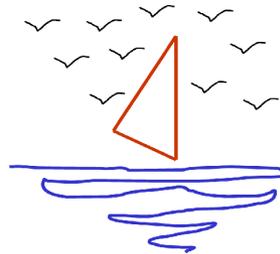


Presentaciones adaptadas al texto del libro:
“Temas de química (II) para alumnos de ITOP e ICCP”

Tema 14:

Durabilidad y Protección de las Armaduras



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



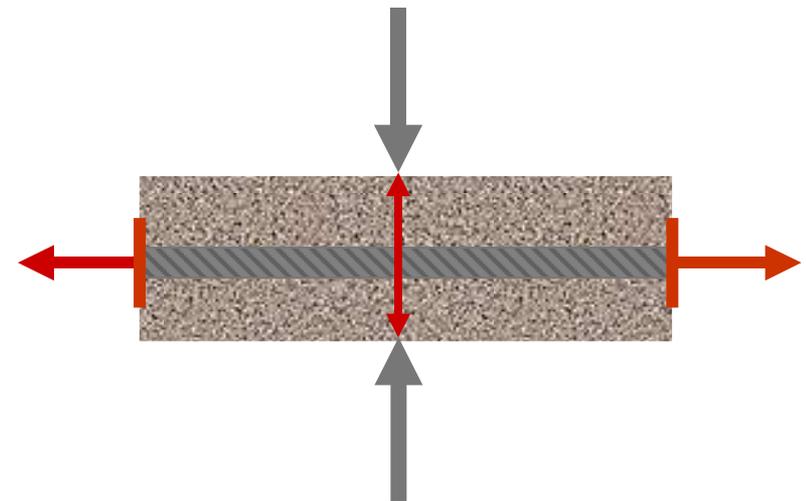
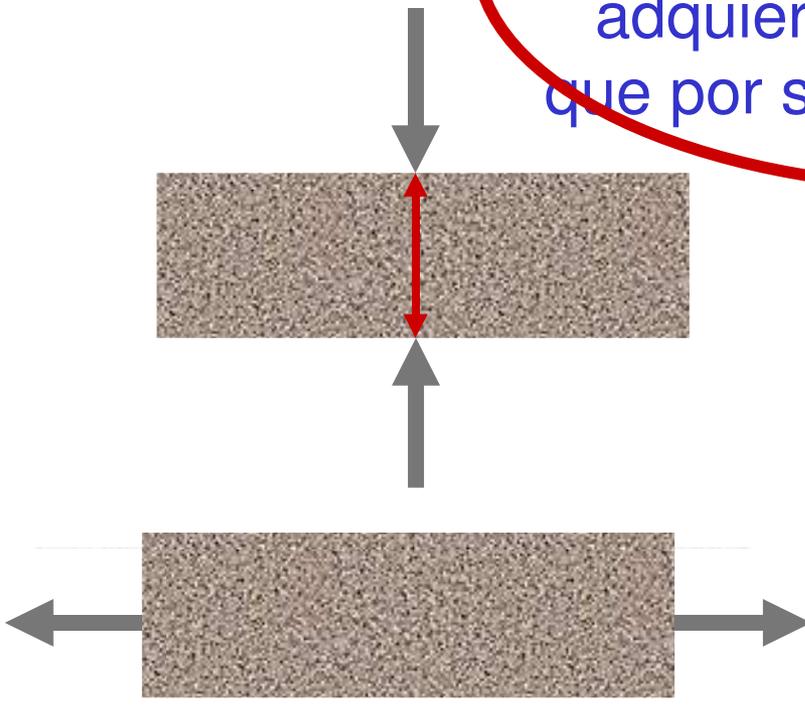
El hormigón armado es el material de construcción más utilizado debido a sus excelentes propiedades

- aún a las ventajas del hormigón y del acero
- complementa ambos mutuamente
- material de construcción muy económico

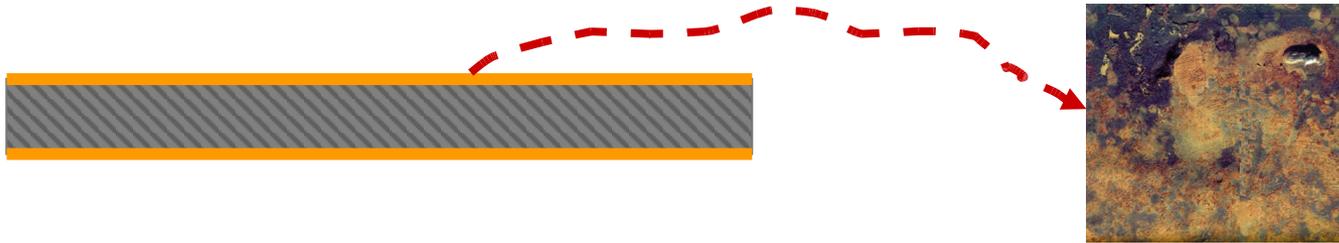
El hormigón posee una elevada resistencia mecánica a la compresión pero baja resistencia a la tracción

El acero posee una elevada resistencia mecánica a la tracción

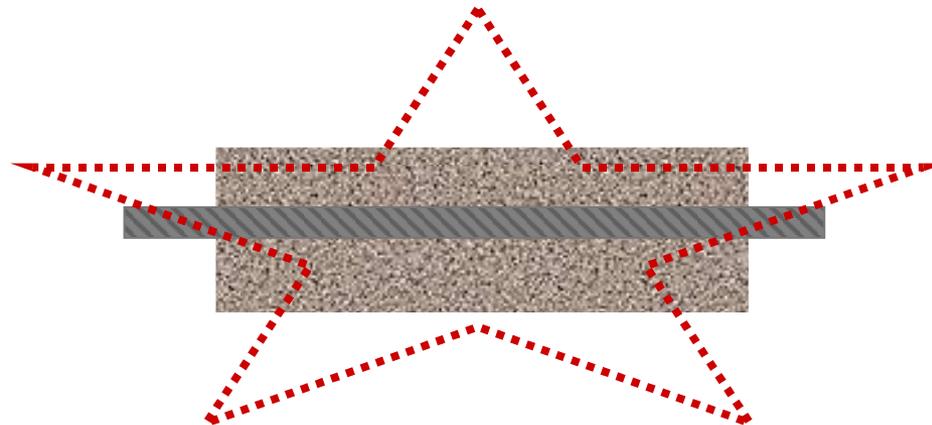
material compuesto adquiere las propiedades que por separado no poseen



el acero presenta el problema de su fácil corrosión cuando se encuentra expuesto a un ambiente agresivo



el hormigón sitúa a la armadura de acero en un medio que la protege contra la corrosión de forma natural



1. Interacción acero – hormigón



La protección contra la corrosión que ejerce el hormigón sobre el acero es doble

de tipo químico

es fuertemente alcalina
(pH entre 12 y 14)
situa al acero en una
zona de pasividad en su
diagrama potencial – pH
o de Pourbaix.

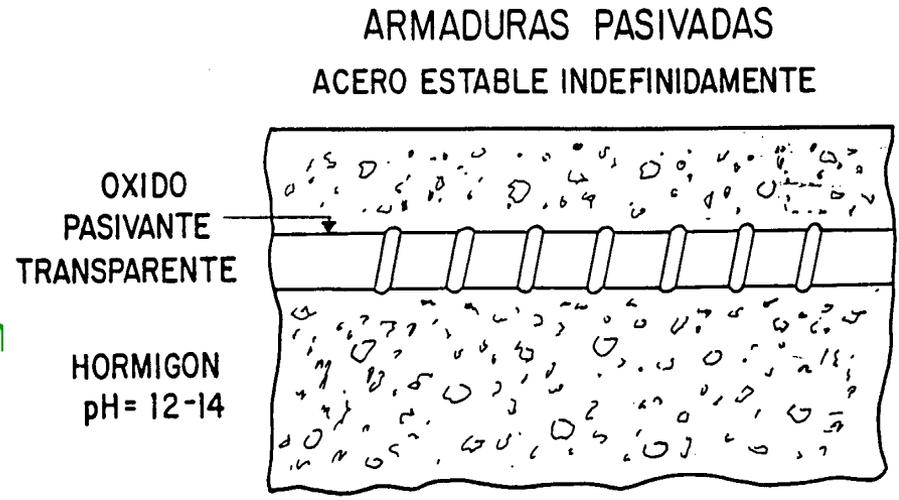
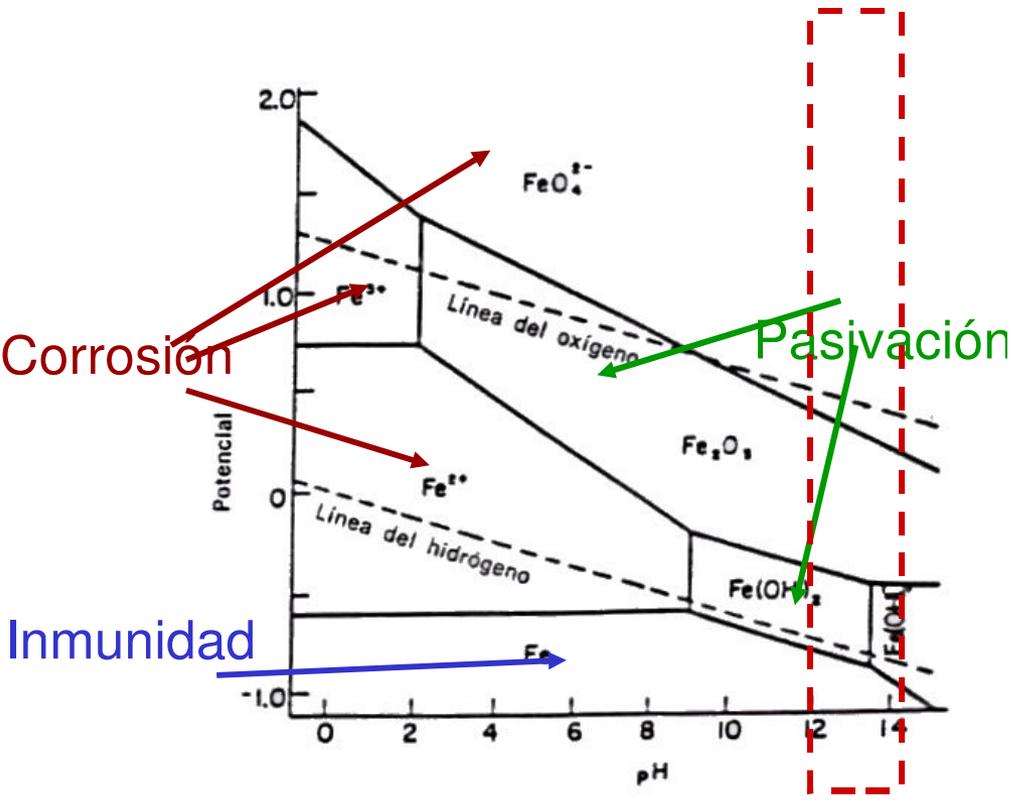
de tipo físico

las armaduras están
inmersas en el hormigón
a una profundidad de
varios centímetros

