



Rete dei Laboratori Universitari
di Ingegneria Sismica e Strutturale



6 / 13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

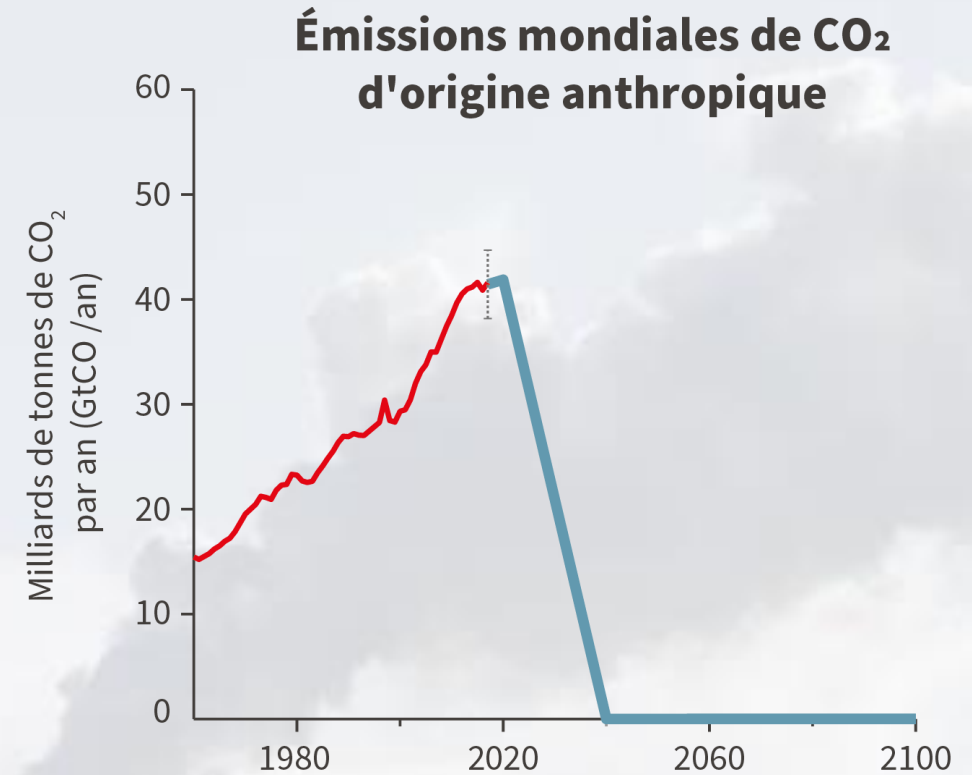
Bologna, 9-11 ottobre 2024

Calcestruzzi Innovativi a basso impatto ambientale
Prof Ing Claudio Mazzotti – UNIBO

Sustainable construction is key to achieving net zero

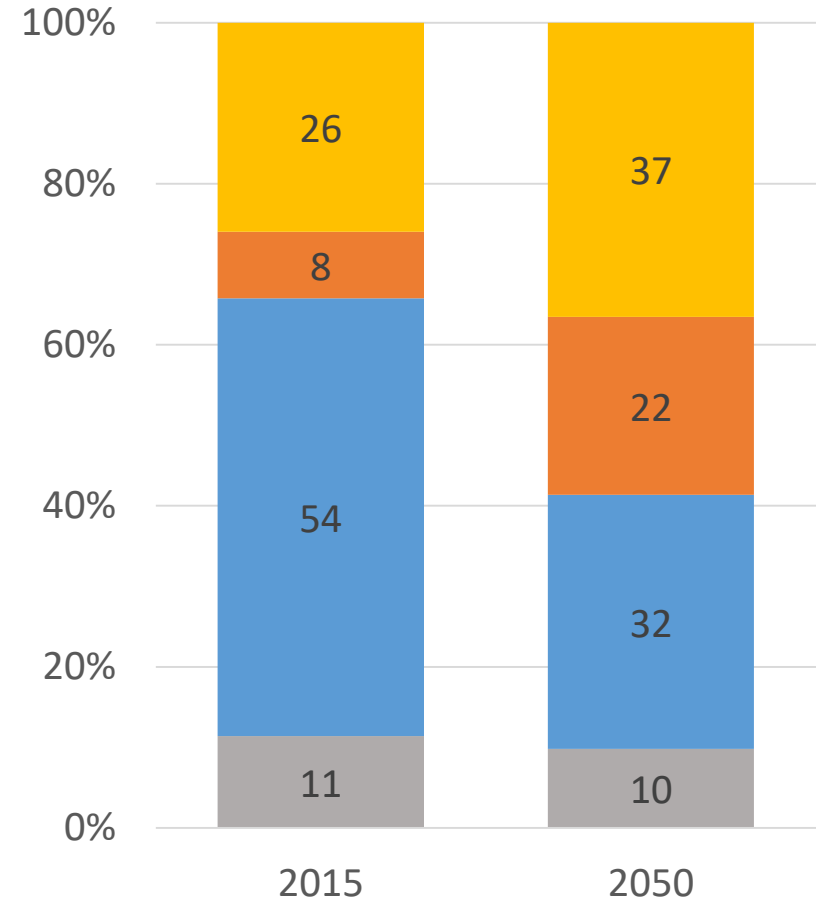
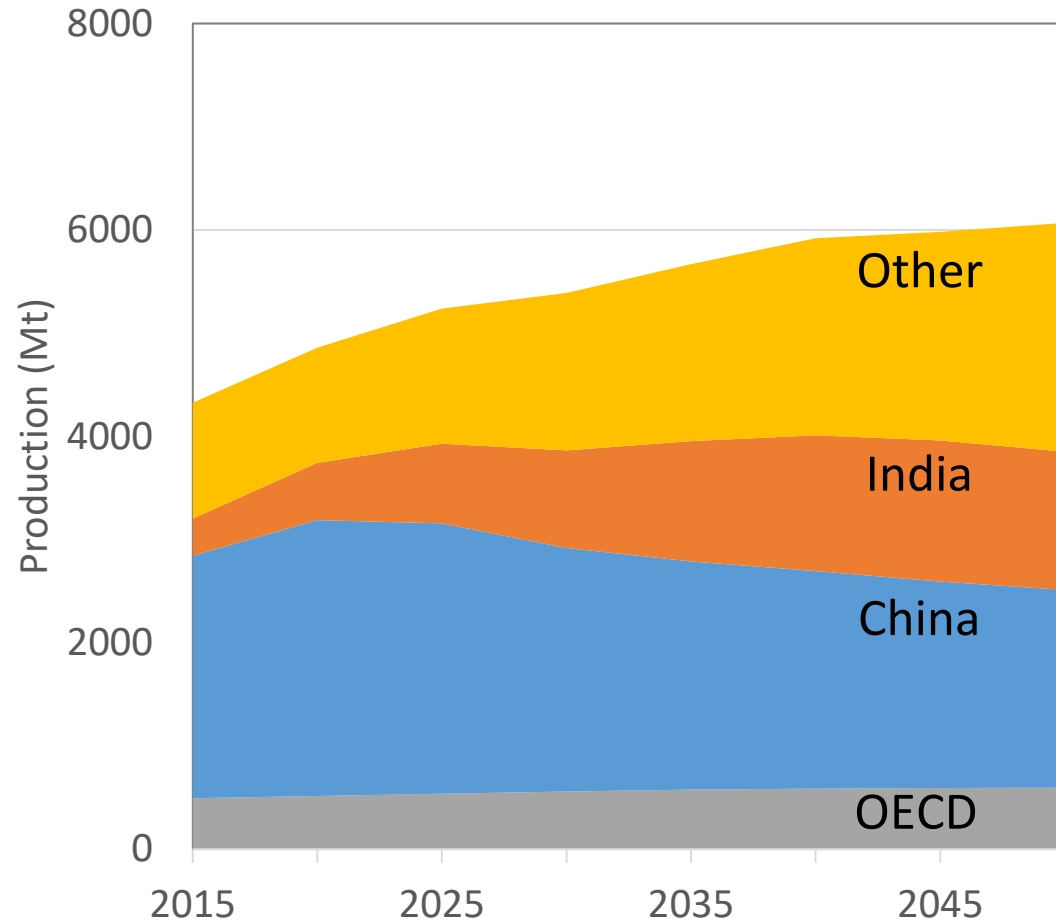
A radical transition is imperative:

- Cut CO₂ emission in half in the next 10 years
- Reach net zero in 2040



Martin Vetterli - Président de l'EPFL

Previsione di crescita

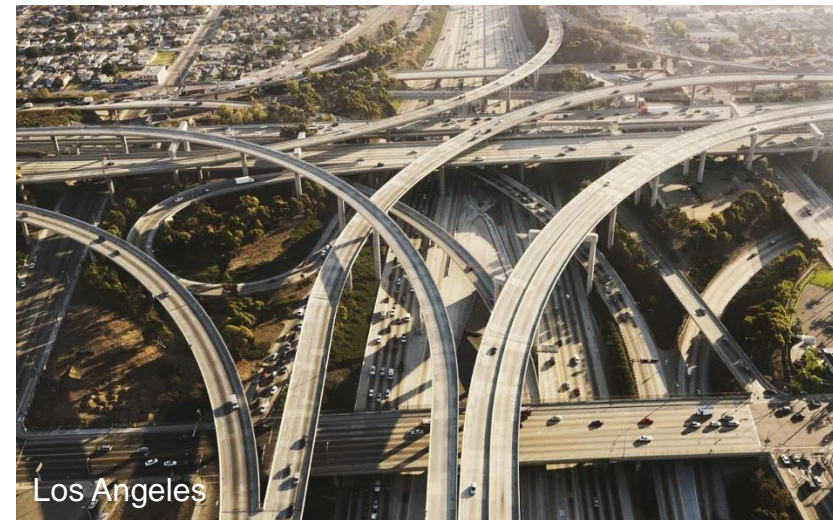


We need solutions for people in developing countries

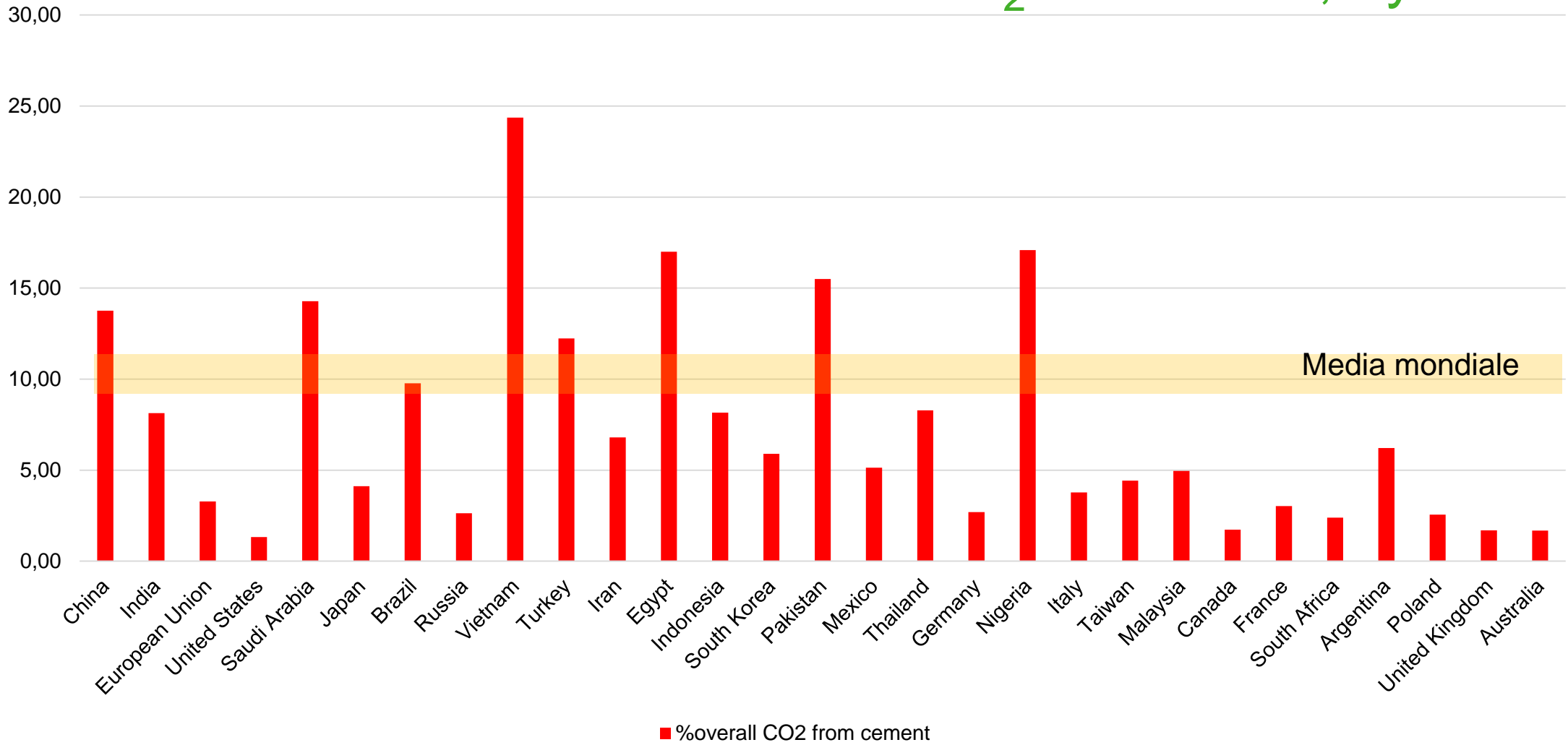


L'uso del calcestruzzo strutturale – alcuni dati

- The use of concrete correlates strongly with the economical growth and the development of the civil infrastructure
- Concrete is indispensable and irreplaceable as a building material due to its excellent technical properties, low price and worldwide availability in large mass
- Production: 7 - 8 billion m³/year;
strong increase expected
- Concrete production is today associated with 6 - 8 % of the global CO₂ emissions



Contribution of cement to CO₂ emissions, by country



Although the USA is the third largest consumer of cement, it accounts for < 1.5% of the country's emissions



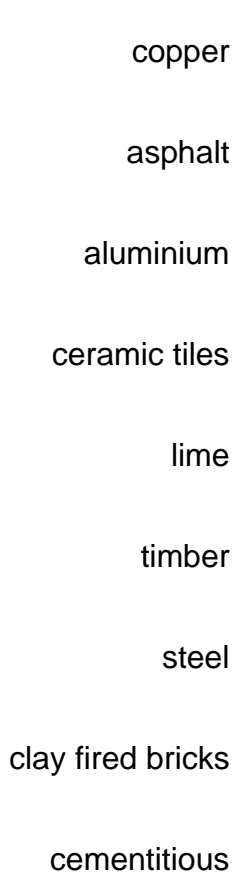
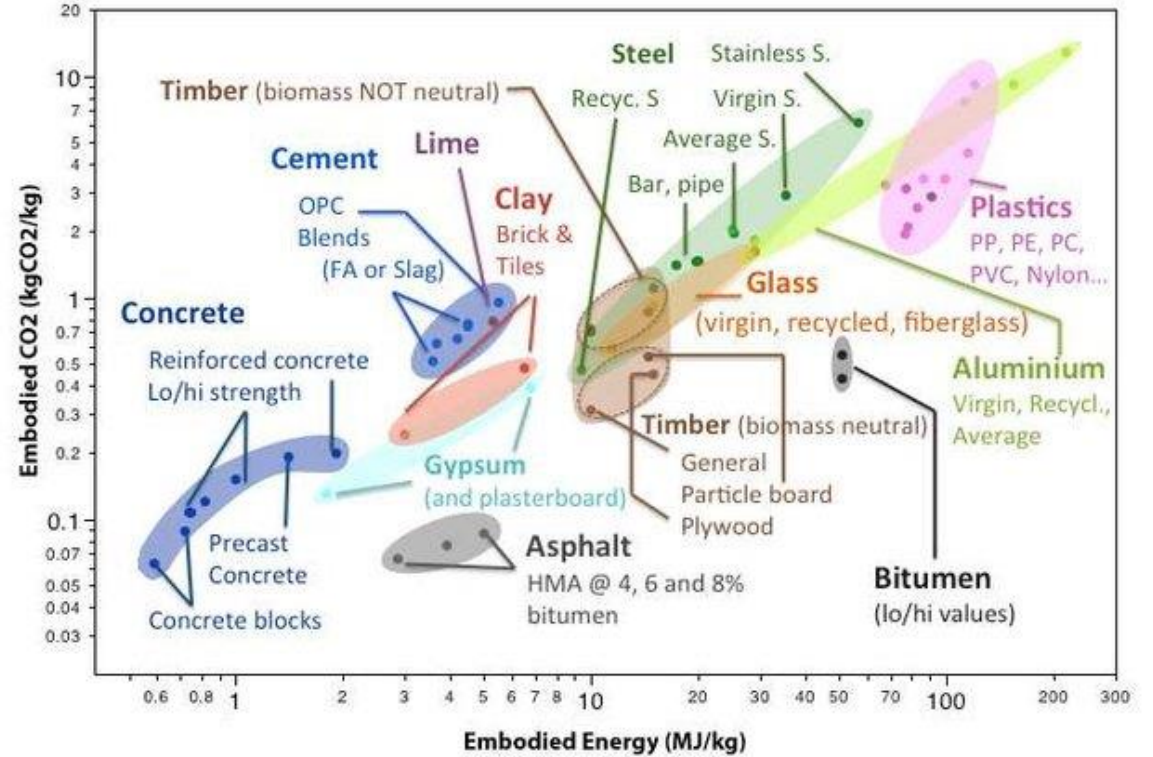
Large contribution worldwide due to enormous volumes

Cementitious materials make up >50% of everything we produce.

It is only for this reason they account for 8% of CO₂ annually.

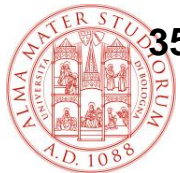
Low intrinsic environmental impact

To replace 25% of cementitious with timber would require planting a forest 1,5 x the size of India



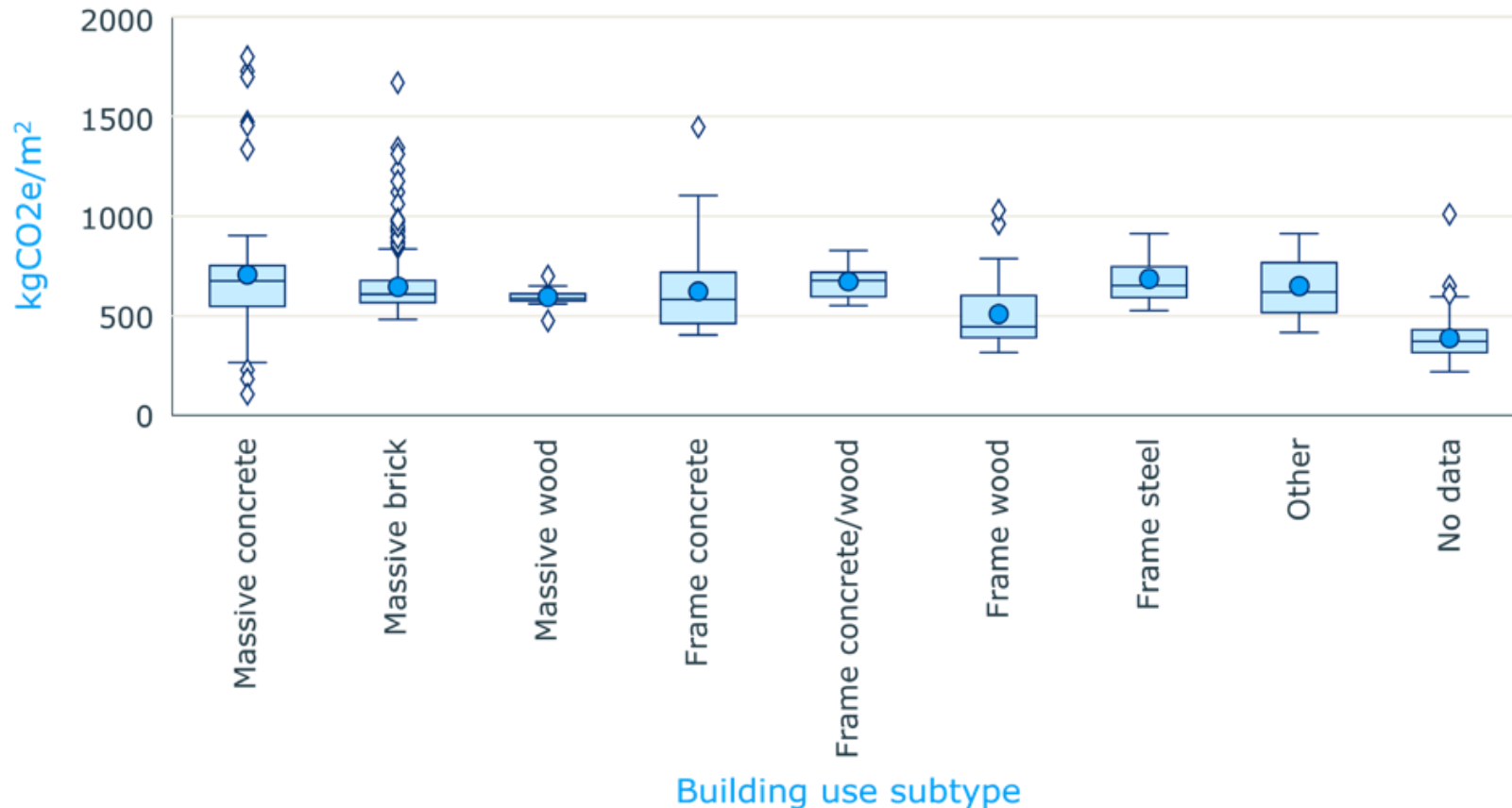
0 5 10 15 20 25 30

Miliardi di tonnellate



Would it help to replace concrete by other materials?

