

*Sesión incorporación a la Academia de Ingeniería de la Provincia de Buenos Aires
15 de junio de 2021*

A LA SUSTENTABILIDAD POR LA DURABILIDAD DEL HORMIGON ESTRUCTURAL

M^a Carmen Andrade Perdrix

candrade@cimne.upc.edu



*International Centre for Numerical
Methods in Engineering*

AGRADECIMIENTO

- A la Junta Directiva de la Academia y su Presidenta por el nombramiento y la persistencia en mi incorporación
- A Luis Lima por su dedicación al Grupo Latinoamericano de la RILEM y su interés en mi colaboración



CONTENIDO

- Agradecimiento
- Referencias a ingenieros ilustres
- Hormigón estructural: el material del siglo XX: barato, funcional y resistente
- RETOS DEL SIGLO XXI
 - Efecto invernadero del CO₂
 - Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU
 - El hormigón como sumidero de CO₂: Re-carbonatación
 - Método de calculo en un inventario de estructuras
 - Durabilidad
 - Vida útil ¿es posible predecirla?
 - Códigos: métodos probabilistas, métodos avanzados de calculo
 - Método de la resistividad eléctrica

REFERENCIAS EN LA INGENIERIA

Profesor **Enrique Costa Novella**

Catedrático de Ingeniería Química

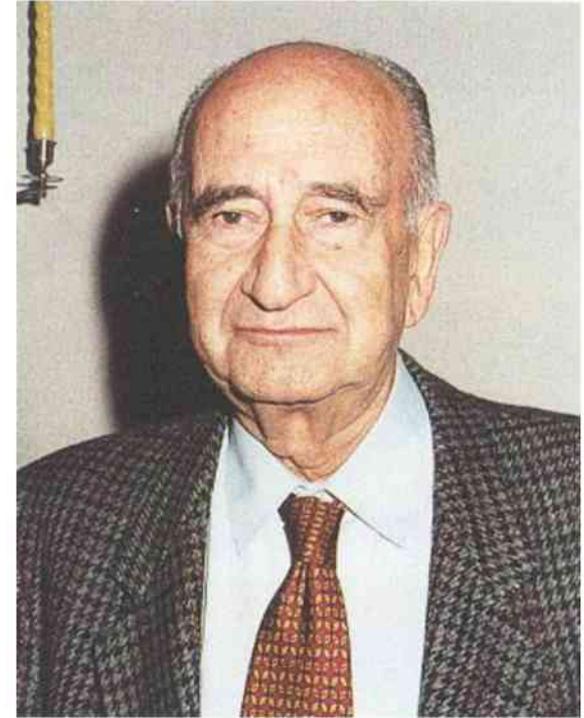
Universidad Complutense de Madrid

Decano de la Facultad

Vicerrector de la Universidad Complutense

Director General de Universidades e Investigación

Tiene el premio «Leonardo Torres Quevedo» de investigación técnica (1.985). Es Académico Numerario de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales. Ha sido asesor de REPSOL, S.A.



Profesor **Angel Vian Ortuño**

Catedrático de Química Industrial y Economía

Universidad Complutense de Madrid

Rector de la Universidad Complutense

Colaborador de la empresa Minas de Riotinto



REFERENCIAS EN LA INGENIERIA

Eduardo Torroja Miret

“...En los años 30 y 40 la investigación se concebía como un trabajo individual al estilo de un Ramon y Cajal que pasaba las noches y días observando por un microscopio, en apariencia aislado de su entorno.

Sin embargo Torroja organiza un Instituto donde el trabajo en equipo es la base de su funcionamiento. Es tanto como suponer que todos miren por el mismo microscopio.

Además pretende que este trabajo llegue al entorno social, tanto al empresarial como al puramente artesanal y

que a la vez el trabajo se proyecte fuera de la fronteras del país, tanto hacia el oeste como hacia el Este (viajó a Rusia y otros países del Este cuando no existían relaciones diplomáticas formales) y fundamentalmente hacia Iberoamérica....”

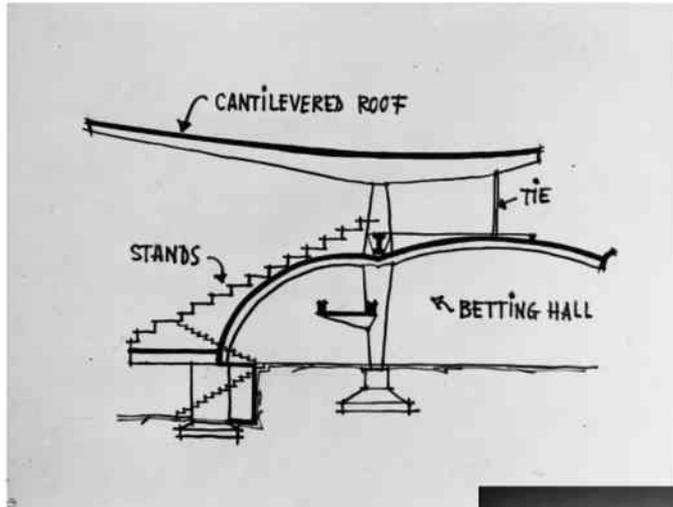
Carmen Andrade - con motivo del centenario de su nacimiento



HIPODROMO DE LA ZARZUELA

EJEMPLO DE ESTRUCTURA DURABLE

Arniches, Dominguez y Torroja 1933-35



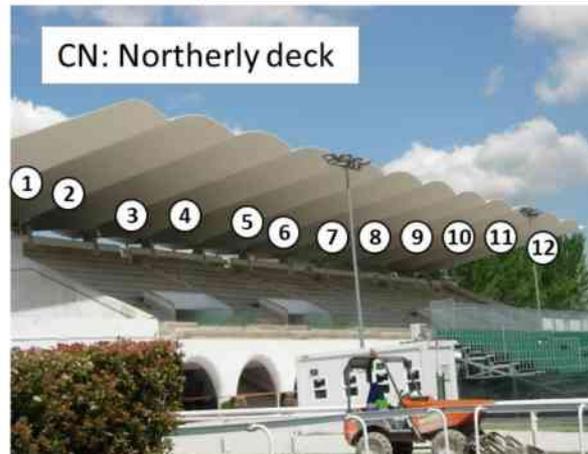
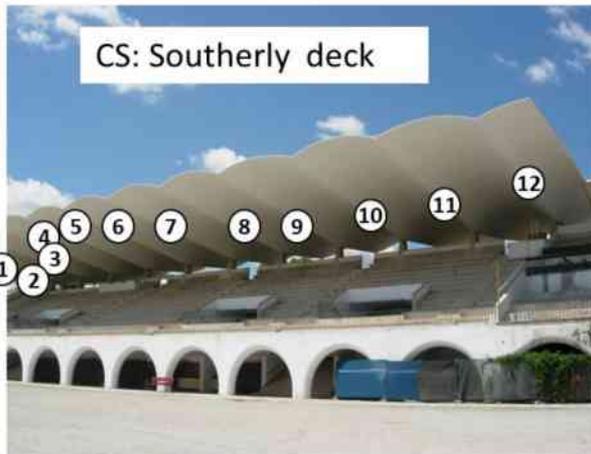
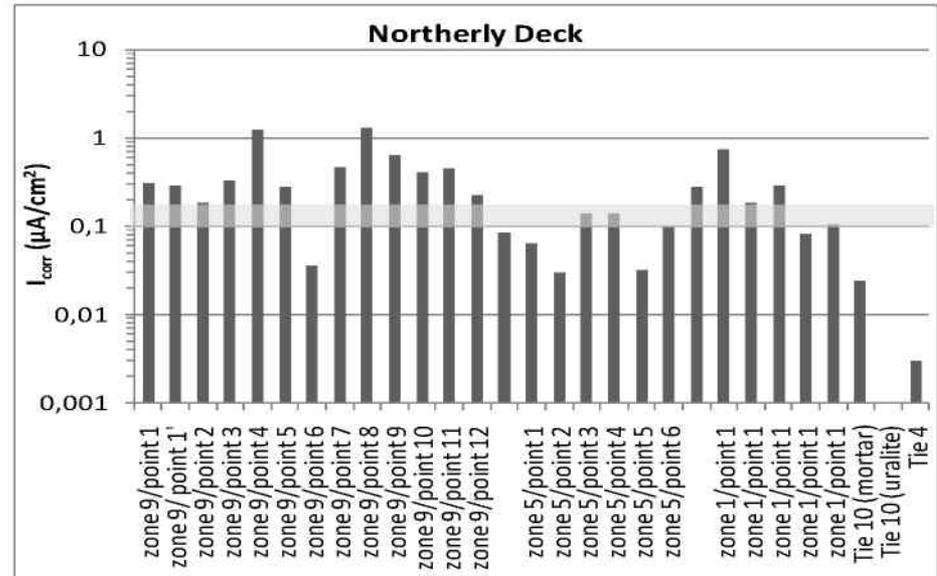
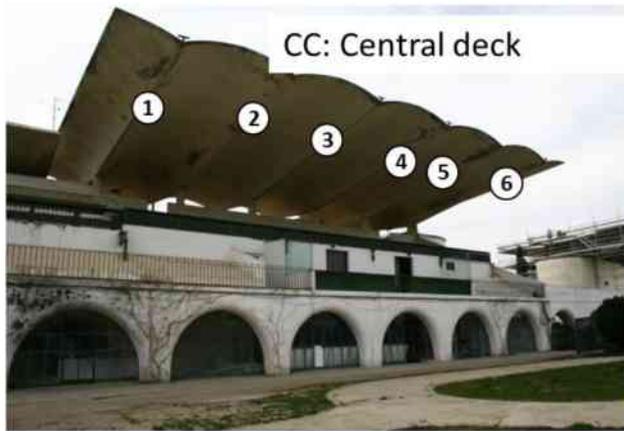
2014



