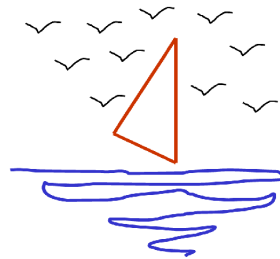


Presentaciones adaptadas al texto del libro:
“Temas de química (II) para alumnos de ITOP e ICCP”

Tema 18.-

Durabilidad del Hormigón en Ambiente Marino



ROCÍO LAPUENTE ARAGÓ
Departamento de Ingeniería de la Construcción
 UNIVERSIDAD DE ALICANTE





1. Importancia del problema y multiplicidad de factores agresivos

El problema es de importancia puesto que las obras expuestas a ambientes marinos, tanto las obras en el mar como las obras construidas sobre una banda litoral que se ven alcanzadas por el rocío del mar, van siendo más y más numerosas.



COMPONENTES AGRESIVOS EN UN MEDIO MARINO

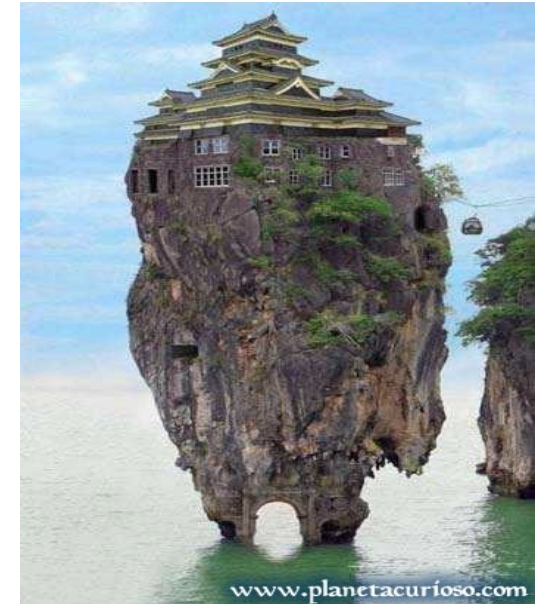
1- Factores químicos:

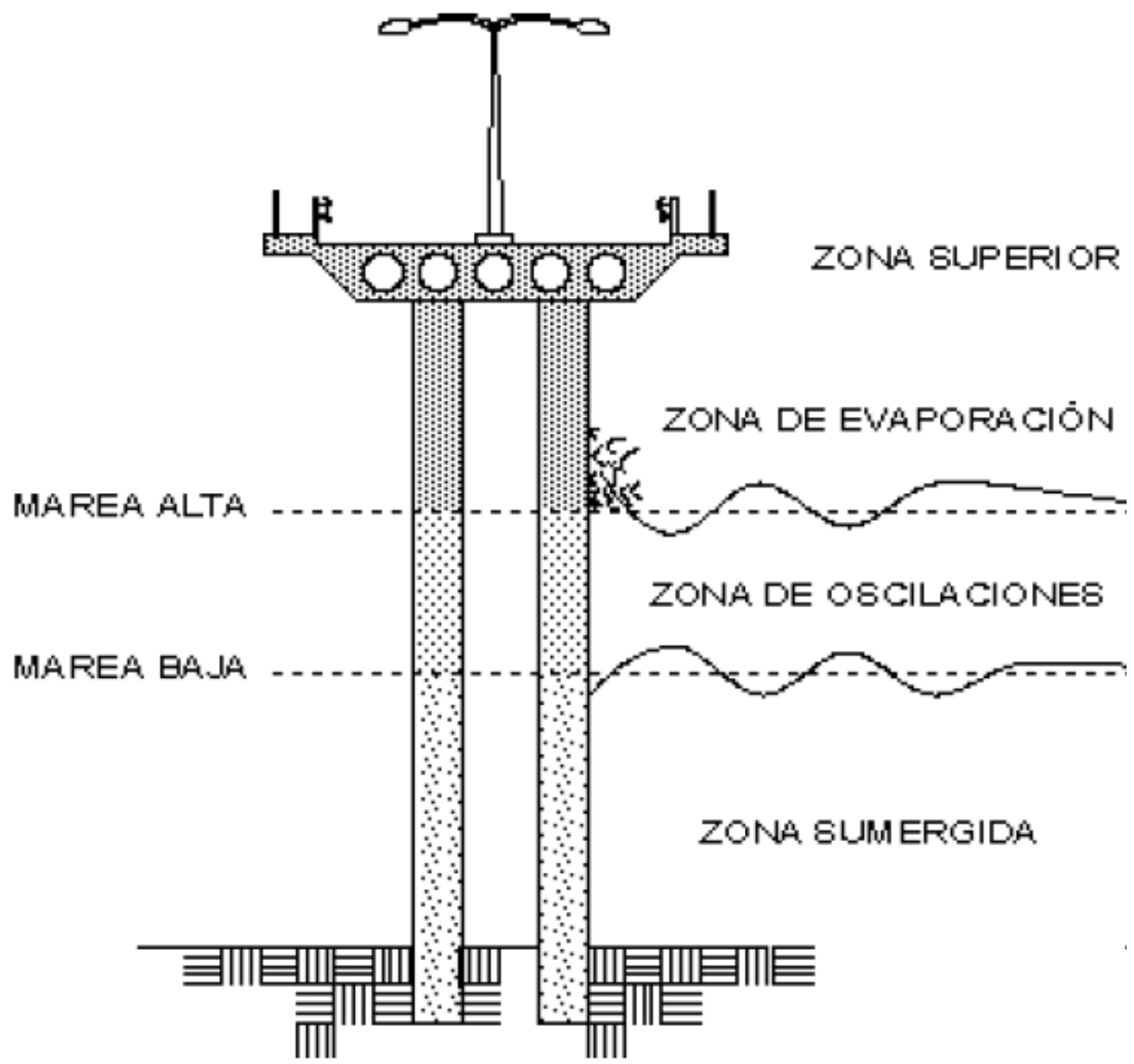
iones variados presentes en el agua de mar

DONDE LOS EFECTOS NO SON FORZOSAMENTE ACUMULATIVOS

2-Factores calificados de "geométricos":

las fluctuaciones del nivel del mar (mareas, tempestades, ...)





3.- Factores físicos:

La Temperatura:

En climas muy fríos, se pueden producir fenómenos hielo-deshielo.

En climas calurosos, la temperatura es un parámetro de activación de las reacciones de deterioro.

