

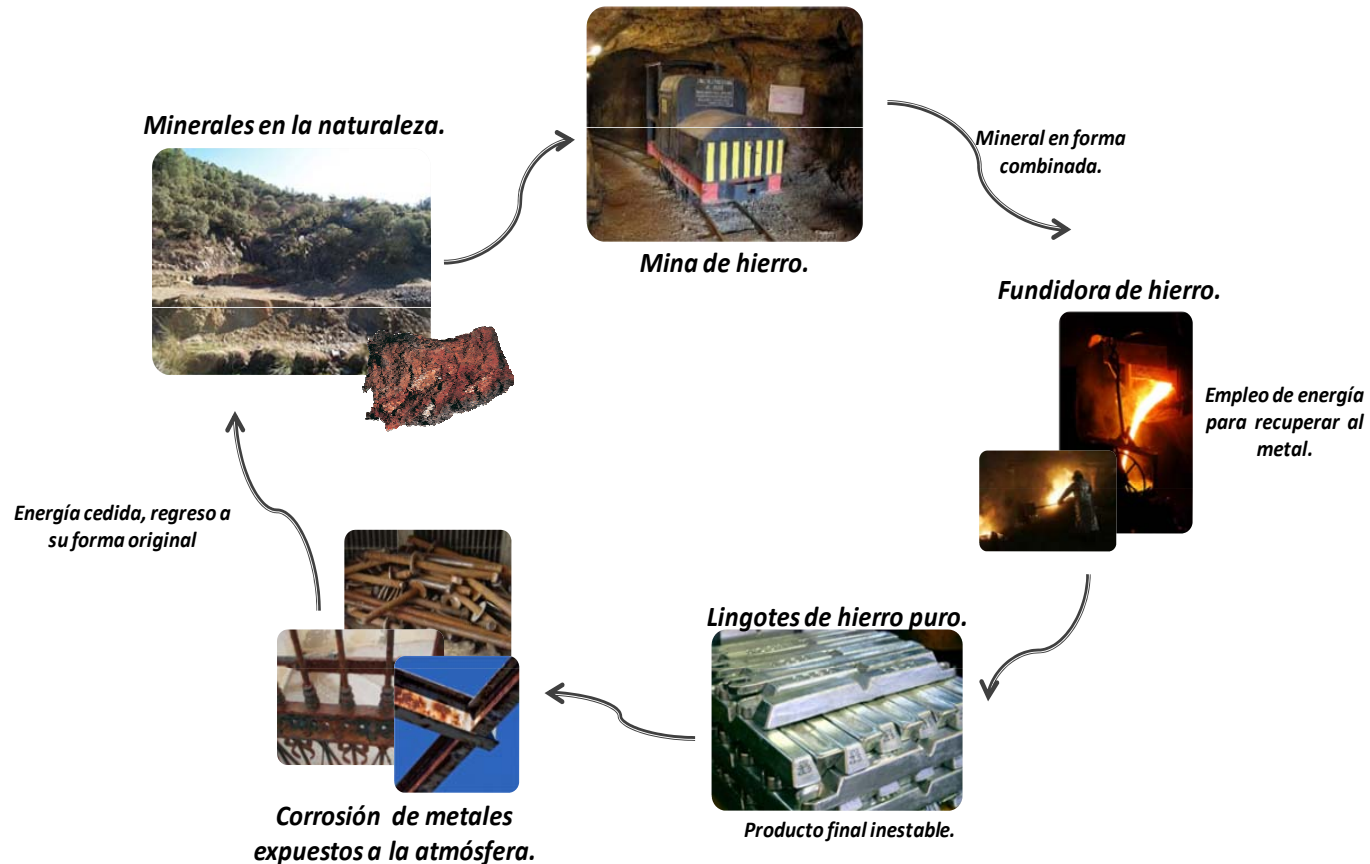
# Principios generales de la corrosión del acero en el concreto

**Dr. Pedro Castro Borges**



## Definición de corrosión

- Proceso de deterioro y destrucción de un material (generalmente un metal) o de sus propiedades debido a su reacción con el medio ambiente.



### Energía requerida de algunos metales para extraerlos de sus minas

---

**Requerimiento de mayor energía**  
( Mayor tendencia a corroerse)

Potasio  
Magnesio  
Berilio  
Aluminio  
Zinc  
Cromo  
Fierro  
Níquel  
Estaño

**Requerimiento de menor energía**  
( Menor tendencia a corroerse )

Cobre  
Plata  
Platino  
Oro

---



## Formas de corrosión

De acuerdo al tipo de ambiente existen dos formas básicas de corrosión:

1. Corrosión química, que ocurre debido al ataque de sistemas no electrolíticos, por ejemplo gases y vapores a temperaturas que impiden su condensación sobre la superficie metálica

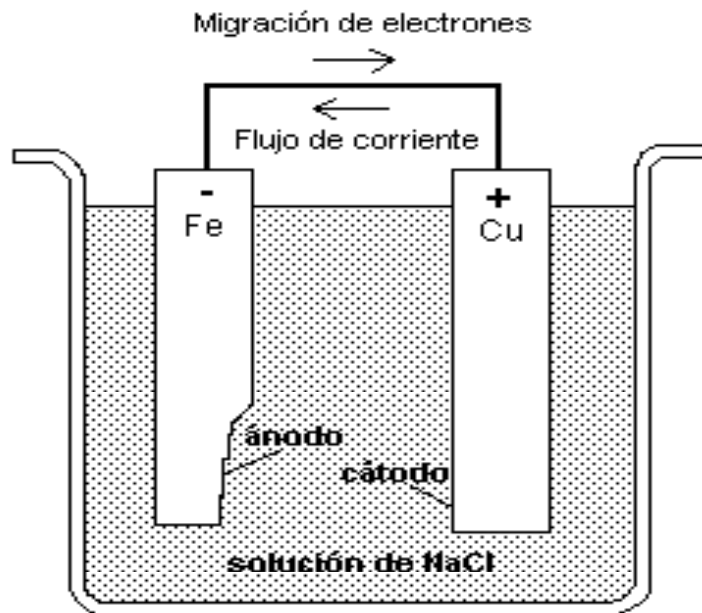


Pedro Castro-Borges

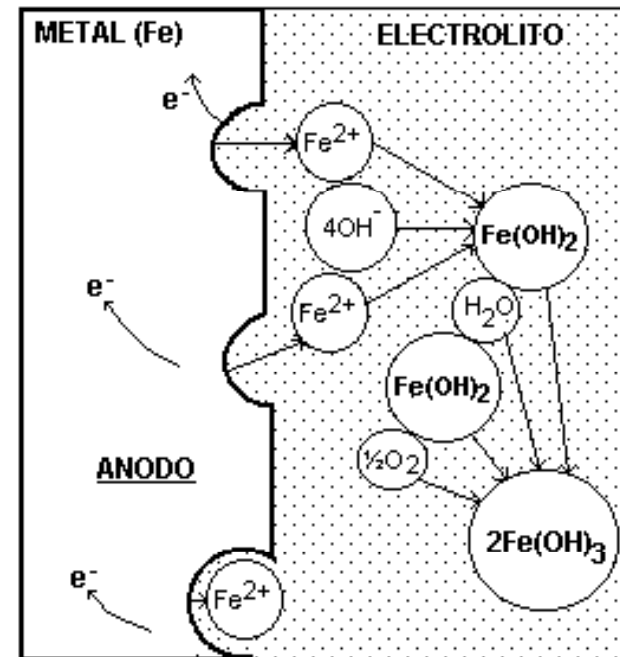


## Formas de corrosión

- Corrosión electroquímica, es en la que interviene una reacción química en la que hay transferencia de electrones e iones; por lo tanto, cuando la corrosión ocurre en un medio acuoso es de carácter electroquímico.