Embodied carbon per m² by building structure type for all EU-ECB cases



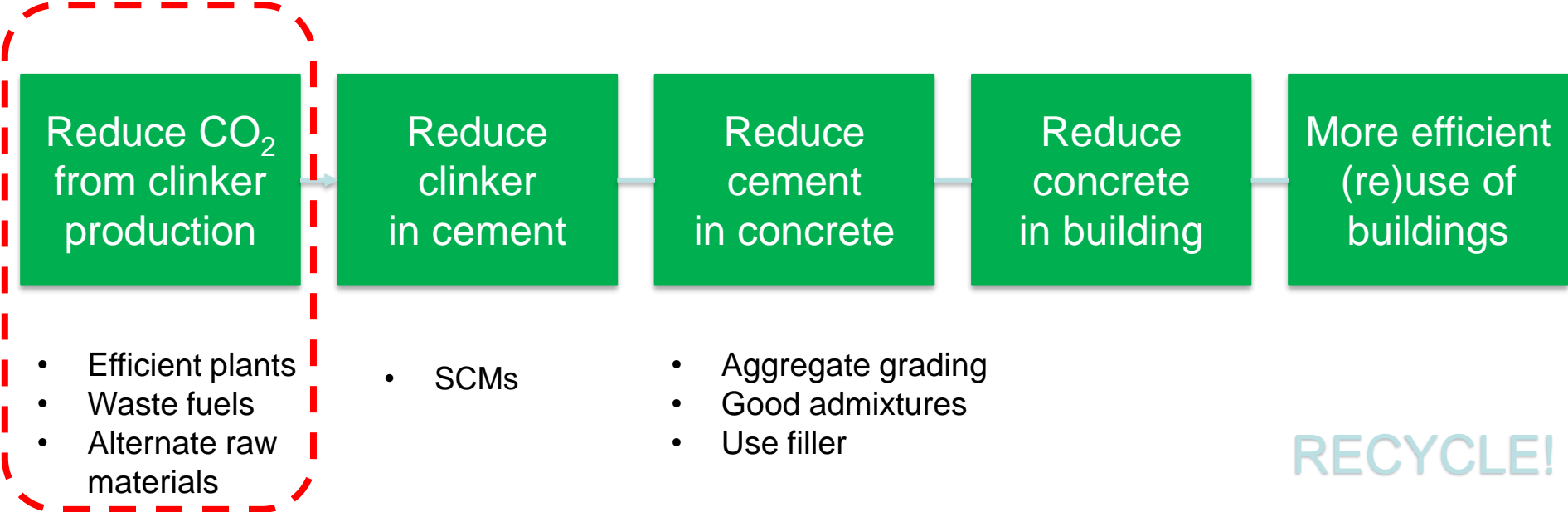
I cementi Portland continueranno a dominare la scena

Blended cements are the most realistic option to reduce CO₂ and extend resources





Report for European Climate Foundation 2017



RECYCLE!

Substantial reductions in emissions > 80% can be achieved by working through the whole value chain

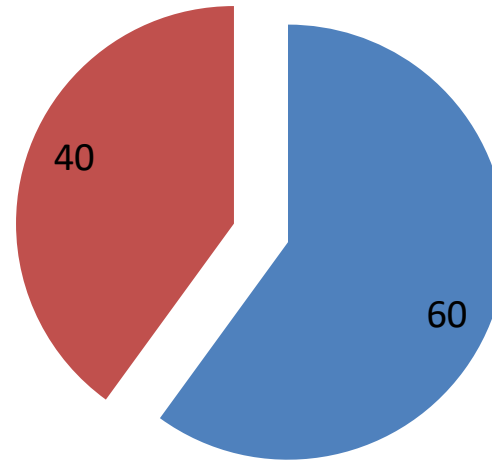
If only cement level is considered not more than about 50% possible without carbon capture and storage



Origins of CO₂ emissions in clinker production: CO₂ from the clinker remains around 90% through to the Concrete



The production process is highly optimised, up to around 80% of thermodynamic limit.
It is estimated that < 2% further savings can be made here
Use of waste fuels, which can be > 80%, reduces the demand for fossil fuels



1 tonne of clinker leads to the emission of 750 – 900 kg CO₂
Average 850kg/t

- CaCO₃ decomposition (CHEMICAL)
- Fuel

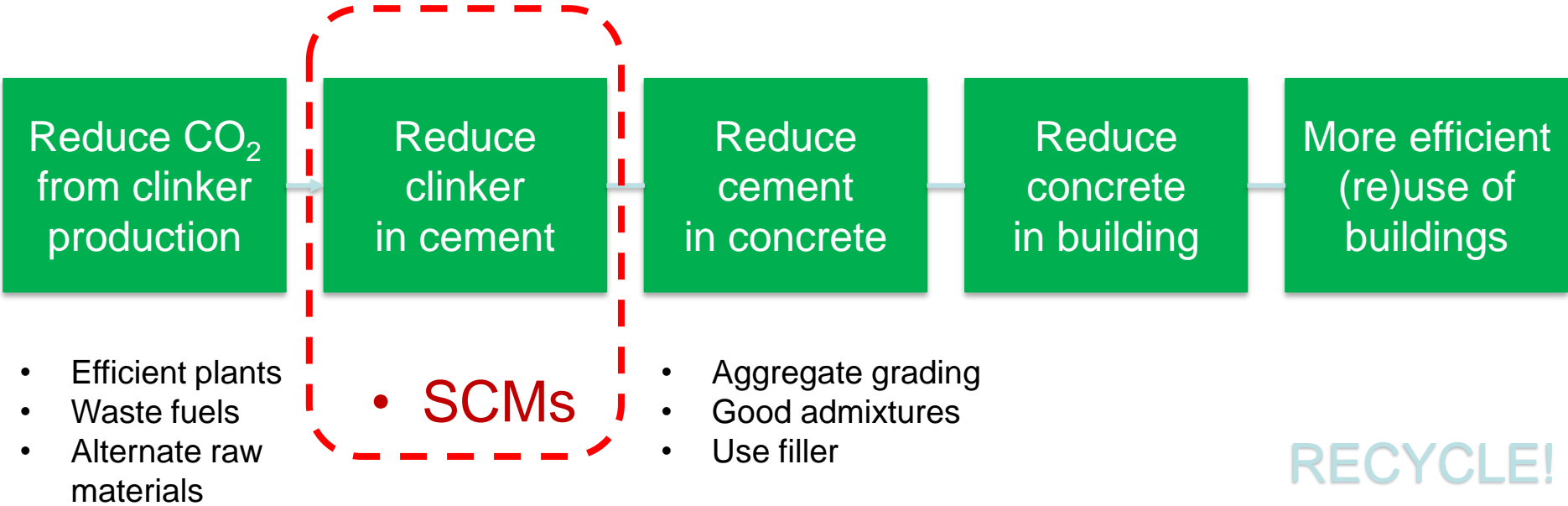


Limestone
80% of
raw material





Report for European Climate Foundation 2017

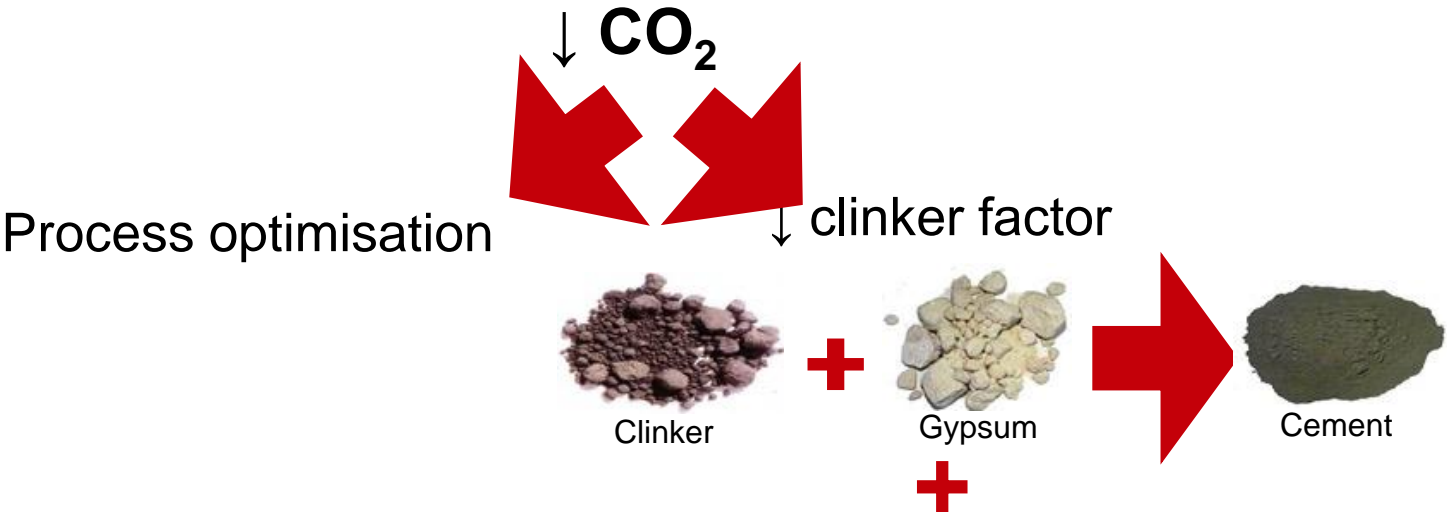


Substantial reductions in emissions > 80% can be achieved by working through the whole value chain

If only cement level is considered not more than about 50% possible without carbon capture and storage



Most promising approach – reducing the clinker factor



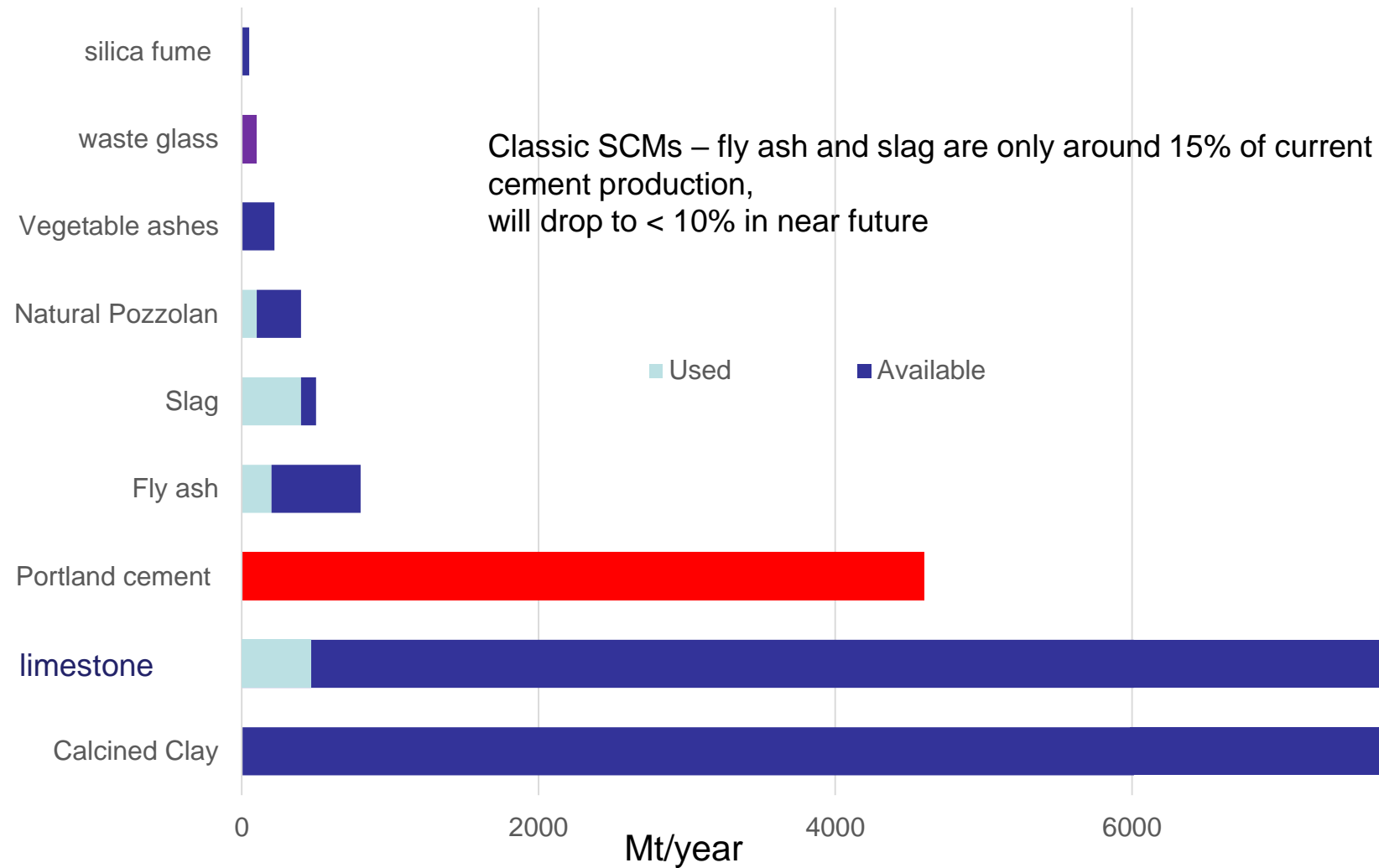
SCMs – Supplementary Cementitious Materials



Often by-products or wastes from other industries



Availability of SCMs



There is no magic solution



- Blended with SCMs will be best solution for sustainable cements for foreseeable future
- **Only material really potentially available in viable quantities is calcined clay.**
- **Synergetic reaction** of calcined clay and limestone allows high levels of substitution:
EPFL led LC³ project supported by SDC. **Started 2013**



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Agency for Development
and Cooperation SDC

Limestone
Calcined
Clay
Cement

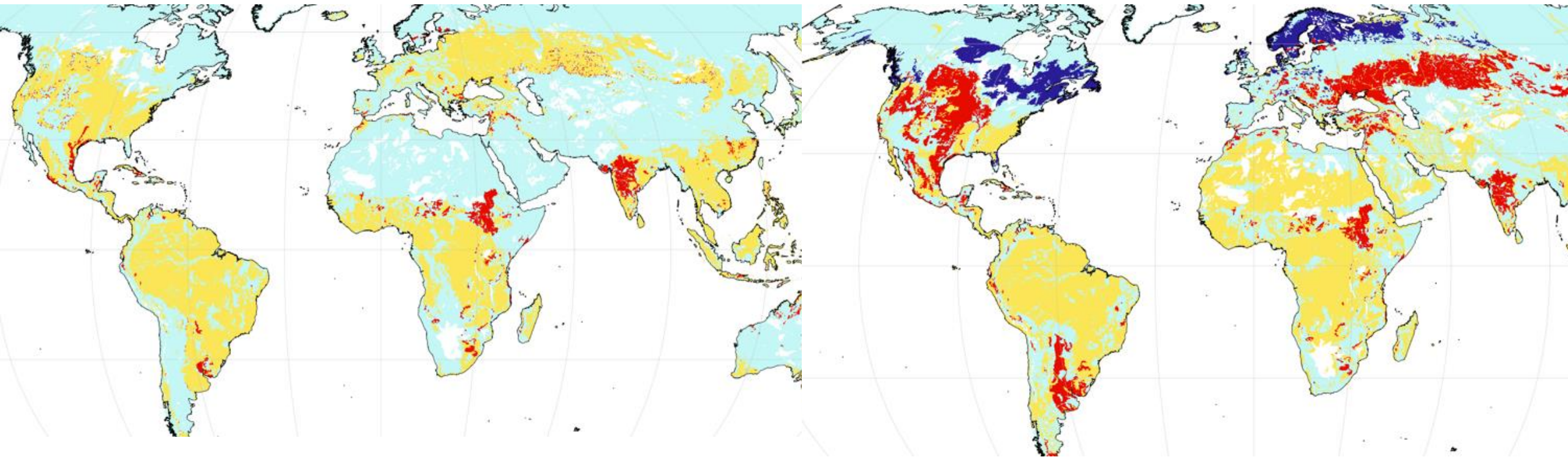
The logo for Limestone Calcined Clay Cement (LC³), featuring the letters 'LC' in a large, bold, green font and the number '3' in a smaller, bold, dark blue font.

Distribution of Kaolinitic clays

Ito and Wagai, Scientific data 2017

0-5m

>5m



Karen Scrivener,
Realistic options to reduce CO₂ emissions from Cement and Concrete
ICC 2022, Napoli



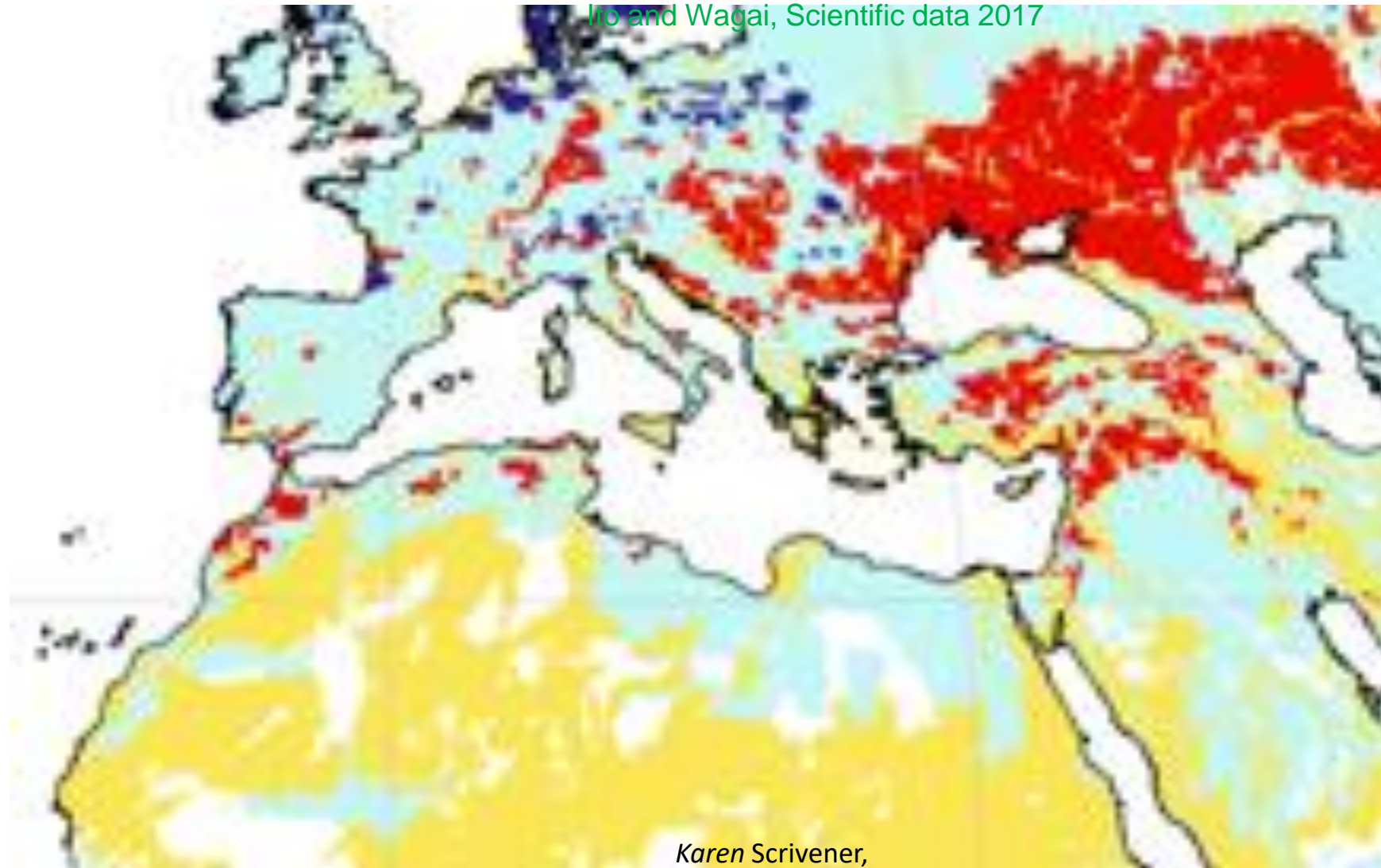
Illite/mica

Kaolinite

Smectite

Vermiculite

Distribution of Kaolinitic clays



Karen Scrivener,
Realistic options to reduce CO₂ emissions from Cement and Concrete
ICC 2022, Napoli

Illite/mica

Kaolinite

Smectite

Vermiculite

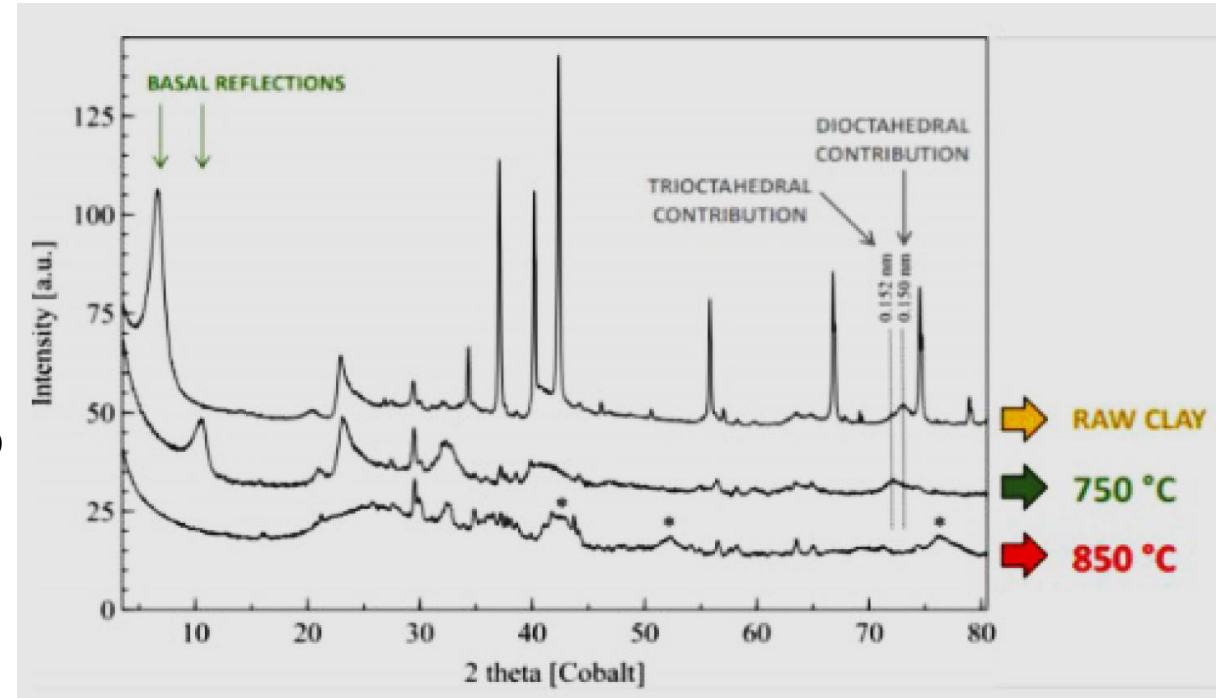


I cementi LC3

- Sostituzione del clinker con materiali amorfi → reattivi
- L'argilla calcinata si trasforma in **silico-alluminati pozzolanicamente reattivi**, così come il caolino

Calcinazione

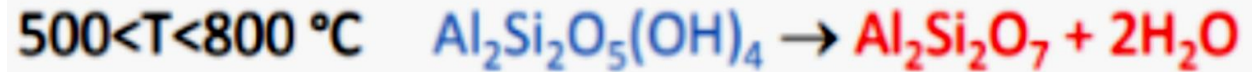
- Processo termico in un range tra i 600°C e gli 850°C
- Rende il materiale reattivo in soluzione acquosa.
- La reattività è data dal fatto che il trattamento termico favorisce l'amorfizzazione della struttura
- Processo può essere monitorato mediante analisi XRD.



