

# Seminario

## Arquitectura en Hormigón

Posibilidades y Desafíos

Ricardo Serpell

Investigación e Innovación

ÁREA EDIFICACIÓN [WWW.CONCRETARQ.CL](http://WWW.CONCRETARQ.CL)

GRUPO DE INVESTIGACIÓN:

INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN (ETC)



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CHILE

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN  
ESCUELA DE INGENIERÍA



---

A.D. 1824 . . . . . N° 5022.

---

**Artificial Stone.**

---

**ASPDIN'S SPECIFICATION.**

**TO ALL TO WHOM THESE PRESENTS SHALL COME, I, JOSEPH ASPDIN, of Leeds, in the County of York, Bricklayer, send greeting.**

...

My method of making a cement or artificial stone for stuccoing buildings, waterworks, cisterns, or any other purpose to which it may be applicable (and which I call Portland cement) is as follows:—I take a specific quantity of limestone, such as that generally used for making or repairing roads, and I take it from the roads after it is reduced to a puddle or powder; but if I 5

---

**2013** ... material más producido en el mundo

---

**3.600**

millones de toneladas  
de cemento Portland

( USGS, 2013 )

**15.000**

millones de m<sup>3</sup>  
de hormigón

**~ 5%**

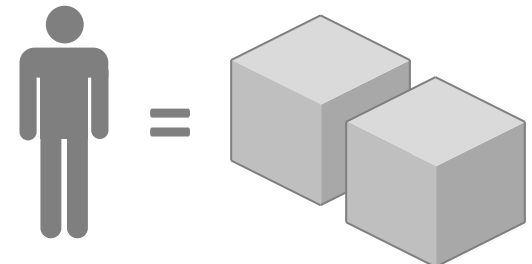
emisiones de CO<sub>2</sub>  
antropogénicas

**4.500**

TWh

> **50** veces la demanda  
de energía en Chile

> **15** cerros San Cristóbal  
> **2 m<sup>3</sup>** per cápita



**resistente**

**versátil**

**diseñado a medida**

**moldeable**

**disponible**

**simple**

**incombustible**

**inorgánico**

**insoluble**

**durable**

**reciclable**



*House. Rachel Whiteread, 1993*

un material que evoluciona y se adapta  
mediante la **investigación** e **innovación**





## Investigación e innovación

### Problemas recurrentes

alto grado de control sobre las prestaciones, pero  
**los resultados no siempre son satisfactorios**

### Problemas nuevos

nuevos requerimientos de la industria y la sociedad  
**nuevo contexto, nuevo énfasis, nuevas prioridades**

s. XIX



s. XX



s. XXI

**materiales**

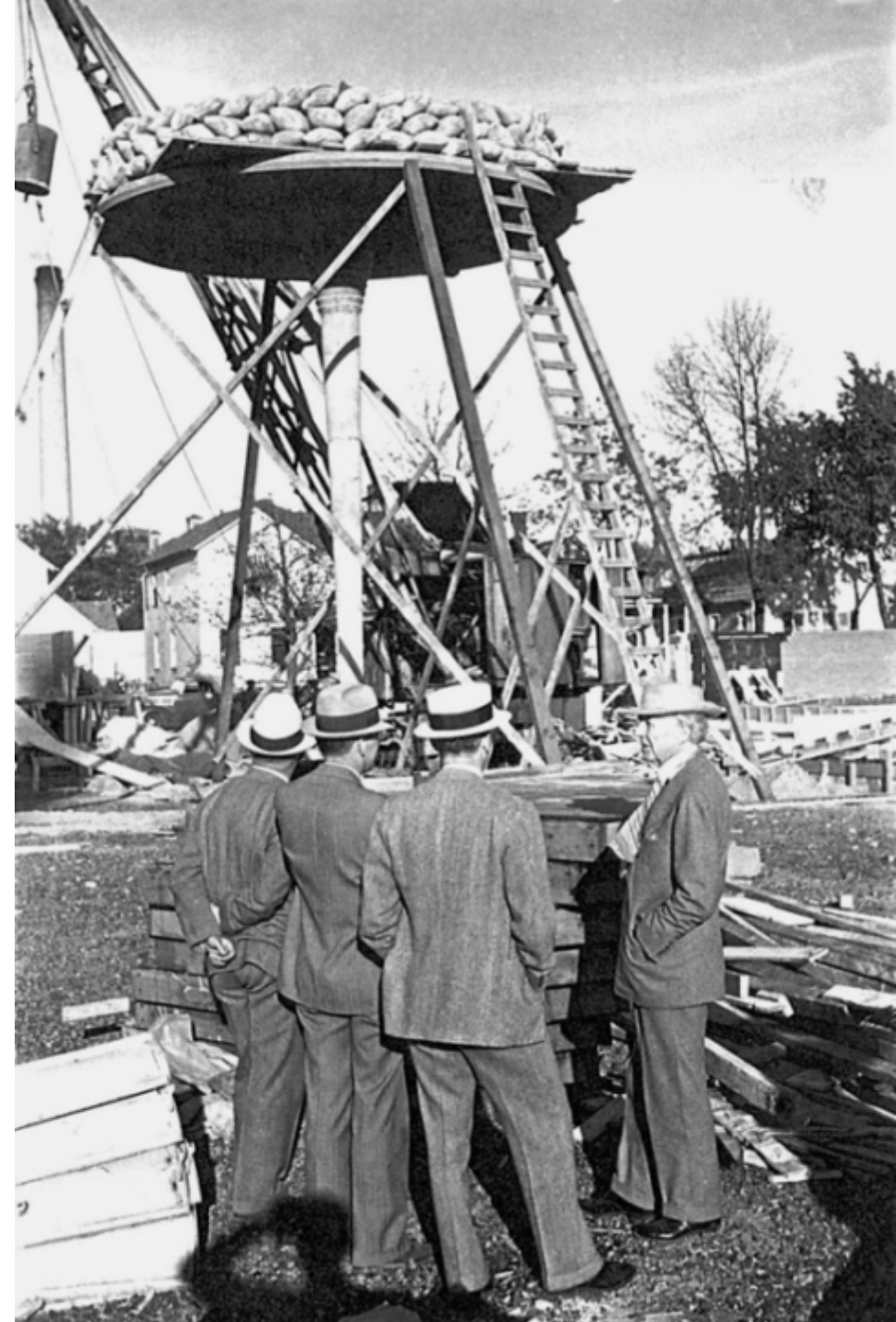
**procedimientos**

**formas**

**propiedades**

**durabilidad**

**medio ambiente**



Frank Lloyd Wright en una prueba de la columna *lilypad* para el Johnson Wax Building, 1930  
( Archivo Oak Clearing Farm and Museum )