**Pila galvánica de corrosión.**

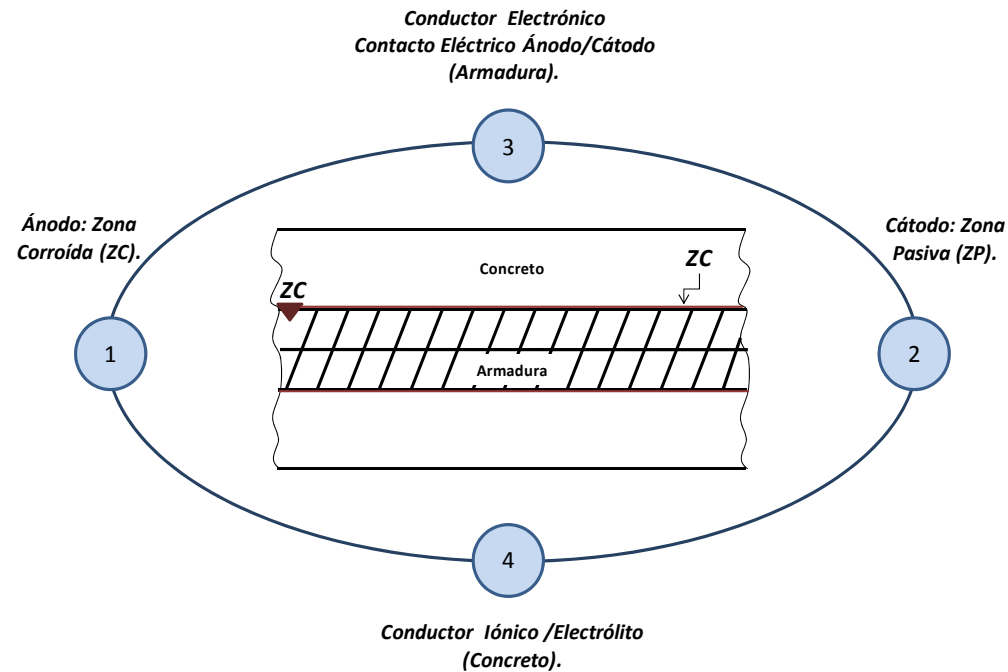


Formación de  $\text{Fe(OH)}_2$  y de  $\text{Fe(OH)}_3$  en el ánodo.

Pedro Castro-Borges



## Formas de corrosión



- **Ánodo:** Zona donde ocurre o comienza la oxidación.
- **Cátodo:** Zona donde ocurre una reducción.
- **Conductor metálico:** Zona donde ocurre el flujo de electrones.
- **Electrolito:** Zona donde la corriente eléctrica es generada (concreto) por el flujo de electrones debido al medio que le rodea.



## El potencial electroquímico

- Para que ocurran todas las reacciones mencionadas anteriormente en la pila galvánica debe haber un movimiento de electrones del ánodo al cátodo por el hilo conductor. Este desplazamiento es debido a la **diferencia de potencial** que existe entre ambos metales. La diferencia de potencial se define como el trabajo realizado por el desplazamiento de los electrones.



## El potencial electroquímico

- Corresponde al potencial eléctrico generado cuando se sumerge un metal en una solución estándar (1M) que contenga sus propios iones, a una temperatura de 25º C y a una presión de 1 atmósfera. Al estar en contacto el metal con el electrolito se produce, por un lado, una tendencia a disolverse, quedando de esta manera, cargado negativamente:



- mientras que por otro lado, los iones del electrolito se depositan sobre el metal:





## El potencial electroquímico

- Se establece de esta manera un equilibrio entre la tendencia del metal a entrar en la solución para incrementar la concentración de iones y la tendencia opuesta de los mismos iones de regresar al metal para reducir la concentración de la solución:



- Para poder medir esta diferencia de potencial se adoptó un electrodo patrón que es el *electrodo normal de hidrógeno*, al cual, por convención se le asignó un valor de cero voltios.



## El potencial electroquímico

Tabla 2.2 .- Serie de Fuerza Electromotriz.

Sistema	Reacción de Equilibrio	E° (en volts vs E.N.H.)
Li <sup>+</sup> /Li	Li <sup>+</sup> + 1e <sup>-</sup> ↔ Li	-3.045
K <sup>+</sup> /K	K <sup>+</sup> + 1e <sup>-</sup> ↔ K	-2.925
Ca <sup>2+</sup> /Ca	Ca <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> ↔ Ca	-2.870
Na <sup>+</sup> /Na	Na <sup>+</sup> + 1e <sup>-</sup> ↔ Na	-2.714
Al <sup>3+</sup> /Al	Al <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup> ↔ Al	-1.660
Zn <sup>2+</sup> /Zn	Zn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> ↔ Zn	-0.762
Cr <sup>3+</sup> /Cr	Cr <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup> ↔ Cr	-0.740
Fe <sup>2+</sup> /Fe	Fe <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> ↔ Fe	-0.990
Ni <sup>2+</sup> /Ni	Ni <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> ↔ Ni	-0.250
Fe <sup>3+</sup> /Fe	Fe <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup> ↔ Fe	-0.036
H <sup>+</sup> /H <sub>2</sub>	2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> ↔ H <sub>2</sub>	0.000
Cu <sup>2+</sup> /Cu	Cu <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> ↔ Cu	+0.337
Ag <sup>2+</sup> /Ag	Ag <sup>2+</sup> + 1e <sup>-</sup> ↔ Ag	+0.800



## Funciones del electrodo de referencia.

- a) Dar una idea de la probabilidad de corrosión del electrodo, a través de la tabla llamada Serie de Fuerza Electromotriz.
- b) Predecir cual sistema se comportará como cátodo y cual como ánodo
- c) El electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>).

