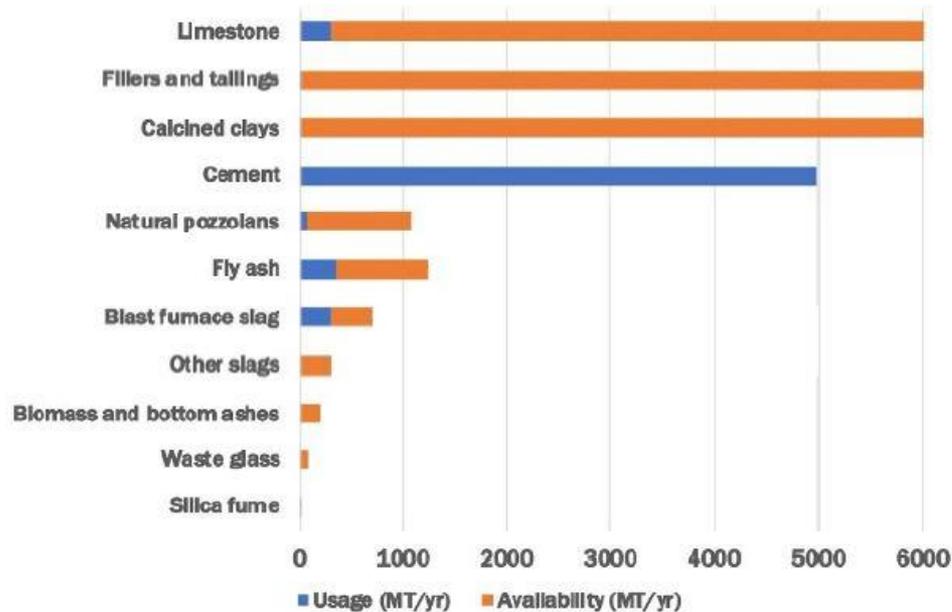




# Evaluación de la reactividad de las nuevas adiciones

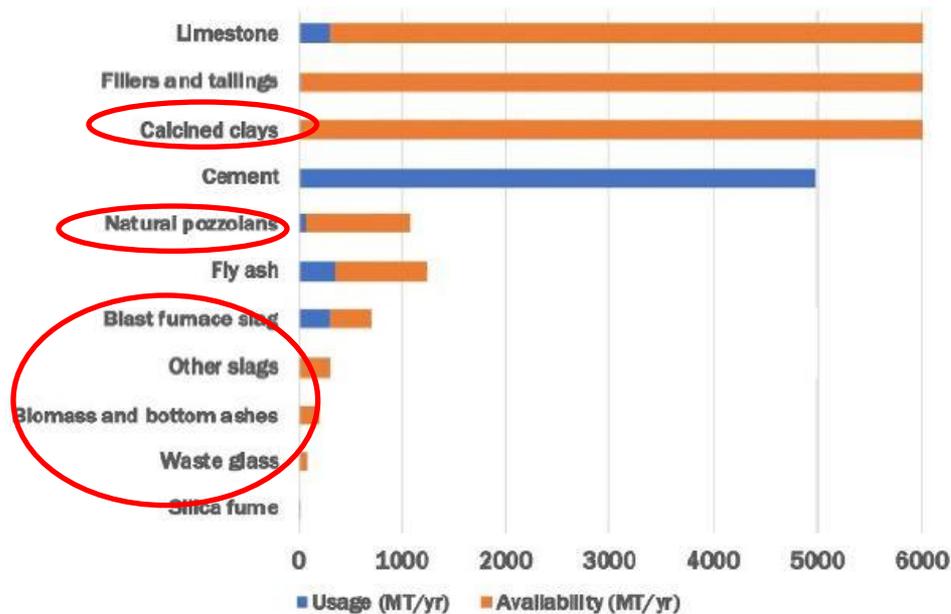
Tecnología de nuevos hormigones con cementos ternarios (UNE-EN 197-5:2021) y con la adición Q

- **Situación actual**
- **Necesidad de medida de la reactividad**
- **Métodos de evaluación actuales y nuevos métodos**
- **Descripción de los métodos  $R^3$  para evaluar la reactividad**
- **Resultados RILEM y otros**
- **Conclusiones**



Fuente: Cem Concr Res (2018) 114: 2-26.