# Impacto ambiental del hormigón

impacto directo

consumo de **recursos naturales**

consumo de **energía**

**emisiones**

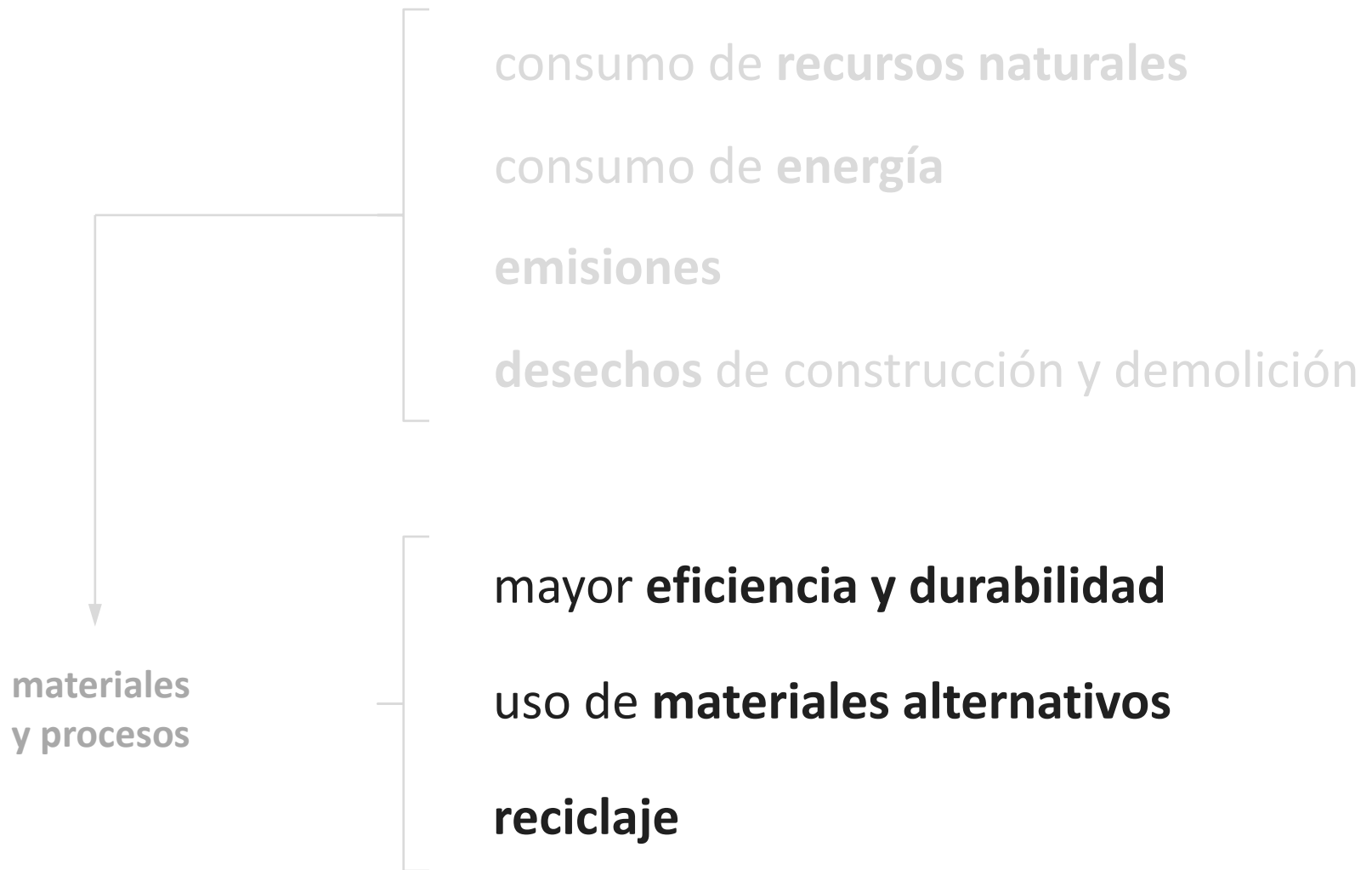
**desechos** de construcción y demolición

impacto indirecto

**comportamiento energético**

de la edificación e infraestructura

# Investigación y hormigón sustentable



# Investigación e Innovación

materiales  
y procesos

mayor **eficiencia y durabilidad**

uso de **materiales alternativos**

**reciclaje**

tecnologías

hormigón arquitectónico

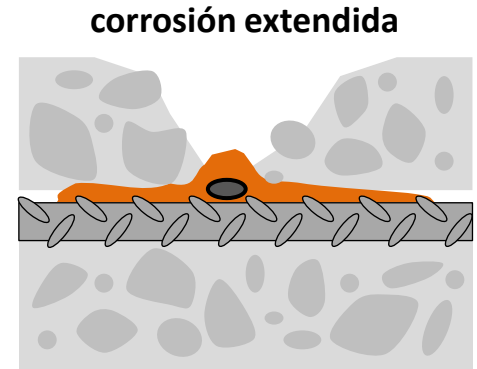
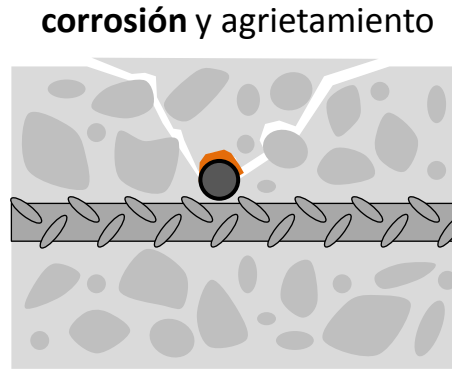
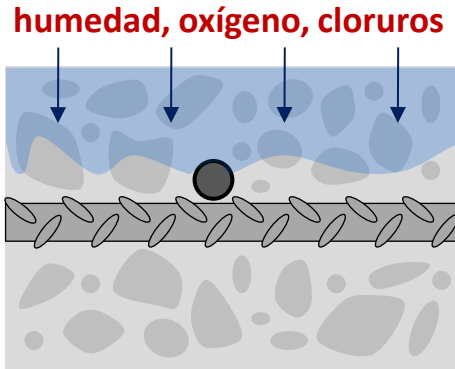
y **manufactura digital**

# Investigación en **materiales y procesos**

# Durabilidad y agrietamiento

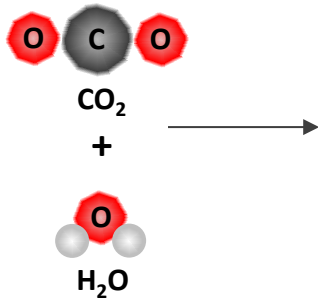
El agrietamiento facilita el **acceso de agentes de deterioro**