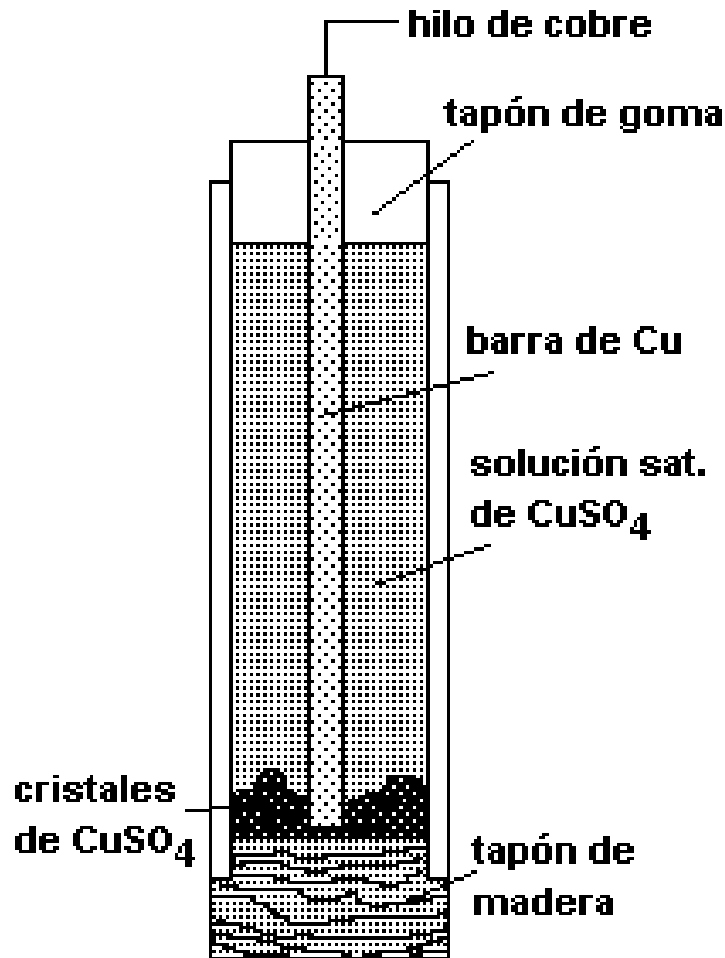


- d) Es muy práctico para medir potenciales en cualquier ambiente, su potencial de electrodo es +0.316 V vs. ENH a temperatura ambiente.

Pedro Castro-Borges



## Funciones del electrodo de referencia.



Electrodo de cobre/sulfato de cobre

Pedro Castro-Borges



## Pasivación y capas protectoras

- **Pasivación.**
  - Es el fenómeno de protección que ocurre cuando se tiene un producto insoluble. Se define como la pérdida de reactividad química bajo ciertas condiciones ambientales
- **Tipos de productos de corrosión**
  - a) Insolubles;** son películas muy delgadas de óxido, invisibles al ojo (óxido de cromo) que protegen contra la corrosión atmosférica
  - b) Solubles;** son óxidos inestables cuyas transformaciones llevan al consumo o pérdida del metal.



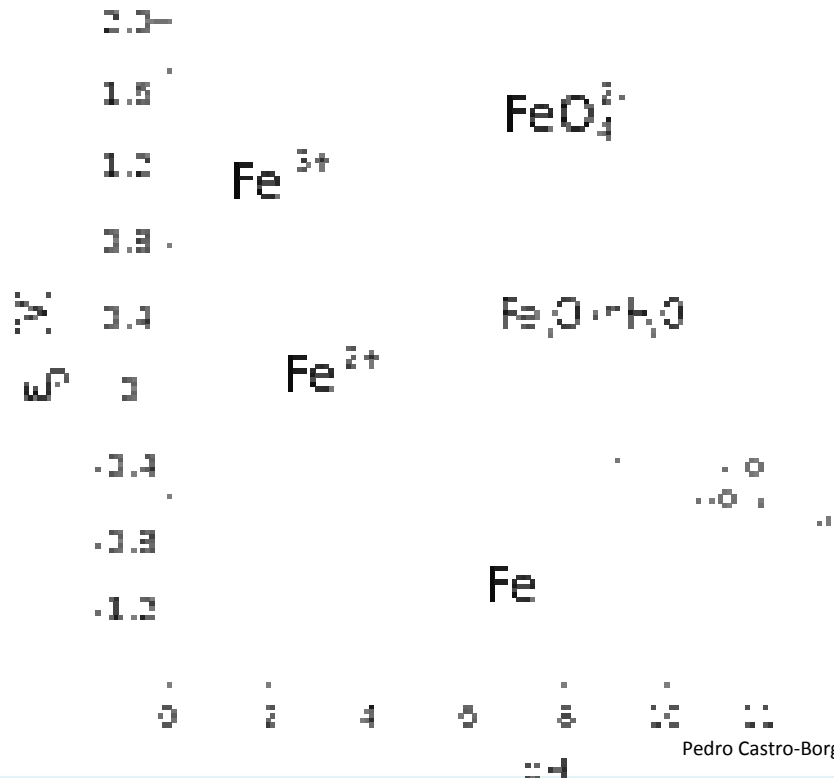
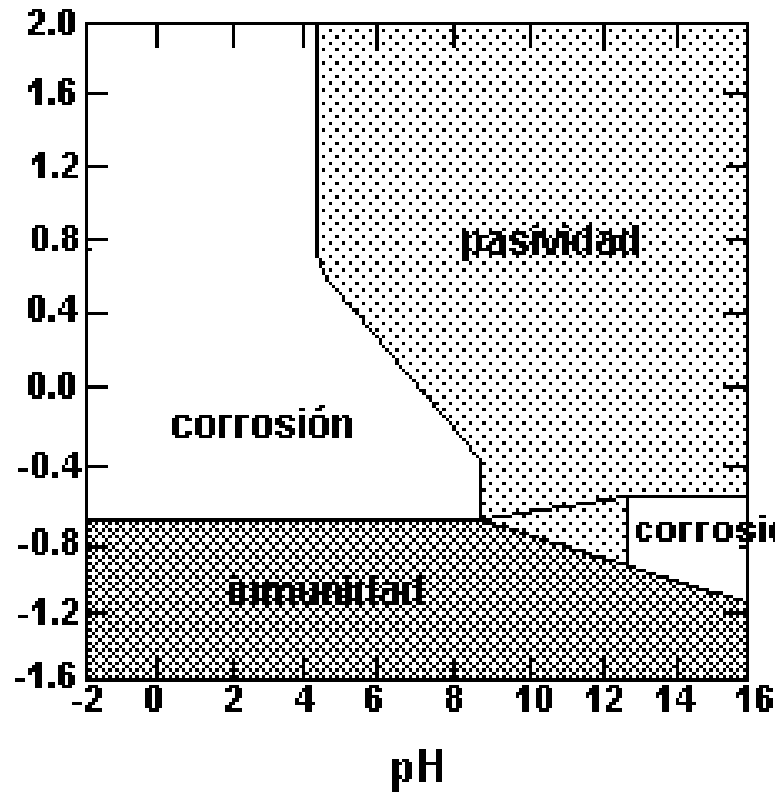
## Diagramas de Potencial - pH

- Muestran las condiciones del pH del electrolito y potencial favorables para la corrosión del metal
- Ayudan a estimar la composición de los productos de corrosión formados
- Dan información termodinámica pero no cinética



# Diagramas de Potencial - pH

$E^0$  (volts vs ENH)



Pedro Castro-Borges



## Tipos de corrosión

Algunos tipos de corrosión:

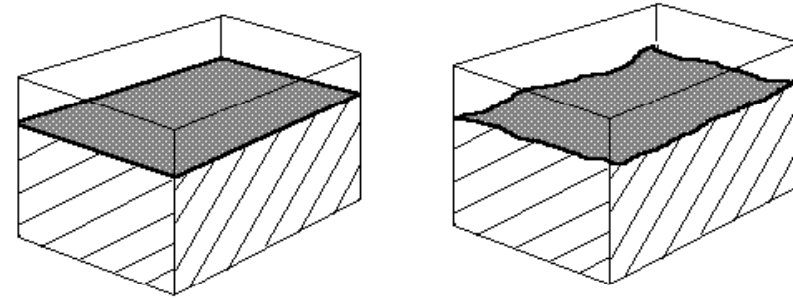
a) uniforme

b) generalizada irregular

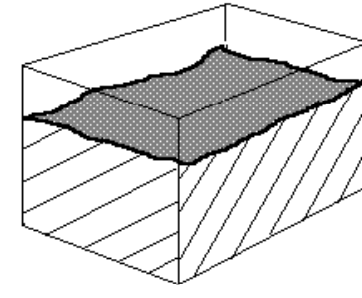
c) localizada

d) por picaduras

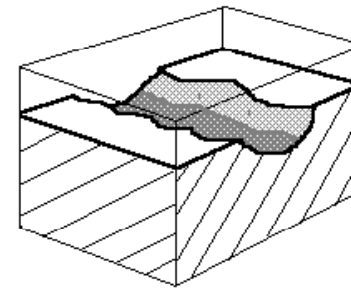
e) agrietamiento



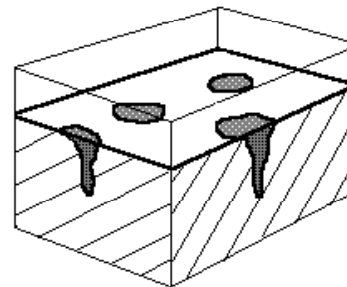
a)



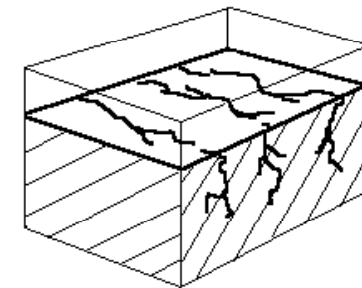
b)



c)



d)

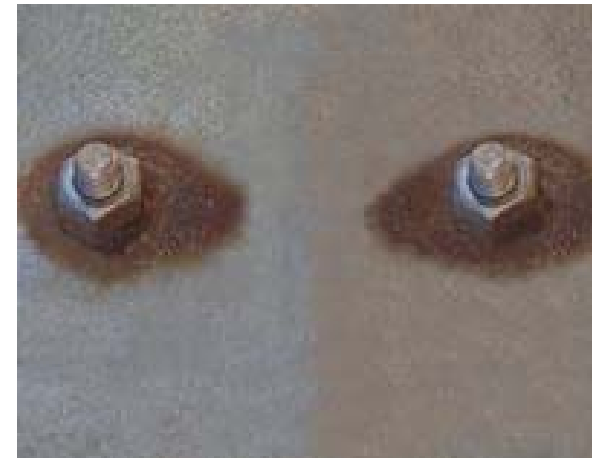
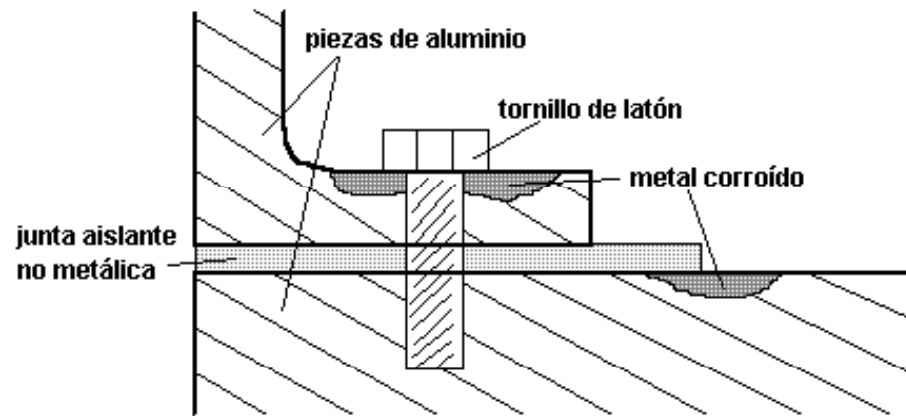


e)





## Tipos de corrosión

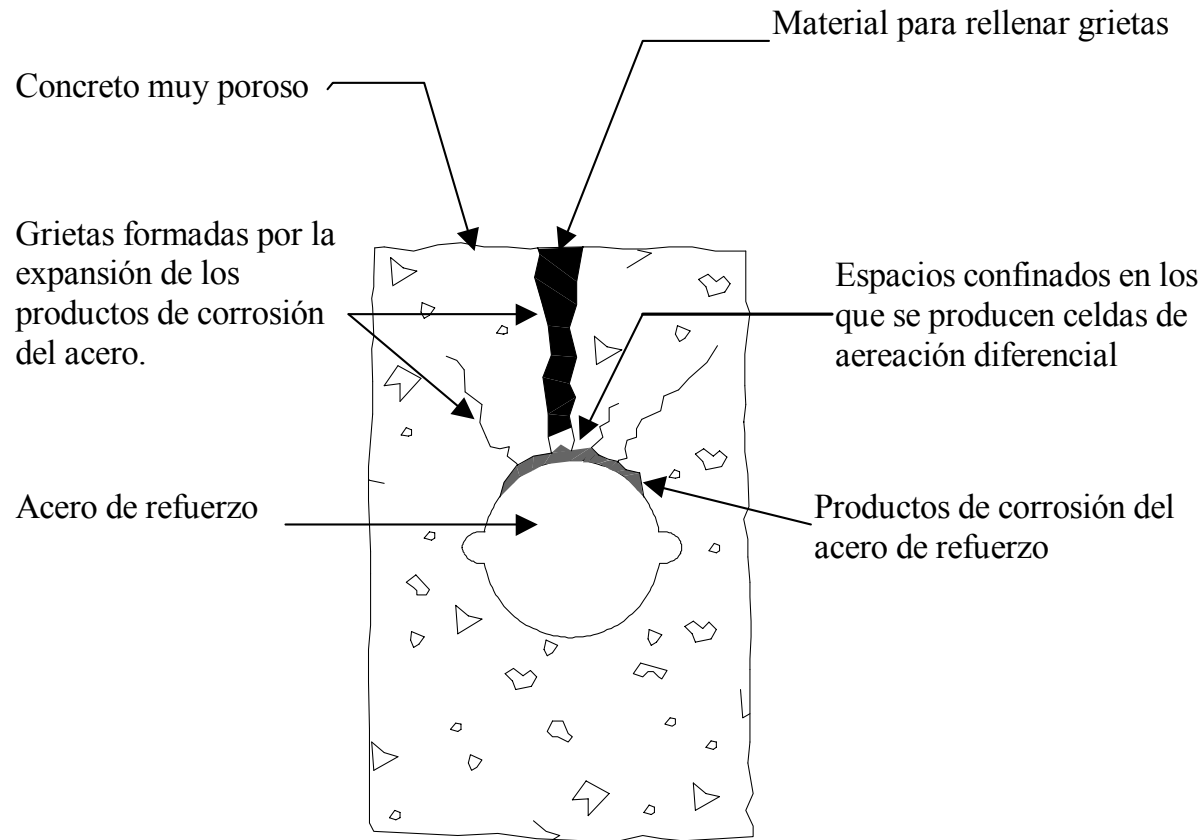


Ejemplo de corrosión galvánica

Pedro Castro-Borges



## Tipos de corrosión

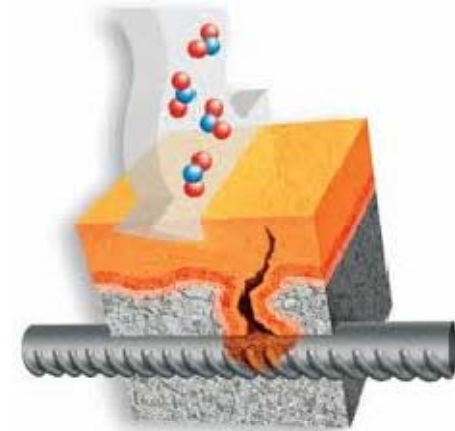


Ejemplo de situación que propicia corrosión en espacios vacíos por carencia de oxígeno.

