

Durabilidad de hormigones en ambientes marinos. Cálculo de vida en servicio en obras civiles

Prof. Amparo Moragues Terrades

**E. T. S. I. de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid**



ESTRATEGIAS DE DURABILIDAD EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

- Definición de durabilidad y vida útil de estructuras de hormigón
- Factores que determinan una Estrategia de Durabilidad
- Estructura del hormigón: macro y micro escala
- Mecanismos de deterioro: causas físicas y reacciones químicas



DURABILIDAD

- **Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-2007)**

- “*La durabilidad de una estructura de hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que esta expuesta y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y solicitaciones consideradas en el análisis*”

- **Comité Euro-International du Béton**

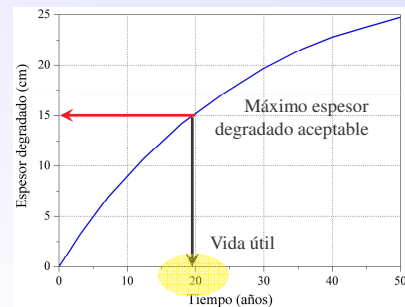
- “*La mayoría de los procesos físicos y químicos que tienen influencia en la durabilidad de estructuras de hormigón están condicionados por el transporte de líquidos a través de sus poros y grietas.*”



VIDA ÚTIL DE UNA ESTRUCTURA

VIDA ÚTIL DE UNA ESTRUCTURA es el período de tiempo, a partir de su puesta en servicio, durante el que debe mantener unas condiciones de seguridad, funcionalidad y aspecto aceptables. durante este período requerirá una conservación normal adecuada, pero no requerirá operaciones de rehabilitación.

| Tipo de estructura | Vida útil nominal (años) |
|--|--------------------------|
| Elementos reemplazables no estructurales | 10 a 25 |
| Edificios agrícolas, industriales y obras marítimas | 15 a 50 |
| Edif. de viviendas u oficinas, puentes < 10 m, estructuras de repercusión económica baja | 50 |
| Edificios monumentales o especiales | 100 |
| Puentes > 10 m o estructuras de repercusión económica alta | 100 |



VIDA UTIL DE UNA ESTRUCTURA

PROTECCION SUPERFICIAL
AMBIENTES MUY AGRESIVOS

ADOPCION MEDIDAS CONTRA
CORROSION DE ARMADURAS



TIPOLOGÍA Y DISEÑO DE LAS
FORMAS ESTRUCTURALES



ESTRATEGIA DE DURABILIDAD

CONTROL DEL VALOR MAXIMO
DE ABERTURA DE FISURA

CALIDAD ADECUADA
DEL HORMIGÓN

ADOPCION DE UN ESPESOR DE RECUBRIMIENTO
PARA PROTECCION DE ARMADURA



VIDA ÚTIL EN LA FASE DE PROYECTO

- Debe incluir las medidas necesarias para que la estructura alcance la duración de la vida útil acordada, de acuerdo con las condiciones de agresividad ambiental y con el tipo de estructura.
- La agresividad a la que está sometida una estructura se identificará por el tipo de ambiente de acuerdo con:
 - Clases generales de exposición frente a la corrosión de las armaduras
 - Clases específicas de exposición relativas a los otros procesos de degradación que procedan para cada caso

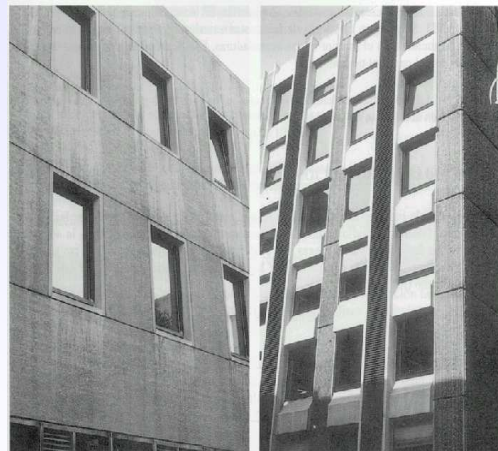


VIDA ÚTIL EN LA FASE DE PROYECTO

- En el proyecto se definirán los esquemas estructurales, las formas geométricas y los detalles que sean compatibles con la consecución de una adecuada durabilidad de la estructura.
- Se procurará evitar el empleo de diseños estructurales que sean especialmente sensibles frente a la acción del agua: evitándose en la medida de lo posible la existencia de superficies sometidas a salpicaduras o encharcamiento de agua



VIDA ÚTIL EN LA FASE DE PROYECTO



VIDA ÚTIL EN LA FASE DE EJECUCIÓN

- La buena calidad de la ejecución de la obra y, especialmente, del proceso de curado, tienen una influencia decisiva para conseguir una estructura durable.
- Las especificaciones relativas a la durabilidad deberán cumplirse en su totalidad durante la fase de ejecución. No se permitirá compensar los efectos derivados por el incumplimiento de alguna de ellas.