CONSTRUCCION INSPECCION



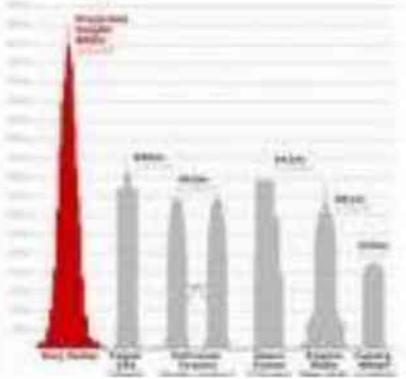
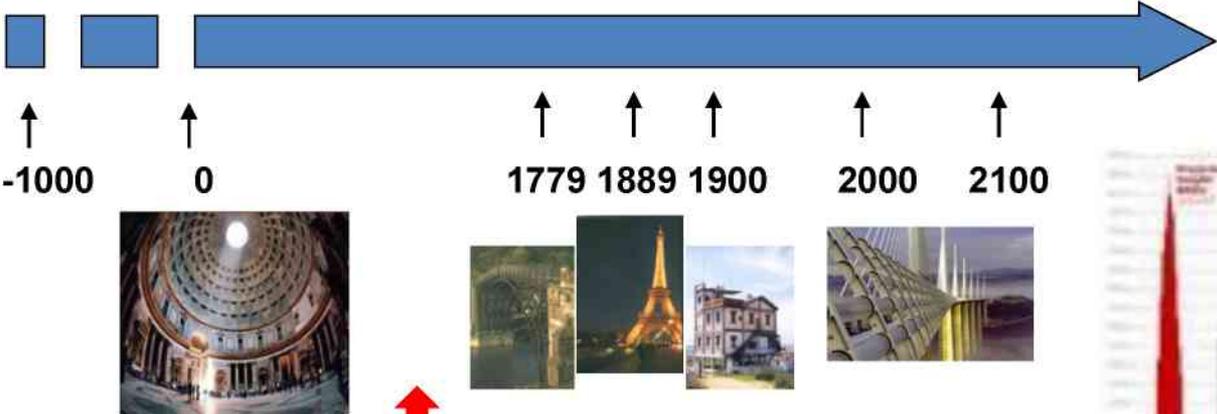
INSPECCION Hipódromo de la Zarzuela-2014



REPARACION Hipódromo de la Zarzuela 2014



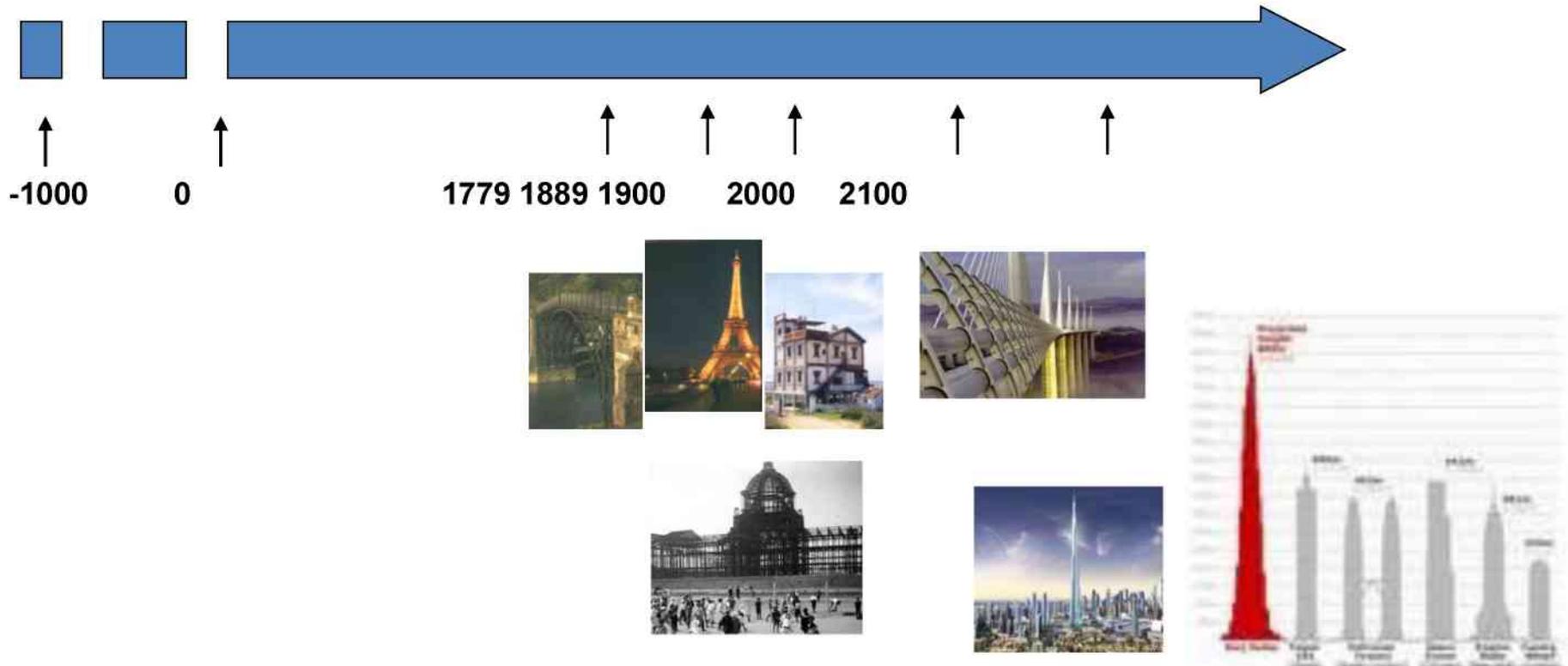
MATERIALES ESTRUCTURALES DE CONSTRUCCION USADOS A LO LARGO DE LA HISTORIA



Piedra madera ladrillo adobe

A red rounded rectangle containing four images of buildings made from different materials. From left to right: a stone building (Piedra), a wooden cabin (madera), a brick building (ladrillo), and an adobe building (adobe). A red arrow points from the 'ladrillo' image up to the timeline diagram.

