

HORMIGÓN PROYECTADO

Sergio Cavalaro

Profesor del Dpto. Ingeniería de la Construcción

E.T.S. Ingenieros de Caminos Canales y Puertos

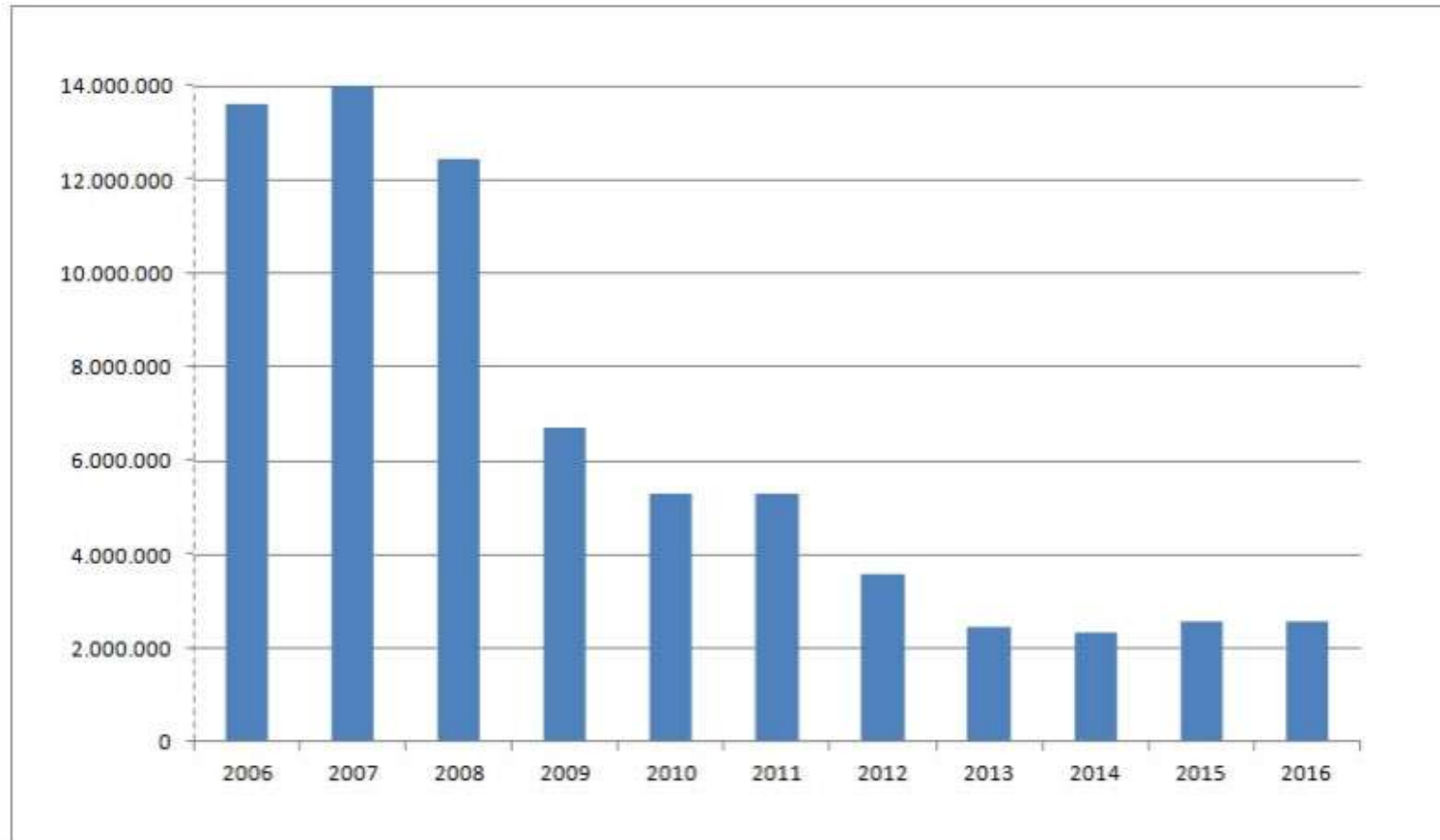
Universidad Politécnica de Cataluña

sergio.pialarissi@upc.edu

INTRODUCCIÓN

CONTEXTO: CONSUMO DE CEMENTO

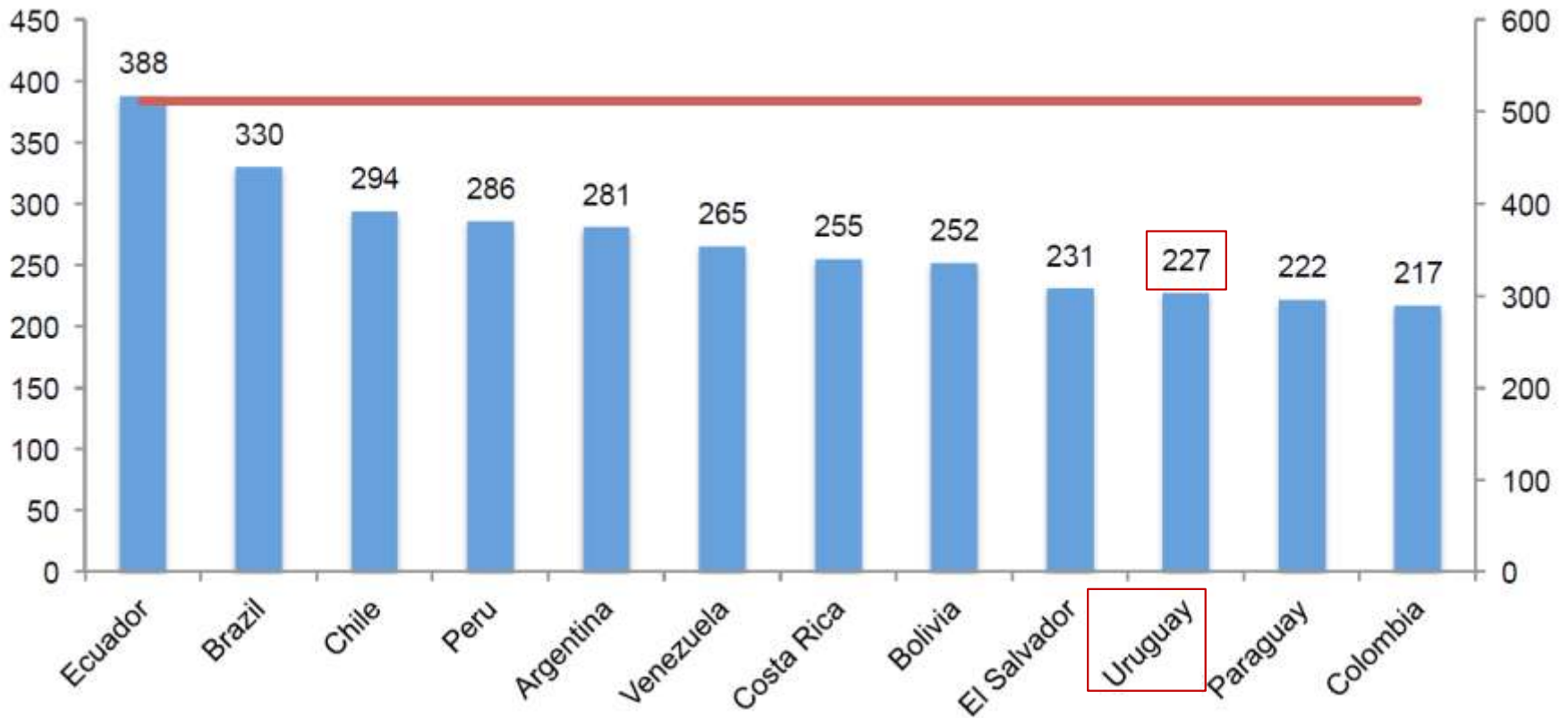
**Evolución del consumo de cemento primer trimestre del año en España
(2006-2016, toneladas)**



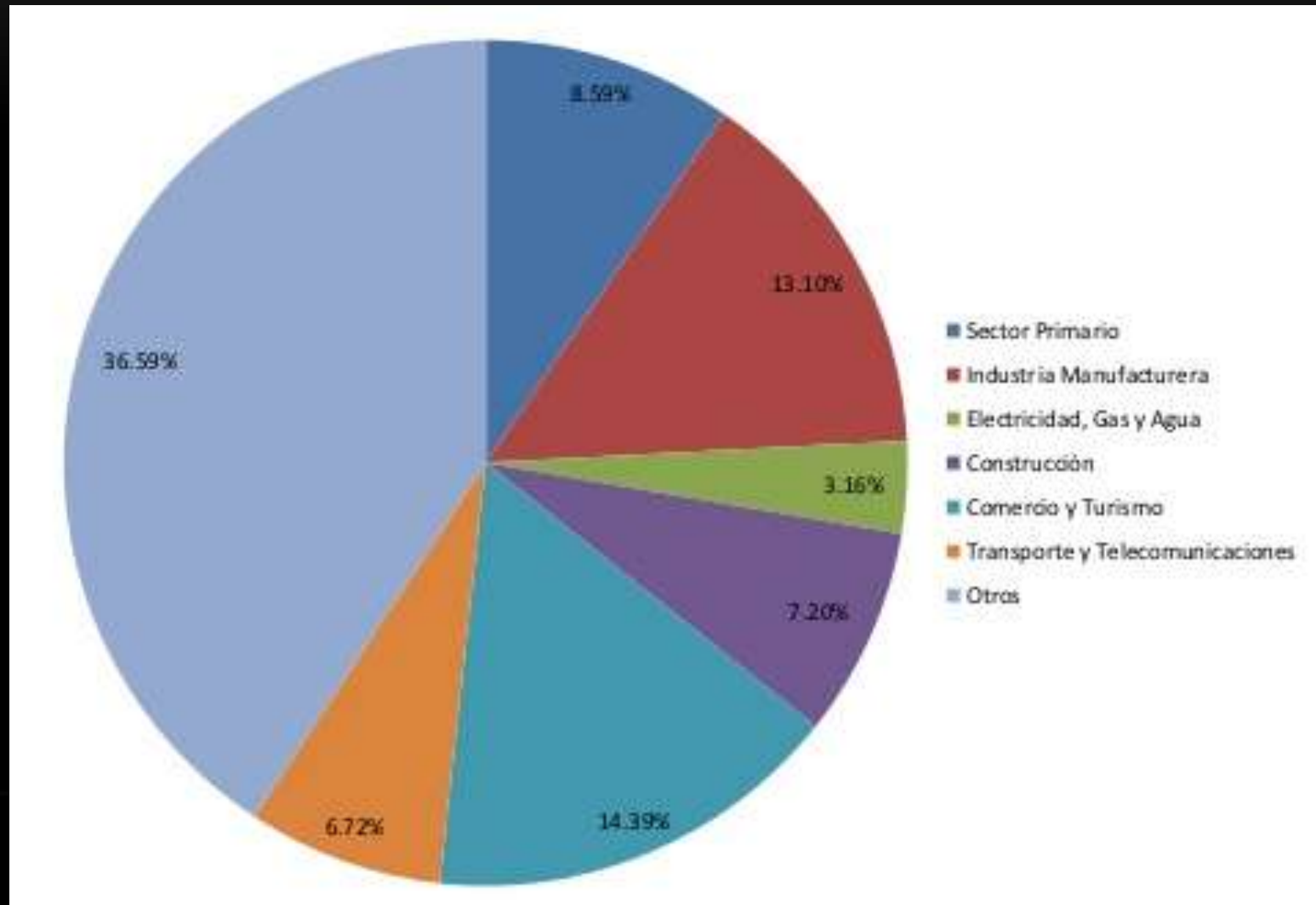
Fuente: Oficemen

CONTEXTO: CONSUMO DE CEMENTO

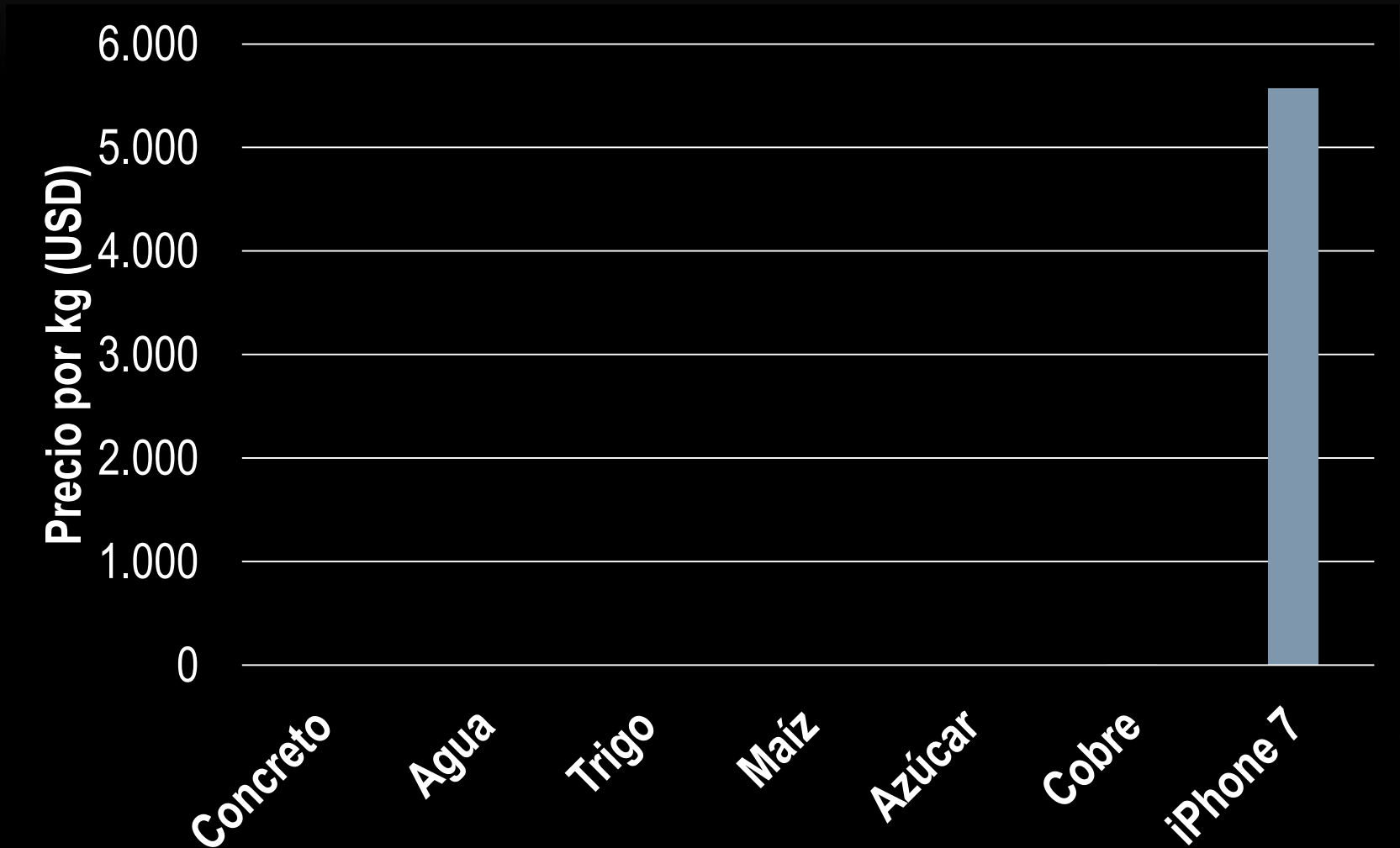
Per capita consumption, LatAm v World (kg)