- Ogni tipologia di argilla ha una temperatura di calcinazione ideale, che consente di amorfizzare la massima porzione di struttura cristallina.
- Una temperatura di calcinazione troppo bassa comporta un grado di amorfizzazione non sufficiente, che rallenterebbe le reazioni pozzolaniche e la produzione di silicati idrati di calcio che costituiscono le paste cementizie.
- Una temperatura di calcinazione troppo elevata può causare la formazione di alcune fasi inerti in soluzione acquosa.

I cementi LC3

Chimicamente, il trattamento termico favorisce la deidrossilazione della caolinite, che si traduce in un rilascio di vapore acqueo e formazione di metacaolinite, una fase amorfa costituita da alluminati e silicati.



Viene prodotto vapore acqueo e **non viene prodotta CO₂** !!!!! Al contrario del clinker

Si usano tipicamente cementi di miscela ternari:

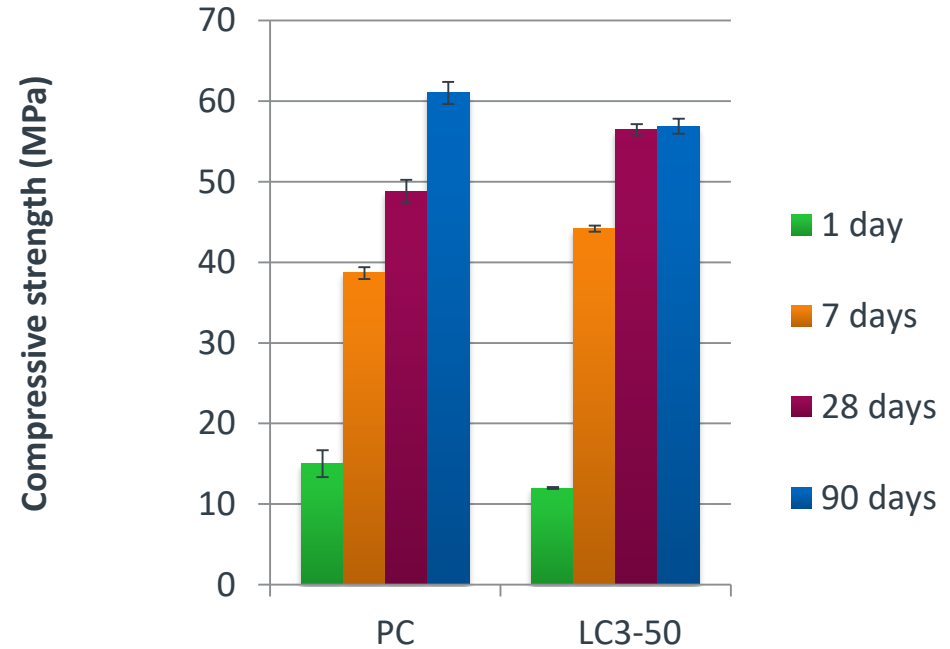
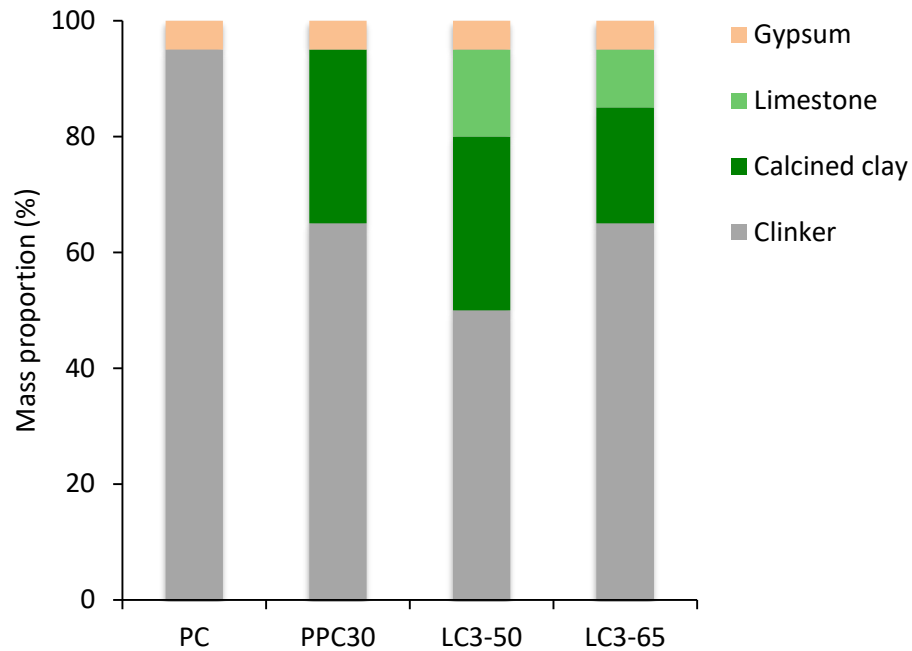
- cemento Portland (< 65% ~ 50%)
- argille calcinate
- calcare non calcinato

Questi cementi prendono il nome di LC3 (Limestone Calcined Clay Cement).

Formulazioni dei cementi LC3 piuttosto varie, ma proporzioni più comuni tra la quantità di argilla calcinata e di calcare non calcinato sono **2:1** o **1:1**.



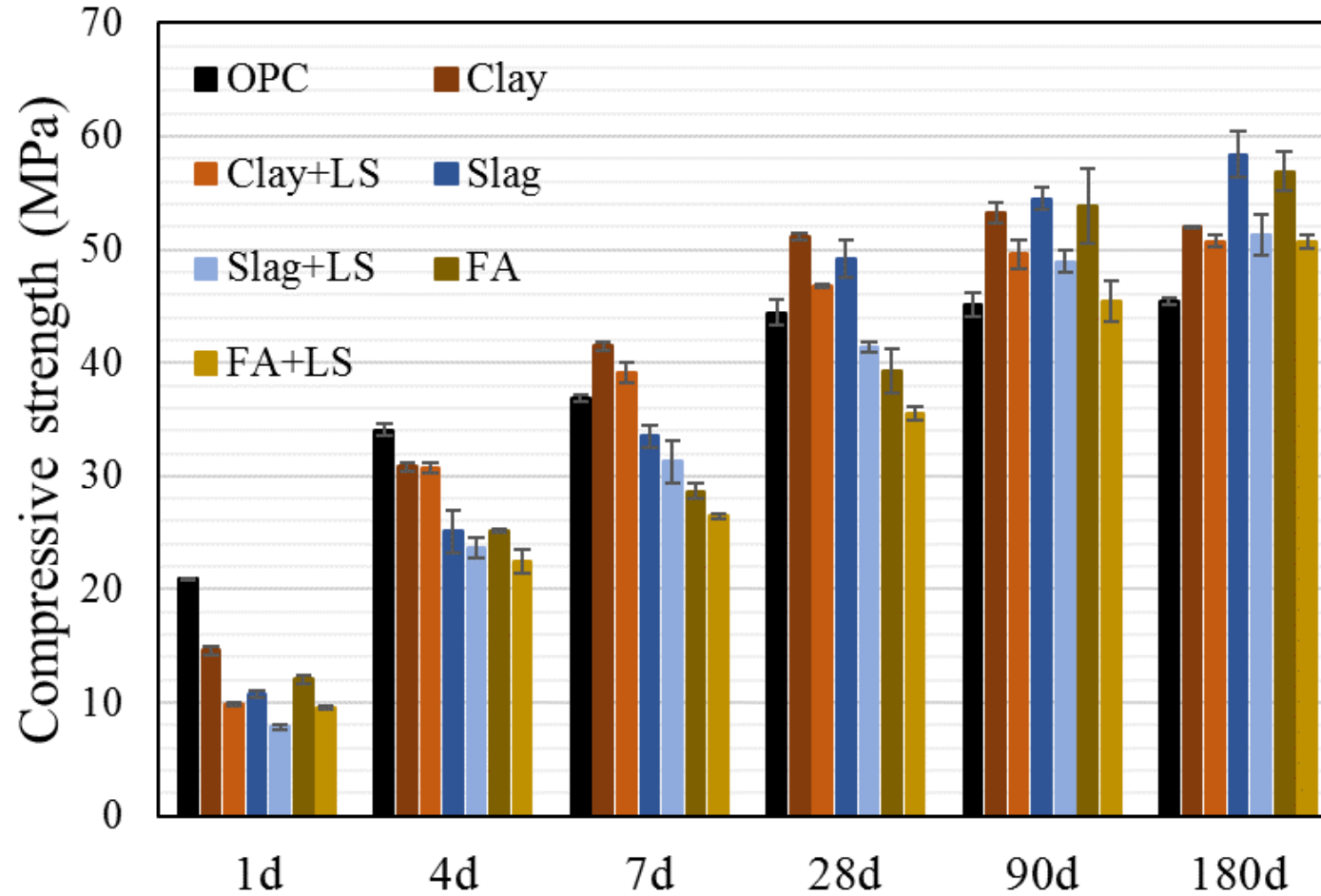
What is LC³



LC³ is a family of cements, the figure refers to the **clinker** content

- 50% less clinker
- 40% less CO₂
- Similar strength
- Better chloride resistance
- Resistant to alkali silica reaction

Comparison of calcined kaolinitic clay, slag and fly ash



Binary systems 70% clinker, 30% SCM

Ternary systems, with limestone 50% clinker, 30% SCM, 15% limestone

Karen Scrivener,

Realistic options to reduce CO₂ emissions from Cement and Concrete

ICC 2022, Napoli



LC3

Blend at cement plant

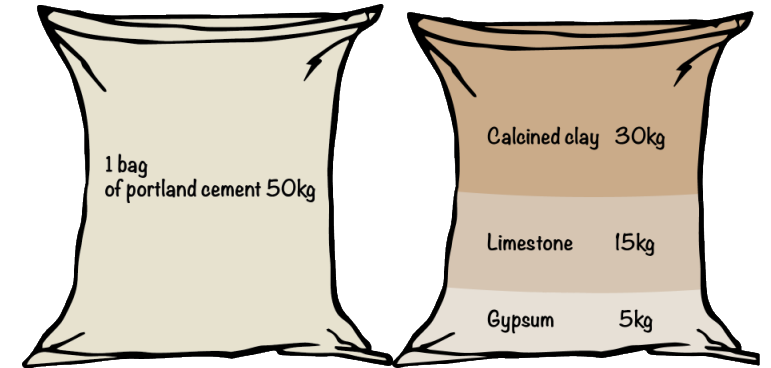
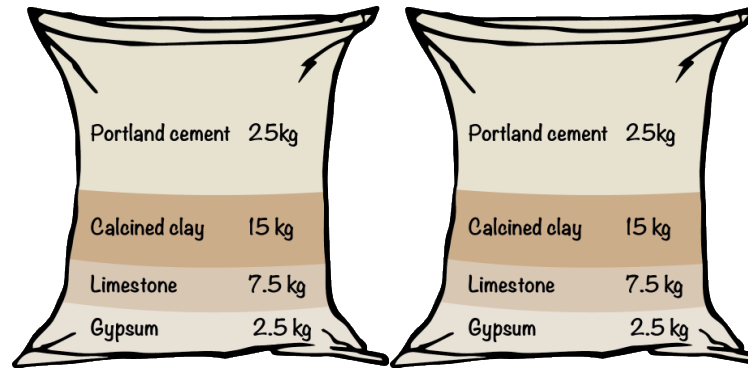
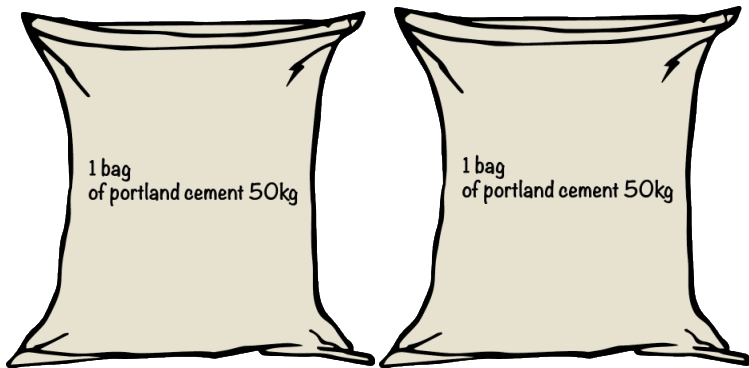
LC2

Blend at ready mix plant

Ordinary Portland Cement (100kg = 2 bags)
bags
 Conventional solution

LC3: 100kg = 2 bags
 (pre-mixed at factory) Needs new standards in most countries
 Clinker factor = 50%

LC2: 100kg = 1 bag Portland + 1 bag LC2
 (mixed at concrete ready mix site) Already possible with existing standards in most countries, Clinker Factor also 50%



CO₂ emissions
 80kg per 100kg

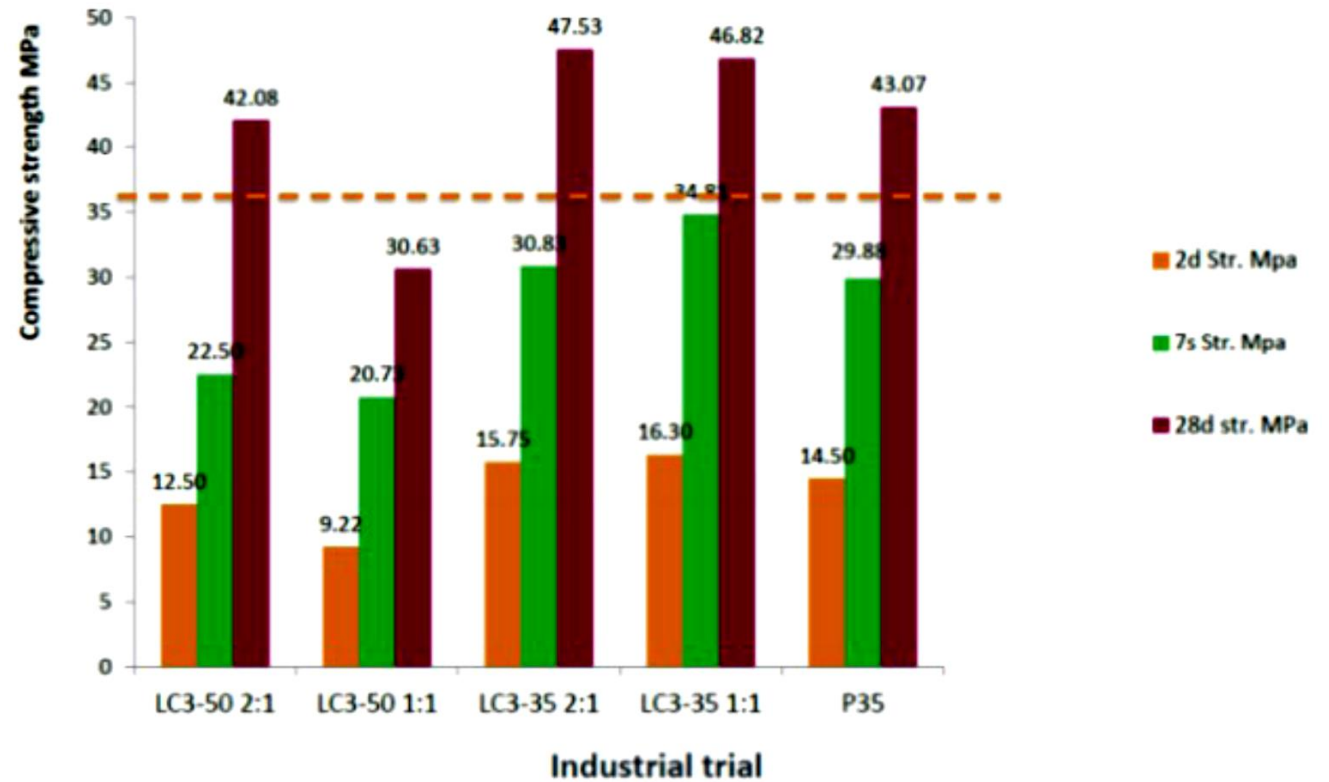
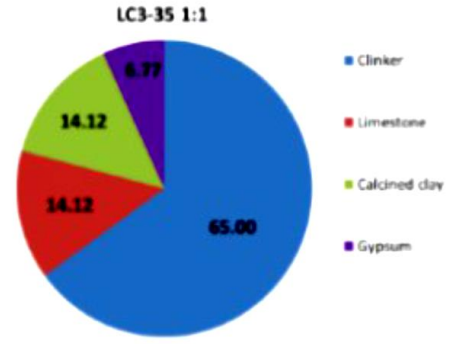
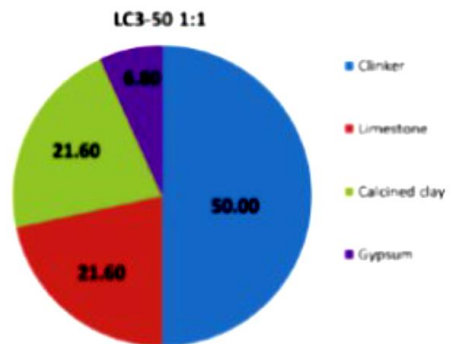
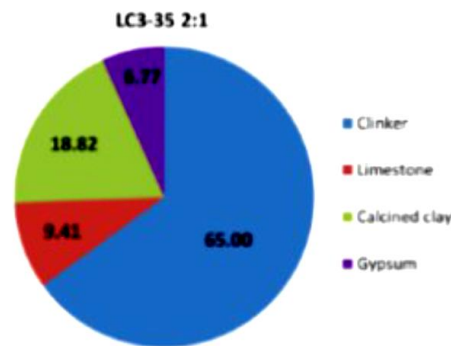
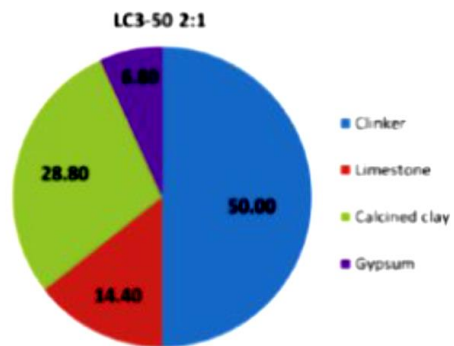
CO₂ emissions
 50kg per 100kg

CO₂ emissions
 50kg per 100kg



I cementi LC3

Le formulazioni dei cementi LC3 sono piuttosto varie, ma rispettano delle proporzioni tra la quantità di argilla calcinata e di calcare non calcinato, che possono essere in rapporto 2:1 o 1:1



Comparison with natural pozzolans, example Chile



- Pozzolanic cements have been in widespread use since the 1960s
- Standardization built around the cements available in the local market

High strength (80% CK)