- **Producimos unas 4.200 Mt de cemento en el mundo**
- **El consumo de cemento se incrementará en las próximas décadas**
- **La producción supone un 6 % aprox. de las emisiones de CO<sub>2</sub> mundiales**
- **Reducción cenizas volantes y escorias de horno alto**



Fuente: Cem Concr Res (2018) 114: 2-26.

- Emplear nuevas adiciones activas con baja huella de carbono (arcillas calcinadas y otras como puzolanas o cenizas volantes alternativas)
- Necesidad de caracterizar de forma rápida y fiable la reactividad de las adiciones diferenciando las inertes de las activas para estimar su contribución a la resistencia final
- Definir los criterios y límites de aceptación de las nuevas adiciones activas

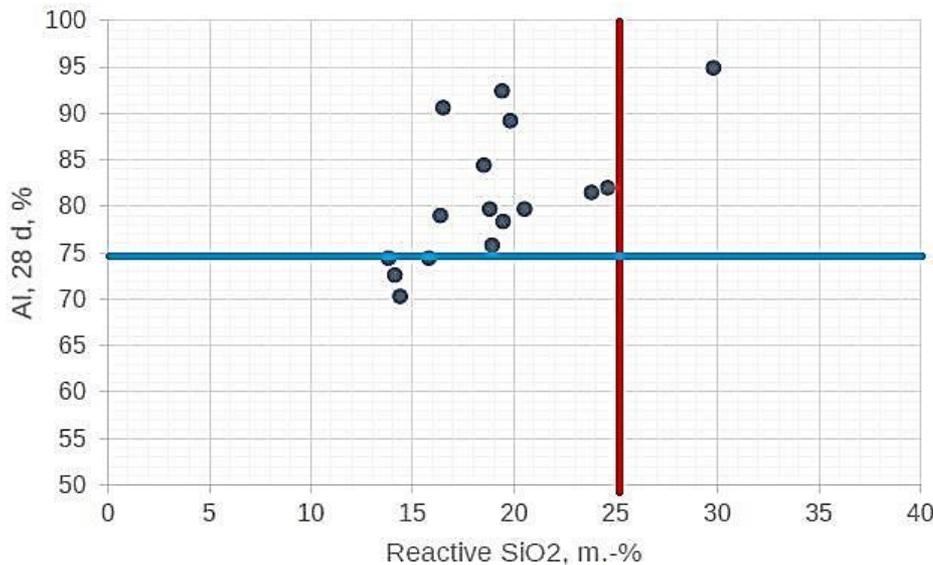
### Evaluación de la reactividad en las adiciones activas comúnmente usadas en cementos

Adición	Definición	Normas especificaciones	Requisitos y criterios sobre reactividad	Métodos de ensayo
Puzolana natural (P)	Fundamentalmente formadas por $\text{SiO}_2$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ entre otros	EN 197-1	$\text{SiO}_2$ reactivo > 25 %	EN 196-2
		UNE 80303-1 y 2	I.A. 28 d > 75% y cumplir puzolanicidad	EN 196-1 y EN 196-5
Puzolana natural calcinada (Q)	Puzolanas naturales activadas térmicamente conformes con la definición de Puzolana natural (P)	EN 197-1	$\text{SiO}_2$ reactivo > 25 %	EN 196-2
Ceniza volante sílicea (V)	Fundamentalmente formadas por $\text{SiO}_2$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ entre otros	EN 197-1	$\text{SiO}_2$ reactivo > 25 %	EN 196-2
		UNE 80303-1 y 2	I.A. 28 d > 75% y cumplir puzolanicidad	EN 196-1 y EN 196-5