Pedro Castro-Borges



## Tipos de corrosión



Corrosión uniforme del acero de refuerzo debido a la carbonatación



## Clasificación de los procesos de corrosión

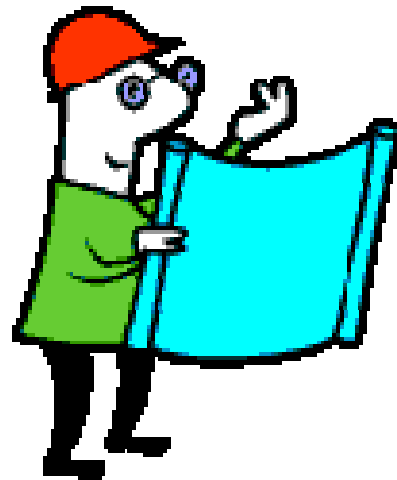
Clasificaciones de los procesos de corrosión, según diversos criterios.

Mecanismo	Medio agresivo	Morfología	Acciones físicas simultáneas	Sector industrial
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxidación directa (corrosión química o seca)</li> <li>- Corrosión electroquímica o húmeda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Atmosférica</li> <li>- De estructuras sumergidas</li> <li>- De estructuras enterradas</li> <li>- Por gases calientes</li> <li>- Por sales fundidas.</li> <li>- Por ácidos, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uniforme</li> <li>- Galvánica</li> <li>- Selectiva</li> <li>- Por picaduras</li> <li>- Intergranular</li> <li>- Bajo tensión</li> <li>- En lámina de cuchillo.</li> <li>- Exfoliante, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erosión-corrosión</li> <li>- Corrosión bajo tensión</li> <li>- Corrosión por cavitación</li> <li>- Corrosión por frotamiento</li> <li>- Corrosión fatiga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transporte</li> <li>- Aplicaciones marinas</li> <li>- Construcción</li> <li>- Petroquímica</li> <li>- Generación de energía</li> <li>- Industria alimentaria</li> </ul>

Esta clasificación no es única, ya que los tipos de corrosión se pueden clasificar también de acuerdo al medio donde se desarrolla, a los sectores industriales que atacan, a las acciones físicas etc.



Una vez conocido algunos principios básicos ya se pueden entender los problemas que ocurren en la corrosión del acero de refuerzo



## Protección natural del concreto al acero

- **El hidróxido de calcio**
  - La capa pasivante
  - Protección física (agua, oxígeno, cloruros, gases)
  - El efecto barrera
  
- **Causas de la corrosión del acero embebido en concreto**
  - Presencia de cloruros
  - Pérdida de alcalinidad

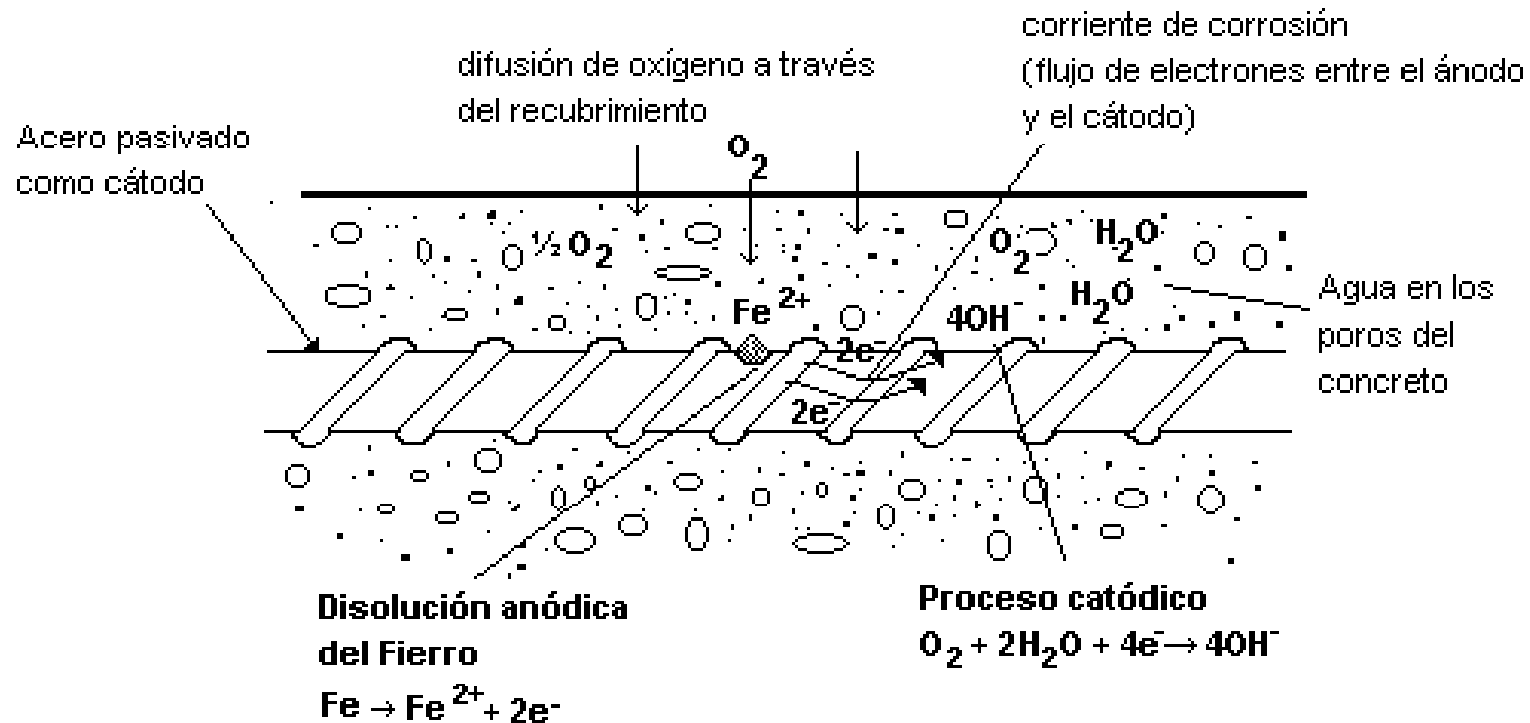


## Carácter electroquímico de la corrosión del refuerzo

- a) La fase sólida y la fase líquida
  
- b) La existencia de cátodos y ánodos debida a heterogeneidades en
  - La escala macroscópica (estructura porosa, agregados, proceso de fabricación, etc.)
  - La escala microscópica (gradientes de temperatura, acceso no uniforme de sales y agua, etc.)
  