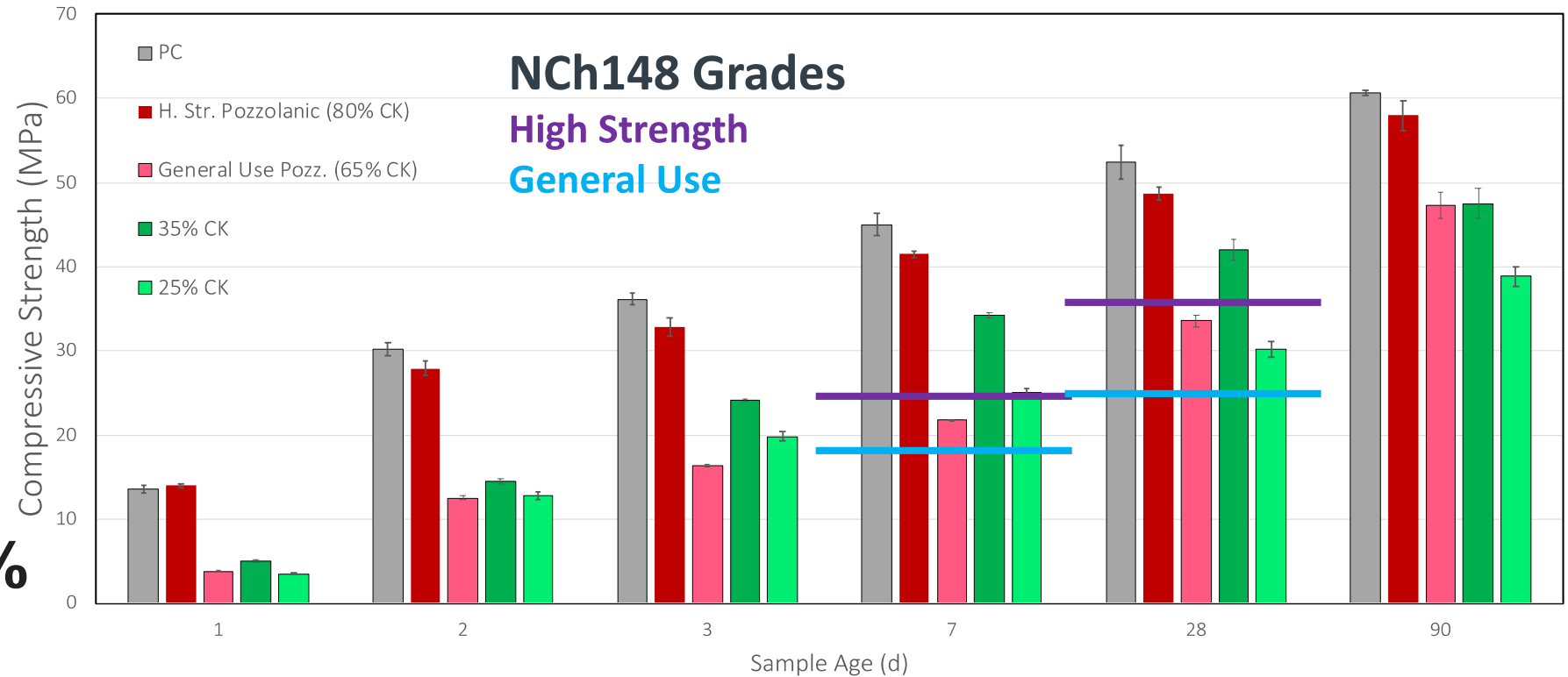
General use (65% CK)



LC³-35 (35% CK)

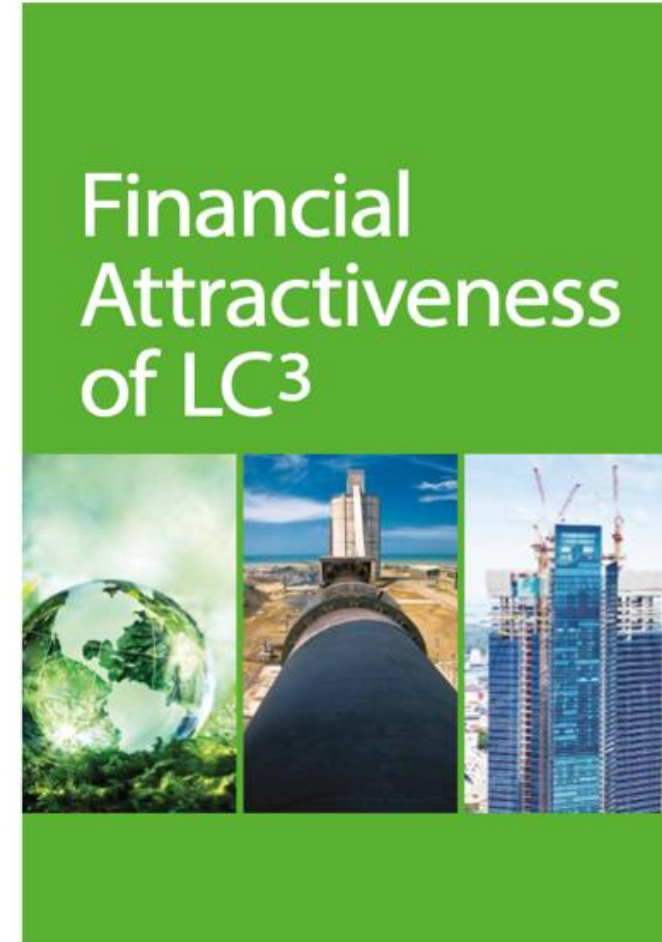
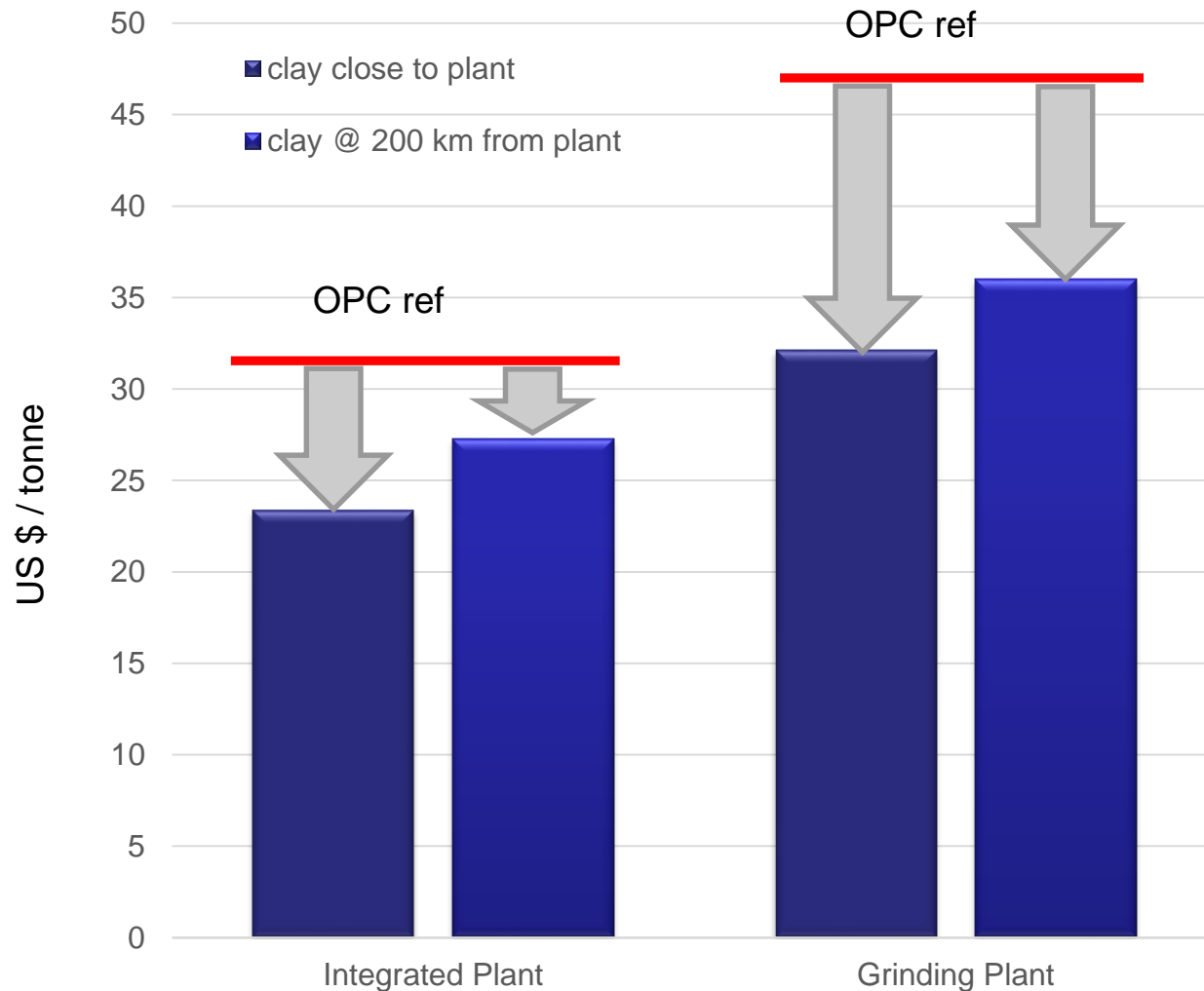
LC³-25 (25% CK)

Clinker savings
40-45%



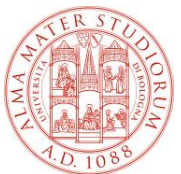
The reactivity of SCMs matters!

Lower cost: Cementis study

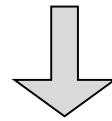
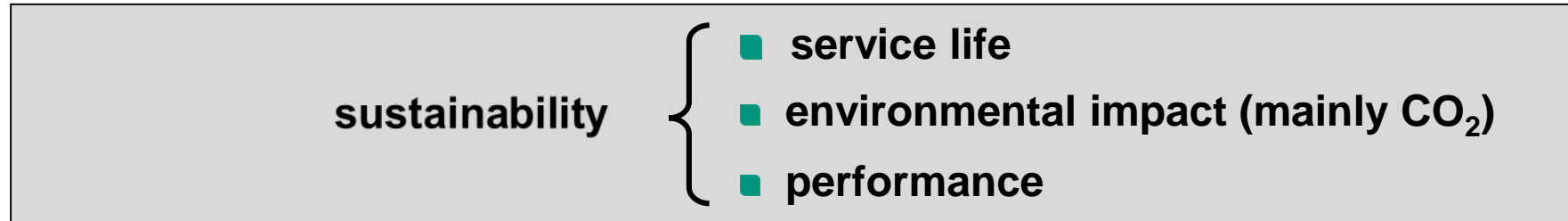


Report available:

<https://lc3.ch/wp-content/uploads/2020/10/2019-LC3FinancialAttractiveness-WEB.pdf>

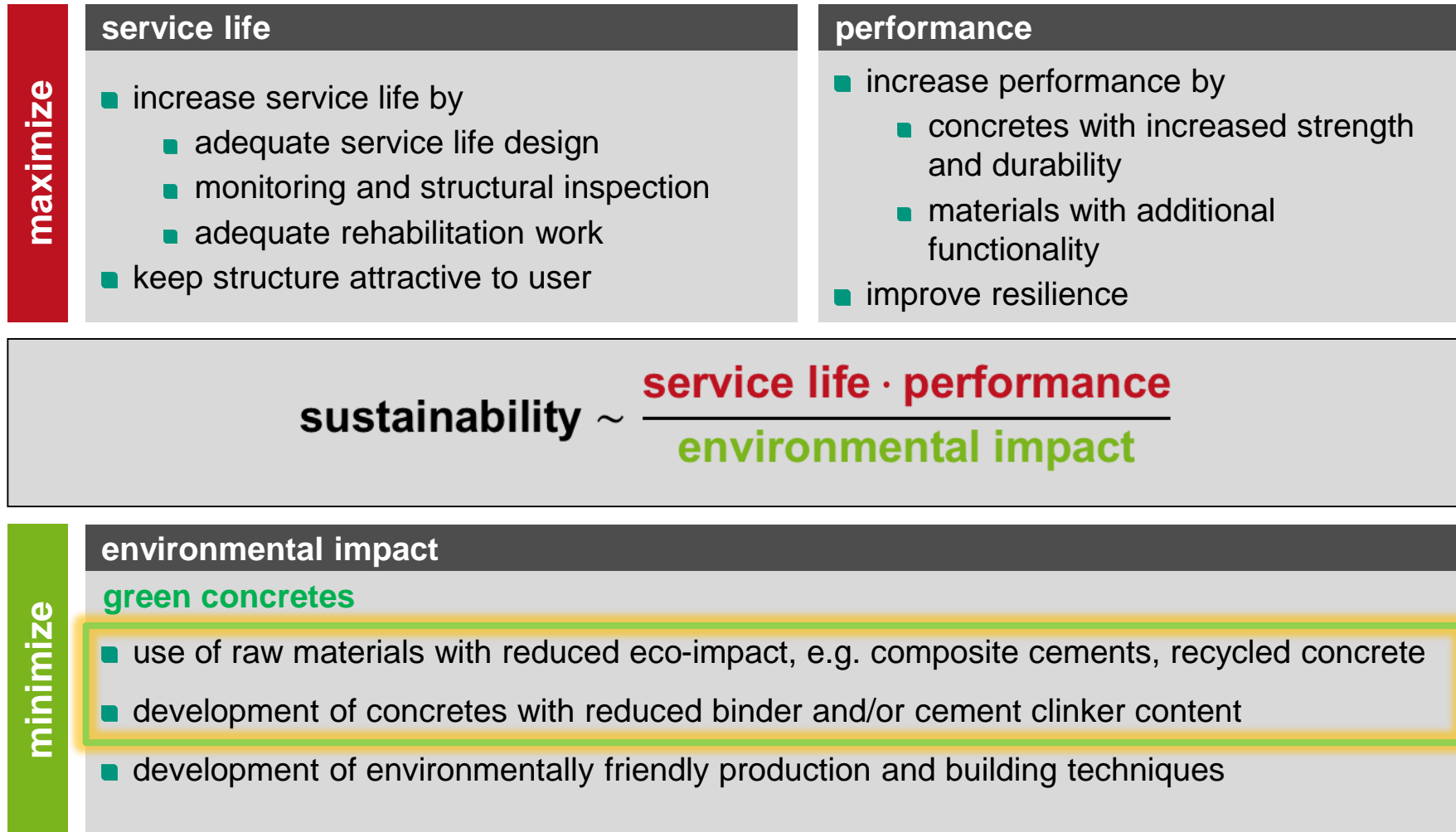


Sustainability related to structural concrete – main effecting parameters

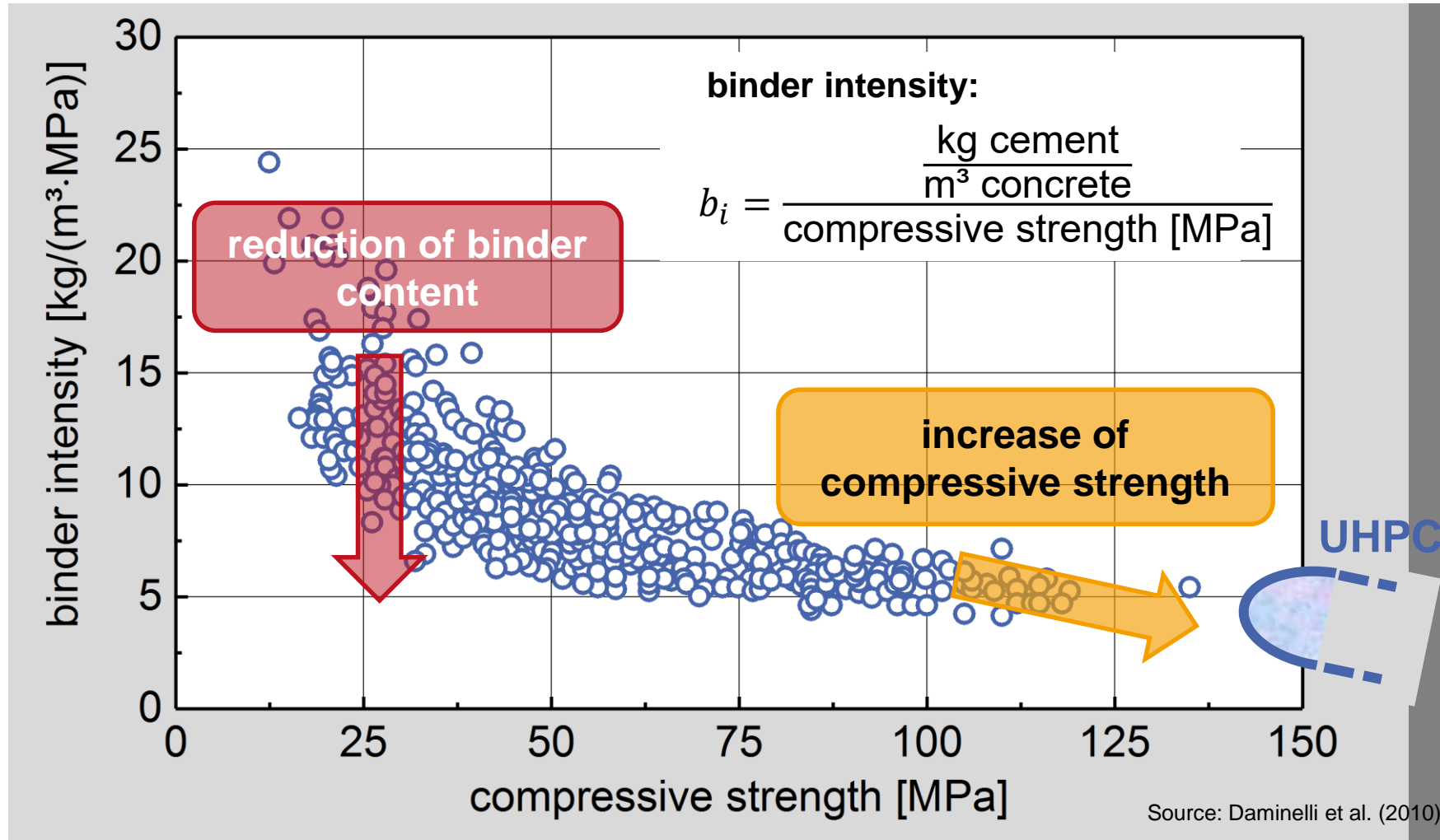


$$\text{sustainability} \sim \frac{\text{service life} \cdot \text{performance}}{\text{environmental impact}}$$