### Evaluación de la reactividad en las adiciones activas comúnmente usadas en hormigón

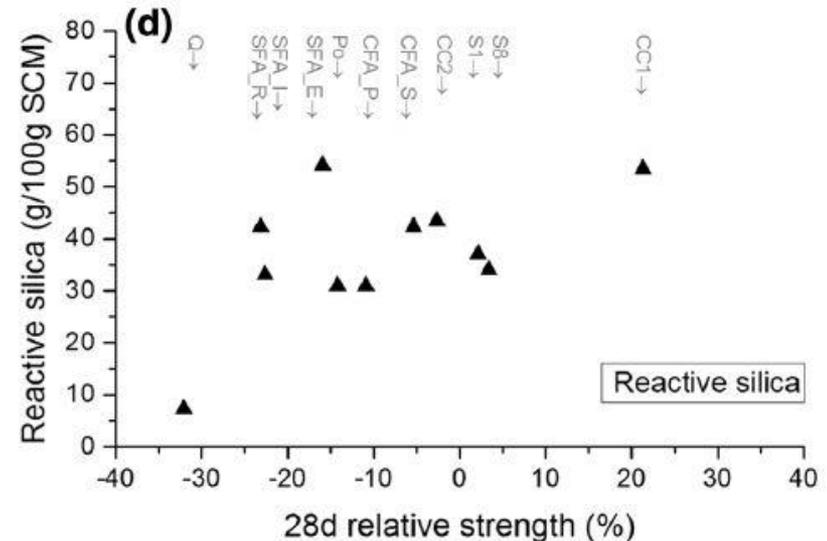
Adición	Definición	Normas especificaciones	Requisitos y criterios sobre reactividad	Métodos de ensayo
Ceniza volante sílicea	Fundamentalmente formadas por $\text{SiO}_2$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ entre otros procedente de la combustión de carbón	EN 450-1	$\text{SiO}_2$ reactivo > 25 %	EN 196-2
			I.A. > 75 % a 28 d + I.A. > 85 % a 90d	EN 196-1
Humo de sílice	Fundamentalmente $\text{SiO}_2$ amorfo como subproducto de la producción de Si metal y aleaciones de ferrosilicio	EN 13263-1	I.A. > 100 % a 28 d	EN 196-1 (empleando superplastificante)

### Problema en la evaluación de la reactividad de arcillas calcinadas y otras adiciones



Fuente: VDZ S. Baetzner (modificado)

**No hay correlación entre el contenido en SiO<sub>2</sub> reactivo y el índice de actividad a 28 días de cementos con arcillas calcinadas**



Fuente: Li et al. Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267 phase 1. Materials and Structures 2018

**No hay correlación entre el contenido en SiO<sub>2</sub> reactivo y el índice de actividad de cementos con otras adiciones**

### Métodos actuales ya normalizados

- Ensayo de I.A. mediante resistencia a compresión (EN 196-1)
- SiO<sub>2</sub> reactivo (EN 197-1/EN 196-2)
- Ensayo de Frattini (puzolanicidad según EN 196-5)
- Ensayo de Chapelle (NF P18-513)
- Ensayo reactividad según IS 1727-1967

### Otros métodos normalizados en fase de estudio

- Ensayo modificado basado en la reactividad de cales según CSA A3004-E1
- Ensayo modificado basado en la medida de la resistividad de probetas de mortero según ASTM C1876-19

### Métodos nuevos ya normalizados

- Métodos R<sup>3</sup> de medida de calor de hidratación y agua combinada (ASTM C1897-20)

### Necesidad de consensuar métodos

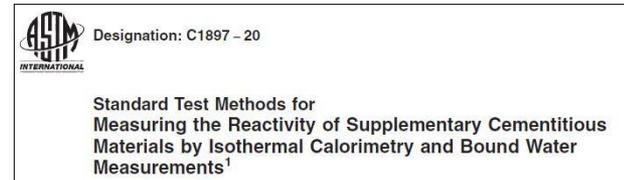
- Para una amplia variedad de posibles adiciones
- Prácticos y con suficiente facilidad de ser implantados en los laboratorios
- Con buena precisión