corrosión



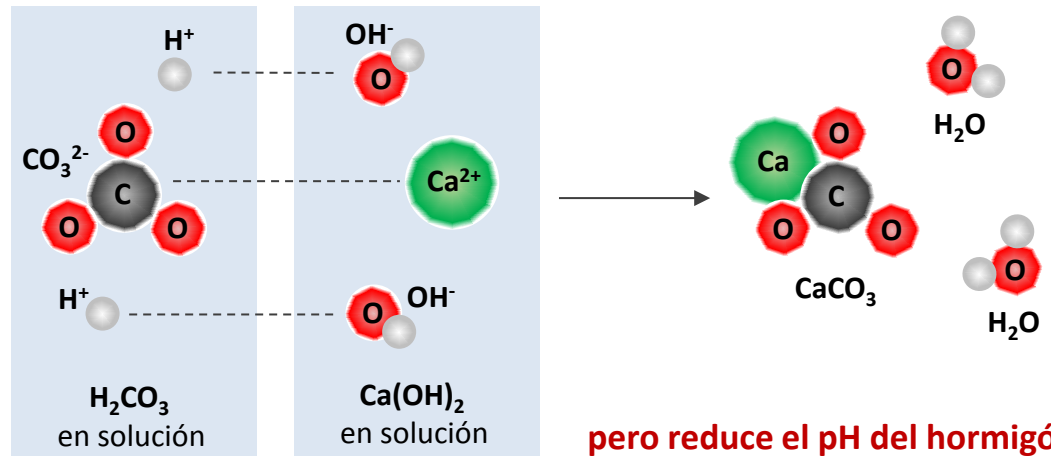
carbonatación

**CO<sub>2</sub>** se disuelve en **agua** y forma ácido carbónico



capta **CO<sub>2</sub>** de la atmósfera

**ácido carbónico** + hidróxido de calcio = **carbonato de calcio** y agua



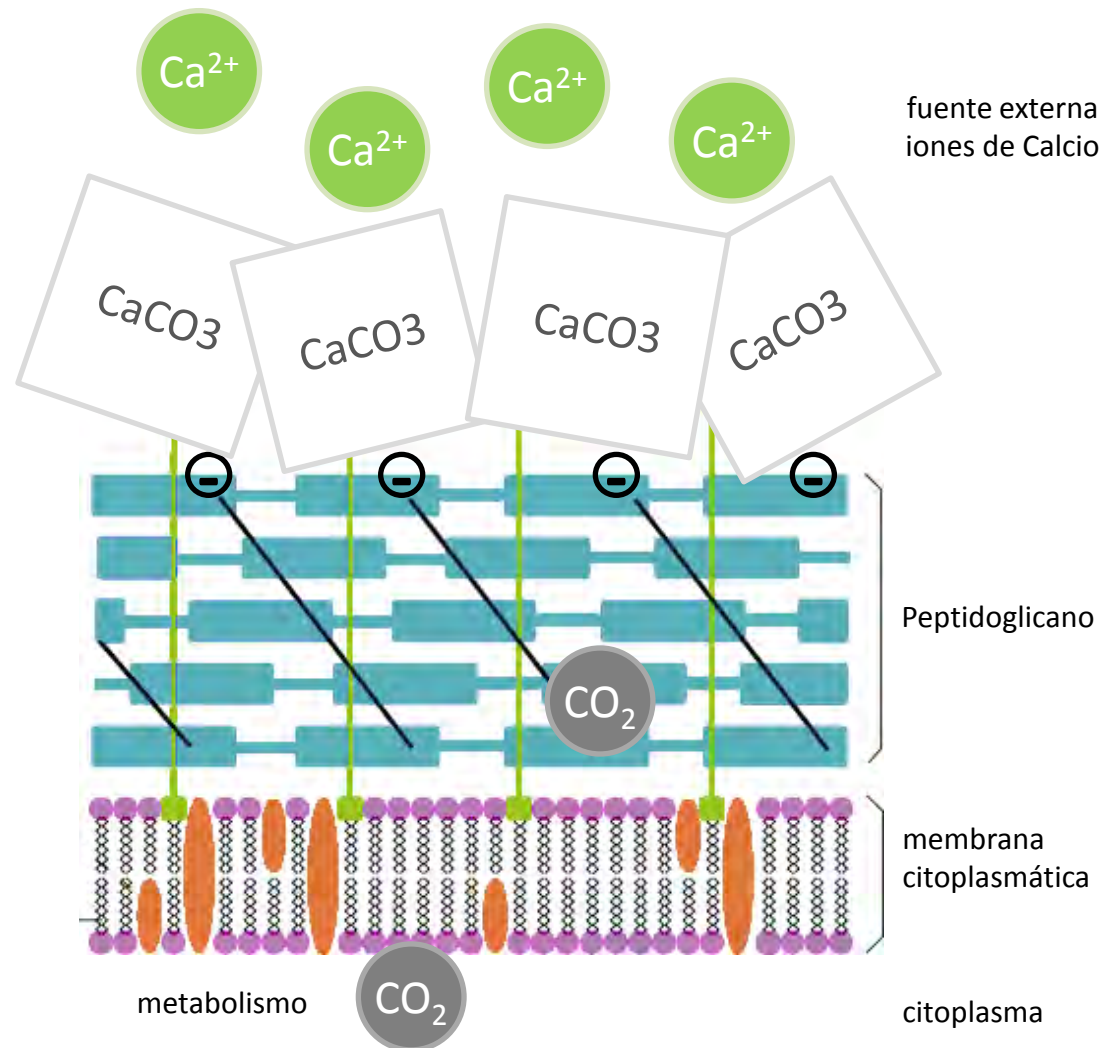
**pero reduce el pH del hormigón**



# Durabilidad y auto-sanado biológico de grietas

La precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) sella grietas en hormigones

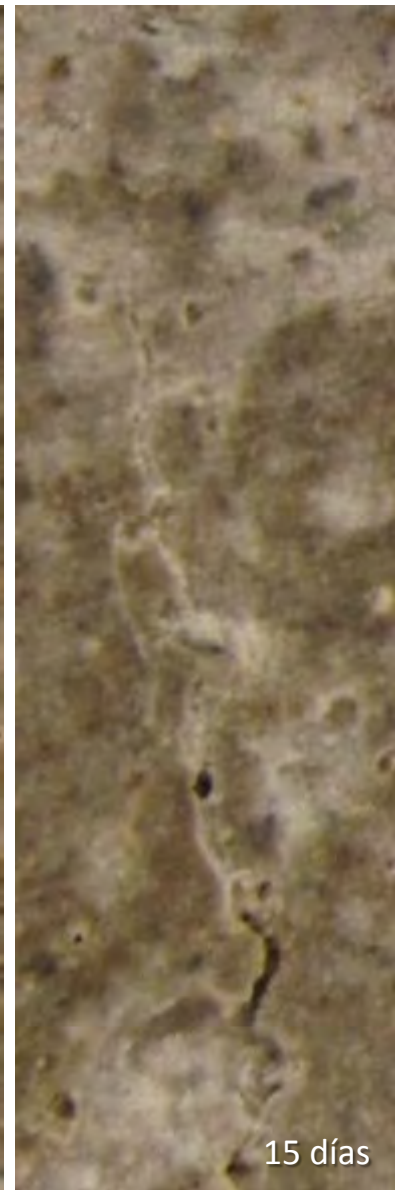
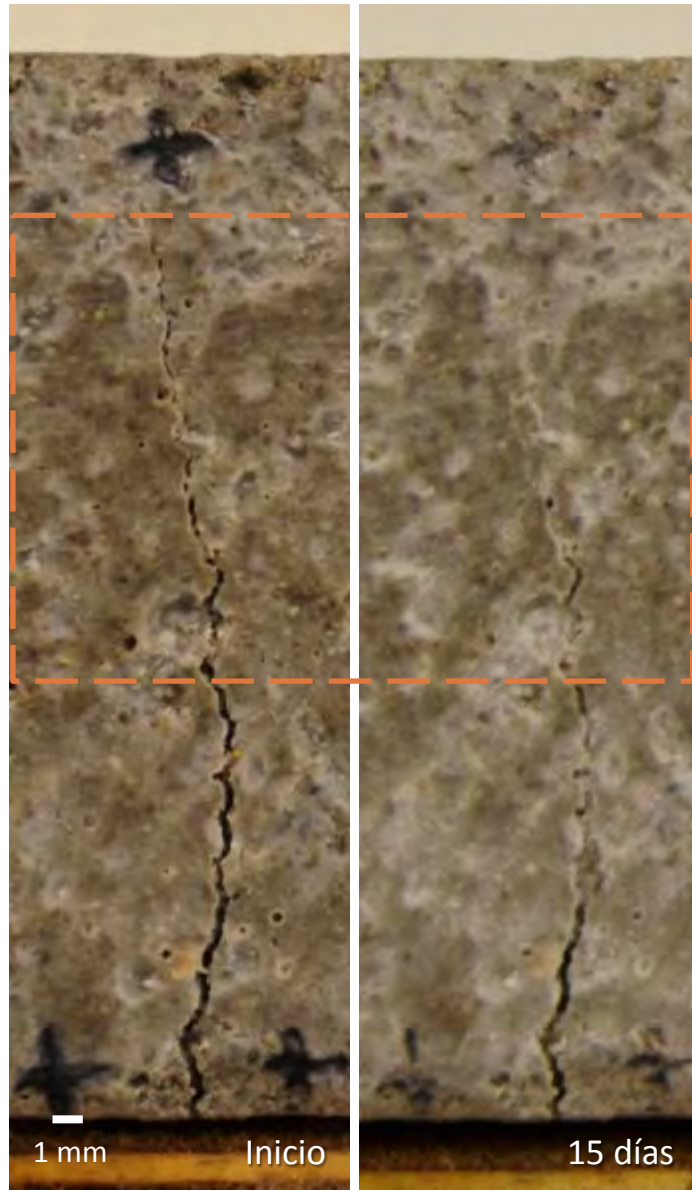
**Bacterias incorporadas en la mezcla pueden promover la precipitación de  $\text{CaCO}_3$**



# Durabilidad y auto-sanado biológico de grietas



*Bacillus pseudofirmus*



Auto-sellado de grietas por precipitación bacteriana de  $\text{CaCO}_3$  (Tesis: Claudia Stuckrath, 2013)

# Durabilidad y agrietamiento térmico

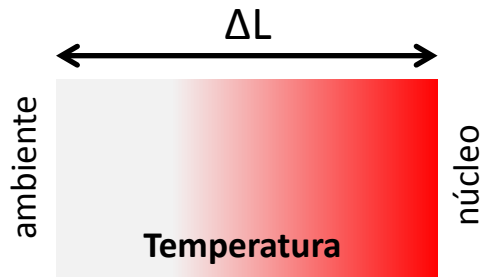
Industria de la construcción demanda  
**acelerar los procesos de construcción**

→ mezclas de alta resistencia inicial

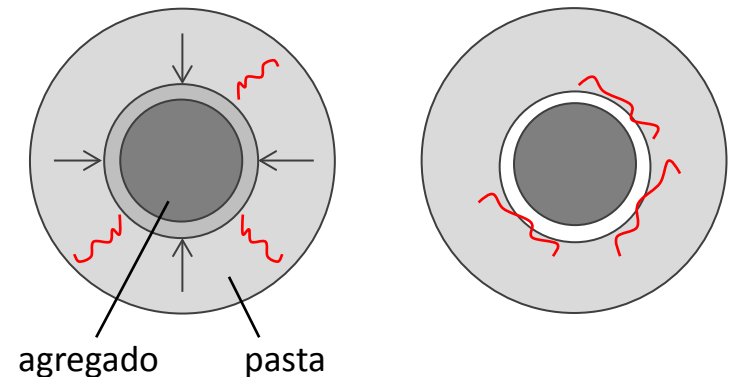
→ **alto calor de hidratación**

→ **alto potencial de agrietamiento térmico**  
**baja durabilidad potencial**

1. **gradientes de temperatura**  
(interior – superficie)