HORMIGON ESTRUCTURAL



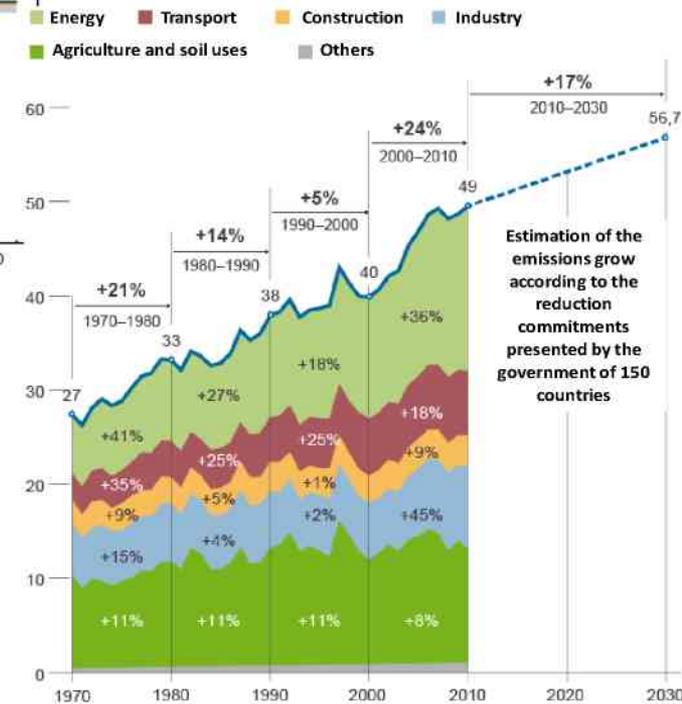
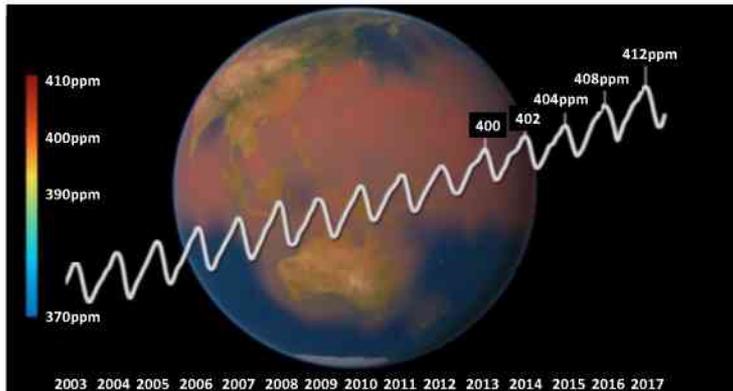
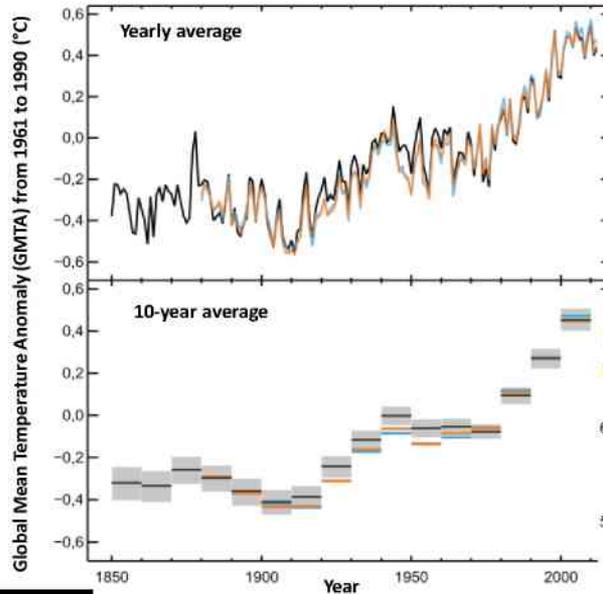
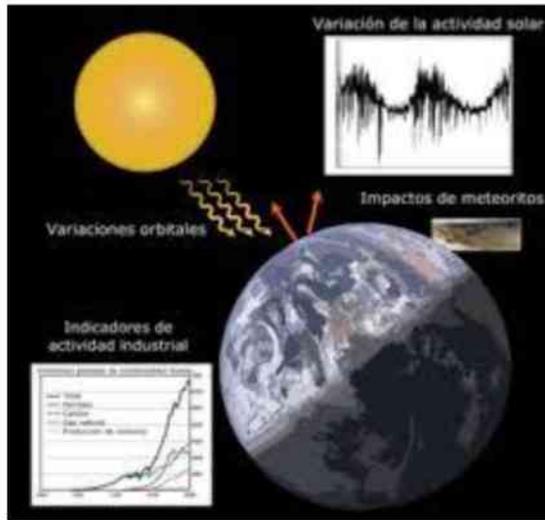
¿Qué retos tiene en el siglo XXI?

RETOS DEL HORMIGON ESTRUCTURAL EN EL SIGLO XXI

- Sustentabilidad
 - Reducción huella de carbono
 - Considerar el ciclo de vida
 - Durabilidad
 - ¿es posible predecir la vida útil ?
 - Cómo conseguir hormigones sustentables y durables
 - Método de la resistividad eléctrica

HUELLA DE CARBONO

Las temperaturas medias se están incrementando debido al desarrollo industrial



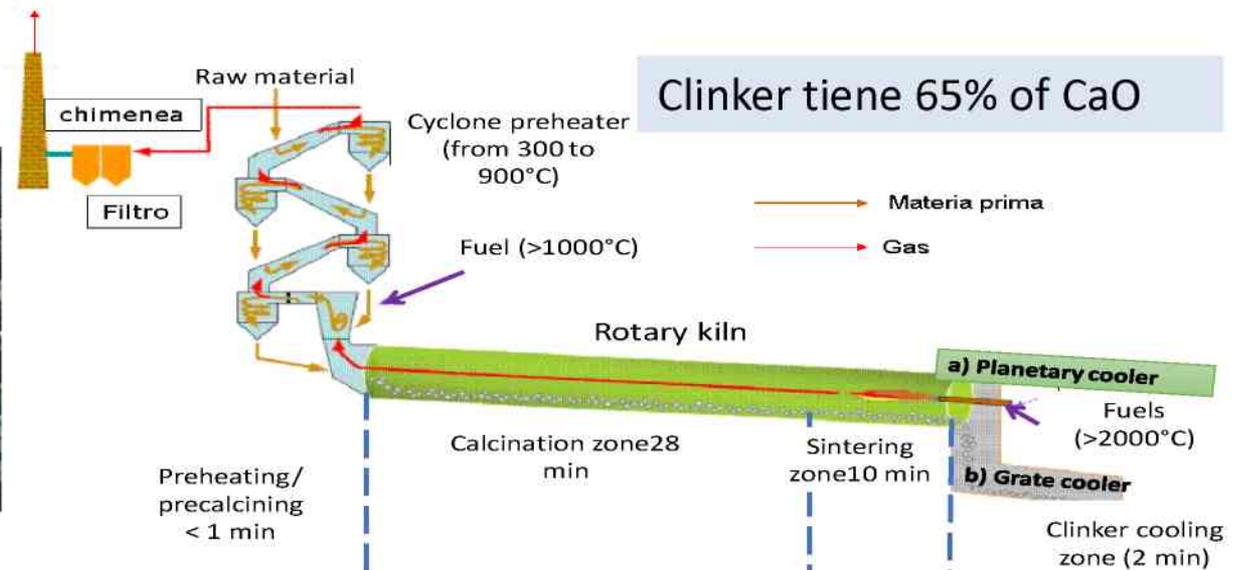
OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA ONU

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



EL IPCC FIJA LA EMISION DE CO₂ EN LA PRODUCCION DE CLINKER

- Clinkerización (decarbonación): **520 kg CO₂/t clinker**
 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- **El combustible libera 480 Kg de CO₂ /t de Clinker**

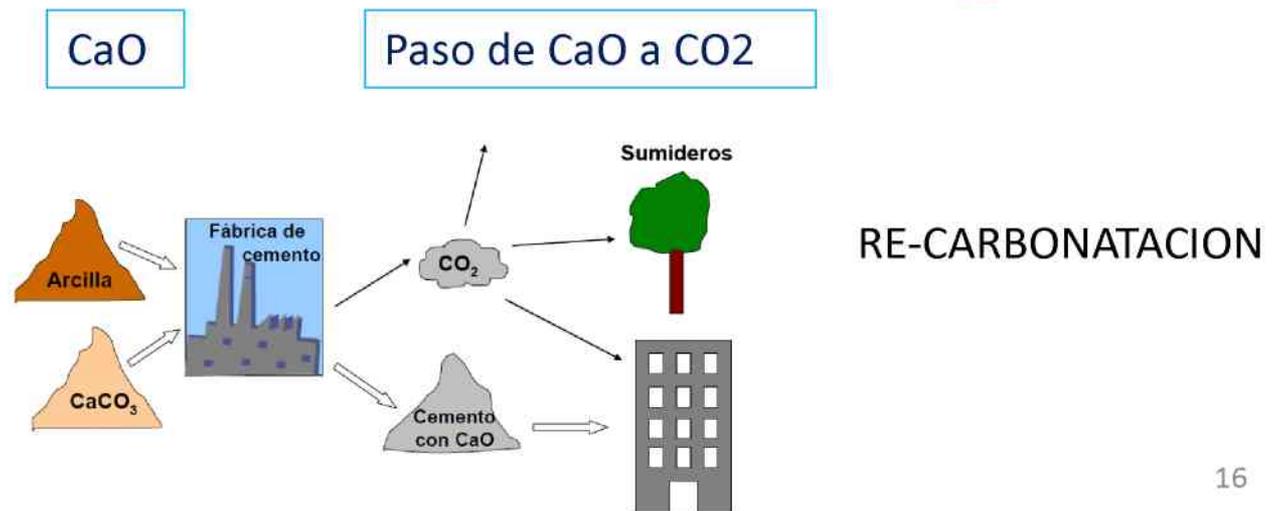


LA CARBONATACION ES LA VUELTA DE LAS MATERIAS PRIMAS A SU ESTADO ORIGINAL NATURAL

Por tendencia termodinámica los componentes del Clinker tienden a volver a ser óxidos y carbonato cálcico