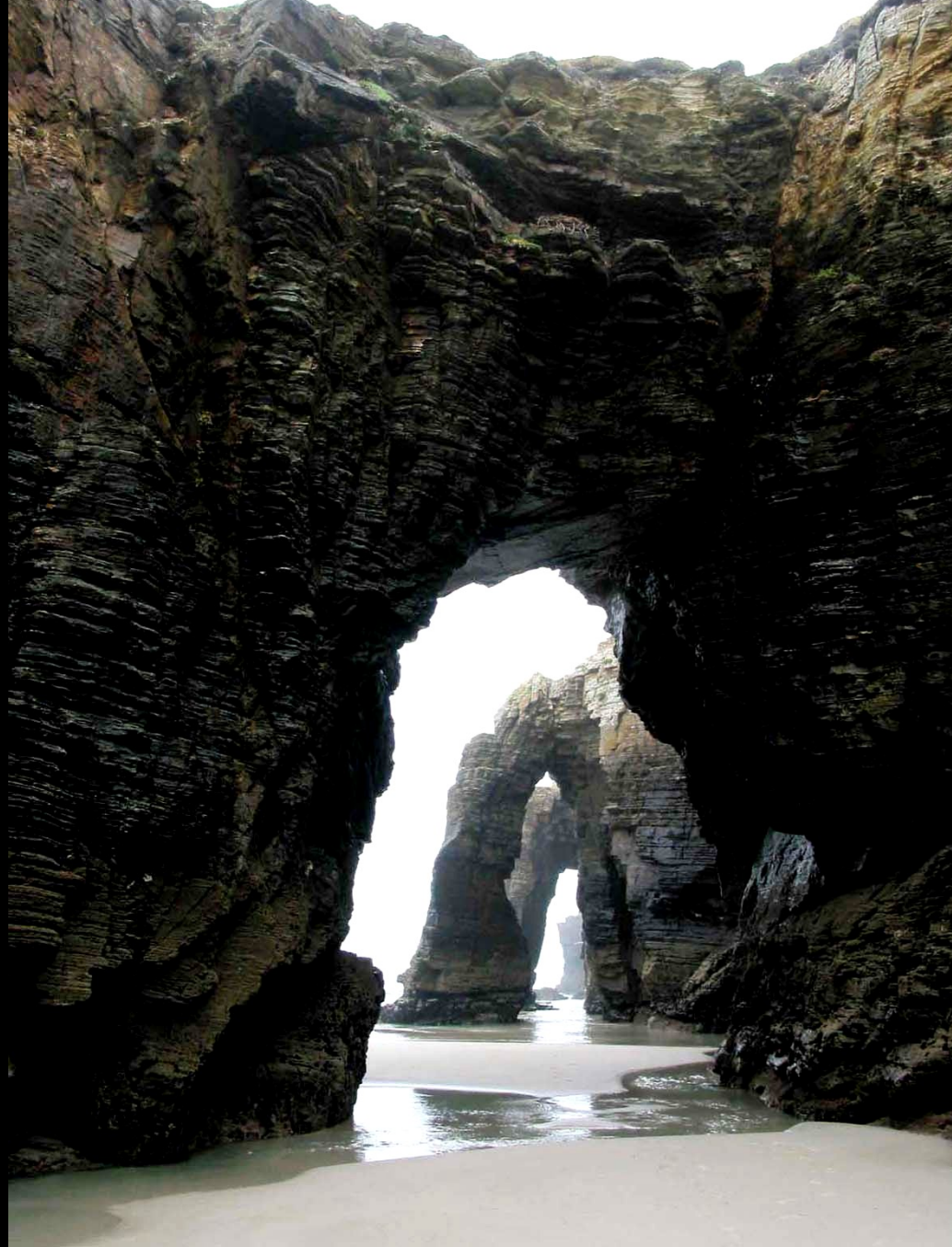
4.- Factores mecánicos:

Los choques de las olas y de los materiales sólidos que transportan, de bloques de hielo flotantes,

son causa de erosión y de fisuración de hormigones

que favorecen ataques químicos ulteriores.





En definitiva

el agua de mar podría ser considerada como bastante poco agresiva respecto de los hormigones

pero el ambiente marino, por si mismo,

resulta fuertemente agresivo.



2. Datos de la observación y de la experiencia

Se deben fundamentalmente al ambiente marino y a su composición.

La tabla reproduce los datos de l'ARBEM (1) indica entre que limites varia la salinidad total de los grandes lagos, mares y océanos y detalla a continuación en contenido en iones para una composición correspondiente a una salinidad media.

(1) ARBEM, Recommandations FNTP: prévention des agressions du béton, 1986



Salinidad (g/l)

Mar Báltico	3 a 8
Mar Negro	18,3 a 22,2
Mar Blanco	26,0 a 29,7
Océano Atlántico	33,5 a 37,4
Océano Pacífico	34,5 a 36,9
Océano Índico	35,5 a 36,7
Mar Mediterráneo	38,4 a 41,2
Mar Rojo	50,8 a 58,5
Lago Notario	72
Mar Caspio	126,7 a 185,0
Mar Muerto	192,2 a 260,0
Lago Elton	265



Las observaciones sobre el comportamiento de obras en el mar son extremadamente numerosas:

probetas inmersas en agua de mar



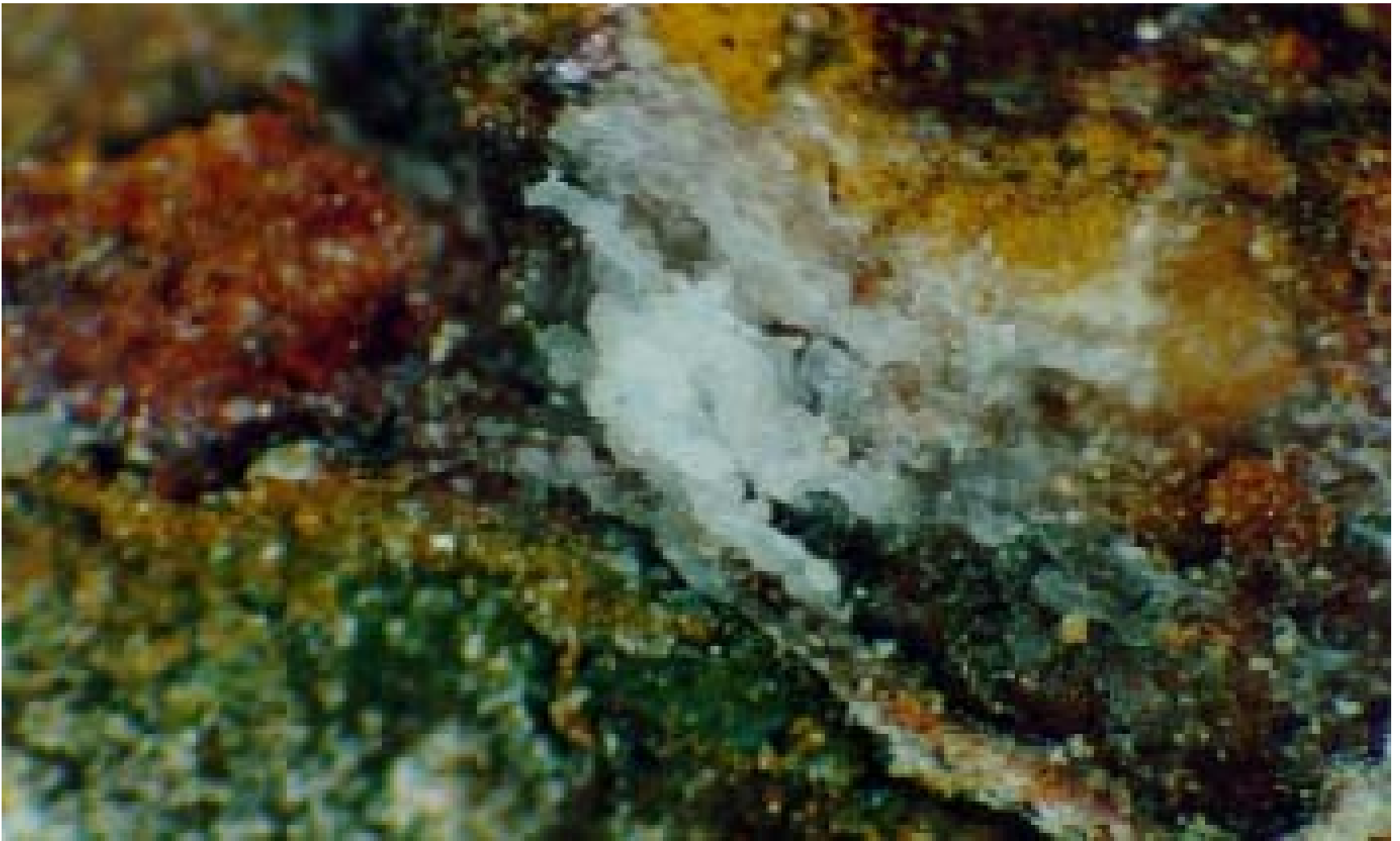
construcciones en el borde del mar



construcciones en pleno mar (plataformas petrolíferas)







Ataque por agua de mar



Conclusiones Esenciales Obtenidas de Diferentes Fuentes

La durabilidad de las construcciones de hormigón sometidas a un ambiente marino puede alcanzar cotas muy elevadas: muchas obras siguen estando en servicio después de cincuenta ó sesenta años.

El Muelle de Zeebrugge (Bélgica)



El Muelle de Zeebrugge (Bélgica) es un caso de longevidad sorprendente

presenta una dosificación en cemento bastante baja (240 a 270 Kg/m³)

Fue construido entre 1895 y 1907

bombardeado durante las guerras de 1914-18 y de 1939-45

ha sido juzgado como apto para el servicio, después de algunas reparaciones menores



Por el contrario, las patologías pueden aparecer muy rápidamente.

En los Países Bajos, en puentes construidos entre 1962 y 1965, se han detectado desde 1979 corrosiones de las armaduras que han necesitado reparaciones.

Los expertos achacan la causa a desperfectos localizados:

espesor del recubrimiento de uno ó dos centímetros en vez de los tres previstos.



© Rijkswaterstaat - Adviesdienst Geo-Informatie en ICT (AGI)



En un cierto número de obras del Golfo Pérsico, la aparición de problemas ha sido aún más rápida

El túnel de Al-Shindaga a necesitado un programa de reparaciones importante, tan sólo cinco años después de su puesta en servicio.



En este caso, se ha podido achacar a la mala calidad de las juntas (no estancas), al empleo de áridos contaminados por cloruros y porosos y a la utilización de cemento de calidad mediocre.



La experiencia europea muestra el papel benéfico que ha supuesto la utilización de cementos con escorias en la resistencia del hormigón al ambiente marino.

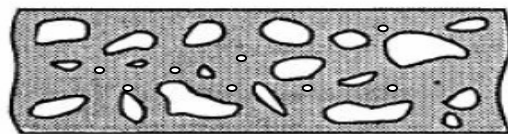
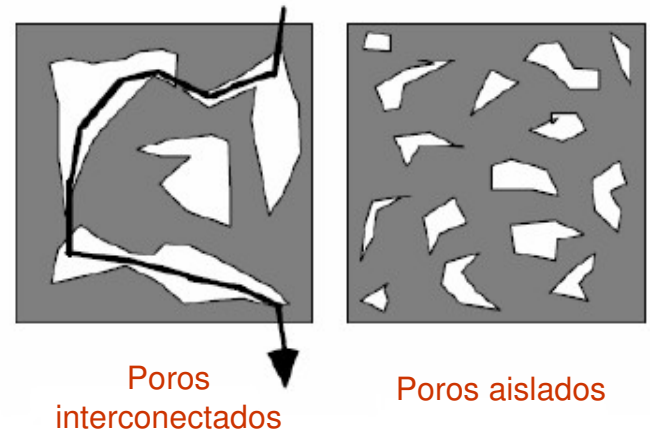




Oresund Bridge Copenhagen-Malmö 16 Km



El parámetro esencial que determina el buen comportamiento de un hormigón es su compacidad y la morfología de sus poros.