### Métodos R<sup>3</sup>

- Rápidos
- Robustos
- Relevantes
- Medida del calor de hidratación
- Medida del agua ligada



### ASTM C1897-20



### RILEM TC 267-TRM

- 5 años de trabajo
- Análisis de métodos existentes
- Optimización de métodos R<sup>3</sup>



### Futura prEN XXX-XX



CEN/TC 51/WG15 - prEN XXX-XX:2022

Reactivity of cement constituents – Heat of hydration and bound water methods

### Método A (calor de hidratación)

- Pasta: **constituyente/adición + Ca(OH)<sub>2</sub> + CaCO<sub>3</sub> + solución (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + KOH)**
- Medir calor de hidratación en condiciones isotérmicas (40 °C) conforme a EN 196-11
- El calor de hidratación desprendido a 3 días y a 7 días dará la medida de la reactividad de la adición o constituyente

### Método B (agua ligada)

- Pasta: **constituyente/adición + Ca(OH)<sub>2</sub> + CaCO<sub>3</sub> + solución (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + KOH)**
- **Tras endurecimiento y curado 7 días**, determinar el agua ligada químicamente de la pasta mediante secado a 350 °C y posterior pesada
- La cantidad de agua así determinada dará la medida de la reactividad de la adición o constituyente

### Esquema prEN XXX-XX

Preparación previa de la mezcla en seco

- Tamizado por 45 μm de la muestra
- Homogeneizar y separar 100 g
- Mezclar manualmente con Ca(OH)<sub>2</sub> + CaCO<sub>3</sub>
- Secar a 40 °C

**Mezcla A:** agitación mecánica mezcla seca + solución de potasio para pasta homogénea

Introducir **pasta A** en contenedor

Calibrar y ajustar el calorímetro

Introducir contenedor en calorímetro

Registrar calor liberado a 40 °C  
H<sub>3 días</sub> (J/g)  
H<sub>7 días</sub> (J/g)

Calcular H<sub>constituyente</sub> (J/g)

Method	Cement Constituent	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Potassium solution
Mass	g	g	g	g
Method A	2,00± 0,01 g	6,00± 0,01 g	1,00± 0,01 g	10,80± 0,01 g
Method B	4,00± 0,01 g	12,00± 0,01 g	2,00± 0,01 g	21,60± 0,01 g