barrera física las
sustancias procedentes
del exterior

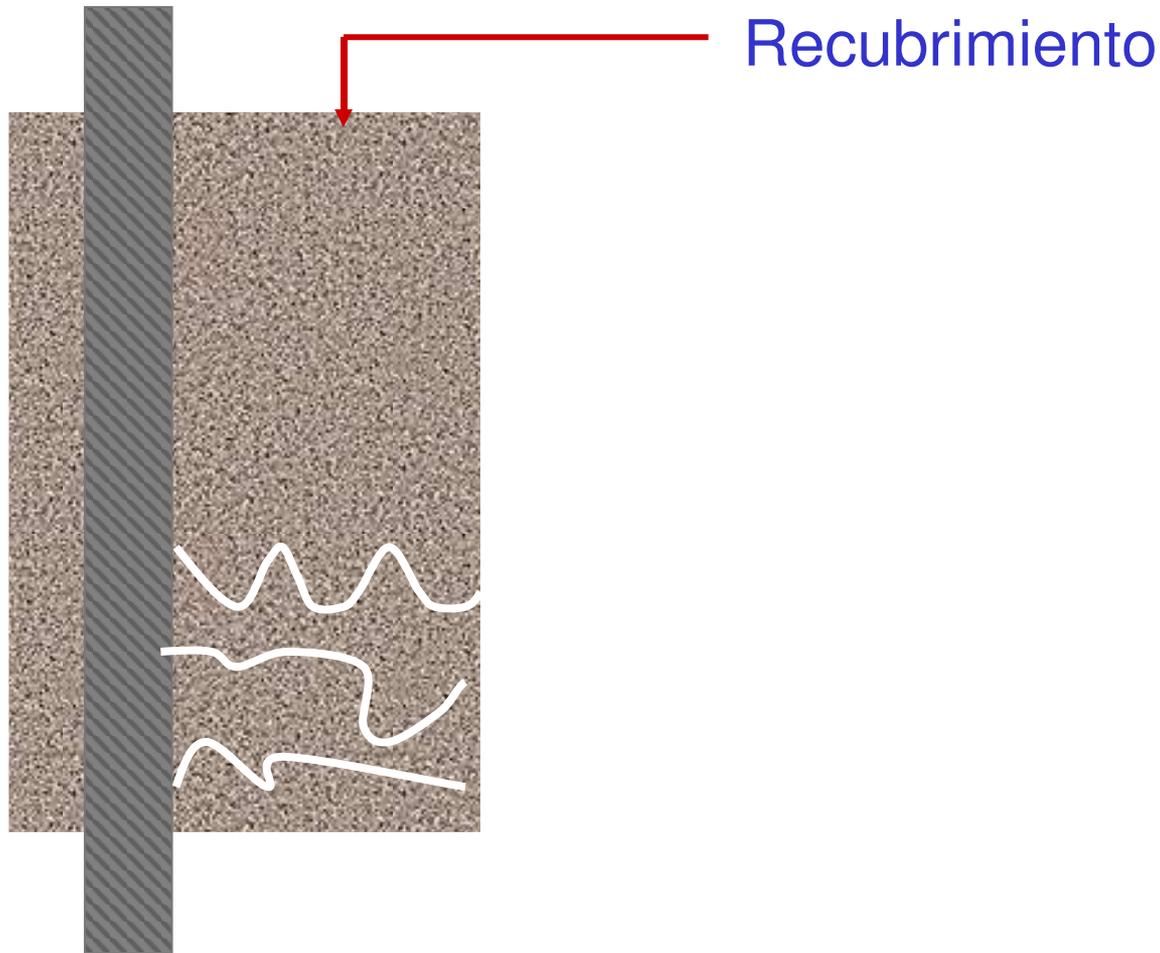


La protección de tipo químico



Estado natural de la armadura en el hormigón

La protección física frente a la corrosión

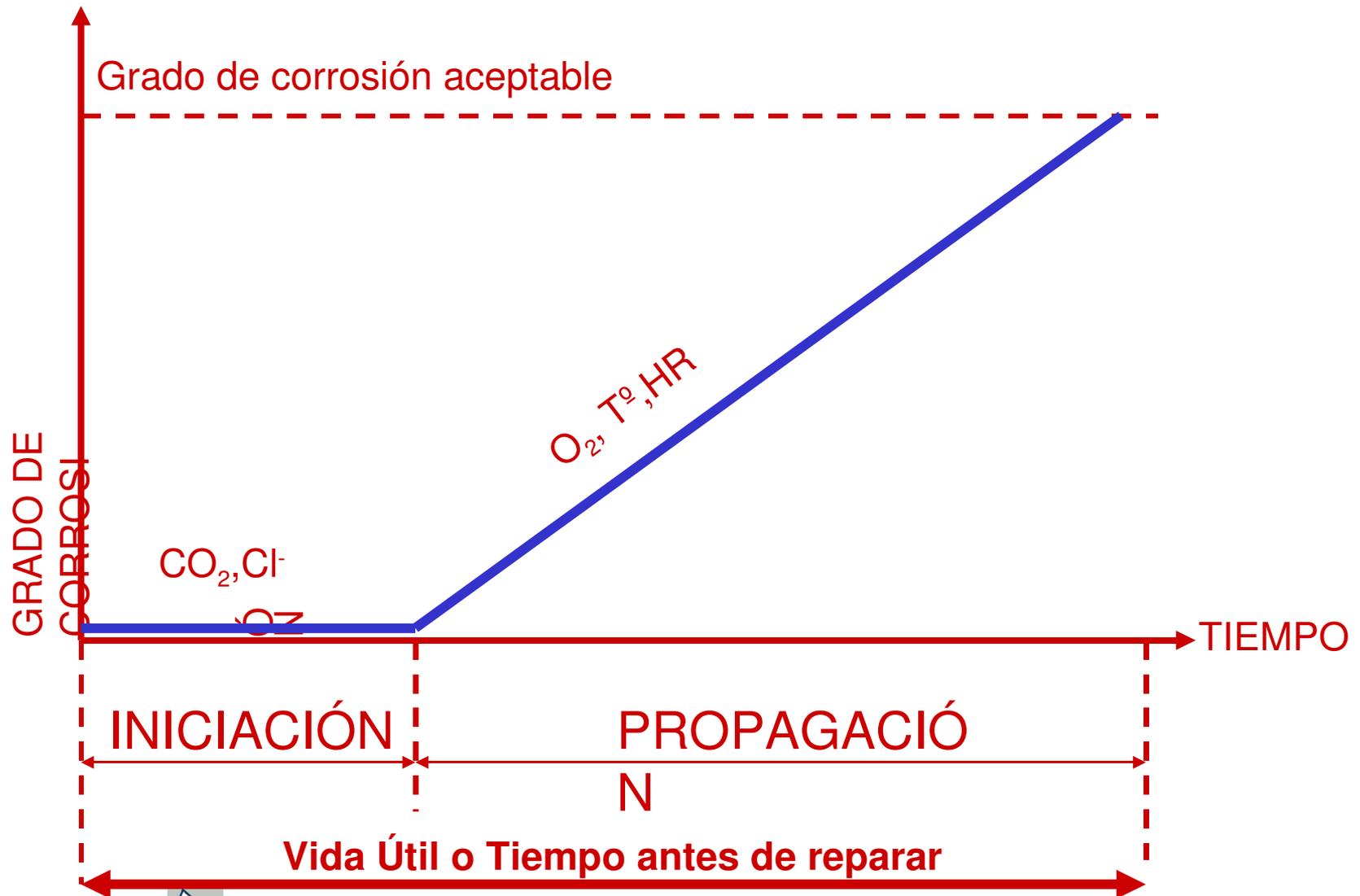


¡Cuidado
con el
agresivo!

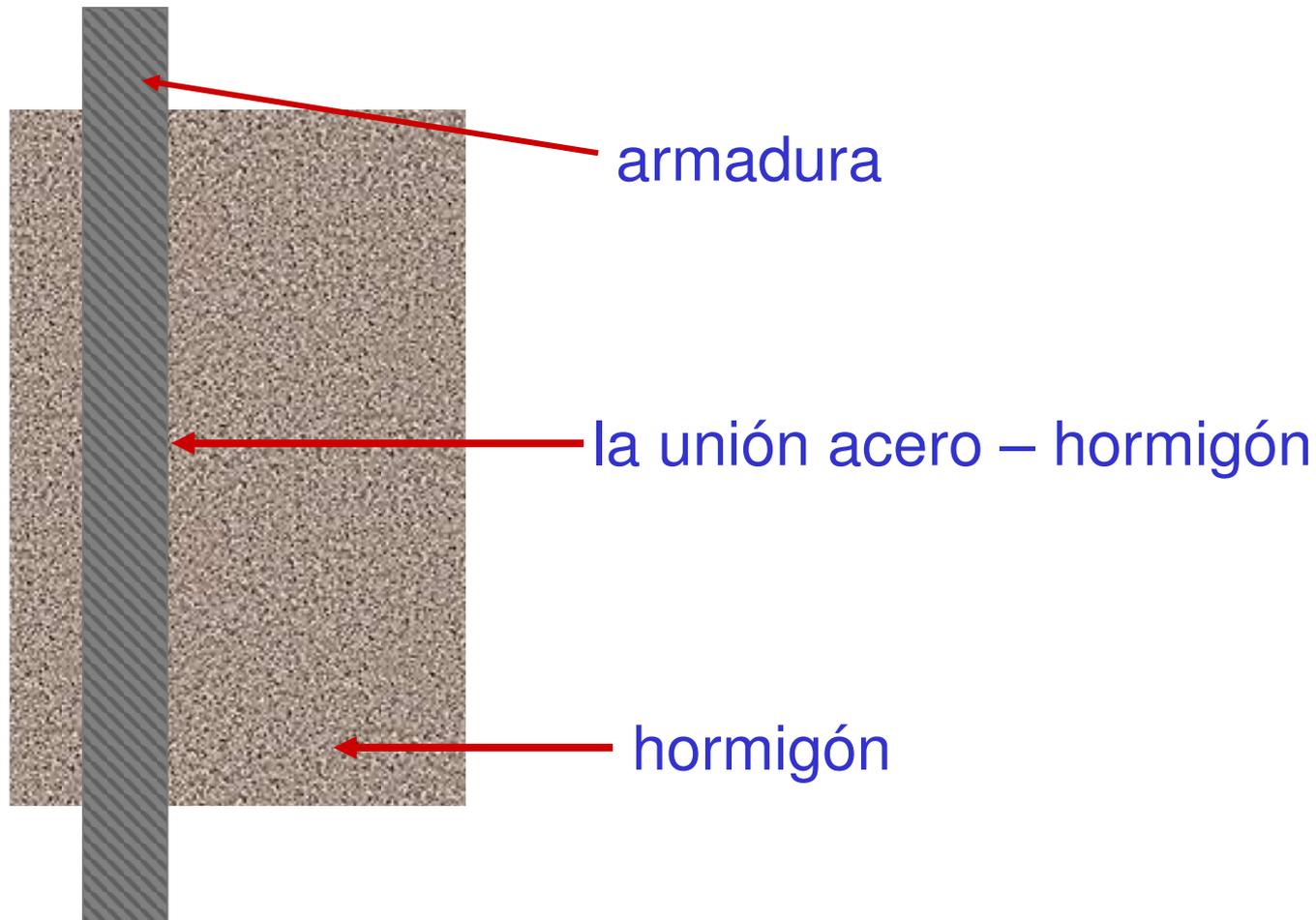
Agresivos:
agua y
aire...

pueden entrar
por la red capilar

Tuutti propuso un modelo cualitativo para determinar el tiempo de vida útil de las estructuras



2. Efectos de la corrosión



2. Efectos de la corrosión

Efectos sobre la armadura



disminución de la sección de la armadura

por tanto, de su capacidad portante

disminución de su ductilidad

mayor riesgo de que se produzca una fractura frágil de la armadura, si esta está sometida a esfuerzos de tracción (hormigón pretensado o postensado).

2. Efectos de la corrosión

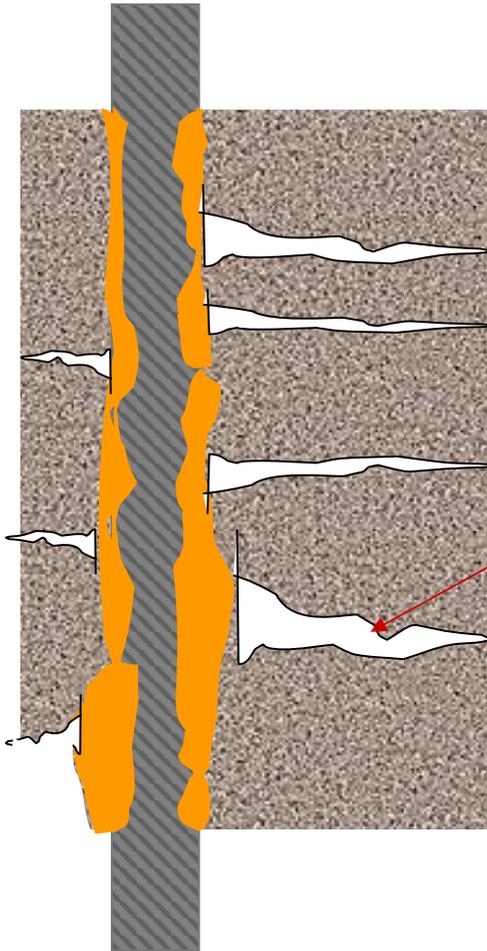
Efectos sobre el hormigón

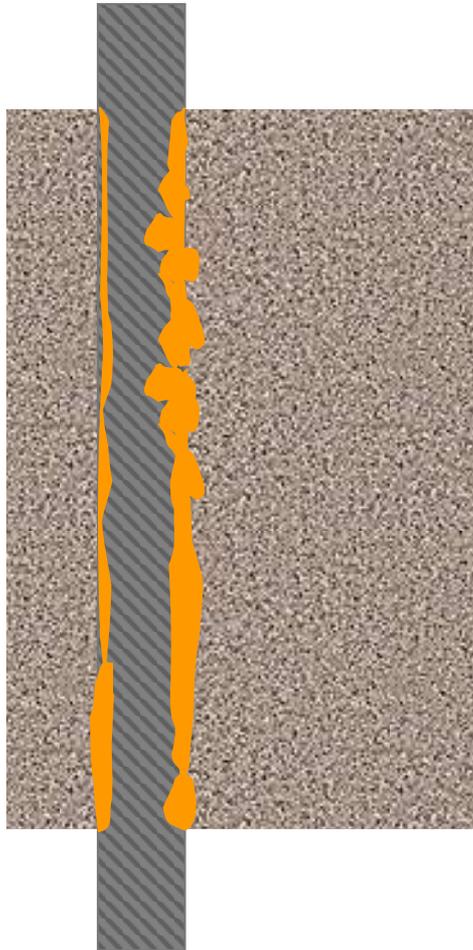
Los productos de corrosión del hierro son más voluminosos que este

Este fenómeno se conoce como *splitting*

la pérdida de parte del hormigón produce una reducción en la capacidad portante de la estructura

fisuras facilita el acceso de las sustancias agresivas del medio hasta la armadura





Si el hormigón está muy húmedo

Este no es el caso más habitual

Pero seguro que todos lo hemos visto...