Material poroso impermeable

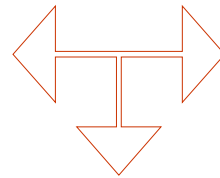


Material poroso permeable



Bloques de hormigón de estaciones experimentales en la Rochelle y en los Angeles

fuertemente dosificados en cemento Portland (600K Kg/m³)



ricos en C₃A
(14,9% en el primer caso, 14% en el segundo)

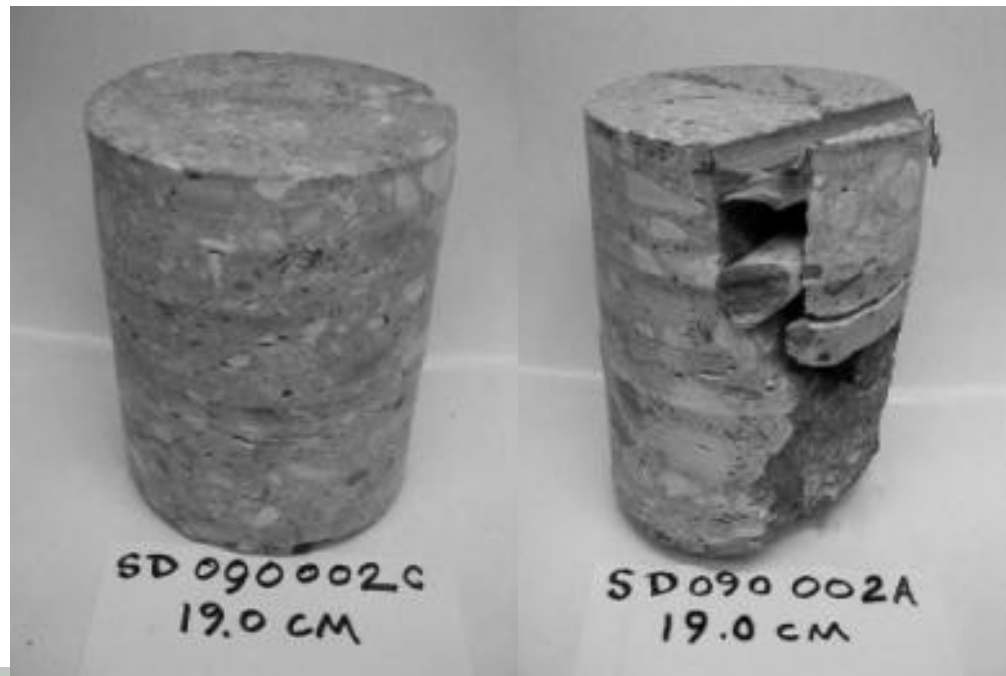
mostraron buena resistencia mecánica



En el mismo tiempo, bloques poco dosificados en cemento tuvieron que ser destruidos, al estar fuertemente deteriorados.



Una gran parte de los estragos detectados en las obras portuarias de países del norte (Dinamarca, Noruega) se explican por la ausencia de adiciones en los hormigones provocando una fisuración por los ciclos de hielo-deshielo y facilitando así la iniciación de la corrosión.



Todas estas observaciones convergen en una misma conclusión:

las estructuras marinas construidas en hormigón son duraderas a condición de haber elegido un cemento adaptado a la normativa actual (EH-91)

suficientemente dosificado

de haber elegido una relación a/c no muy elevada

de haber compactado bien el hormigón

y de haber asegurado una cura suficiente.

Para el hormigón armado, el respeto de los recubrimientos recomendados es un imperativo a fin de evitar la corrosión de las armaduras.



3. Mecanismos de ataque del agua de mar

Los procesos químicos de ataque de los hormigones por el agua de mar resulta de varias reacciones más o menos simultáneas e interdependientes que implicarán diferentes mecanismos:

- disolución-lixiviación
- reacciones de cambio de bases
- precipitación de compuestos insolubles
- cristalización de sales insolubles
- cristalización de sales expansivas.

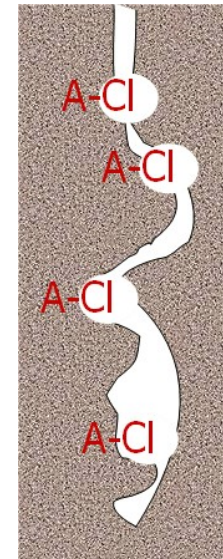
Las principales reacciones puestas en juego pueden descomponerse de la manera siguiente



*Acción de cloruros:

Independientemente de sus efectos nocivos sobre los aceros de los hormigones armados, los cloruros pueden estar en el origen de las alteraciones de los componentes ligantes cuando están en proporciones elevadas

Una parte de los cloruros se fija a los silicatos de calcio hidratado, otra se combina al C_3A bajo la forma de monocloroaluminato de calcio

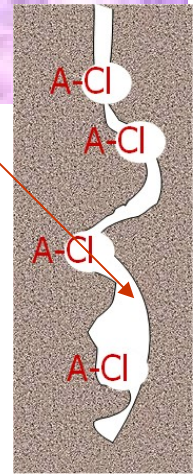
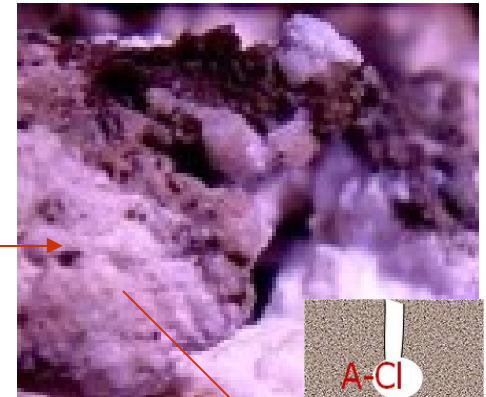


El cloruro de magnesio reacciona igualmente con la portlandita según la reacción siguiente de intercambio:



La brucita es insoluble y se deposita sobre la superficie del hormigón,

mientras que el cloruro de calcio reacciona con los aluminatos para formar el monocloroaluminato.



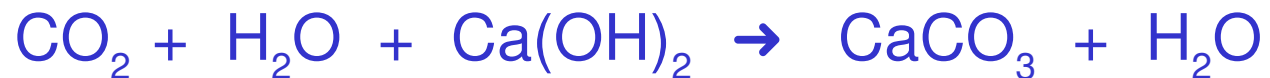
* Acción del sulfato de magnesio

Las reacciones siguientes, conducen a la formación de la ettringita expansiva y a la sustitución de iones Ca^{+2} por iones Mg^{+2} , sea en el C-S-H, sea en la portlandita (formación de brucita).