### Método A

- Crítico el ajuste del calorímetro
- Es relativamente caro

### Método B

- Crítica la fase de trituración
- Es económico

**Mezcla B:** agitación mecánica mezcla seca + solución de potasio para pasta homogénea

Introducir **pasta B** en 2 recipientes herméticos

Curado 7 días a 40 °C

Triturar pasta endurecida y secar 24 h a 40 °C

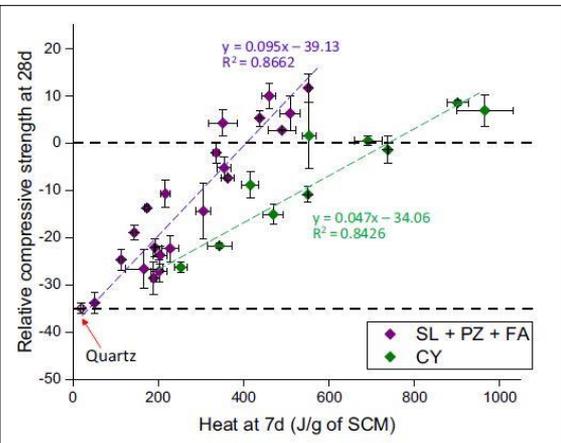
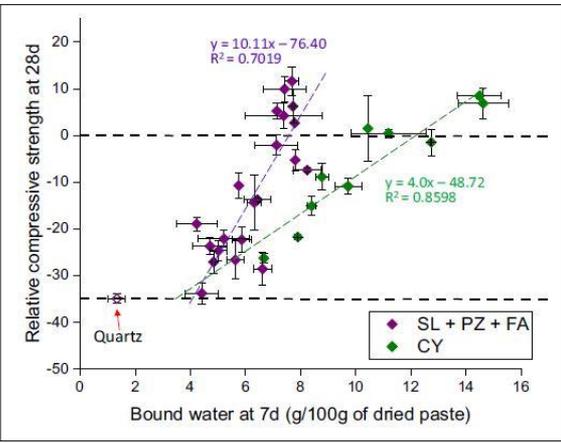
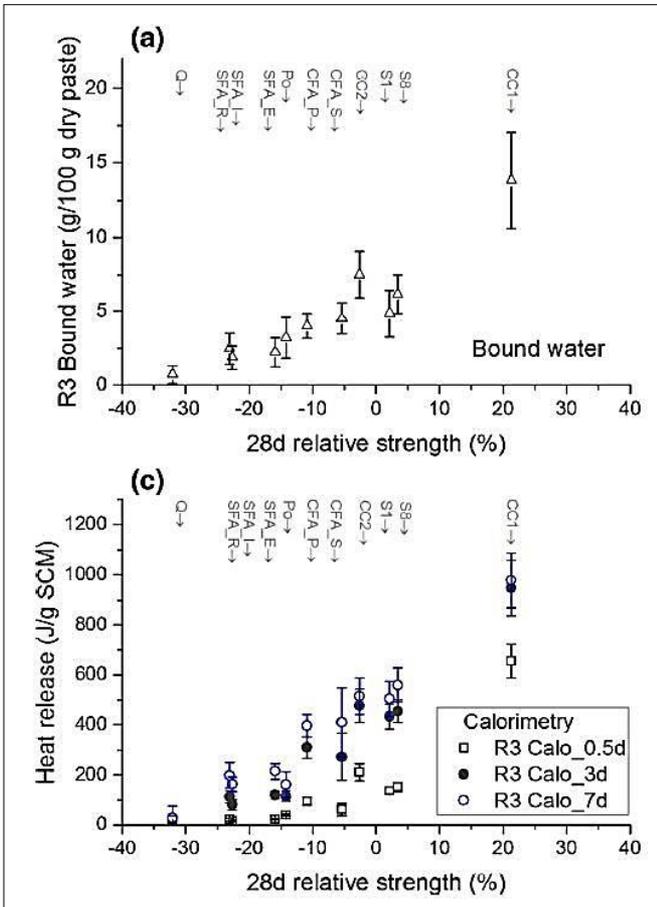
Calcinar 2 h a 350 °C una cantidad conocida (g)

Enfriar 1 h a 60 °C y pesar (g)

Calcular H<sub>2O ligada</sub> (g)

## Correlación de los métodos R<sup>3</sup> y el índice de actividad

Buena correlación de ambos métodos R<sup>3</sup> y los ensayos de resistencia a 28 días