El máximo de CO_2 incorporado a un cemento Portland, suponiendo un 95% clinker por cemento, es:

$$\text{CO}_2 \text{ secuestrado} = \frac{65}{100} \cdot 0.95 \cdot \left(\frac{44}{56}\right) = 0,49 \text{ Kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{Kg cemento}}$$

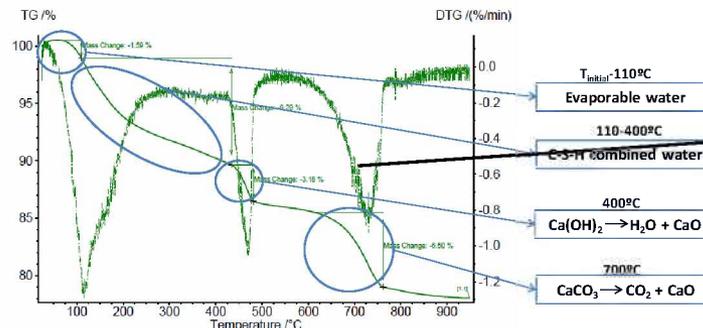


GRADO DE CARBONATACION (DoC)

- Es la proporción de CO_2 incorporado (reaccionado) en relación al máximo que podría llegar a ser.

$$GdC (DoC) (\%) = \frac{\text{CO}_2 \text{ en la zona carbonatada}}{\text{Maximo de CO}_2 (65\% \text{ CaO})}$$

- En la zona carbonatada se hace un análisis termogravimétrico y se calcula la cantidad de CO_2 incorporado:



Carbonato cálcico

PARQUE CONSTRUIDO EN UN PAIS

CALCULOS BASADOS EN PRODUCCION DE HORMIGON

“CO₂ STORAGE CAPACITY” (SECUESTRO CO₂)

Inventario de producción hormigón
Cemento/m³ de hormigón y mortero producido



PARQUE CONSTRUIDO

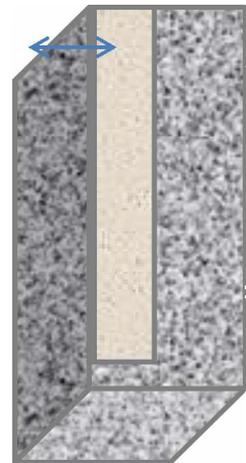


Relación S/V

GROSOR EQUIVALENTE CARBONATADO

VOLUMEN CARBONATADO = GROSOR (m) X SUPERFICIE EXPUESTA (m²)

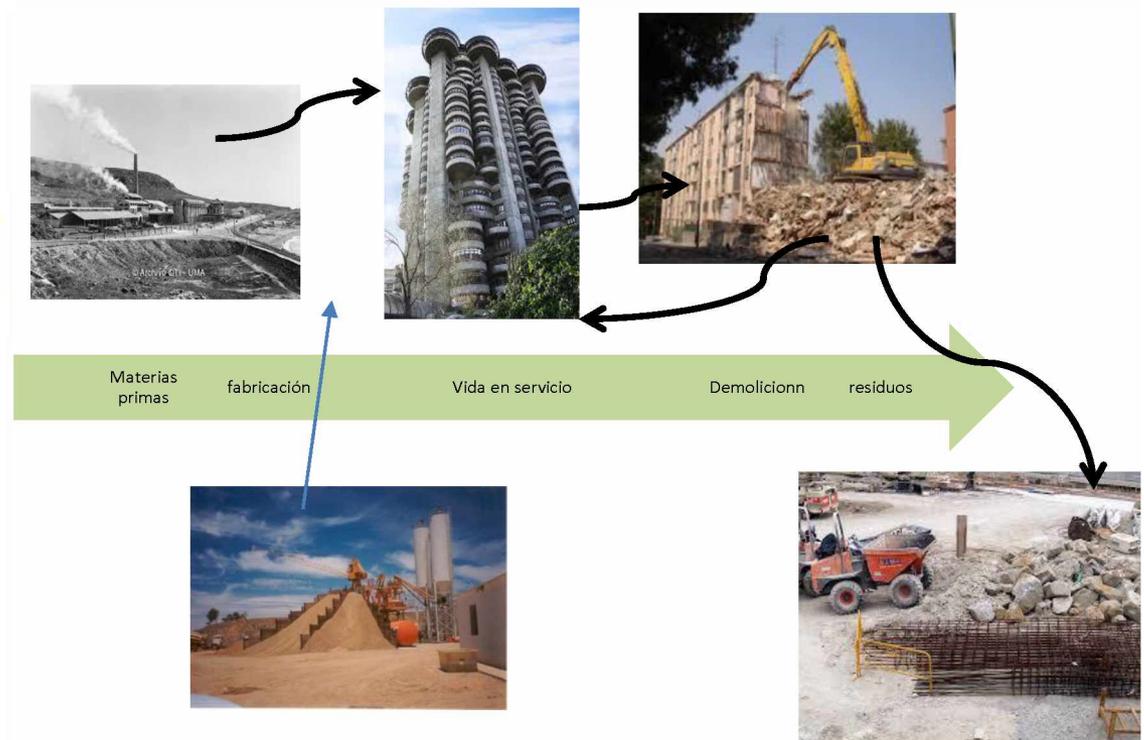
$$\%CO_{2,abs} \left(\frac{kg_CO_2}{kg_cem_carb} \right) \cdot dosif \left(\frac{kg_cem_carb}{m^3\ horm_carb} \right) \cdot profun(m_horm_carb) \cdot \frac{m^2\ horm_exp}{m^3\ horm} = \frac{kg_CO_{2,abs}}{m^3\ horm}$$



CICLO DE VIDA ¿CUÁNTO TIEMPO?

