disueltas.

Casi todos los mecanismos de transporte en materiales porosos como el hormigón son no-lineales por naturaleza. Este hecho tiene que ser considerado al evaluar las consecuencias de un ambiente agresivo, ver por ejemplo Fig. 6.

En un caso real, también ilustrado en la Fig. 6, esto supondría que una capa de recubrimiento de proyecto de alta calidad, de 35 mm., podría resultar en una duración de 100 años, antes de que el frente de carbonatación llegara a la armadura. Si la ejecución de la estructura condujera en algunas partes de la armadura a tan sólo la mitad de la capa de recubrimiento proyectada, bastarían tan sólo 15 años de carbonatación para llegar a la armadura y así iniciar la corrosión.

## Parámetros

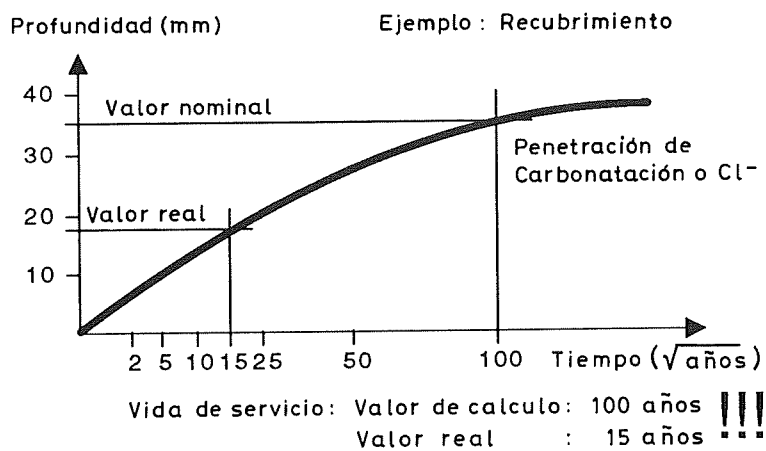


Fig. 6. Grado de transporte y deterioro no lineal.

En la práctica aún más bajas capas de recubrimiento han sido constatadas, ¡hasta unos pocos mm.! Por lo cual, no ha de extrañar que se hayan constatado casos donde el daño, debido a la corrosión, ha sido observado en estructuras bastante nuevas. Siendo así que, la causa principal de tal deterioro prematuro es la mala calidad de trabajo que produce una debilidad oculta de la estructura, y no en absoluto que el hormigón sea inadecuado para hacer frente al ambiente en cuestión.

Lo que debe destacarse son las dramáticas consecuencias de tales fallos triviales en la ejecución.

### 3 CONSECUENCIAS PARA PROYECTOS DURABLES PARA EL FUTURO

Es la preocupación primordial durante el proceso de diseño, el considerar los fenómenos de transporte y concentración arriba mencionados y asegurar que sean mantenidos bajo control. Esta es la clave para el proyecto para larga vida útil.

Consecuentemente, muchos esfuerzos deben ser hechos durante la fase de ejecución a fin de asegurar una calidad apropiada del hormigón en las capas externas de las estructuras de hormigón, por ejemplo una «piel» de hormigón fuerte, bien compactada, es necesaria juntamente con baja permeabilidad, baja difusión y sin fisuras de mapa. Además, un espesor adecuado de la capa de recubrimiento de hormigón de la armadura deberá ser provisto. Estos requerimientos recalcan la necesidad de un curado cuidadoso y controlado de la estructura, evitando asimismo la fisuración térmica causada por el calor de hidratación.



### 3.1. Gross-Error Problems, a Challenge to Education, Information and Quality Assurance

Analysing numerous cases of serious premature deterioration reveals that in the majority of cases the cause of damage is not due to normally anticipated (accepted) in situ variations in material properties and concrete covers but is due to gross deviations from anticipated values. Examples are:

- 5 mm covers instead of 50 mm
- Large honeycombing/bad compaction
- 150 kg cement/m<sup>3</sup> instead of 350
- W/C-ratio = 0.75 instead of 0.45
- Design faults threatening safety (insufficient reinforcement)
- Errors in specified types of cement (sulphate resistant cement in heavily chloride contaminated environments)

Such **Gross-Error Problems** cannot be solved by more refined design procedures or by the use of advanced theories of reliability. Only by relevant information and education routines and by carefully planned and strictly enforced quality assurance procedures can the frequency of such gross errors be minimized.

### 3.2 Durable Designs Following the CEB-FIP Model Code 1990 (MC 90)

Reference is made to Section 8 «Durability» of MC 90, Ref. 6. The present author chaired the CEB Task Group responsible for this section of MC 90.

#### 3.2.1. Basic Requirements

MC 90 expresses the basic requirements as follows:

Concrete structures shall be designed, constructed and operated in such a way that, under the expected environmental influences, they maintain their safety, serviceability and acceptable appearance during an explicit or implicit period of time without requiring unforeseen high costs for maintenance and repair.

The avoidance of durability problems throughout the expected life of a structure requires the coordinated efforts of all parties involved in all phases of the planning, construction and use of the structures (Ref. 7), i.e.

- **The owner**, by defining his present and foreseen future demands and wishes, if any.
- **The designers** (engineers and architects), by preparing design specifications (including proposed quality control schemes) and conditions.
- **The contractor**, who should follow these intentions in his construction works. Most commonly also subcontractors are involved.
- **The user**, who will normally be responsible for the maintenance of the structure during the period of use.

Any of these four parties may – by their actions or lack of actions – contribute to an unsatisfactory state of durability of the structure and thus cause a reduction of the service life. Also interactions between two parties may cause faults which can have an adverse effect on durability and service life.

### 3.3 Service Life Design

MC 90 will generally lead to a service life of the structure in excess of 50 years.

However, some structures will require a substantially longer service life, say 100 years or more, and other structures may need a considerably shorter service life, say less than 25 years.

### 3.1. Problemas de errores graves. Un desafío a la educación, información y garantía de calidad.

Analizando numerosos casos de serio y prematuro deterioro, se pone de manifiesto que en la mayoría de los casos la causa del daño no es debida a variaciones in situ de las propiedades del material y capas de recubrimiento de hormigón normalmente aceptadas, sino que es debida a desviaciones graves de los valores previstos. Ejemplos son:

- 5 mm de capa de recubrimiento en lugar de 50 mm
- Grandes huecos o «bolsadas»/deficiente compactación
- 150 kg de cemento/m<sup>3</sup> en lugar de 350
- Relación a/c = 0,75 en lugar de 0,45
- Fallos de proyecto amenazando la seguridad (armadura insuficiente)
- Errores en los tipos de cemento especificados (cemento resistente al sulfato en ambientes fuertemente contaminados de cloruro)

Estos **Problemas de Errores Graves** no pueden ser solucionados a través de rutinas de proyecto más refinadas, ni por la aplicación de teorías avanzadas de fiabilidad. Solamente a través de información relevante y rutinas de educación así como por medio de un proceso de garantía de calidad cuidadosamente planificado y estrictamente implementado, puede la frecuencia de tales errores graves ser minimizada.

### 3.2 Proyectos durables según el CEB-FIP MODEL CODE 1990 (MC 90)

Se hace referencia a la Sección 8 «Durabilidad» del MC 90, Ref. 6. El autor del presente artículo presidió el Grupo de Trabajo del CEB responsable de esta sección del MC 90.

#### 3.2.1 Requisitos básicos

El MC 90 expresa los requisitos básicos como sigue:

Las estructuras de hormigón serán proyectadas, construidas y operadas, de manera tal que bajo las influencias ambientales previstas, mantengan su seguridad, serviceabilidad y apariencia aceptable, durante un período explícito o implícito de tiempo, sin requerir altos costos imprevistos de mantenimiento y reparación.

El evitar problemas de durabilidad a través de la vida prevista de una estructura requiere los esfuerzos coordinados de todos los grupos comprometidos en todas las fases de la planificación, construcción y uso de la estructura (Ref. 7), por ejemplo:

- El propietario, definiendo sus demandas y deseos presentes y futuros, si los tuviera.
- Los proyectistas (ingenieros y arquitectos), preparando las especificaciones de diseño (incluyendo propuestas de planes de control de calidad) y condiciones.
- El contratista que debería seguir estas intenciones en su puesta en obra de los trabajos. Más comúnmente los subcontratistas están también comprometidos.
- El usuario, quien normalmente es el responsable del mantenimiento de la estructura durante su período de uso.

Cualquiera de estos cuatro grupos puede —por sus acciones o por falta de ellas— contribuir a un estado de durabilidad insatisfactoria de la estructura, causando así una reducción de la vida útil de ésta. Asimismo, interacciones entre dos grupos pueden causar fallos que puedan resultar en efectos adversos sobre la durabilidad y vida útil de la estructura.

### 3.3 Proyecto de vida útil

El MC 90 conduciría generalmente a una vida útil de la estructura por encima de los 50 años.

Sin embargo, algunas estructuras requerirían una vida útil considerablemente más larga, digamos 100 años o más, y otras estructuras podrían necesitar una vida útil considerablemente más corta, digamos que menos de 25 años.

Service life depends equally on the behaviour of structural and non-structural elements. Non-structural elements such as drainage, joints, bearings, installations, etc., as well as structural components such as anchorages, couplers and deviators for prestressing tendons, may require specialist attention other than that of structural engineering.

Accessories usually have a shorter service life than the structure itself, and adequate provisions for inspection, maintenance and replacement of such elements should be provided in the design.

### 3.4 Buildings Should Grow Old Gracefully

The design should consider detailing which increases self-protection and robustness of the structure against aggressive environment.

This includes provisions to ensure satisfactory weathering and ageing of exposed surfaces thus allowing buildings to grow old gracefully without expensive maintenance.

Fig. 7 illustrates how unsightly the unavoidable miscolouring caused by dust, dirt and soot depositing on a concrete facade can look.

Fig. 8 shows how a carefully planned channelling of water run-off on the surface can leave behind an interesting pattern much more pleasant to look at.

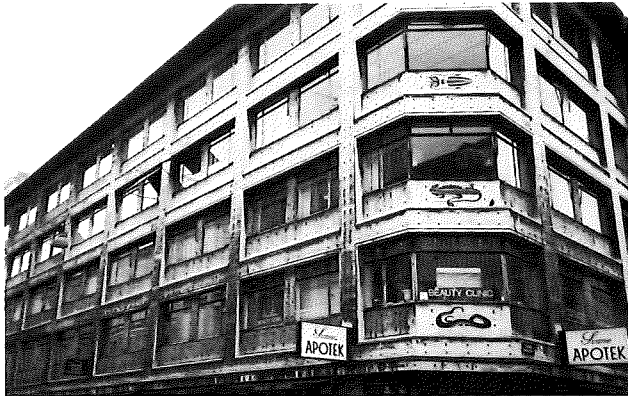


Fig. 7. Surface miscolouring due to dirt and soot depositing and local clean-wash by rain.

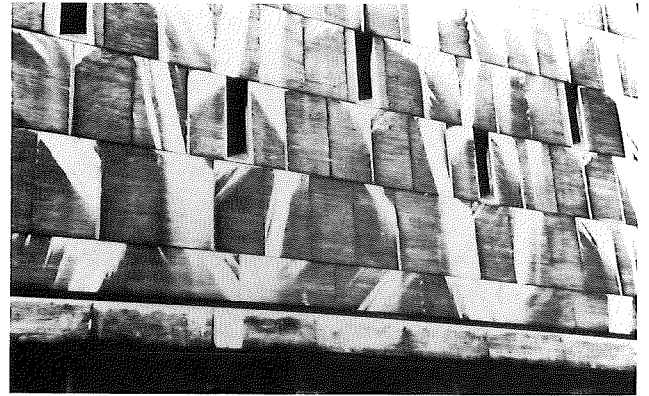


Fig. 8. Dirty facade made attractive by preplanned channelling of water run-off creating pattern by clean-washing.

### 3.5 Multi-Stage Protection Strategy

A set of appropriate measures (one or more) can be combined to ensure that the required service life is obtained with a sufficiently high probability.

The strategy of the service life design is to select intelligently an appropriate number and types of cooperating measures to ensure the required service life, considering the environment in question.

This design strategy is considered a «Multi Stage Protection Strategy» which leaves the selection of individual protective measures to the designer.

Protective measures may be established by, i.e.:

- The selected structural form.
- The concrete composition.
- The reinforcement detailing including concrete cover.
- A special skin concrete quality, including skin reinforcement.
- Limiting or avoiding cracks.

La vida útil, depende igualmente del comportamiento de los elementos estructurales y no-estructurales. Los elementos no-estructurales como drenajes, juntas, apoyos, instalaciones, etc., así como componentes estructurales como anclajes, acomplamientos y desviadores para los tendones de pretensado, pueden requerir la atención de especialistas además de los de ingeniería estructural.

Los accesorios tienen normalmente una vida útil más corta que la de la estructura misma y una previsión adecuada para inspección, mantenimiento y recambio de tales elementos debería incluirse en el proyecto.

### 3.4 Los edificios deberían envejecer elegantemente

El proyecto debería considerar los detalles que aumenten la autoprotección y robustez de la estructura frente al ambiente agresivo.

Esto incluye previsiones para asegurar la resistencia a la intemperie y el envejecimiento de las superficies expuestas, permitiendo ello a los edificios un envejecimiento elegante y gracioso sin mantenimiento excesivo.

La Fig. 7 ilustra de qué manera tan poco elegante puede resultar sobre una fachada de hormigón la inevitable decoloración causada por polvo, suciedad y depósito de hollín.

La Fig. 8 muestra cómo el acanalado planificado del agua en la superficie puede dejar una interesante figura más agradable de contemplar.

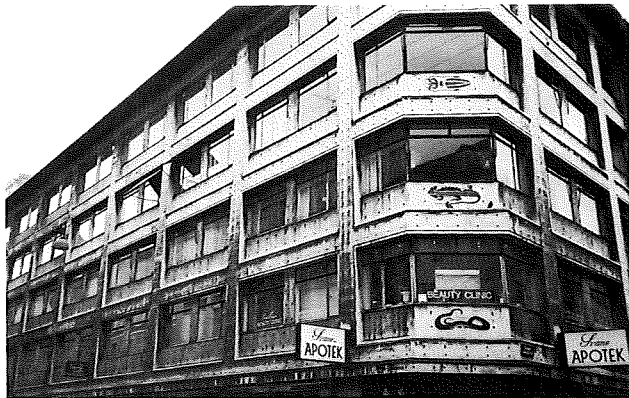


Fig. 7. Decoloración de la superficie debida a la deposición de suciedad y hollín y a la limpieza local por la lluvia.

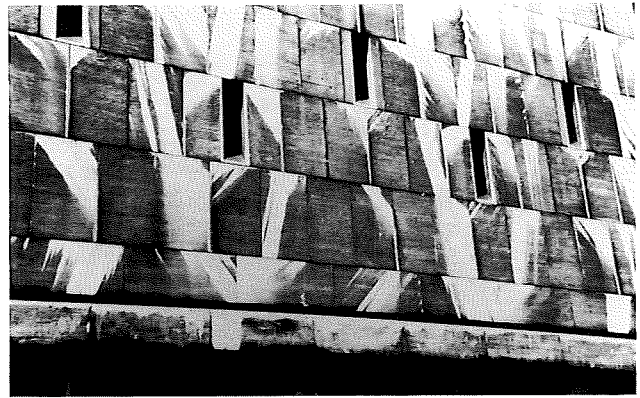


Fig. 8. Fachada sucia hecha atractiva por el acanalado de agua preplanificado creando una figura al ser limpiado.

### 3.5 Estrategia de protección multi-grado

Un juego de medidas apropiadas (una o más) pueden ser combinadas para asegurar que la vida útil prescrita sea obtenida con un suficiente alto grado de probabilidad.

La estrategia del proyecto de vida útil es el seleccionar inteligentemente un número y tipos apropiados de medidas cooperadoras para asegurar la vida útil prescrita, considerando el medio ambiente en cuestión.

Esta estrategia de proyecto está considerada como una «Estrategia de Protección Multi-grado» que deja la selección de las medidas protectoras individuales al proyectista.

Las medidas protectoras pueden ser establecidas, por ejemplo por:

- Una forma estructural adecuada.
- La composición del hormigón.
- Los detalles de la armadura, incluyendo el recubrimiento de hormigón.
- Una calidad especial de la superficie del hormigón, incluyendo la armadura superficial.
- La limitación o la eliminación de grietas.

- Additional protective measures such as insulation, membranes or coatings, including coating of reinforcement.
- Specified inspection and maintenance procedures during inservice operation.
- Special active protective measures such as cathodic protection or monitoring by way of sensors.

### 3.6 Inspectable and Maintainable Structures

The design shall, wherever possible, ensure adequate access to all parts of the structure, including voids and accessories, to allow for inspection and possible maintenance.

In some cases inspection is impossible or very complicated, e.g. for foundations Robust design, intensified quality control during execution, and monitoring by special sensors may then be the only available measures.

### 3.7 Structural Form

An architectural design well thought of from the point of view of required long service life may lead to considerable improvements in the durability and appearance.

Complexity in structural form, as well as in execution, will usually increase the sensitivity of the structure to deterioration.

The robustness of an exposed structure or structural component is partly related to the ratio between the exposed surface area and the volume of concrete. The larger this ratio the greater is the risk of sufficient deleterious substance penetrating into the concrete to cause damage and reduce safety. For building façades the ratio between the exposed surface area and the projection of the façade on a vertical plane is a similar relative measure of the vulnerability of the façade.

Fig. 9 pictures an architectural design, where precast concrete elements are assembled externally. This structure has a very large ratio between exposed concrete surface and façade projection area. Such a structure has a high durability risk factor. However, high concrete quality has been obtained in the referred case as the structure has been in satisfactory operations for more than 15 years.

Another façade layout is pictured in Fig. 10. A very smooth surface, with no window sills creating shade for rain wash of the façade causing uncontrolled run-off patterns. The durability risk factor is low, judged from the geometric form alone.