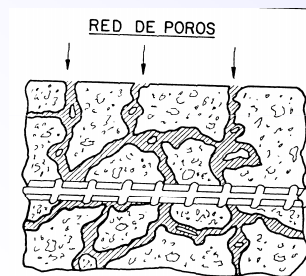


CAUSAS DE LOS PROCESOS DE DEGRADACIÓN

MECANISMOS DE DETERIORO



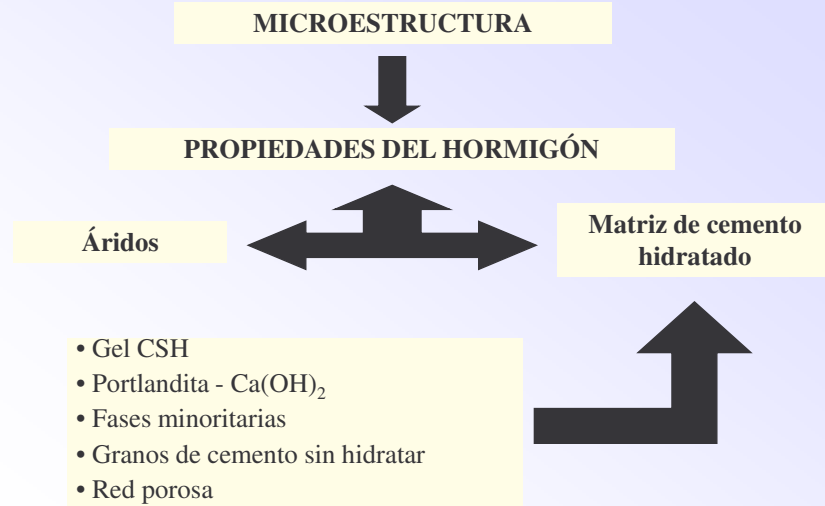
CAMBIOS ELEMENTOS MICRO O MACRO ESTRUCTURALES DEL HORMIGÓN



- FASES SÓLIDAS
- RED DE POROS / FASE ACUOSA
- ÁRIDOS
- ARMADURA METÁLICA



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Cemento anhidro

COMPOSICIÓN DE UN CEMENTO ANHIDRO

| | | | |
|-----------------------------|---|--------------------------|--------|
| Silicato tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_3S | 45-60% |
| Silicato bicálcico | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_2S | 5-30% |
| Aluminato tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | C_3A | 6-15% |
| Ferroaluminato tetracálcico | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF | 6-8% |
| Yeso hidratado | $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | $\text{C}\bar{\text{S}}$ | 3-5% |

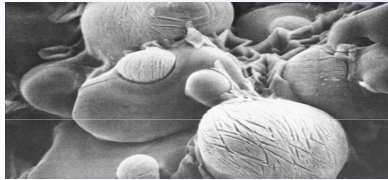
En la química del cemento es habitual utilizar una notación particular: C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃; H = H₂O; S = SO₃.



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Cemento anhidro



Cristales de Alita



Cristales de Belita

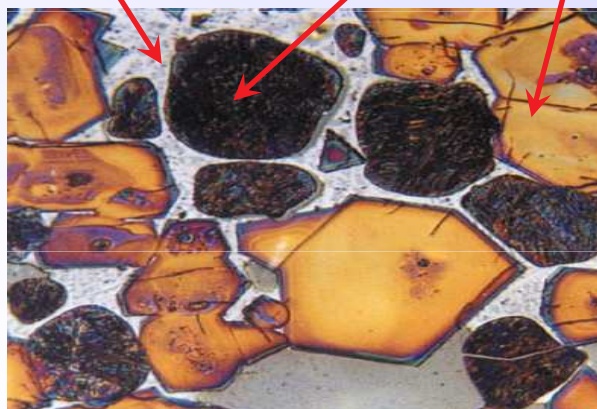


MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Cemento anhidro

Matriz de C_3A y C_4AF

Belita

Alita



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas

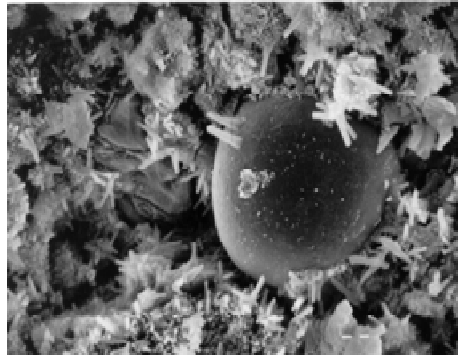
GEL DE SÍLICE



CRISTAL DE ALITA Y PRODUCTOS
DE HIDRATACION (GEL C-S-H)

MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas

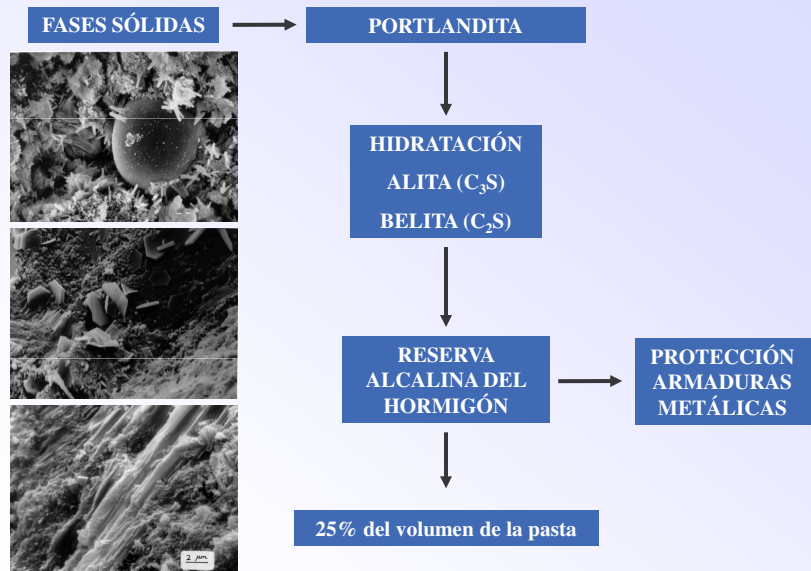
GEL DE SÍLICE



CENIZA VOLANTE Y PRODUCTOS
DE HIDRATACION

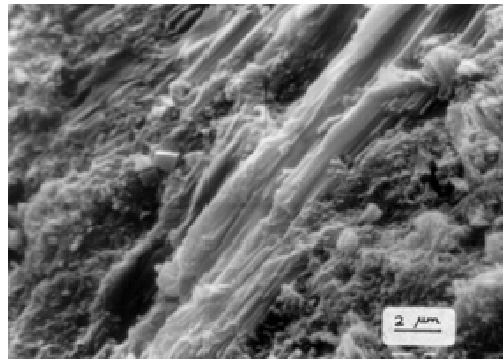


MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas

PORTLANDITA

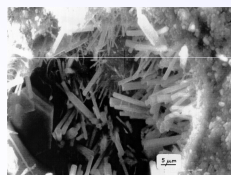
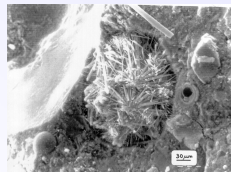


PLACAS DE PORTLANDITA



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas

FASES SÓLIDAS



ETRINGITA

HIDRATACIÓN
C₃A y YESO

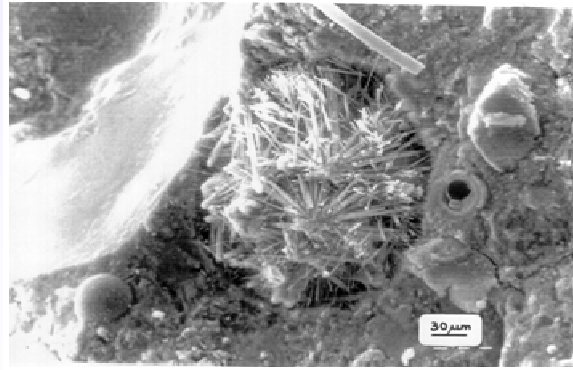
PAPEL IMPORTANTE EN
LA DURABILIDAD EN
MEDIOS SULFATADOS

15% del volumen de la pasta



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas

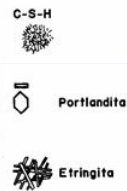
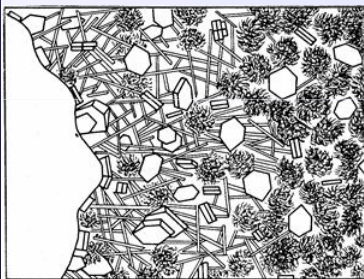
ETRINGITA