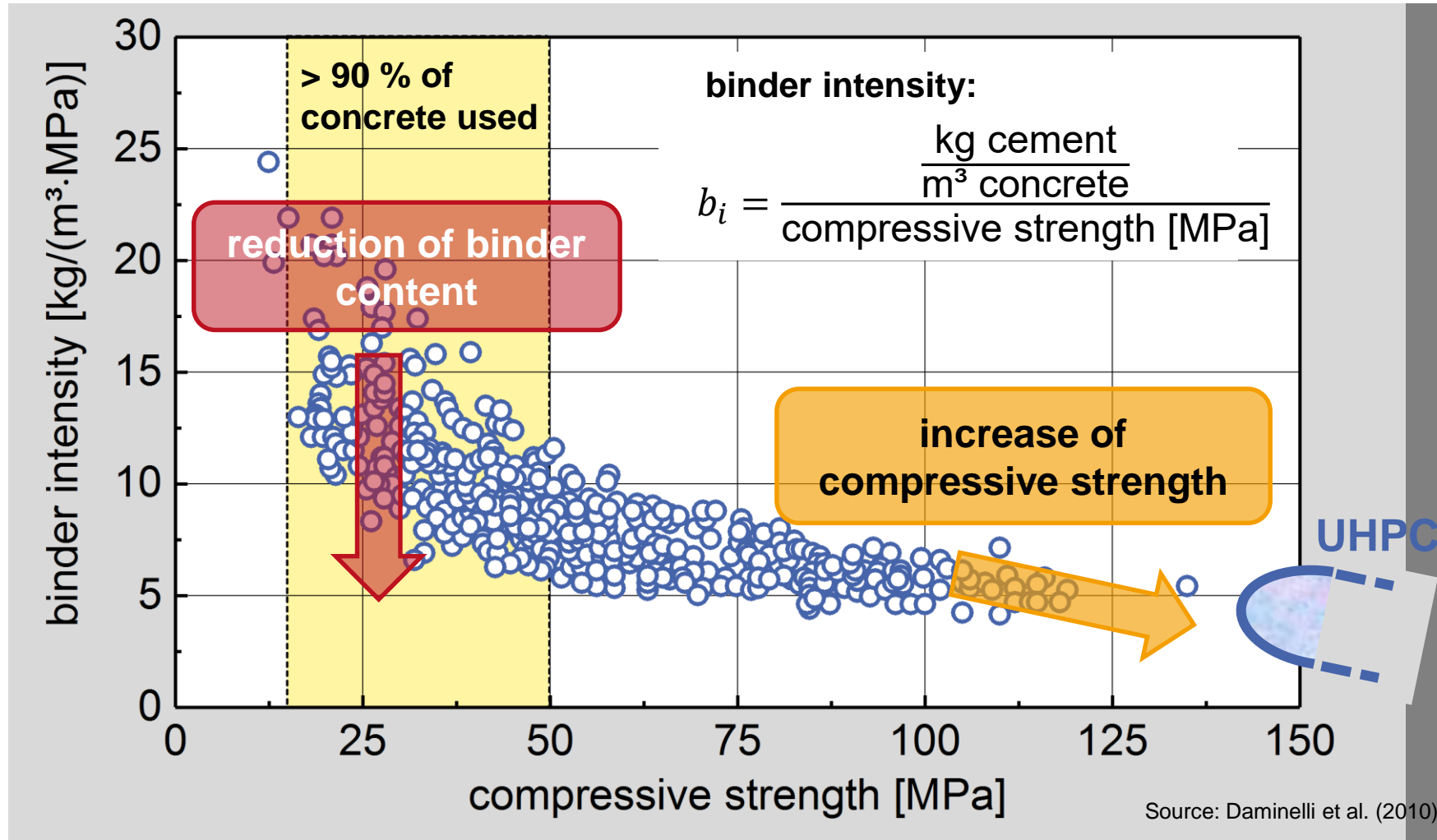
Sustainability of structural concrete



Improvement of concrete sustainability

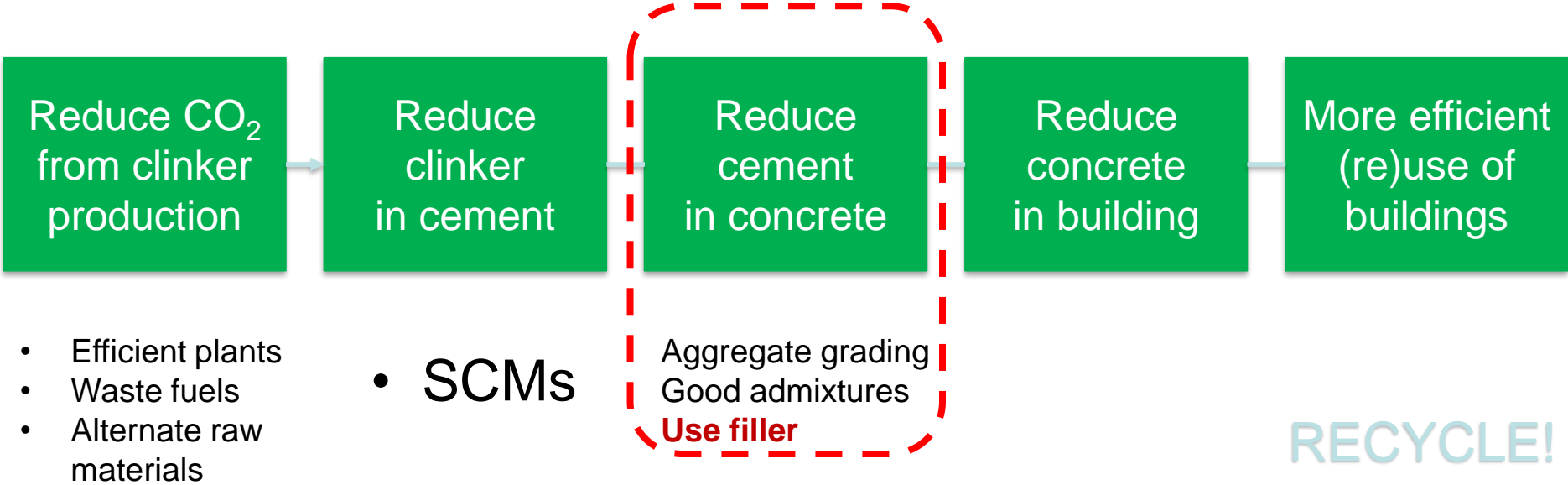


Improvement of concrete sustainability





Report for European Climate Foundation 2017



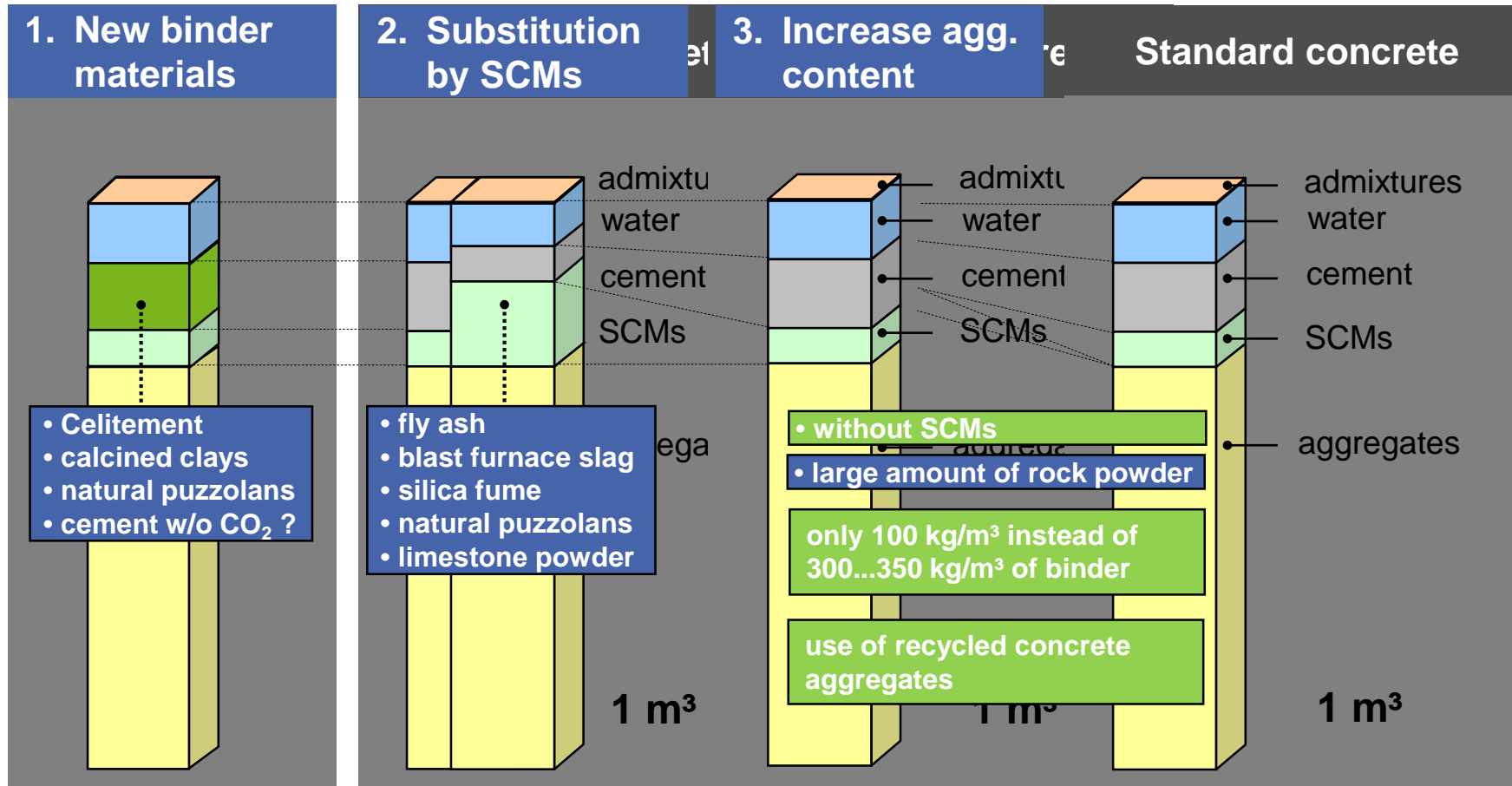
Substantial reductions in emissions > 80% can be achieved by working through the whole value chain

If only cement level is considered not more than about 50% possible without carbon capture and storage



Paths towards green structural concrete

Aim: Minimal use of materials with significant influence on environmental impact



Green (cement-reduced) concrete – tools and required developments

Virtual concrete mix design

Optimierte Packung:

$$\phi_{p,max} = \sum_{i=1}^n v_{p_i} / \left(\sum_{i=1}^n v_{p_i} + v_h \right)$$

Basic models: de Larrard, Fennis

Effect of plasticizers

Today: Plasticizers interact primarily with cement

Tomorrow: Interaction with all fines

Source graphic: BASF

Da H. Muller (2022)
Green concretes
Workshop fib MC 2020, Rome



Comparison of green (cement-reduced) and concrete and ordinary concrete C30

Composition			
component		ord	green
type of cement	-	42,5 R	52,5 R
cement	[kg/m ³]	320	113
water		192	87
paste content	[Vol.-%]	29	13
w/c ratio (eff.)	[-]	0,60	0,64
quartz powder 1	[kg/m ³]	-	96
quartz powder 2		-	120
sand 0/2		550	955 ¹⁾
gravel 2/8		635	480
gravel 8/16		640	505
plasticizer		-	6,5

¹⁾ splitted in two fractions 0.1/1 and 1/2 mm

Concrete properties			
parameter		ord	green
compr. strength f_{cm}	[N/mm ²]	38,4	76,9
modulus of elast. E_c		33700*	38030
spl. tensile str. $f_{ctm,sp}$		2,9*	2,3
flex. strength $f_{ctm,fl}$		4,4*	4,9
inverse carbonation resistance R_{ACC}^{-1}	[(10 ⁻¹¹ m ² /s) /kg/m ³]	13,4	18,9
chloride migration coefficient $D_{RCM,0}$	[10 ⁻¹¹ m ² /s]	2,5	2,0
CDF frost spalling	[g/m ²]	< 1500	2760
Global Warming Potential	[equ.kg CO ₂ /m ³]	285	135

* according to *fib* Model Code 2010



Comparison of green (cement-reduced) and concrete and ordinary concrete C30

Composition				Concrete properties			
component		ord	green	parameter		ord	green
type of cement	-	42,5 R	52,5 R	compr. strength f_{cm}		38,4	76,9
cement	[kg/m ³]	320	113	modulus of elast. E_c	[N/mm ²]	33700*	38030
water		192	87	spl. tensile str. $f_{ctm,sp}$		2,9*	2,3
paste content	[Vol.-%]	29	13	flex. strength $f_{ctm,fl}$		4,4*	4,9
w/c ratio (eff.)	[-]	0,60	0,64	inverse carbonation resistance R_{ACC}^{-1}	[(10 ⁻¹¹ m ² /s) /kg/m ³]	13,4	18,9
quartz powder 1	[kg/m ³]	-	96				
quartz powder 2		-	120				
sand 0/2		550	955 ¹⁾				
gravel 2/8		635	480				
gravel 8/16		640	505				
plasticizer		-	6,5				

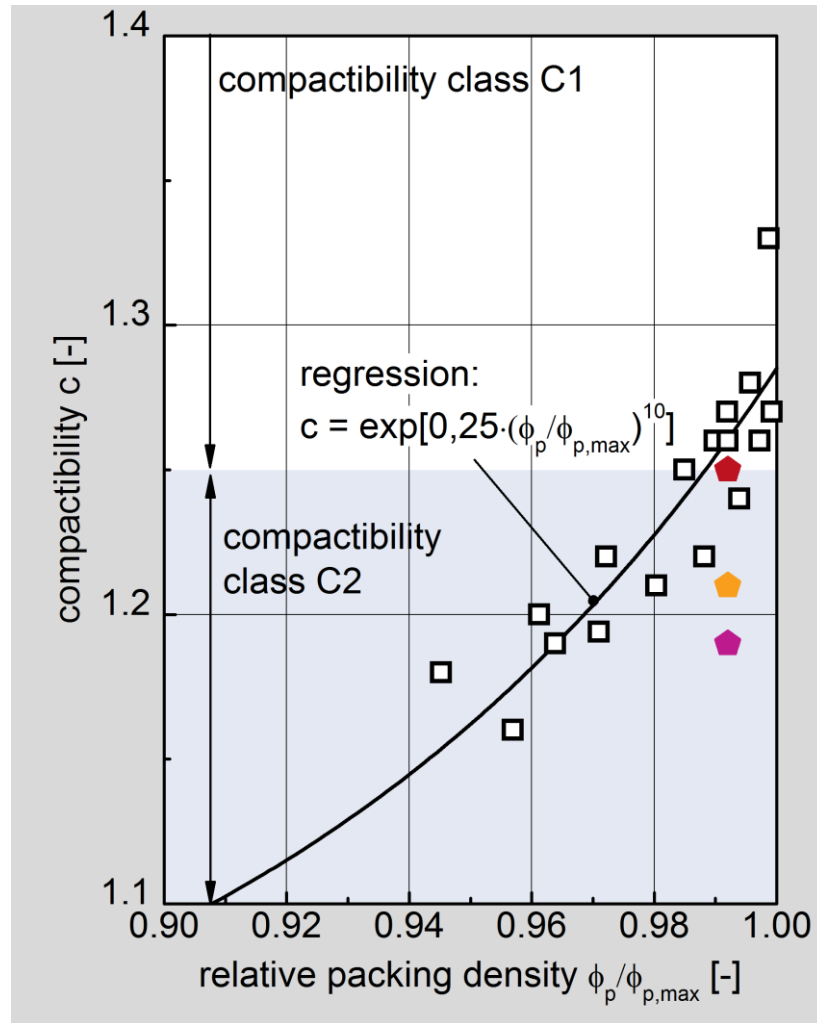
These tendencies are in contrast to our consolidated knowledge !
→ green concrete ≠ ordinary concrete

* according to *fib* Model Code 2010

¹⁾ splitted in two fractions 0.1/1 and 1/2 mm



Properties of green concrete in the fresh state



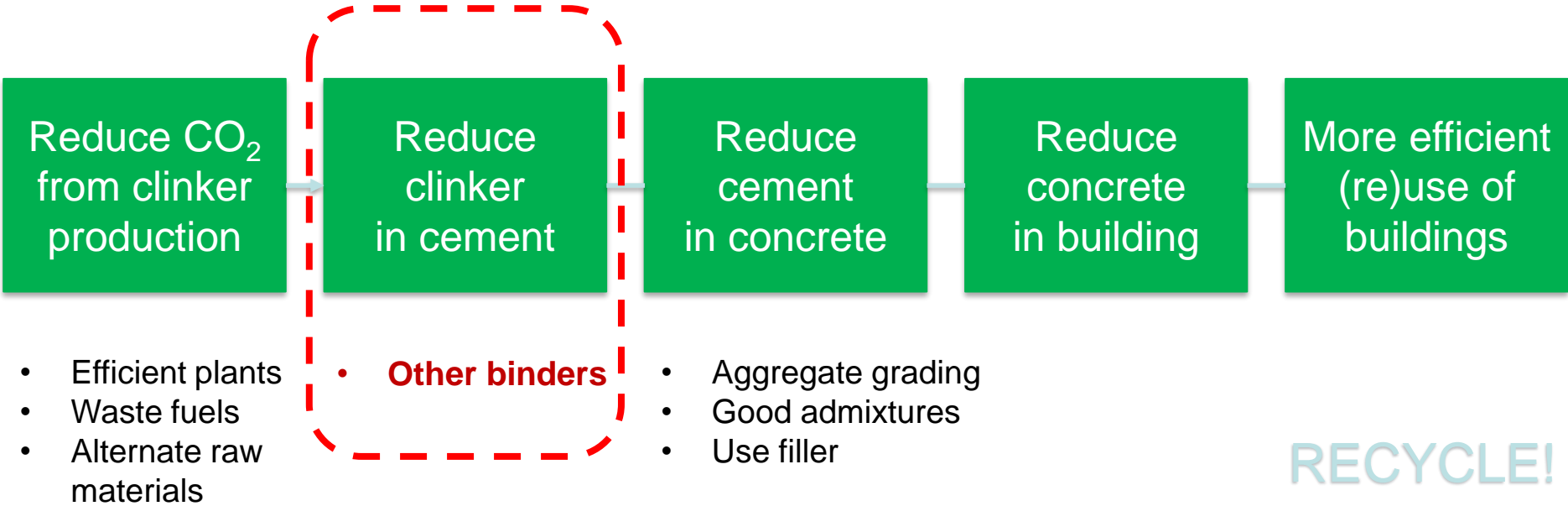
CEM [vol.-% of solids]	10	6	5	4	4	4
w/c-value [-]	0.43	0.69	0.67	0.64	0.64	0.65
cement type [-]	CEM I 52.5 R			μ CEM	SF- CEM	
cement [kg/m ³]	268	162	138	113	111	109
water (eff.) [kg/m ³]	116	112	92	72	70	72
aggregate [t/m ³]	1.93	2.02	2.09	2.16	2.16	2.16
SP (PCE) [kg/m ³]	6.2	5.7	6.0	6.5	6.4	6.5
GWP [kg CO ₂ /m ³]	259	171	157	136	136	133

Green concretes with low cement content





Report for European Climate Foundation 2017

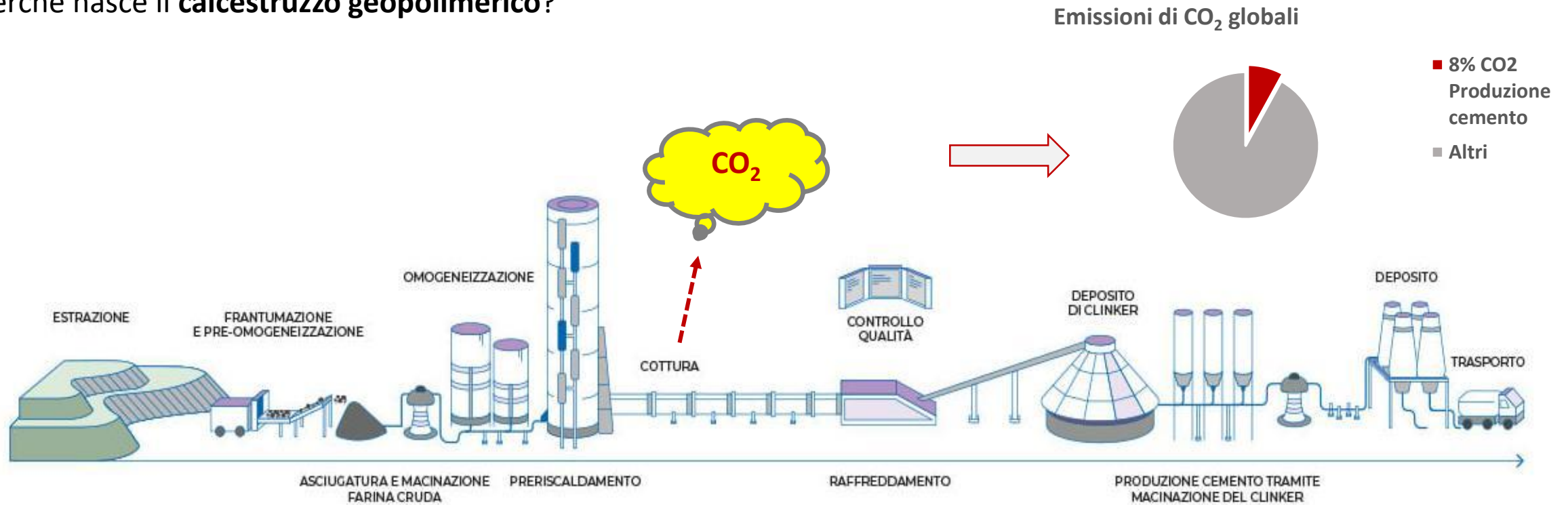


Substantial reductions in emissions > 80% can be achieved by working through the whole value chain

If only cement level is considered not more than about 50% possible without carbon capture and storage



Perché nasce il calcestruzzo geopolimerico?



- ❖ Abbattimento emissioni di CO₂
- ❖ Riutilizzo di materie di scarto

CALCESTRUZZO GEOPOLIMERICO

Definizione

POLIMERI INORGANICI CHIMICAMENTE ATTIVATI

i Geopolimeri possono essere considerati come materiali compositi ottenuti dalla miscelazione di una polvere silico-alluminata fine (**Base**) ed una soluzione alcalina (**Attivatore**).



BASE

Materiali silico-
alluminati

+



ATTIVATORE

Soluzione
Alcalina

+



CARICHE

Aggregati di varie
dimensioni e
natura

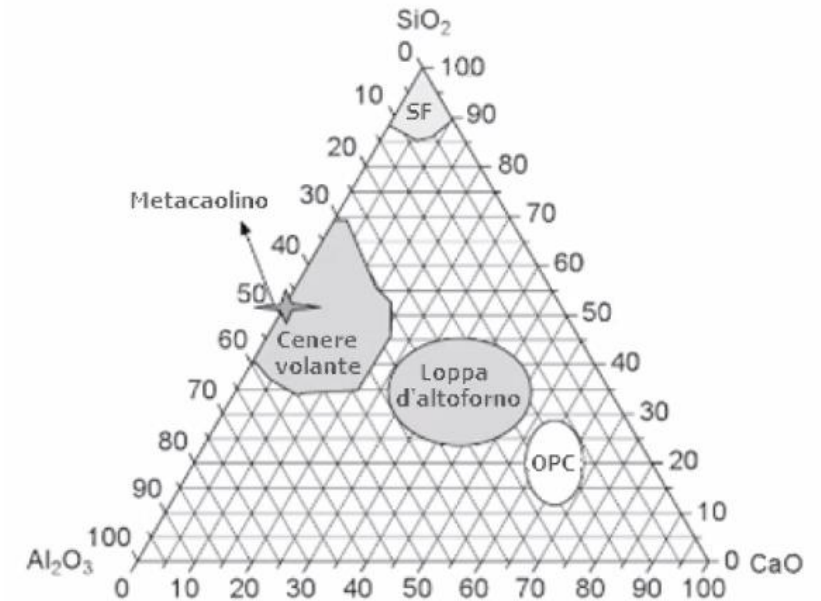
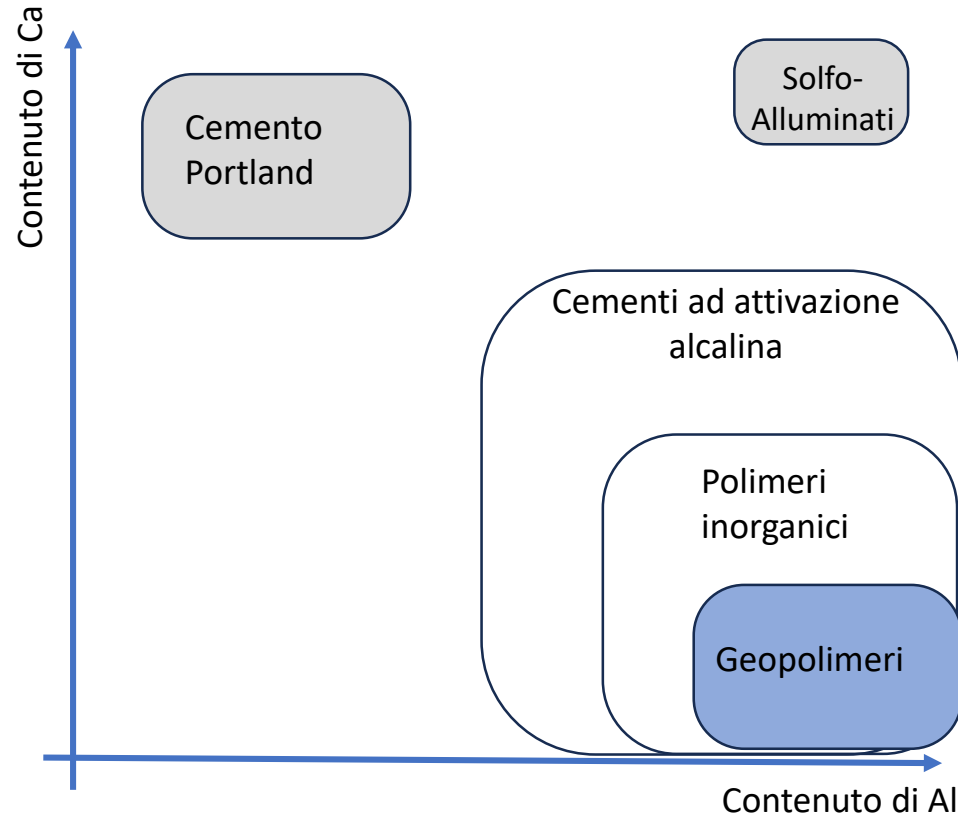
=

Geopolimerico

o
AAM

Definizione di materiali alcali attivati

Il materiale geopolimerico, se usato nell'edilizia, deve essere caratterizzato confrontandolo con un equivalente materiale cementizio



i materiali attivati dagli alcali (AAM) NON sono polimeri, quindi non possono essere chiamati geopolimeri.