Fig. 9. Architectural layout of building facade with high durability risk factor.

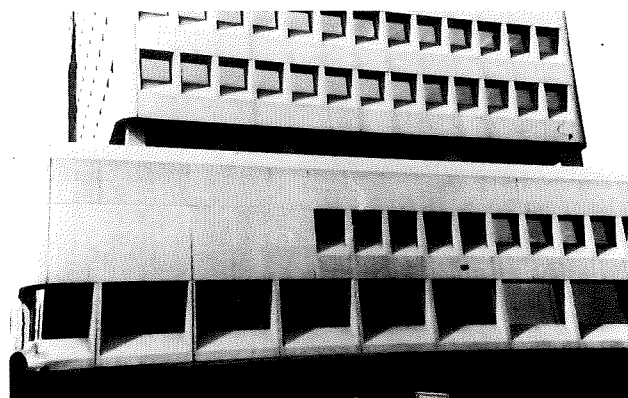


Fig. 10. Architectural layout of building facade with low durability risk factor.



- Medidas adicionales de protección, tales como aislamiento, membranas o recubrimientos, incluyendo recubrimiento de la armadura con epoxy.
- Especificación de rutinas de inspección y mantenimiento durante la operación en servicio.
- Medidas de protección activas, tales como protección catódica o supervisión por medio de sensores.

### 3.6 Estructuras inspeccionales y mantenibles

El diseño deberá, siempre que sea posible, asegurar acceso adecuado a todas las partes de la estructura, incluyendo huecos y accesorios, a fin de permitir la inspección y posible mantenimiento.

En algunos casos la inspección es imposible o muy complicada, como por ejemplo en cimentaciones. Un diseño robusto, control de calidad intensificado durante la ejecución, así como la supervisión por medio de sensores especiales, pueden ser las únicas medidas disponibles en estos casos.

### 3.7 Forma estructural

Un diseño arquitectónico bien pensado desde el punto de vista de larga vida útil requerida puede conducir a considerables mejoras en la durabilidad y apariencia.

La complejidad en la forma estructural, así como en la ejecución, incrementará normalmente la sensibilidad al deterioro de la estructura.

La robustez de una estructura o componente estructural expuesto, está relacionada en parte a la relación, entre la superficie expuesta y el volumen del hormigón. Cuanto mayor sea esta relación, tanto mayor será el riesgo de penetración de substancias suficientemente nocivas en el hormigón, causando daños y reduciendo la seguridad. Para fachadas de edificios la relación entre el área de la superficie expuesta y la proyección de la fachada sobre un plano vertical, es una medida similar relativa de la vulnerabilidad de la fachada.

La Fig. 9 ilustra un diseño arquitectónico, donde los elementos prefabricados de hormigón son ensamblados exteriormente. Esta estructura tiene una relación muy grande entre la superficie de hormigón expuesta y la superficie de proyección de la fachada.

Una estructura de este tipo tiene un factor de riesgo de durabilidad muy alto. Sin embargo, en el referido caso se obtuvo un alto grado de calidad del hormigón, habiendo estado la estructura en operación satisfactoriamente por más de 15 años.

Otra disposición de fachada es ilustrada en la Fig. 10. Una superficie muy lisa, sin repisas de ventanas que crean retención de la lluvia, lavando la fachada y causando derrames incontrolados. El factor del riesgo de durabilidad es bajo, a juzgar por la forma geométrica sola.



Fig. 9. Disposición arquitectónica de fachada de edificio con factor de riesgo de durabilidad alto.

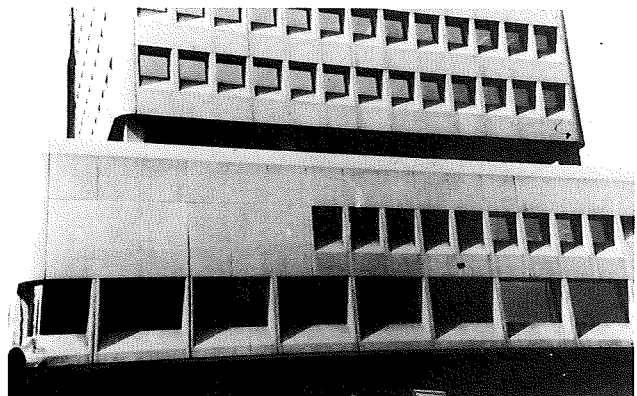


Fig. 10. Disposición arquitectónica de fachada de edificio con factor de riesgo de durabilidad alto.

Roofs with large eaves provide valuable protection of the façades against wetting. Bands of balconies and galleries may have a similar effect.

Near out-going edges and corners aggressive substances can penetrate into the concrete from more than one side thus leading to local concentrations, see Fig. 11. This may lead to early development of damage at the outgoing corners and along such edges, i.e. a so-called corner effect develops.

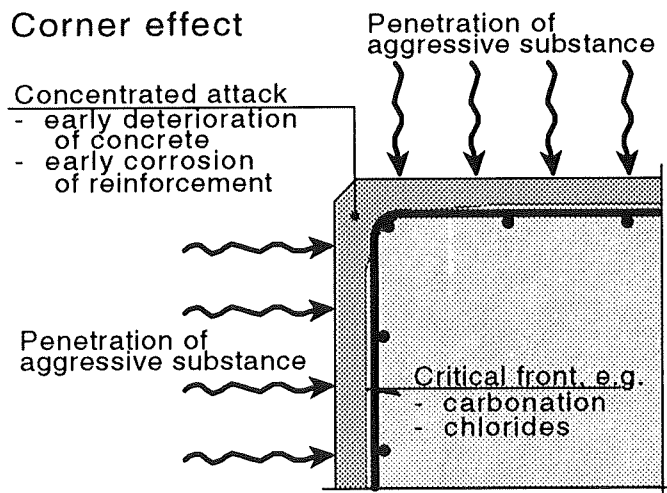


Fig. 11. Concentration of aggressive substance at sharp out-going edges and corners (corner effect).

Cyclic wetting and drying effects will strongly accelerate the rate at which aggressive substance enters the concrete and concentrates near the surface of evaporation.

In these cases the selection of rounded corners and edges will reduce the concentration effects and thus enhance the durability of the structure, see Fig. 12 e.g. round or oval columns are more durable than square or rectangular columns; the same goes for beams with rounded edges.

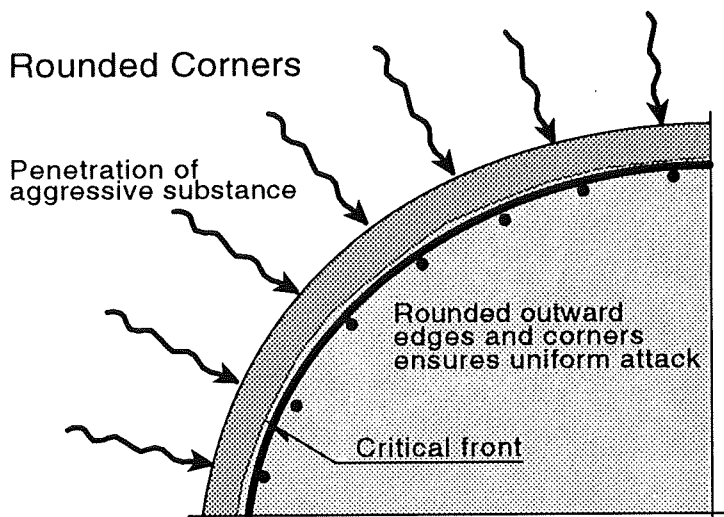


Fig. 12. Rounded or polygonal out-going edges and corners distribute and reduce the attack in these areas.

Techos con grandes aleros proveen a las fachadas de una valiosa protección contra la humedad. Bandas de balcones y galerías pueden tener efectos similares.

Cerca de esquinas y cantos salientes, las sustancias agresivas pueden penetrar dentro del hormigón desde más de un lado, conduciendo ello a concentraciones locales, ver Fig. 11. Esto puede conducir al prematuro desarrollo de daños en las esquinas salientes y a lo largo de estos cantos, por ejemplo, el llamado «efecto de esquina» aparece.

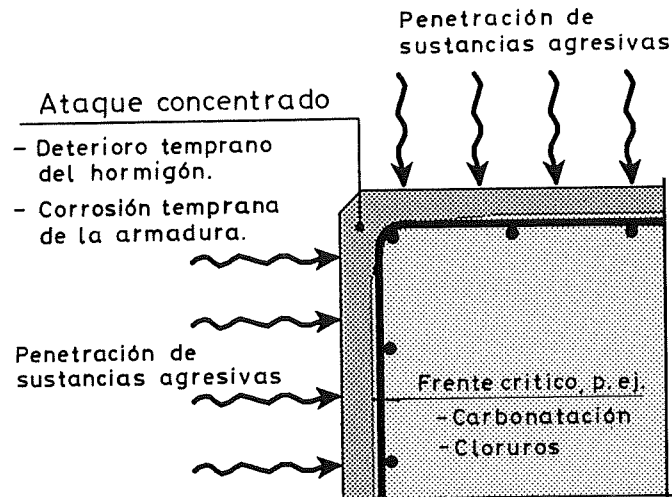


Fig. 11. Concentración de sustancia agresiva en esquinas y cantos salientes afilados (efecto de esquina).

Los efectos del mojado y secado cíclicos aceleran el grado de penetración de las sustancias agresivas disueltas en el hormigón y su concentración cerca de la superficie de evaporación.

En estos casos, la elección de esquinas y cantos redondeados reducirá los efectos de concentración y con ello aumentará la durabilidad de la estructura, ver Fig. 12. Por ejemplo, columnas circulares u ovales son más durables que columnas cuadradas o rectangulares; lo mismo es válido para vigas con cantos redondeados.



Fig. 12. Las esquinas y cantos redondeados o poligonales distribuyen y reducen el ataque en estas zonas.

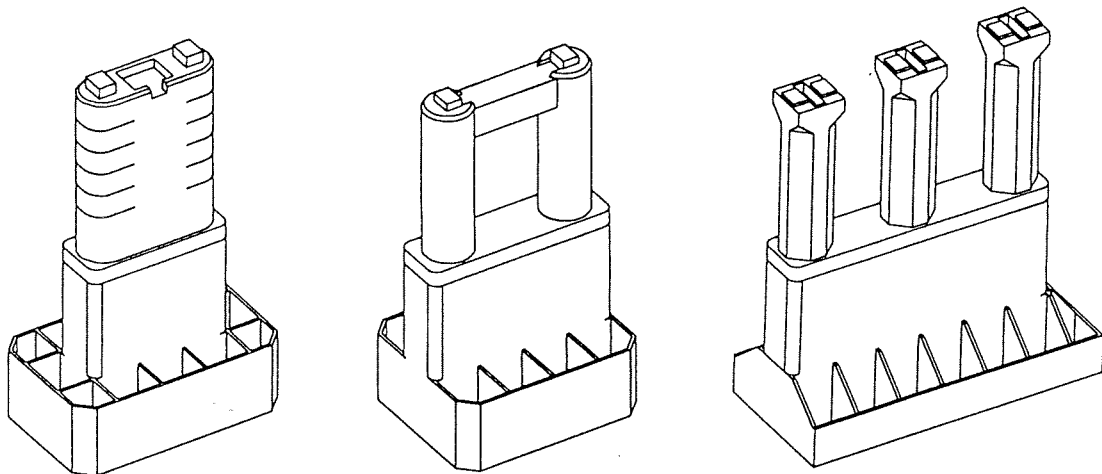


Fig. 13. Durable design for bridge piers. Project proposal of The West Bridge, the Great Belt Link, Denmark. See section 7.

Fig. 13 shows different forms selected for the tender design of the substructures of the West Bridge of the Great Belt Link described in more detail in Section 8. Huge fully submerged caissons are placed on the seabed.

Pier sections in the tidal and splash zones were given rounded or octagonal forms to enhance durability. Ice pressures were reduced also.

### 3.8 Concrete Cover and Spacers

Concrete cover shall be chosen according to the aggressivity of the environment and shall comply with national regulations.

Other reasons than durability may warrant larger covers such as:

- Ensuring bond strength.
- Ensuring fire protection.
- Use of larger aggregate sizes.

In aggressive environments spacer material should have good adhesion to the concrete. High quality concrete spacers (impermeable and with good bond) are preferred compared to plastic spacers.

### 3.9 Prestressed Structures

Corrosion protection of prestressing tendons may consist of several successive protective measures such as:

- Quality and diameter of prestressing steel
- Grouting of ducts or sheathing
- Type of sheathing
- Quality of concrete cover
- Thickness of concrete cover
- Special surface protection
- Sealing of anchorages

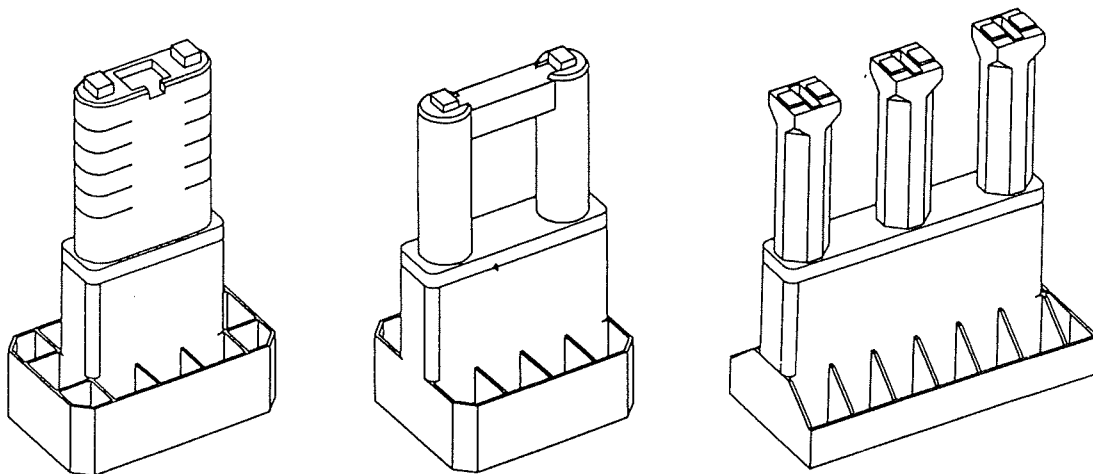


Fig. 13. Diseño durable para pilas de puentes. Proyecto de oferta del Puente del Oeste, Enlace del Gran Belt, Dinamarca. Ver sección 7.

La Fig. 13 muestra diferentes formas elegidas para el proyecto de oferta de la subestructura del Puente del Oeste del Enlace del Gran Belt, descrito más detalladamente en la sección 7. Enormes cajones sumergidos son colocados sobre el fondo del mar.

A las secciones de los pilares en las zonas de mareas y salpicaduras se les ha dado una forma redondeada u octogonal para aumentar la durabilidad. Las presiones del hielo fueron reducidas también de este modo.

### 3.8 Recubrimiento de hormigón y separadores

La capa de recubrimiento de hormigón deberá ser elegida según la agresividad del medio ambiente y deberá cumplir con las regulaciones nacionales.

Otras razones que las de la durabilidad pueden justificar recubrimientos mayores, tales como:

- Asegurar resistencia de adherencia.
- Garantizar protección contra incendios.
- Empleo de áridos de mayor tamaño.

En medio ambientes muy agresivos el material de los espaciadores debería tener buena adhesión con el hormigón. Espaciadores de morteros de alta calidad (impermeables y con buena adherencia) son preferibles comparados con los espaciadores de plástico.

### 3.9 Estructuras pretensadas

La protección contra la corrosión de los cables de pretensado puede consistir en diversas medidas protectoras, tales como:

- Calidad y diámetro del acero de pretensado
- Inyección de las vainas o conductos
- Tipo de conductos
- Calidad de la capa de recubrimiento de hormigón
- Espesor de la capa de recubrimiento de hormigón
- Protección especial de la superficie
- Sellado de los anclajes



Each may be individually chosen and designed to obtain optimal combined protection for a given environment. For unbonded tendons, a distinction should be made between internal and external unbonded tendons.

### 3.10 Special Protective Measures

In case of especially aggressive environments and in cases where insufficient durability have resulted in damage to an existing structure, special protective measures may be applied.

The special protective measures are of the following type (MC 90):

- Provide smooth surfaces and minimise the area exposed to the environment, see Fig. 10.
- Provide structural protection such as:
  - \* Roof, eaves or similar to protect concrete surfaces against rain
  - \* Surface protection in the form of:
    - A water repellent impregnation
    - A thin or thick film coating
    - Tanking (of e.g. foundations)
    - Membrane
    - Lining

Figs. 14 and 15 show the use of stainless steel lined in-situ cast circular concrete columns placed in an area with frequent salting of the road and in saline waters, respectively.

- \* Increased concrete cover. Provide special skin reinforcement in thick covers (MC 90:  $c_{nom} \geq 70$  mm).
- \* Reduce environmental aggressivity by e.g. surface insulation thus controlling heat and moisture conditions in the concrete (mainly in buildings).
- Provide special protection of the reinforcement, such as:
  - \* Place prestressed reinforcement in sheathings (metallic or plastic).
  - \* Epoxy coating of reinforcement.

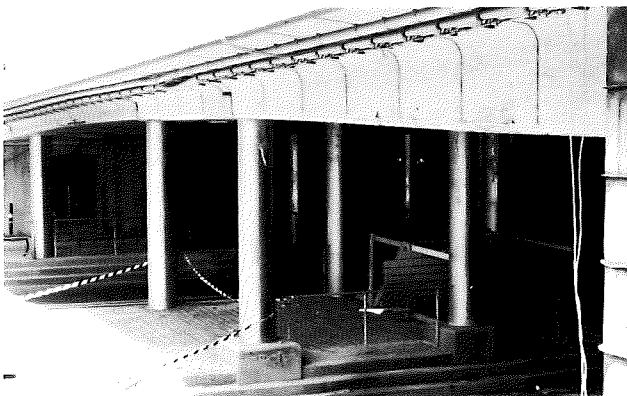


Fig. 14. Stainless steel lined reinforced concrete column frequently exposed to de-icing salt.