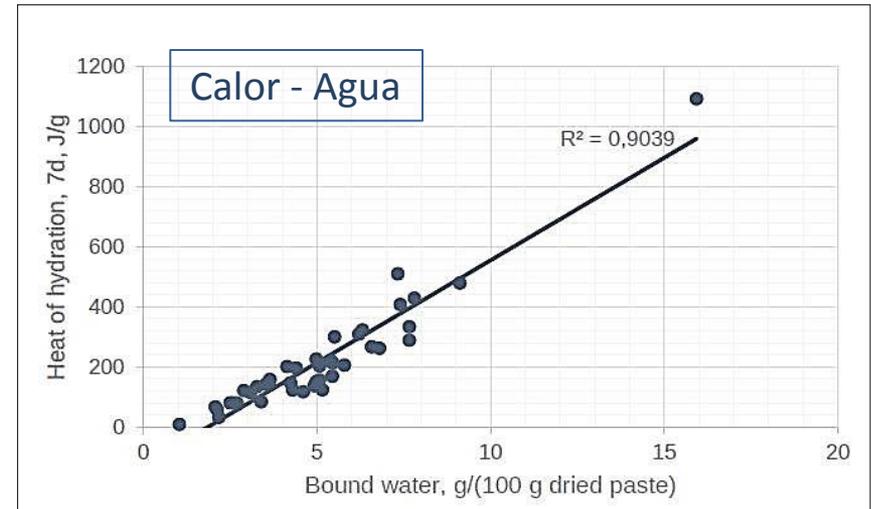
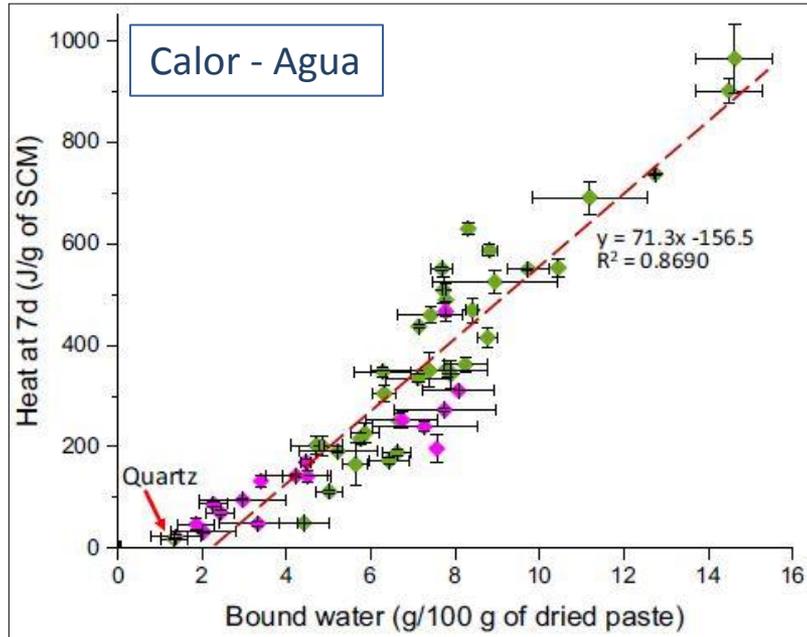


Fuente: Londono-Zuluaga et al. Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267 phase 3. Materials and Structures 2022

Fuente: Li et al. Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267 phase 1. Materials and Structures 2018

## Correlación entre Calor de Hidratación – Agua Ligada

Resultados de los ensayos R<sup>3</sup> para arcillas calcinadas y una variedad de adiciones (convencionales y no convencionales)



Fuente: VDZ S. Baetzner

Fuente: Londono-Zuluaga et al. Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267 phase 3. Materials and Structures 2022

Buena correlación entre ambos métodos R<sup>3</sup> tanto para adiciones conocidas como para arcillas calcinadas y otras alternativas