AGUJAS DE ETRINGITA EN PORO



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Áridos



ZONA DEBIL
MECÁNICAMENTE EN LA
INTERFASE CON LA PASTA

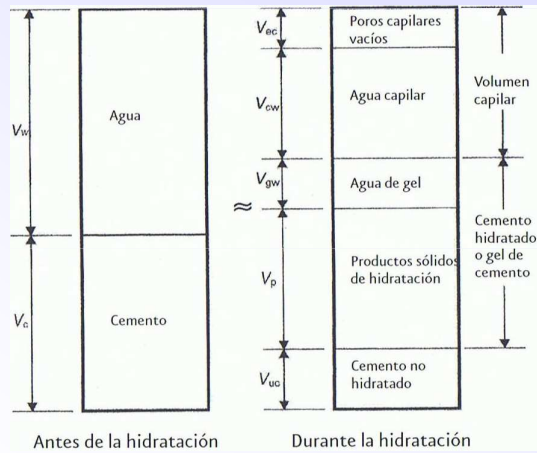


PAPEL IMPORTANTE EN LA
REACCIÓN ÁRIDO-ÁLCALI

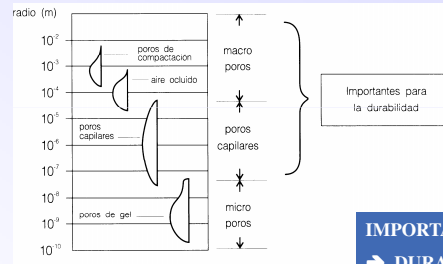


MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Porosidad

REPRESENTACIÓN VOLUMETRICA DE LA PASTA DE CEMENTO ANTES Y DESPUES DE LA HIDRATACIÓN

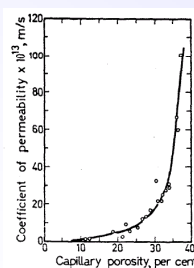
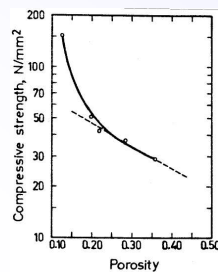


MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Porosidad



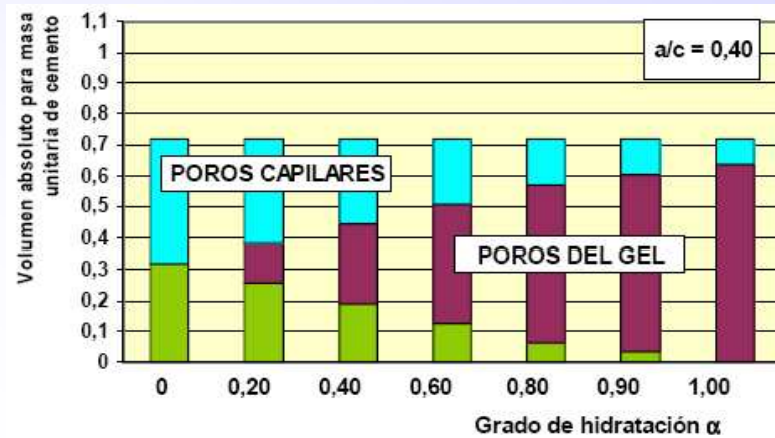
IMPORTANTES PARA LA

- DURABILIDAD
- PERMEABILIDAD
- RESISTENCIAS MECÁNICAS



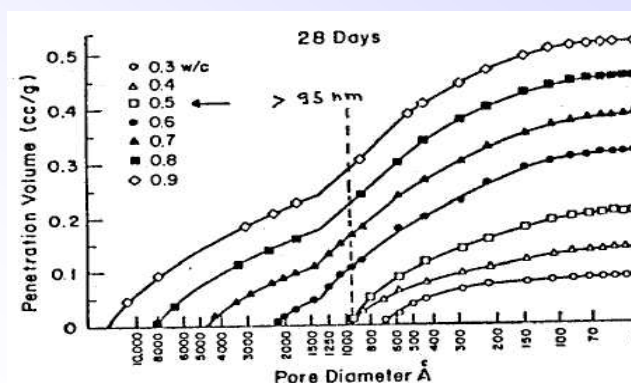
MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Porosidad

Variación del tamaño de poro en
función del grado de hidratación



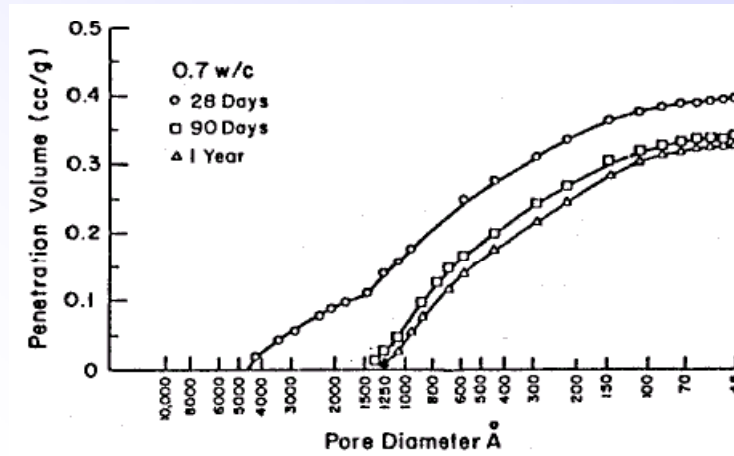
MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Porosidad