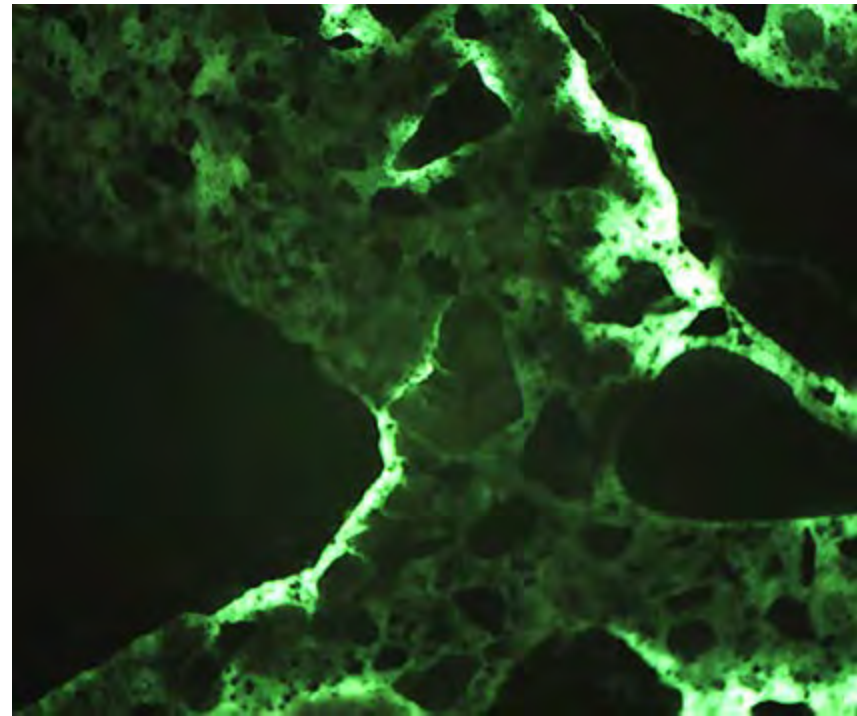
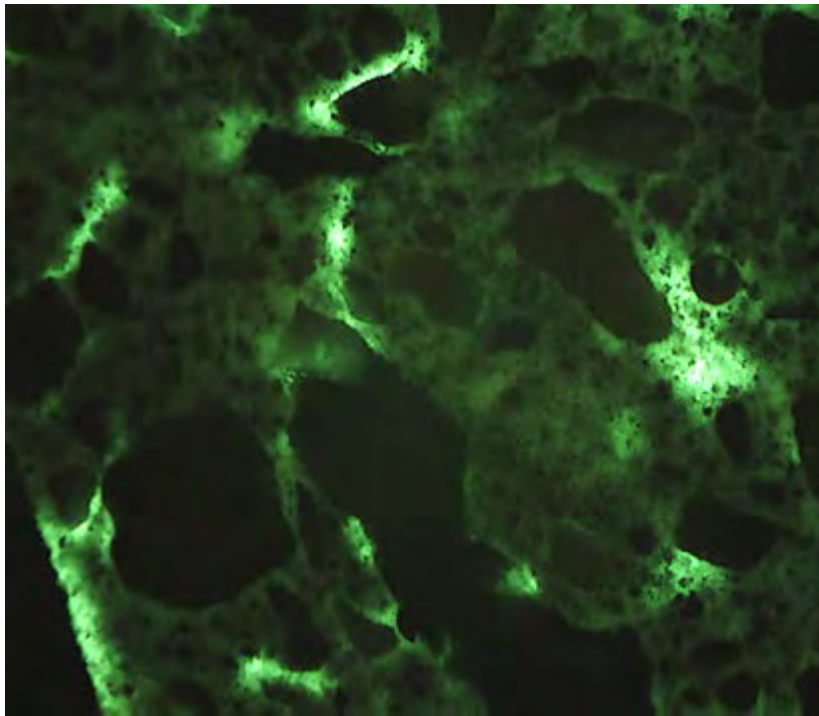


2.  **$\Delta$  coeficiente de expansión térmica**  
de materiales constituyentes



# Durabilidad y agrietamiento térmico

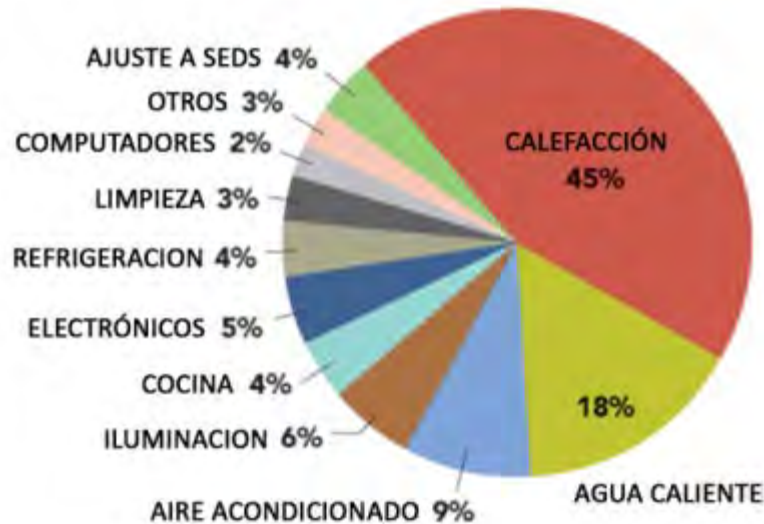
- Objetivos**
- Identificar los **factores** que inducen agrietamiento térmico temprano
  - Determinar los **efectos** de estos factores sobre el agrietamiento
  - Proponer medidas para **prevenir** y **controlar** el agrietamiento



**microfotografías ópticas de fluorescencia:** agrietamiento térmico de interfases (IPre: Franco Zunino, 2013)



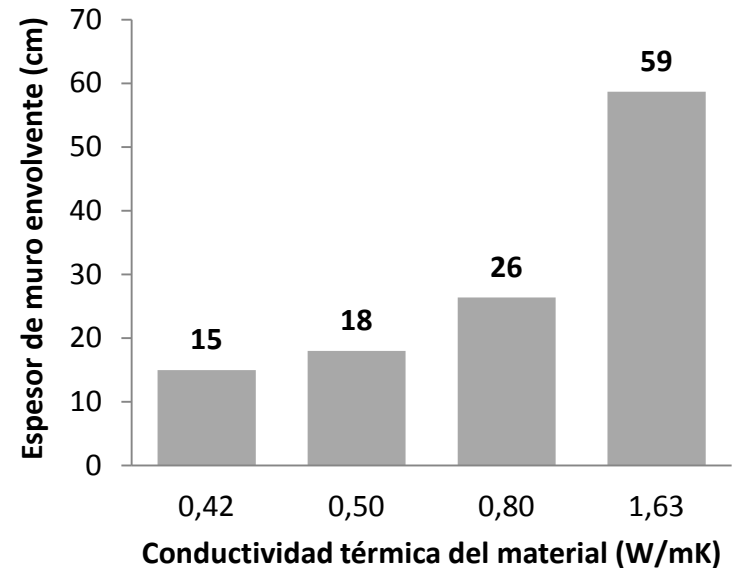
# Comportamiento térmico del hormigón



**Consumo energético residencial por uso (EEUU)**

( DOE, 2012 )