Basi Geopolimeriche

Polveri Silico-Alluminate

➤ Metacaolino

➤ Gesso

➤ Cemento/Clinker

➤ Filler Calcare

➤ Cenere

➤ Loppa, prodotta dalla macinazione spinta delle loppe granulate d'altoforno.

➤ fumo di silice (prodotte presso centrali termoelettriche a carbone)



Materiali naturali
Idraulicità



Materiali di riciclo
Idraulicità

Base	Loppa	Fumo di Silice	Base Idraulica	Metacaolino
	85%	15%	100%	
SiO ₂	42,03%	97,82%	50,40%	42,00%
Al ₂ O ₃	18,00%	0,13%	15,32%	53,00%
K ₂ O	1,06%	1,46%	1,12%	1,45%
Fe ₂ O ₃	0,69%	0,04%	0,59%	0,97%
TiO ₂	0,47%	0,00%	0,40%	1,50%
MgO	5,36%	0,04%	4,56%	0,13%
CaO	31,81%	0,27%	27,08%	0,20%
Na ₂ O	0,59%	0,24%	0,54%	0,09%
	BASE Id			

Caratteristiche Essenziali

- Struttura Amorfa
- Elevati quantitativi di SiO₂/Al₂O₃
- Elevata finezza (Superficie specifica)
- Idraulicità



Basi Geopolimeriche

Composizione chimica delle Basi

Base	Loppa	Fumo di Silice	Base Idraulica	Metacaolino	Legante	Cemento Portland
SiO ₂	42,03%	97,82%	50,40%	42,00%	SiO ₂	20%
Al ₂ O ₃	18,00%	0,13%	15,32%	53,00%	Al ₂ O ₃	7%
K ₂ O	1,06%	1,46%	1,12%	1,45%	K ₂ O	0,5%
Fe ₂ O ₃	0,69%	0,04%	0,59%	0,97%	Fe ₂ O ₃	3%
MgO	5,36%	0,04%	4,56%	0,13%	MgO	1,8%
CaO	31,81%	0,27%	27,08%	0,20%	CaO	66%
Na ₂ O	0,59%	0,24%	0,54%	0,09%	Na ₂ O	0,34

- Il legante cementizio presenta quantità di ossido di calcio, decisamente superiore alle possibili basi geopolimeriche.
- Le basi geopolimeriche sono ricche di ossidi di SiO₂ e Al₂O₃

Composizione chimica differente tra cemento e basi geopolimeriche

Basi Geopolimeriche

Parametri fisici

Materiali	<i>Superficie Specifica</i>	<i>Peso specifico</i>	<i>Indice di idraulicità</i>
	<i>(cm²/g)</i>	<i>(kg/l)</i>	
Loppa Calme	4150	2,61	0,78
Loppa Ecocem	4470	2,62	0,70
Fumo di silice	10500	2,45	2
Filler Calcere	3600	2,70	0
Base geopolimerica	5000	2,59	

<i>Materiali</i>	<i>Superficie Specifica</i>	<i>Peso specifico</i>	<i>Indice di idraulicità</i>
	<i>(cm²/g)</i>	<i>(kg/l)</i>	
Cemento 52,5	5300	3,13	1
Cemento 42,5	3400	2,95	1

Finezza e Peso densità simili

Attivatori Alcalini

Idrossidi NaOH Idrossido di Sodio

KOH Idrossido di potassio

Silicati Na₂SiO₄ Silicato di Sodio

K₂SiO₄ Silicato di Potassio

Leganti Calce
Cemento
Clinker

Acqua H₂O



In Soluzione, con
concentrazione che
varia dal 40 al 60%



In polvere, non comuni

Liquido

Attivatore	Unità di misura	Valore	
		Minimo	Massimo
Densità relativa a 20°C	g/ml	1,51	1,56
Rapporto ponderale	-	1,6	1,7
Titolo in Sodio Silicato	%	41,7	45
SiO ₂	%	25,6	29,3
Na ₂ O	%	15,5	17,2
Ph (TAL QUALE)	-	12,6	13,8
Viscosità a 20°C	MPa s	200	600

Da regolare in base al grado di lavorabilità richiesto – come nei calcestruzzi, all'aumentare si riducono le proprietà meccaniche

Funzione degli attivatori

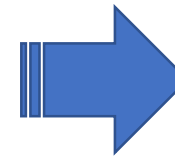
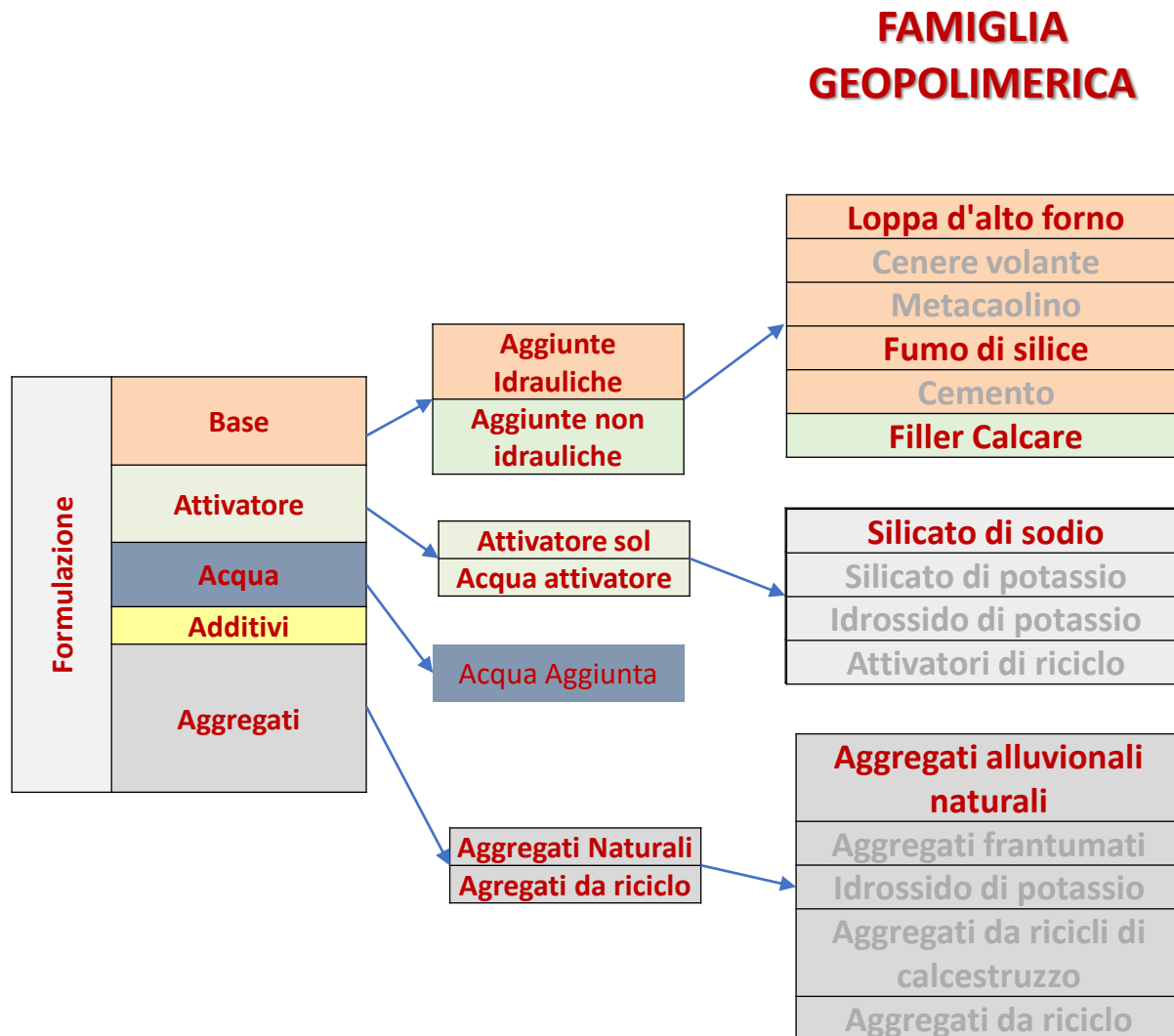
- Innalzano il PH della Soluzione
- Ne modificano la viscosità

- Consentono di gestire la velocità del tempo di presa

- Gestiscono la velocità di sviluppo delle proprietà meccaniche



La formulazione del legante geopolimerico



Malta Cementizia Normalizzata		
Base	Loppa	12%
	Fumo di Silice	2%
	Filler	5%
Acqua Aggiunta	Peso Tot	6,2%
Attivatore	Sil. di Sodio	7%
Aggregati		67,5%
Totale		100%

Peso totale	100.0%
Base Idraulica	14.0%
Acqua Totale	10.1%
Rapp. (base idraulica+attivatore)/inerti	29.0%
Rapp base/inerti	20.7%
Rapp.attivatore/peso totale	0.070
Rapp. Acqua Tot/base id	72.1%
Rapp base id/att.sol	2.00

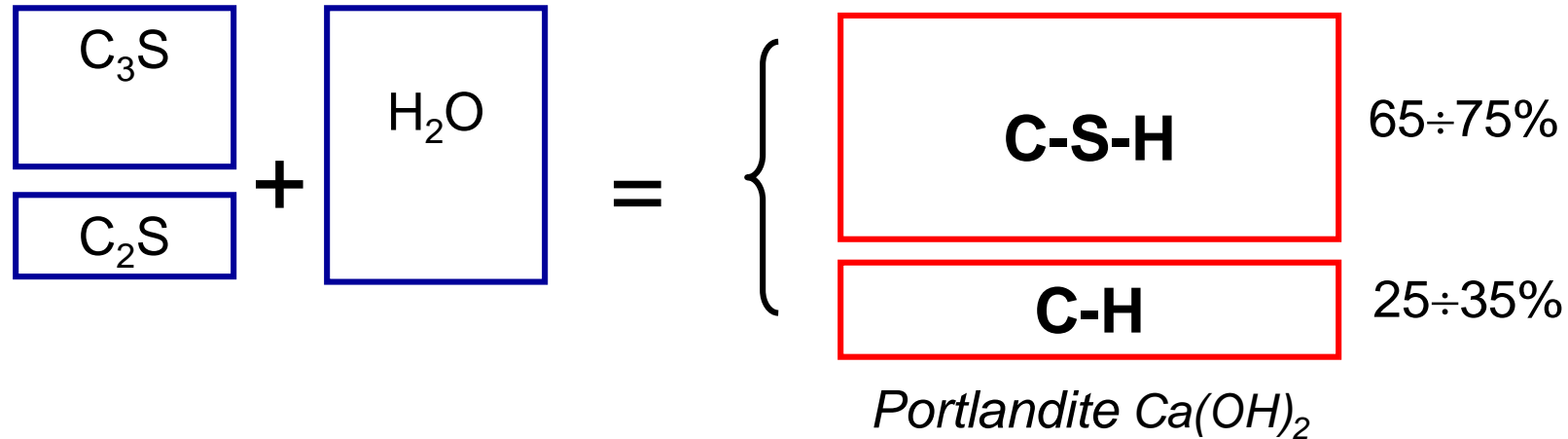


MIX DESIGN CONGLOMERATI GEPOLIMERICI



Idratazione del cemento portland

2 – Idratazione dei Silicati (**INDURIMENTO**)

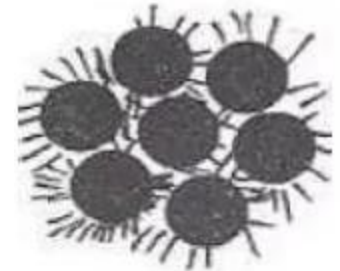


- Creazione di una **struttura cristallina disordinata** (C-S-H) a lamelle e filamenti molto sottili (*gel di cemento*).
- **Presenza di Portlandite** con dimensioni maggiori e minori proprietà meccaniche
- Portlandite rende il calcestruzzo sensibile alle acque aggressive (-)
- Portlandite rende fortemente basica ($pH > 13$) la soluzione acquosa all'interno della pasta cementizia (+: protezione barre di armatura)

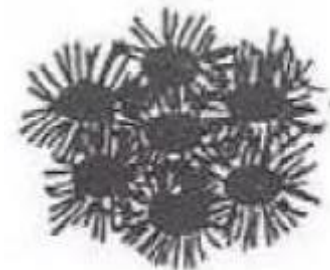
Dissoluzione



Idratazione



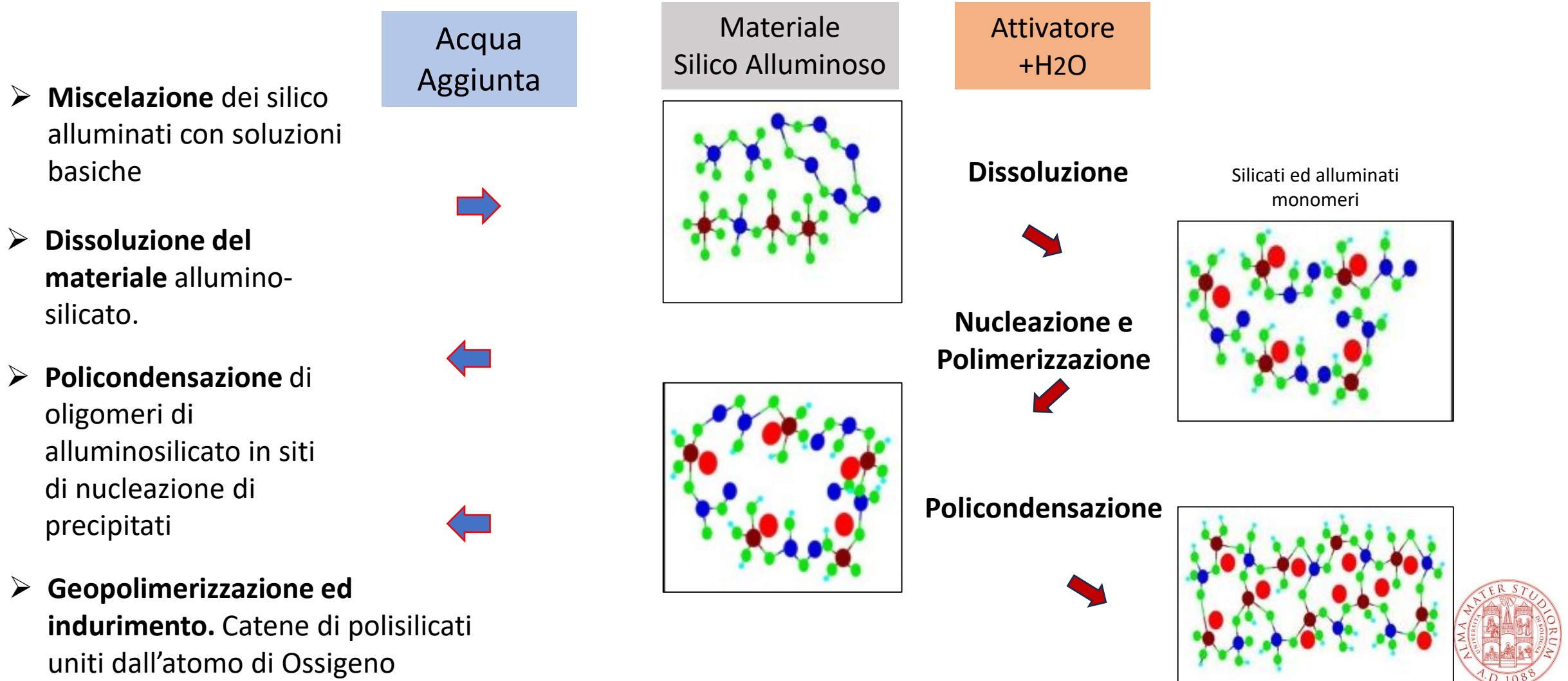
Idratazione



Processo di geopolimerizzazione

I geopolimeri sono miscele di strutture amorfe e semi-cristalline.

La reazione di geopolimerizzazione può essere suddivisa in quattro fasi principali:



Lavorabilità malta geopolimerica

Malta Geopolimerica Normalizzata

Base	Loppa	230	12%
	Fumo di Silice	40	2%
	Filler	120	5%
Acqua Aggiunta	Peso Tot	144	6,2%
Attivatore	Silicato di Sodio	141	7%
Aggregati		1350	67,5%
Totale		2025	100



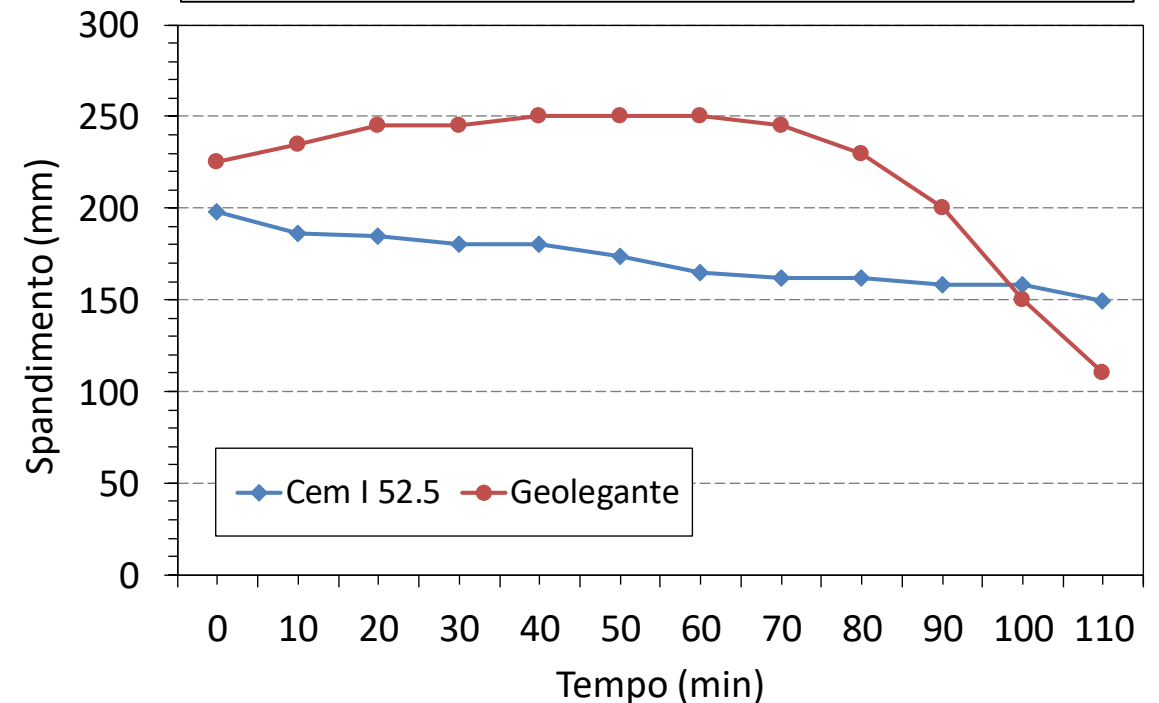
UNI EN 1015-3



Rapporti caratteristici

	Geopolimero	Cementizio
Peso totale	100%	100%
Base Idraulica	13,3%	22,2 %
Base	19,0%	22,2 %
Acqua Totale	11,0%	11,1 %
Rapp base/inerti	0.2	
Rapp. Acqua/Base idraulica	0,606	0,50
Rapp. Acqua Tot/base	0,57	0,50
Rapp. Acqua Tot/base + att sol	0,50	0,50