2. Efectos de la corrosión

Efectos sobre la unión acero – hormigón

afecta a la adherencia

deslizamiento de la armadura

transmisión de las cargas entre el acero y el hormigón que no sea la adecuada.



3. Corrosión de armaduras.

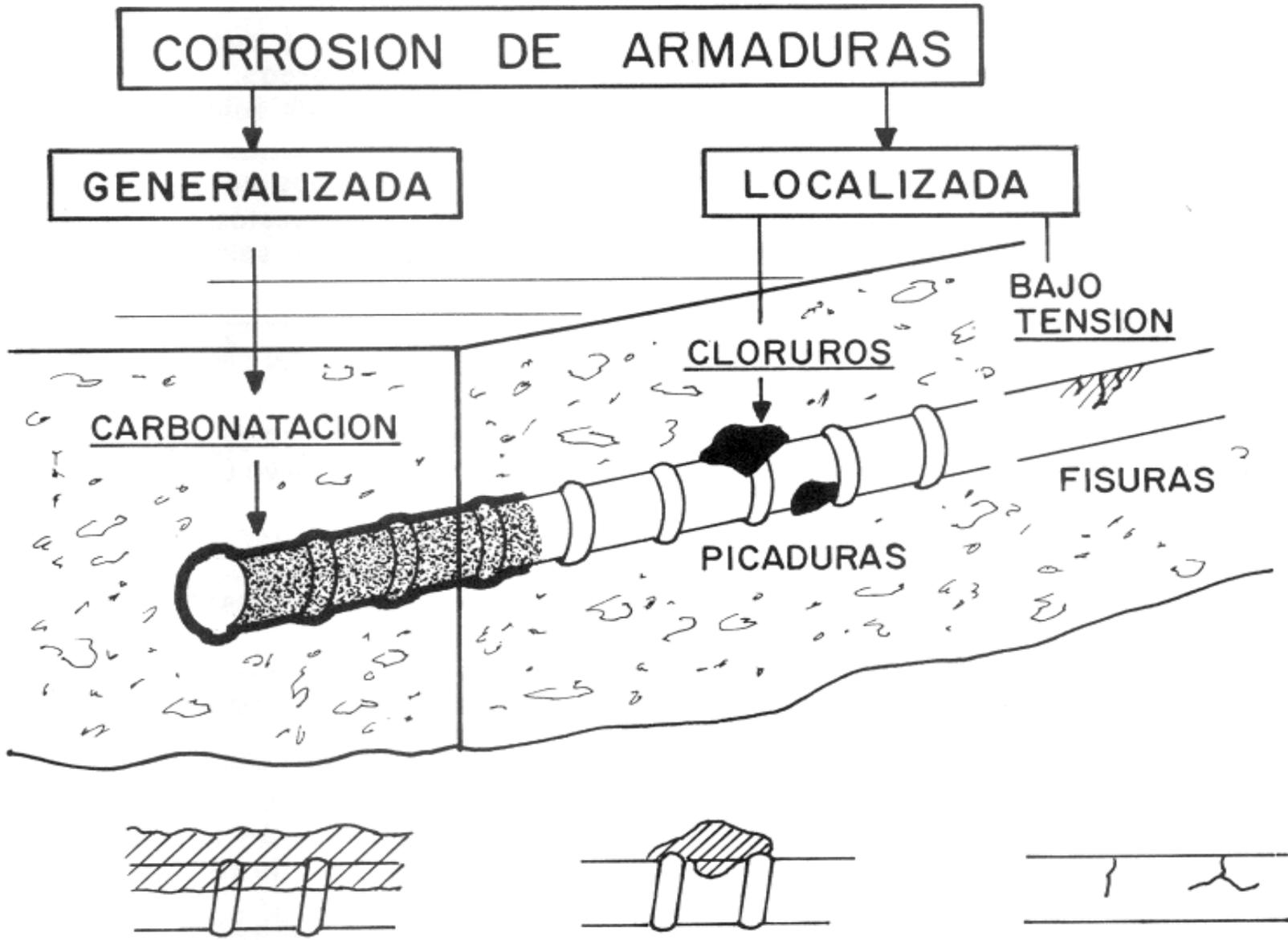
La corrosión de armaduras es la patología más importante del hormigón armado, ya que es la que se produce con mayor frecuencia, obligando a costosas reparaciones.

El hormigón ofrece una protección natural contra la corrosión de las armaduras, ésta se puede perder en determinadas circunstancias.

*Corrosión generalizada
debida
a la carbonatación*

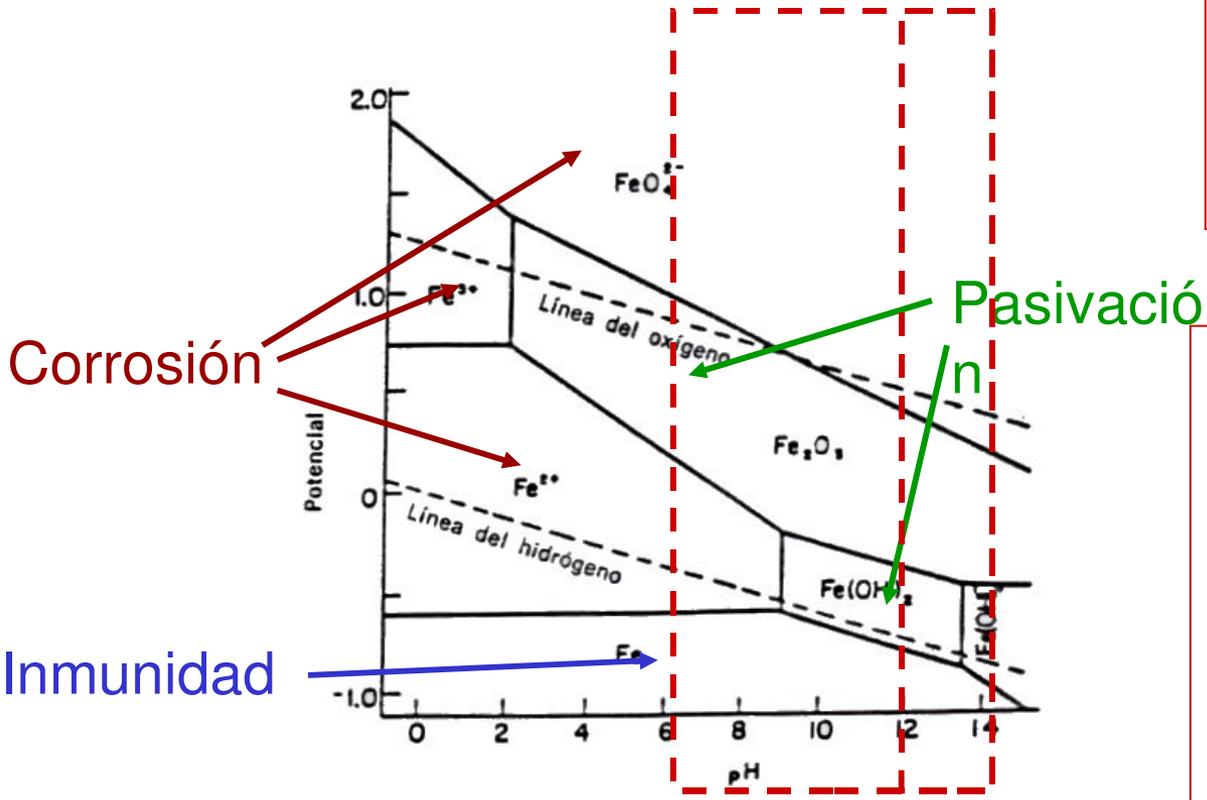
*Corrosión localizada
debida
a los iones cloruro*





3. Corrosión de armaduras

3.1. Corrosión generalizada



La capa pasiva se disuelve y el acero empieza a corroerse

La disolución de la capa si el pH ha disminuido por debajo de un cierto valor de aquí el nombre de **corrosión generalizada**

3. Corrosión de armaduras

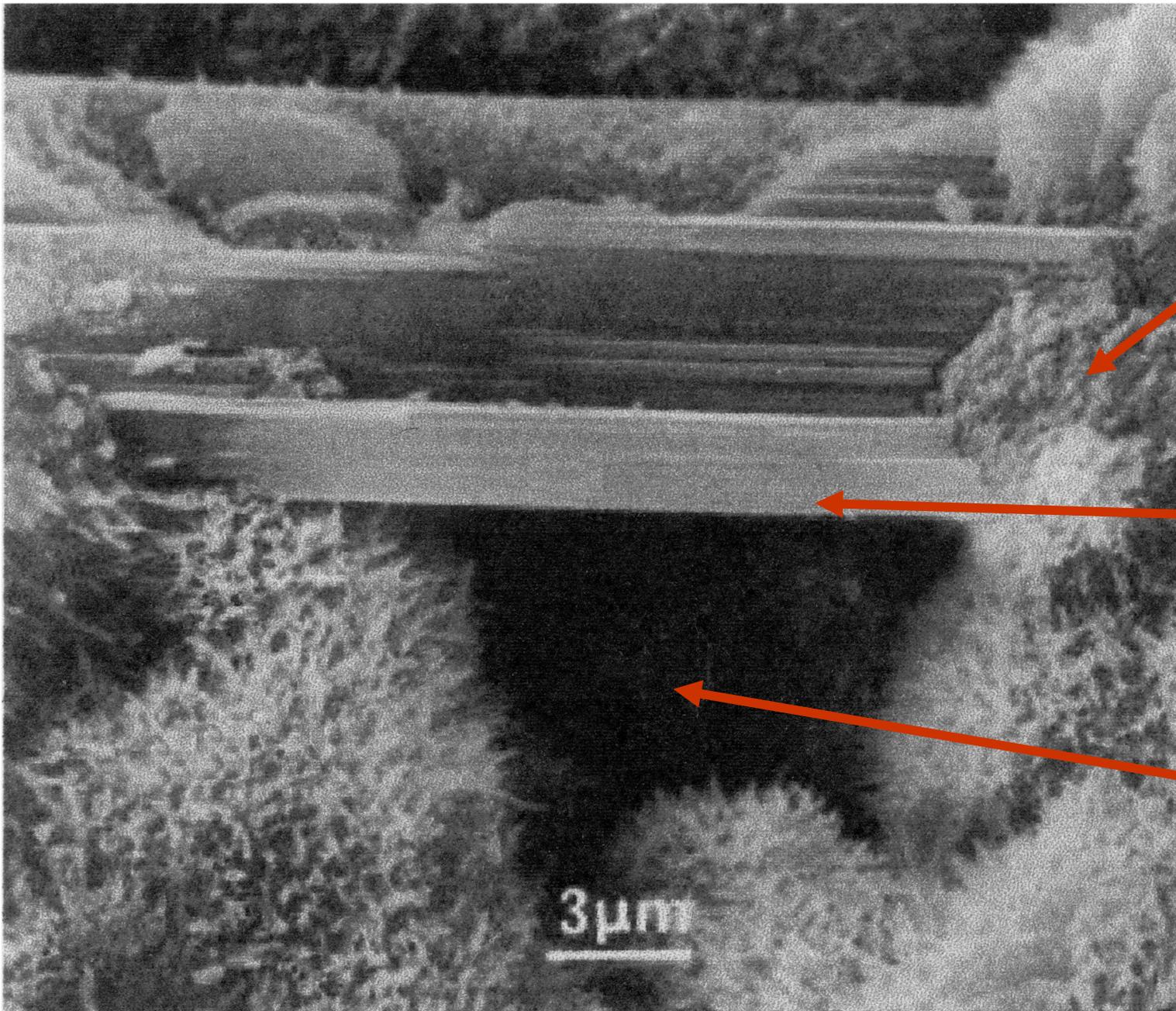
3.1. Corrosión generalizada

El principal responsable de este fenómeno es el dióxido de carbono

CO₂ Atmósfera

H₂O red capilar





CSH

Ca(OH)₂

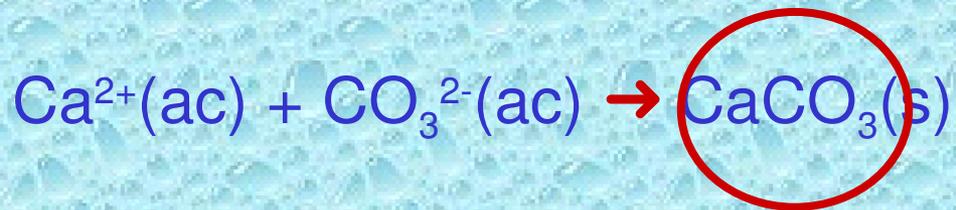
Huecos





(portlandita) (acidez debida al CO₂)