Variación de la porosidad en función
de la relación agua cemento

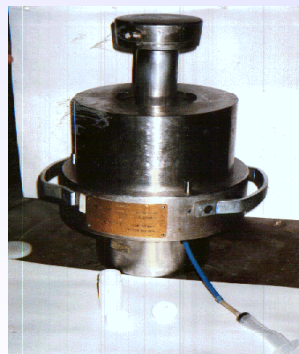


MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Porosidad

Variación de la porosidad en
función del tiempo de curado



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fase acuosa



K^+
 Na^+
 OH^-

 Ca^{2+}
 $Al(OH)^4^-$
 SO_4^{2-}

REGULA TODOS LOS
PROCESOS QUÍMICOS
Y ELECTROQUÍMICOS
DE DETERIORO



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fase acuosa

COMPOSICION QUIMICA DE FASES ACUOSAS

| Muestra | T* (°C) | Edad (días) | pH | [SO ₄ ²⁻] (M) | [Na ⁺] (M) | [K ⁺] (M) | [Ca ²⁺] (M) |
|---------|------------|----------------|------|---|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Blanco | 20° | 21+7 | 13 | 0.0009 | 0.036 | 0.053 | 0.008 |
| | | 21+28 | 13 | 0.004 | 0.025 | 0.041 | 0.014 |
| | | 21+56 | 13 | 0.001 | 0.019 | 0.051 | 0.012 |
| | | 21+90 | 13 | 0.0005 | 0.0076 | 0.0051 | 0.015 |
| | | 21+180 | 12 | 0.0003 | 0.017 | 0.015 | 0.020 |
| | | 21+365 | 11.7 | 0.020 | 0.091 | 0.010 | 0.012 |
| | 40° | 21+7 | 12.4 | 0.0017 | 0.013 | 0.028 | 0.017 |
| | | 21+28 | 12.4 | 0.0006 | 0.009 | 0.033 | 0.017 |
| | | 21+56 | 11.9 | 0.0003 | 0.013 | 0.018 | 0.017 |
| | | 21+90 | 12.5 | 0.026 | 0.069 | 0.0084 | 0.015 |
| | | 21+180 | 11.6 | 0.0002 | 0.21 | 0.13 | 0.055 |
| | | 21+365 | 11.7 | 0.0008 | 0.009 | 0.003 | 0.022 |
| BWR-CO | 20° | 21+7 | 12 | 0.014 | 0.33 | 0.152 | 0.27 |
| | | 21+28 | 12 | 0.008 | 0.14 | 0.028 | 0.63 |
| | | 21+56 | 11.6 | 0.009 | 0.27 | 0.014 | 0.65 |
| | | 21+90 | 11.7 | 0.012 | 0.25 | 0.0045 | 0.63 |
| | | 21+180 | 11.3 | 0.010 | 0.17 | 0.00 | 0.30 |
| | | 21+365 | 10.8 | 0.015 | 0.33 | 0.003 | 0.14 |
| | 40° | 21+7 | 11.7 | 0.009 | 0.24 | 0.038 | 0.49 |
| | | 21+28 | 11.6 | 0.008 | 0.21 | 0.016 | 0.65 |
| | | 21+56 | 11.2 | 0.009 | 0.34 | 0.018 | 0.74 |
| | | 21+90 | 11.1 | 0.009 | 0.29 | 0.009 | 0.78 |
| | | 21+180 | 10.8 | 0.013 | 0.24 | 0.028 | 0.11 |
| | | 21+365 | 10.0 | 0.115 | 0.77 | 0.013 | 0.06 |

Composición de fase acuosa
de cementos a distintas
temperaturas



CAUSAS DE LOS PROCESOS DE DEGRADACIÓN

■ Ataques físicos

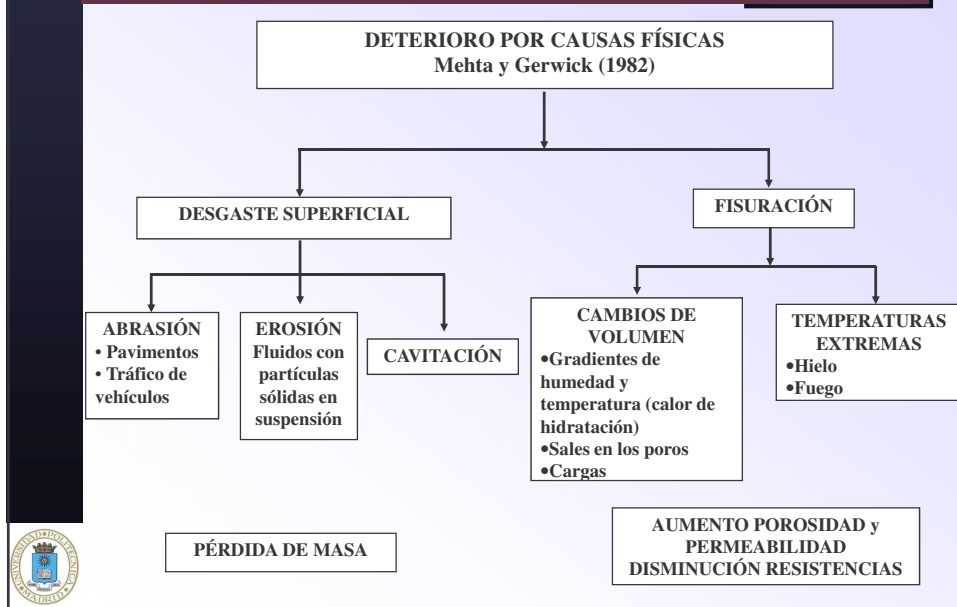
- Ciclos de hielo/deshielo
- Desgaste superficial
- Abrasión
- Erosión
- Cavitación

■ Ataques químicos

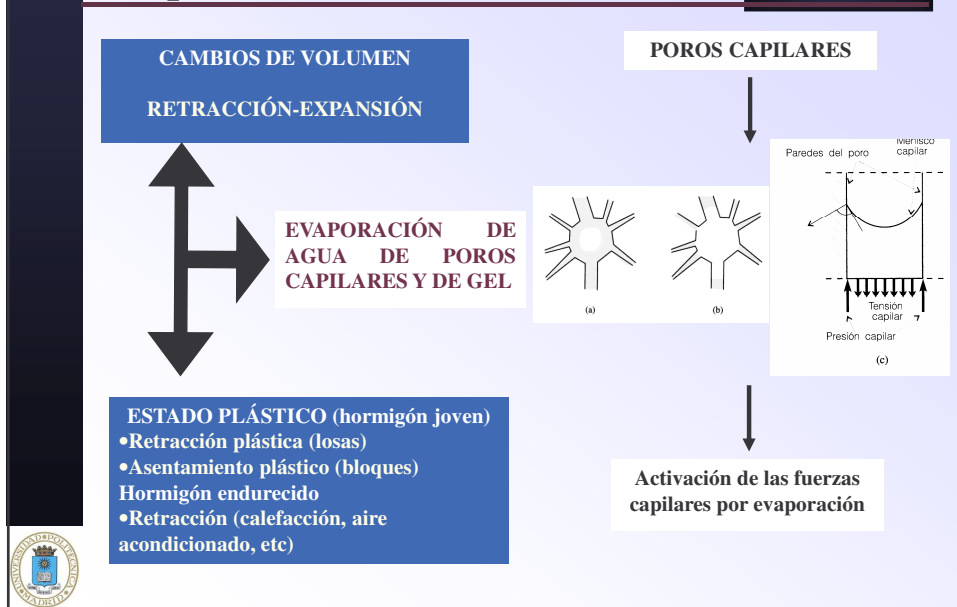
- Reacciones químicas de los áridos
- Exposición a agente químicos agresivos
- Ataque por sales
- Ataque de ácidos
- Corrosión de las armaduras