## Chile: zona térmica 3



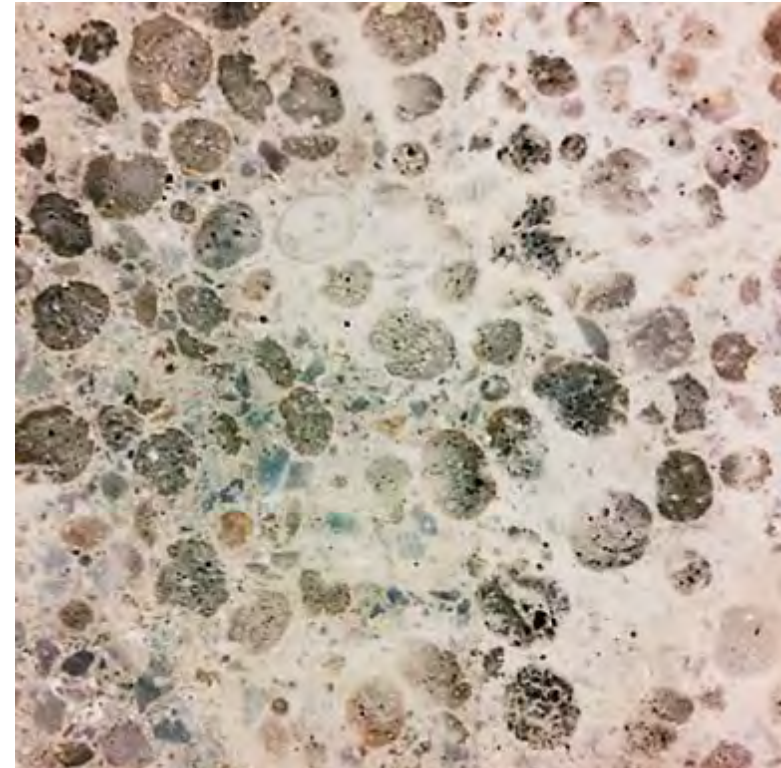
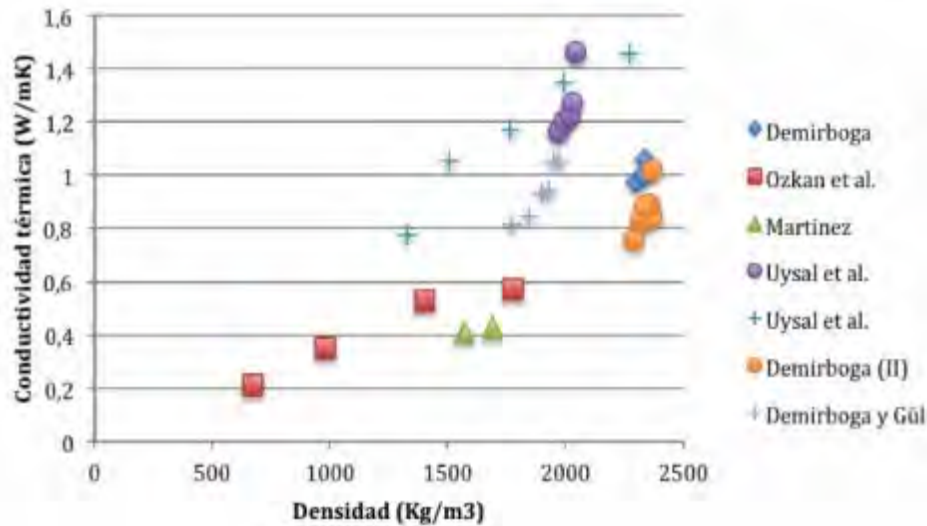
**Esesor de hormigón requerido**

( Tesis: José Carlos Remesar, 2013 )



# Eficiencia térmica + resistencia mecánica

La conductividad térmica del hormigón depende principalmente de su densidad



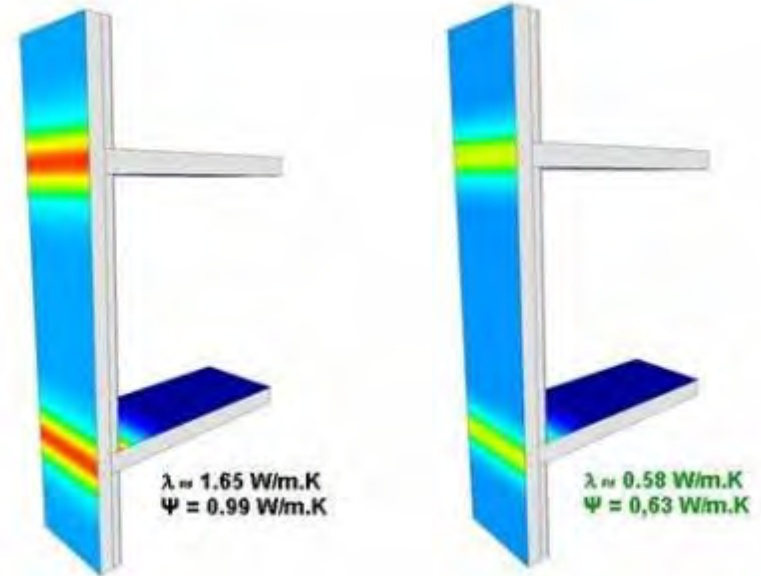
**Hormigón con agregado liviano**

( Tesis: José Carlos Remesar, 2013 )

**Pero: hormigones livianos logran resistencias (mucho) menores**

# Eficiencia térmica + resistencia mecánica

¿Es posible lograr hormigones livianos con resistencias apropiadas para la vivienda y edificación de baja altura?



**Thermedia™, Lafarge**  
0,6 W/m°K y 25 MPa

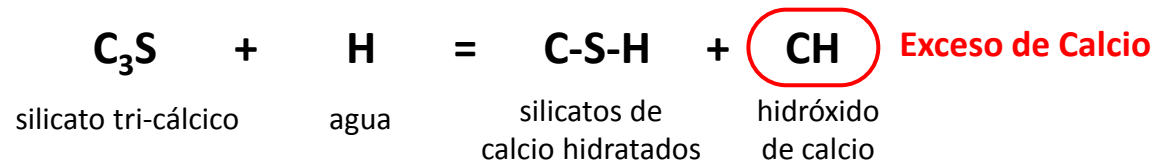
¿Cuál es el efecto de estos materiales alternativos en la conductividad?

- agregados livianos no convencionales
- arenas livianas
- fibras estructurales
- materiales cementicios suplementarios

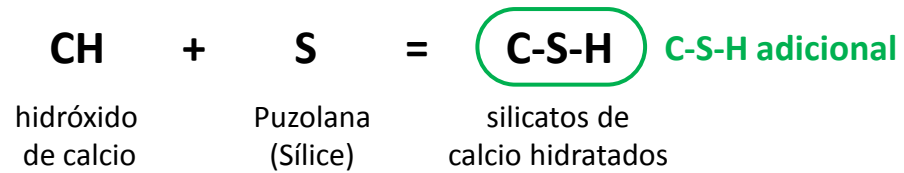
# Materiales alternativos (sustituciones)

- Optimizar el uso de cemento Portland
- Utilizar **subproductos** de otras industrias

**Cemento Portland:**



**Puzolanas:**



ceniza volante (*fly ash*)



metakaolín



micro-sílice

# Materiales **alternativos** (sustituciones)



**NCh 148 Of.68**

	<b>Cemento Portland</b>	<b>Puzolana</b>
Cemento <b>Portland Puzolánico</b>	$\geq 70 \%$	$\leq 30 \%$
Cemento <b>Puzolánico</b>	<b>50 – 70 %</b>	<b>30 – 50 %</b>

# High Volume Fly Ash (HVFA) concrete

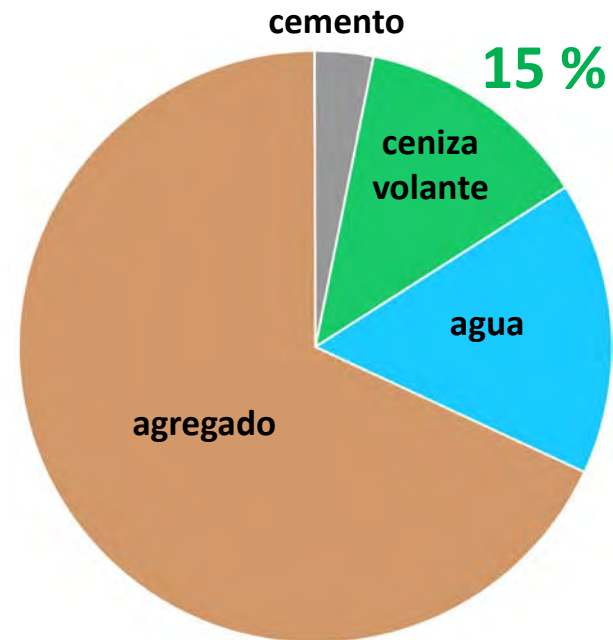
Hormigón con alto contenido de **cenizas volantes** (puzolana artificial)

Son un residuo de la generación termoeléctrica (en Chile son descartadas)

## Hormigón convencional



## Hormigón HVFA



**Hasta 80% de reemplazo de cemento**

Baja resistencia inicial, alta resistencia final



# Massive Volume Fly Ash (MVFA) concrete

Reemplazo de cemento y uso de **agregados de ceniza volante**

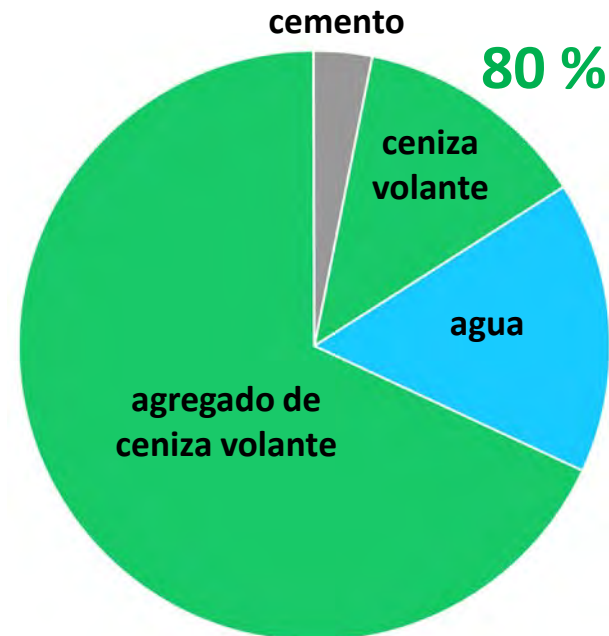
Agregado de ceniza peletizada



Apariencia, absorción y desempeño mecánico similar a agregados livianos convencionales