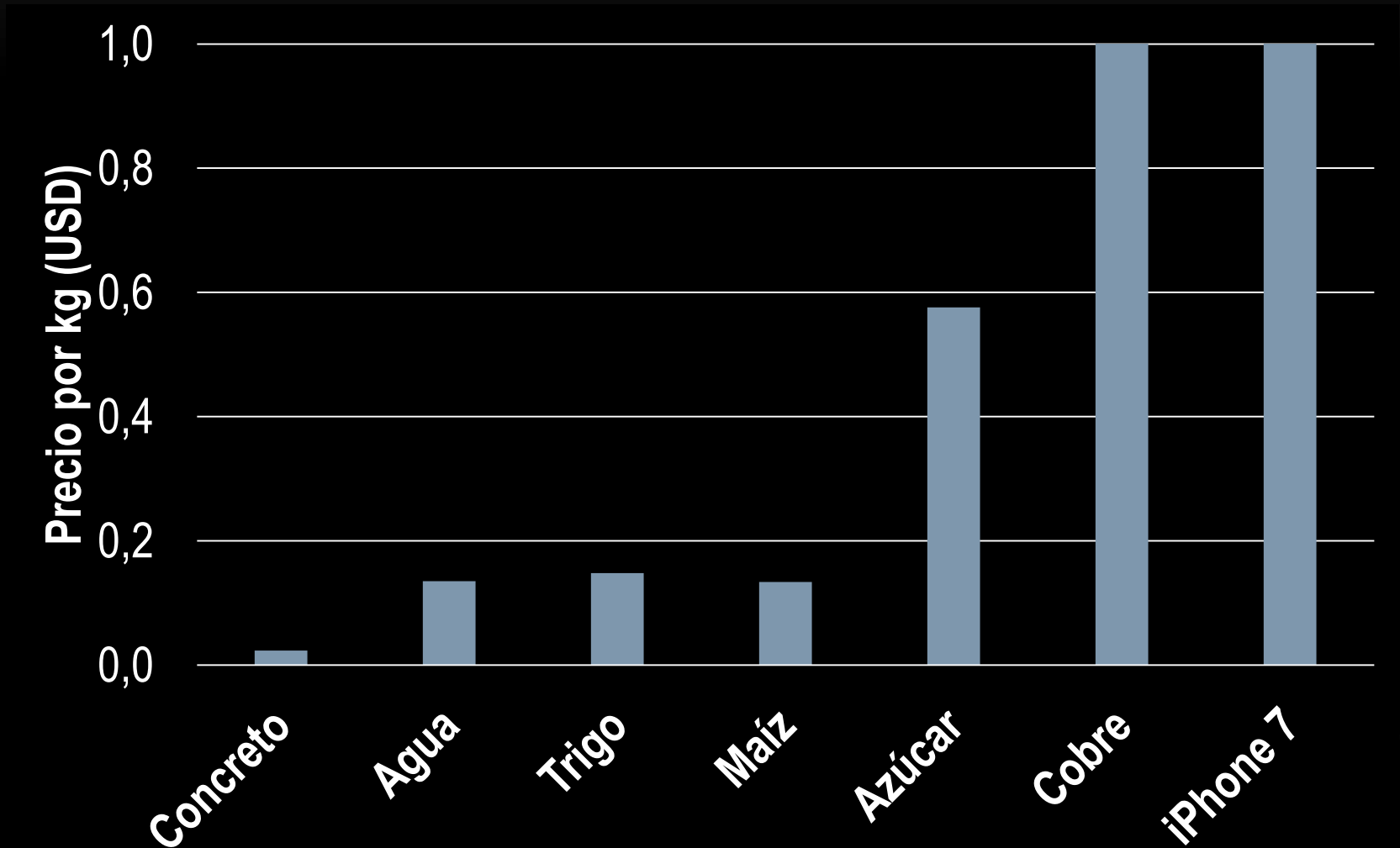
CONTEXTO: CONSUMO DE CEMENTO



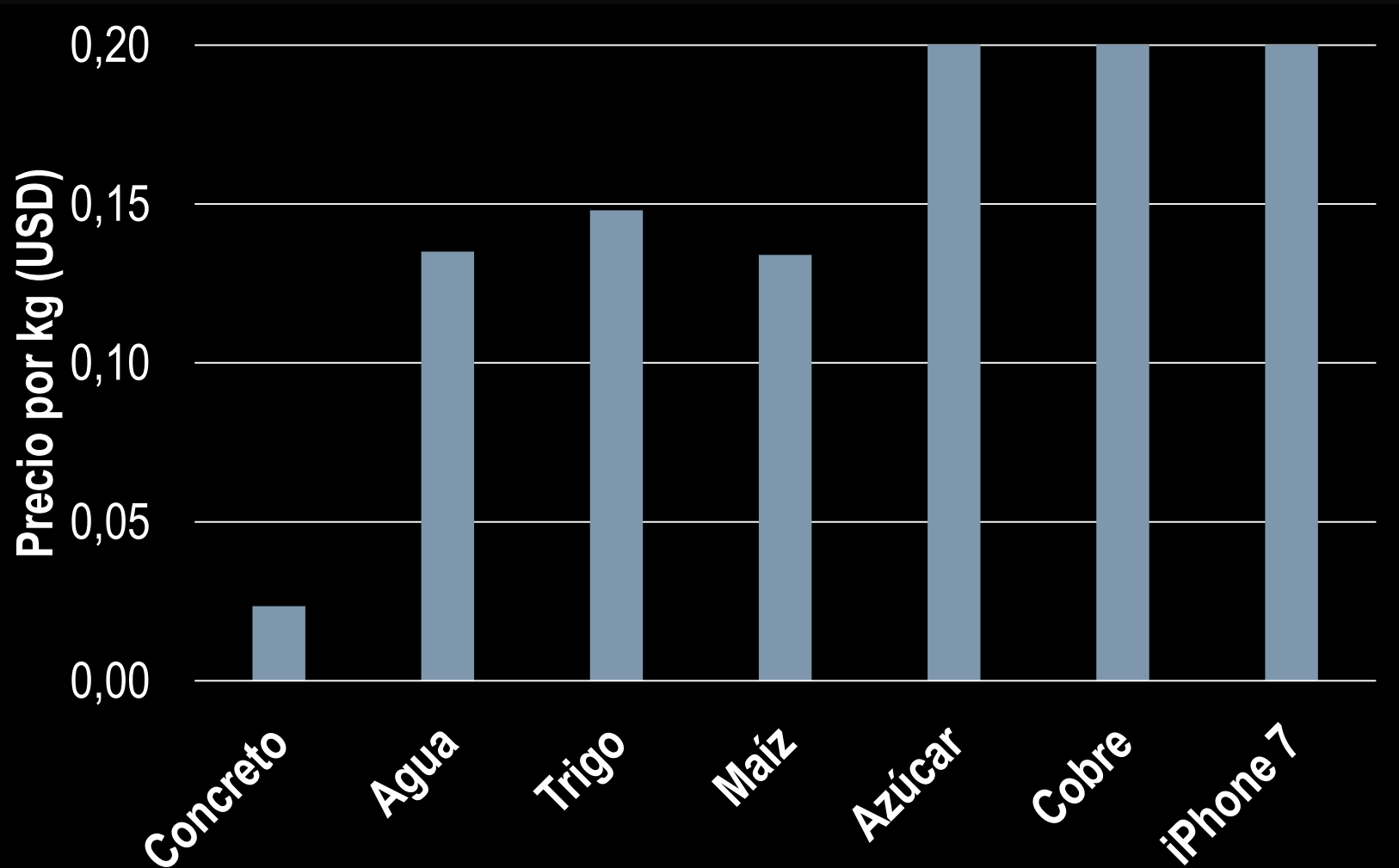
CONTEXTO: ¿A DÓNDE VA EL DINERO?



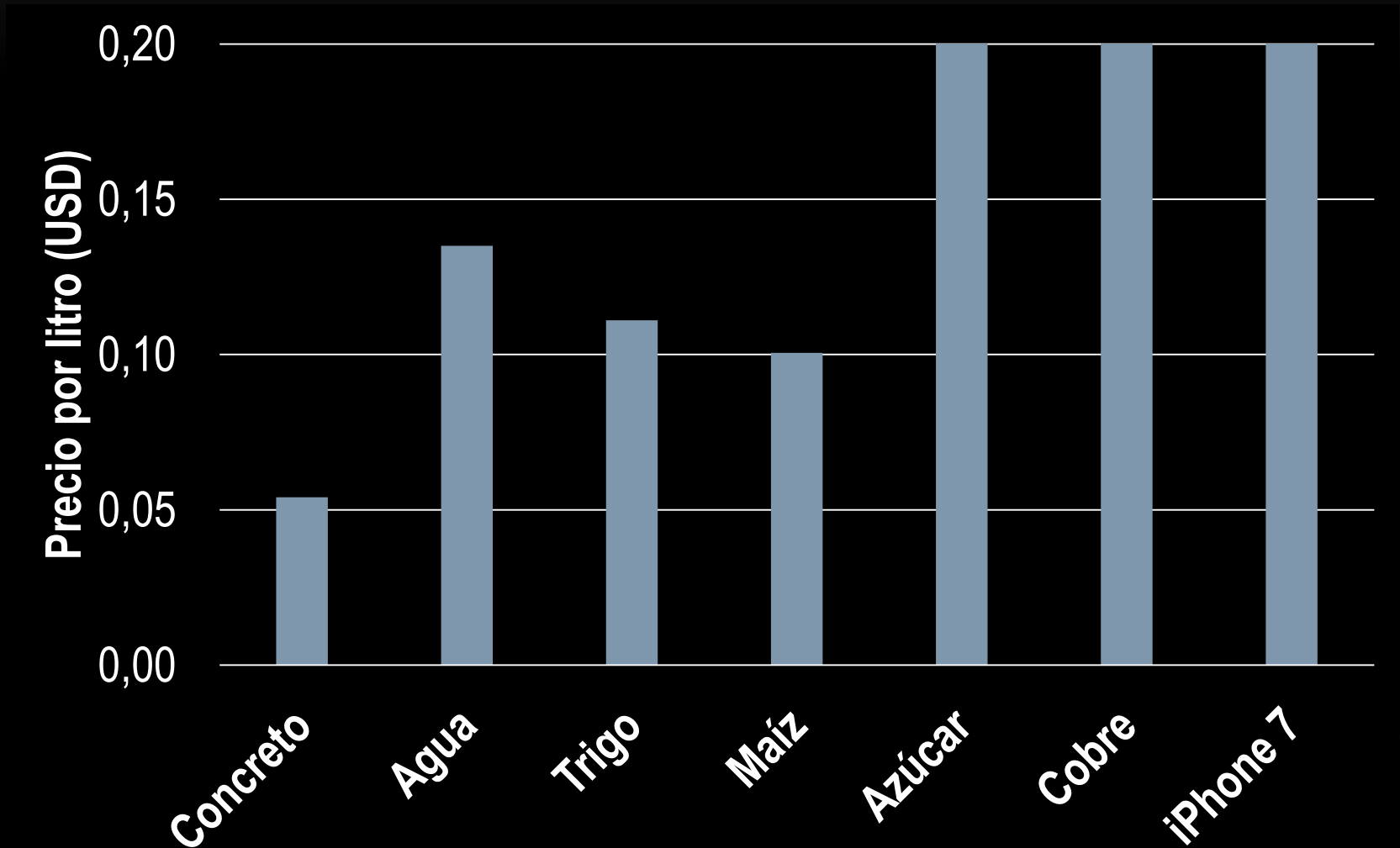
CONTEXTO: ¿A DÓNDE VA EL DINERO?



CONTEXTO: ¿A DÓNDE VA EL DINERO?



CONTEXTO: ¿A DÓNDE VA EL DINERO?



CONTEXTO: ¡SOLUCIÓN!

- Emplear materiales con mayor valor añadido/ventajas
- Asociar conocimiento técnico singular
- Solucionar problemas
- Maximizar satisfacción del cliente
- **Dar respuesta integral**



Hormigón proyectado



¿UN MATERIAL O UN
PROCESO?

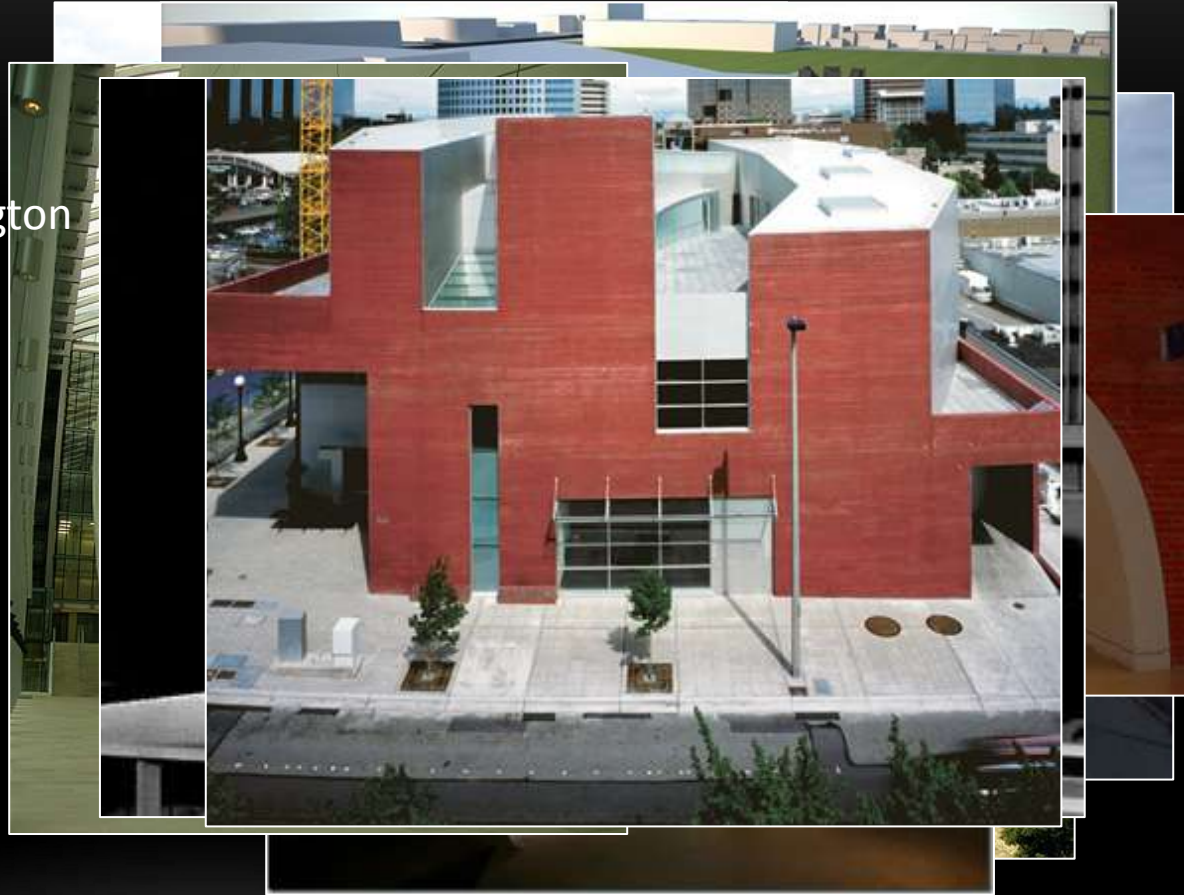


¿PARA QUÉ SE USA?