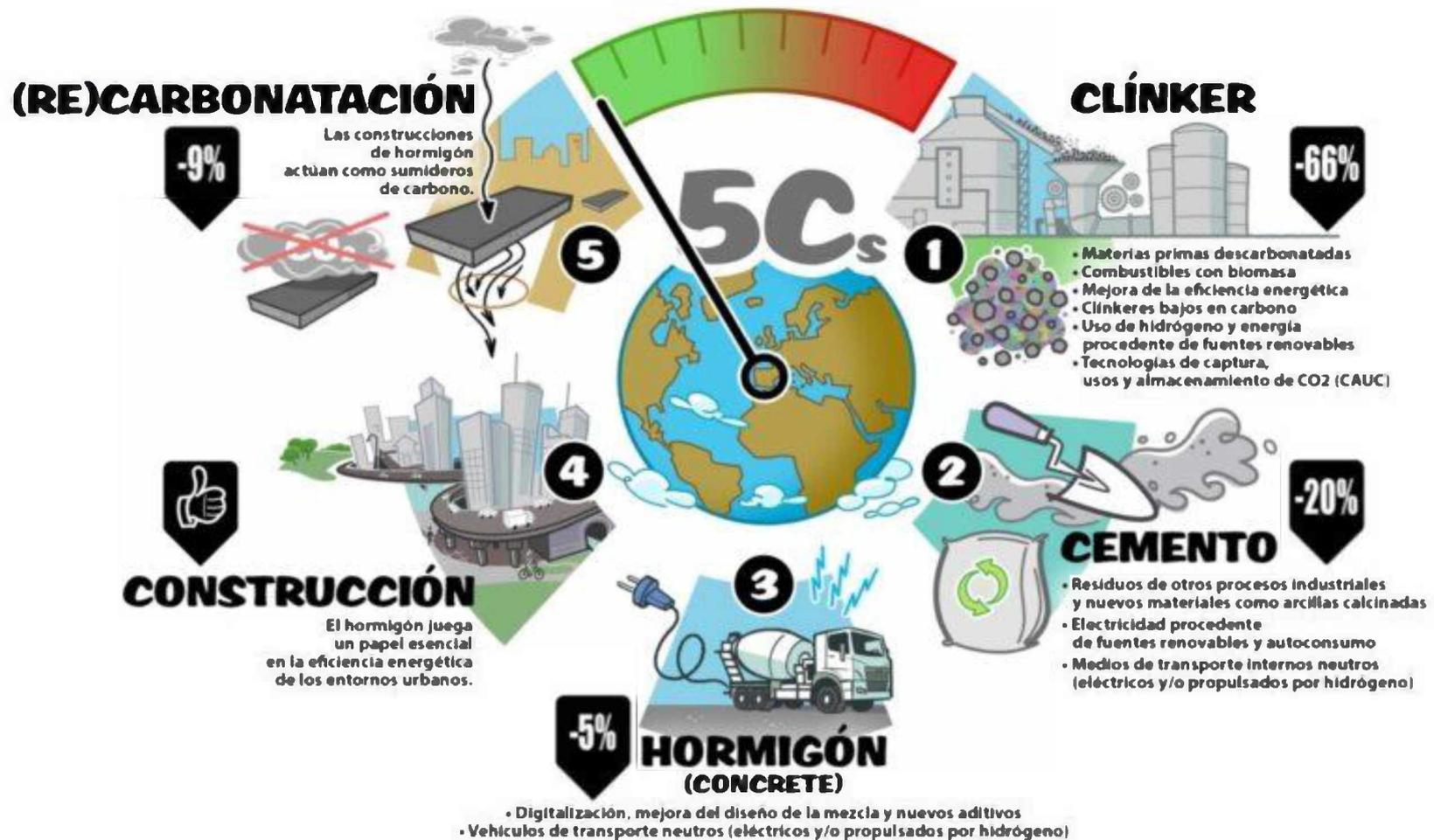
Cual ciclo de vida considerar

- ¿50 o 100 años? La profundidad carbonatada cambia
- El hormigón que no vuelva al horno, se va carbonatando progresivamente si esta expuesto a la atmosfera



HOJA DE RUTA DEL SECTOR CEMENTO

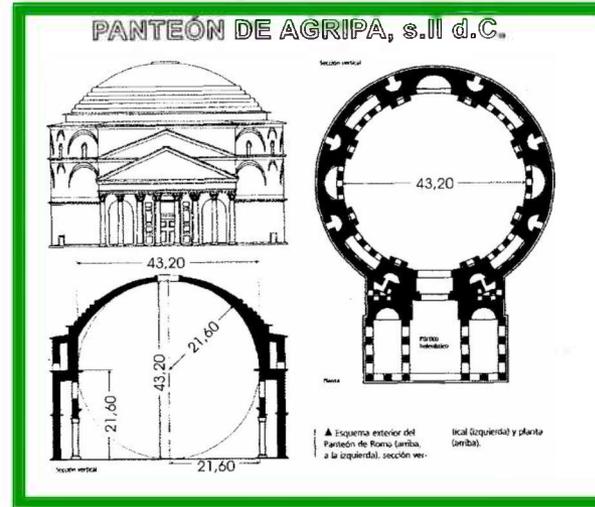
reducir emisiones en todas las etapas



DURABILIDAD

HORMIGON ANTIGUO

EL PANTEÓN DE ROMA



El Panteón de Agripa o Panteón de Roma es un templo de planta circular erigido en Roma por Adriano, entre los años 118 y 125 d. C. **Primera construcción realizada en “hormigón” hace más de 2000 años.**

Cúpula de 43 m de diámetro.

ESTADIO DE MARACANA 1950

la marquesina ha tenido que ser demolida pues la armadura estaba corroida

antes



despues



CONSECUENCIAS ESTRUCTURALES de la corrosión

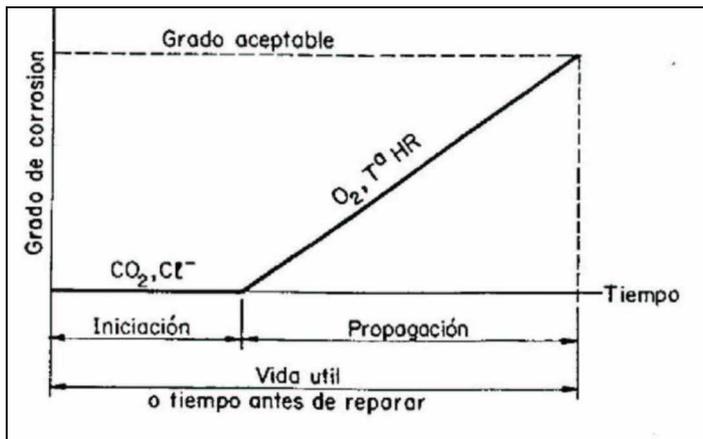
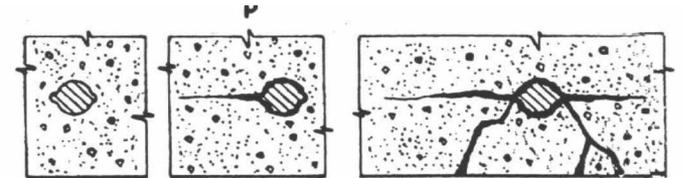
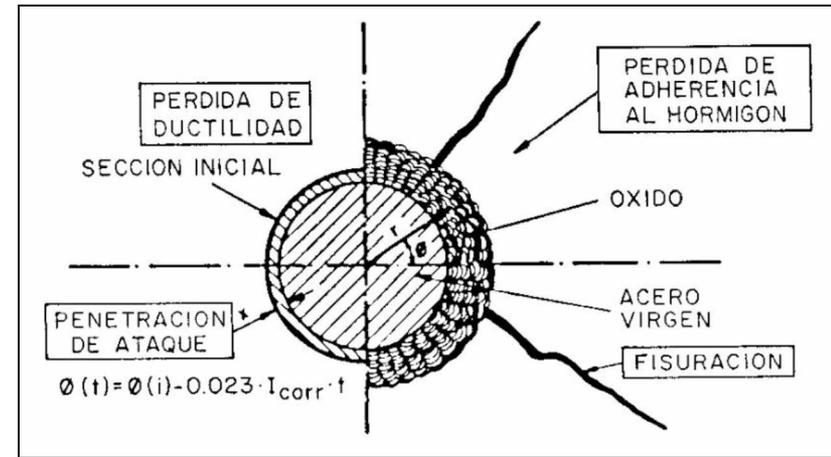
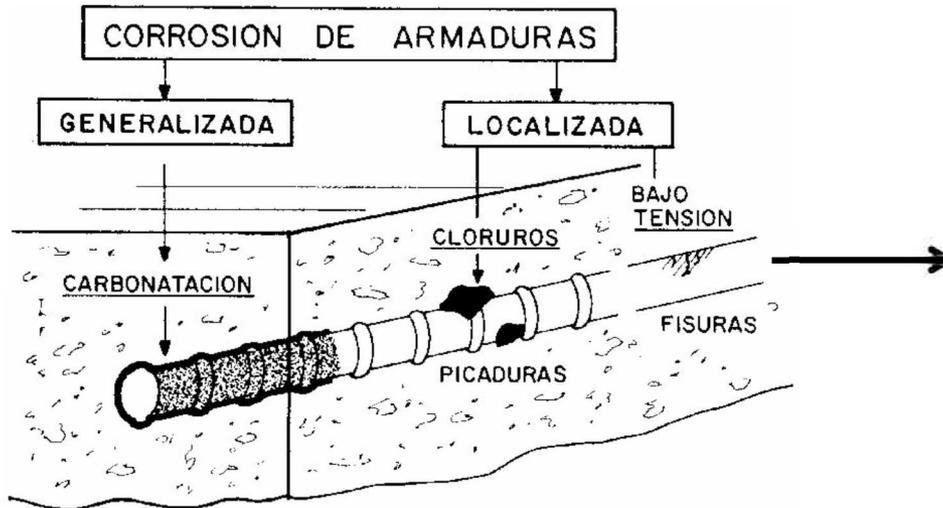


Diagrama de vida util

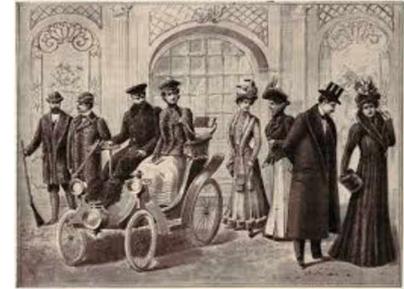
RETOS DEL HORMIGON ESTRUCTURAL EN EL SIGLO XXI