Fig. 15. Stainless steel lined column in saline waters.

Cada etapa puede ser individualmente elegida y diseñada a fin de obtener la protección combinada óptima para un medio ambiente dado.

Para cables no adheridos, una distinción debería ser hecha entre los cables no adheridos internos y externos.

### 3.10 Medidas de protección especiales

En caso de ambientes especialmente agresivos y en casos donde insuficiente durabilidad ha conducido a daños en una estructura existente, pueden ser aplicadas medidas especiales de protección.

Las medidas especiales de protección son del siguiente tipo (MC 90):

- Proveer superficies lisas y minimizar el área expuesta al medio ambiente, ver Fig. 10.
- Proveer protección estructural, tal como:
  - \* Cubiertas, aleros o similar para protección de superficies de hormigón contra la lluvia
  - \* Protección superficial en forma de:
    - Impregnación repelente del agua
    - Recubrimiento de película grueso o delgado
    - Membrana
    - Revestimiento

Las Figs. 14 y 15 muestran el empleo de columnas circulares de hormigón, hormigonadas in situ y revestidas de acero inoxidable, emplazadas en una zona con frecuente aplicación de sal en la calzada y en aguas salinas, respectivamente.

- \* Capa de recubrimiento de hormigón aumentada. Proveer armadura superficial especial en capas de recubrimiento espesas (MC 90:  $c_{nom} \geq 70$  mm.).
- \* Reducir la agresividad ambiental a través de, por ejemplo, aislamiento superficial, controlando con ello el calor y las condiciones de humedad en el hormigón (principalmente en edificios).
  - Proveer protección especial para la armadura, tal como:
    - \* Colocar la armadura pretensada en conductos (metálicos o de plástico).
    - \* Recubrimiento de la armadura con capa de epoxy.

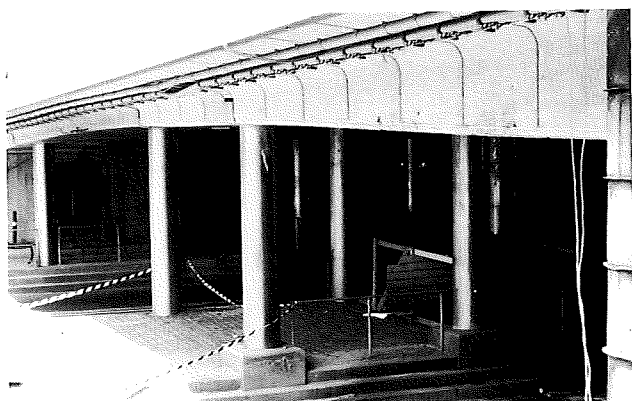


Fig. 14. Columna de hormigón armado revestida de acero inoxidable expuesta a frecuente deshelado por sal.

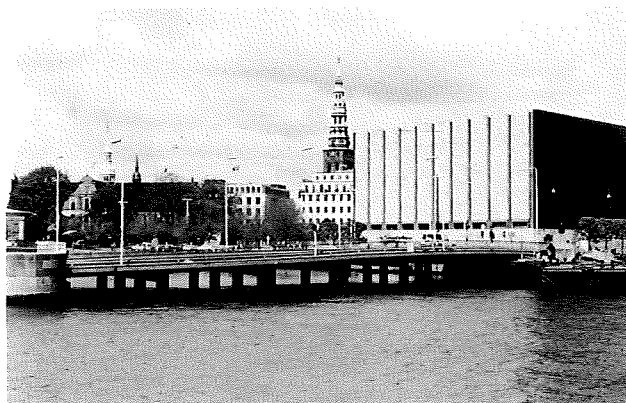


Fig. 15. Columna revestida de acero inoxidable en aguas salinas.



Fig. 16. Fluidized bed dipping technique used for epoxy coating of 3-D fully welded, grit basted and pre-heated reinforcement cages.

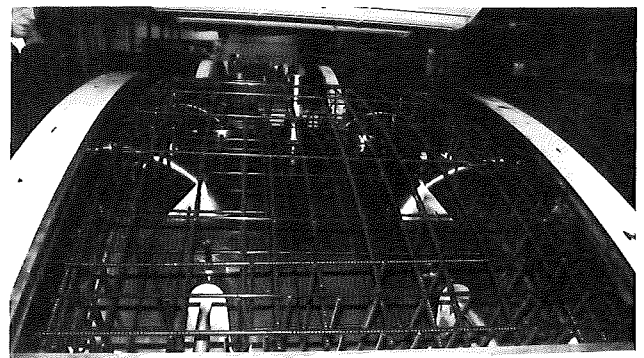


Fig. 17. Positioning of epoxy coated cages from Fig. 16 in the segment form.

- The usual procedure has been to coat straight bars individually. Then cut them to length and bend them to form. This requires patch repairs of the coating at cut ends and at damaged bends.
- Individually coated bars will not be in electric contact within the structure. This will prevent a later installation of cathodic protection, should the need arise.
- Figs. 16 and 17 show the fluidized bed dipping technique used for the fully welded 3-dimensional reinforcement cages of the precast segmental lining at the Eastern Tunnel of the Great Belt Link, Denmark. This is a novel technique for such reinforcement cages. Damage of the coating is reduced to close to nil due to avoidance of cutting and bending after coating, and all bars in a segment are electrically connected by welding prior to coating.

\* Cathodic protection.

- Initial electric continuity of the reinforcement will greatly facilitate the installation of cathodic protection some time in the future, should this prove necessary.
- For structures in chloride containing environments all reinforcement should be electrically continuous for the whole structure or individually for selected structural components.
- Cathodic protection tends to increase the concentration of alkalis near the reinforcement. This may increase the risk of alkali-aggregate reactions if the concrete contains alkali-reactive aggregates.

\* Select non-corroding reinforcement (specific stainless steel).

- Provide special monitoring systems (e.g. a warning system) to follow the condition of the structure.
- Provide intensified inspection and maintenance routines to cope with early warnings of deterioration, e.g. by preventive maintenance (Management Systems needed).

#### 4 EXECUTION

Structures should be designed and detailed, with due account of the execution procedures foreseen such as to:

- Facilitate execution
- Be adequately accessible and inspectable
- Be maintainable

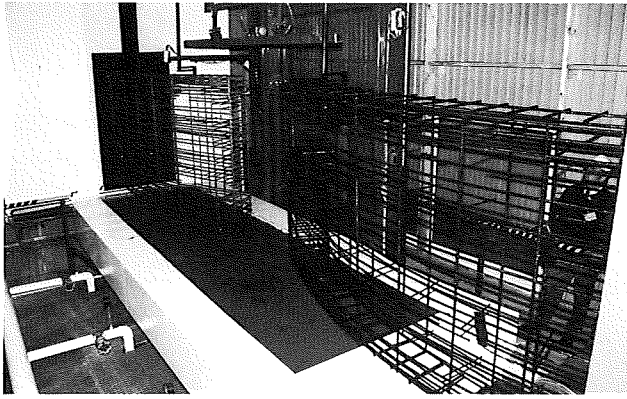


Fig. 16. Técnica del baño fluidizado usado para el recubrimiento de capa de epoxy de gabiones de armadura 3-D completamente soldados, limpiados por chorro de arena y precalentados.

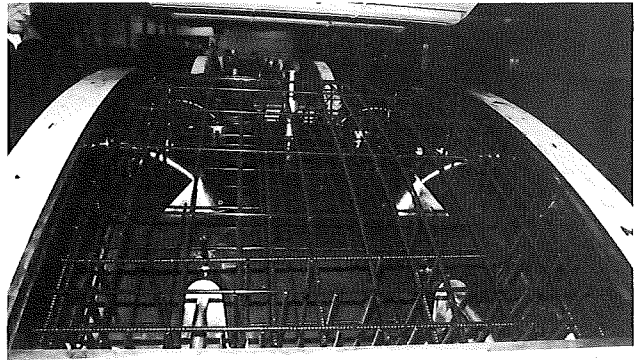


Fig. 17. Colocación de los gabiones recubiertos con capa de epoxy de la Fig. 16 en el encofrado del segmento.

- El método usual ha sido el recubrir las barras rectas individualmente. Luego cortarlas a la longitud pertinente y doblarlas a su forma. Esto requiere reparación o remiendo de la capa a los extremos cortados y en los doblados dañados.
- Las barras individualmente recubiertas no van a estar en contacto eléctrico con el resto de la estructura, lo cual va a impedir una posterior instalación de protección catódica de ser eso necesario.
- Las Figs. 16 y 17 muestran la técnica del baño fluidizado usado para las jaulas de armadura tridimensionales completamente soldadas de los segmentos de revestimiento prefabricados del Túnel del Este, del Enlace del Gran Belt, en Dinamarca. Esta es una nueva técnica para este tipo de jaulas de armadura. El daño a la capa de recubrimiento es casi nulo debido a que se evita el cortado y doblado posterior de recubrimiento, y todas las barras en un segmento están eléctricamente conectadas entre sí por soldadura anterior al recubrimiento.

\* Protección catódica.

- La continuidad eléctrica inicial de la armadura va en gran medida a facilitar la instalación de protección catódica en el futuro, si ello fuera necesario.
- Para estructuras en medio ambientes conteniendo cloruros todas las armaduras deberían ser eléctricamente continuas para toda la estructura o individualmente para componentes estructurales elegidos.
- La protección catódica tiende a aumentar la concentración de los álcalis cerca de la armadura. Esto puede incrementar el riesgo de reacciones álcali-áridos si el hormigón contiene áridos álcali-reactivos.

\* Elegir armadura no-corrosiva (especificar acero inoxidable).

- Proveer sistemas de supervisión especiales (por ejemplo un sistema de alarma) para seguir la condición la estructura.
- Proveer rutinas de inspección intensificada y mantenimiento para tomar en consideración las alarmas tempranas de deterioro, por ejemplo por medio de mantenimiento preventivo (siendo necesarios sistemas de Gestión).

#### 4 EJECUCION

Las estructuras deberían ser proyectadas y detalladas teniendo en cuenta los métodos de ejecución previstos, de manera que:

- Faciliten la ejecución
- Sean adecuadamente accesibles e inspeccionables
- Sean de fácil mantenimiento

---

This include:

- Adequate dimensions to ensure easy casting and compaction of concrete.
- Formwork which -where relevant- contains sufficient windows to allow thorough compaction and which provides smooth and pleasant exposed surface texture.
- Detailing of reinforcement to ensure high quality, well compacted concrete in the concrete cover, free of any honey-combing.
- Pre-determined positioning of construction joints to match the exposure class and the foreseen structural performance.

## 5 MAINTENANCE

**Maintenance** is the term used for keeping a structure in satisfactory operating conditions within foreseen and budgeted expenses. **Repair** is the term used if unforeseen interventions are needed. This leads to two conclusions.

Firstly, the natural degeneration of structures will require an assessment of the structure performed at regular intervals.

Secondly, a long term budgeting of the costs for regular inspections and possible interventions must be made.

All experience show that a planned and budgeted regular upkeep of a structure leads to the lowest costs for operating a structure, provided the correct assessment and the correct interventions are made at the correct time.

The fact that objects such as utensils, equipment, machinery, TV-sets, automobiles, etc. need maintenance is very familiar to all people.

Also for many of our structures regular service or maintenance is a normal event costing time and money, such as impregnating wooden components in houses and painting exposed steel components.

But somehow, concrete structures have lost out in this development.

We engineers have probably mainly ourselves to blame. Over the years concrete has been marketed and praised as being practically maintenance free in use and nearly foolproof in construction. Any man from the street can make his living as a concrete worker without any prior education or training, and once finished, the structure has been considered «hard and durable as stone».

In order to perform relevant inspection and maintenance the inspection engineers must know what they shall be looking for, see Ref. 9. This requires a fundamental knowledge of the main deterioration mechanisms and their governing parameters.

However, inspectors can in general not rely solely on visual inspections, because the consequences of this approach can be very costly for the owner of the structure.

During the initiation period there will be no visual damage nor any other signs of beginning degeneration of the structure (see section 2, Figs. 2 and 3). Only some way into the propagation period will damage become visible. This situation is illustrated in Fig. 18.

By adopting a maintenance strategy based mainly on visual inspections no owner will be motivated to spend money for maintenance during the initiation period. So by following this strategy all concern for the structure is delayed until its condition has developed well into the propagation period and visual damage has occurred.



---

Esto incluye:

- Dimensiones adecuadas para asegurar un hormigonado fácil y fácil compactación del hormigón.
- Encofrados que —donde fuera requerido— contengan las suficientes ventanas para permitir una compactación meticulosa y que provean una textura de la superficie expuesta lisa y agradable.
- Detallado de la armadura para asegurar una alta calidad y buena compactación del hormigón en la capa de recubrimiento, libre de bolsadas y huecos.
- Emplazamiento predeterminado de las juntas de construcción adaptadas a la clase de exposición y rendimiento estructural previsto.

## 5 MANTENIMIENTO

**Mantenimiento** es el término usado para mantener una estructura en estado y condiciones de uso dentro de los costos previstos y presupuestados. **Reparación** es el término usado si las intervenciones imprevistas son necesarias. Esto conduce a dos conclusiones:

Primeramente, la degeneración natural de las estructuras requerirá una evaluación de la estructura, llevada a cabo a intervalos regulares.

En segundo lugar, una presupuestación a largo plazo de los costos para inspecciones regulares y posibles intervenciones deberá llevarse a cabo.

Toda la experiencia enseña que una conversación regular planificada y presupuestada de una estructura, resulta en los más bajos costos para el uso de la estructura, suponiendo que la evaluación correcta y las intervenciones correctas sean efectuadas en el momento adecuado.

El hecho de que objetos como utensilios, equipos, maquinaria, aparatos de TV, coches, etc. necesiten mantenimientos es muy familiar a todo el mundo.

También para muchas de nuestras estructuras, el servicio o mantenimiento regulares es un acontecimiento normal costando tiempo y dinero, ejemplos son el impregnar los componentes de madera en casas y pintando los componentes metálicos expuestos.

Pero por alguna razón las estructuras de hormigón han sido olvidadas en este desarrollo.

Los ingenieros posiblemente sólo podemos reprocharnos a nosotros mismos. A lo largo de los años el hormigón ha sido comercializado y alabado como siendo prácticamente libre de mantenimiento en su uso y casi perfecto en su construcción. Cualquier persona de la calle puede vivir como trabajador en el ramo del hormigón, sin ninguna educación y entrenamiento previo. Y una vez acabada, la estructura ha sido considerada como «fuerte y durable como la piedra».

A fin de realizar las relevantes inspecciones y mantenimiento los ingenieros supervisores deben saber lo que han de estar buscando, ver Ref. 9. Ello requiere un conocimiento fundamental de los principales mecanismos de deterioro y sus parámetros reguladores.

Sin embargo, los inspectores no pueden en general solamente basarse en inspecciones visuales, ya que las consecuencias de este método pueden ser muy costosas para el propietario de la estructura.

Durante el período de iniciación no habrá daños visuales u otras señales de degeneración iniciada de la estructura (ver sección 2, Figs. 2 y 3). Sólo algún tiempo ya dentro del período de propagación los daños serán visibles. Esta situación está ilustrada en la Fig. 18.

Adoptando una estrategia de mantenimiento basada principalmente en inspecciones visuales, ningún propietario está motivado a gastar dinero para mantenimiento durante el período de iniciación. De manera que, siguiendo esta estrategia todo interés y preocupación por la estructura es demorada hasta que su condición se ha desarrollado bastante, dentro del período de propagación, habiendo los daños visuales ya ocurrido.

# Visual Inspection

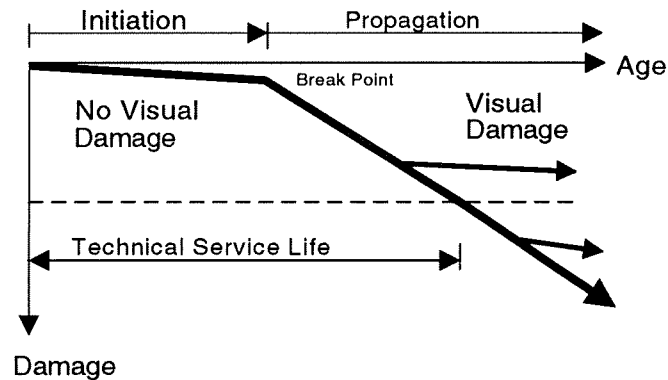


Fig. 18. Consequences of a maintenance strategy based solely on visual inspection.

Experience has also shown that the costs for repairing damaged structures is much higher than the costs for some protective measures introduced while the structure is still visually undamaged. The costs for late repair may be as much as five to ten times higher than the costs for an early preventive maintenance.

So, an operation and maintenance strategy based solely on the classical visual inspections automatically leads to a maximizing of the maintenance costs.

Therefore, in order to reveal oncoming deterioration in due time for preventive maintenance to be performed, inspection should include selective sampling of information regarding where relevant:

- Carbonation depth relative to prevailing concrete covers.
- Chloride profiles relative to prevailing concrete covers.
- Potential mapping with excavations («windows») to calibrate measurements.
- Coring including thin section microscopy and petrographic analysis to determine concrete quality such as compaction, curing, micro cracking, w/c-ratio, air content, reactivity of aggregates, etc.
- Surface tapping to reveal surface delaminations.

Examples are:

- Surface coatings.
- Structural protection reducing the aggressivity of the environment.
- Electro-chemical repair methods such as cathodic protection.

From the above it comes clear, that the upkeep of structures depend fully on which strategy is selected.

This in turn can only be decided by the owner or the responsible manager of the structure, i.e. by the Management.