- Obras subterráneas
- Canalizaciones
- Depósitos
- Estabilización de taludes
- Reparación de estructuras
- Protección de estructuras metálicas
- Piscinas



- Flintstone House, California
- Bellevue Art Museum, Washington
- Selfridges Birmingham, UK
- Holocausto Museum, NY
- Darwin Cocoon, UK
- House of Blues, Chicago
- Oceanográfico de Valencia



Vivienda Unifamiliar



Vivienda Unifamiliar



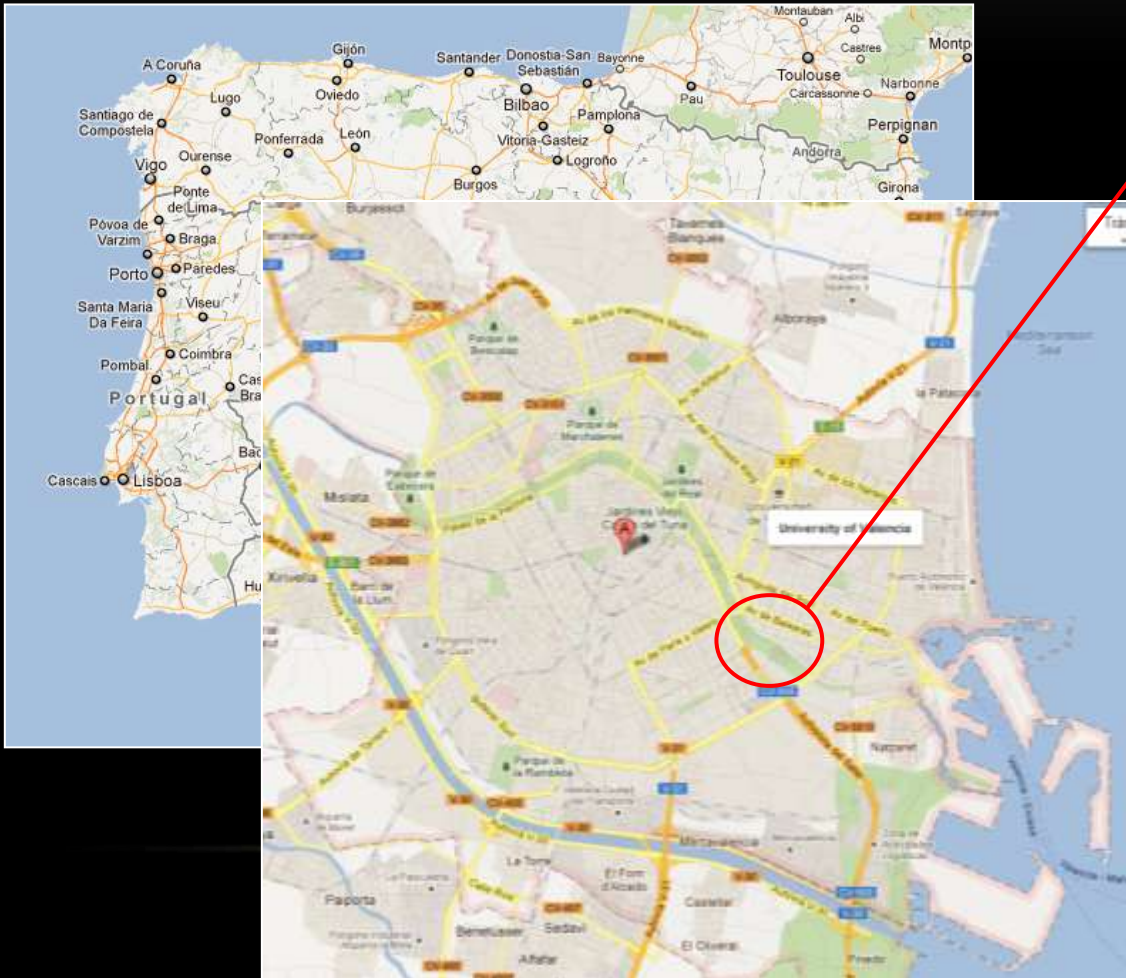
Vivienda Unifamiliar



Vivienda Unifamiliar



Cubierta Restaurante Oceanográfico Valencia



Cubierta Restaurante Oceanográfico Valencia



Cubierta Restaurante Oceanográfico Valencia



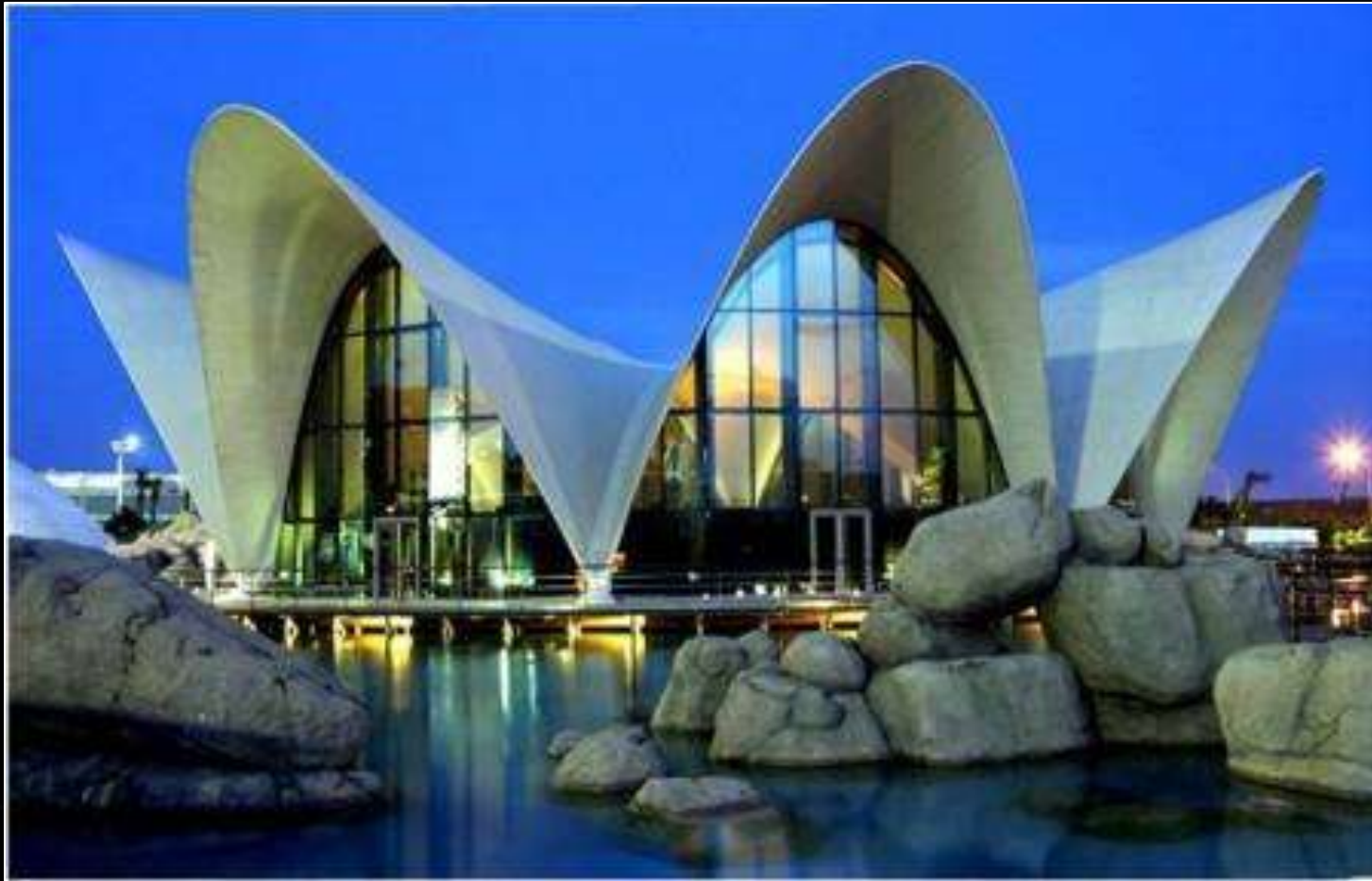
Cubierta Restaurante Oceanográfico Valencia



Cubierta Restaurante Oceanográfico Valencia



Cubierta Restaurante Oceanográfico Valencia



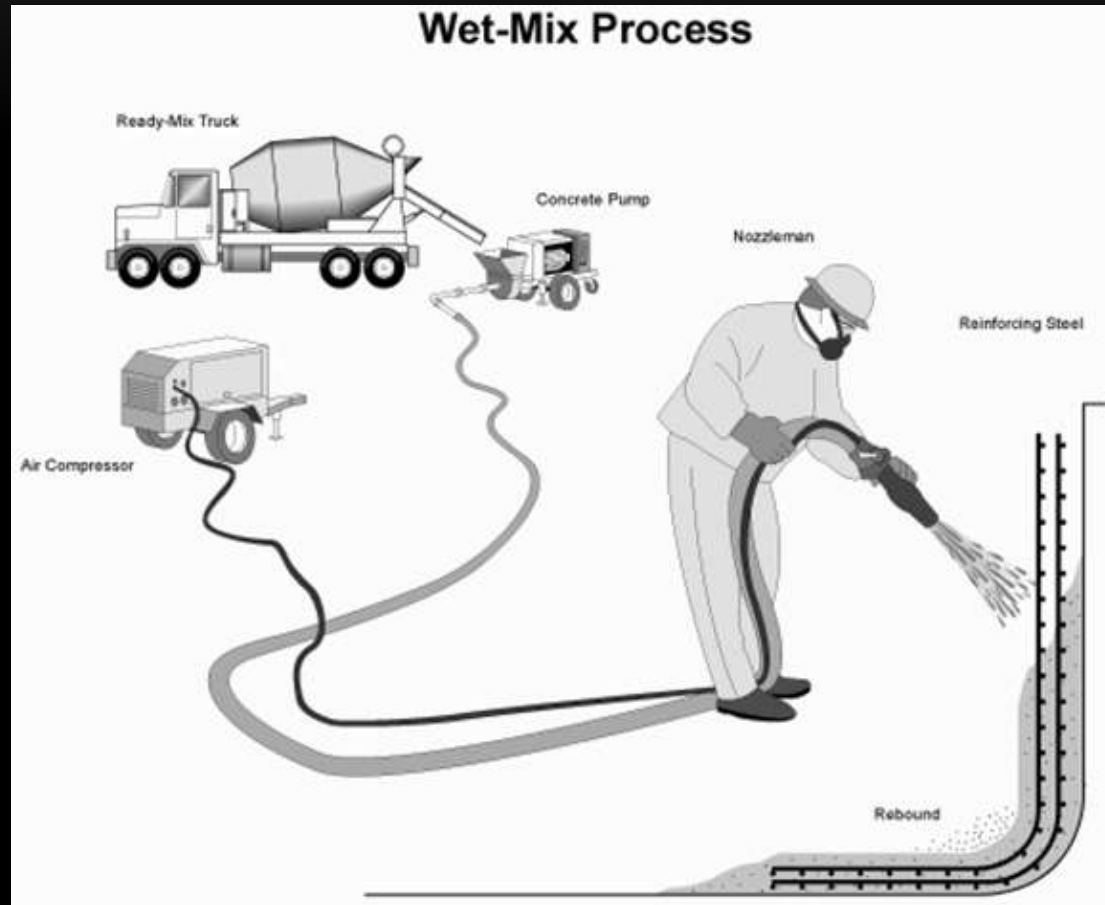
¿CÓMO PROYECTAR?



VÍA HÚMEDA

X

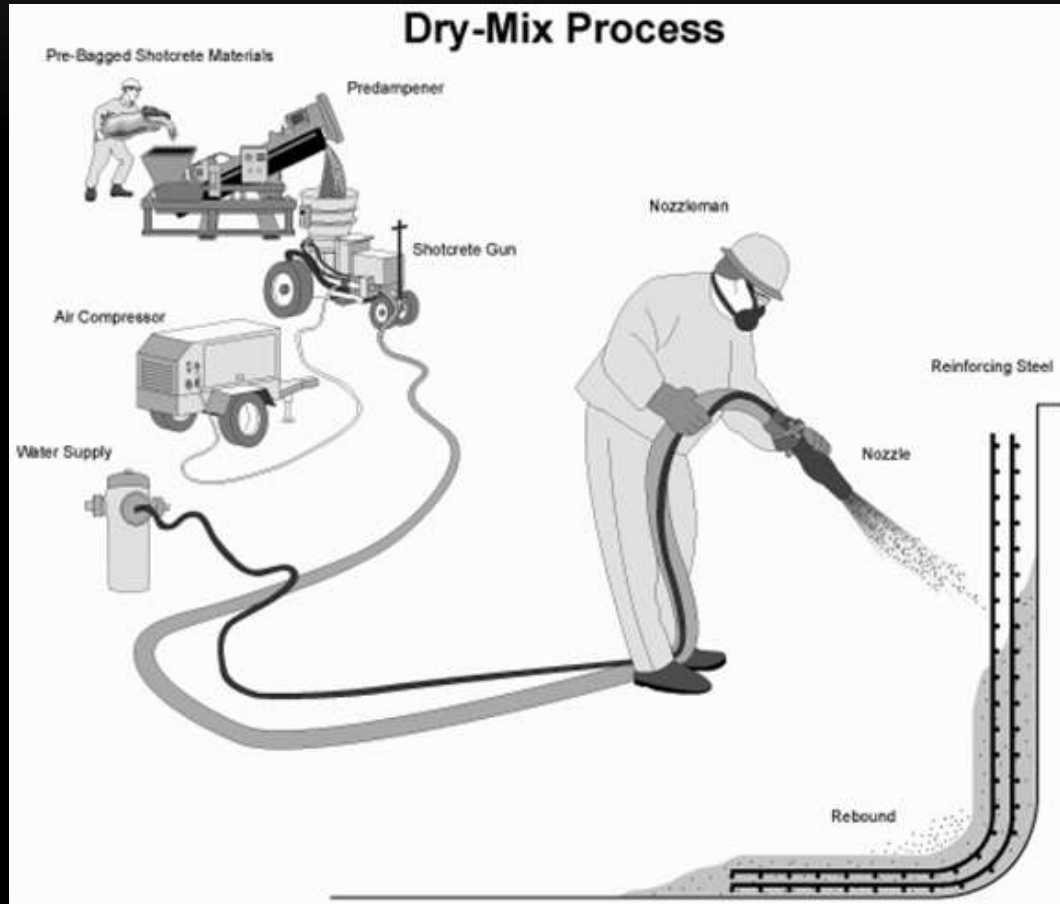
VÍA SECA



VÍA HÚMEDA

X

VÍA SECA



VÍA HÚMEDA

X

VÍA SECA

- ↑ rendimiento de equipo
- ↓ rebote
- ↑ condiciones ambientales de trabajo



- ↓ coste de equipo
- ↑ distancias del equipo al punto de aplicación.

VÍA HÚMEDA

X

VÍA SECA

- ↑ rendimiento de equipo
- ↓ rebote
- ↑ condiciones ambientales de trabajo



- ↓ coste de equipo
- ↑ distancias del equipo al punto de aplicación.

VÍA HÚMEDA

X

VÍA SECA

425	Cemento (kg/m³)	380
190	Agua (kg/m³)	150
900	Arena 0/2 (kg/m³)	-
350	Arena 0/6 (kg/m³)	1100
380	Gravilla 4/12 (kg/m³)	600
20	Microsílice (kg/m³)	20
4,25	Superplastificante (kg/m³)	3,80

¿QUÉ DIFERENCIA HAY
CON UN HORMIGÓN
CONVENCIONAL?