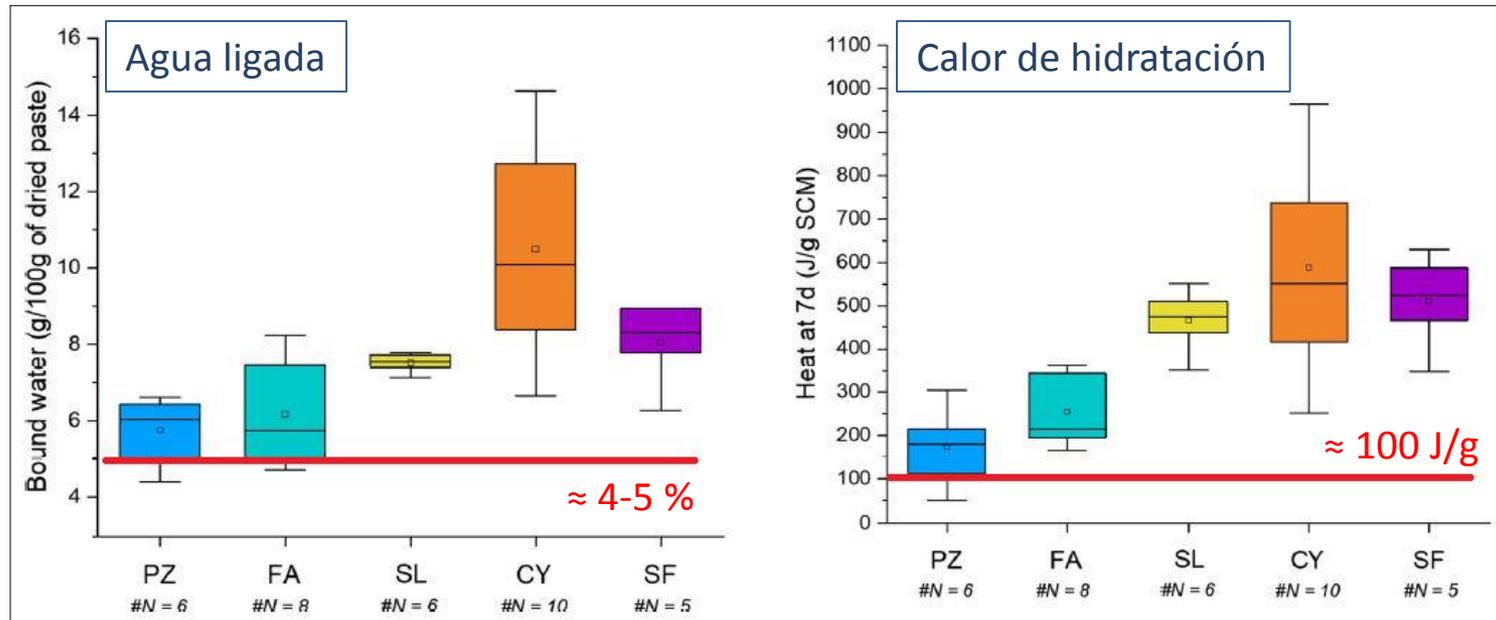


Posibilidad de emplear **indistintamente** el método de calor de hidratación o el método de agua ligada

**En discusión.** No excluir con límites demasiado restrictivos:

- adiciones tradicionales como puzolanas naturales
- adiciones como las cenizas volantes con índice de actividad > 75 % a 28 días

Primera aproximación según los resultados de interlaboratorio con distintas adiciones:



Fuente: Londono-Zuluaga et al. Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267 phase 3. Materials and Structures 2022

- Para algunas adiciones en estudio como las arcillas calcinadas y otras adiciones alternativas **no hay correlación** entre el contenido en **SiO<sub>2</sub> reactivo** y el **índice de actividad** a 28 días
- El límite establecido por el método del **SiO<sub>2</sub> reactivo** (> 25 %) según la EN 197-1 **no siempre es válido** para nuevas adiciones alternativas como son las arcillas calcinadas
- Tras los estudios llevados a cabo en los últimos 5 años, una alternativa son los métodos R<sup>3</sup> ya normalizados en la ASTM C1897-20. Métodos del **calor de hidratación** hasta edad de 3 o 7 días y del contenido de **agua ligada** a la edad de 7 días
- El proyecto de norma europeo **prEN XXX-XX “Reactivity of Cement Constituents – Heat of Hydration and Bound Water test methods”** está actualmente en fase de borrador en el seno del CEN/TC 51/WG 15.
- Los límites de especificación para ambos métodos no están definidos, pero están en fase de estudio dentro del CEN/TC 51/WG 6
- Es importante poner en marcha a nivel nacional **ensayos de interlaboratorio** con ambos métodos para que fabricantes y laboratorios en España tengan mayor experiencia

## Gracias por la atención

Daniel del Barrio Saiz  
[dbarrio@loemco.com](mailto:dbarrio@loemco.com)