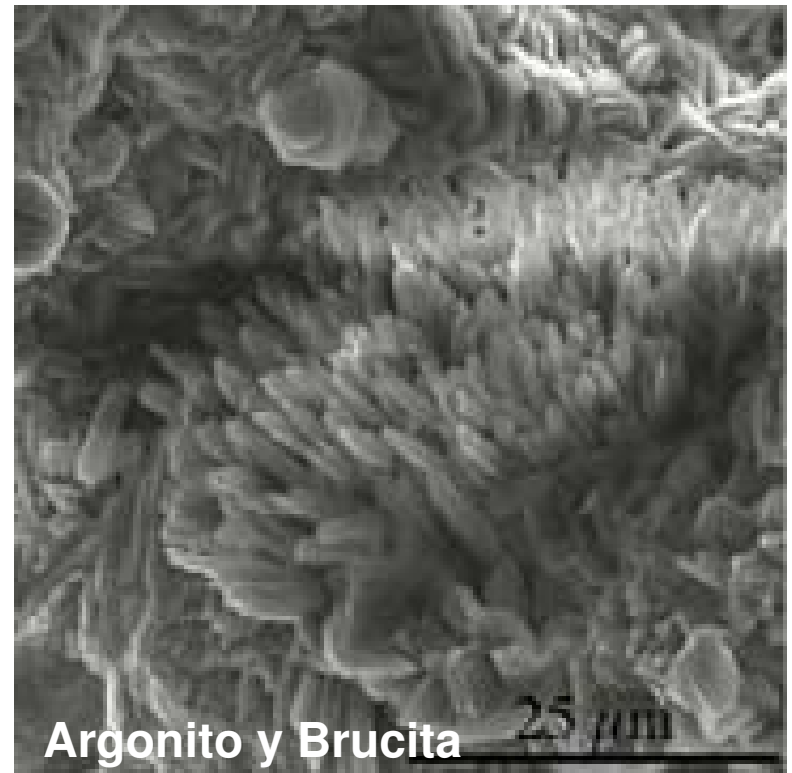


*Acción del dióxido de carbono

Reacciona con la portlandita según la reacción:

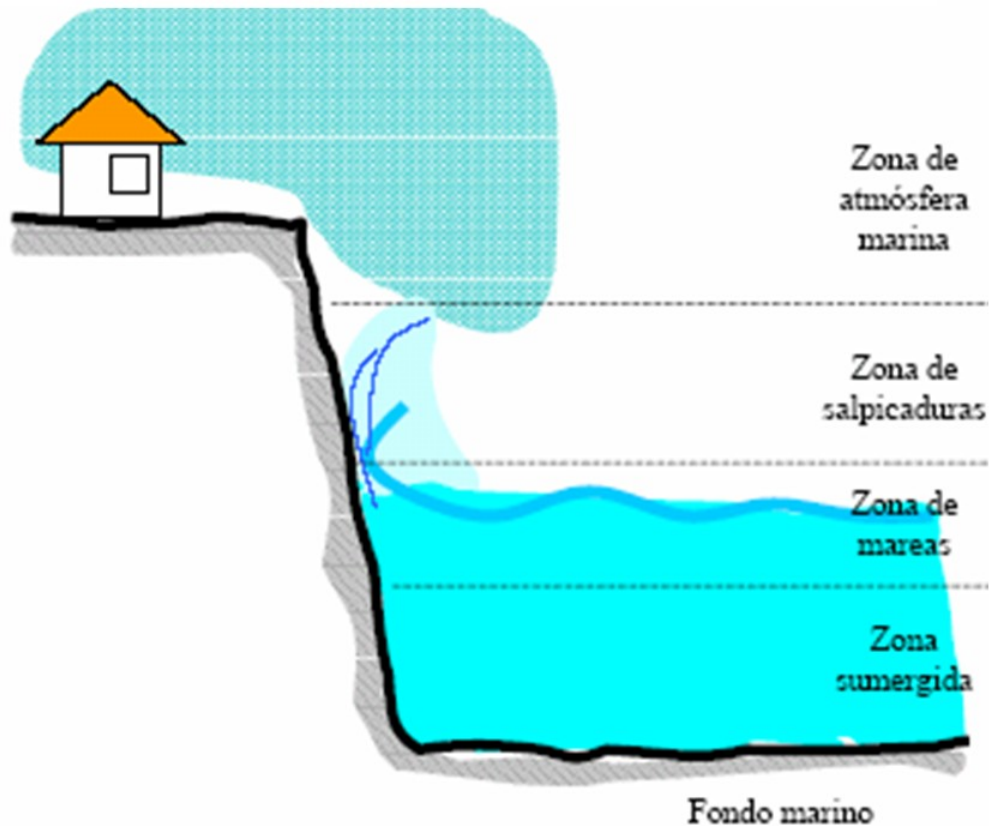


El carbonato de calcio precipita en la superficie del hormigón bajo la forma de aragonito y calcita colmatando los poros.



*Acción simultánea de diferentes iones

Para los hormigones sumergidos, Moskvín y col. han propuesto el siguiente esquema de zonas de ataque por el agua de mar



Presentan localizaciones preferenciales de diferentes ataques iónicos

Estas zonas no son fijas y, con el tiempo, progresan hacia el interior del hormigón.



Las acciones de cada uno de los iones no son acumulativas

El
monocloroaluminato
de calcio

inestable en presencia
de sulfatos

la ettringita

Recordamos el ataque
por sulfatos

La ettringita

en presencia de
sílice disuelta
y de carbonatos

thaumasita:
 $\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$

La interferencia de los diferentes iones explica que la agresividad del agua de mar sea inferior a la que muestran las aguas sulfatadas.



Pero hay diferencias sobre las explicaciones a tener en cuenta

Según Mehta (3)




los iones OH^- son sustituidos por los iones Cl^-

reduce la alcalinidad de la disolución intersticial
y no se forma la ettringita expansiva a partir de la disolución



La presencia de cloruros reduce la agresividad

Los cloruros aumentan la
solubilidad del yeso y de la
ettringita



la ettringita cristaliza, al
menos parcialmente, bajo
una forma no expansiva a
partir de la disolución



Los cloruros penetran
rápidamente en el hormigón

(debido a su coeficiente de
difusión relativamente elevado)



y consumen una parte de
aluminatos



monocloroaluminato

no expansivo

Pero, los cloroaluminatos,
(inestables en presencia de sulfatos)



tienden a transformarse en
ettringita expansiva

(puede ser lixiviada por el agua de mar)



Para otros investigadores la explicación es diferente

Locher atribuye la agresividad relativamente débil del agua de mar a la acción del dióxido de carbono

El CO_2 induce a la formación de una capa protectora densa de carbonato de calcio en la superficie del hormigón.