## Inspección visual

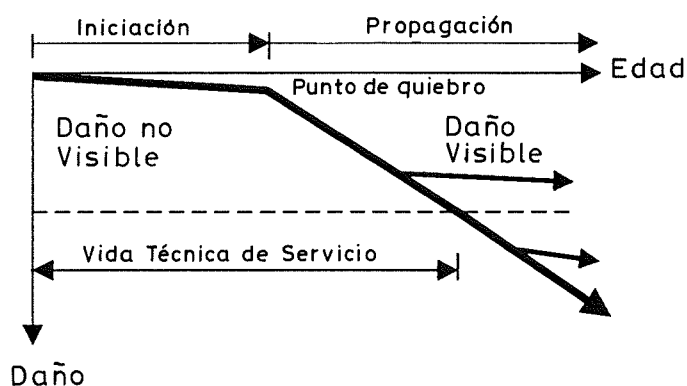


Fig. 18. Consecuencias de una estrategia de mantenimiento basada solamente en la inspección visual.

La experiencia ha enseñado también que el costo de reparación de estructuras dañadas es mucho más alto que el de algunas medidas de protección introducidas cuando la estructura está visualmente indemne. Los costos para la reparación posterior pueden llegar a ser tan altos como de cinco a diez veces de los costos de un temprano mantenimiento preventivo.

De esta manera, una estrategia de operación y mantenimiento solamente basada en la clásica inspección visual, automáticamente lleva a maximizar los costos de mantenimiento.

Por lo tanto, a fin de descubrir el deterioro en camino a su debido tiempo para poder llevar a cabo el mantenimiento preventivo, la inspección debería incluir recogida de información selectiva, teniendo en cuenta cuando fuera relevante:

- Profundidad de la carbonatación relativa a las capas de recubrimiento de hormigón predominantes.
- Perfiles de cloruro relativos a las capas de recubrimiento predominantes.
- Medición de potenciales con aperturas («ventanas») para calibrar las mediciones.
- Toma de testigos, incluyendo microscopía de secciones delgadas y análisis petrográfico para determinar la calidad del hormigón, tal como compactación, curado, microfisuras, relación a/c, contenido de aire, reactividad de los áridos, etc.
- Golpeteo de la superficie para descubrir delaminaciones superficiales.

Ejemplos son:

- Recubrimientos superficiales
- Protección estructural reduciendo la agresividad del medio ambiente.
- Métodos de reparación electroquímicos tales como protección catódica.

Por lo anteriormente dicho, está claro que la conservación de estructuras depende completamente de la estrategia elegida.

Esto a su vez puede solamente ser decidido por el propietario o el gerente responsable de la estructura, por ejemplo la gerencia.

---

## 6 STRUCTURES MANAGEMENT SYSTEMS

It is essential for the Management to have all technical as well as economic facts present when decisions are taken. In this process it has for many years not been customary to take future cost for maintenance and repair into account.

It is becoming painfully clear that this approach results in a very shortsighted sub-optimisation of the economy.

One well known way to consider anticipated future costs is based on the discount method. Current or assumed rates of interest and inflation are used to determine a discounting rate. Thus costs occurring at different times in the future can be compared on equal terms, i.e. by discounting the values to present day costs.

Modern computer techniques combined with a rational, selective inspection and assessment of structures have developed into interactive **Structures Management Systems**.

Such management systems are needed to keep track with large stocks of structures or large numbers or components. They allow an optimization (minimization) of maintenance costs and a smooth cash flow convenient to the budget restrictions of the owner, public or private.

A Bridge Management System developed by COWIconsult together with the Danish Road Directorate and the Danish State Railways is in operation in Denmark as well as for 10,000 bridges on the road network of Thailand, and is currently being implemented on the Thai Railway System.

In several cases costs alone are not the decisive factor. In many cases also political concerns or public opinion may have an important say in the final choice. For example, a structure of major importance for society, say a tunnel or a bridge, may have an optimal economic service life of 40-60 years, depending on the discounting rate. But nevertheless, this structure may have such great influence on the everyday functioning of society, that it certainly would be politically or morally unacceptable to society to design the structure for such relatively short service life, and e.g. 100 or 120 years should be designed for.

### 6.1 The «Law of Fives» (de Sitter)

Most of the problems discussed boil down to being problems of economy. An experienced contractor has ventured into a rough estimate of what the relative costs would be to ensure a satisfactory service life of a concrete structure, depending on which measures were chosen to ensure this service life.

The service life can be divided into four different phases, according to de Sitter, Ref. 7.

- Phase A: Design, —construction— and curing-period.
- Phase B: Initiation processes are under way, but propagation of damage has not begun yet.
- Phase C: Propagating deterioration has just begun.
- Phase D: Advanced state of propagation with extended damage occurring.

These phases and the estimated relative costs are illustrated in Fig. 19. Based on his yearlong experience de Sitter has introduced the «Law of Fives», stating that:

«One dollar spent in phase A equals five dollars in phase B equals 25 dollars in phase C equals hundred-and-twentyfive dollars in phase D». Fig. 20.

From this de Sitter concludes that it is high time that engineers working in scientific institutions, engineering consultants and contractors take up the challenge and concentrate on phases A and B.

## 6 SISTEMA DE GESTION DE ESTRUCTURAS

Es esencial para la Gerencia el tener todos los datos técnicos y económicos presentes al tomar decisiones. En este proceso no ha sido en muchos años costumbre el tomar en consideración futuros costos de mantenimiento y reparación.

Está siendo cada vez más dolorosamente evidente que esta manera de actuar resulta muy poco previsora en cuanto a economía.

Un método muy conocido para considerar anticipadamente costos futuros está basado en el método de descuento. Niveles de interés e inflación, presentes o supuestos, son usados para determinar el nivel de descuento. Por lo cual, costos en diferentes períodos en el futuro pueden ser comparados en términos iguales, por ejemplo, descontando los valores a costos del día de hoy.

Las técnicas modernas de ordenador combinadas con una inspección y evaluación selectivas y racionales de las estructuras se han desarrollado en **Sistemas de Gestión de Estructuras** interactivos.

Estos sistemas de gestión son necesarios para administrar gran número de estructuras o gran número de componentes. Estos sistemas permiten la optimización (minimización) de los costos de mantenimiento y suave corriente de fondos conveniente a las restricciones del presupuesto del propietario, ya sea público o privado.

Un Sistema de Gestión de Puentes desarrollado por COWIconsult juntamente con la Dirección General de Carreteras y los Ferrocarriles del Estado de Dinamarca, está operando en Dinamarca, así como implementando para 10.000 puentes en la red de carreteras de Tailandia, siendo el sistema implementado actualmente en el Sistema de Ferrocarriles de Tailandia.

En muchos casos los costos solos no son el factor decisivo. En algunos casos la preocupación política o la opinión pública pueden tener un importante voto en la elección final. Por ejemplo, una estructura de mayor importancia para la sociedad, digamos un túnel o un puente, puede tener una óptima vida útil económica de 40 a 60 años, dependiendo del grado de descuento.

No obstante, esta estructura puede tener una influencia o impacto tan grande en el funcionamiento diario de la sociedad que ciertamente sería política y moralmente inaceptable para la sociedad el diseñar la estructura para una tan relativamente corta vida útil, debiendo diseñarse para, por ejemplo, 100 ó 120 años.

### 6.1 La «Ley de los Cincos» (de Sitter)

La mayoría de los problemas discutidos se reducen a problemas de economía. Un contratista experimentado se ha aventurado a dar un presupuesto aproximado referente a los costos relativos para asegurar una vida útil de una estructura de hormigón, dependiendo su estimación de qué medidas fueron elegidas para asegurar esta vida útil.

La vida útil puede dividirse en cuatro fases diferentes, según Sitter, Ref. 7.

- Fase A: Período de proyecto, de construcción y curado
- Fase B: Procesos de iniciación extendiéndose, pero los daños de propagación aún sin empezar.
- Fase C: El deterioro propagador ha empezado.
- Fase D: Estado avanzado de propagación con daños extensos ocurriendo

Estas fases y los costos relativos estimados son ilustrados en la Fig. 19. En la base de su experiencia de muchos años, de Sitter ha introducido la «Ley de los Cincos», postulando que:

«Un dólar gastado en la fase A equivale a cinco dólares en la fase B, equivaliendo a 25 dólares en la fase C, equivaliendo a ciento veinticinco dólares en la fase D». Fig. 20.

De ello concluye de Sitter que ya es hora de que los ingenieros trabajando en instituciones científicas, consultores de ingeniería y contratistas acepten el desafío y empiecen a concentrarse en las fases A y B.

## "The Law of Fives" ( de Sitter )

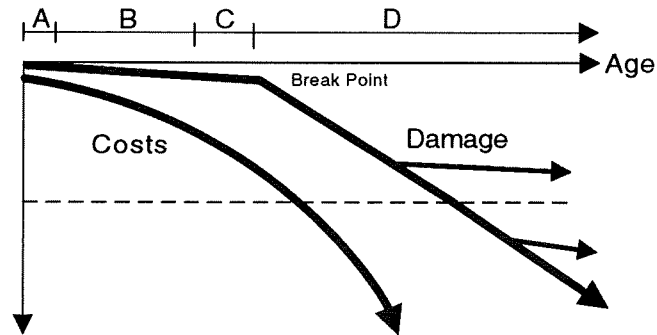


Fig. 19. The «Law of Fives».

## "The Law of Fives" ( de Sitter )

A: Good Practice	\$ 1
B: Preventive Maintenance	\$ 5
C: Repair and Maintenance	\$ 25
D: Rehabilitation	\$ 125

Fig. 20. Service Life Costs.

### 6.2 The «Low - Bid Syndrome»

In spite of present day knowledge, the message has not come across to practice, that by proper attention in the design and execution phase, and a correctly adopted maintenance strategy, all structures can achieve very long service lives.

The actual cost of structures is very high compared to other investments made, and at the same time «human optimism» leads most people to reach for the limit in size and operating quality when venturing into a building project. For individuals, building a house is often the largest investment in their lives. In practice this will focus much attention on the immediate building costs, i.e. limiting the short term construction costs becomes «the way of life».

The same attitude governs large corporations and companies as well as local and national governments.



## " La Ley de los Cincos "

( de Sitter )

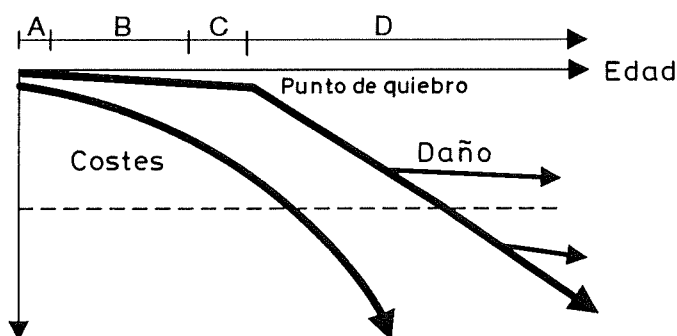


Fig. 19. La «Ley de los Cincos».

## " La Ley de los Cincos "

( de Sitter )

A : Buena Práctica	\$	1
B : Mantenimiento Preventivo	\$	5
C : Reparación y Mantenimiento	\$	25
D : Rehabilitación	\$	125

Fig. 20. Costos de Vida Util.

### 6.2 El «síndrome de la oferta baja»

A pesar del conocimiento actual, el mensaje no ha llegado a la práctica de que prestando la atención apropiada en las fases de proyecto y ejecución, y con una estrategia de mantenimiento correctamente adoptada, todas las estructuras pueden alcanzar vida útiles muy largas.

El coste actual de las estructuras es muy alto comparado a otras inversiones y al mismo tiempo el «optimismo humano» hace que la mayoría de las personas aspiren al límite en cuanto a tamaño y calidad de uso al aventurarse en un proyecto de construcción. Para individuos, el construir una casa es a menudo la mayor inversión de su vida. En la práctica esto focaliza mucho su atención en los costos inmediatos de construcción, por ejemplo, limitar los costos de construcción a corto plazo se convierte en «the way of life».

La misma actitud domina las grandes entidades y empresas, así como gobiernos locales y nacionales.

---

This has led to the «Low - Bid Syndrome», by which the lowest bid in a tender usually is adopted because of the sweetness of the initial savings. In some countries it is even by law required that the lowest bid shall be accepted for all public construction works.

This is based on the faulty (or simple-minded?) belief, that once a structure has been designed and the tender conditions have been drawn up, then all tenderers that seem to comply with the specifications will produce the same quality. This is of course not the case, and the hidden qualities suffer in the search for competitive prices.

Hence, the Low - Bid Syndrome leads automatically to a minimizing of the service life of the structure and a subsequent maximizing of the maintenance costs, as indicated in Fig. 21.

## Tender Strategy

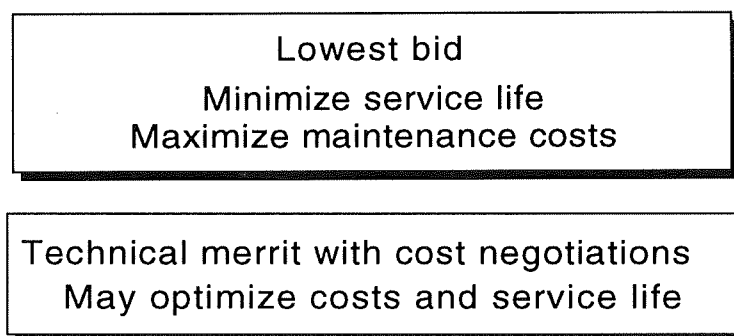


Fig. 21. The Low-Bid Syndrome.

This in turn has moved the problems to the operation and maintenance stage where **the repair industry has developed into a klondyke**. In Ref. 2 this has been formulated as a situation where societies confronted with the growing volume of deteriorating concrete structures may well feel taken hostage.

### 6.3 The Build Environment as a «Political Yo-Yo»

In many countries the building and construction sector is a large monetary sector having dominating influence on the national economy and on the degree of employment. At the same time this sector is controllable by rather simple centralistic financial means.

For this reason the Build Environment has developed into one of the main monetary and political tools for steering national economy. In our dynamic world, this has become an economic valve to be turned up and down as shortsighted responses to national and international economic fluctuations.

This has seriously aggravated the situation, because on the one hand there has been no motivation for the building sector to consider long term strategies, and on the other hand the fluctuations in activities have prevented a stable, experienced and competent workforce to develop.

The most competent workers with the best drive and initiative will be attracted by other industries and professions thus leaving the building sector with a more mediocre competence. The tradition, that any person without any formalised professional competence and without experience can operate as concrete worker, does not improve the situation.

Esto ha conducido al «síndrome de la oferta baja», por el cual la oferta más baja en una licitación es normalmente aceptada por lo agradable que resulta el ahorro inicial. En algunos países está hasta incluso requerido por ley, que sea la oferta más baja la aceptada para todos los trabajos de construcción públicos.

Esto está basado en la creencia errónea (o ¿ingenua?) de que una vez que la estructura ha sido proyectada y los pliegos de condiciones redactados, todos los ofertantes que aparentemente cumplan con las especificaciones van a producir la misma calidad. Este no es naturalmente el caso, y las calidades latentes sufren en la búsqueda de los precios competitivos.

De esto, el síndrome de la oferta baja lleva automáticamente a minimizar la vida útil de la estructura y una subsiguiente maximización de los costos de mantenimiento, como indicado en la Fig. 21.

## Estrategia de Ofertas

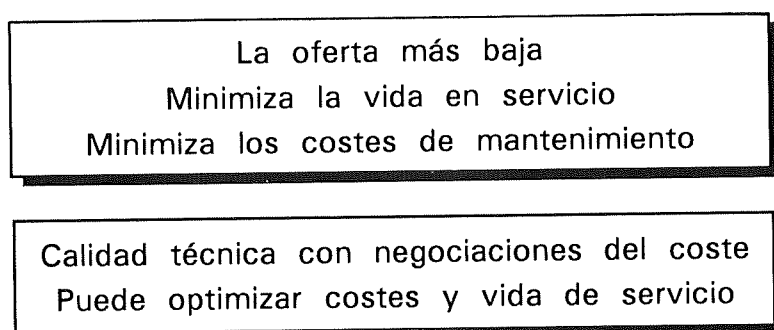


Fig. 21. Síndrome de la Oferta Baja.

Esto a su tiempo ha traspasado los problemas a las fases de operación y mantenimiento donde la industria de la reparación se ha desarrollado en un «klondyke». En la Ref. 2 ha sido esto formulado como una situación donde las sociedades enfrentadas con un creciente volumen de estructuras de hormigón deteriorándose pueden con motivo sentirse como rehenes.

### 6.3 El ambiente de la construcción como «yo-yo político»

En muchos países el sector de la edificación y construcción es un sector monetario muy importante, ejerciendo una influencia dominante en la economía nacional y en el nivel de empleo. Al mismo tiempo este sector es controlable a través de muy simples medios financieros centralizados.

Por esta razón el Ambiente de la Construcción se ha desarrollado en una de las principales herramientas monetarias y políticas para dirigir la economía nacional. En nuestro mundo dinámico, esto se ha transformado en una válvula económica propensa a ser cerrada o abierta como respuestas cortas de vista a las fluctuaciones económicas nacionales e internacionales.

Ello ha agravado seriamente la situación, ya que por una parte no ha habido motivación para el sector de la construcción para considerar estrategias a largo plazo, y por otra parte las fluctuaciones en actividades han impedido el desarrollo de una fuerza de trabajo estable, experimentada y competente.

Los trabajadores más competentes, con la mejor iniciativa y energía, serán atraídos por otras industrias y profesiones, dejando por lo tanto al sector de la construcción con una competencia más mediocre. La tradición de que cualquier persona sin una competencia profesional formalizada y sin experiencia pueda operar como trabajador en el ramo del hormigón, no mejora precisamente la situación.

## 7 THE GREAT BELT LINK, DENMARK

Construction of the Great Belt Link between Funen and Zealand in Denmark is one of the largest transportation projects presently undertaken in Europe and the largest project in Denmark to date, see Fig. 22.

The complete link will be approximately 18 km long and the construction costs will be approximately 3 billion US\$.