( Tesis: Felipe Rivera, 2013 )

Hormigón MVFA



**Hasta 80% de reemplazo total**

Hormigón de baja densidad

# Cenizas de **biomasa**: *Rice Husk Ash* (RHA)

Reemplazo de cemento por **cenizas de combustión de cascarilla de arroz**

**cascarilla de arroz**



20% producción de arroz  
Chile: **30.000 ton/año**

**Ceniza de Cascarilla de Arroz (CCA)**

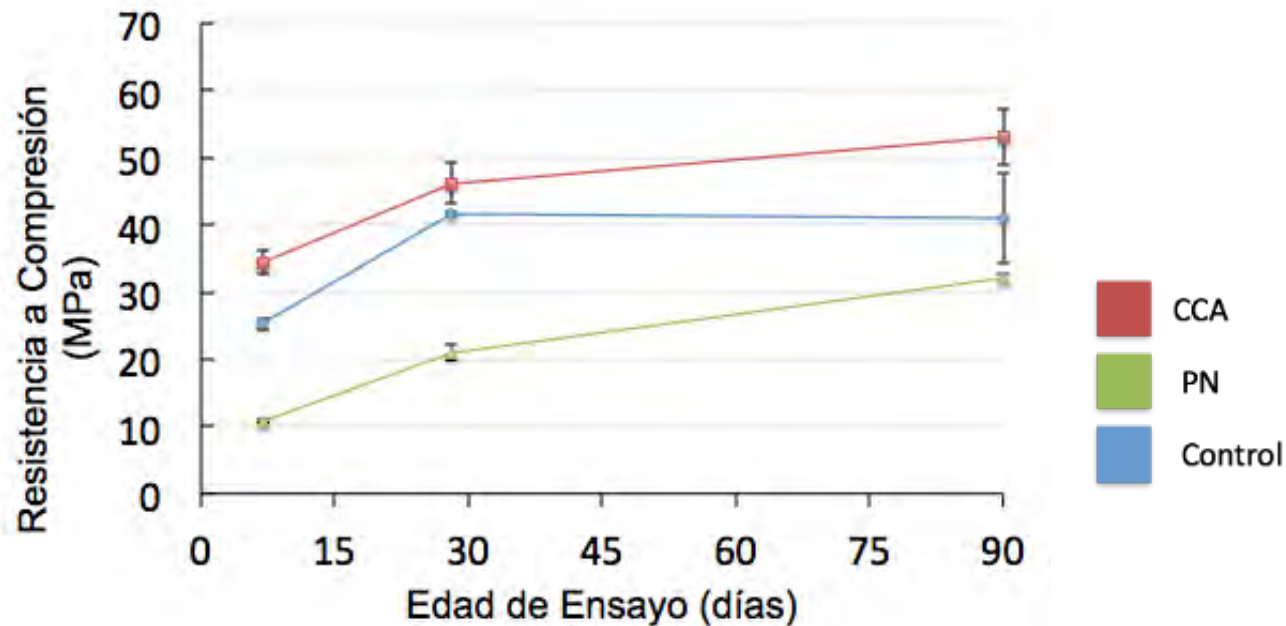


20% de la cascarilla  
Chile: **6.000 ton/año**

( Tesis: Franco Zunino, 2012 )

# Cenizas de **biomasa**: *Rice Husk Ash* (RHA)

Comparación de desempeño **CCA** v/s **Puzolana Natural**



( Tesis: Franco Zunino, 2012 )

**Resistencias aumentan** con sustituciones de 30% para CCA (posiblemente más)

Desempeño en durabilidad mejora significativamente: **menor permeabilidad**

# Reciclaje de hormigón



Reciclaje de **agregados** (gruesos, finos)

Reciclaje de materiales **cementicios**

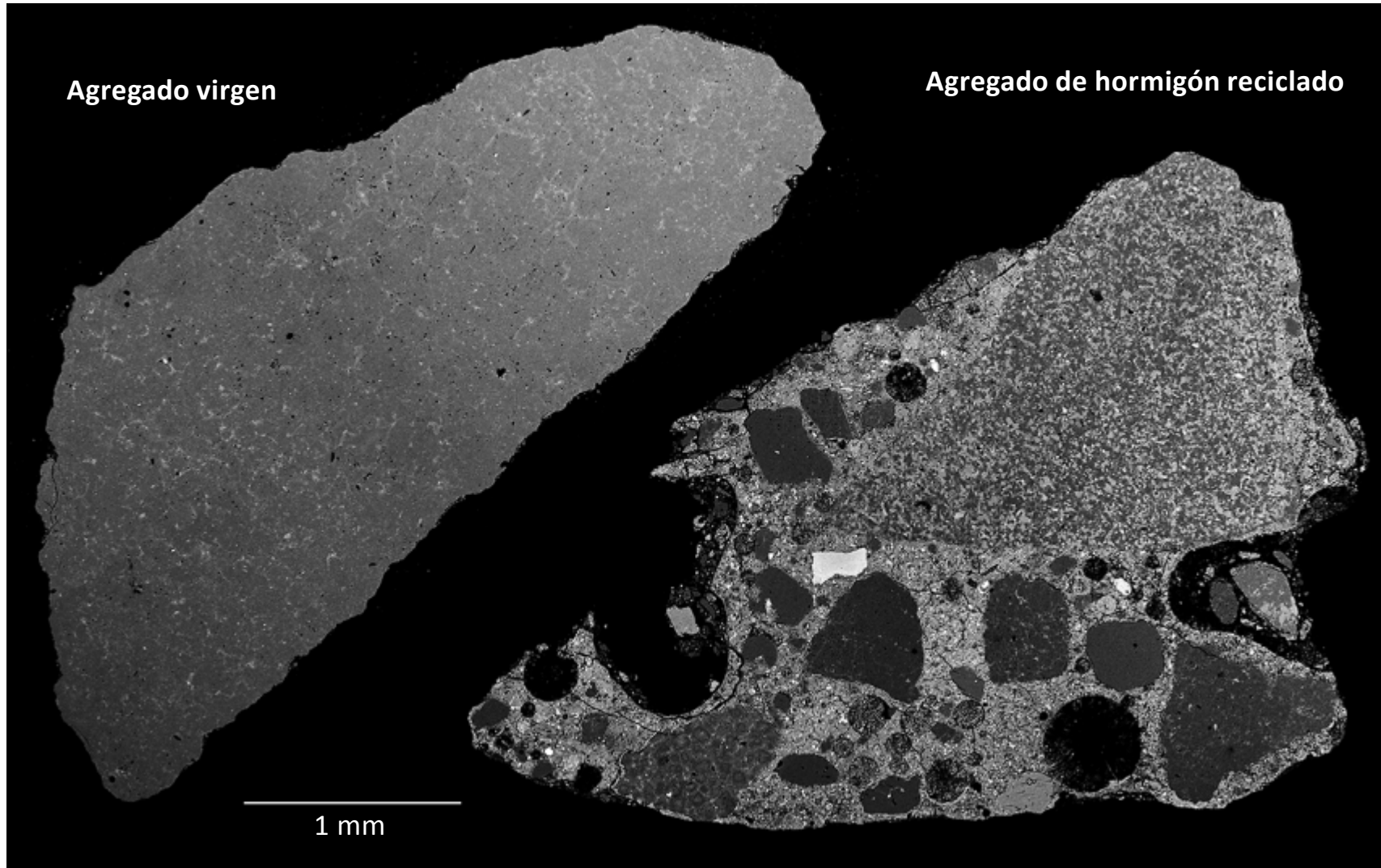


Acopio de hormigón de demolición . Foto: RSC, 2011.