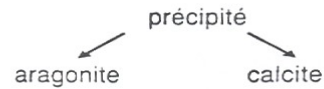
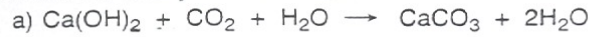


Otros autores también demuestran el efecto positivo de la carbonatación sobre la estabilidad de los hormigones en agua de mar

La tabla 2, debida a Regourd (6), resume los diferentes procesos de ataque y los efectos resultantes sobre la composición del hormigón



1) Action du dioxyde de carbone



PROTECTION

2) Action des sulfates

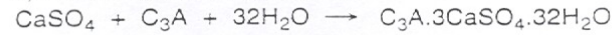


LIXIVIATION

EXPANSION

PROTECTION

c) Action du gypse secondaire

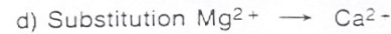


ettringite

EXPANSION

gypse = yeso

3) Action des chlorures



soluble
LIXIVIATION

précipité
PROTECTION

e) Action de CaCl_2



chloroaluminate

EXPANSION

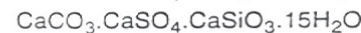
↑ SO_3



ettringite

EXPANSION

↑ $\text{CO}_2 + \text{SiO}_2$

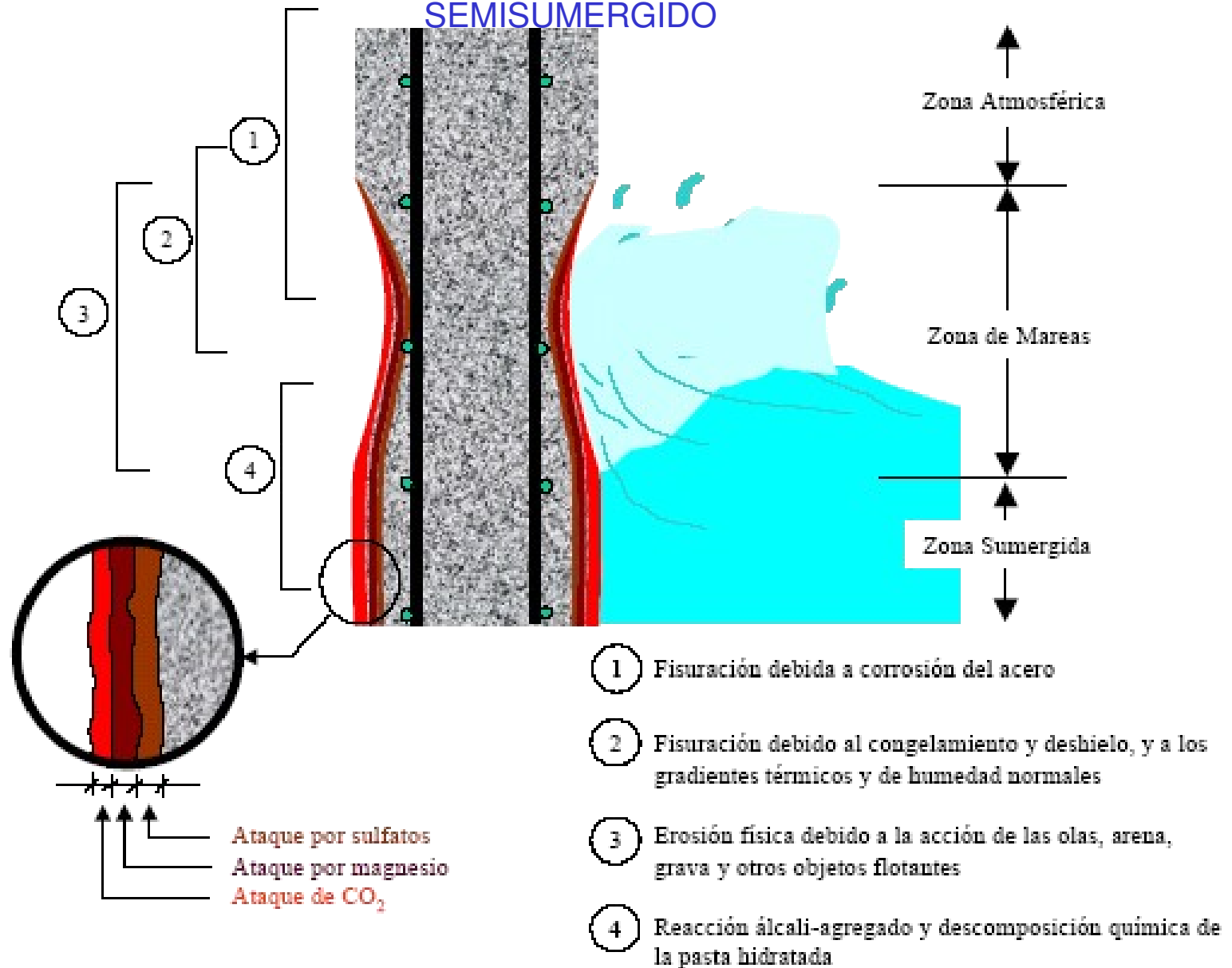


thaumasite

EXPANSION

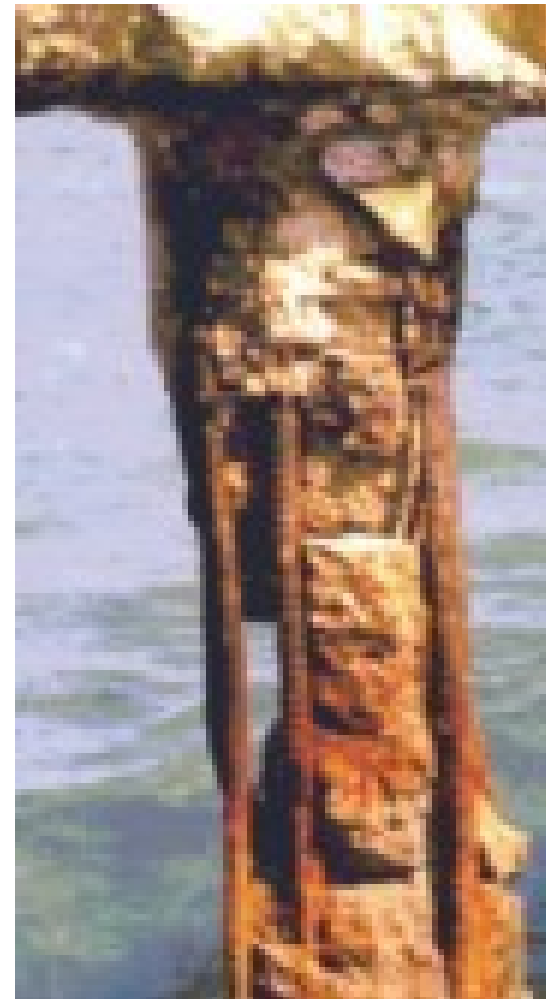


ESQUEMA DEL ATAQUE TÍPICO DEL AGUA DE MAR SOBRE UN PILAR SEMISUMERGIDO





Estructura de hormigón armado expuesta al contacto con el agua salada



Un pilote sostén afectado seriamente por el proceso corrosivo.