The link will include three major structures:

- A twin tube bored railway tunnel under the eastern channel.
- A combined road and railway bridge across the western channel.
- A high level record span suspension bridge for road traffic across the international waters of the eastern channel.

The construction will take place in two stages with the opening of the rail link in 1994 and the road link in 1996.

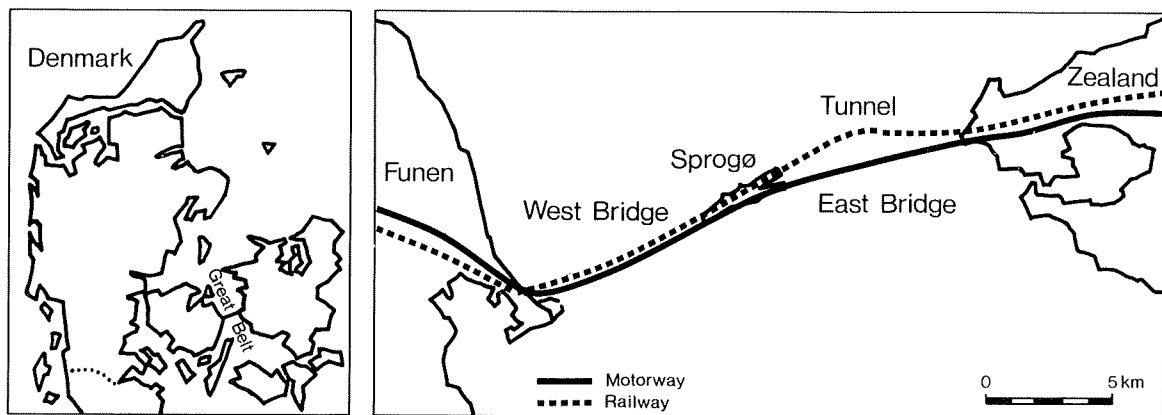


Fig. 22. The Great Belt Link, Denmark.

### 7.1 100 Year Service Life Design

Requirements for long term durability and low operation and maintenance costs can only be fulfilled if taken into account already during the initial design and construction stages.

The Great Belt Link in Denmark comprises three major structural transportation facilities where the owner, The Great Belt A. S., has specified a **100 year service life** as a design requirement, which includes an optimizing of the operation and maintenance activities foreseen for this Link.

Major efforts have been made to identify where this requirement would have an impact on modern design and execution of concrete structures exposed to aggressive environments. (Modern durability technologies along the lines presented in the foregoing have been followed in order to achieve this goal.)

In real life, theory and practice have to compromise in order to unite in a common effort to achieve the best possible solution based on present day knowledge and technology.

The important precondition to reach an acceptable solution in the end, is the need to **follow a rational strategy for durability** formulated during the early stages of design. Such a *Service Life Design* shall combine requirements to the design and execution stage with requirements facilitating the subsequent operation and maintenance of the structure.

## 7 EL ENLACE DEL GRAN BELT, DINAMARCA

La construcción del Enlace del Gran Belt entre las islas de Fionia y Selandia, en Dinamarca, es uno de los mayores proyectos de transporte actualmente emprendidos en Europa y el mayor proyecto en Dinamarca hasta la fecha, ver Fig. 22.

El enlace completo será de aproximadamente 18 km. de largo y el costo de la construcción será de aproximadamente 3 mil millones de dólares (340.000 millones de ptas.).

El enlace incluye tres estructuras principales:

- Un túnel de doble tubo perforado bajo el canal del Este.
- Un puente combinado de carretera y ferrocarril sobre el canal del Oeste
- Un puente colgante de alto nivel con luz récord para el tráfico de carretera sobre las aguas internacionales del canal del Este.

La construcción será llevada a cabo en dos etapas, con la apertura del enlace ferroviario en 1994 y el enlace de carretera en 1996.

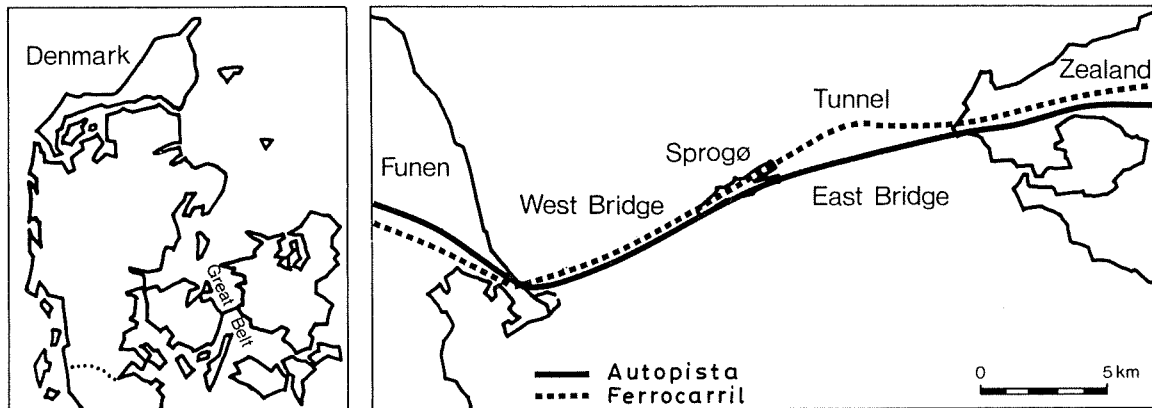


Fig. 22. El Enlace del Gran Belt, Dinamarca.

### 7.1 Diseño dirigido a 100 años de vida útil

Los requerimientos para la durabilidad a largo plazo y bajos costos de operación y mantenimiento pueden tan sólo ser satisfechos de haberse tenido en cuenta durante las fases del proyecto y construcción iniciales.

La entidad propietaria, The Great Belt A. S., ha especificado una vida útil de 100 años como prescripción de diseño, lo que incluye una optimización de las actividades de operación y mantenimiento previstas para este Enlace.

Grandes esfuerzos han sido hechos para identificar dónde esta prescripción tendría un impacto en el moderno proyecto y ejecución de estructuras de hormigón del Enlace del Gran Belt expuestas a ambientes corrosivos.

En la vida real, la teoría y la práctica tienen que llegar a un compromiso a fin de unirse en un esfuerzo común para lograr la mejor solución posible basada en el conocimiento y tecnologías de hoy en día.

La importante precondition de llegar a una solución aceptable al final, es la necesidad de **seguir una estrategia racional para la durabilidad**, formulada durante las fases iniciales del proyecto. Semejante *Diseño de Vida Útil* deberá, por lo tanto, combinar los requisitos de las fases de proyecto y ejecución con prescripciones que faciliten la subsiguiente operación y mantenimiento de la estructura.

## 7.2 The Eastern Tunnel

The tunnel will consist of 7.7 m diameter separate tubes for trains in each direction, with cross passages at 250 m intervals for mechanical and electrical equipment and emergency escape routes.

The spacing between the tube centres is 25 m narrowing down to 9.5 m at the portals. A section in the tunnel and cross passage is shown in Fig. 23. All linings are segmentally bolted precast segments.

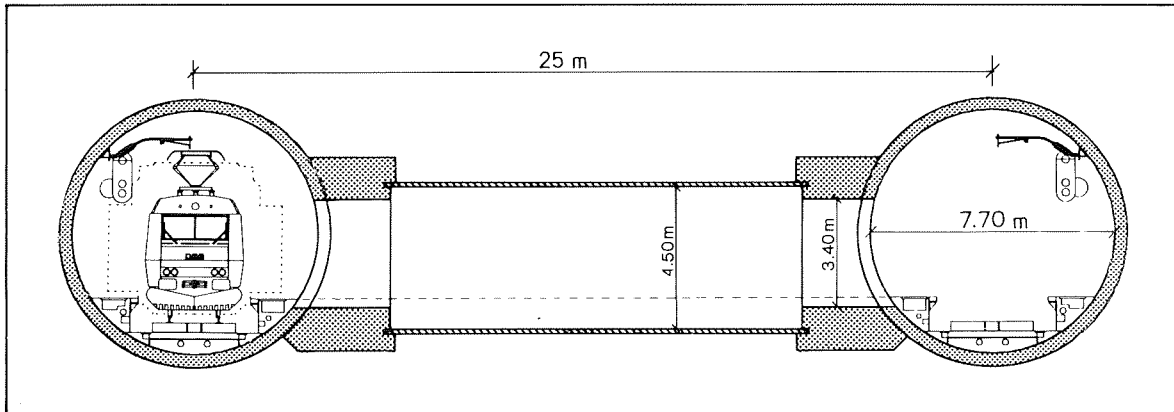


Fig. 23. Eastern Railway Tunnel. Cross Section in Bored Tunnel.

The approximately 8.0 km length of the tunnels are carried out as Tunnel Boring Machine (TBM) driven tunnels over the central 7,410 m with short transitions of cut and cover tunnels at each end.

The main tunnels will generally be lined with 1.65 m wide and 400 mm thick precast reinforced concrete segments. 6 segments and a key make up the whole ring as shown in Fig. 24. The lining is designed to be waterproof for the full hydrostatic pressure of 8 bar (80 m water head). Water tightness is obtained by use of gaskets between segments. Minor inflow escaping the seals will be channelled to the tunnel drainage system.

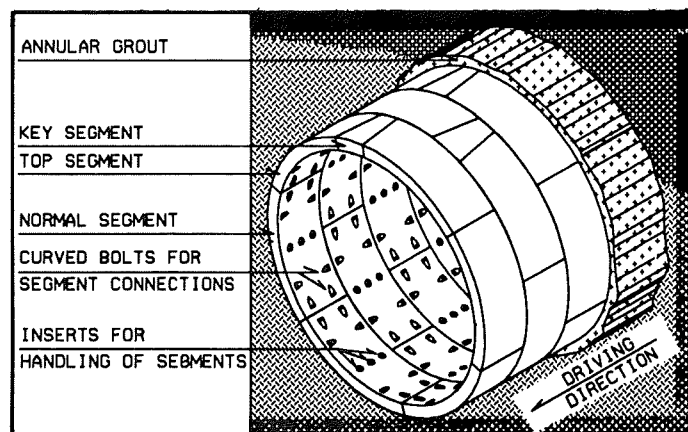


Fig. 24. Precast Segmental Concrete Lining with Epoxy Coated Fully Welded Reinforcement Cages.

## 7.2 El Túnel del Este

El túnel consiste en tubos separados de un diámetro de 7,7 m. para paso de trenes en cada dirección, con pasos transversales a intervalos de 250 m. para instalaciones mecánicas y eléctricas, y rutas de escape de emergencia.

La distancia entre los centros de los tubos es de 25 m. decreciendo hasta 9,5 en las boquillas. Una sección a través del túnel y paso transversal es mostrada en la Fig. 23. Todos los revestimientos son dovelas prefabricadas y atornilladas segmentalmente entre sí.

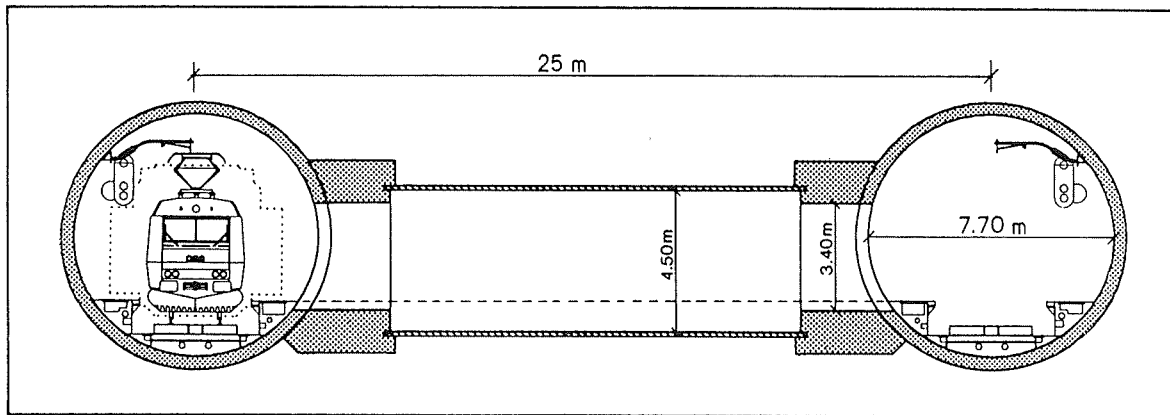


Fig. 23. Túnel del Este para Ferrocarril. Sección transversal en el Túnel Perforado.

Los aproximadamente 8,0 km. de longitud de los túneles son llevados a cabo como túneles perforados en Máquina Tuneladora (TBM, Tunnel Boring Machine) en el tramo central de 7.410 m. con cortas transiciones de falsos túneles a cada extremo.

Los túneles principales son generalmente revestidos con dovelas prefabricadas de hormigón armado de 1,65 m. de ancho y 400 mm. de espesor. Seis dovelas y una pieza clave forman el anillo completo, como se ve en la Fig. 24. El revestimiento está diseñado para ser estanco para la completa presión estática de 8 bares (80 m. de columna de agua). La estanqueidad al agua es obtenida por medio de cubrejuntas entre dovelas. Escapes menores por los cubrejuntas serán canalizados al sistema de drenaje y desagüe del túnel.

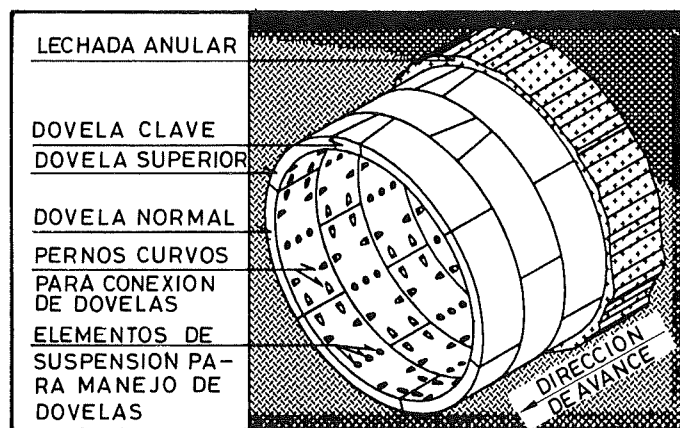


Fig. 24. Revestimiento dovelado prefabricado de hormigón con jaulas completamente soldadas y recubiertas de epoxy.



The design consulting engineers for the eastern railway tunnel is a joint venture, COWI/MHAI, of COWIconsult, Consulting Engineers and Planners, Denmark, and Mott McDonald, UK, with COWI as leading partner.

### Lining Durability

Medium to high ground water chloride and sulphate levels combined with a hydrostatic pressure of up to 80 metres means that dense high quality concrete is essential for the segments. In the light of growing evidence of deterioration of existing reinforced concrete lined tunnels in saline ground conditions, a comprehensive study was *under taken* at an early stage of the Tender Design to establish criteria for the various components of the structure providing for minimum maintenance requirements.

A number of protective measures were considered of which coating to the external surfaces of the segments and epoxy coating of the reinforcement cages were included as specified variants in the Tender Documents. On the basis of pricing, it was decided to use epoxy coated reinforcement, but using a special coating procedure compared to the usual type of coating procedure where individual bars are coated, see below.

### Multi-Stage Protection Strategy

The coating constitutes part of the overall 100 year Service Life Design approach adopted for the project. This design is based on a Multi-Stage Protection Strategy, see Refs. 5 and 6, and illustrated on Fig. 25.

## Multistage Protection Strategy

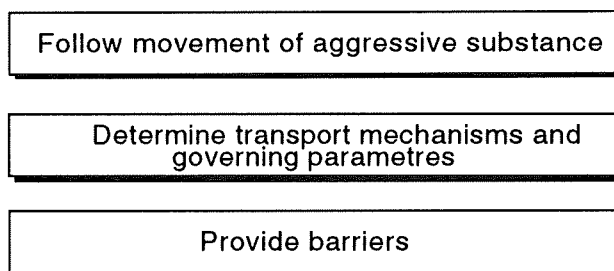


Fig. 25. Multi-Stage Protection Strategy. Principle of application.

The four main barriers against chloride corrosion are, see Figs. 26 and 27:

- Annular grout filling between the lining and the soil.
- Concrete composition including fly ash, micro silica and OPC with a W/C-ratio of max. 0.35.
- Epoxy coated reinforcement.
- The possibility of providing cathodic protection if corrosion should occur some time in the future. The cages are fully welded prior to coating which ensures electrical contact between all bars in a cage and thus makes cathodic protection a realistic future option, see Section 3.10.

### Epoxy Coating by the Fluidised Bed Dipping Technique

The configuration of the reinforcement cages for the segments led to the use of the fluidised bed dipping technique for epoxy coating where the complete cage is coated by heating and dipping in a tank full of epoxy powder fluidised by air jets. The powder fuses to the preheated cage giving a uniform protective layer of epoxy, see Figs. 16 and 17.

Los ingenieros consultores para el túnel ferroviario de Este es una unión temporal de empresas XOWI/MHAI, de COWIconsult, Ingenieros Consultores y Planificadores, Dinamarca, y Mott Macdonald, del Reino Unido, con COWI como empresa líder.

#### Durabilidad del Revestimiento

Los niveles del cloruro y sulfato de medios a altos en aguas subterráneas combinado con una presión hidrostática de hasta 80 m. significa que el uso de hormigón denso de alta calidad es esencial para las dovelas. A la luz de la creciente evidencia del deterioro de los túneles revestidos de hormigón armado existentes en condiciones de subsuelos salinos, un extenso estudio fue emprendido en una temprana fase del proyecto de la propuesta para establecer los criterios para los diversos componentes de la estructura, a fin de definir un mínimo de exigencias de mantenimiento.

Un número de medidas de protección fueron consideradas, de las cuales el recubrimiento de las superficies externas de los segmentos y recubrimiento de epoxy de las jaulas de las armaduras fueron incluidas como variantes en el Pliego de Condiciones. En la base del costo, se decidió usar armaduras recubiertas con capa de epoxy, pero empleando un procedimiento especial de recubrimiento comparado con el tipo usual de recubrimiento, donde las barras individuales son recubiertas, ver más abajo.