# Reciclaje de agregados de hormigón

## Agregados de hormigón reciclado





# Reciclaje de agregados de hormigón

Residuos de hormigón

Agregados de Hormigón Reciclado (RCA)



residuos de pasta



**RCA grueso**

menor densidad  
mayor absorción  
mayor friabilidad  
reduce trabajabilidad  
aumenta retracción  
reduce resistencia  
reduce el módulo E



mayor proporción de residuos de pasta

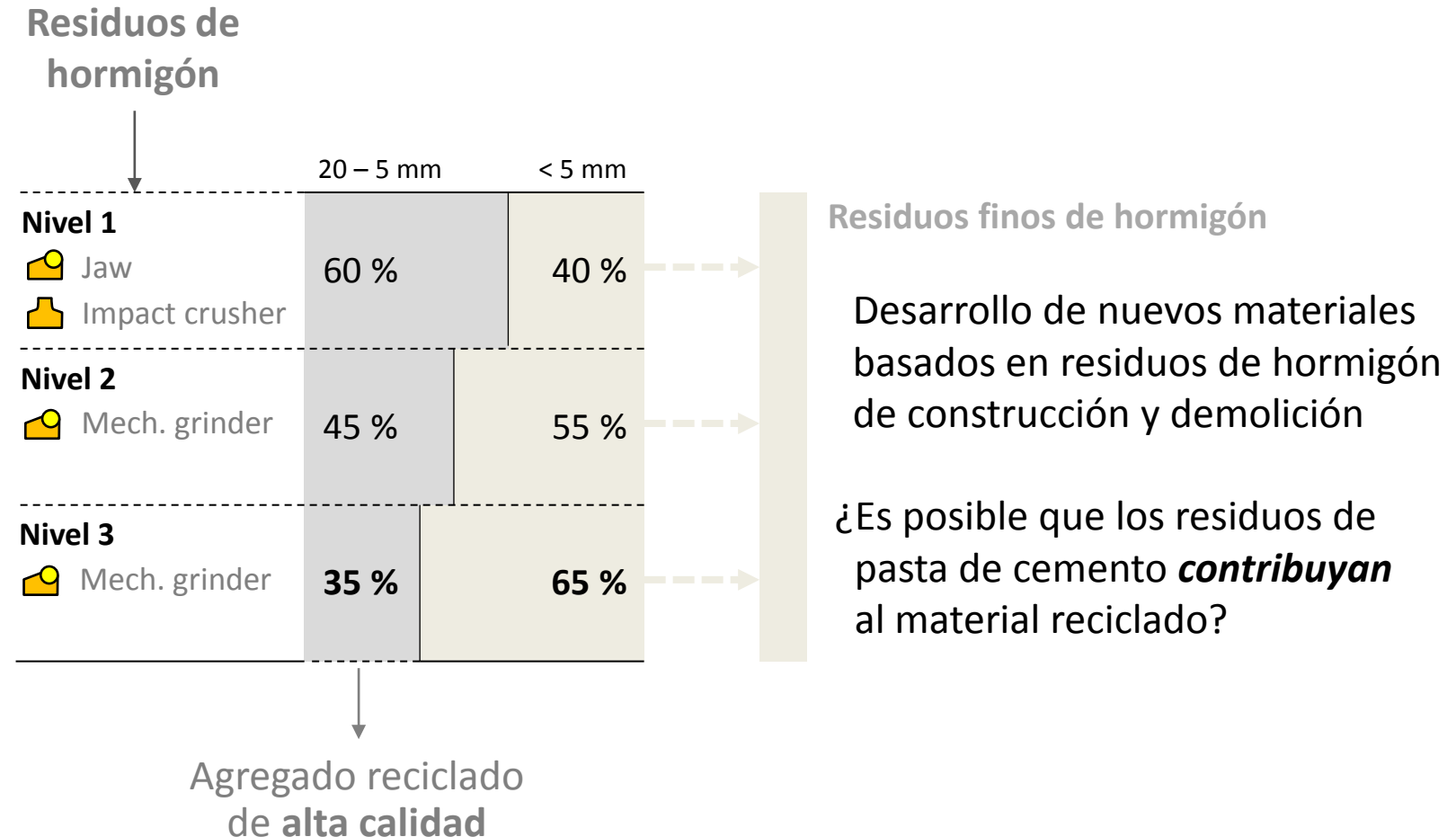
**RCA fino**

todo esto, **pero peor!**

no recomendado para hormigón  
niveles de reemplazo muy limitados

**Descartado**

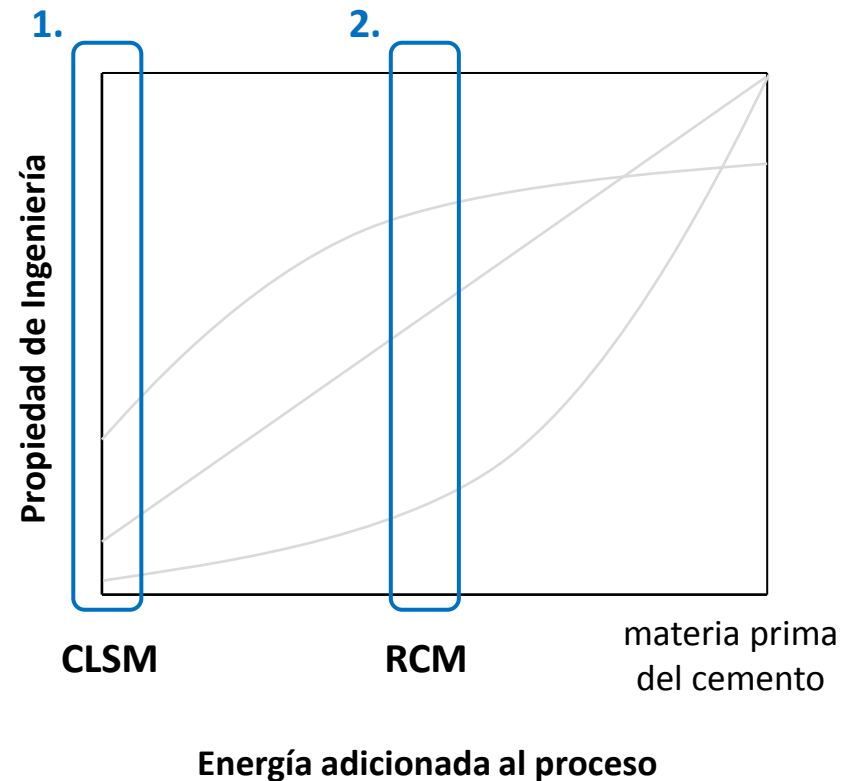
# Reciclaje de residuos finos de hormigón



# Reciclaje de residuos finos de hormigón

Alternativas exploradas:

1. Desarrollo de materiales de baja resistencia controlada (CLSM) basados en **agregados finos** de hormigón reciclado
2. Desarrollo de materiales cementicios reactivados (RCM)



# Reciclaje de residuos finos de hormigón

## 1.- Materiales de baja resistencia controlada (CLSM)

Rellenos fluidos auto-compactados, auto-nivelados

Resistencias deben ser **menores a 80 Kg/cm<sup>2</sup>**  
( $< 20 \text{ Kg/cm}^2$  para futura excavación)



Ensayo de fluidez de CLSM basado en agregados finos reciclados (Serpell, 2011)