El calcio liberado en esta reacción precipita con el carbonato procedente del CO₂:

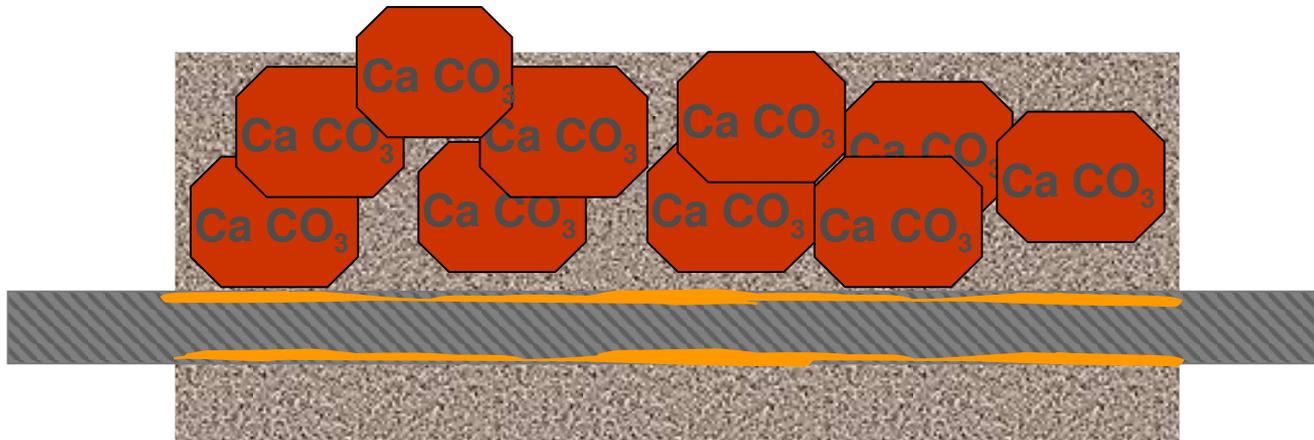
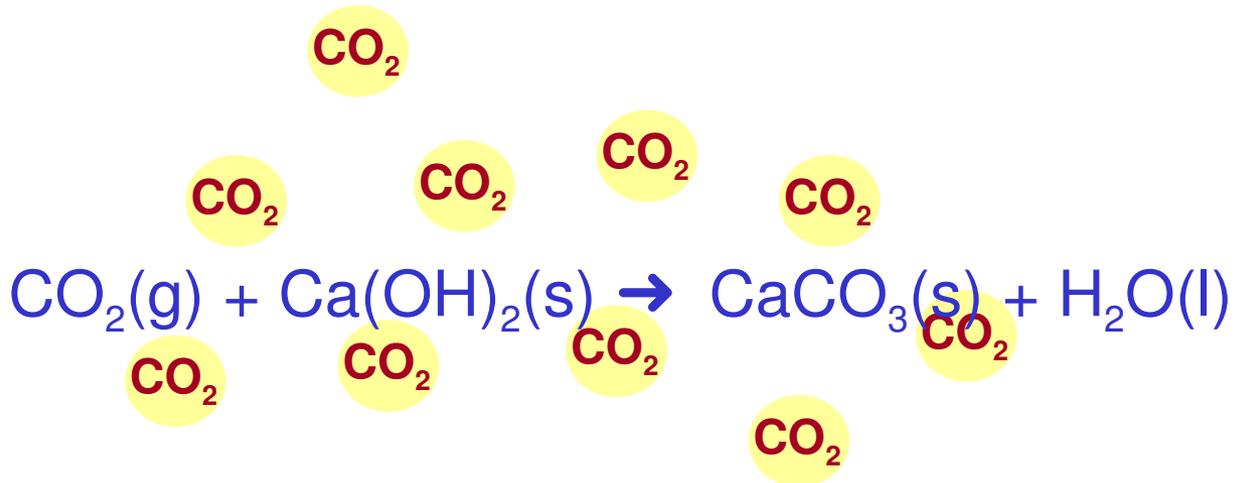


La formación de un carbonato es lo que da el nombre al proceso: **carbonatación**.

El proceso global lo podríamos representar por la reacción:



Corrosión por carbonatación





El CO₂ siempre está presente en la atmósfera, ya que es uno de sus constituyentes, representando el 0.03% en volumen.

En zonas urbanas su concentración es mayor debido, principalmente, al uso de combustibles fósiles para el transporte, lo que conlleva un mayor riesgo de corrosión.



El ensayo de la fenolftaleína

pH < 8

pH > 10 →

ácido

neutro

básico



zona no carbonatada

frente de carbonatación

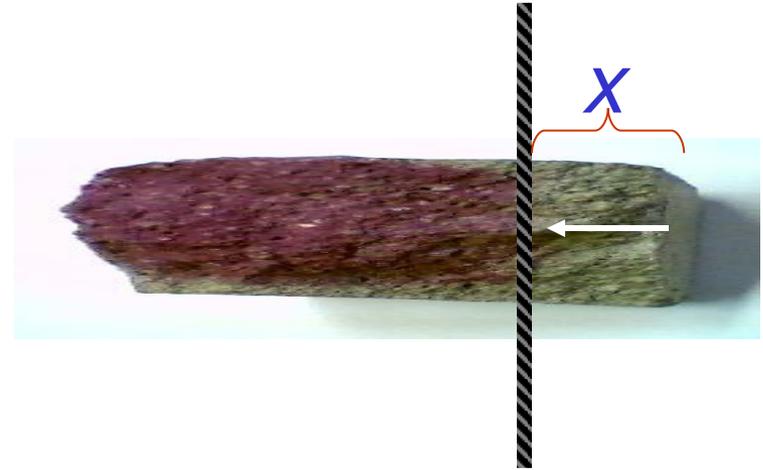


zona carbonatada

La velocidad de carbonatación

o velocidad a la cual avanza el frente de carbonatación

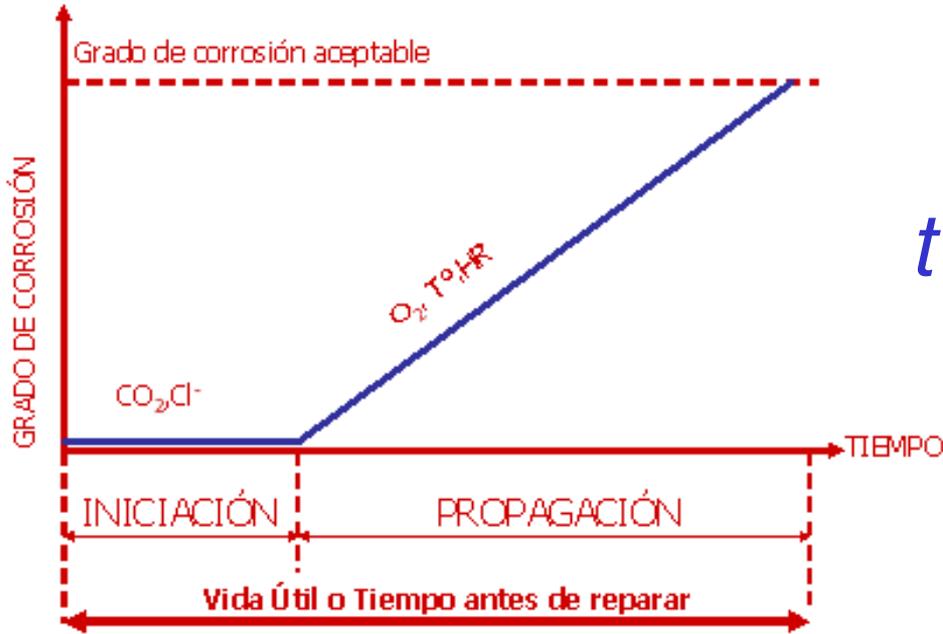
$$x = k \sqrt{t}$$



La profundidad del frente de carbonatación (x) es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde que empezó la estructura a carbonatarse (t):

Cuando x sea igual al espesor de recubrimiento comenzará la corrosión

Recordamos el diagrama de Tutti



$$t_{\text{iniciación}} = \left(\frac{x_{\text{recubrimiento}}}{k} \right)^2$$

\uparrow
1 y 10 mm/año^{1/2}

es muy importante respetar los espesores de recubrimiento establecidos por la normativa

$$\left. \begin{array}{l} k = 5 \text{ mm/año}^{1/2} \\ x = 30 \text{ mm} \end{array} \right\} t = \left(\frac{30}{5} \right)^2 = 36 \text{ años}$$

$$\left. \begin{array}{l} k = 5 \text{ mm/año}^{1/2} \\ x = 10 \text{ mm} \end{array} \right\} t = \left(\frac{10}{5} \right)^2 = 4 \text{ años}$$

Evolución del perfil de carbonatación

(realizado por Emilio Zornoza)



Día 4



Los principales factores que determinan el valor de esta constante y por tanto la velocidad de carbonatación son los siguientes:

-Relación agua/cemento en el amasado:

Cuanto mayor sea esta, más poroso será el hormigón y por tanto mayores serán la velocidad de carbonatación y el valor de k .

-Cantidad de cemento:

Una dosificación alta en cemento produce una baja porosidad y, por tanto, valores bajos de la velocidad de carbonatación y de k .



- Humedad relativa (HR) del ambiente: la velocidad de carbonatación es baja cuando la HR es baja y también cuando la HR es alta.

Si la HR es baja

la red capilar está seca y el CO_2 entra fácilmente dentro de los poros por difusión gaseosa.

Pero la reacción de carbonatación no es posible sin la humedad

La velocidad de carbonatación por tanto es baja cuando la HR es baja.

Si la HR es elevada

la red capilar se encuentra saturada de agua

El CO_2 se disuelve en el agua para acceder al interior del poro

El transporte por difusión en fase acuosa es lento

La velocidad de carbonatación será lenta



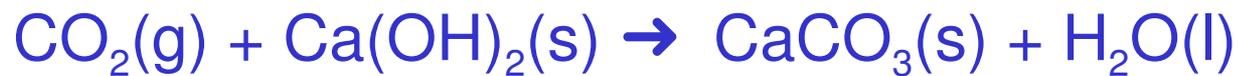
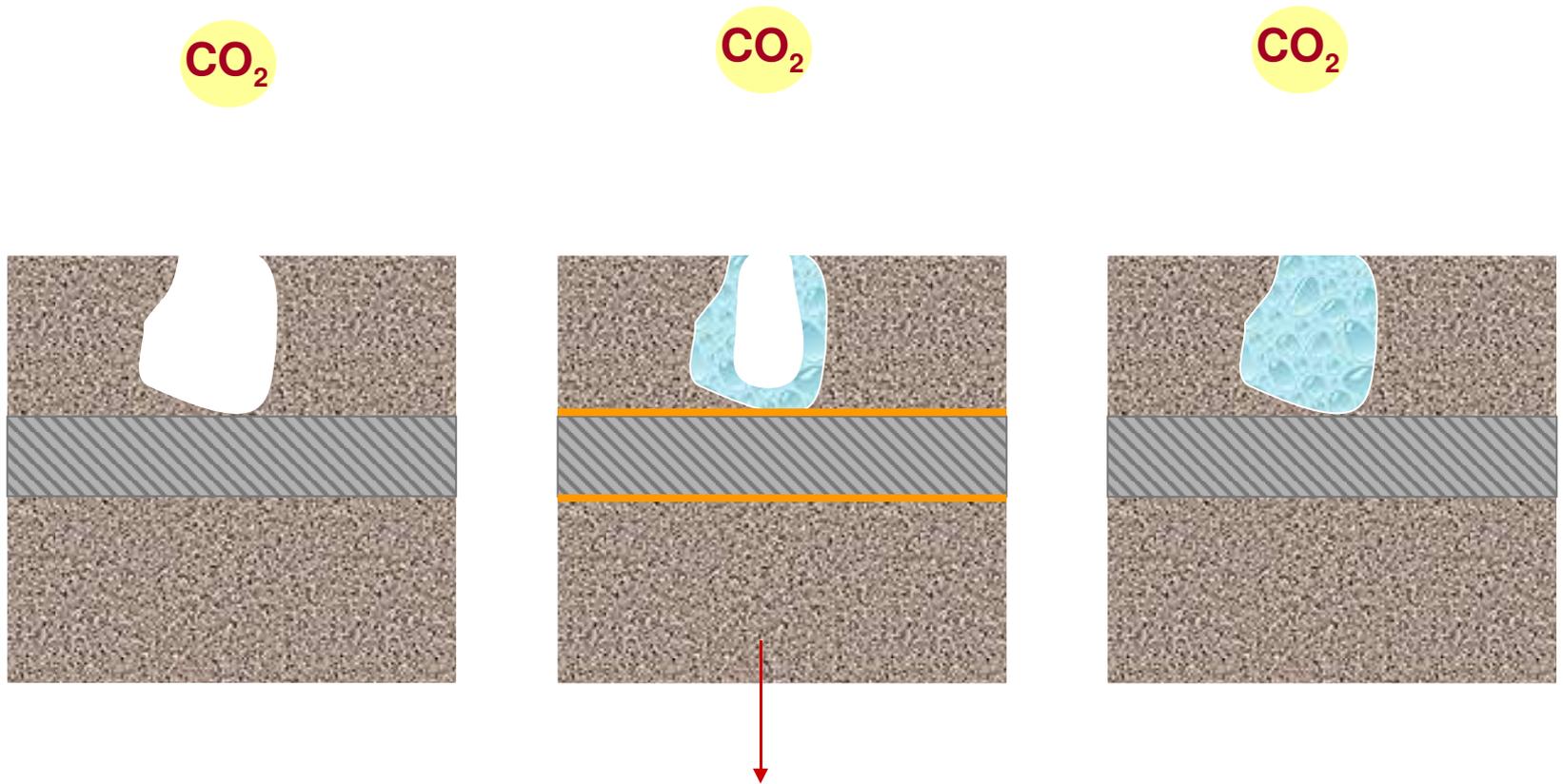
El caso más favorable para una rápida carbonatación se da a humedades intermedias porque entonces una fina capa de agua recubre las paredes del poro pero su interior está vacío.