#### Estrategia de Protección-Multigrado

El recubrimiento constituye parte del concepto total del Diseño de Vida Util de 100 años. Este diseño está basado en la Estrategia de Protección Multigrado ver Ref. 5 y 6, e ilustrado en la Fig. 25.

## Estrategia de Protección Multi - Grado

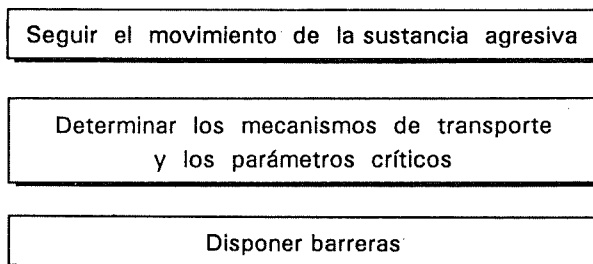


Fig. 25. Estrategia de protección Multi-Grado. Principio de aplicación.

Las cuatro barreras principales contra la corrosión por cloruro son, ver Fig. 26 y 27:

- Hormigón de relleno anular entre el revestimiento y el terreno.
- Composición del hormigón incluyendo cenizas finas, micro-sílice y CPO (cemento portland ordinario) con una relación agua/cemento máxima de 0,35.
- Armadura recubierta con capa de epoxy.
- La posibilidad de proveer protección catódica en caso de manifestarse la corrosión alguna vez en el futuro. Las jaulas son completamente soldadas antes del recubrimiento, lo que asegura contacto eléctrico entre todas las barras en una jaula y por lo tanto, hace a la protección catódica una opción realista en el futuro, ver sección 3.10.

#### Recubrimiento Epoxy por la Técnica del Baño Fluidificado

La configuración de las jaulas prefabricadas de la armadura para las dovelas, condujo al uso de la técnica de recubrimiento con capa de epoxy por baño fluidificado, donde la jaula completa es recubierta por calentamiento y baño en un tanque lleno de polvo de epoxy fluidificado por chorros de aire. El polvo se adhiere a la jaula precalentada resultando en una capa protectora uniforme de epoxy, ver Figs. 16 y 17.

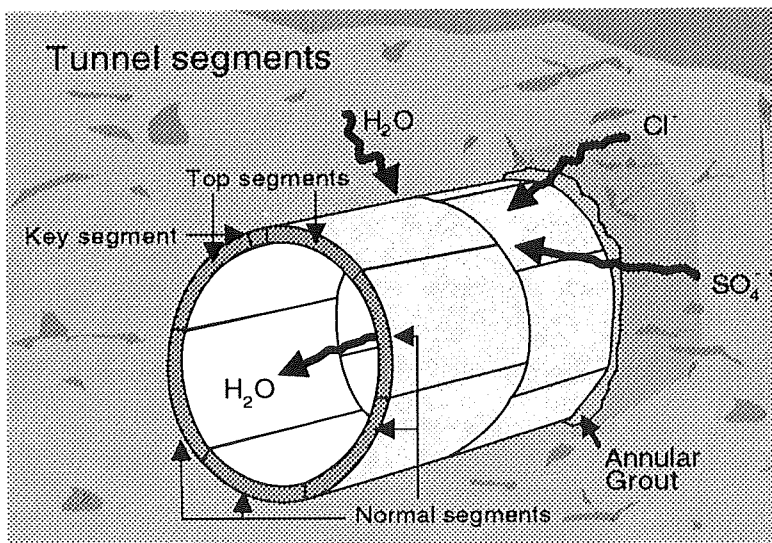
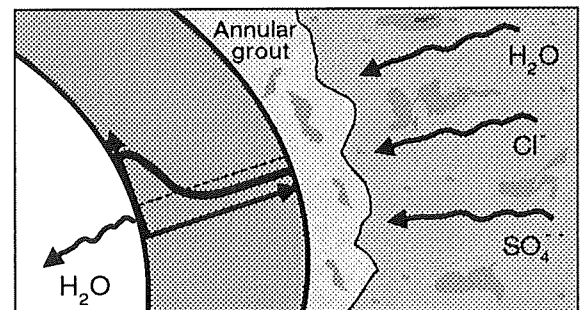


Fig. 26. Aggressive environment of the tunnel lining.  
Detail, see Fig. 27.

## Concentration



## Chlorides and sulphates

Fig. 27. Detail of lining segment with incoming chlorides.

Although used for coating pipes and valves in the pipeline industry, this technique has not previously been employed on any large scale on prefabricated reinforcement cages.

An extensive test programme was carried out during the Tender Design both to confirm the practicality of the system in this application and to establish the effect of the coating on the bond between the reinforcement and the concrete. It was also necessary to determine any difference in structural behaviour at the radial joints, where the welded mats are used to resist splitting of the joint.

The test programmes showed that the technique was feasible for the reinforcement cages and that only minor modifications were required to the structural design and detailing of the segments.

### 7.3 West Bridge

West of Sprogø the Great Belt Link combines in the 6.6 km long high speed railway and 4-lane motorway bridge from Sprogø to Funen. The tender design were prepared by a joint venture, CCL, between COWIconsult, the Carl Bro Group, Denmark, and Leonhardt, Andrä und Partner, Germany with COWI as leading partner.

The tender designs comprised three alternative types of superstructure, a two level composite girder, three independent concrete box girders at the same level, and a single steel box girder. Based on the tenders received, and alternative concrete solution submitted by the European storebælt Group, ESG, was finally selected.

Fig. 28 provides a perspective view of the bridge alternative now being constructed by ESG. CCL coordinates all design activities and performs detailed check of ESG's design, and forms together with the Great Belt A.S. the General Supervision.

The pier shafts have rectangular hollow cross sections with a constant wall thickness. The pier shafts are capped by a 2.5 m plinth. In the lower part of the pier shafts, concrete fill is provided by prefabricated blocks, see Fig. 29.

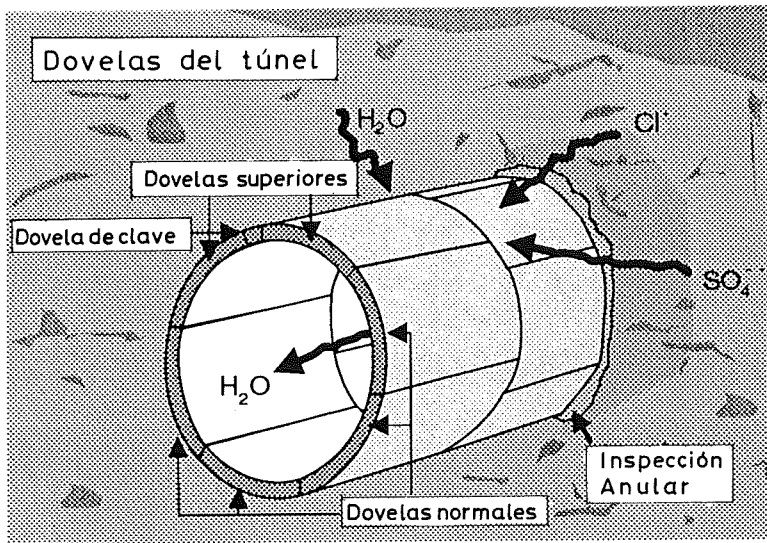
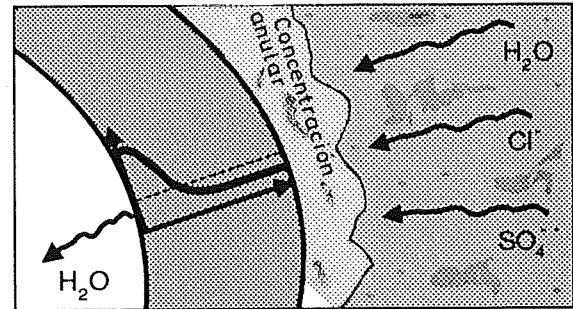


Fig. 26. Ambiente agresivo del revestimiento del túnel. Detalle, ver Fig. 27.

## Concentración



## Cloruros y sulfatos

Fig. 27. Detalle del segmento de revestimiento con los cloruros entrantes.

Aunque usada para la protección de tuberías y válvulas en la industria de oleoductos, esta técnica no ha sido anteriormente empleada a gran escala en jaulas o mallas de armaduras prefabricadas.

Un extenso programa de pruebas fue llevado a cabo durante el proyecto de propuesta, tanto para confirmar la practicabilidad del sistema en esta aplicación, así como para establecer el efecto del recubrimiento en la adherencia entre la armadura y el hormigón. Fue necesario también determinar cualquier diferencia en comportamiento estructural en las juntas radiales, donde las jaulas soldadas son usadas para resistir la rotura de la junta.

Los programas de prueba indicaron que la técnica era factible para las jaulas de armadura y que sólo menores modificaciones serían necesarias para el diseño estructural y detallado de las dovelas.

### 7.3. Puente del Oeste

Al oeste de Sprogø el Enlace de Gran Belt combina en los 6,6 km de puente una vía de ferrocarril de alta velocidad y una autopista de 4 carriles desde Sprogø hasta la isla de Fionia. Los diseños de la propuesta fueron preparados por la unión de empresas, CCL, entre COWIconsult el Grupo Carl Bro, ambas de Dinamarca y Leonhardt, Andra und Partner, de Alemania, con COWI como empresa líder.

Los proyectos de propuesta comprendían tres tipos alternativos de sobreestructura: una viga mixta de dos niveles, tres vigas de cajón independientes de hormigón al mismo nivel y una viga de acero de cajón única. En base a las propuestas recibidas, una solución alternativa de hormigón, presentada por el European Storebaelt Group, ESG, fue finalmente seleccionada.

La Fig. 28 muestra una vista perspectiva de la alternativa del puente actualmente siendo construido por ESG. CCL coordina todas las actividades de diseño y realiza el control detallado del proyecto de ESG, formando conjuntamente con la compañía The Great Belt A. S., la Supervisión General.

Las pilas de cajón son de sección transversal rectangular hueca con un espesor de pared constante. Las pilas están cubiertas en su tope por una losa de 2,5 m. La parte inferior es rellena de hormigón, con bloques prefabricados, ver Fig. 29.

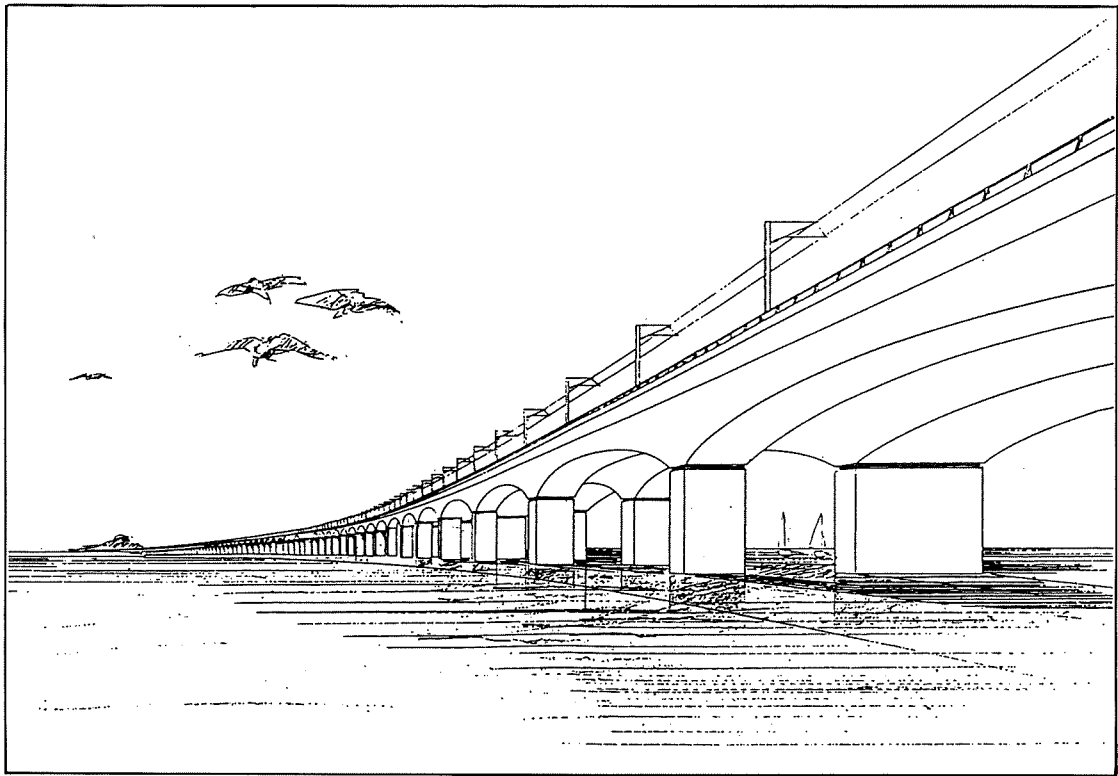


Fig. 28. West Bridge. Perspective View.

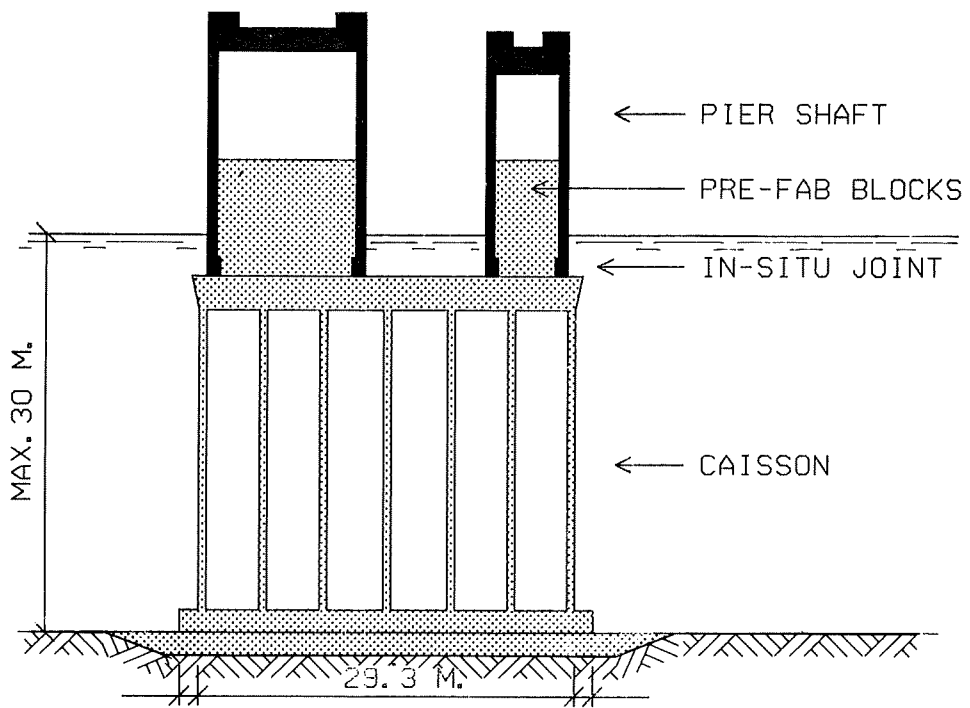


Fig. 29. Precast Concrete Caisson and Pier Shafts.

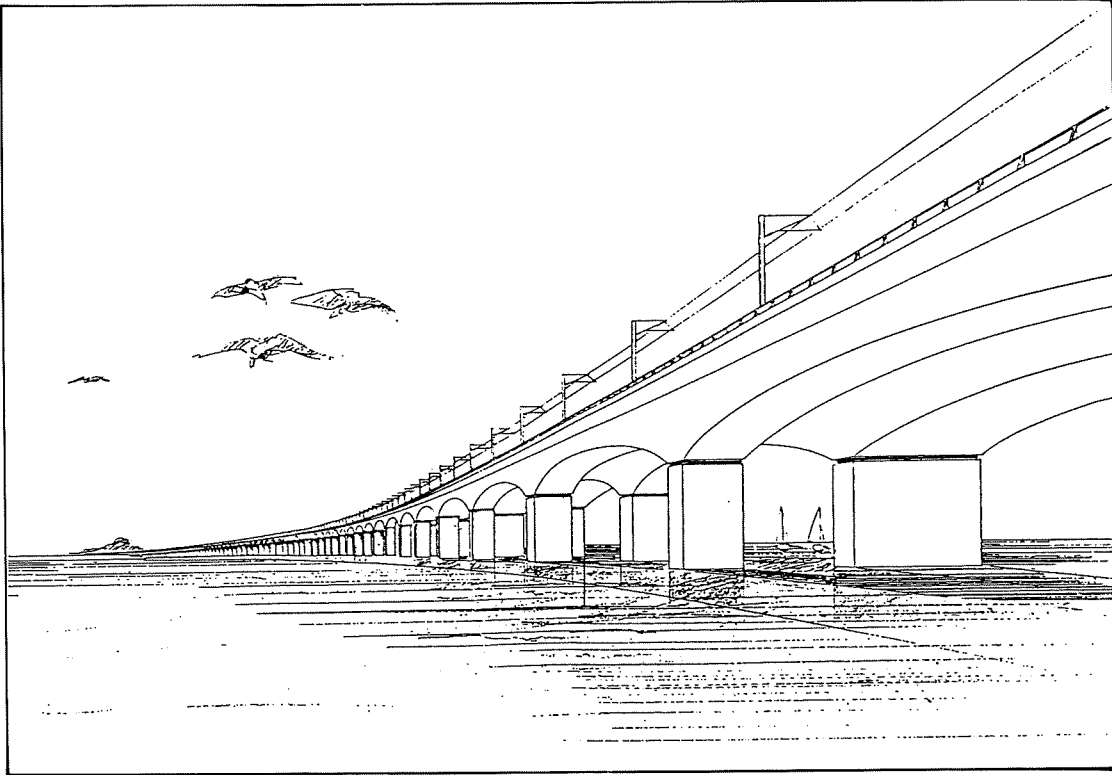


Fig. 28. Puente del Oeste. Vista perspectiva.