- Sustentabilidad
 - Reducción huella de carbono
 - Considerar el ciclo de vida
 - Durabilidad
 - ¿es posible predecir la vida útil ?
 - ¿Cómo conseguir hormigones sustentables y durables
 - Método de la resistividad eléctrica

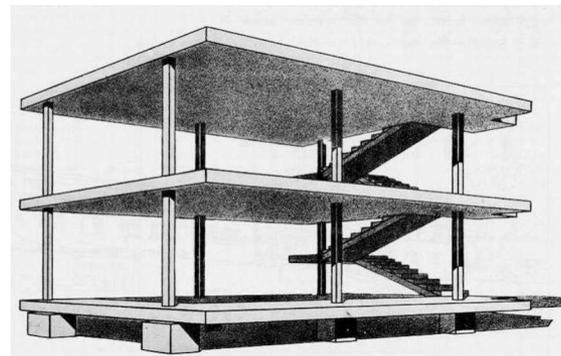
CALCULO DE LA VIDA UTIL

no se sabe todavía calcular con exactitud

- En 1920 casi todos los edificios eran de estructura de madera, de piedra, ladrillo o metálica. No eran de hormigón
- Los estructuras de hormigón no se empezaron a usar hasta hace unos 100 años
- Hay modelos pero no están calibrados durante 100 años



AÑOS 1920



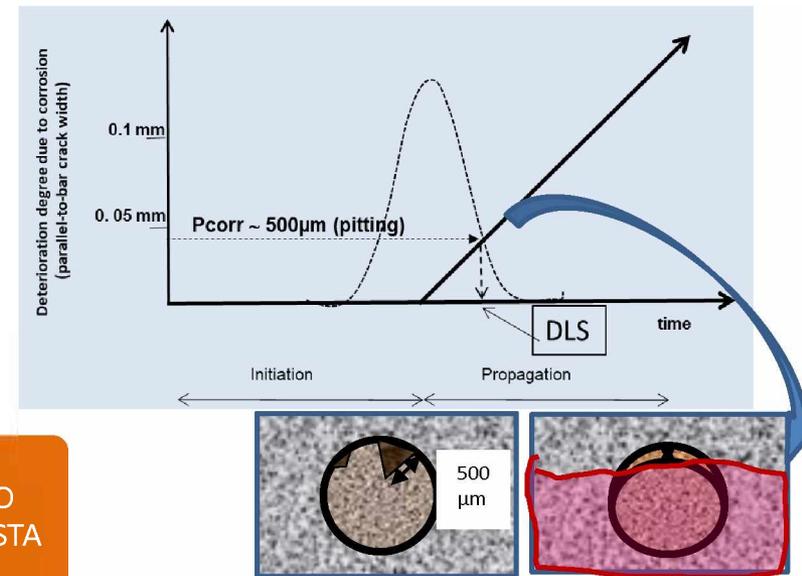
Le Corbusier

MODELOS Y METODOS ACTUALES

(según Model Code 2020 de la *fib: esquema*)

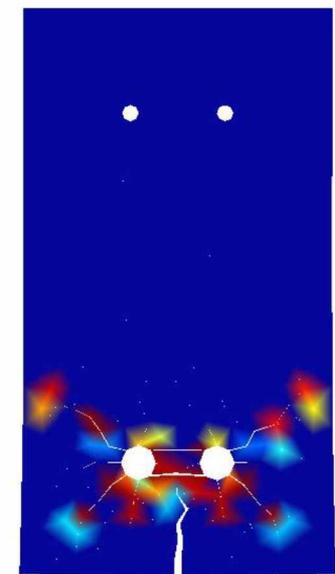
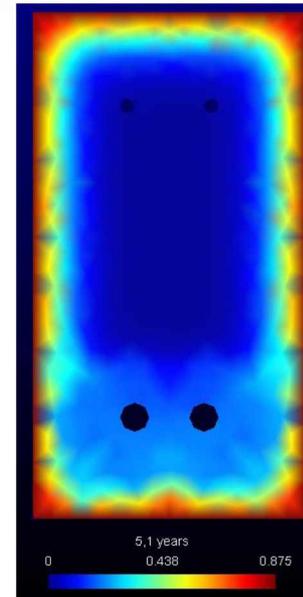
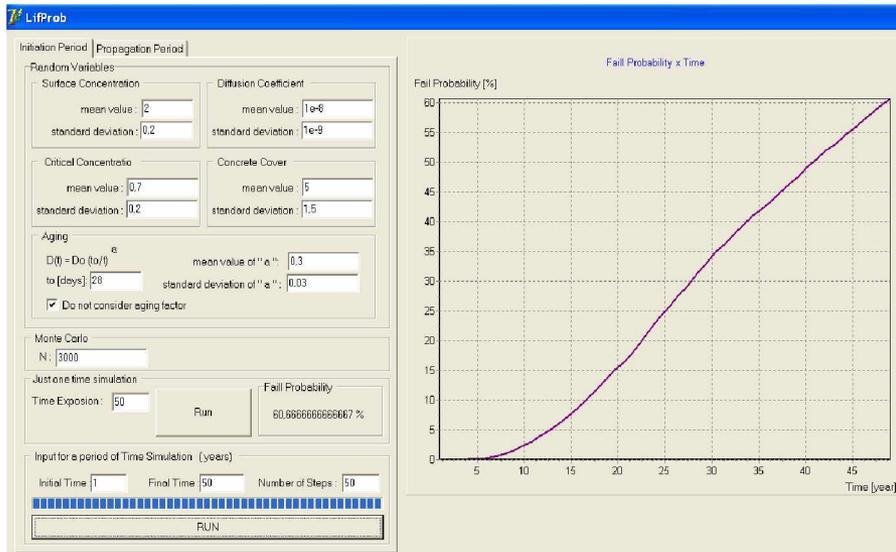
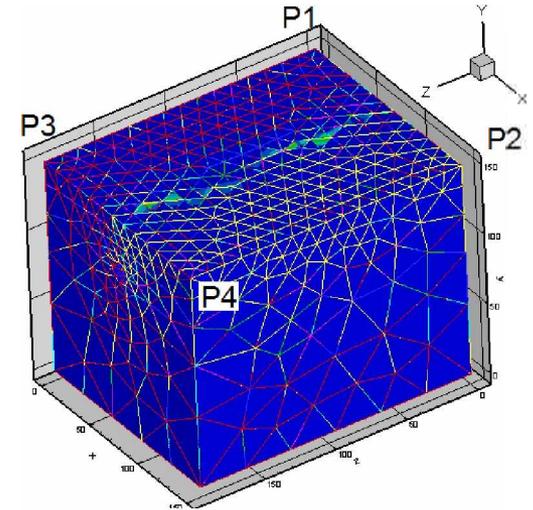
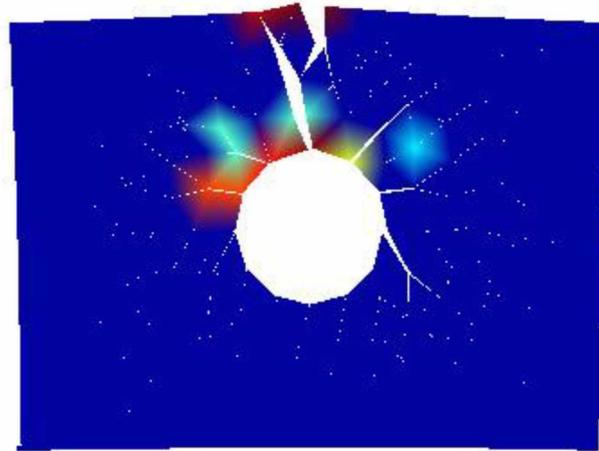
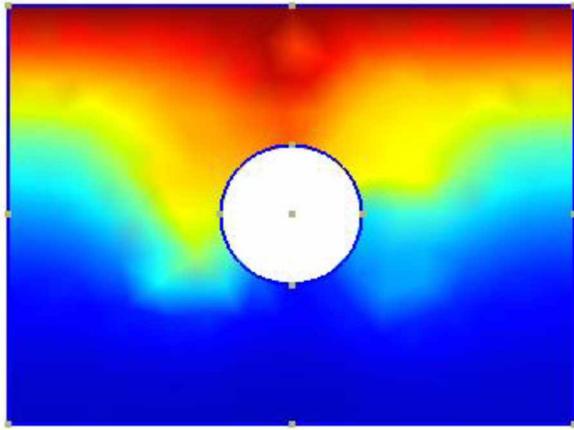