El CO_2 puede acceder rápidamente al interior del poro por difusión gaseosa y a continuación producir la reacción de carbonatación porque existe humedad en contacto con la pared del poro.

Las velocidades máximas de carbonatación se producen a humedades intermedias (60-80%).



Efecto de la Humedad relativa (HR) del ambiente



3. Corrosión de armaduras

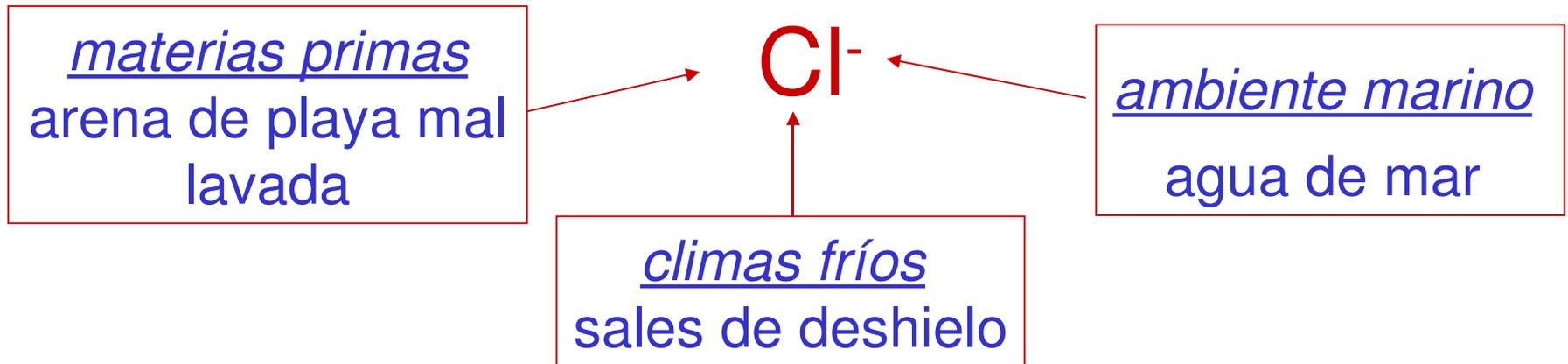
3.2. Corrosión localizada

Son varias las causas posibles de la corrosión localizada de las armaduras:

iones despasivantes (Cl^- , SO_4^{2-} , S^{2-} , etc.), pilas de aireación diferencial o de pH, pares galvánicos, corrientes erráticas



la causa más frecuente



Con el fin de evitar este tipo de corrosión, la normativa establece los valores máximos permitidos de concentración de cloruro en hormigón.

hormigón	% peso de cemento
en masa	1%
armado	0.4%
pretensado	0.2%

$$X_{crit} = k \sqrt{t}$$

también es aplicable para el transporte de los cloruros en el hormigón

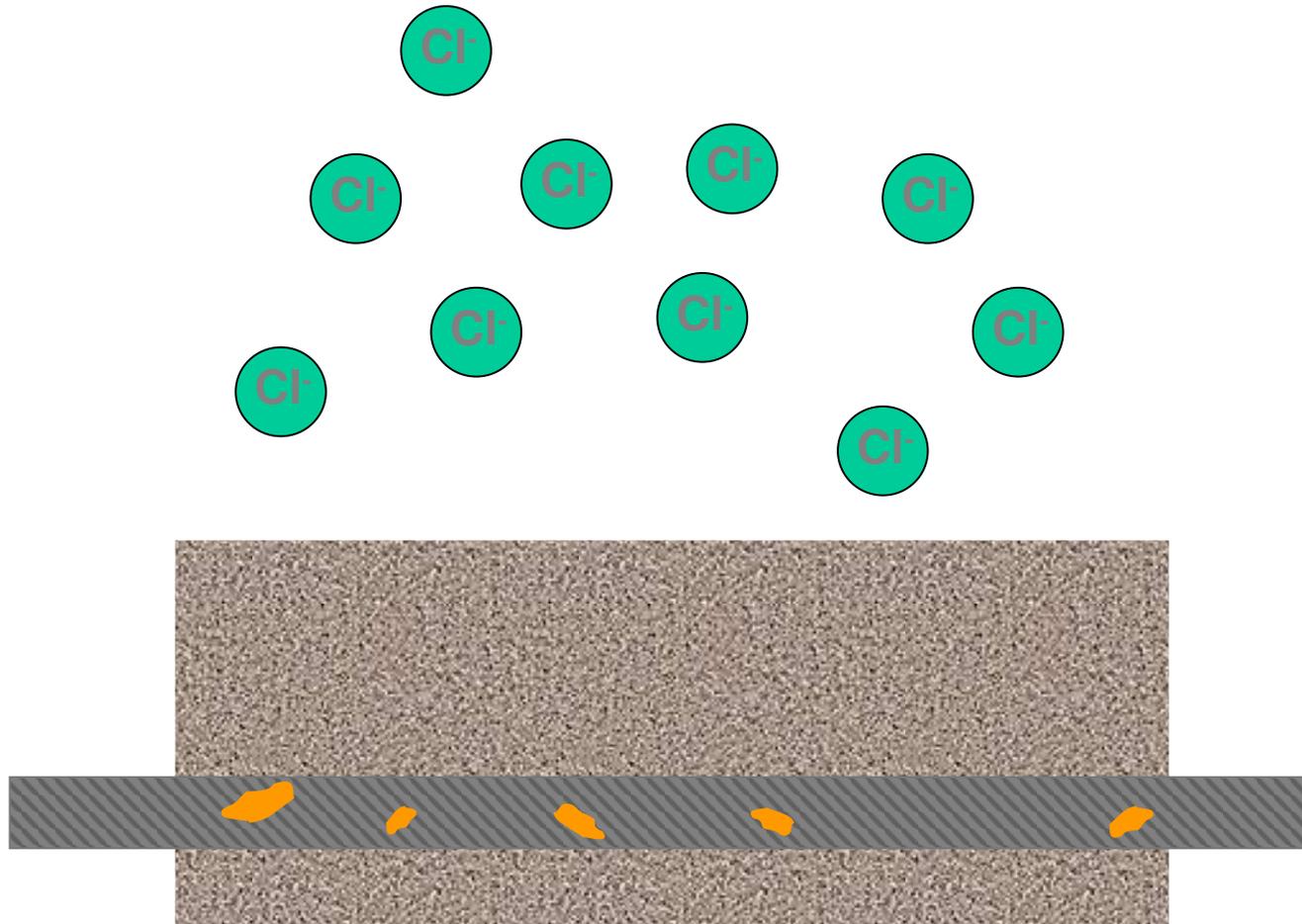
(x_{crit}) la profundidad del frente de concentración de cloruro capaz de despasivar las armaduras

(t) tiempo de exposición de la estructura a los cloruros

CONCLUSIÓN

Es muy importante respetar los espesores de recubrimiento establecidos por la normativa

Corrosión inducida por cloruros



Cl⁻

Los cloruros tienen una acción despasivante local sobre la armadura

iones cloruro + óxidos de la capa pasiva → oxiclорuro (soluble)

la superficie metálica expuesta a la disolución, la cual empezará a corroerse

ion ferroso (corrosión) + cloruros → iones complejos (estables en disolución)

La picadura tiene una profundidad de tan sólo unas micras

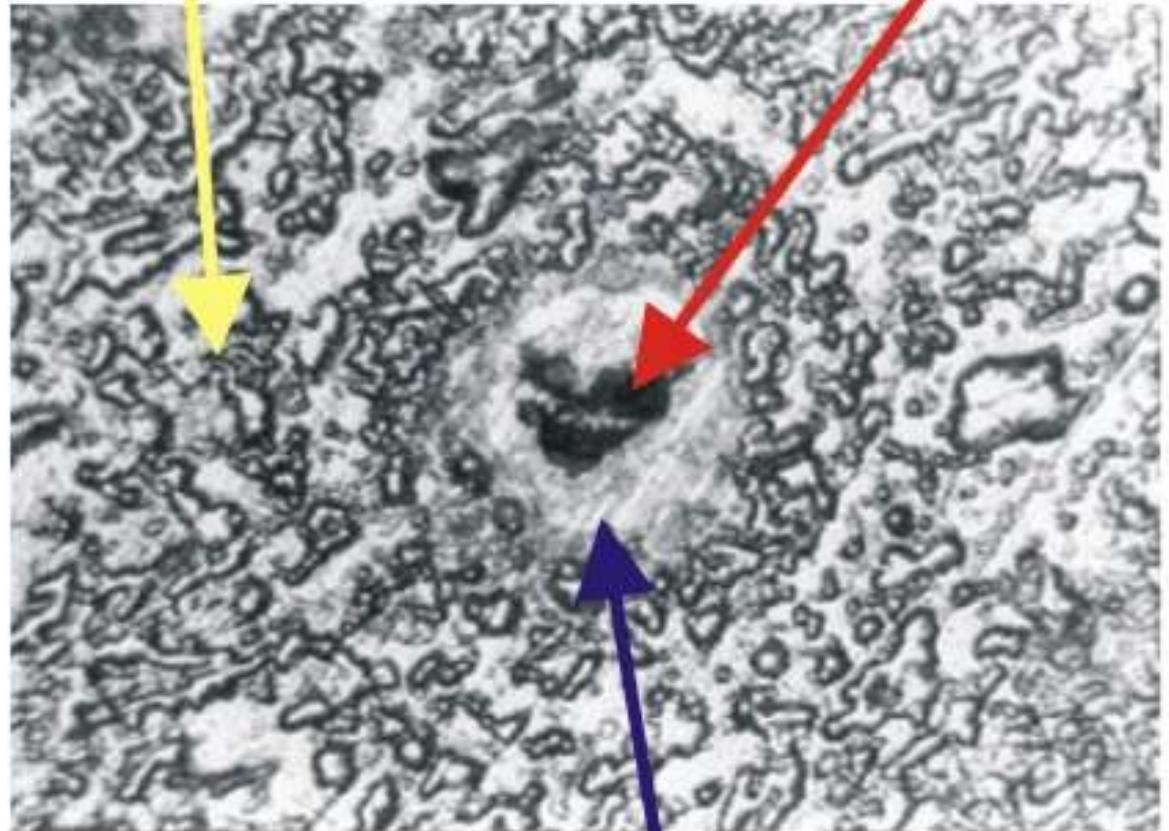
formación de la picadura

se dan unas determinadas condiciones en su interior que favorecen el crecimiento indefinido de la picadura hacia el interior del metal



Uniform pitting

Deep pit (anode)



Intact (cathode)