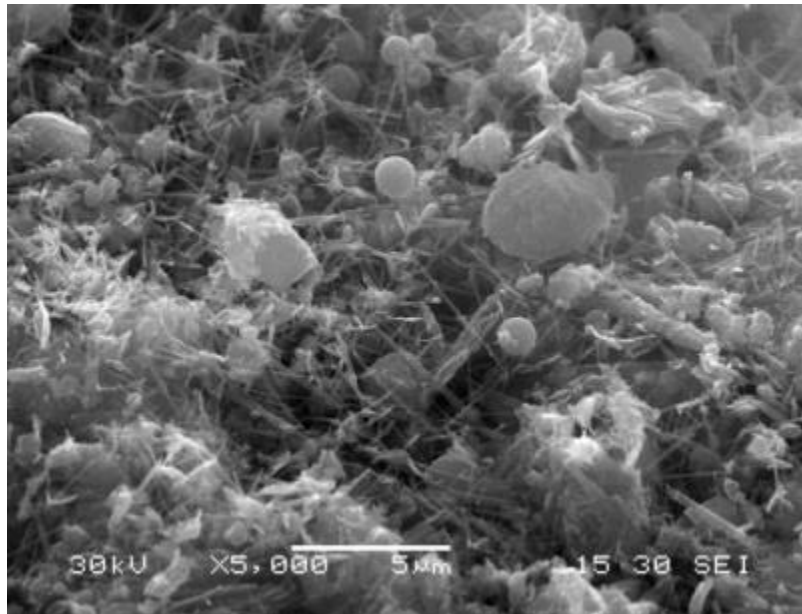
FHWA, 2003



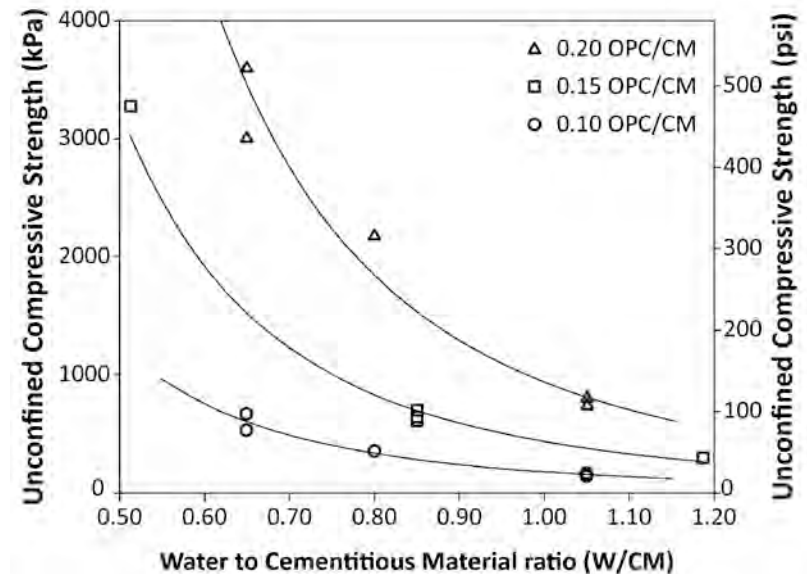
FHWA, 2003

# Reciclaje de residuos finos de hormigón

## 1.- Materiales de baja resistencia controlada (CLSM)



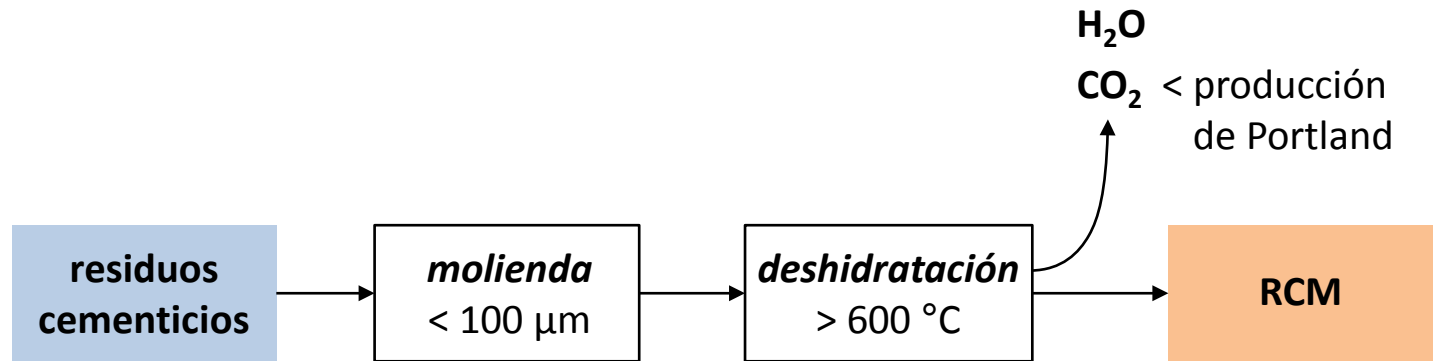
Alkalís presentes en los residuos de pasta **promueven reacciones puzolánicas** de materiales cementicios suplementarios



CLSM basado en agregados reciclados requiere menores dosis de cemento

# Reciclaje de residuos finos de hormigón

## 2.- Materiales cementicios reactivados (RCM)



Resistencia a 28 días:  
> 200 Kg/cm<sup>2</sup>

# **Innovación en hormigón arquitectónico**

**ejemplos del mercado internacional y nacional**



# Hormigón arquitectónico y **manufactura digital**



**Hormigones foto-grabados**  
(*Photo-engraved Concrete*)

Impresión con retardador  
de fragüe y erosión con  
agua a presión

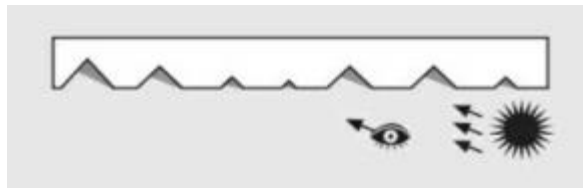
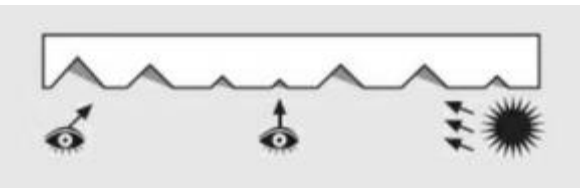


# Hormigón arquitectónico y manufactura digital



Reckli.net

## Foto-grabado vía CNC



Reckli.net

# Hormigón arquitectónico y manufactura digital



**Fabricación de moldes 3D  
en series limitadas vía CNC**





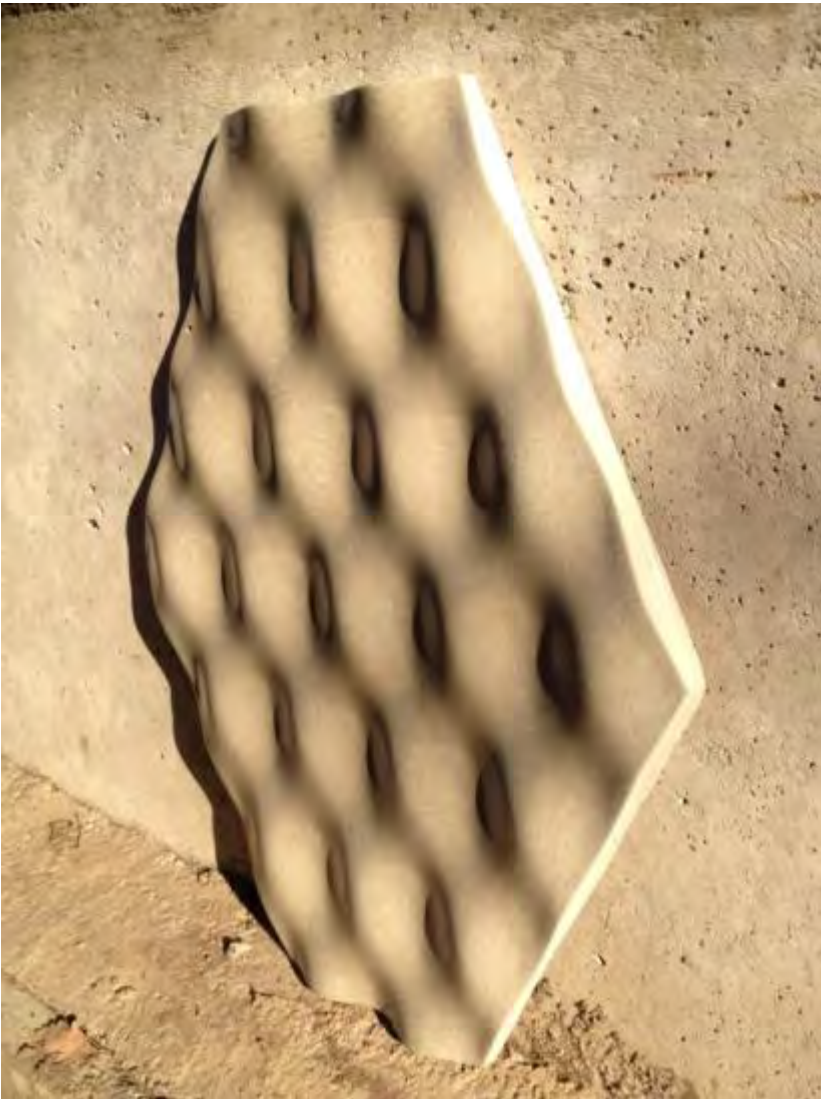
# Hormigón arquitectónico y **manufactura digital**



Qala Digital Concrete ([www.not.cl](http://www.not.cl))

**Placas delgadas de hormigón reforzado con fibra de vidrio (GFRC)**

# Hormigón arquitectónico y **manufactura digital**



Qala Digital Concrete ([www.not.cl](http://www.not.cl))

**Placas delgadas de hormigón reforzado con fibra de vidrio (GFRC)**



# Hormigón arquitectónico y **manufactura digital**



Qala Digital Concrete ([www.not.cl](http://www.not.cl))

**Piezas de hormigón reforzado con fibra de vidrio (GFRC)**

[rserpell@uc.cl](mailto:rserpell@uc.cl)