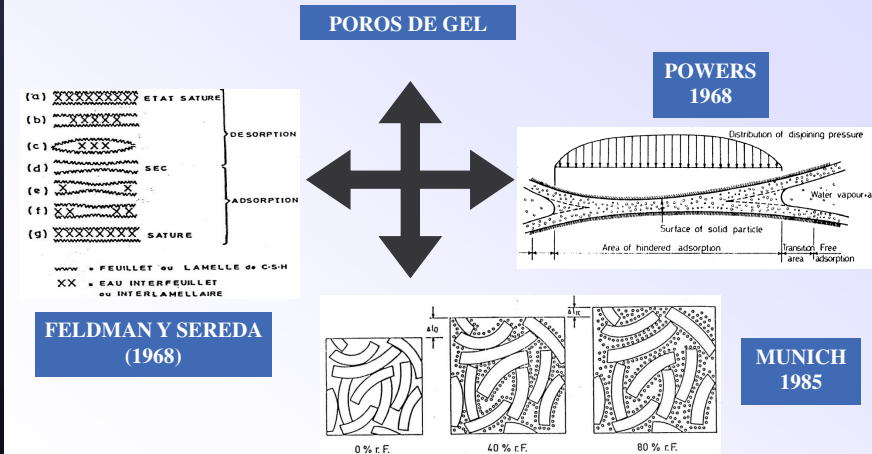
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque físico



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque físico

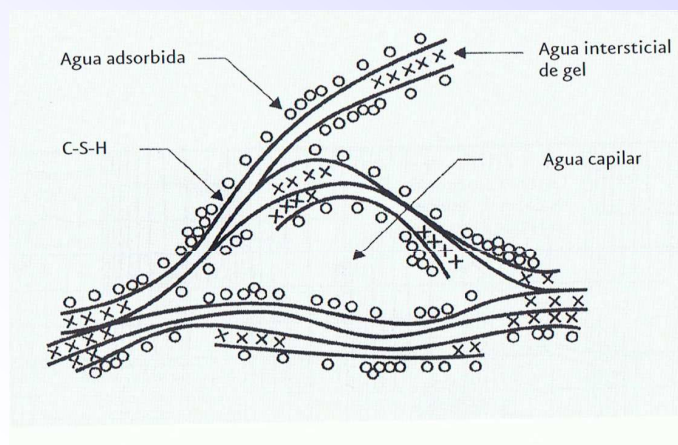


PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque físico



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque físico

FORMACIÓN FÍSICA DE LAS LAMINAS DE SILICATOS CÁLCICOS HIDRATADOS



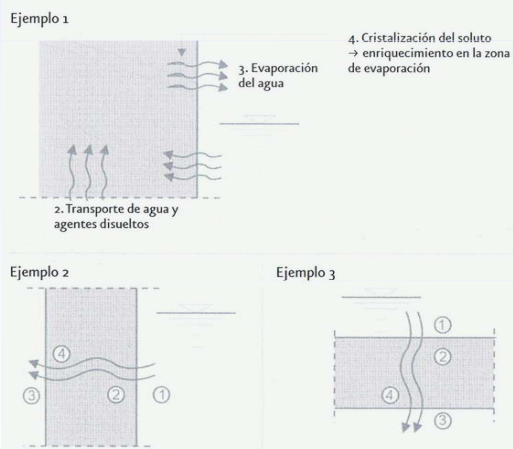
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

- Ataques químicos
 - Reacciones químicas de los áridos
 - Reacción álcali – sílice
 - Reacción álcali – carbonato
 - Exposición a agentes químicos agresivos
 - Ataque por sales
 - Ataque de ácidos
 - Corrosión de las armaduras



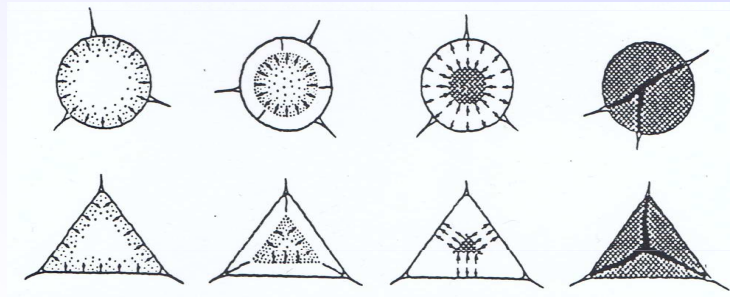
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

MECANISMOS DE TRANSPORTE



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

ÁRIDO-ÁLCALI

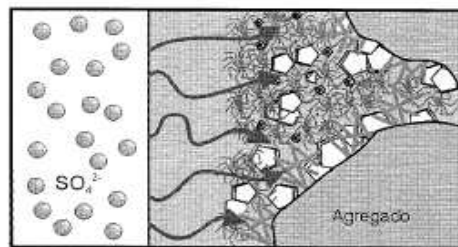


ESQUEMA DE LOS EFECTOS MECÁNICOS DE LAS REACCIONES ÁRIDO-ÁLCALI EN DIFERENTES ÁRIDOS



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

ATAQUE POR SULFATOS



| | | |
|--------------------------|--------------------------|--|
| Ambiente con sulfatos | Proceso de transporte | Reacción con los hidratos de la pasta |
|--------------------------|--------------------------|--|

- Formación de etringita
- Formación de yeso
- Formación de taumasita
- Formación de brucita, yeso y descomposición de gel
- Cristalización de sales