Conclusión

el ataque del hormigón por el agua de mar implica

fenómenos de
disolución de la
portlandita

formación de sales

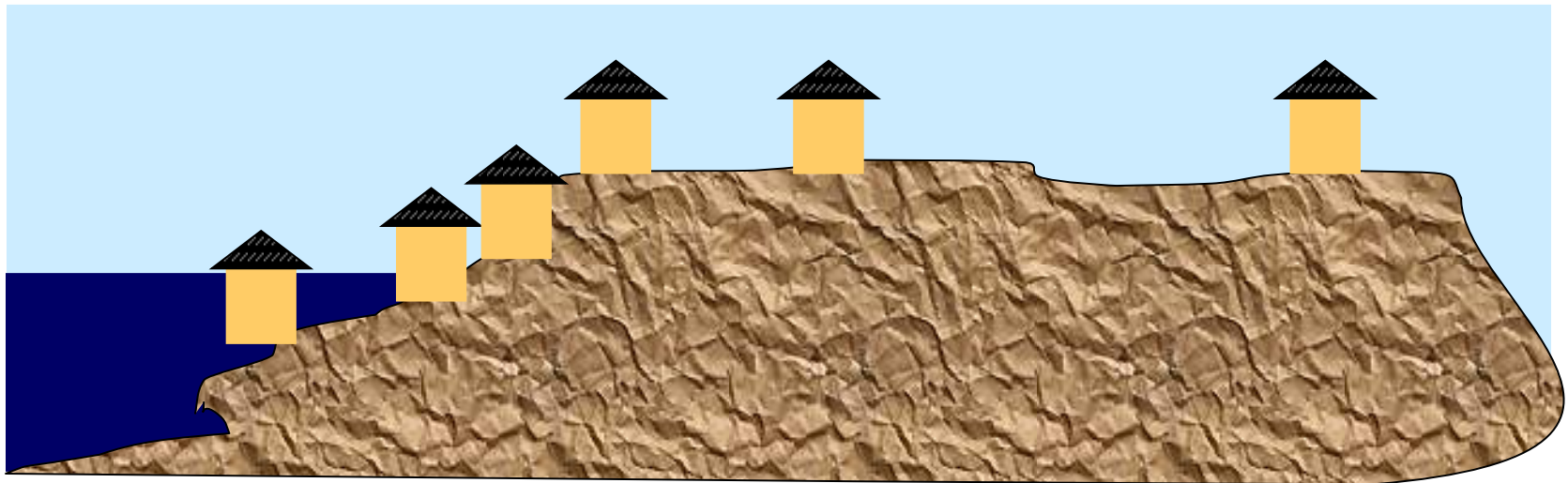
protectoras
(aragonito, brucita)

nocivas
(yeso, ettringita,
thaumasita).



4. Parámetros que condicionan la durabilidad de los hormigones en un medio marino

La situación de la obra en relación al medio marino determina directamente el riesgo de deterioro incurrido por el hormigón.



Según el esquema propuesto por Mehta (3), se pueden descubrir varias zonas de degradación posibles.

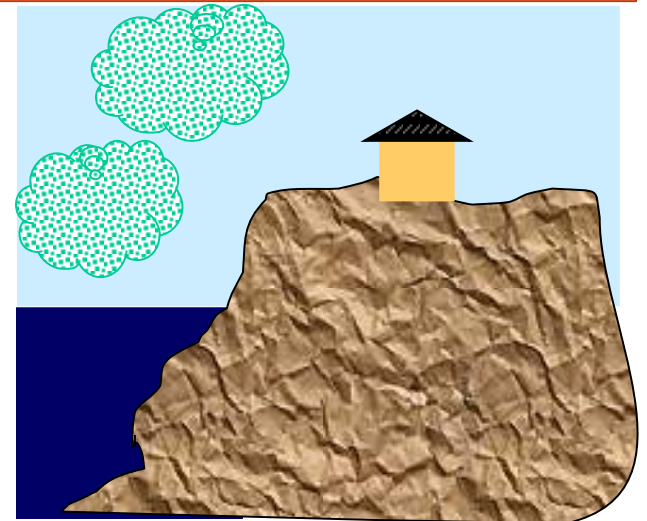


1.- Zona de rocío marino:

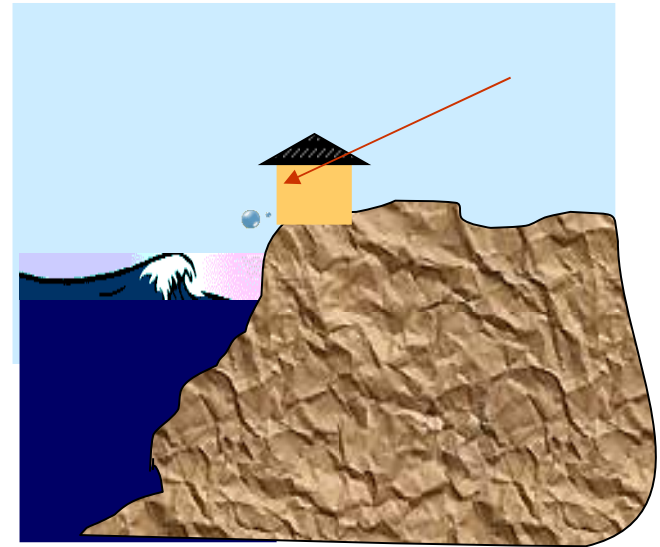
El hormigón no está en contacto directo con el medio líquido.

La obra está sometida al rocío y a la niebla marina que pueden transportar sales (cloruros) a distancias importantes según cual sea la configuración del terreno y los vientos dominantes.

Los riesgos de degradación decrecen con la distancia a la costa.