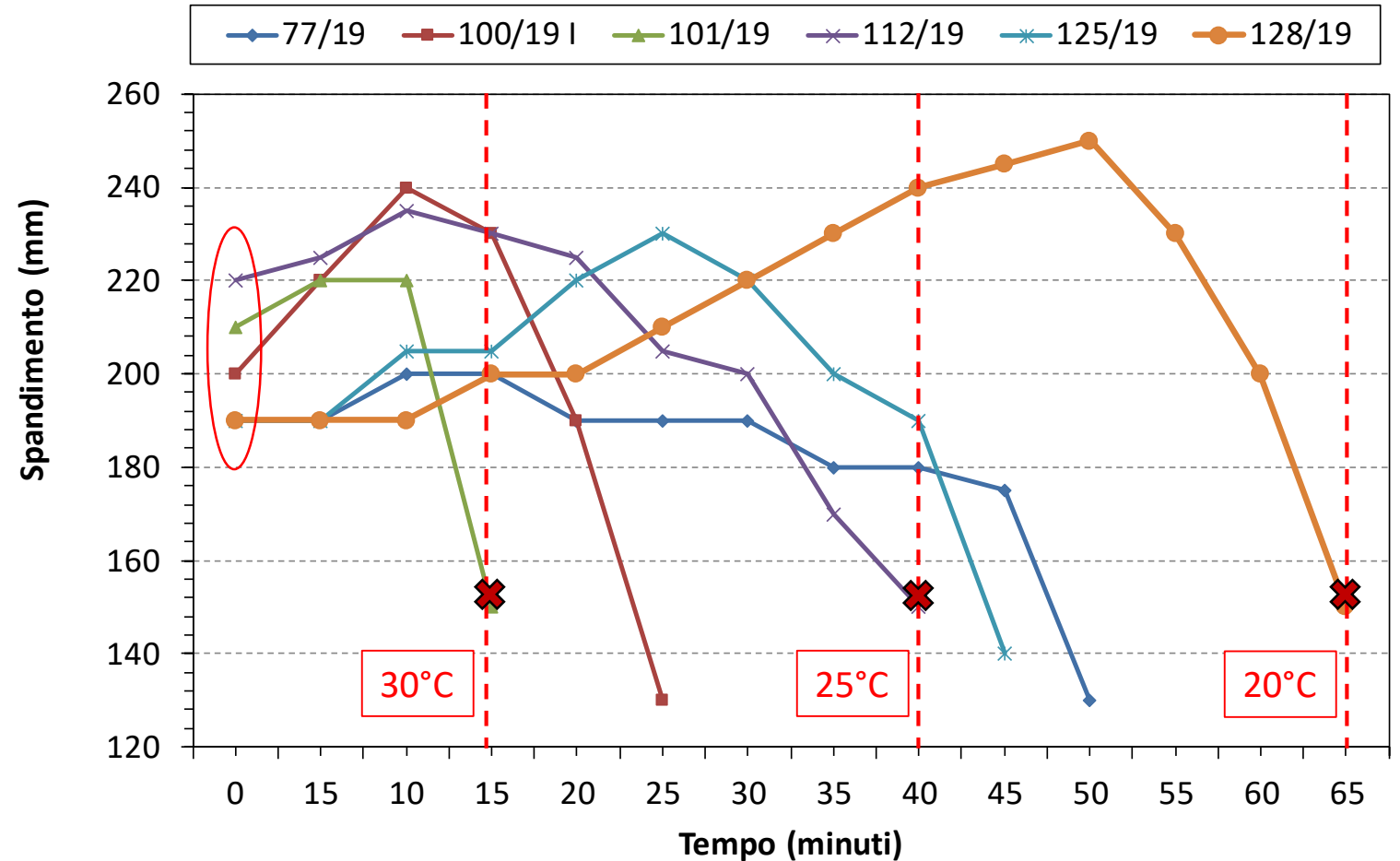
A parità d'acqua totale le lavorabilità sono simili



Lavorabilità malta geopolimerica

Mantenimento della lavorabilità in funzione della temperatura

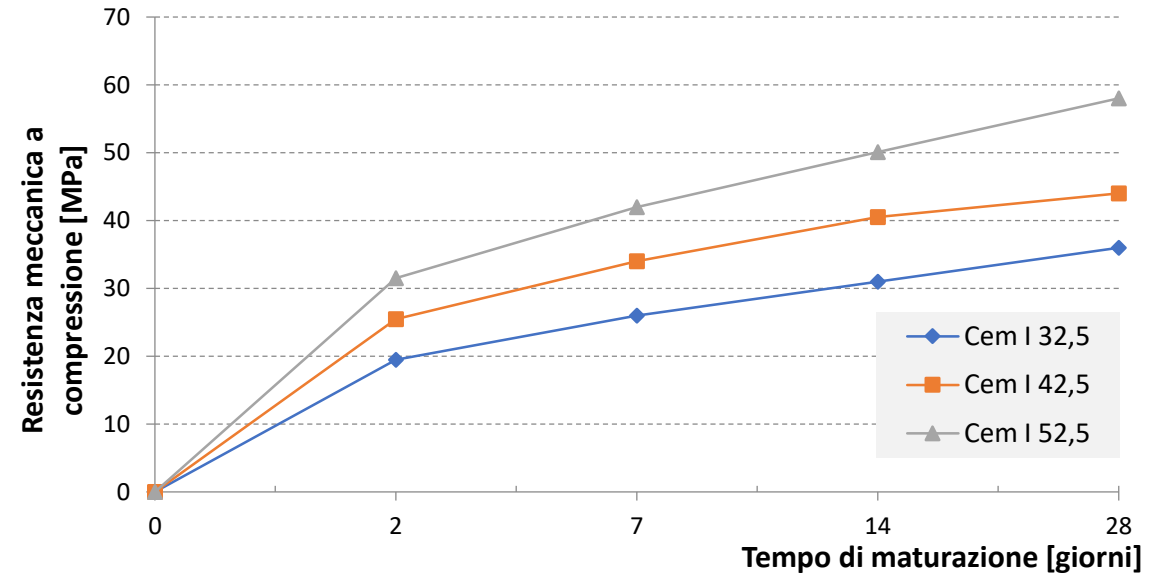
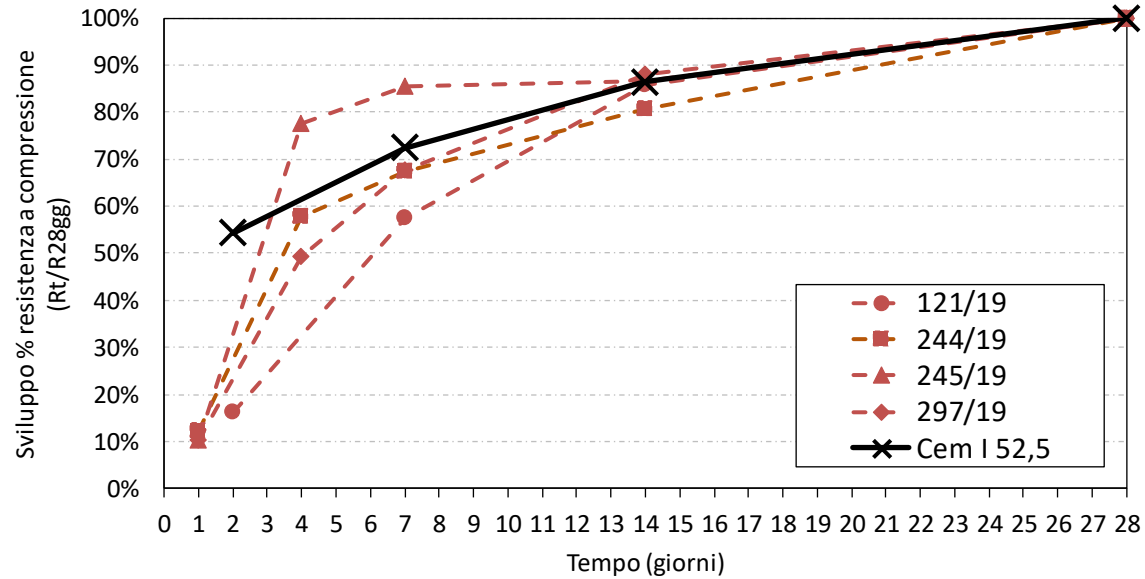
- Lavorabilità: in tutti i casi analizzati sono stati **misurati soddisfacenti valori della lavorabilità** (≈ 200 mm) e **confrontabili con il legante di riferimento CEM I 52,5**;
- **mantenimento varia in funzione dei materiali componenti**
- **Notevole influenza della temperatura**: riduzione del tempo di mantenimento all'aumentare della temperatura ambientale e dei componenti.



Resistenze meccaniche



Sviluppo delle resistenze meccaniche nei leganti geopolimerici



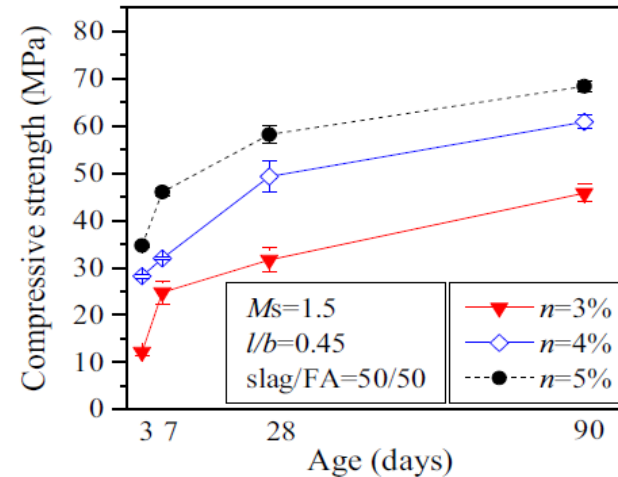
Difficile fare delle correlazioni

Grande variabilità dello sviluppo delle resistenze in funzione della variabilità delle basi e dell'attivatore utilizzato

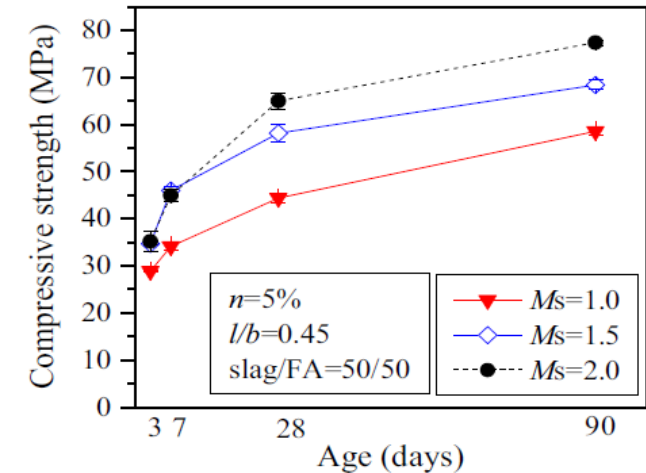
Sviluppo delle resistenze meccaniche nei leganti geopolimerici

Lo sviluppo delle resistenze meccaniche dipende:

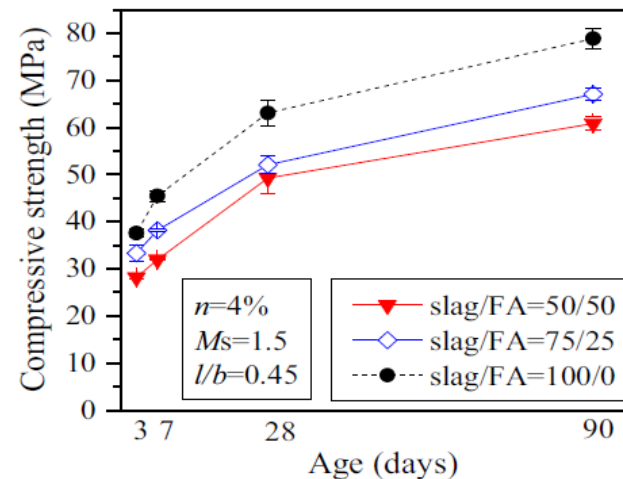
- Dalla **composizione** morfologica e chimica delle materie prime che compongono la **base**.
- Dalla **composizione** chimica dell'**attivatore**, silicati/idrossidi, e dalla concentrazione dello stesso.
- Dal **PH** che sviluppa l'attivatore.
- Dal **quantitativo d'acqua** totale.



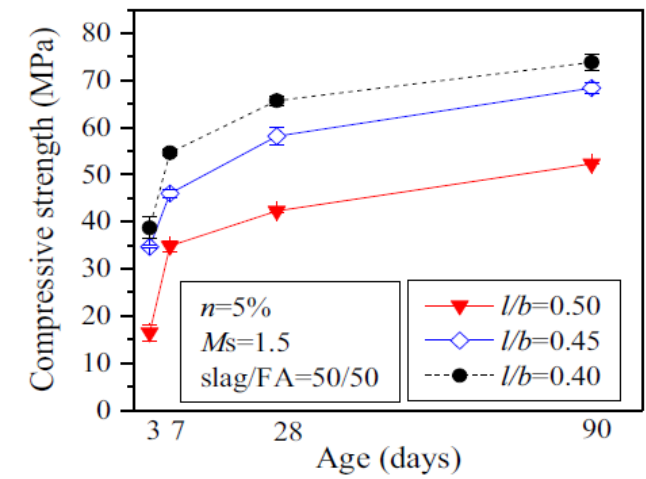
(a) Alkali concentration



(b) Modulus



(c) Slag/FA ratio



(d) Liquid/binder ratio

Fig. 4. Influences of material parameters on compressive strength development of SFGC.

Curva di correlazione Rm- (a tot/base id.) nei leganti geopolimerici

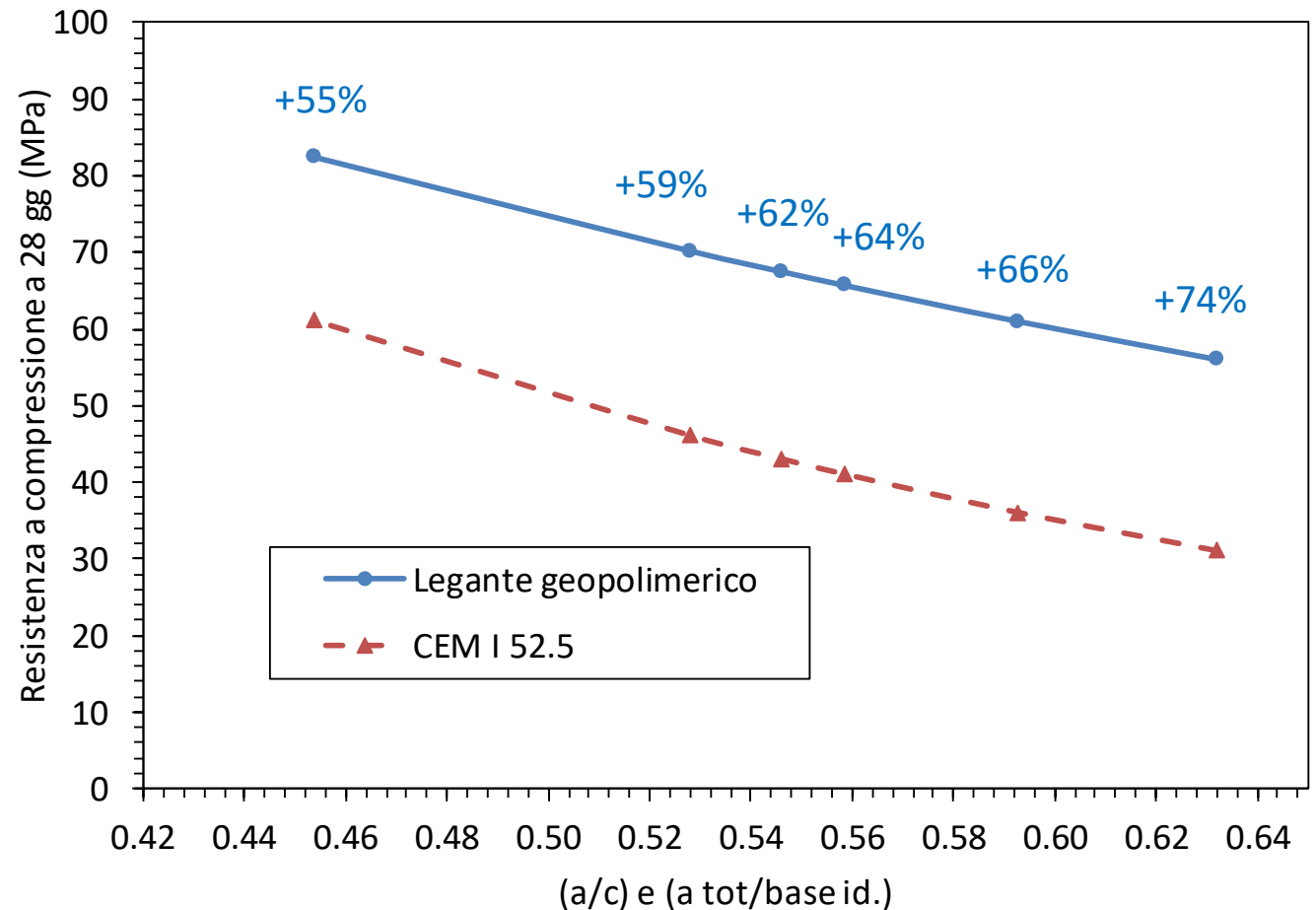
- Le pendenze delle curve di correlazione risultano confrontabili.
- A parità di rapporto acqua/cemento le miscele geopolimeriche presentano da valori di resistenza a compressione maggiori rispetto alla miscela di riferimento.

$$R_m = 221.9 e^{-\left(\frac{a_{tot}}{base\ id.}\right)^{-2.181}}$$

Legante geopolimerico	
Rm (MPa)	a tot/base id.
55.92	0.63
60.92	0.59
65.64	0.56
67.46	0.55
70.12	0.53
82.43	0.45

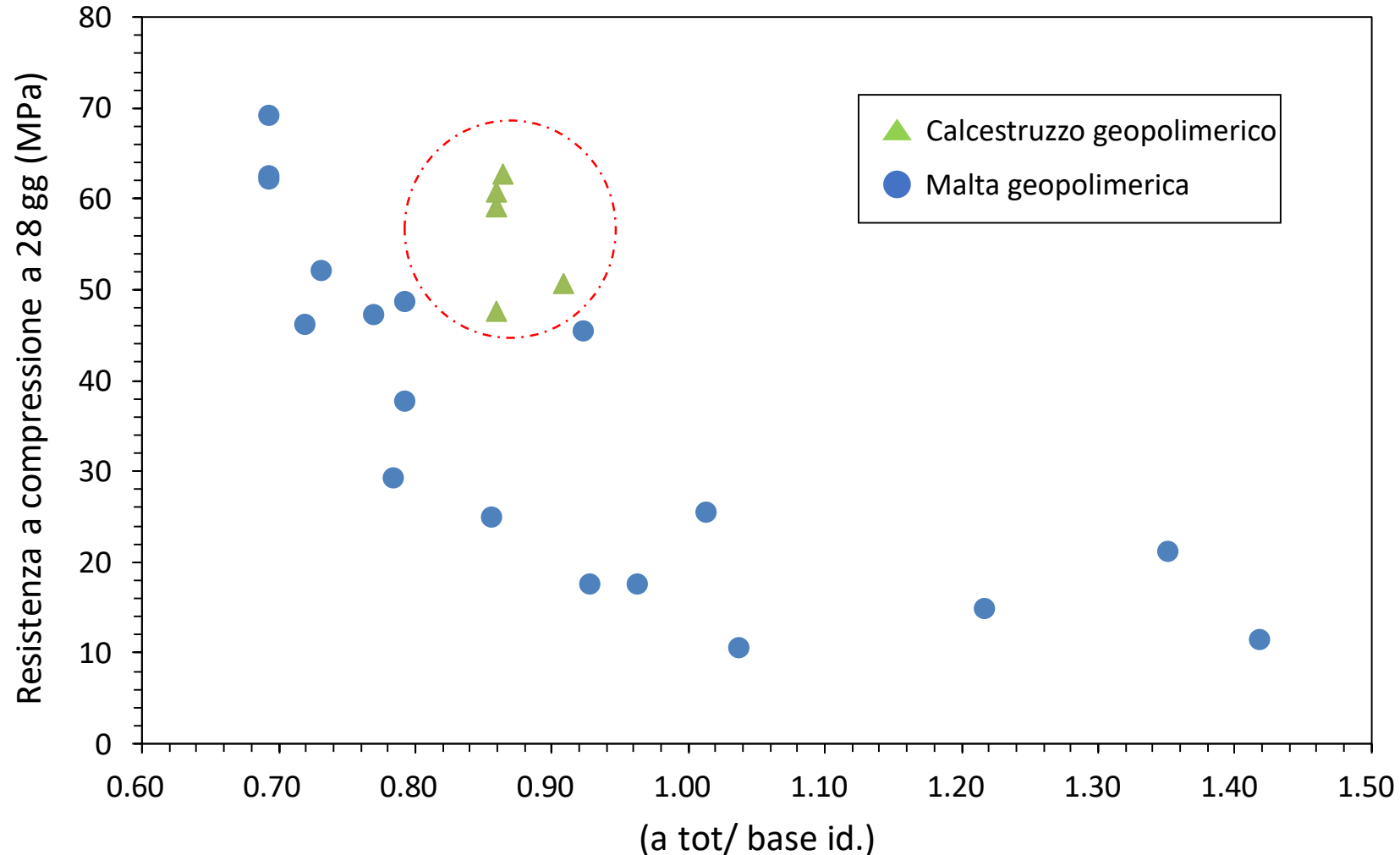
$$R_m = 342.9 e^{-\left(\frac{a}{c}\right)^{-3.804}}$$

CEM I 52.5	
Rm (MPa)	a/c
31.0	0.63
36.0	0.59
41.0	0.56
43.0	0.55
46.0	0.53
61.0	0.45