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

ATAQUE POR SULFATOS

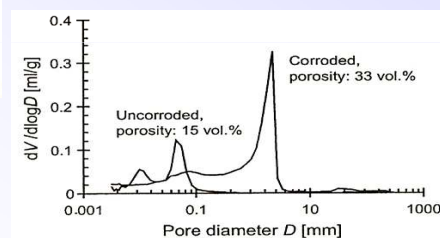
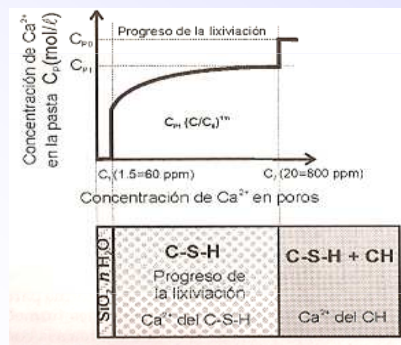
Ataque por sulfato de magnesio

- Baja concentración – formación de etringita
- Media (0,48-0,75 %) formación de etringita y yeso
- Alta :se forma yeso, brucita y un gel de sílice no cementante
- Se forma una doble capa de brucita y yeso, la brucita es muy insoluble y acidifica el interior del cemento, puede desestabilizar el gel.
- La etringita no se detecta se descompone por debajo del pH de formación de la brucita.



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

ATAQUE ÁCIDO



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

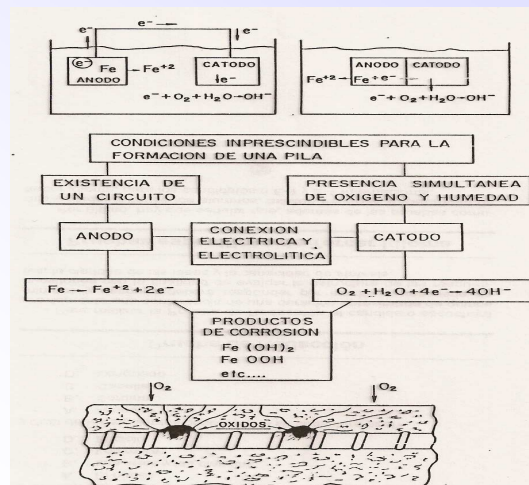
ATAQUE ÁCIDO

| | |
|--------------|--|
| pH 12,5 | Se disuelve la portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Precipita la etringita: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$. |
| pH 12,5-12,0 | Se disuelve la fase $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$. |
| pH 11,6-10,0 | Precipita el yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| pH 10,6 | Precipita Gipsita, $\text{Al}(\text{OH})_3$ y yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a expensas de la disolución de etringita. |
| pH 8,8 | Precipita sílice amorfa, SiO_2 y se disuelve el gel CSH. |



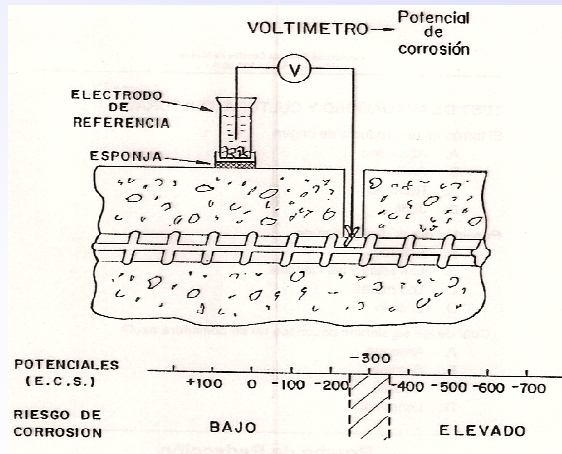
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS



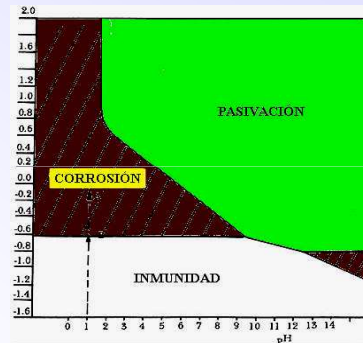
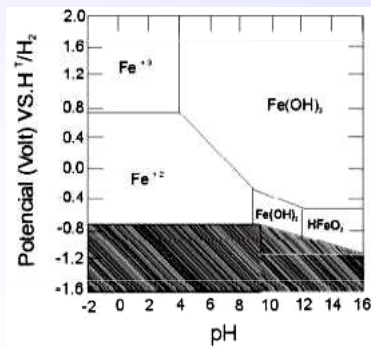
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS



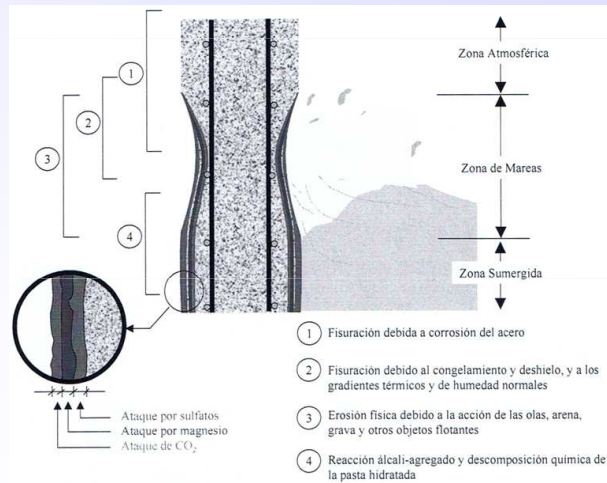
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

EFFECTOS DEL ATAQUE POR AGUA DE MAR



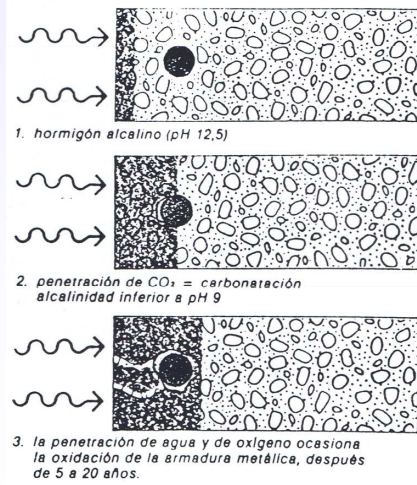
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