2.- Zona de aspersión :
está situada por encima del nivel del mar , durante la marea alta.



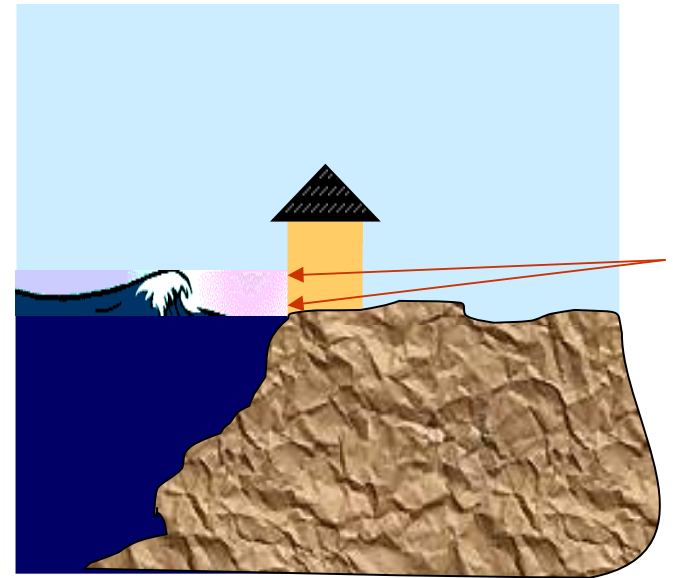
El hormigón está entonces sometido a las salpicaduras provocadas por las olas hasta una altura variable según el estado del mar o del océano.



3.- Zona de exposición entre mareas:

El intervalo de alturas determinadas por los niveles de agua durante la marea alta y baja respectivamente.

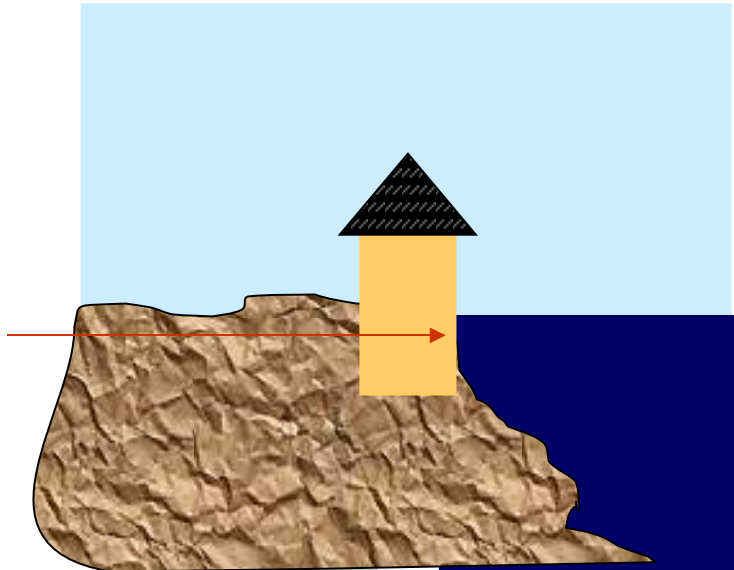
Las diferentes partes de las construcciones en esta zona están alternativamente inmersas o emergidas.



4.- Zona de inmersión:

Se sitúa por debajo del nivel del mar durante la marea baja.

El hormigón se encuentra continuamente sumergido.



La experiencia

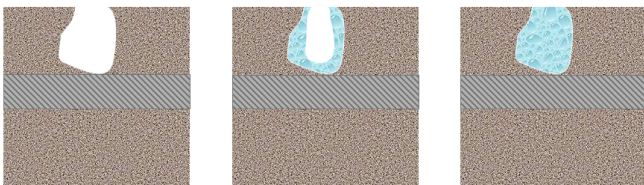
los riesgos más grandes de deterioro para el hormigón se sitúa en la zona entre mareas

se yuxtaponen los efectos físicos, mecánicos y químicos

Para el hormigón armado

los peligros de corrosión de las armaduras son mayores en la zona de aspersion

donde el oxígeno se puede difundir en un medio no saturado.



Influencia que la temperatura ejerce sobre la velocidad de degradación del hormigón en un medio marino

En mares calientes

deterioro catastrófico del hormigón de ciertas obras

Medio Oriente

En el mar del Norte

excelente resistencia a la degradación

plataformas petrolíferas

la temperatura media del aire y el agua

$\sim 40^{\circ}\text{C}$

$\leq 10^{\circ}\text{C}$



De una forma general, la temperatura es un parámetro importante en la activación de las reacciones químicas.

Una temperatura elevada juega un doble papel:

-interviene en el proceso de curado del hormigón



evitar fisuras de retracción

-acelera la cinética de las reacciones químicas de degradación.

Independientemente de la exposición de la obra al medio marino,

la formulación-dosificación,

resulta decisiva en su resistencia al agua de mar.



Los factores que influyen sobre la resistencia de los hormigones

al agua de mar

al ataque de sulfatos en las agua subterráneas

son de la misma naturaleza

el proceso de degradación está limitado por la acción inhibidora de los cloruros



Composición del cemento,
y particularmente (%C₃A)

es menos determinante que
la compacidad del hormigón

los hormigones densos realizados con cemento Portland están en buen estado después de más de sesenta años en el Pacífico.

La buena influencia de la adición de escoria está confirmada en agua de mar.

Todos los cimientos que contienen más del 60% de escoria resisten muy bien al agua de mar.

El excelente comportamiento de los hormigones con una elevada tasa de escorias está contrastada de forma general.



En definitiva deben tenerse en cuenta las siguientes conclusiones:

1) El agua de mar es un medio notablemente agresivo.



2) La degradación es variable según el grado de inmersión:

- en inmersión total, el ataque químico es moderado para hormigones poco porosos.

- en inmersión alterna o de semi-inmersión, las diferentes acciones físicas (erosión por la olas y la arena, absorción y evaporación repetitivas del agua, cristalización expansiva de las sales, fisuración debida a la corrosión de las armaduras) se conjugan con los ataques químicos para agravar las condiciones de exposición.

Las obras más vulnerables se encuentran tanto en climas fríos, donde el hormigón esta sometido a ciclos de hielo y deshielo, como en las regiones calientes donde el efecto térmico acelera la velocidad de degradación.



3) Las adiciones minerales, y más particularmente las escorias en proporciones elevadas (superiores al 60%), mejora fuertemente la resistencia del hormigón al agua de mar en inmersión completa.