- c) En la fase líquida hay características que controlan la corrosión del refuerzo:
  - Composición y cantidad de la solución contenida en los poros del concreto
  - Estructura y distribución de la red de poros
  - Presencia de hidróxido de calcio precipitado



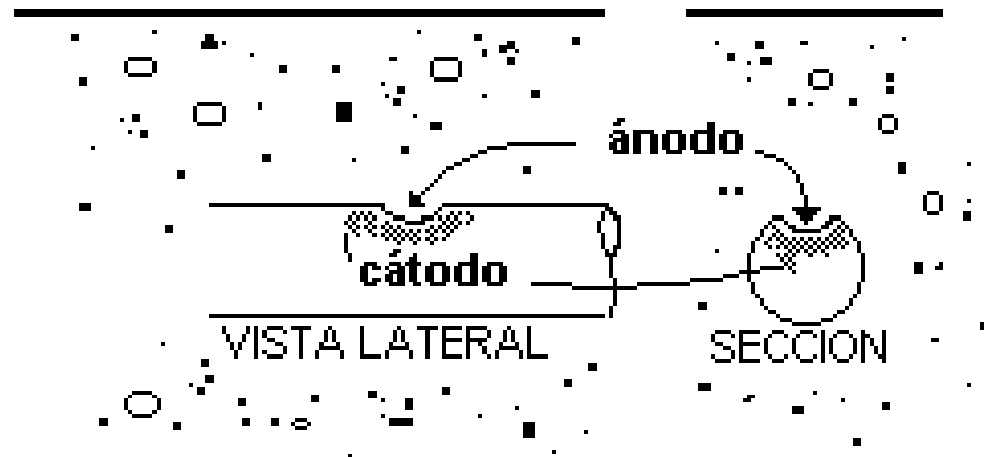
# Reacciones electroquímicas durante la corrosión del refuerzo:





## Tipos de celda (pila) de corrosión

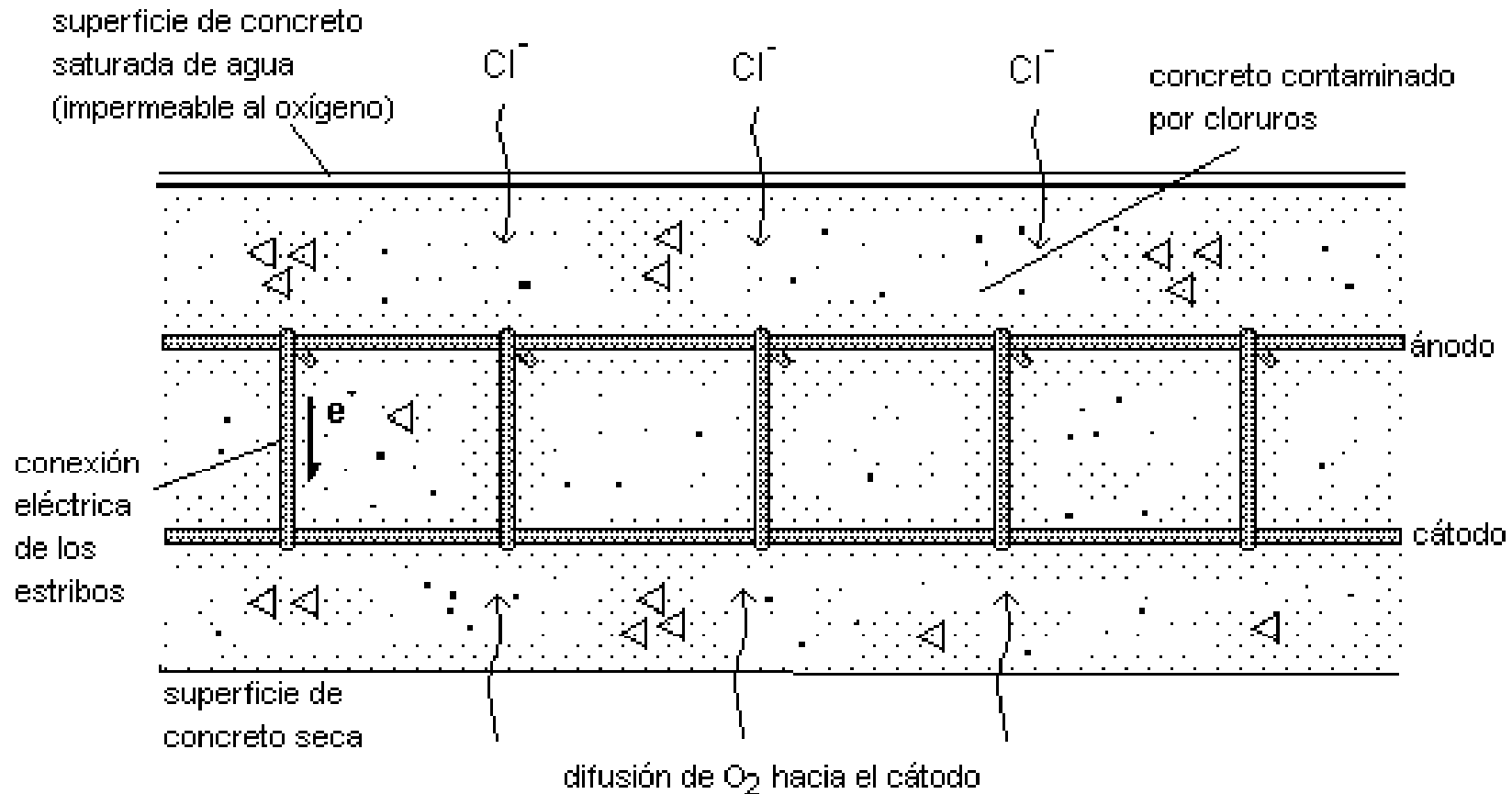
- La microcelda



**Fig. 2a.- Microcelda.**

## Tipos de celda (pila) de corrosión

- **La macrocelda**

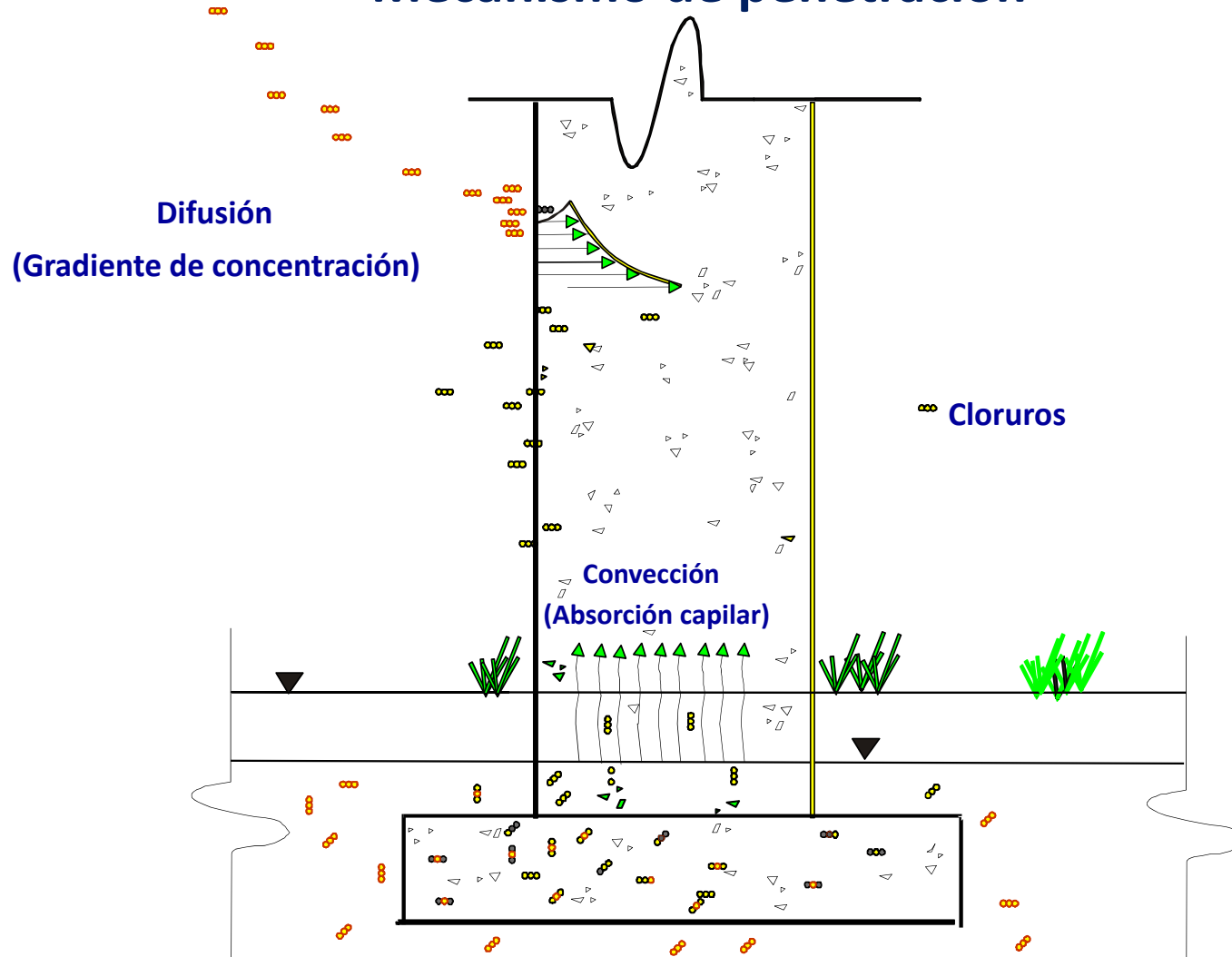


## Corrosión localizada: ataque por cloruros

- **Formas de ingreso**
  - **Mecanismos de penetración de cloruros**
    - Por succión capilar
    - Por difusión
    - Por mezcla de ambos
  - **Mecanismos de ataque de cloruros**
    - Teoría de la formación del compuesto



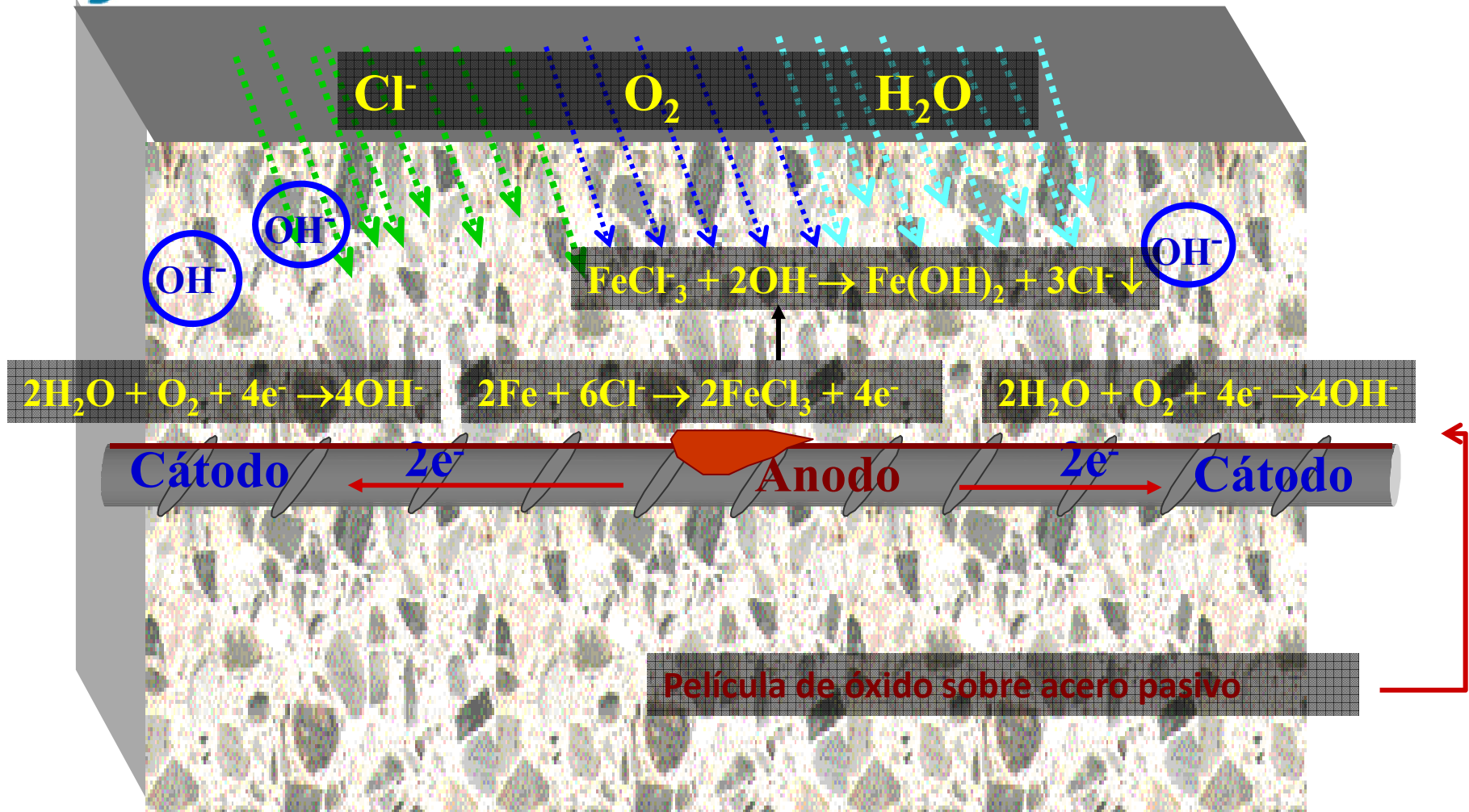
# Mecanismo de penetración



Pedro Castro-Borges



# Mecanismo de ataque



## Niveles de cloruro iniciadores de la corrosión

- Para que los cloruros rompan la capa pasivante de la barra y comience el proceso de corrosión requieren estar en una concentración llamada nivel iniciador de la corrosión.
- Este valor depende de numerosos factores:
  - El proporcionamiento del concreto,
  - El tipo de cemento (finura, contenido de yeso, contenido de aluminato tricálcico, etc.)
  - La relación agua/cemento (a/c),
  - El contenido de sulfatos,
  - Las condiciones de curado, edad, e historia ambiental del concreto,
  - Rugosidad y limpieza de la barra de refuerzo.
- Por esta razón no se puede determinar un valor fijo general para todos los tipos de concreto.