Proceso Proyección → *ASPECTOS SINGULARES*

HORMIGÓN
DE PARTIDA

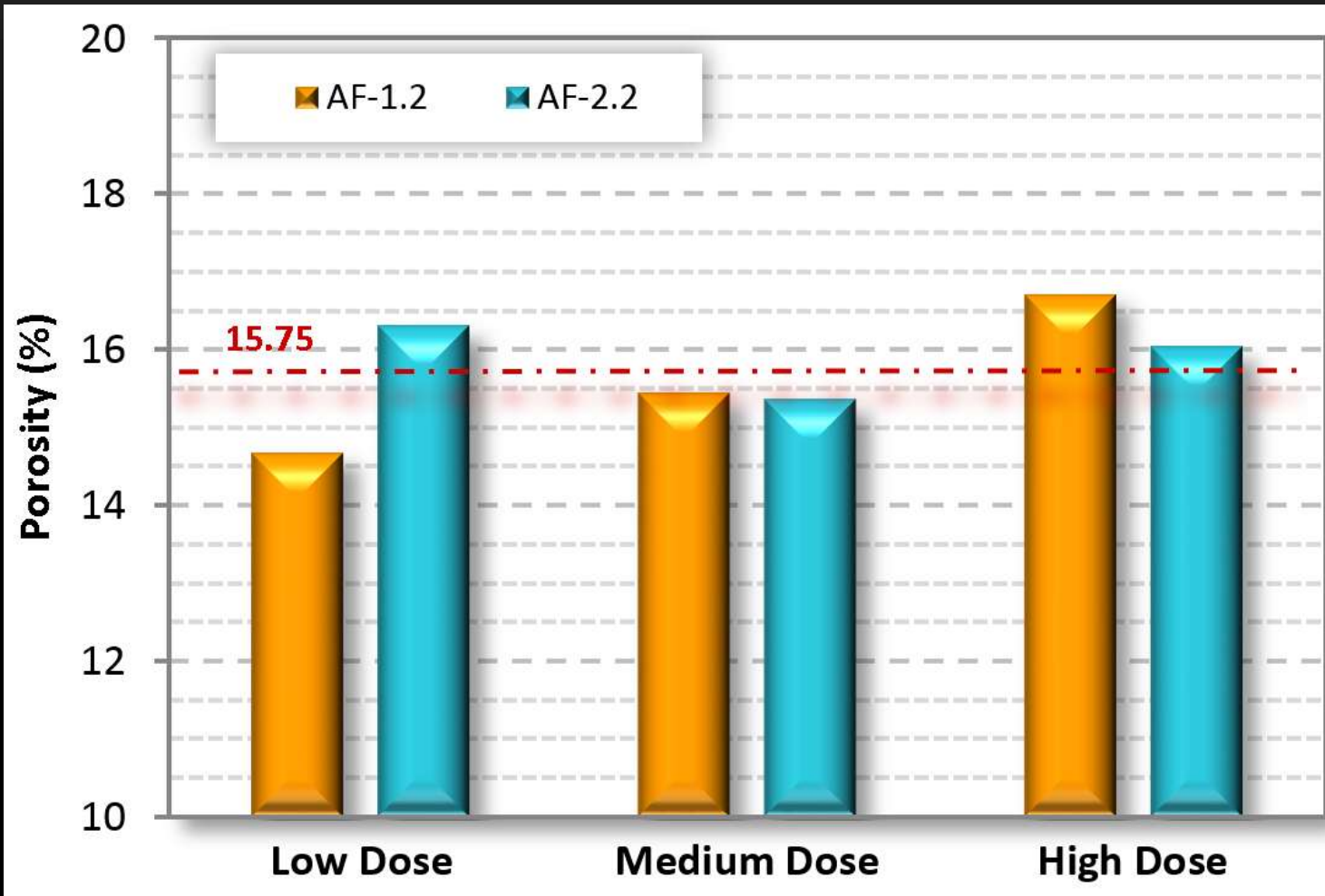
PROYECCIÓN



HORMIGÓN
COLOCADO

- Inclusión aire
- Rebote

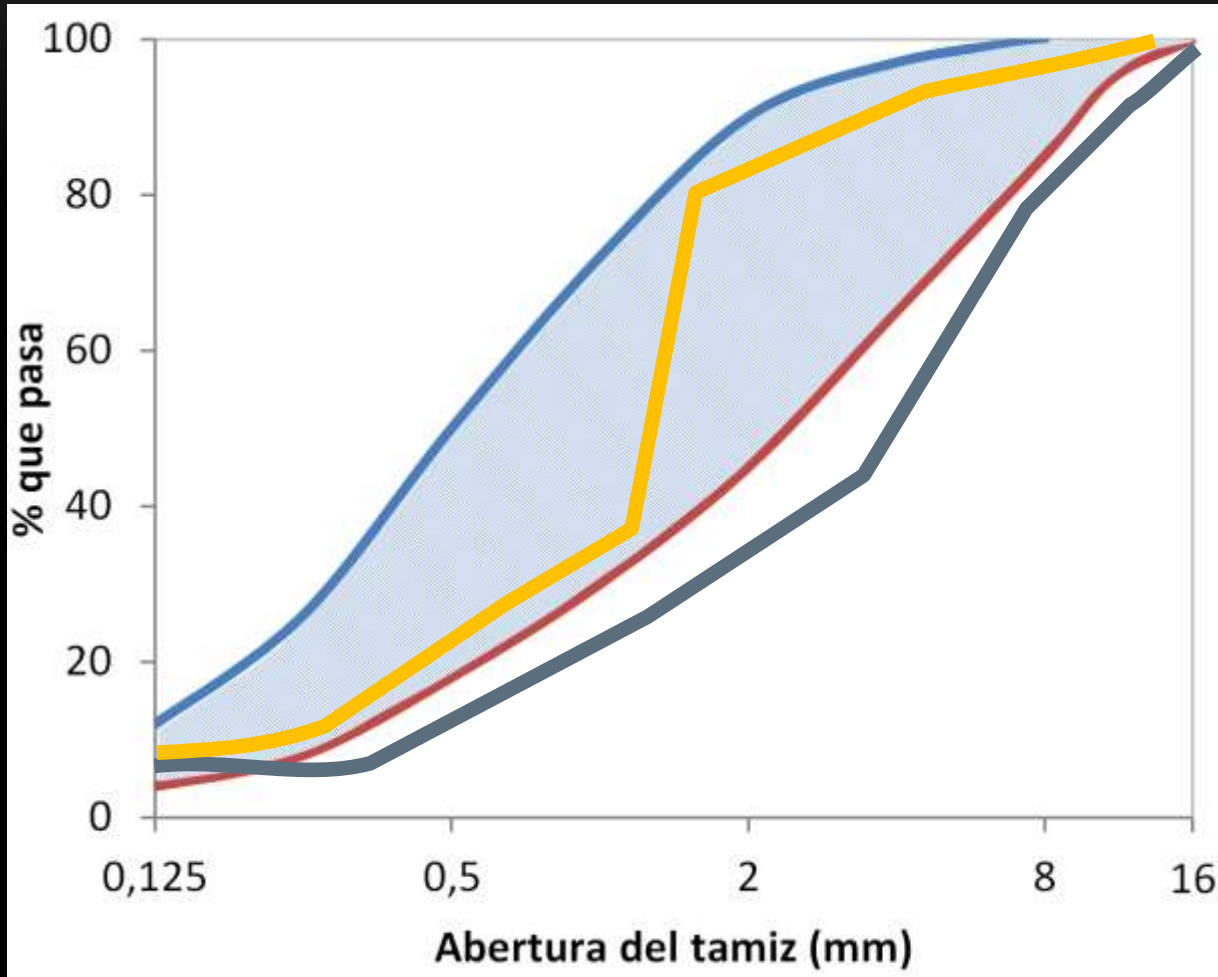
¡Mayor porosidad!
¡Variación composición!



¿CÓMO DOSIFICAR PARA
EL ÉXITO?



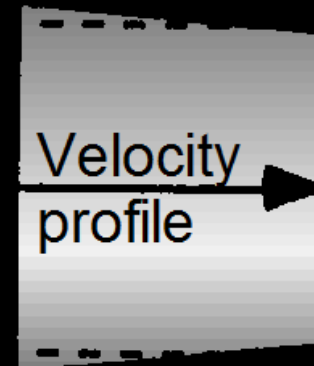
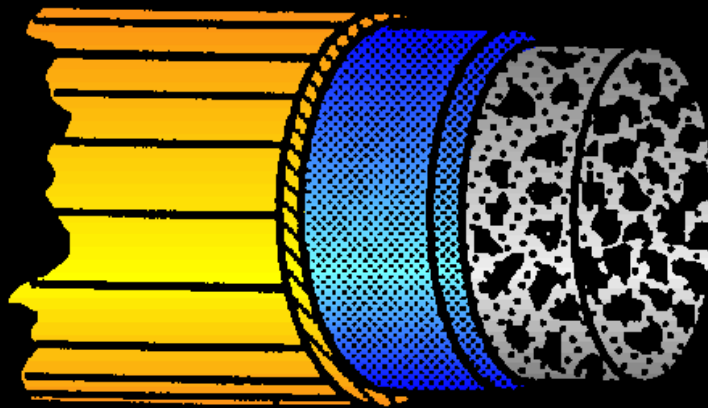
ESQUELETO GRANULAR



- $D_{\max} \leq \phi_{\text{tubo}}/3$
- $D_{\max} \leq 16 \text{ mm}$

CONTENIDO DE FINOS

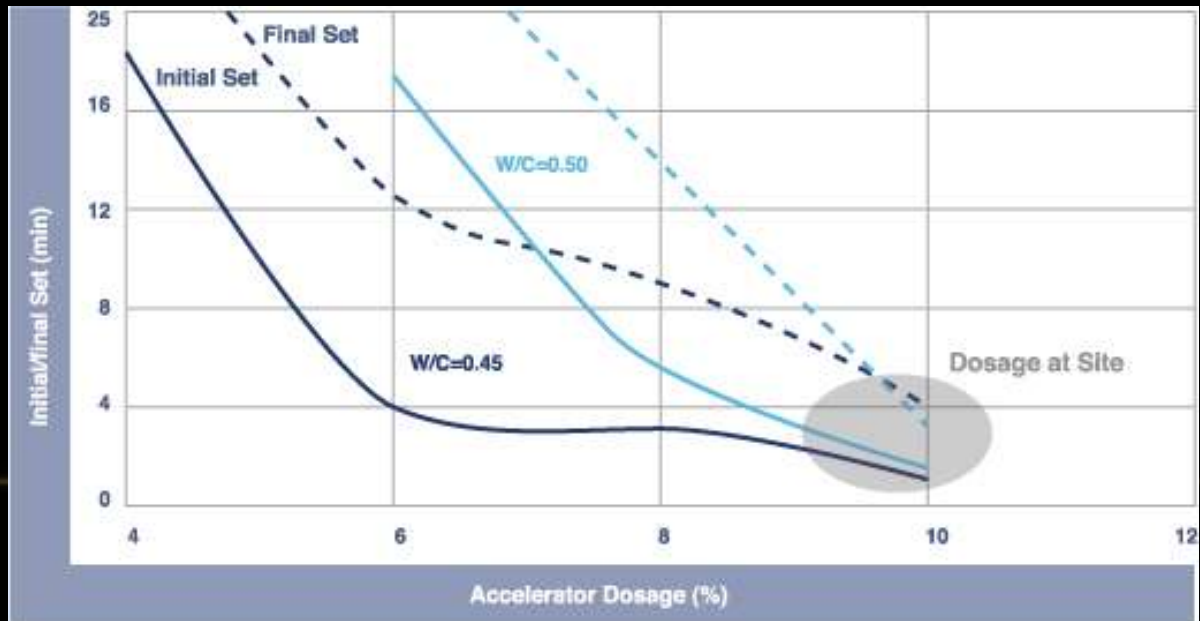
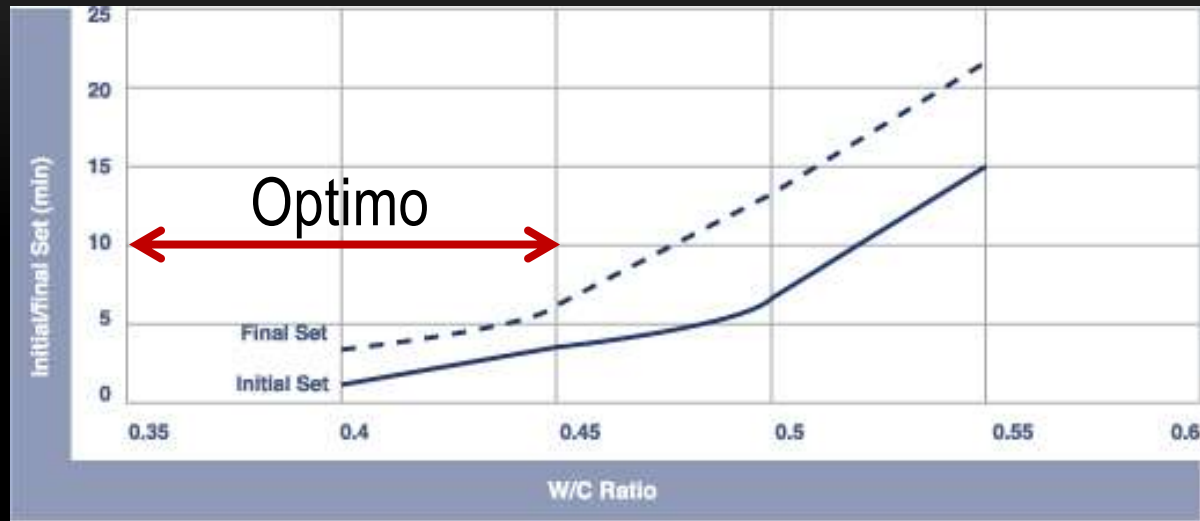
- Adiciones + Cemento + Finos áridos = $500-550 \text{ kg/m}^3$



CONTENIDO DE FINOS



RELACIÓN A/C



ELEGIR ADITIVOS COMPATIBLES



¿QUÉ TIPO DE
ACELERANTE USAR?

RICO EN ÁLCALI

X

LIBRE DE ÁLCALI

3 – 7	Dosificación típica	4 – 9
13 – 14	pH	2,5 – 6
+++	Evolución resistencia inicial	++
++	Resistencia final	+++
--	Salud laboral	++
-	Seguridad para transporte	++
+	Aspecto medioambientales	+++

RICO EN ÁLCALI X LIBRE DE ÁLCALI



¿QUÉ TIPO DE
CEMENTO USAR?