Nuevo estado limite
Estado limite de deterioro DLS



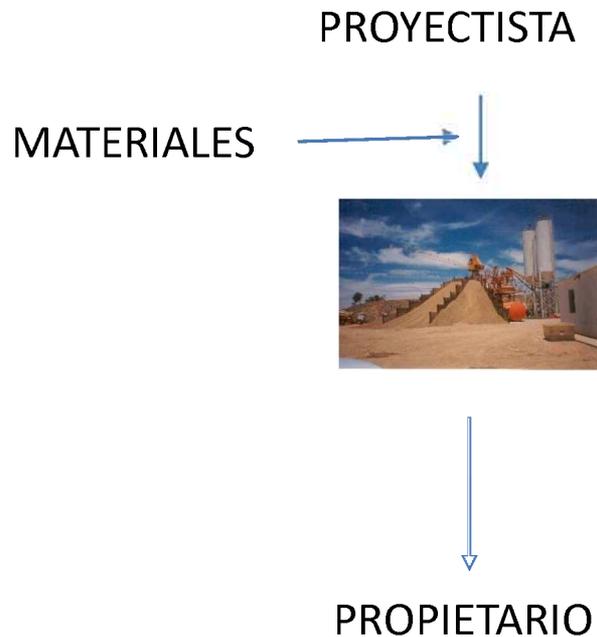
AVANCES NECESARIOS

MODELADO NUMERICO: digital twin



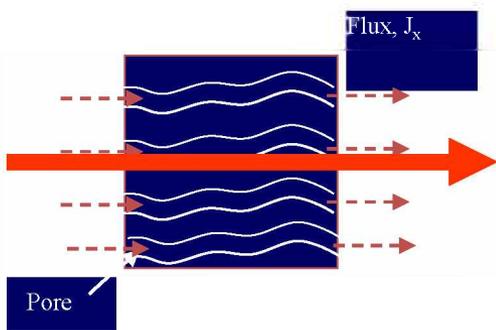
RESISTIVIDAD COMO INDICADOR DE DURABILIDAD

parámetro para evaluar la vida útil estructura nueva y existente



¿QUE ES LA RESISTIVIDAD ELECTRICICA?

La resistencia al paso de corriente



$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A}$$

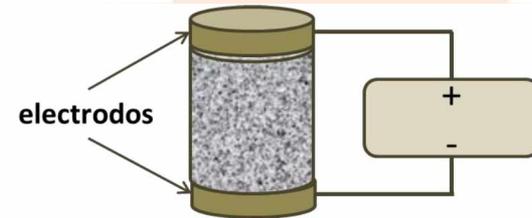
Ley de Ohm

Factor Geométrico

$$\rho = \frac{2\pi a R}{l}$$

Distancia entre electrodos

Método directo
Geometría regular



FACTOR FORMA

	a = 0,035m	a = 0,05m
Cilíndrica 30x15 cm	0.714	0.606
Cilíndrica 20x10 cm	0.571	0,377
Cilíndrica 15x7.5cm	0,384	---
Prismática 4x4x16 cm	0.172	---

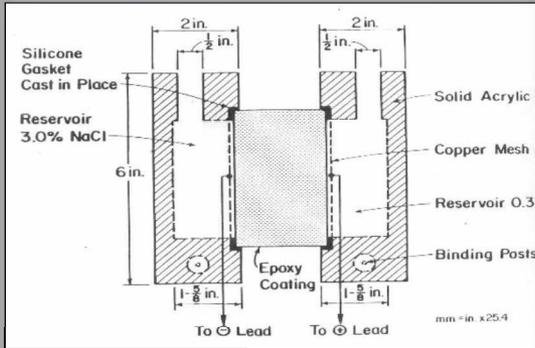
Método cuatro puntas



PUEDE SUSTITUTIR A LOS ENSAYOS ACELERADOS

ASTM 1202-Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration

propuesto en los 80 por David Whiting – PCA-USA



CARGA EN CULOMBIOS

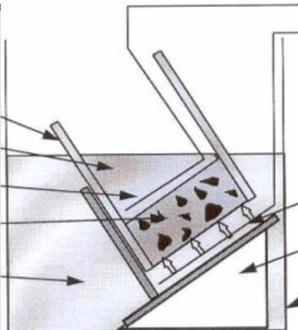
> 4000

2000-4000

1000-2000

100-1000

< 100



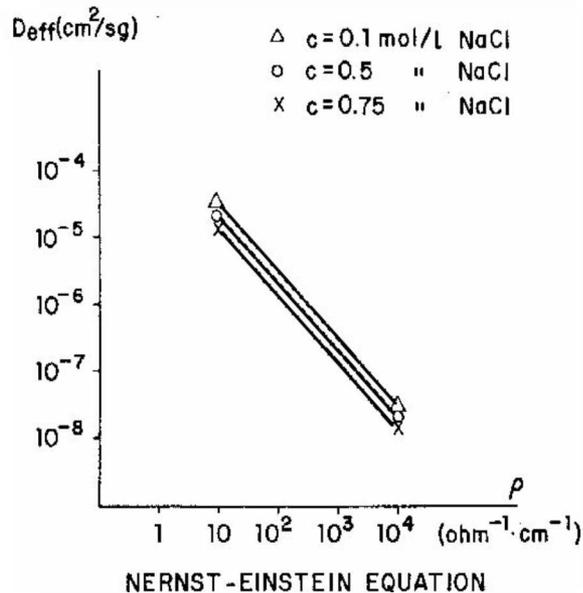
$$D_{ns} = \frac{0.0239(273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left[x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right] \quad [m^2 / s]$$



NT Build 492

- Es igual que el ASTM 1202
- Usa ensayo colorimétrico
- Es empírico

RELACION TEORICA ENTRE EL COEFICIENTE DE DIFUSION Y LA RESISTIVIDAD-debida a Einstein



$$D_j = \frac{RT}{nF^2} A_j = \frac{RT}{nF^2} \cdot \frac{i t_j}{\Delta E} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{C_j Z}$$

NERNST-PLANK simplificado

Ecuación de Nernst-Einstein

CALCULATION OF CHLORIDE DIFFUSIVITY FROM CONCRETE RESISTIVITY MEASUREMENTS

$$D_{eff} = \frac{RT}{nF^2} \cdot \frac{t_{Cl}}{\rho c \gamma} = 26,1 \times 10^{-8} \frac{t_{Cl}}{c \gamma} \cdot \frac{1}{\rho}$$

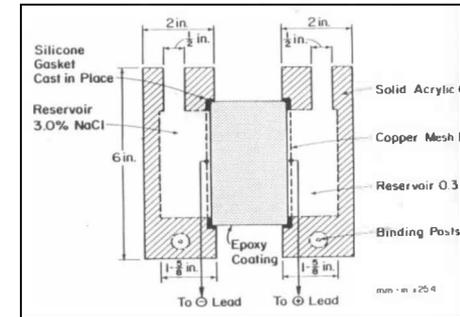
Example:

$\rho = 5000 \Omega \cdot \text{cm}$
 $c = 0,5 \times 10^{-3} \text{ mol/cm}^3$
 $\gamma = 0,68$
 $t_{Cl} = 0,35$

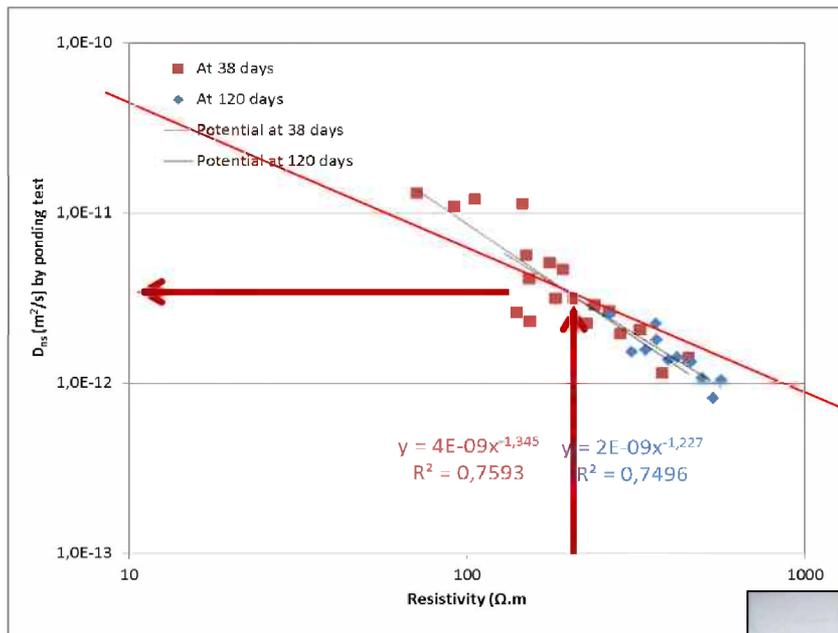
$$D_{eff} = \frac{26,1 \times 10^{-8}}{\rho} \approx 5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sc}$$