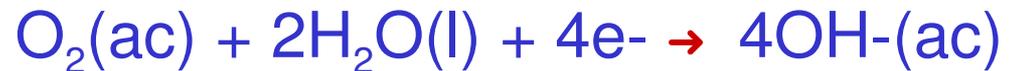
Cl⁻

El proceso de crecimiento es el siguiente

en el interior despasivado de la picadura



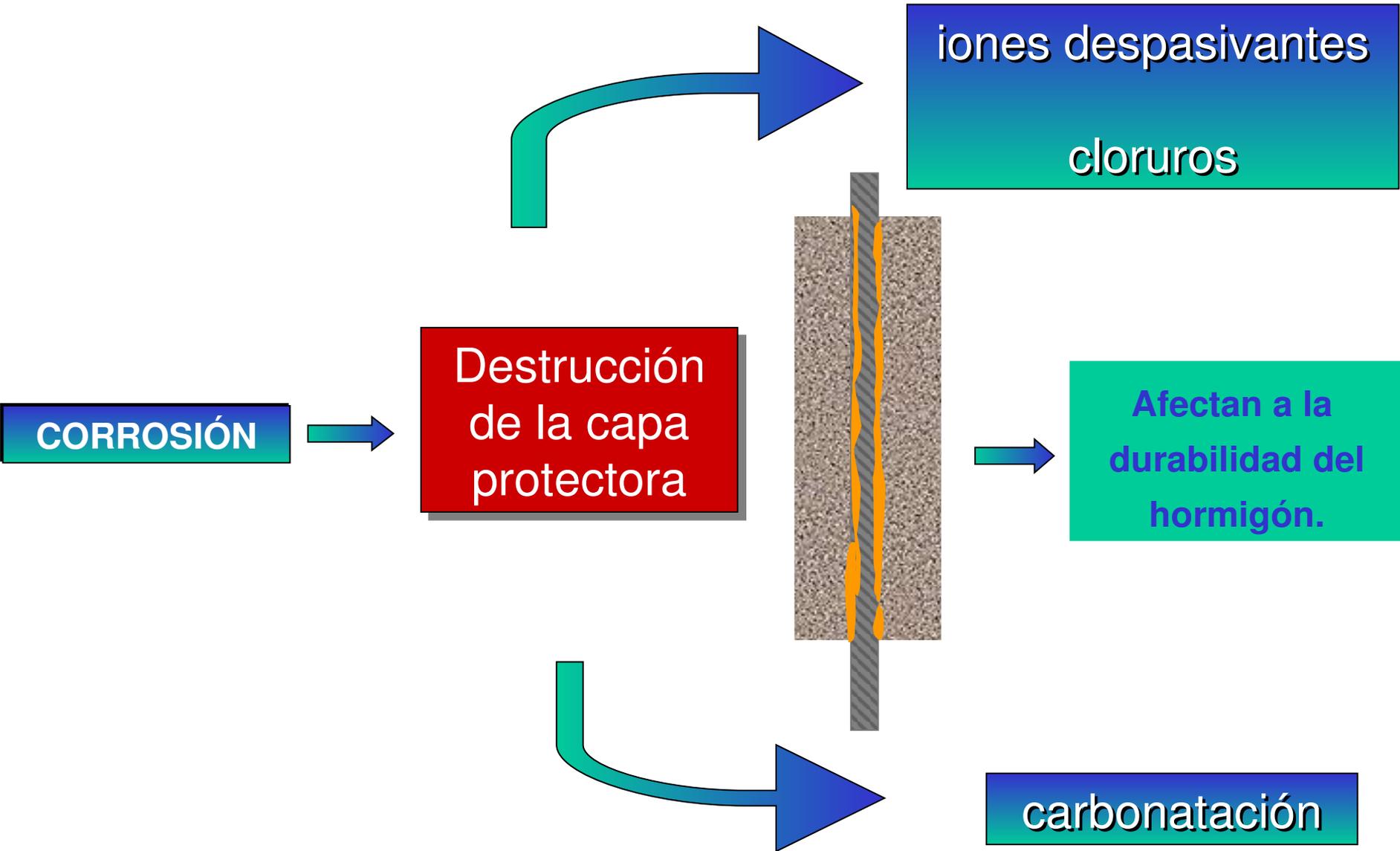
impide su repasivación y la oxidación continúa



la corrosión localizada debida a los cloruros es más peligrosa que la corrosión generalizada debida a la carbonatación



Corrosión de armaduras



Para una misma velocidad de corrosión

(expresada como pérdida de peso o como intensidad de la corriente de corrosión)

Corrosión localizada

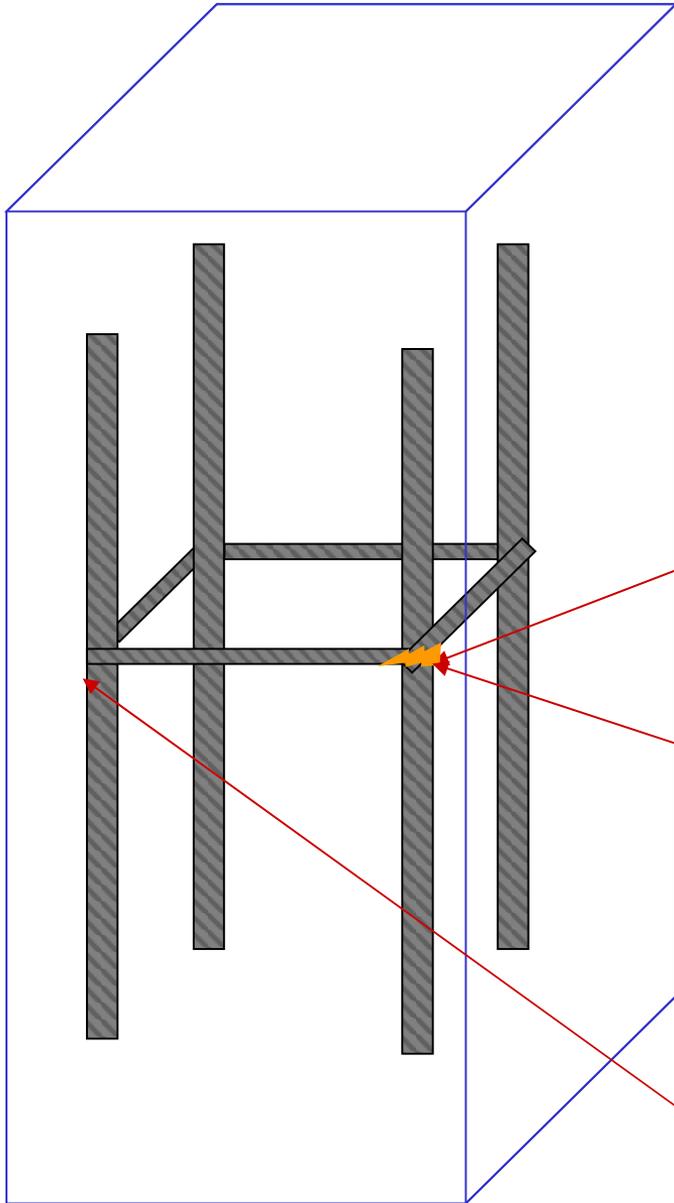


Corrosión generalizada

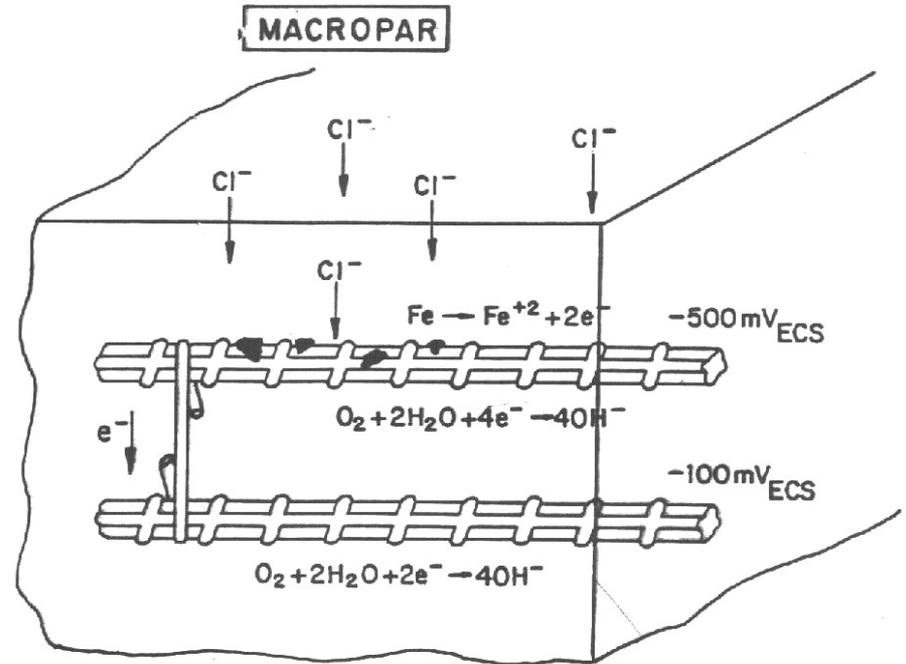


(armaduras pretensadas o postensadas)

formación de macropares galvánicos



Cl^-



E disminuye (se hace mas anódico)

PILA

E aumenta se hace mas catódico

¿De que dependerá el tiempo que tarde una armadura en despasivarse debido a la acción de los Cloruros?

- *Calidad del hormigón* : Un buen hormigón dificulta el acceso de sustancias agresivas desde el exterior al tener una baja porosidad.

Demostrado: las adiciones activas, especialmente las escorias siderúrgicas con un elevado porcentaje de reemplazo, son muy beneficiosas en un ambiente marino



- *Capacidad ligante del cemento* : la pasta de cemento une los cloruros a las fases sólidas inmovilizándolos y retrasando el avance de los cloruros