CEM I

X

CEM II

El cemento más utilizado en España → Tipo I: *CEM I 52,5 R*

Tendencia en Europa → Tipo II: *CEM II/A*

- Razones medioambientales

*(Otros cementos dependiendo de exposiciones
ambientales)*

CEM I

X

CEM II

Energía liberada en primera hora (J/g cemento)

Cem I 52,5 R

38,38

48,34

41,66

55,34

A,5%

A,7%

B,5%

B,7%

Cem II/A-LL 42,5 R

41,61

51,13

41,18

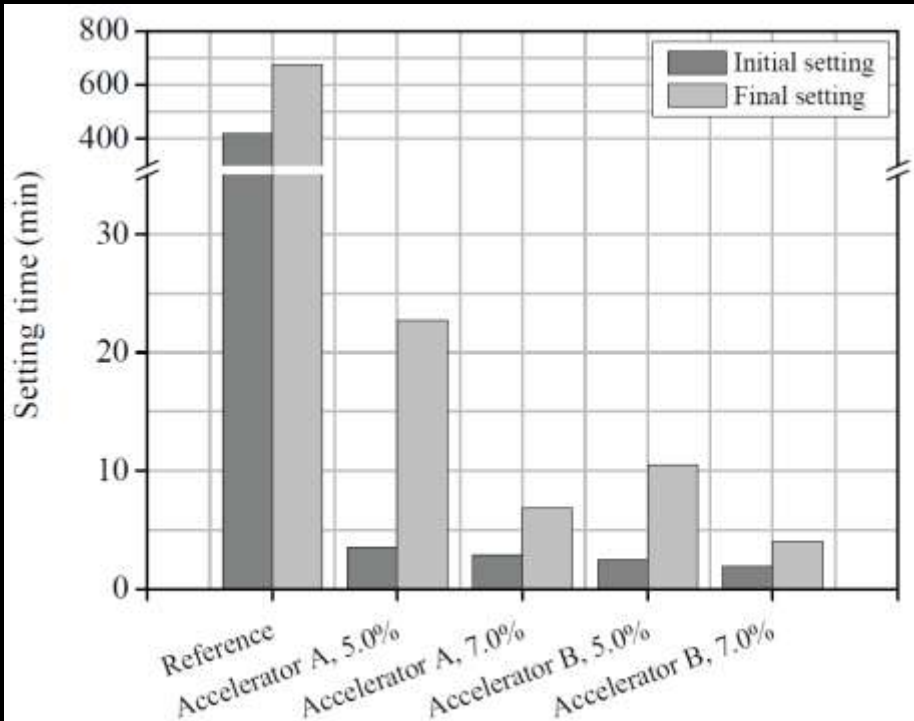
52,14

CEM I

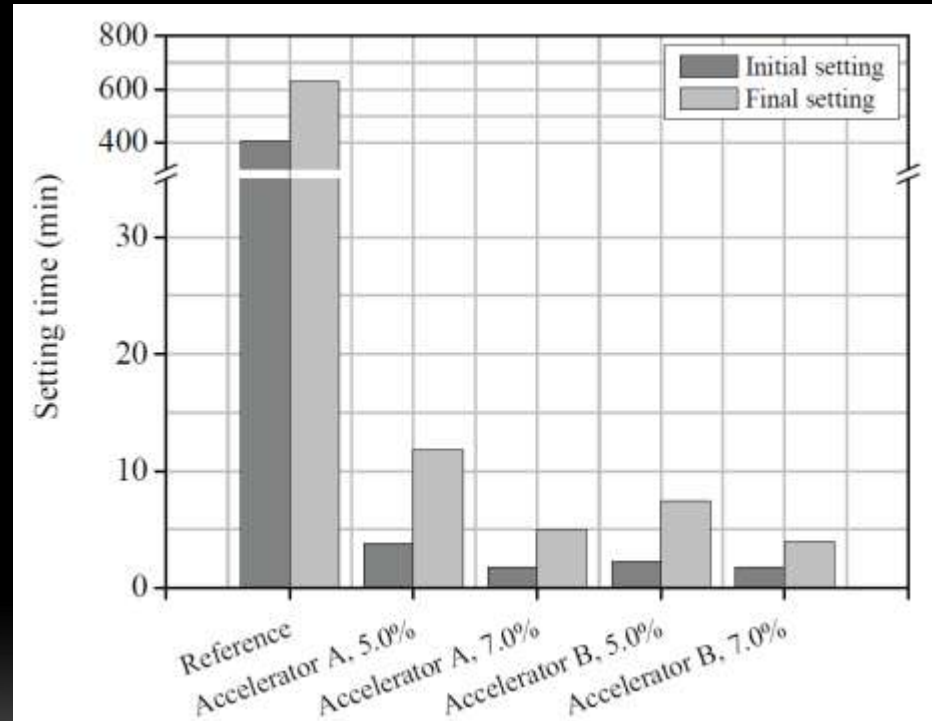
X

CEM II

Cem I 52,5 R



Cem II/A-LL 42,5 R



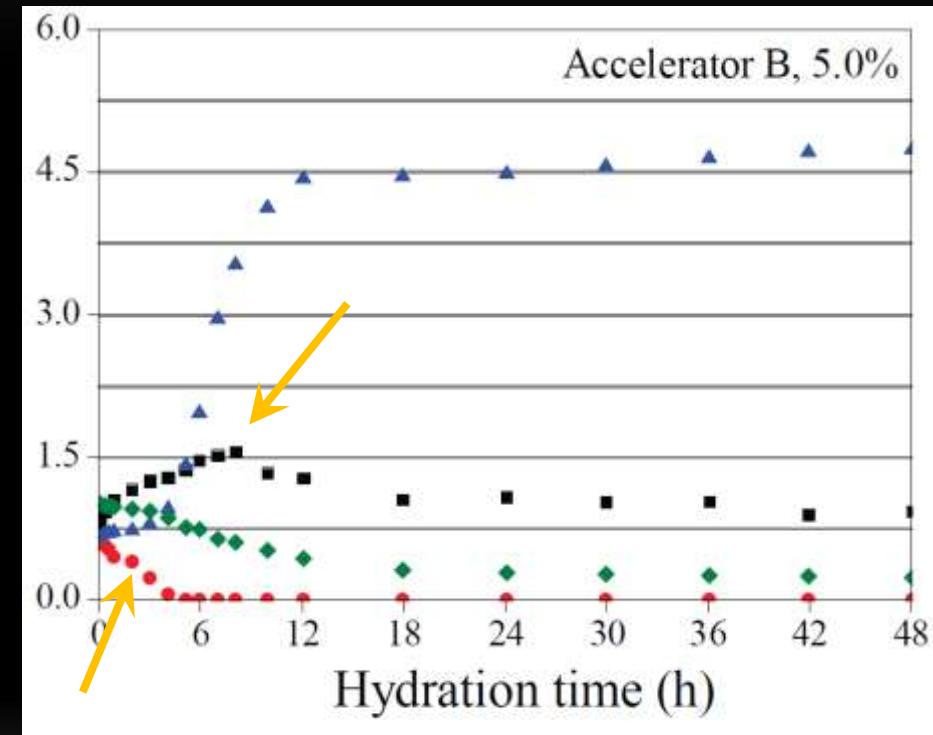
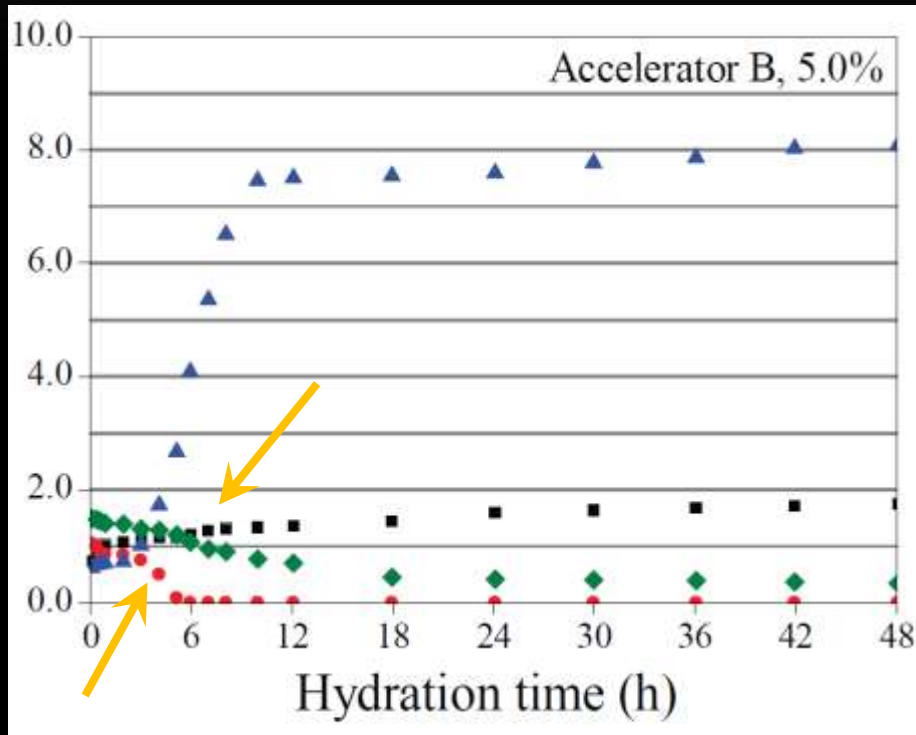
CEM I

X

CEM II

Cem I 52,5 R

Cem II/A-LL 42,5 R

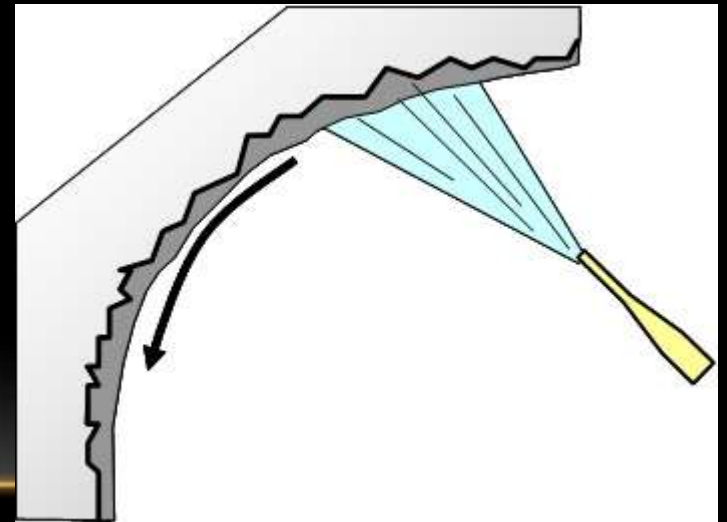


- Ettringite
- Gypsum
- ▲ Portlandite
- ◆ Alite

¿CÓMO PROYECTAR
PARA EL ÉXITO?



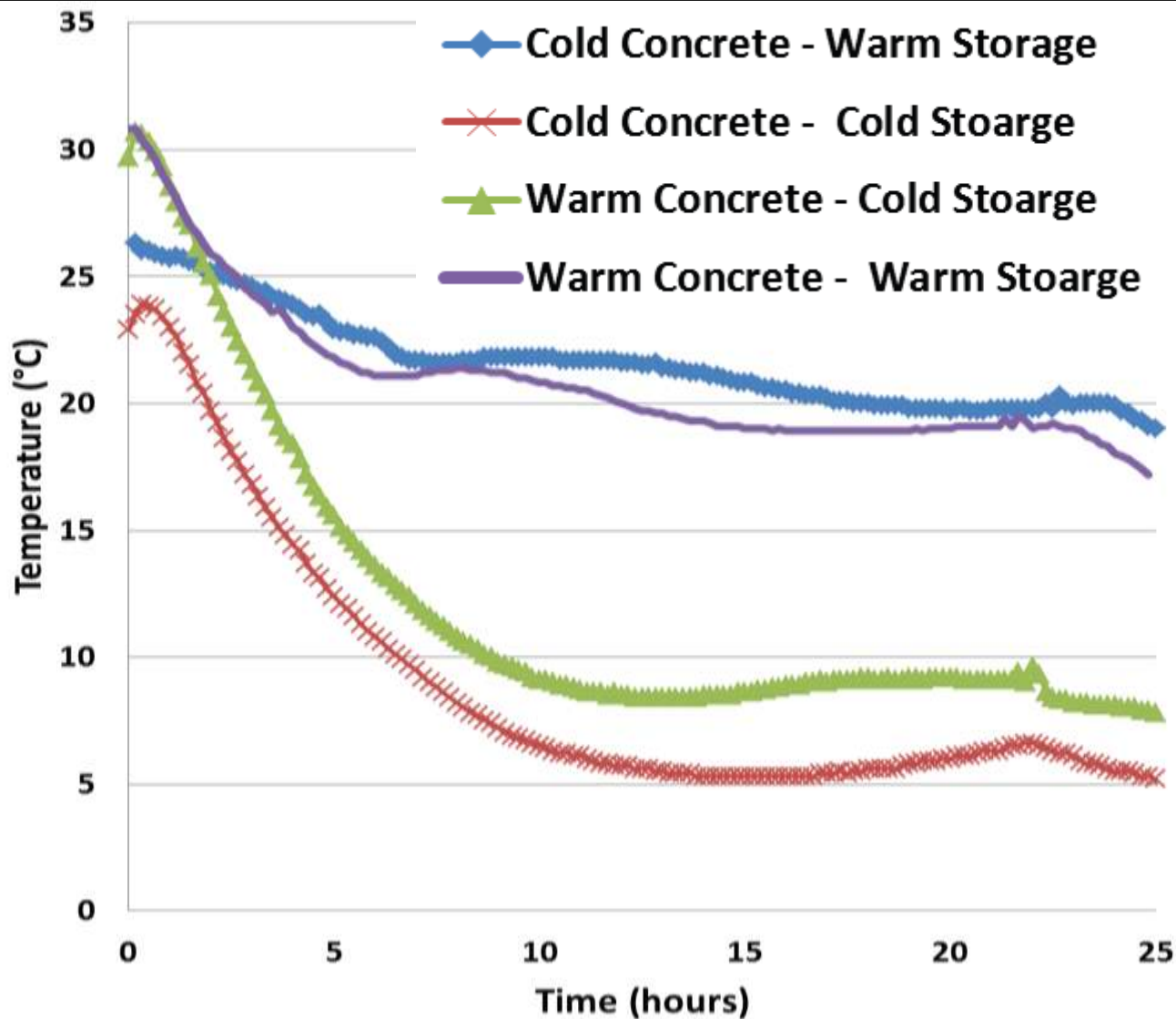
LIMPIAR SUPERFICIES ANTES DE PROYECTAR



LUBRICAR EQUIPO ANTES DE PROYECTAR



CUIDAR LA TEMPERATURA

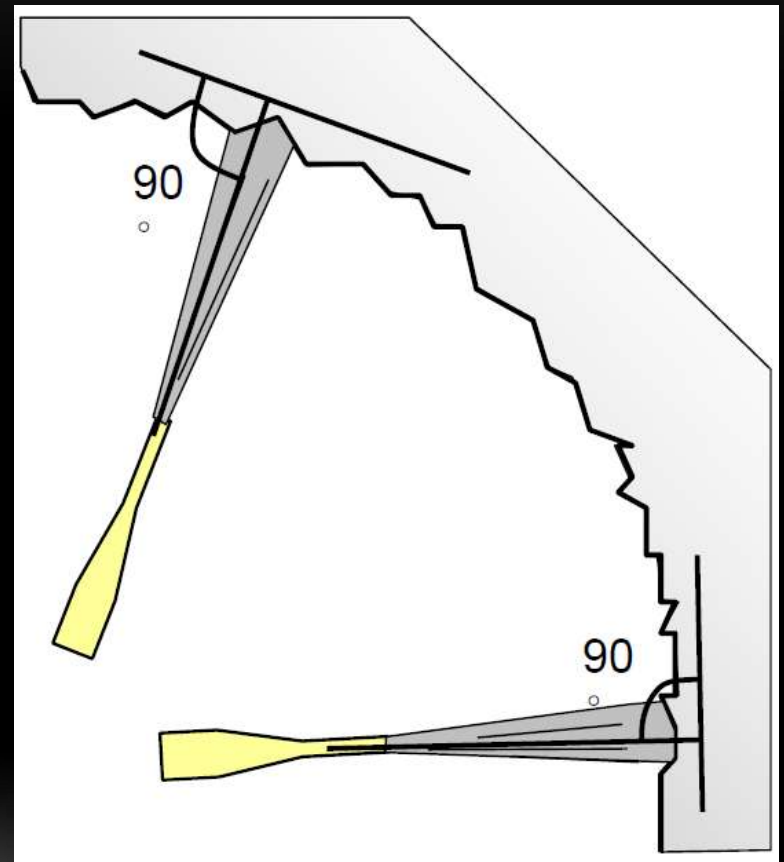
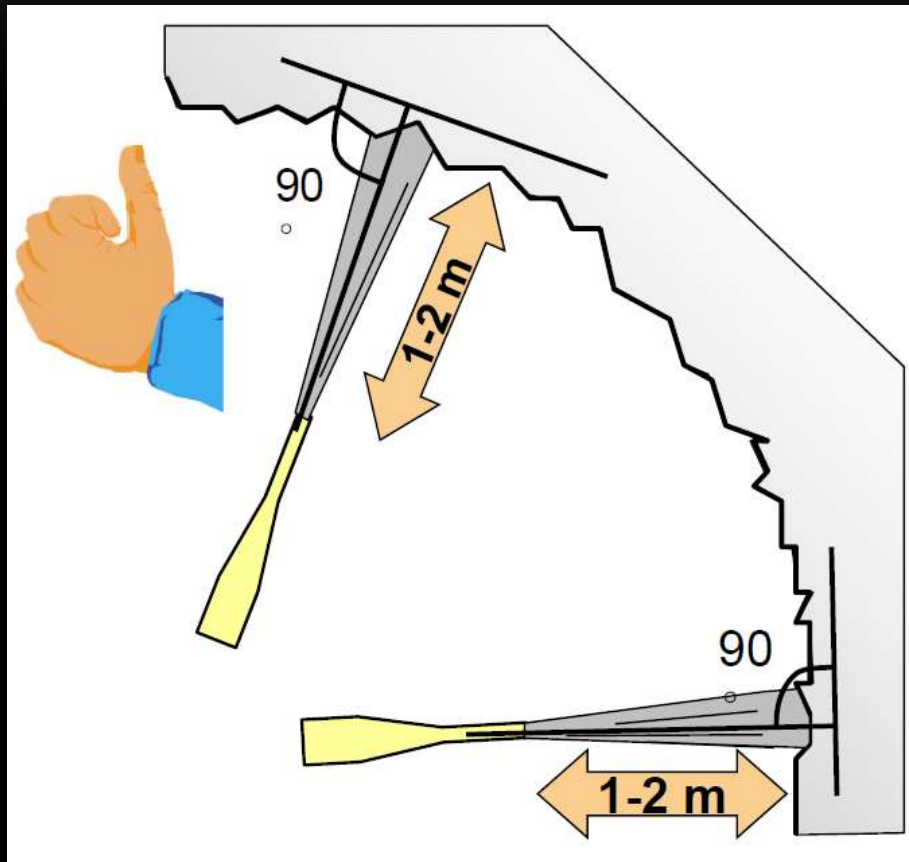