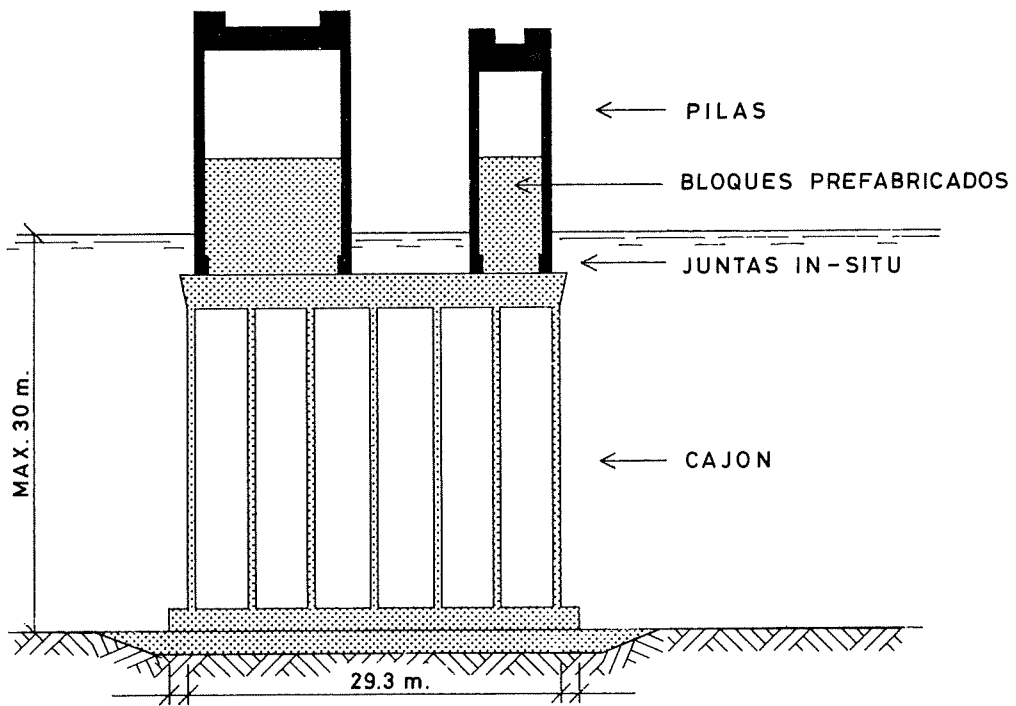


Fig. 29. Cajones y pilas en cajón prefabricado de hormigón.

The superstructure elements are 110.4 m long haunched box girders with depth decreasing parabolically from 8.70 m at the piers to 5.13 m at mid span for the railway girder. The corresponding dimensions for the roadway girder are 7.34 m and 3.78 m, respectively. Each girder will be cast in five large pours comprising one pier head and two sets of identical cantilever units.

Figs. 30 and 31 show sections in the bridge superstructure.

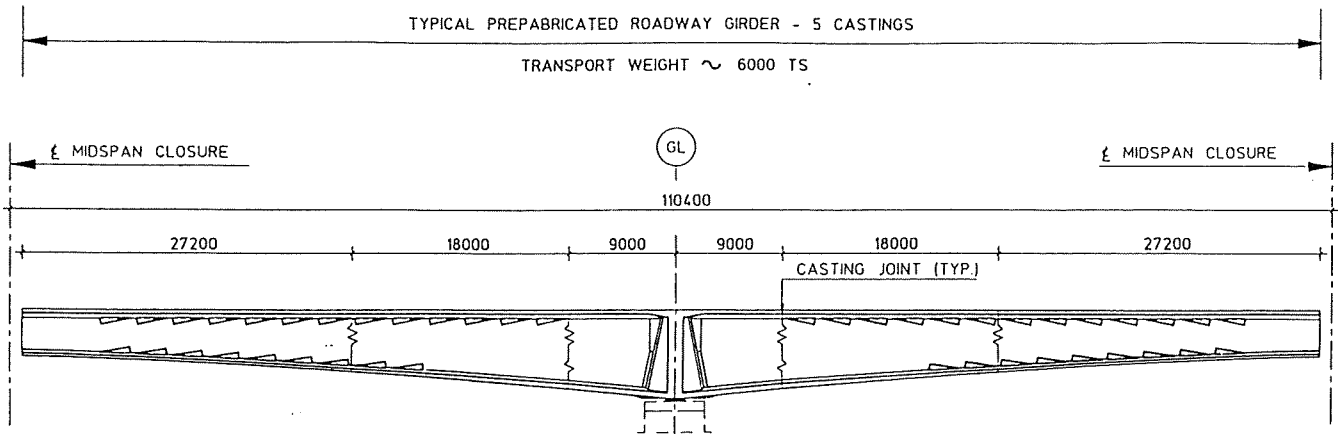


Fig. 30. Precast Concrete Bridge Superstructure. Longitudinal section.

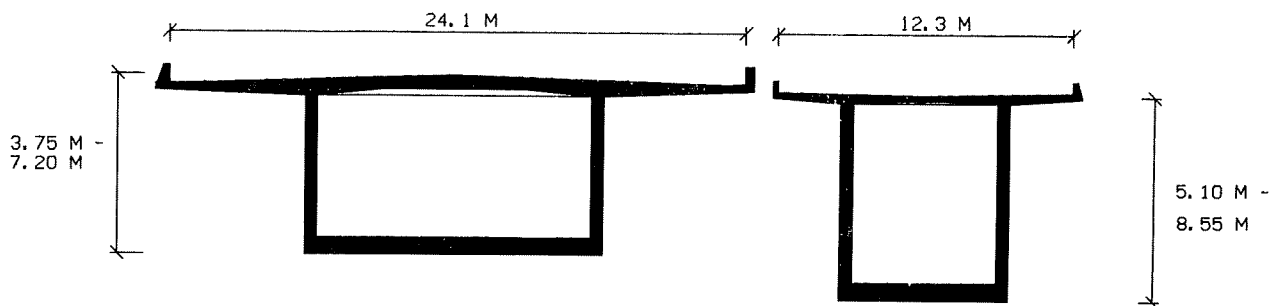


Fig. 31. Superstructure. Cross Section.

The installation of the bridge elements will be performed by means of a large U-shaped crane vessel with a lifting capacity of approximately 6,500 t. This vessel will place all 324 units, i.e. caissons, pier shafts as well as bridge girders.

#### Durability of Pier Shafts

When considering protective measures for the bridge pier standing in saline waters, the following options have been considered:

- Smooth, uncracked and impermeable concrete surface.
- Rounded outward corners.
- Minimum of construction joints on exposed surfaces.
- Sloping horizontal faces where ponding may occur (alternative: surface coating).



Los elementos de la superestructura (tableros) son vigas de cajón arqueadas de 110,4 m. de longitud, con perfil decreciente parabólicamente desde 8,7 m. sobre los pilares hasta 5,13 m. en el punto medio de la viga para el ferrocarril. Las dimensiones correspondientes para la viga de la autopista son de 7,34 m. y 3,78 m. respectivamente. Cada viga es hormigonada en cinco grandes secciones o dovelas, comprendiendo un cabezal sobre el pilar y dos conjuntos de idénticas unidades en voladizo.

Las Figs. 30 y 31 muestran secciones en la superestructura del puente.

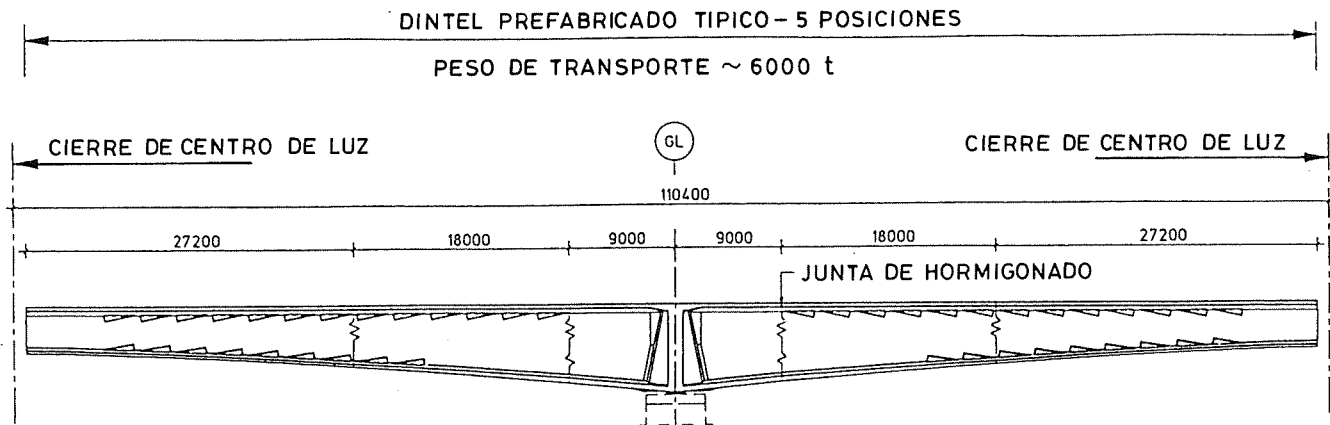


Fig. 30. Superestructura prefabricada de hormigón del puente. Sección longitudinal de hormigón.

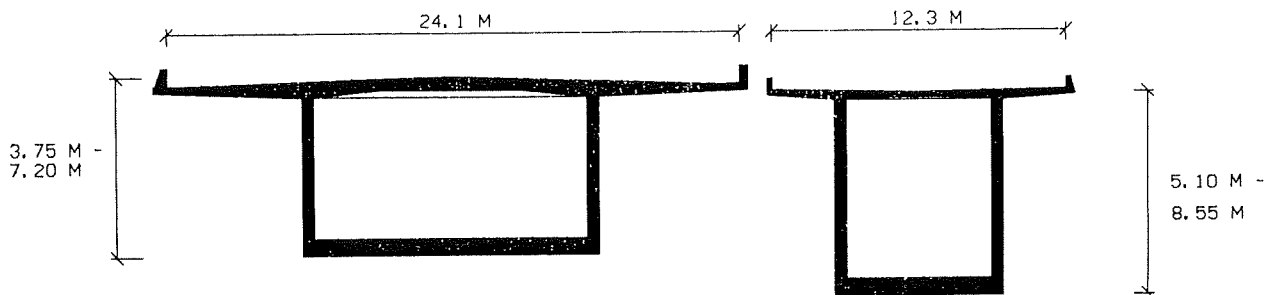


Fig. 31. Superestructura. Sección transversal.

La instalación de los elementos del puente es llevada a cabo con una grúa flotante, de configuración en U, con una capacidad de carga de aproximadamente 6.500 t. Esta nave-grúa colocará las 324 unidades, v. g. cajones sumergidos, pilas así como las vigas del tablero.

#### Durabilidad de las pilas en cajón

Al considerar las medidas protectoras para las pilas en cajón del puente en aguas salinas, las siguientes opciones fueron consideradas:

- Superficies de hormigón lisas, sin grietas e impermeables.
- Esquinas salientes redondeadas.
- Mínimo de juntas de hormigonado en superficies expuestas.
- Superficies horizontales inclinadas donde el embalse de aguas pudiera ocurrir (alternativa: recubrimiento superficial).

- 100 mm concrete cover with sacrificial skin reinforcement (corroding thus protecting the main reinforcement, and with subsequent spalling of its cover). Alternative is noncorroding skin reinforcement of stainless steel or in some cases epoxy coating.
- 75 mm concrete cover with epoxy coated reinforcement.
- Liner in splash zone, e.g. stainless steel or surface coating.
- Provision for future cathodic protection (electric continuity of the reinforcement).

They each have a different degree of reliability and a different overall effect, but if a careful selection of combined measures is made, very long durability may be expected.

In the final design by ESG the following has been selected:

- Small rounding of edges, mainly to reduce ice pressure.
- No construction joints in tidal or splash zones.
- 70 mm (+ 5 mm for tolerance) concrete cover.

### Durability of Superstructure

The superstructure is located rather low over the water, as the maximum clearance is 18 m. However, the conditions are not as aggressive as in the splash zone where cyclic wetting and drying with salt water is occurring.

The following protective barriers have been chosen:

- Rounding of outward edges (radius = 50 mm).
- Concrete cover of 50 (+ 5 mm.).

In both cases the quality of the concrete and very strict curing conditions have been specified by The Great Belt A.S.

## 7.4 East Bridge

The third major component of the Great Belt Link is the 6.8 km long high level bridge across the Eastern Channel, see Fig. 32. This will be the most spectacular part of the link. It will be visible at great distance and the impact on the seascape will be considerable, see Fig. 33.

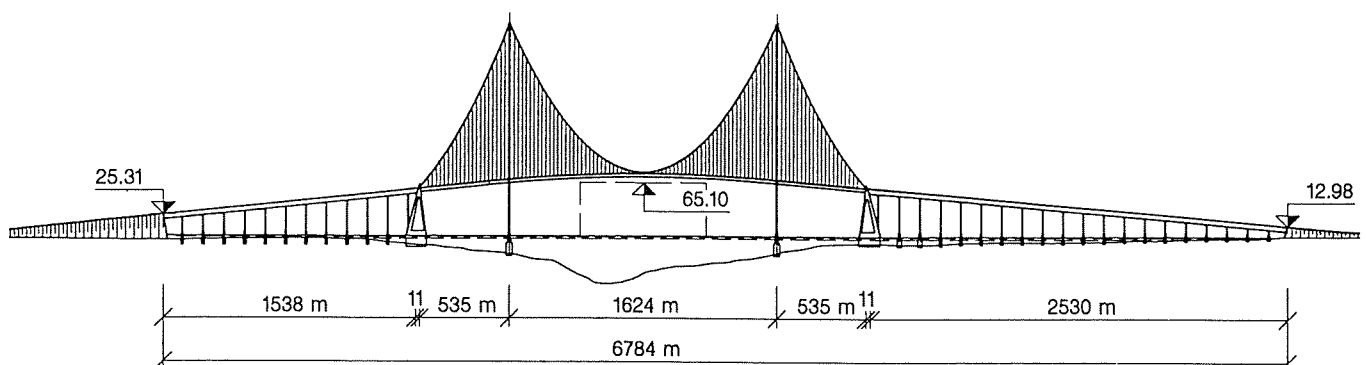


Fig. 32. East Bridge with a Record Main Span of 1,624 m. The bridge will carry a 4 lane motorway with two emergency lanes.

- 100 mm. de capa de recubrimiento de hormigón con armadura superficial de sacrificio (corroyendo, protegiendo de esta manera a la armadura principal, y con la subsiguiente fisuración de su recubrimiento). Una alternativa es la armadura superficial no propensa a la corrosión de acero inoxidable o en algunos casos con recubrimiento epoxy.
- 75 mm. de capa de recubrimiento con armadura recubierta de epoxy.
- Revestimiento en la zona de salpicadura, por ejemplo recubrimiento de acero inoxidable y recubrimiento superficial.
- Previsión para futura protección catódica (continuidad eléctrica de la armadura)

Cada una de estas opciones ofrecen un grado de fiabilidad diferente, así como un diferente efecto general, pero si una cuidadosa selección de medidas es realizada, una muy larga durabilidad puede ser esperada.

En el diseño final por ESG fueron seleccionadas las siguientes medidas:

- Pequeñas esquinas redondeadas, principalmente para reducir presiones del hielo.
- No existencia de juntas de hormigonado en zonas de marea o de salpicaduras.
- 70 mm. (+ 5 mm. de tolerancia) de capa de recubrimiento de hormigón.

#### Durabilidad de la superestructura

La superestructura está colocada bastante baja sobre el agua, siendo el gálibo máximo de 18 m. De todas maneras, las condiciones no son tan agresivas como en la zona de salpicadura donde el mojado y secado cíclico con agua salada ocurre.

Las siguientes barreras protectoras han sido elegidas:

- Redondeo de las esquinas salientes (radio = 50 mm)
- Capa de recubrimiento de hormigón de 50 mm. (+ 5 mm.).
- En ambos casos la calidad del hormigón y las condiciones de curado muy estrictas han sido requeridas por The Great Belt, S. A.

#### 7.4. Puente del Este

El tercer componente principal del Enlace de Gran Belt es el puente de alto nivel de 6,8 km sobre el Canal del Este, ver Fig. 32. Este será la más espectacular parte del Enlace. Será visible a gran distancia y su impacto en el paisaje será considerable, ver Fig. 33.

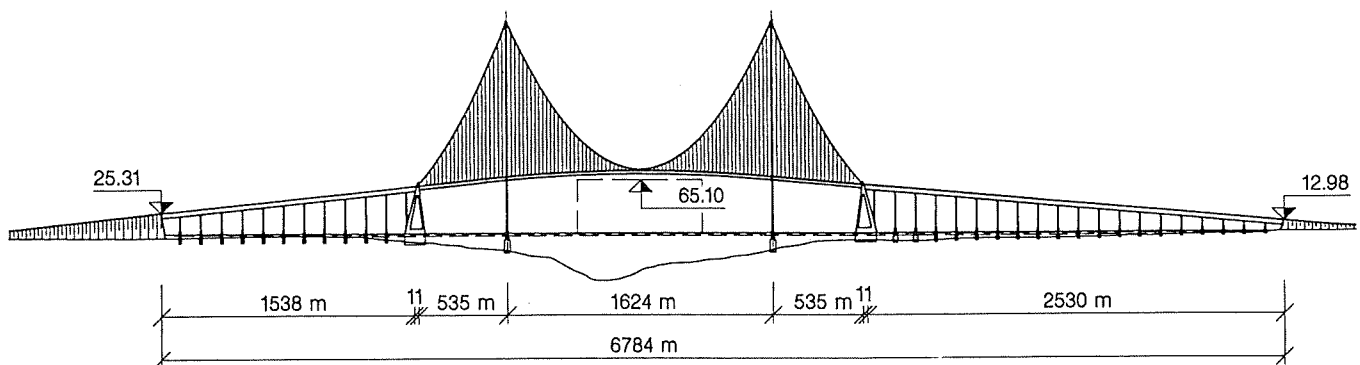


Fig. 32. Puente del Este con una luz principal récord de 1.624 m. El puente llevará una autopista de 4 carriles con dos arcenes de emergencia.