cloruros ligados

cloruros libres

tipo químico

Los aluminatos
del cemento
cloroaluminatos

capaz de desplazarse
y despasivar
las armaduras

tipo físico

El gel CSH

adsorbe
los cloruros

un hormigón con gran
capacidad de ligar
cloruros retrasará la
despasivación

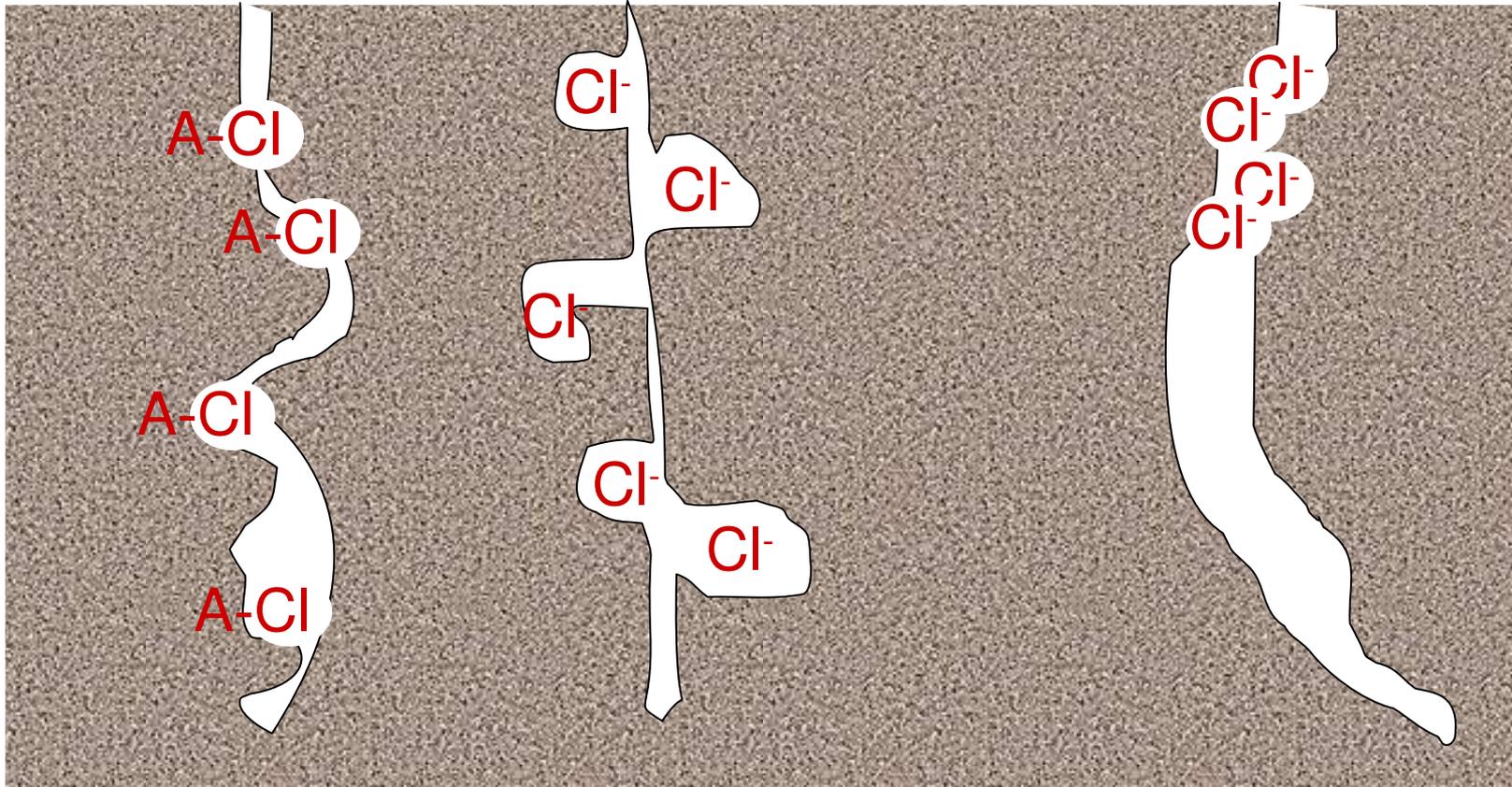


cloruros ligados

cloruros libres

tipo químico

tipo físico



un hormigón con gran capacidad de ligar cloruros retrasará la despasivación

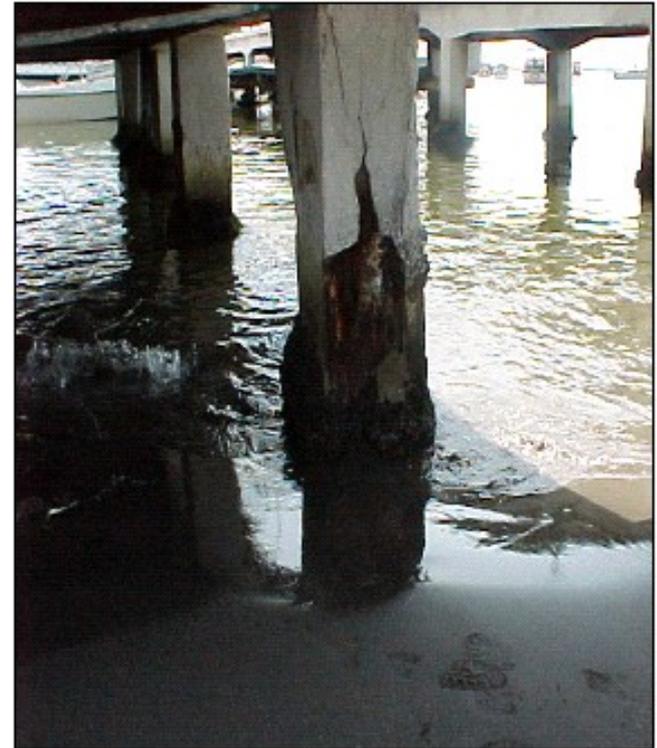
- *Carbonatación* : Se ha observado que la carbonatación destruye los cloroaluminatos, liberando los cloruros ligados que pasarán a la disolución.
- *Humedad relativa* : La humedad relativa del ambiente tiene una gran influencia en la velocidad a la cual avanzan los cloruros en el hormigón.

- *Exposición al medio marino :*

En principio podría parecer que la zona de mayor riesgo de corrosión es la que corresponde al hormigón sumergido (clase de exposición *IIIb* según la EHE). **No es así**

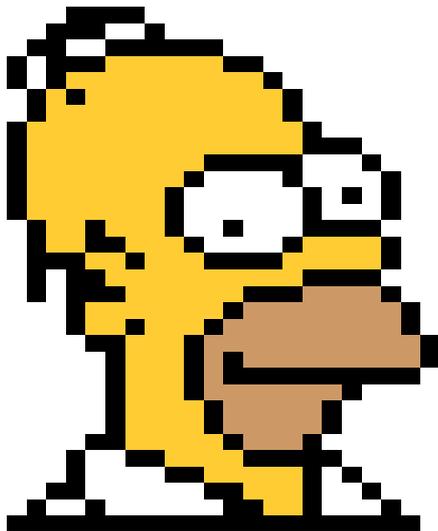
La zona de salpicaduras especialmente, y la de carrera de mareas en menor medida, son las que sufren un mayor riesgo de corrosión.

Esto se debe a los ciclos de secado y mojado que sufren estas zonas.



4. Determinación del riesgo de corrosión

la inspección visual

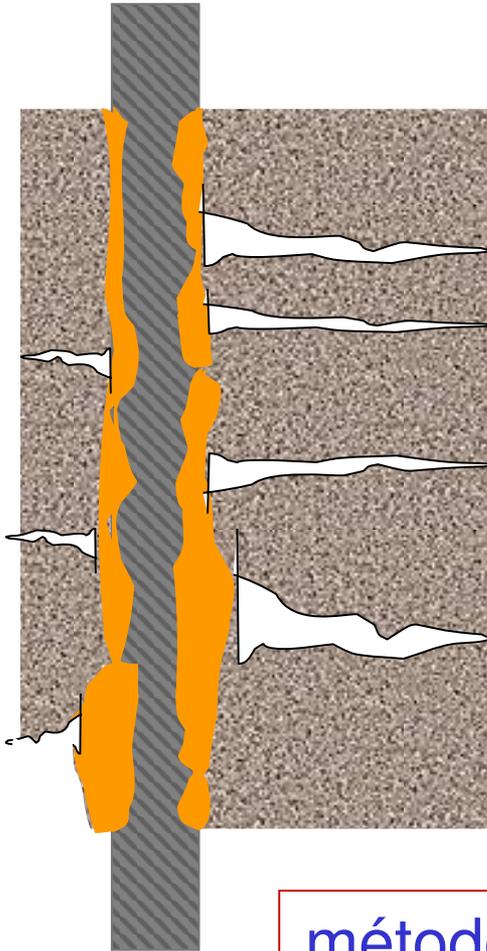


la medición de parámetros electroquímicos.

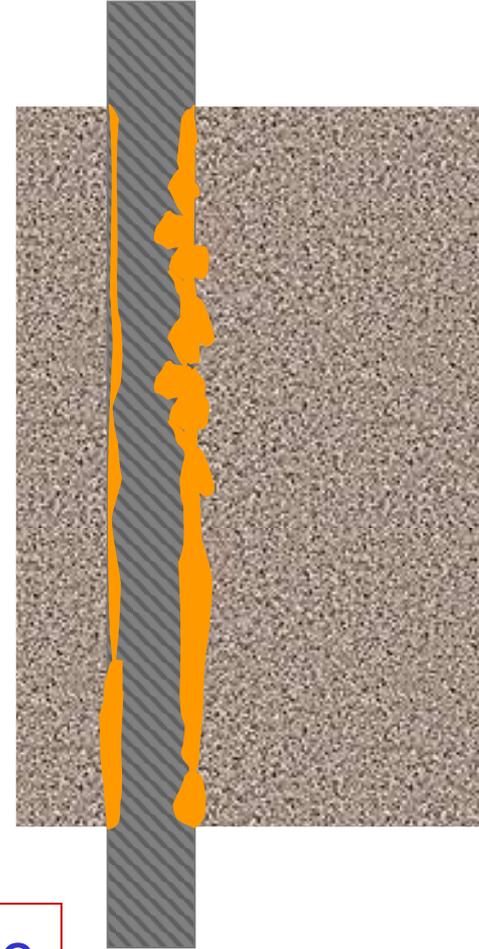


-inspección visual

fisuración → (*splitting*)



manchas pardas



método sencillo y rápido



Si se sospecha que la estructura puede estar carbonatada se debe realizar el ensayo de la fenolftaleína.

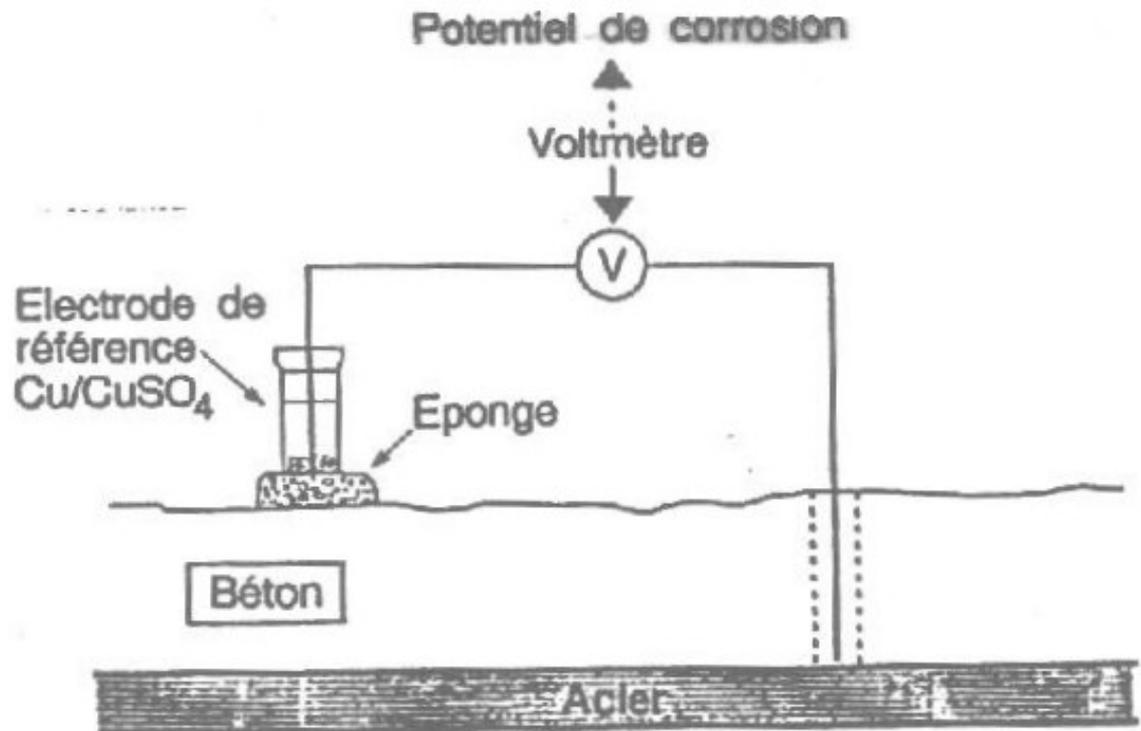


-la medida de parámetros electroquímicos

Potencial de corrosión de la armadura (E_{corr})

Potenciales bajos indican que la armadura está actuando como ánodo y por tanto la probabilidad de corrosión es elevada.

Potenciales
altos
indican una
baja
probabilidad de
corrosión



-la medida de parámetros electroquímicos

Resistividad del hormigón (r)

Se trata de la resistividad eléctrica del hormigón al paso de la corriente y se mide en $k\Omega\cdot cm$.

Constituye una medida indirecta de lo húmedo que se encuentra el hormigón.

resistividad alta \leftrightarrow hormigón seco
probabilidad de corrosión baja

resistividad baja \leftrightarrow hormigón húmedo
probabilidad de corrosión alta



Resistivímetro

Puede darse el caso de una armadura que se encuentre despasivada pero el hormigón esté seco

la medida del potencial de corrosión indicaría una alta probabilidad de corrosión (potenciales bajos)

la lectura de resistividad indicaría una probabilidad de corrosión baja (resistividad alta)

La armadura en estas condiciones no se corroe, ya que la sequedad del hormigón impide el proceso de corrosión



-la medida de parámetros electroquímicos

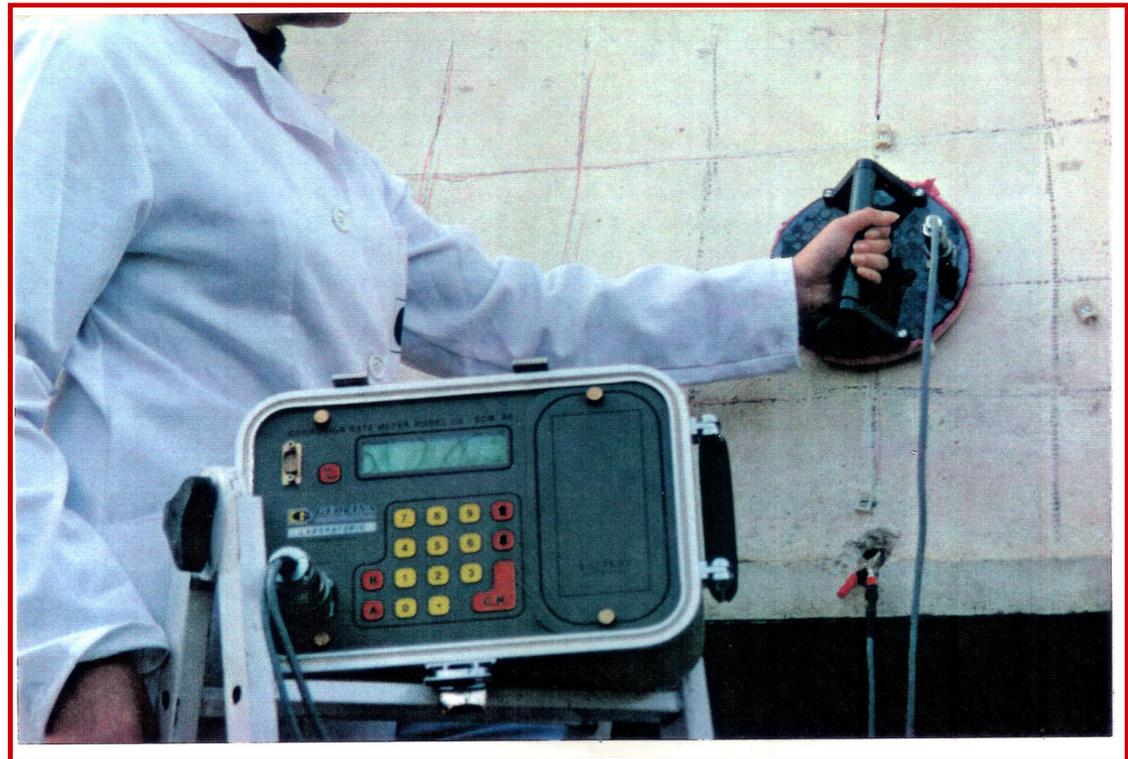
Corriente de corrosión de la armadura (I_{corr})

Esta es una medida de la velocidad de corrosión que se expresa en mA/cm².