- $T_{\text{sustrato}} \geq 2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $T_{\text{hormigón}} \geq 10 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $T_{\text{accelerante}} \geq 15 \text{ } ^\circ\text{C}$

ASEGURAR BUENA POSICIÓN DEL OPERARIO



MIRAR BIEN Y A BUENA DISTANCIA



NO ATRAPAR REBOTE



CUIDADR DE CONEXIONES



LIMPIAR EQUIPOS DESPUÉS DE PROYECTAR



¿CÓMO CONTROLAR EL
HORMIGÓN?



H. DE PARTIDA

≠

H. PROYECTADO

Consistencia



UNE-EN 12350-2



UNE-EN 12350-5

H. DE PARTIDA

≠

H. PROYECTADO

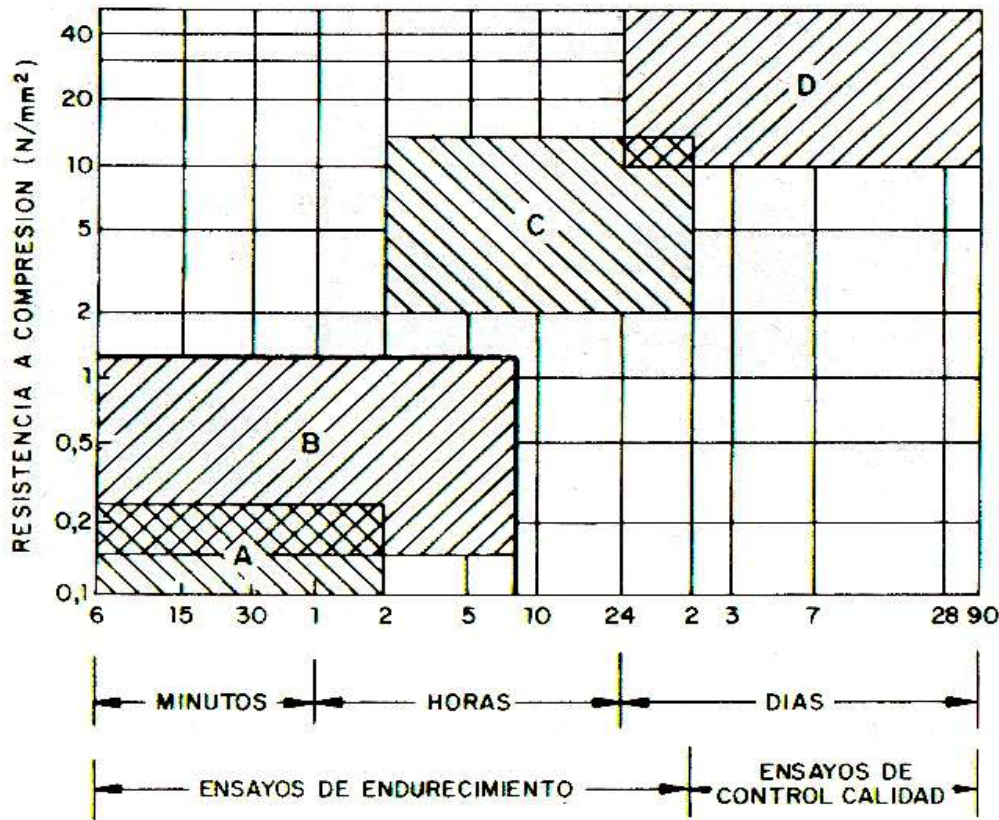
Consistencia

Ensayo	Rango	Sin aceler.	Con aceler.
Asentamiento UNE-EN 12350-2	entre 50 mm y 90 mm		
	entre 100 mm y 150 mm		
	entre 160 mm y 210 mm		
	Mayor que 220 mm		
Extensión de flujo UNE-EN 12350-5	entre 500 mm y 540 mm		
	entre 550 mm y 590 mm		
	entre 600 mm y 640 mm		
	entre 650 mm y 700 mm		

H. DE PARTIDA

≠

H. PROYECTADO



Ensayos in-situ

- A y B: Ensayo de penetración
- C: Ensayo de hincado de clavo

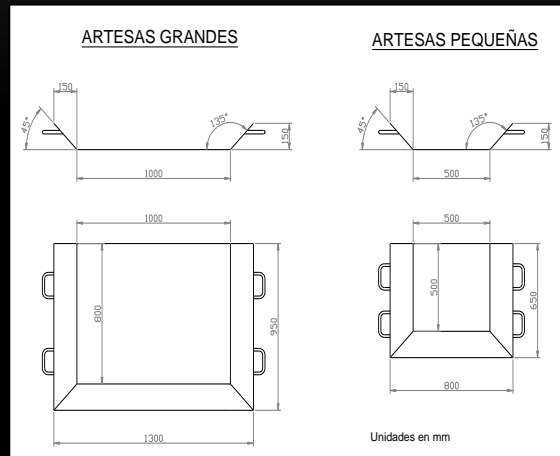
Ensayos en Laboratorio

- D: Ensayo sobre testigo

H. DE PARTIDA

≠

H. PROYECTADO

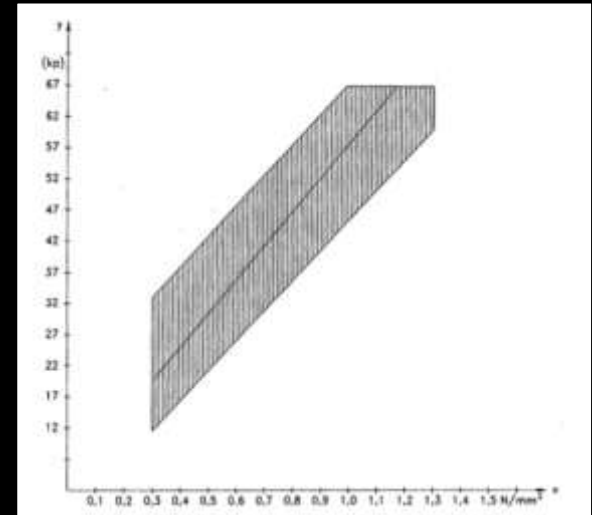


H. DE PARTIDA

≠

H. PROYECTADO

Resistencia a compresión (Penetrómetro)



EN-14488-2

H. DE PARTIDA

≠

H. PROYECTADO

Resistencia a compresión (Hincado de clavo)



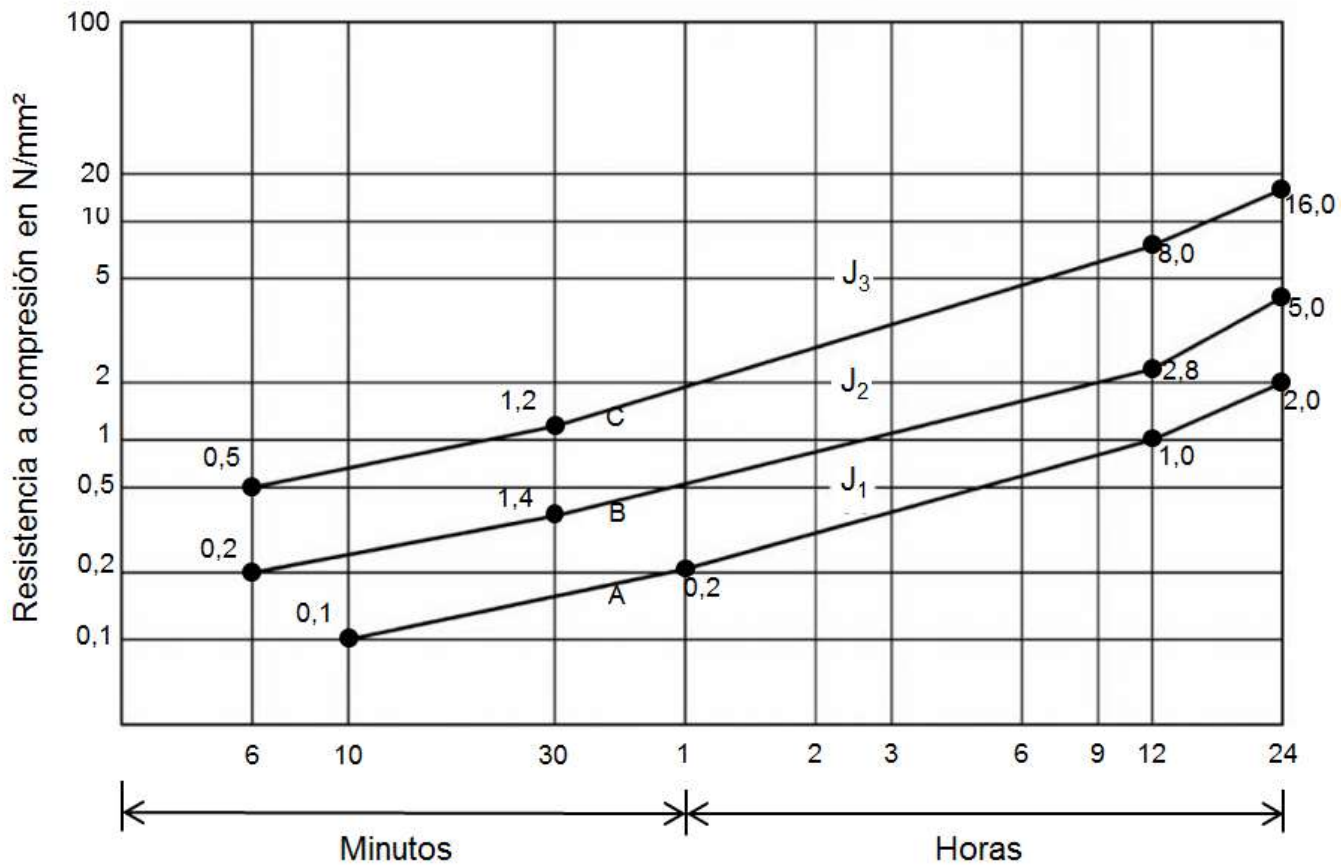
EN-14488-2

H. DE PARTIDA

≠

H. PROYECTADO

Resistencia a compresión



H. DE PARTIDA

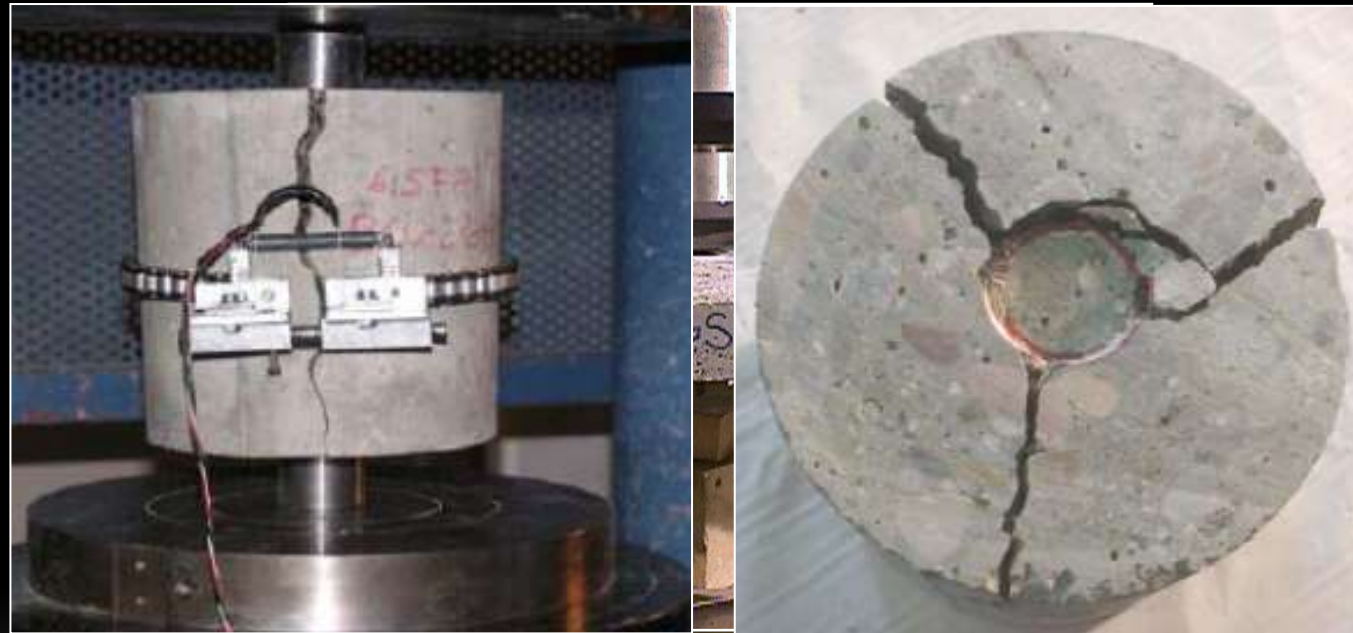
≠

H. PROYECTADO

Resistencia a residual y absorción de energía

- Ensayos para la caracterización del hormigón proyectado reforzado con fibras:

- Ensayo de viga
- Ensayos de placa
 - Panel EFNARC
 - Round panel
- Ensayo Barcelona

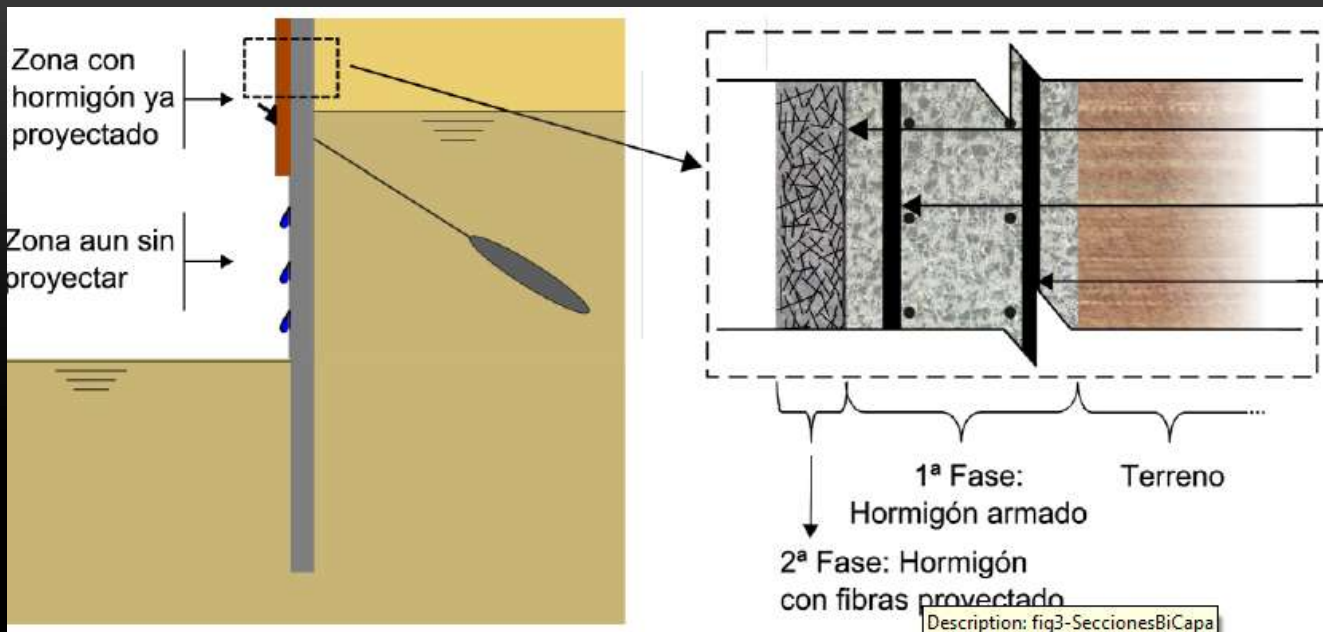


¿HORMIGÓN
ESTRUCTURAL?