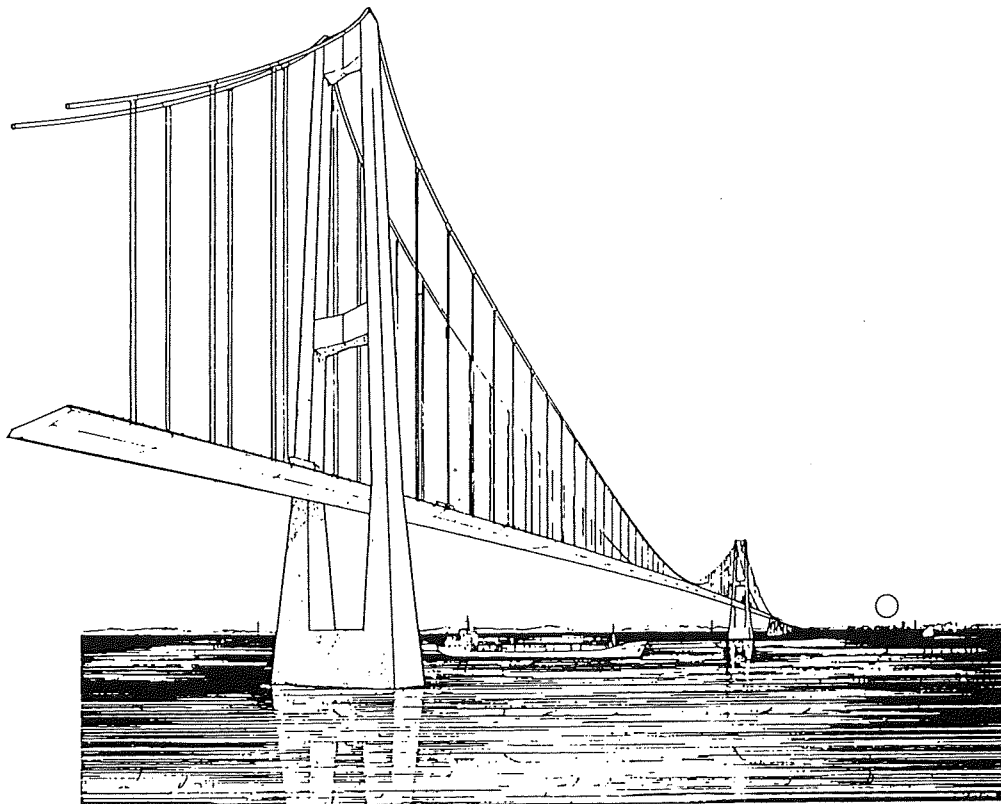


Fig. 33. East Bridge. Perspective view.

The Tenders for the East Bridge were opened in December 1990. Contract negotiations are ongoing, with expected signing of contract in September 1991. The main bridge will be a suspension bridge with a record breaking 1,624 m main span and two side spans of 535 m each.

The bridge towers will rise 254 m above water and will be constructed in concrete. A steel alternative was also part of the tender.

The tender design has taken the following provisions to ensure adequate durability of the most critical parts of the concrete substructure:

- Rounding of outward corners.
- Main proposal: 100 mm concrete cover with a stainless steel mesh as skin reinforcement.
- Alternatively: 75 mm concrete cover and epoxy coated reinforcement.
- Additional option: the possibility of giving the concrete a surface treatment with water repellent silane.

The tender designs have been prepared by and all Danish joint venture, CBR, between COWIconsult, B. Højlund Rasmussen and Rambøll & Hannemann, with COWI as leading partner.

#### Acknowledgements

The author wishes to thank The Great Belt A.S. for permission to publish details of the three projects of the Great Belt Link.

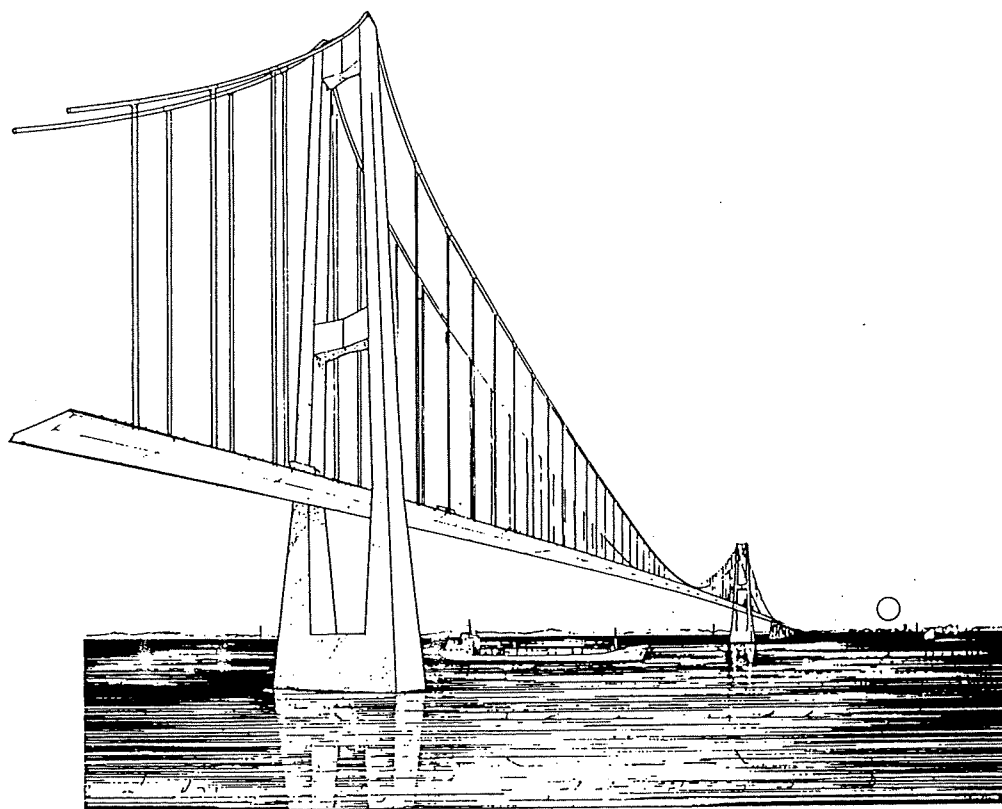


Fig. 33. Puente del Este. Vista perspectiva.

La Oferta para el Puente del Este fue abierta en diciembre de 1990. Las negociaciones para el contrato están aún siendo llevadas a cabo, con la firma del contrato prevista para octubre 1991. El puente principal será un puente colgante con unas luces rompedoras de récords, de 1.624 m, para el vano principal y dos vanos laterales de 535 m. cada uno.

Las torres del puente se alzarán a 254 m. sobre el nivel del mar y serán construidas en hormigón. Una alternativa en acero fue también considerada en el proyecto de oferta.

El proyecto de oferta ha considerado las siguientes medidas para asegurar una adecuada durabilidad de las partes más críticas de la superestructura de hormigón:

- Esquinas salientes redondeadas
- Propuesta principal: 100 m. de capa de recubrimiento de hormigón con malla de acero inoxidable como armadura superficial.
- Alternativamente: 75 mm. de capa de recubrimiento de hormigón y armadura recubierta de epoxy.
- Opción adicional: la posibilidad de dar al hormigón un tratamiento superficial con silane repelente de agua.

Los proyectos de oferta han sido realizados por una unión temporal de empresas completamente danesa, la CBR, entre COWIconsult, B. Højlund Rasmussen y Rambøll à Hannemann, con COWI como empresa líder.

### Reconocimientos

El autor quiere agradecer a The Great Belt A. S. por su permiso para publicar los detalles de los tres proyectos de Enlace del Gran Belt.

---

8 REFERENCES  
8 BIBLIOGRAFÍA

- (1) ROSTAM S., SORENSEN K. A., BERGHOLT K.: «Full Scale Load Tests of Damaged Concrete Structures». Proceedings of the 1st International on Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Arabian Gulf, October 1985. Volume I, p. 333-349.
- (2) ROSTAM S., JENSEN K. N.: «Assessment and Decision Making for Deteriorating Concrete Structures, Acting on Incomplete Information. Example of Practical Use». Proceedings of the 2nd International Conference on Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Arabian Gulf, October 1987. Volume II, p. 271-287.
- (3) ROSTAM S.: «International Codes of Practice with Particular Reference to Durability. Can Durability be Codified?». Proceedings of the 2nd International Conference on Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Arabian Gulf, October 1987. Volume II, p. 135-159.
- (4) ROSTAM, S.: «Durability of Concrete Structures - the CEB-FIP Approach». Proceedings of the Colloquium on the CEB-FIP MC 90, COPPE/UFRJ, Universidade Federale do Ríó de Janeiro, 28 - 03 August 1991, p. 369-429.
- (5) CEB: «Durable Concrete Structures. CEB Design Guide». CEB Bulletin of Information No. 182, June 1989.
- (6) «CEB-FIP Model Code, 1990». Comité Euro-International du Béton and Fédération Internationale de la Précontrainte. Final Draft. CEB-Bulletin of Information No. 204 and 205, July 1991.
- (7) CEB-RILEM International Workshop: «Durability of Concrete Structures». Workshop Report, Editor: Steen Rostam. April 1984. Also available as CEB-Bulletin of Information No. 152, 1984.
- (8) CEB: «Durability of Concrete Structures», State-of-the-Art Report, CEB-Bulletin d'Information No. 148, April 1982.
- (9) CEB: «Diagnosis and Assessment of Concrete Structures», State-of-the-Art Report, CEB-Bulletin d'information No. 192, January 1989.



## Relación de personal titulado

### Arquitecto

Luzón Cánovas, José M.<sup>a</sup>

### Arquitectos Técnicos

Blanco Pérez, Hermenegildo  
Casado de la Fuente, M.<sup>a</sup> Esther  
Cervera García, Eduardo  
Fuente Rivera, Jesús de la  
Jiménez Recio, Pedro Luis  
Montejano Jiménez, María del Carmen  
Muños Mesto, Angel  
Oros Rey, Ana Isabel  
Seisdedos Domínguez, Lucía  
Vicente García, José Manuel

### Ingeniero Aeronáutico

Cerdó Alonso-Misol, Gonzalo

### Ingeniero Agrónomo

Valdés Tamames, Begoña

### Ingenieros de Caminos

Acón Robleda, Miguel Angel  
Avalos Brunetti, Hugo Edgardo  
Calavera Ruiz, José  
Cortés Bretón, Juan María  
Corral Folgado, Claudio  
Delibes Liniers, Adolfo  
Díaz Lozano, Justo  
Espinós Espinós, José  
Fernández Gómez, Jaime Antonio  
Ferrer Serafi, Carles  
Ferreas Eleta, Román  
Gómez Alvarez, Mercedes  
González González, Juan José  
González Valle, Enrique  
Hostalet Alba, Francisco  
Izquierdo Bernaldo de Quirós, José M.<sup>a</sup>  
Jordán de Urrés de la Riva, Jorge  
Ley Urzaiz, Jorge  
Rodríguez Moragón, Julio  
Sirvent Sirvent, Enrique  
Tapia Menéndez, José

### Ingenieros Civiles

Arias Brostella, Carlos Alfredo  
Pulgar Allendes, Jorge Osvaldo

### Ingeniero I.C.A.I.

Marín Estévez, Gonzalo

### Ingenieros Industriales

Alvarez Cabal, Ramón Amado  
Aparicio Puig, José Antonio  
Bueno Bueno, Jorge  
Durán Boldova, José Miguel  
Pi Sáenz de Heredia, Cristóbal  
Valenciano Carles, Federico

### Ingeniero de Minas

Ramos Sánchez, Adelina

### Ingenieros Técnicos Industriales

Alonso Miguel, Félix Benito  
Díaz-Trechuelo Laffón, Antonio  
Gómez Gómez, Angel Manuel  
González Carmona, Manuel  
González Muñoz, Rafael  
Madueño Moraño, Antonio  
Rodríguez Delgado, José Manuel

### Ingeniero Técnico Industrial Químico

Fernández París, José Manuel

### Ingenieros Técnicos de Minas

Ballesteros Peinado, Luis Alberto  
Santacoloma Cabero, Juan Ignacio  
Sillero Arroyo, Andrés

### Ingenieros Técnicos de Obras Públicas

Aranda Cabezas, Luis  
Blanco García, Fernando  
Carrero Crespo Rafael  
Esteban García, Juan José  
Fernández Corredera, Carlos  
González Isabel, Germán  
González Nuño, Luis  
Mata Soriano, Juan Carlos  
Montiel Sánchez, Ernesto  
Muñoz Jiménez, José Luis  
Muñoz Mesto, Angel  
Pardo de Agueda, Juan Luis  
Rosa Moreno, José Andrés  
Rozas Hernando, José Juan  
Sánchez Vicente, Andrés

### Ingenieros Técnicos Topógrafos

Barragán Bermejo, M.<sup>a</sup> Vicenta  
Carreras Ruiz, Francisco  
Vinagre Sáenz de Tejada, Hilario

### Licenciado en Ciencias Físicas

Díaz Paniagua, Carlos

### Licenciados en Ciencias Geológicas

Blanco Zorroza, Alberto  
Massana Milá, Joan  
Serrano Martín, Luis

### Licenciados en Ciencias Químicas

Grandes Velasco, Sylvia María  
López Sánchez, Pedro  
Morgado Sánchez, José Carlos  
Rodríguez-Maribona Gálvez, Isabel Ana

### Profesores Mercantiles

González Alvarez, Vicente  
Sampedro Portas, Arturo

### Técnico en Informática

García Rodríguez, Juan Tomás

### Topógrafo

Alquezar Falceto, Ricardo



# SERVICIO DE PUBLICACIONES

2.<sup>a</sup> EDICION 1991

3.<sup>a</sup> EDICION 1991



\* De acuerdo con las Instrucciones EH-91 y EF-88, con referencia al EUROCODIGO EC-2, Model Code CEB-FIP 1990, ACI 318-89

## ULTIMOS CUADERNOS PUBLICADOS

Cuaderno N.º 4 «Color y textura en el hormigón estructural».

Autor: J. M. Pérez Luzardo.

Cuaderno N.º 5 «Tecnología moderna de durabilidad. Aplicación de la experiencia pasada a proyectos futuros».

Autor: S. Rostam.

## PROXIMOS CUADERNOS

Cuaderno N.º 6 «Construcción y seguimiento de una gran obra de tierra».

Autores: C. Corral y J. Espínos.

Cuaderno N.º 7 «Diagnóstico estructural y rehabilitación de edificios históricos».

Autor: G. Macchi.

Cuaderno N.º 8 «Estabilidad estática de los cerramientos de fachadas de fábrica».

Autor: J. M. Luzón Cánovas.

### "PROYECTO Y CALCULO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO PARA EDIFICIOS"

- Autor: J. CALAVERA.
- 2.<sup>o</sup> Edición, 1991, de acuerdo con las Instrucciones EH-91 y EF-88, con referencia a EUROCODIGO EC-2, Model Code CEB-FIP 1990, ACI 318-89.

#### TOMO I CALCULO DE ESFUERZOS

- 568 páginas. ● Encuadernación en gualflex. ● 373 figuras. ● 90 gráficos y tablas auxiliares.

#### TOMO II DIMENSIONAMIENTO Y

- 871 páginas. ● Encuadernación en gualflex. ● 611 figuras. ● 142 gráficos y tablas auxiliares.

Precio de la obra completa: 15.000 Pts.

### "CALCULO DE ESTRUCTURAS DE CIMENTACION"

- Autor: J. CALAVERA.
- 3.<sup>o</sup> Edición, 1991, de acuerdo con la Instrucción EH-91, con referencia al EUROCODIGO EC-2, Model Code CEB-FIP 1990 y ACI 318-89. ● 418 páginas. ● Encuadernación en gualflex. ● 40 tablas para el dimensionamiento directo de zapatas corridas y aisladas. ● Precio: 7.000 Pts.

### "CALCULO, CONSTRUCCION Y PATOLOGIA DE FORJADOS DE EDIFICACION"

- Autor: J. CALAVERA.
- 4.<sup>o</sup> Edición. ● 678 páginas. ● Encuadernación en gualflex. ● 344 figuras. ● 93 tablas y ábacos. ● 16 ejemplos resueltos. ● 159 referencias bibliográficas. ● 188 detalles constructivos. ● Precio: 6.770 Pts.

### "MUROS DE CONTENCIÓN Y MUROS DE SOTANO"

- Autor: J. CALAVERA.
- 2.<sup>o</sup> Edición. ● 308 páginas. ● Encuadernación en gualflex. ● 26 gráficos y tablas auxiliares. ● 22 tablas para el dimensionamiento directo. ● Precio: 5.900 Pts.

### "TECNOLOGIA Y PROPIEDADES MECANICAS DEL HORMIGON"

- Autor: A. DELIBES.
- 266 páginas. ● Encuadernación en gualflex. ● AGOTADO. (Próxima edición 1992).

## TRABAJOS PUBLICADOS EN REVISTAS

Nuestro INSTITUTO dispone de una amplia serie de trabajos publicados por nuestras revistas técnicas en diferentes revistas que por su número no pueden reproducirse aquí. Solicite relación de títulos si está interesado.

Los precios indicados son para entregas dentro del territorio español.



# INTEMAC

Monte Esquina, 30, 4.<sup>o</sup> D. 28010 MADRID

Tels.: (91) 410 51 58-62-66. Télex: 49987 INTEM E - Fax: (91) 410 25 80