No se puede medir de forma directa

Se utiliza un método indirecto: *resistencia de polarización*.

valor alto de la corriente de corrosión armadura se está corroyendo rápidamente



La forma habitual de trabajar es realizar un *mapeo*

Se pueden dibujar, por ejemplo, las curvas de *isopotencial*

Este método nos indica una cierta probabilidad de corrosión, pero no nos asegura con total certeza que la armadura se esté corroyendo o no.

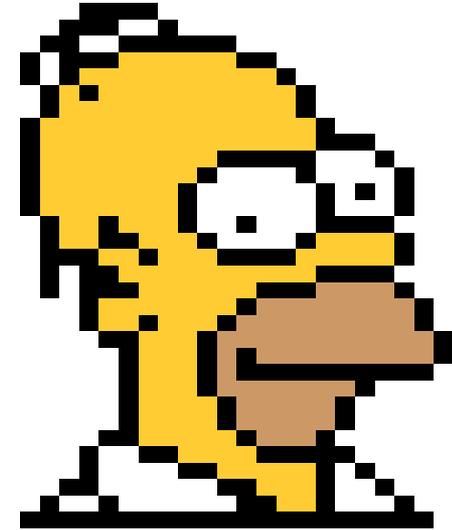
La medida de tan sólo uno de los tres parámetros podría no ser suficiente para determinar el riesgo de corrosión de una armadura.



Ventajas



&



Detecta la corrosión antes de que cause efectos perjudiciales

Puede indicar el riesgo de que se produzca corrosión

Su desventaja es que requiere de un instrumental específico y es más laborioso

Los criterios para determinar el riesgo de corrosión son los siguientes:

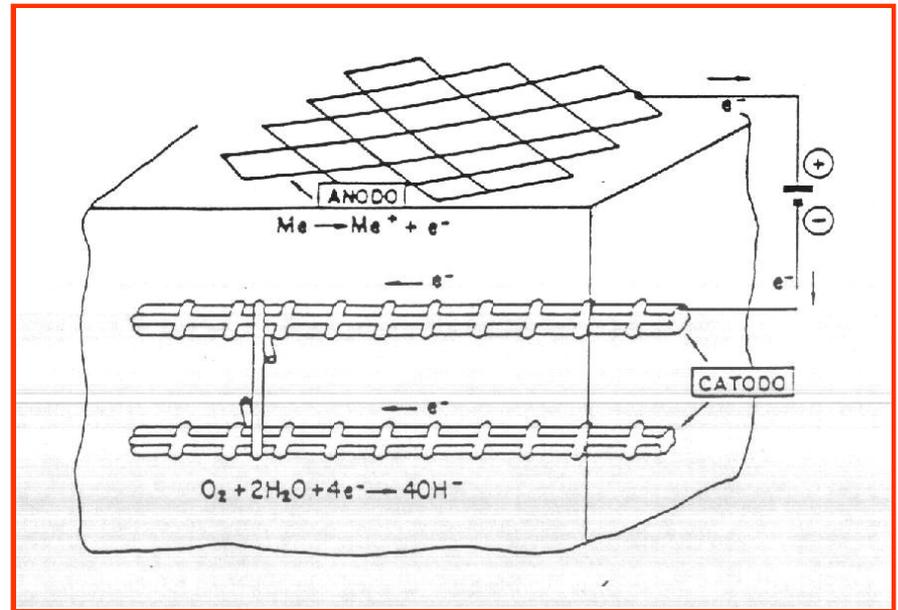
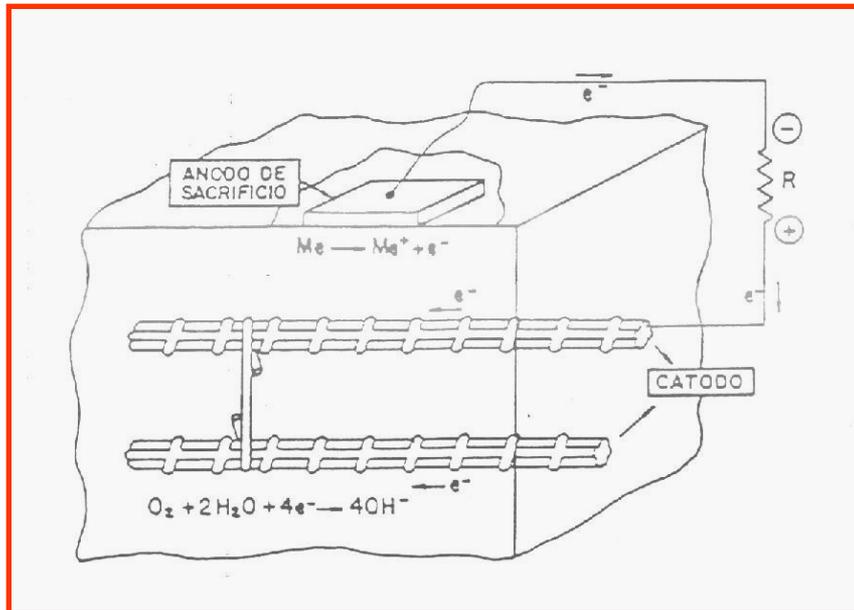
Riesgo de corrosión	E_{corr} (mV vs. Cu/CuSO ₄)	ρ (k Ω ·cm)	I_{corr} (μ A/cm ²)
Bajo	> -200	> 200	< 0.1
Alto	< -350	< 100	> 0.5



5. Protección contra la corrosión

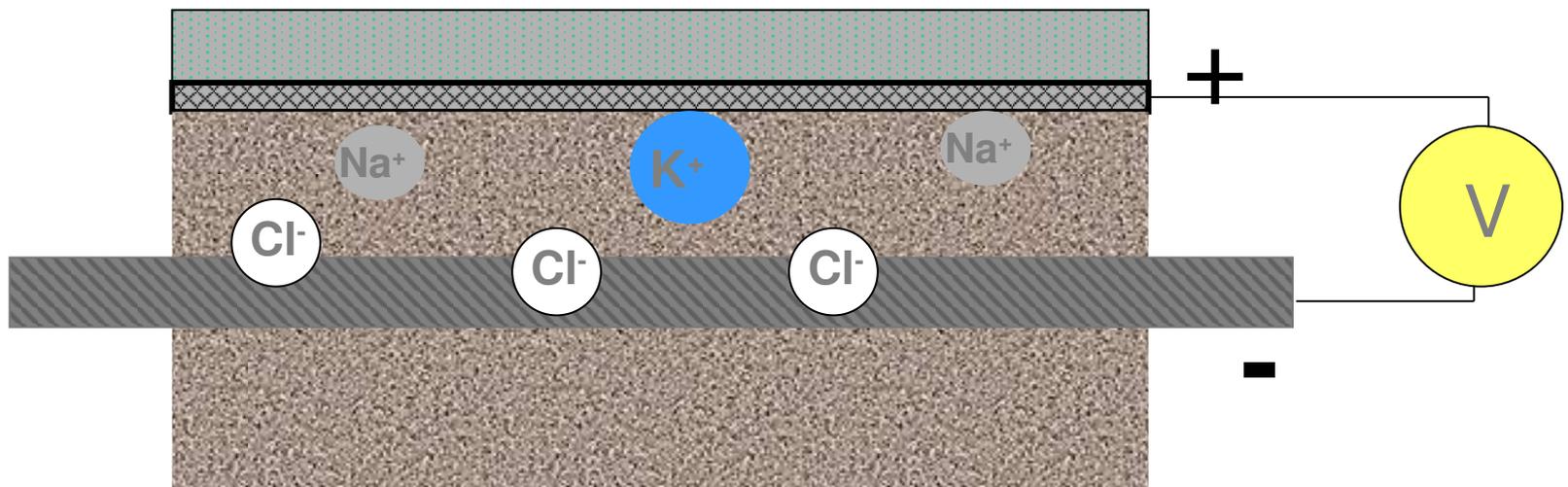
- Inhibidores: $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ añadido en el amasado
 - Carbonatación: 3% $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ref. cem
 - Cloruros: $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^- > 2$
- Recubrimientos
 - Armadura: resinas epoxi
 - Hormigón: pinturas (impermeabilizante, anticarbonatación)
- Acero galvanizado
 - Bajo contenido en álcalis
 - Zn > 10mm (80 - 100mm)

- Protección catódica:
 - Ánodo de sacrificio
 - Corriente impuesta
- Extracción electroquímica de cloruros



Extracción electroquímica de cloruros (EEC)

FUNDAMENTO



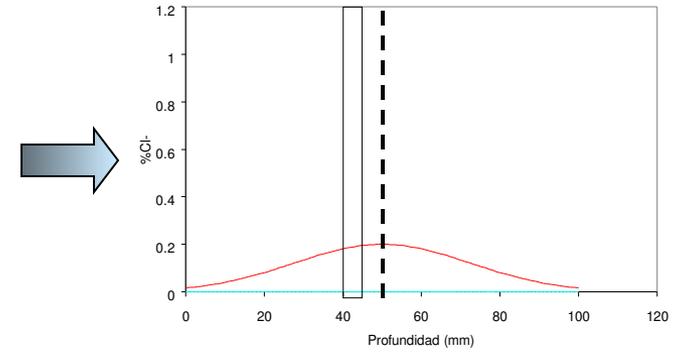
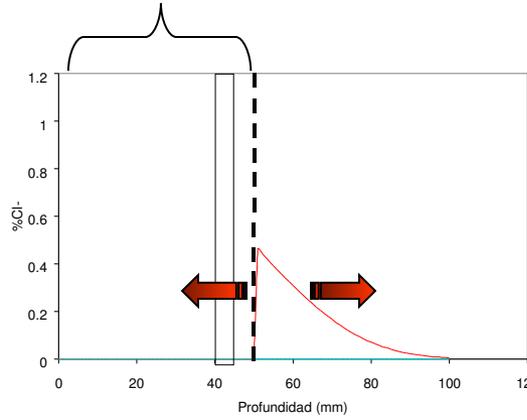
6. Reparación de estructuras dañadas

1. Eliminación del hormigón contaminado.
2. Limpieza / protección de la armadura.
3. Tratamiento de la superficie del hormigón antiguo.
4. Aplicación de un mortero de reparación.

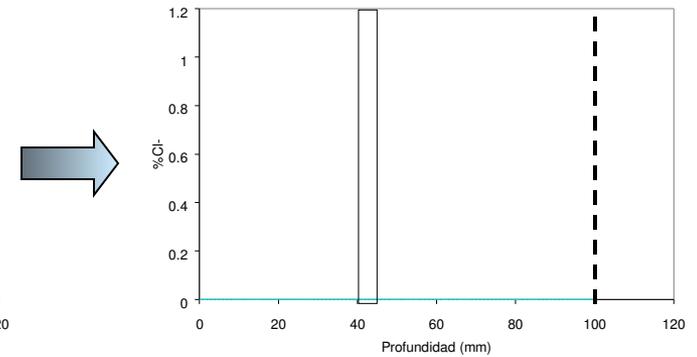
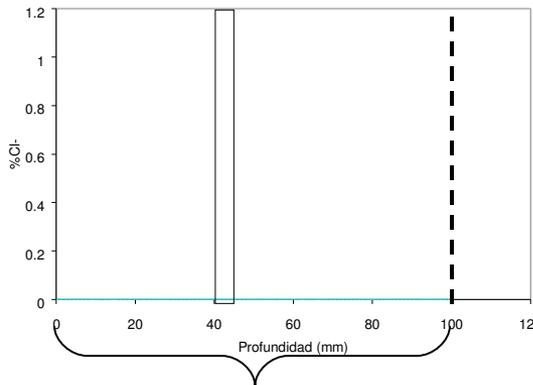


**PRECAUCIÓN: ELIMINAR EL
HORMIGÓN POR DETRÁS
DE LA ARMADURA**

MAL REPARADO



TRAS LA REPARACIÓN



BIEN REPARADO

ANTES DE LA REPARACIÓN