C. Andrade 1993

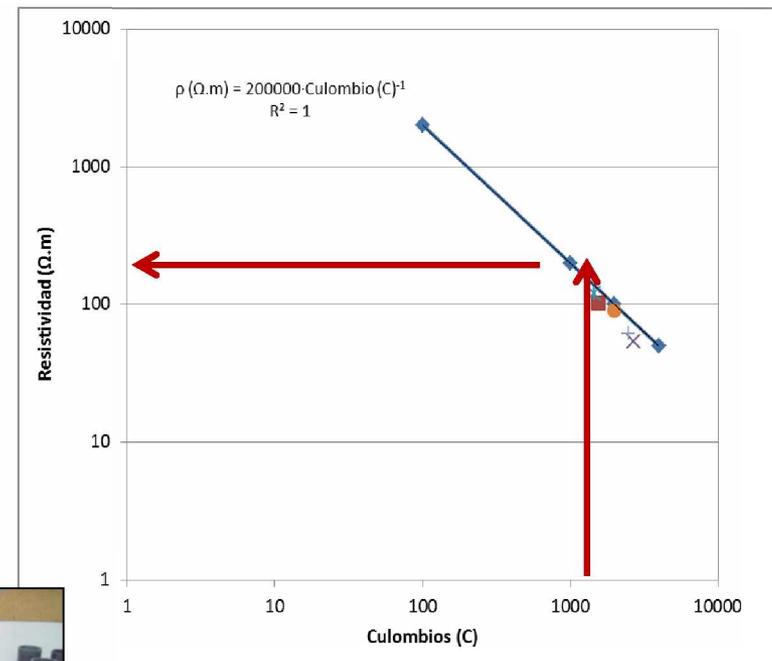
RELACIONES RESISTIVIDAD



Relación con difusión de cloruros



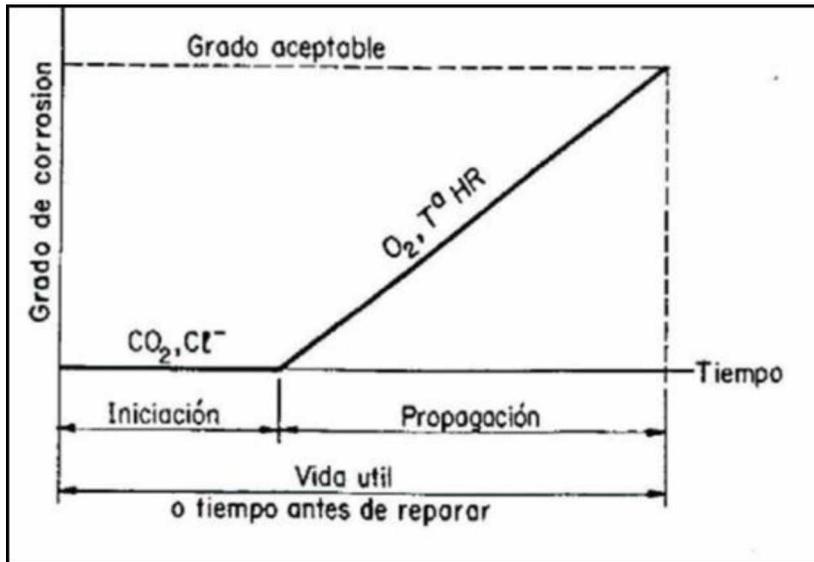
Relación con Culombios



$$\rho(\Omega m) = \frac{2E5}{Q}$$

RELACION CON EL TIEMPO

la relación de Einstein (random walk) se introduce en la de la raíz cuadrada



$$X = V \sqrt{t}$$



$$V = \sqrt{D} = \sqrt{K/\rho}$$



$$t_l = \frac{x^2 \cdot \rho_{ef} \left(\frac{t}{t_0} \right)^q}{F_{env}} \cdot r_{Cl,CO_2}$$

COMPLEMENTOS DEL MODELO DE LA RESISTIVIDAD PARA EL HORMIGON

para el modelado de la vida útil es necesario conocer factores adicionales

Factor de edad

Factor de retardo

$$t_l = \frac{x^2 \cdot \rho_{ef} \left(\frac{t}{t_0} \right)^q}{F_{env}} \cdot r_{Cl,CO_2}$$

Factor ambiental

EJEMPLO DE APLICACION

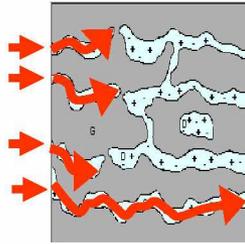
$$t_l = \frac{x^2 \cdot \rho_{ef} \left(\frac{t}{t_0} \right)^q}{k_{Cl,CO_2}} \cdot r_{Cl,CO_2}$$

Recubrimiento Vida util Tipo de Cemento II/A Clase de exposicion (XS2) Facto de edad (10 años)	X_{Cl} (cm) = 10 t (años) = 100 $r_{Cl} = 1,8$ F_{env} (cm³Ω/year)= 25000 q= 0.3
---	---

Valor de la Resistividad ρ_0 28 days

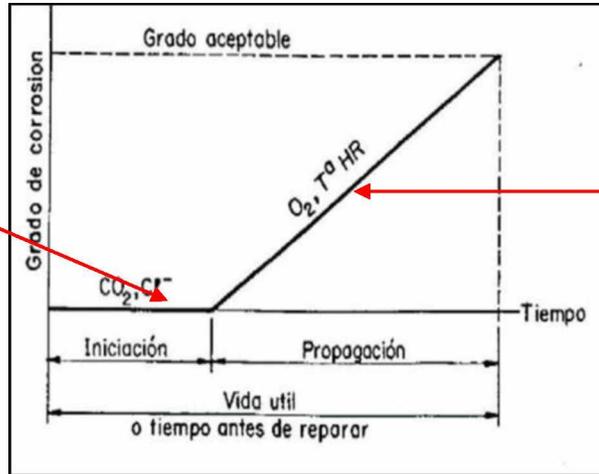
$$10 = \sqrt{\frac{25000}{\rho_0 \left(\frac{0.25}{0,0767} \right)^{0,3} \cdot 1,8}} \cdot \sqrt{100} \rightarrow \rho_0 (\Omega \cdot m) = 97.44$$

MODELO COMPLETO DE DURABILIDAD BASADO EN LA RESISTIVIDAD como único parámetro

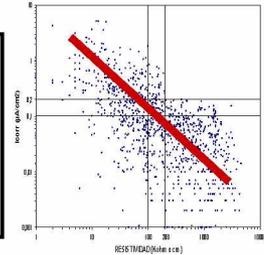


$$D_{Cl} = \frac{K}{\rho}$$

RELACION con DIFUSION



$$I_{corr} = \frac{K}{\rho}$$



RELACION con CORROSION

C. Andrade- C&CR 23 (1993) 724
Nernst-Plank and Nernst-Einstein equations

C. Alonso, C. Andrade, J.A Gonzalez- C&CR 18 (1988) 687.

$$t_L = t_i + t_p$$

$$t_l = t_i + t_p = \frac{x^2 \rho_{ef} r_{Cl, CO_2}}{F_{Cl, CO_2}} + \frac{P_v \cdot \rho}{k_{corr}}$$

COMENTARIOS FINALES

- El hormigón estructural debe responder en el siglo XXI al reto de SUSTENTABILIDAD
- La DURABILIDAD y el ciclo de vida son parte esencial de la sustentabilidad

Quedan muchísimos aspectos por refinar para responder a la demanda de la sociedad

GRACIAS

un honor el formar parte de esta Academia



ACADEMIA DE LA INGENIERIA
DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

*Por cuanto la **Dra. Carmen Andrade** ha sido designada **Miembro Correspondiente** de esta Academia, se le expide el presente diploma que así lo acredita.*

La Plata 15 de Junio de 2021.

María Inés Valla
Académica Secretaria

Patricia Arnera
Académica Presidente