Pedro Castro-Borges



## Corrosión generalizada (Carbonatación)

- Se denomina así al proceso en el que el dióxido de carbono de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto y da lugar a una neutralización de todo el material; produciéndose un cambio abrupto del pH generando la aparición de un frente carbonatado, que se revela con el indicador de fenolftaleína<sup>1</sup>.
  
- Concentración típica de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (0.03 %)



## Corrosión generalizada (Carbonatación)

- El proceso de carbonatación:

Reacciones que se producen en la solución del poro:

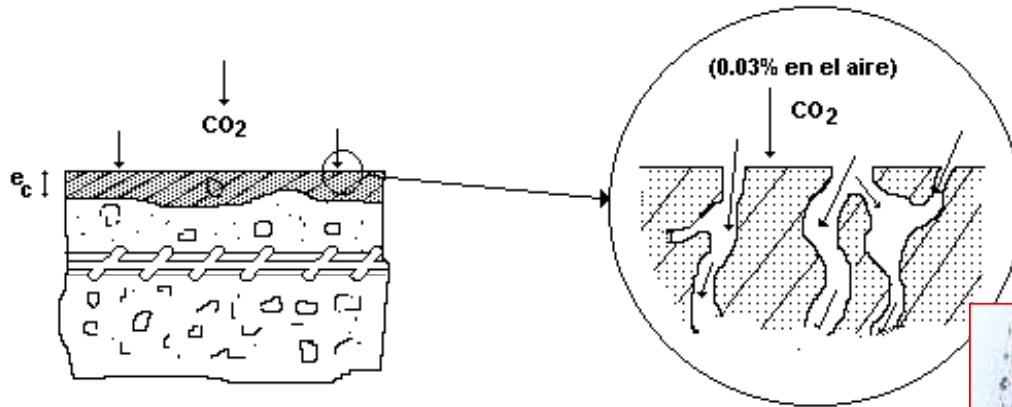


- Desligamiento de cloroaluminatos cuando la carbonatación avanza (fase sólida)

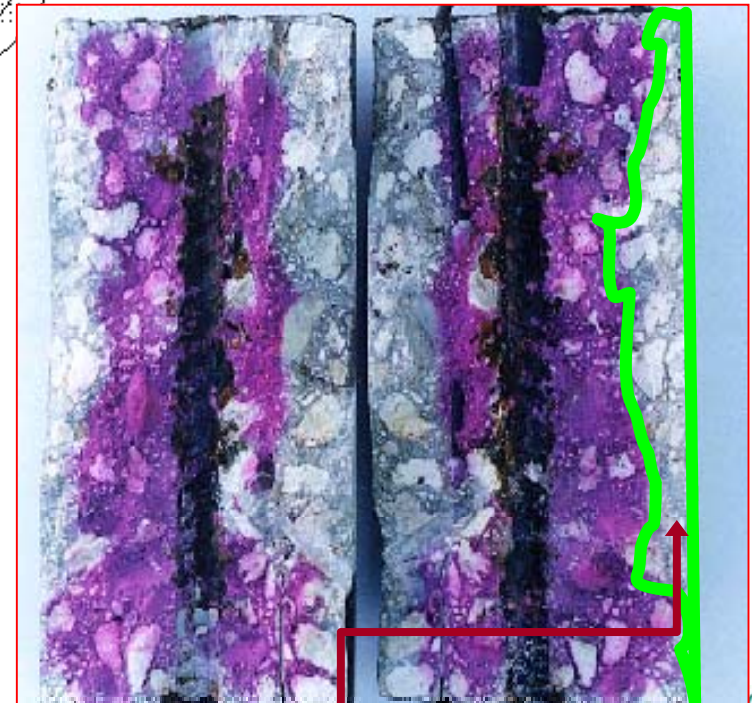




# Carbonatación en el concreto



Frente de carbonatación y corrosión generalizada del refuerzo



Pedro Castro-Borges



## Carbonatación en el concreto

- Lo que ocurre cuando el frente de carbonatación alcanza el refuerzo
  - Se vuelve inestable la capa pasiva
  - Se inicia el proceso de corrosión
  - Se reduce la sección transversal de la barra con el consiguiente peligro
  - Los productos de corrosión se expanden causando fallas del concreto, tensión (grietas), o manchas en la superficie si logran difundirse
  - Efectos combinados de carbonatación y cloruros



## Fórmulas para modelar el fenómeno de la carbonatación

- La más común dice que este fenómeno sigue un tendencia parabólica: la profundidad de carbonatación,  $x$ , es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de exposición,  $t$ .

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

$X$  = Profundidad de carbonatación, mm

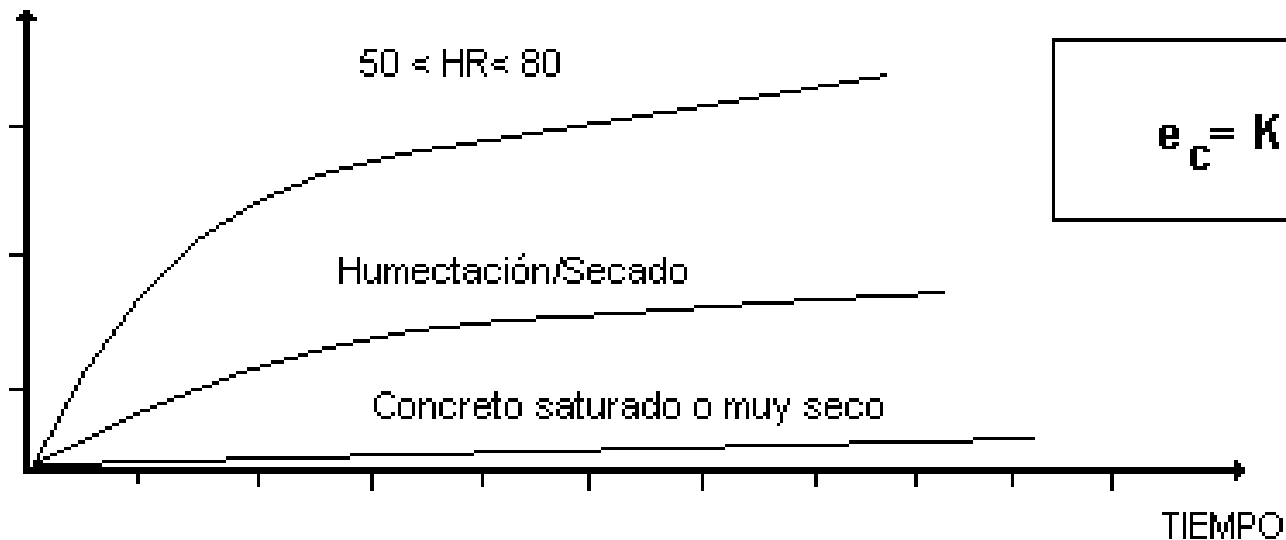
$K$  = Constante de carbonatación, mm.año<sup>-0.5</sup>

$t$  = Tiempo en años



## Relación del espesor carbonatado con el tiempo y con la humedad ambiental

Espesor carbonatado



Pedro Castro-Borges



## ¿ Cómo actúan los cloruros?