EFFECTOS DEL ATAQUE POR AGUA DE MAR



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

CARBONATACIÓN



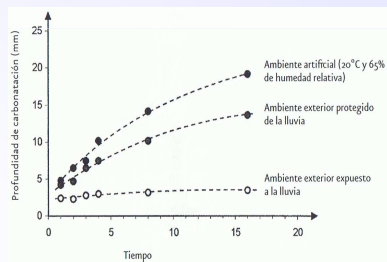
$$t_i = \left(\frac{d}{K_c} \right)^2$$

$$2-15\text{mm}/(\text{año})^{1/2}$$

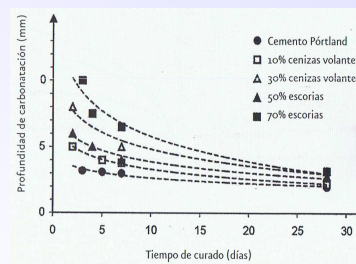


PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

CARBONATACIÓN

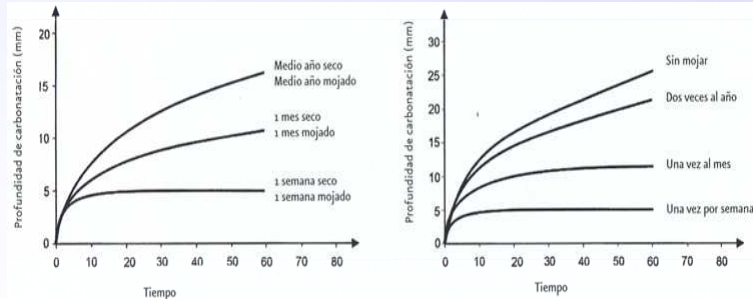


Influencia del ambiente y la composición en la carbonatación del hormigón



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

CARBONATACIÓN

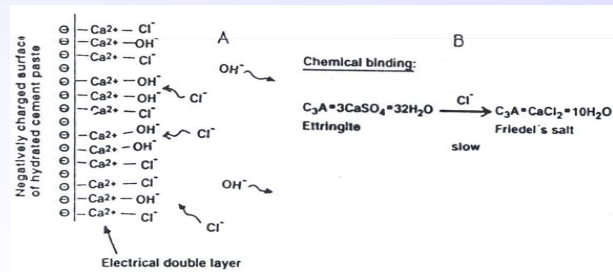


Influencia de los ciclos de mojado y secado en la carbonatación del hormigón



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

CLORUROS

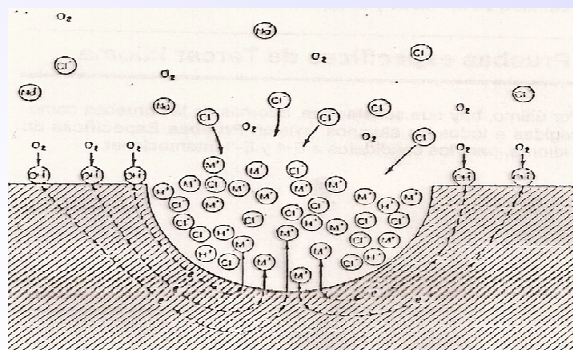


- (A): Iones cloruro compiten con los iones hidroxilo por adsorberse físicamente en la superficie positivamente cargada de las paredes de los poros, dominadas por silicatos de calcio hidratados.
- (B): Iones cloruro forman enlace químico por conversión lenta de la etringita en la sal de Friedel.



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

CLOURUROS



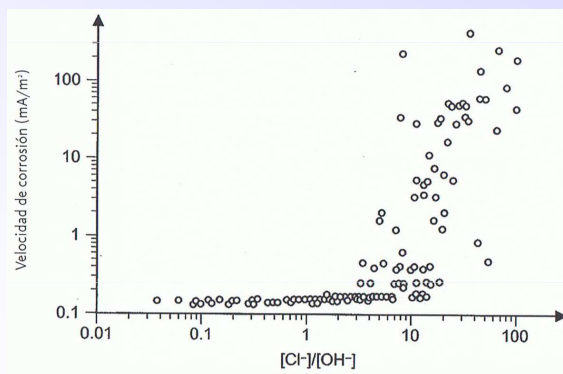
$v < 2 \mu\text{m/año}$
despreciable

ATAQUE POR PICADURAS



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

CLOURUROS

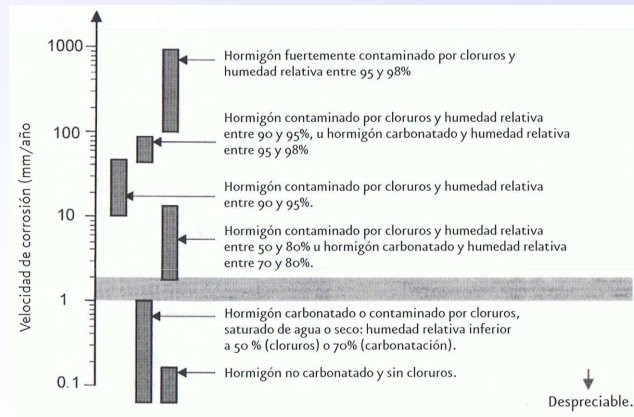


RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE
CORROSIÓN Y LA RELACIÓN CL-/OH



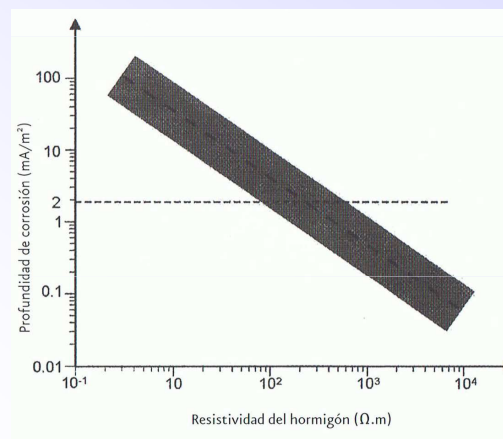
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS



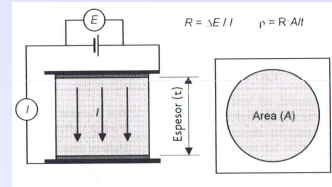
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