¿CÓMO DIMENSIONAR
ESTRUCTURAS?



RELACIÓN ENTRE MÓDULO Y RESISTENCIA

Model Code 2010

Eurocode 2

EHE-08

	Model Code 2010	Eurocode 2	EHE-08
E_{cm}	$E_{cm} = E_{co} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + \Delta f}{10} \right)^{1/3}$	$E_{cm,j} = 9.5 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,j}}$	$E_{cm} = \alpha \cdot 8.5 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}}$
	$E_{cm} = E_{co} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3}$		
$E_{cm,j}$	$E_{cm,j} = \sqrt{\exp \left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0.5} \right] \right\}} \cdot E_{cm}$		$E_{cm,j} = \left(\frac{f_{cm,j}}{f_{cm}} \right)^{0.3} \cdot E_{cm}$

RELACIÓN ENTRE MÓDULO Y RESISTENCIA

Cemento

CEM I 52.5 R
CEM II/A-L 42.5 R

Agua

Potable
a/c: 0.45

Agregados

Arena Correctora 0-2 mm
Arena Fina 0-4 mm
Grava 4-12 mm

Superplastificante

→ Viscocrete 5940

Acelerantes

Familia 1
Familia 2
Familia 3

} 2 libre de álcali cada una

Familia	Dosis (%spc)		
	Baja	Media	Alta
1	5	7	9
2	5	7	9
3	9	11	-

32
dosificaciones

RELACIÓN ENTRE MÓDULO Y RESISTENCIA

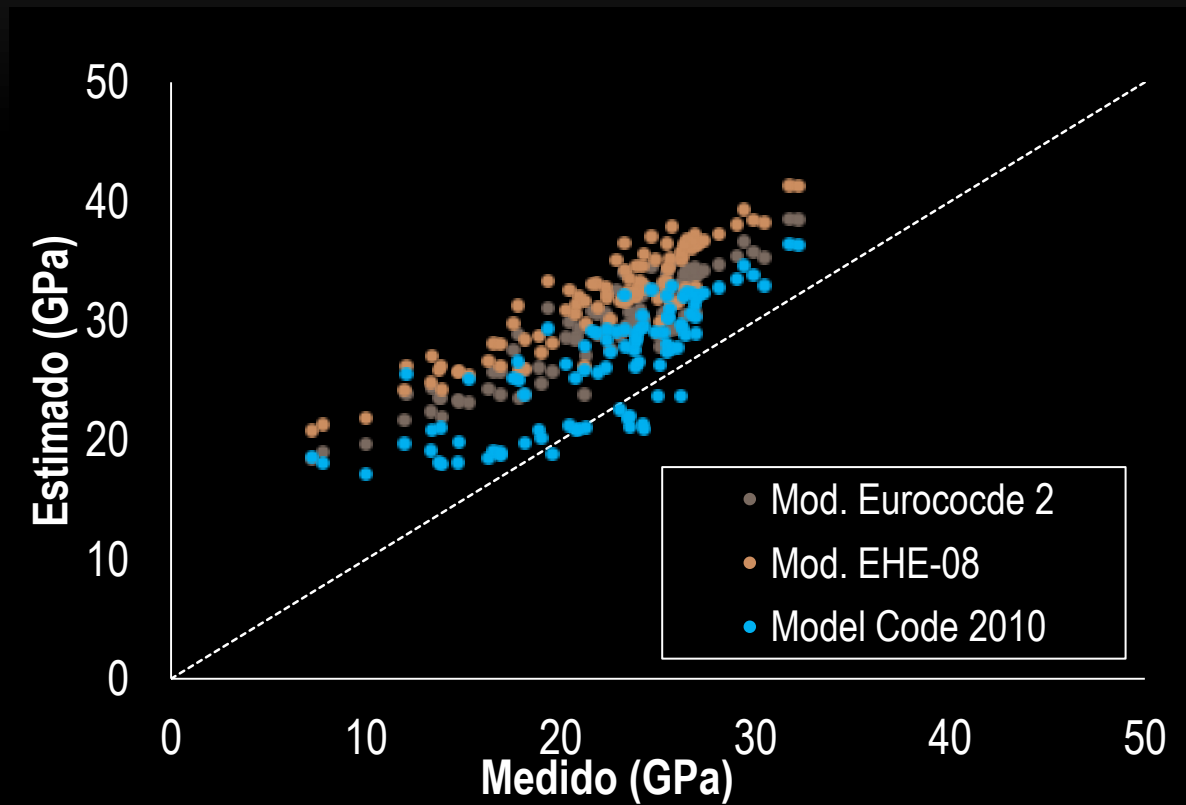
Procedimiento de proyección

- Condiciones exteriores:
Laboratorio Tecnología de Estructuras
Luis Agulló
- Bomba MEYCO Altera
→ Caudal: 4.4 m³/h
- Compresor Diesel de 10 m³/min
→ Presión: 4 bars
- Ensayos
Módulo de elasticidad
Resistencia a compresión
Porosidad



RELACIÓN ENTRE MÓDULO Y RESISTENCIA

Evaluación del ajuste



$$R^2_{\text{Model Code 2010}} = 0.92$$

$$R^2_{\text{Eurocode 2}} = 0.87$$

$$R^2_{\text{EHE-08}} = 0.78$$

Se requieren nuevas ecuaciones

RELACIÓN ENTRE MÓDULO Y RESISTENCIA

Aproximación Estadística

Eurocode 2

$$E_{cm,j} = \gamma \cdot 9.5 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,j}}$$



$$\gamma = 0.76$$

EHE-08

$$E_{cm,28} = \gamma_1 \cdot 8.5 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,28}}$$

$$E_{cm,j} = \left(\frac{f_{cm,j}}{f_{cm}} \right)^{0.30/\gamma_2} \cdot E_{cm}$$

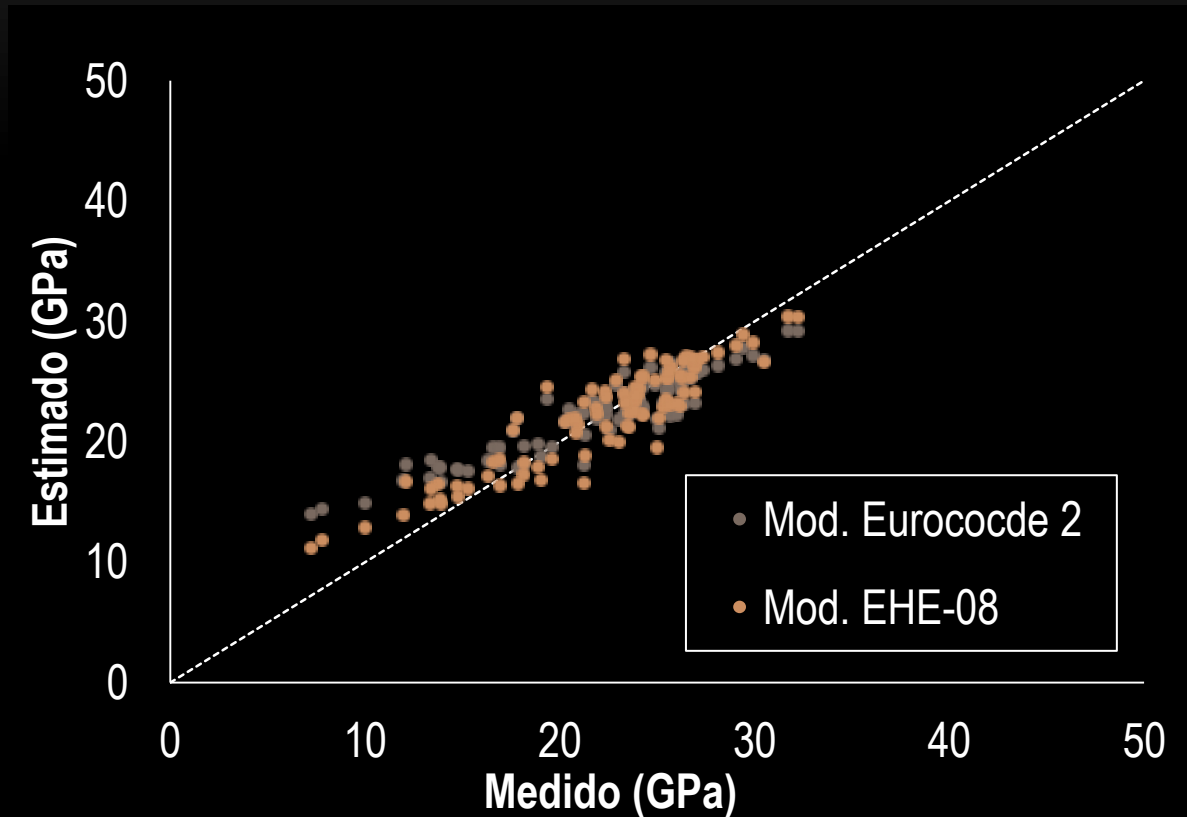


$$\gamma_1 = 0.88$$

$$\gamma_2 = 0.60$$

RELACIÓN ENTRE MÓDULO Y RESISTENCIA

Evaluación del ajuste

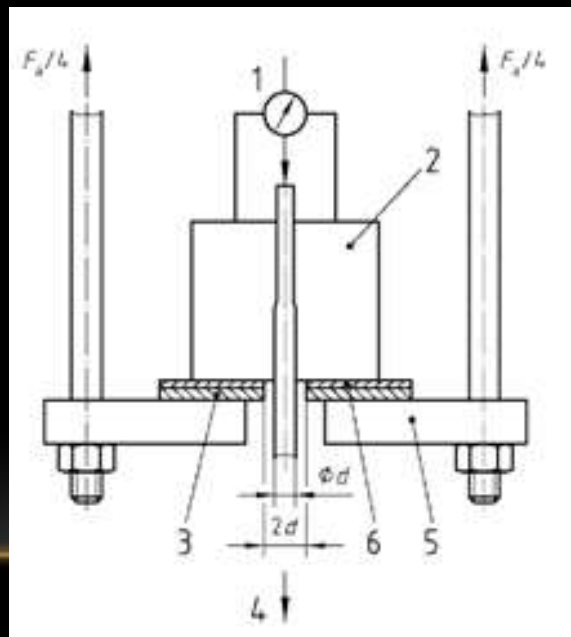
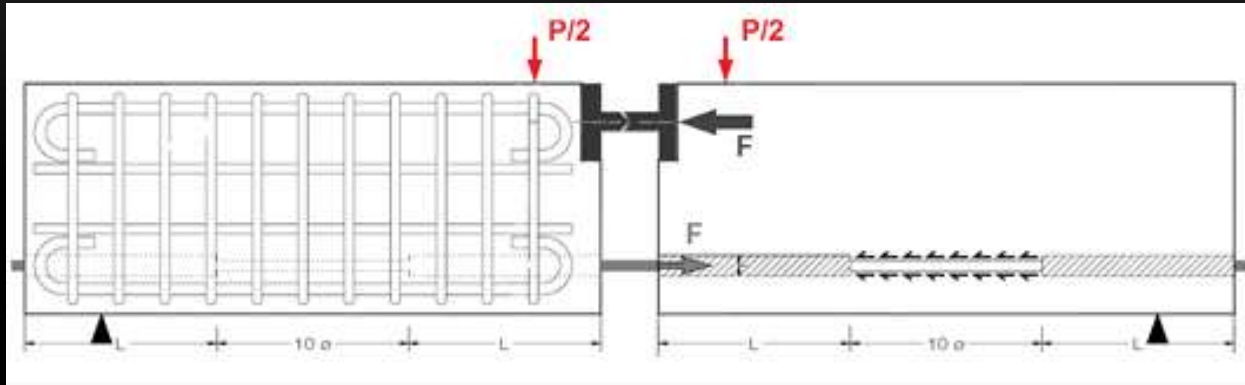