CLORUROS



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

CLOURUROS

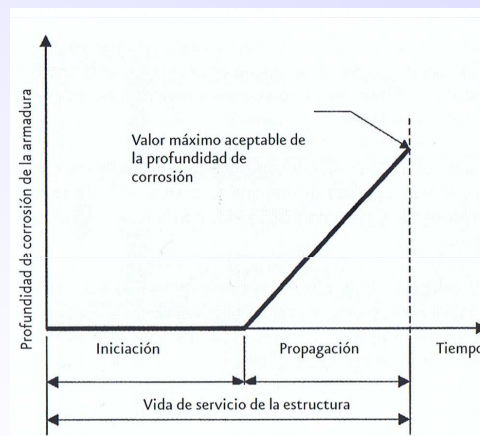


| Ambiente | Cemento Pórtland común (CEM I) | Cemento de escorias CEM III/B (>65% cenizas) o cemento con cenizas volantes CEM II/B-V (>25%) o con humo de sílice (>5%) |
|---|--------------------------------|--|
| Sumergido o mojado, zona de salpicaduras | 50 - 200 | 300 - 1000 |
| Exterior expuesto | 100 - 400 | 500 - 2000 |
| Exterior protegido y no carbonatado (20°C, H ₂ =80%) | 200 - 500 | 1000 - 4000 |
| Idem carbonatado | > 1000 | 2000 - > 6000 |
| Interior carbonatado (20°C, H ₂ =50%) | > 3000 | 4000 - >10000 |



VIDA ÚTIL

Modelo de Tutti para representar las fases de iniciación y progreso de la corrosión



VIDA ÚTIL

Se entiende por Estado Límite de durabilidad el fallo producido al no alcanzarse la vida útil de proyecto de la estructura, como consecuencia de que los procesos de degradación del hormigón o de las armaduras alcancen el grado suficiente como para que impidan que la estructura se comporte de acuerdo a las hipótesis con las que ha sido proyectada.

$$t_L > t_D$$

t_L : valor estimado de vida útil
 t_D : valor calculado de vida útil

$$t_D = \gamma_t \cdot t_g$$

γ_t : coeficiente de seguridad
 t_g : vida útil de proyecto



VIDA ÚTIL

PERÍODO DE INICIACIÓN

$$t_L = t_i + t_p$$

Estimación de t_i en función del proceso de degradación

Carbonatación

$$t_i = \left(\frac{d}{K_c} \right)^2$$

$$K_c = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a \cdot f_{cm}^b$$

Cloruros

$$t_i = \left(\frac{d}{K_{Cl}} \right)^2$$

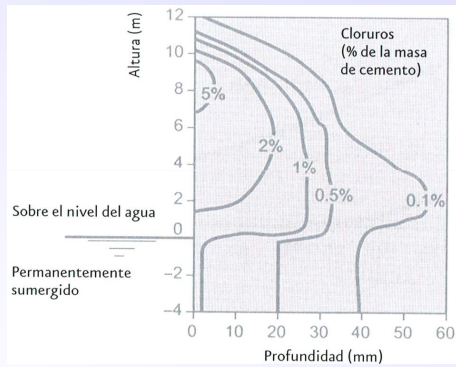
$$K_{Cl} = \alpha \sqrt{12 \cdot D(t)} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_i}{C_s - C_i}} \right)$$



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

EFECTOS DEL ATAQUE POR AGUA DE MAR

| | |
|----------------------|----------------------|
| Zona aérea | Aire |
| Zona de salpicaduras | Máximo nivel del mar |
| Zona de marea | Nivel medio del mar |
| | Nivel mínimo del mar |
| Zona sumergida | Agua del mar |

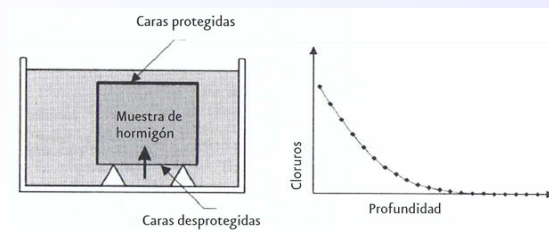
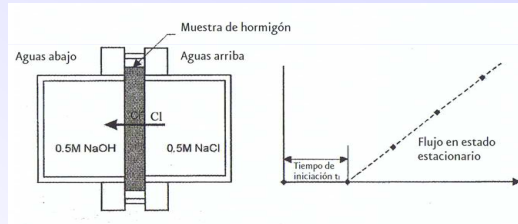


VIDA ÚTIL

PERÍODO DE INICIACIÓN

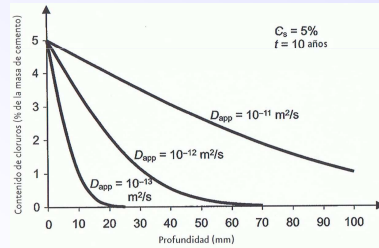
$$D(t) = D(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$$

El coeficiente de difusión
varía con el tiempo



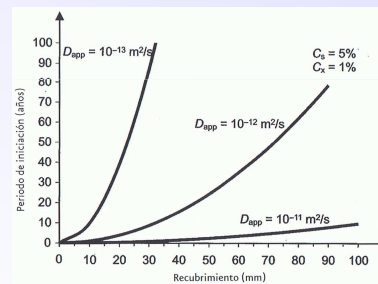
VIDA ÚTIL

PERÍODO DE INICIACIÓN



Tiempo de iniciación para distintos recubrimientos

Perfiles de cloruros para distintos coeficientes de difusión después de 10 años de exposición



VIDA ÚTIL

PERÍODO DE PROPAGACIÓN

La etapa de propagación se considera concluida cuando se produce una pérdida de sección inadmisibles de la armadura o cuando aparecen fisuras en el recubrimiento de hormigón.

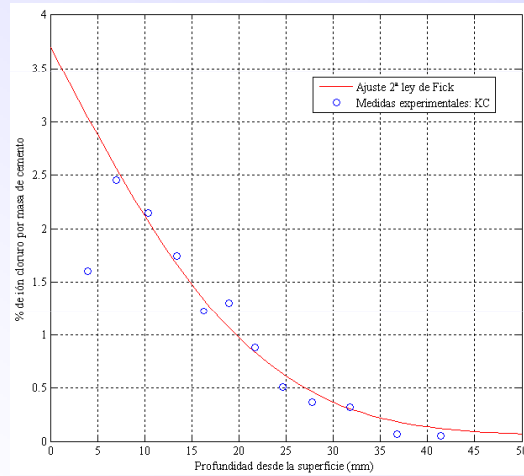
$$t_p = \frac{80 \cdot d}{\phi \cdot v_{corr}}$$

$$t_L = t_i + t_p = \left(\frac{d}{K} \right)^2 + \frac{80 \cdot d}{\phi \cdot v_{corr}}$$



VIDA ÚTIL

Perfil de cloruros



VIDA ÚTIL

Proyección de vida útil