$$R^2_{\text{Eurocode 2}} = 0.98$$

$$R^2_{\text{EHE-08}} = 0.98$$

Se tienen nuevas ecuaciones

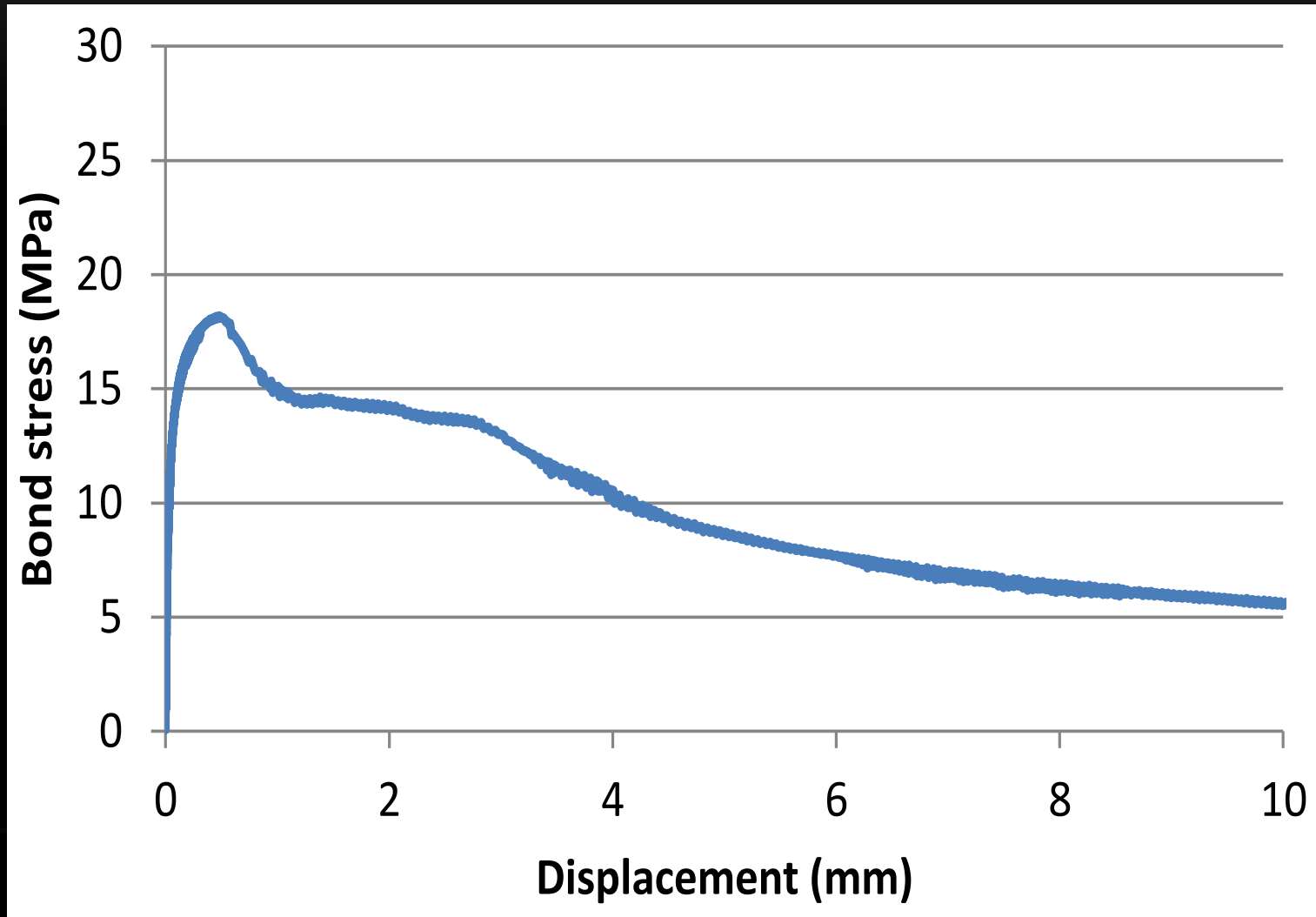
ADHERENCIA HORMIGÓN-BARRA DE ACERO



ADHERENCIA HORMIGÓN-BARRA DE ACERO



ADHERENCIA HORMIGÓN-BARRA DE ACERO



ADHERENCIA HORMIGÓN-BARRA DE ACERO

Cubic specimen (EN 10080)					
Tipo	1 (MPa)	2 (MPa)	3 (MPa)	Promedio (MPa)	C.V.
HC	19,63	20,76	22,91	21,10	7.90%

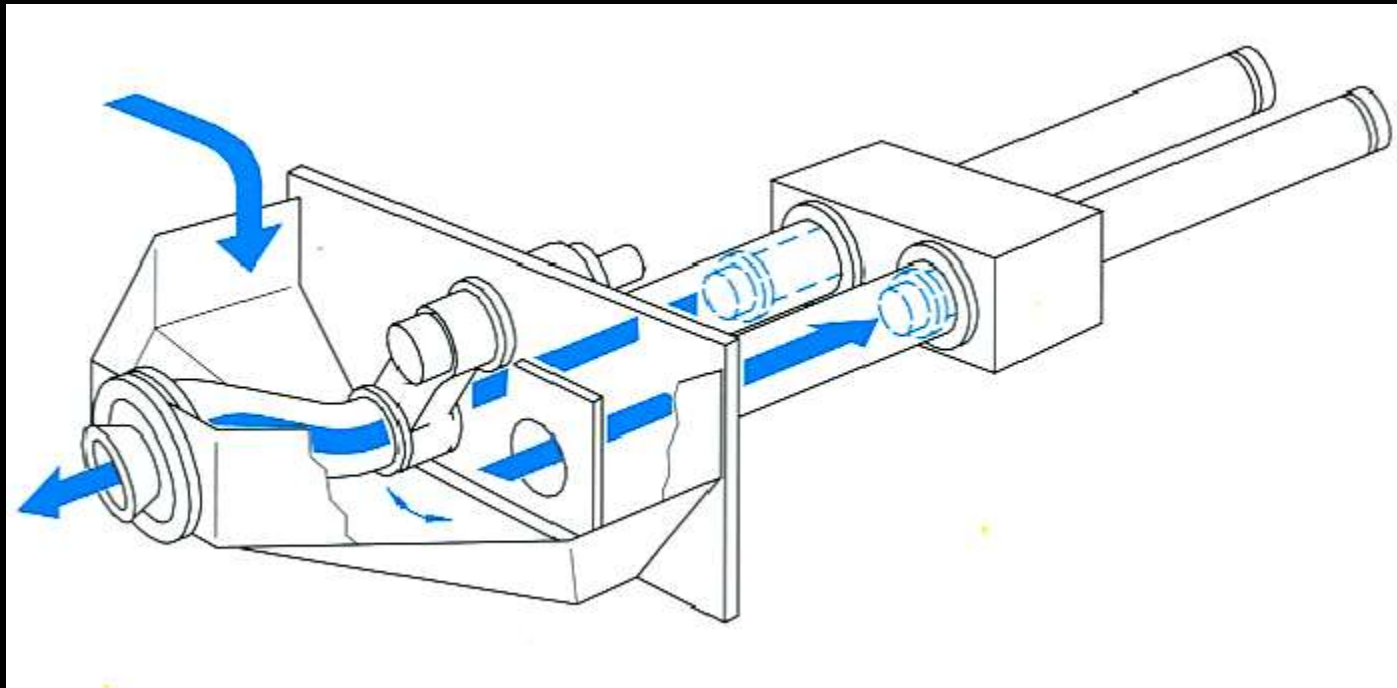
Panel					
Tipo	1 (MPa)	2 (MPa)	3 (MPa)	Promedio (MPa)	C.V.
HC	22,74	26,75	23,13	24,21	9.14%
HP	19,31	19,59	20,38	19,99	2,80%

¿CUÁLES SON LOS
AVANCES MÁS
RECIENTES?

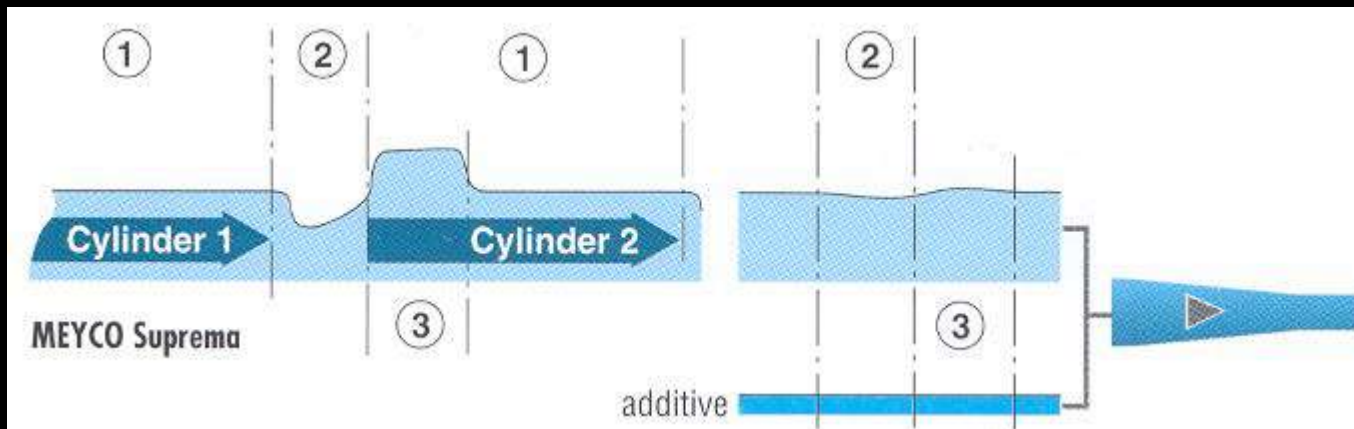
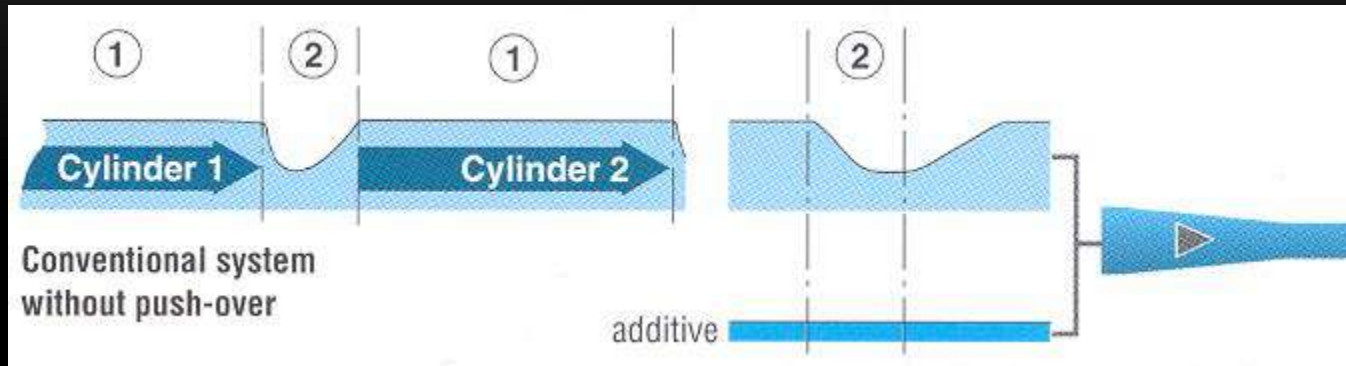
NUEVO ANEJO PARA EL CÓDIGO ESTRUCTURAL

- Diferencias entre Hormigón de Partida y Hormigón Proyectado (en estructura y en artes)
- Aportar formulaciones y modelos constitutivos para el cálculo estructural
- Acotar responsabilidades
- Establecer buenas prácticas
- Estandarizar control

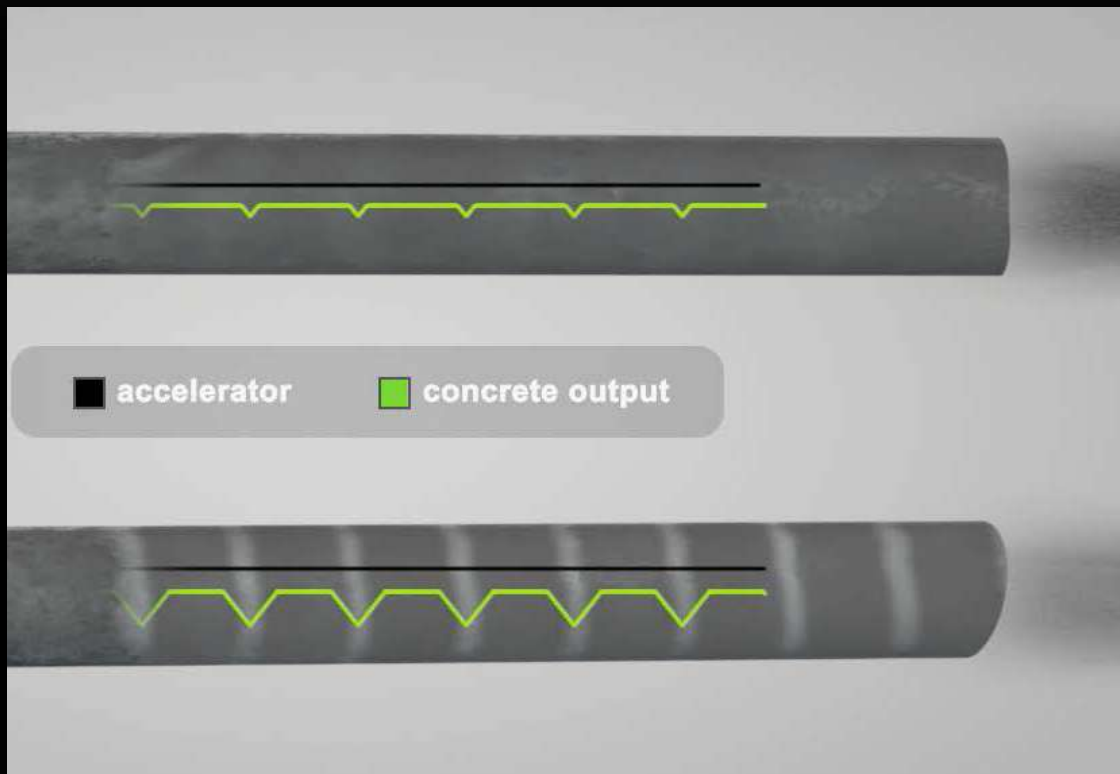
BOMBA CON CICLO DE PRESIÓN VARIABLE



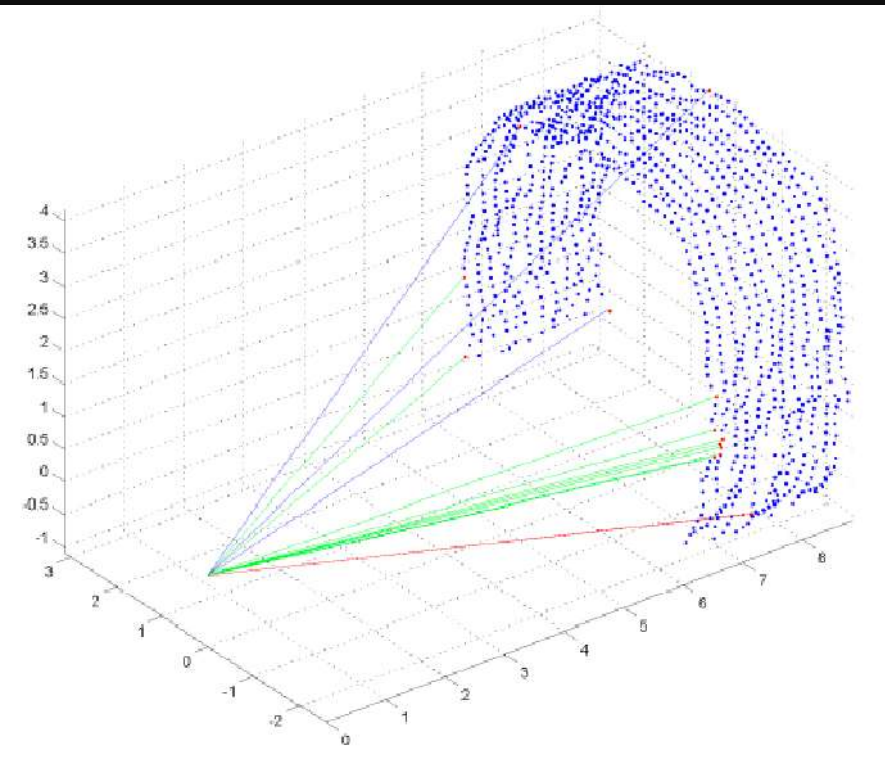
BOMBA CON CICLO DE PRESIÓN VARIABLE



BOMBA CON CICLO DE PRESIÓN VARIABLE



ESCANEADO CONTINUADO DE PROYECCIÓN



SIMULADORES VIRTUALES



HORMIGÓN PROYECTADO

Sergio Cavalaro

**Profesor del Dpto. Ingeniería de la Construcción
E.T.S. Ingenieros de Caminos Canales y Puertos**

Universidad Politécnica de Cataluña

sergio.pialarissi@upc.edu