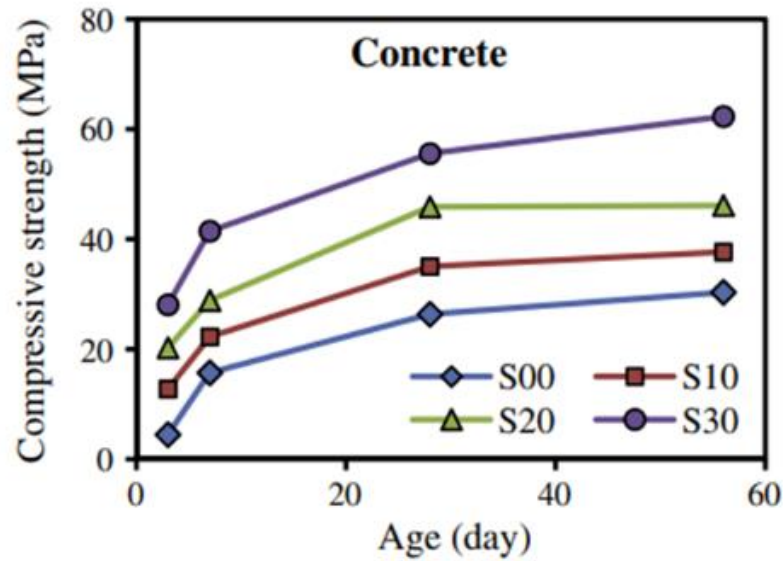


Curva di correlazione Rm- (a tot/base id.) nei leganti geopolimerici

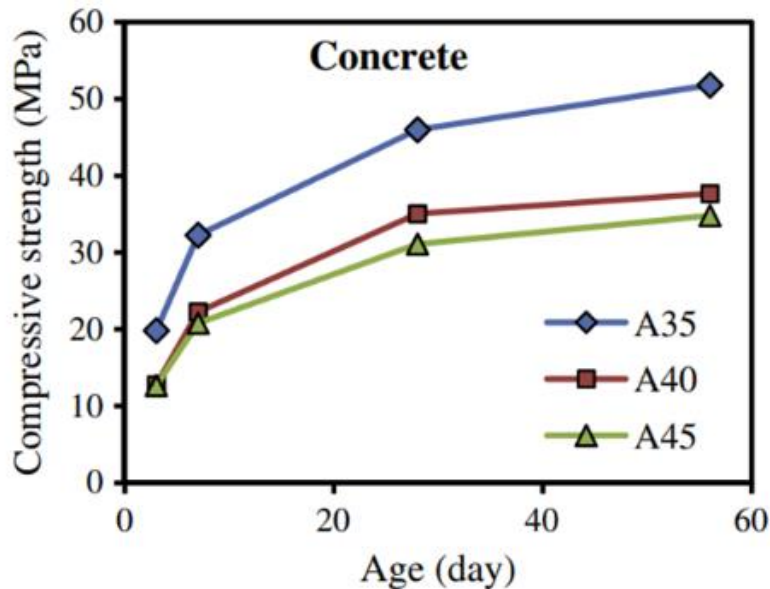
- Valutare la fattibilità di estendere le precedenti considerazioni anche per le miscele di calcestruzzo (**work in progress**)



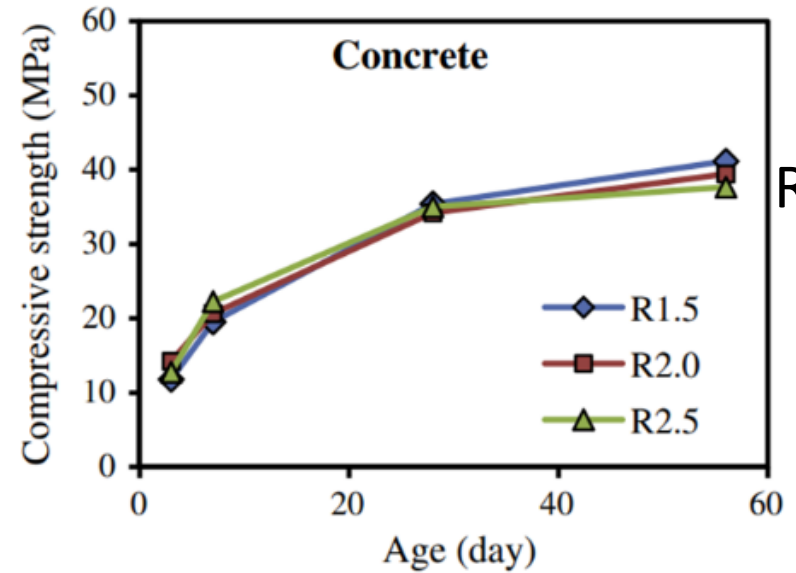
PROPRIETA' MECCANICHE CALCESTRUZZI GEOPOLIMERICI - LETTERATURA



↑
% Scorie
crescente
(GGBS)
Solo ceneri volanti



↓
Liquido alcalino
crescente



Rapporto
SS/SH

Mix design calcestruzzo geopolimerico

Formulazione con NaOH 8M

Materiali	Formulazione [kg/m ³]
GGBS	450.00
NaOH	27.00
Acqua	170.83
Silicato di sodio (SS) in soluzione	64.93
Aggregato fine 1 (0-4 mm)	683.0
Aggregato grosso ghiaia (4-15 mm)	956.0
TOT	2352
a/l	0.41

Formulazione con NaOH 10M

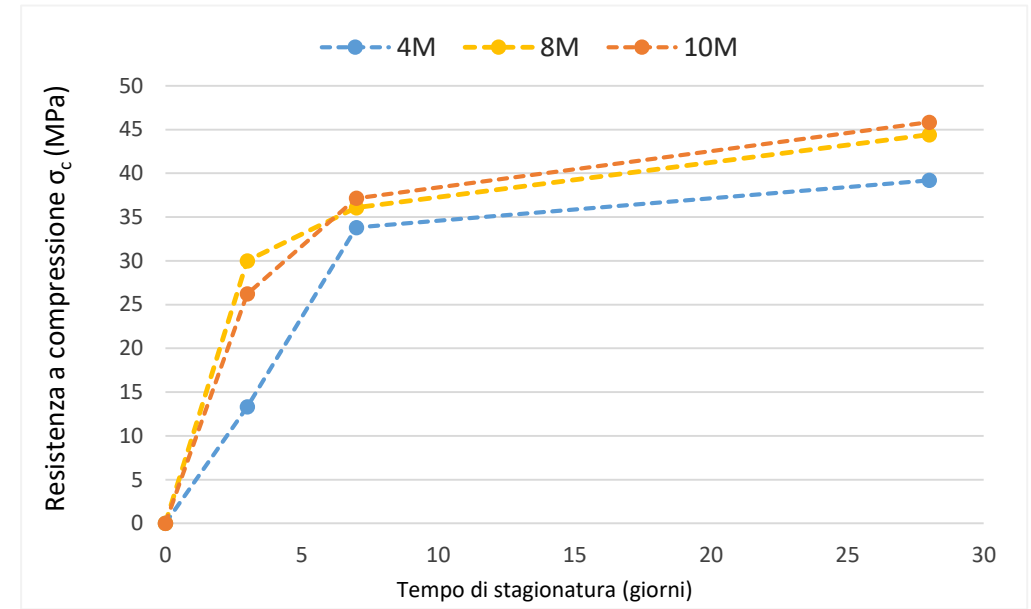
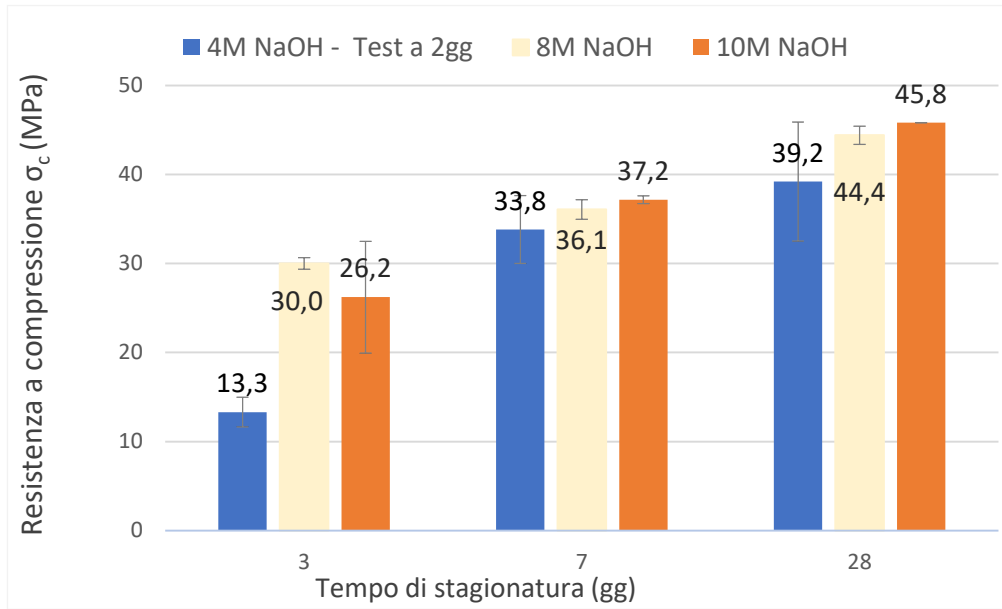
Materiali	Formulazione [kg/m ³]
GGBS	450.00
NaOH	33.80
Acqua	170.83
Silicato di sodio (SS) in soluzione	64.93
Aggregato fine 1 (0-4 mm)	683.0
Aggregato grosso ghiaia (4-15 mm)	956.0
TOT	2359
a/l	0.40

Formulazione con NaOH 4M

Materiali	Formulazione [kg/m ³]
GGBS 2 - LISG	450
NaOH	12.9
Acqua	170.83
Silicato di sodio in soluzione (SS)	64.93
Aggregati fini 1 (0-4 mm)	683
Aggregati grossolani ghiaia (4-15 mm)	956
TOT	2338
a/l	0.42

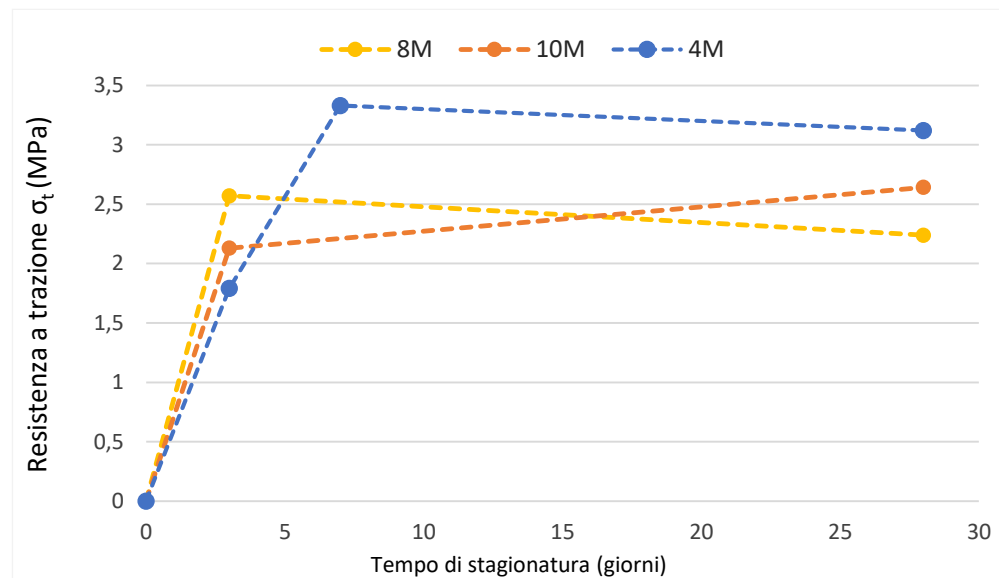
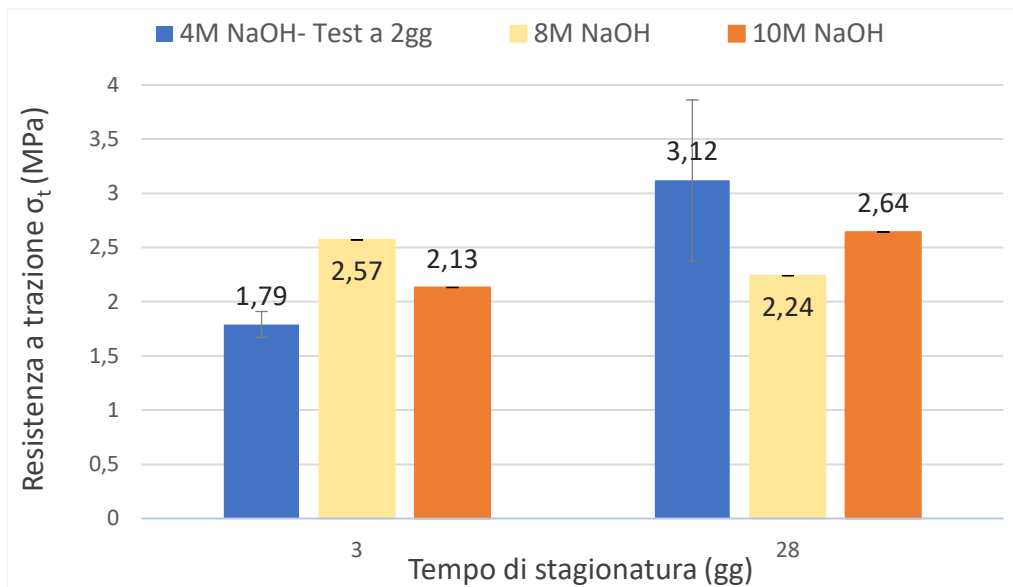


- Resistenza a compressione

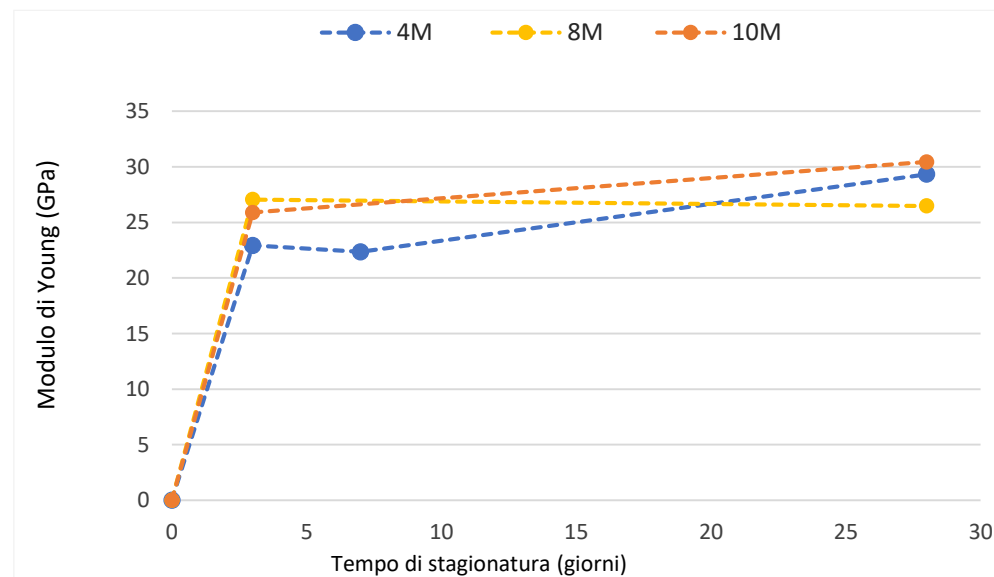
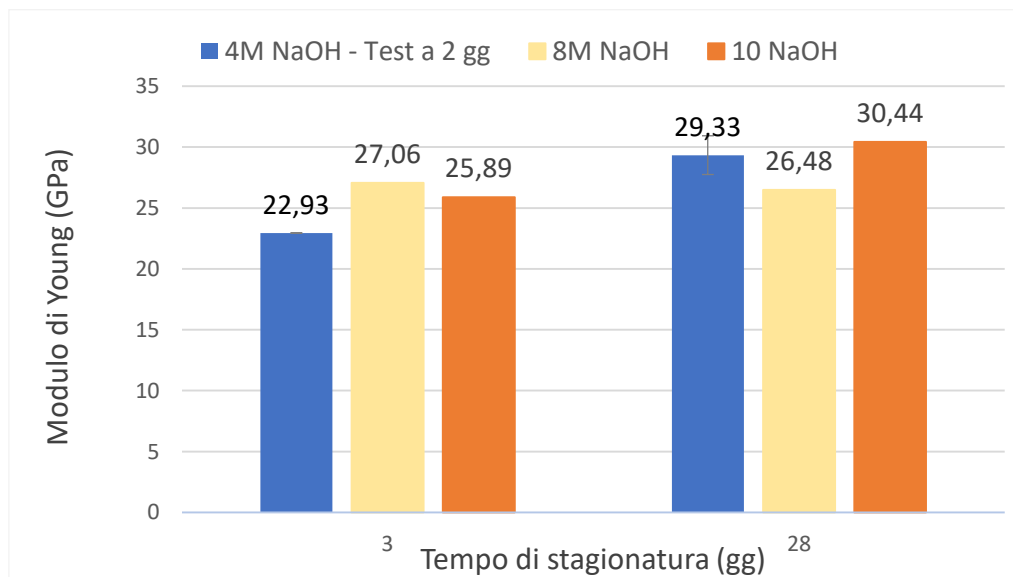


Confronto risultati ottenuti con i dati di un calcestruzzo geopolimerico con 4M NaOH

- Resistenza a trazione



- Modulo elastico



Deformazioni da ritiro



Misurazione ritiro legante geopolimerico

Sono state condotte indagini sperimentali al fine di valutare il ritiro dei leganti geopolimerici in condizioni autogene e di essiccamento (ASTM C490).

1. *Ritiro per essiccamento:*

Scambio igrometrico con ambiente esterno consentito



Prismi: 25 x 25 x 250 mm

2. *Ritiro autogeno:*

Scambio igrometrico con ambiente esterno impedito
mediante applicazione foglio di alluminio

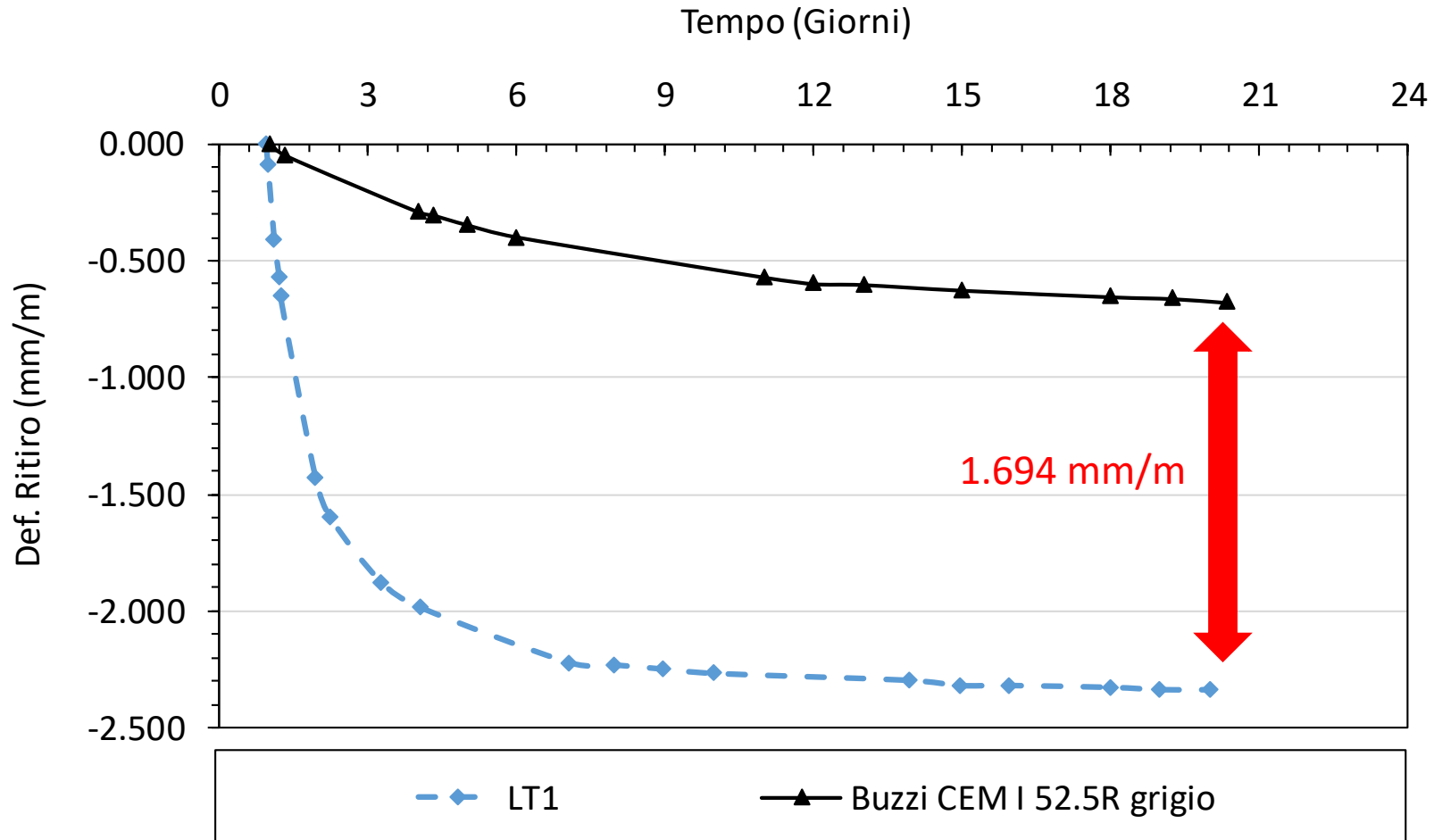


Prismi: 25 x 25 x 250 mm

La prova consiste nel misurare nel tempo la variazione di lunghezza longitudinale dei campioni mediante l'utilizzo di comparatore digitale (distanza tra i pioli in acciaio posti alle estremità dei campioni)

Misurazione ritiro legante geopolimerico

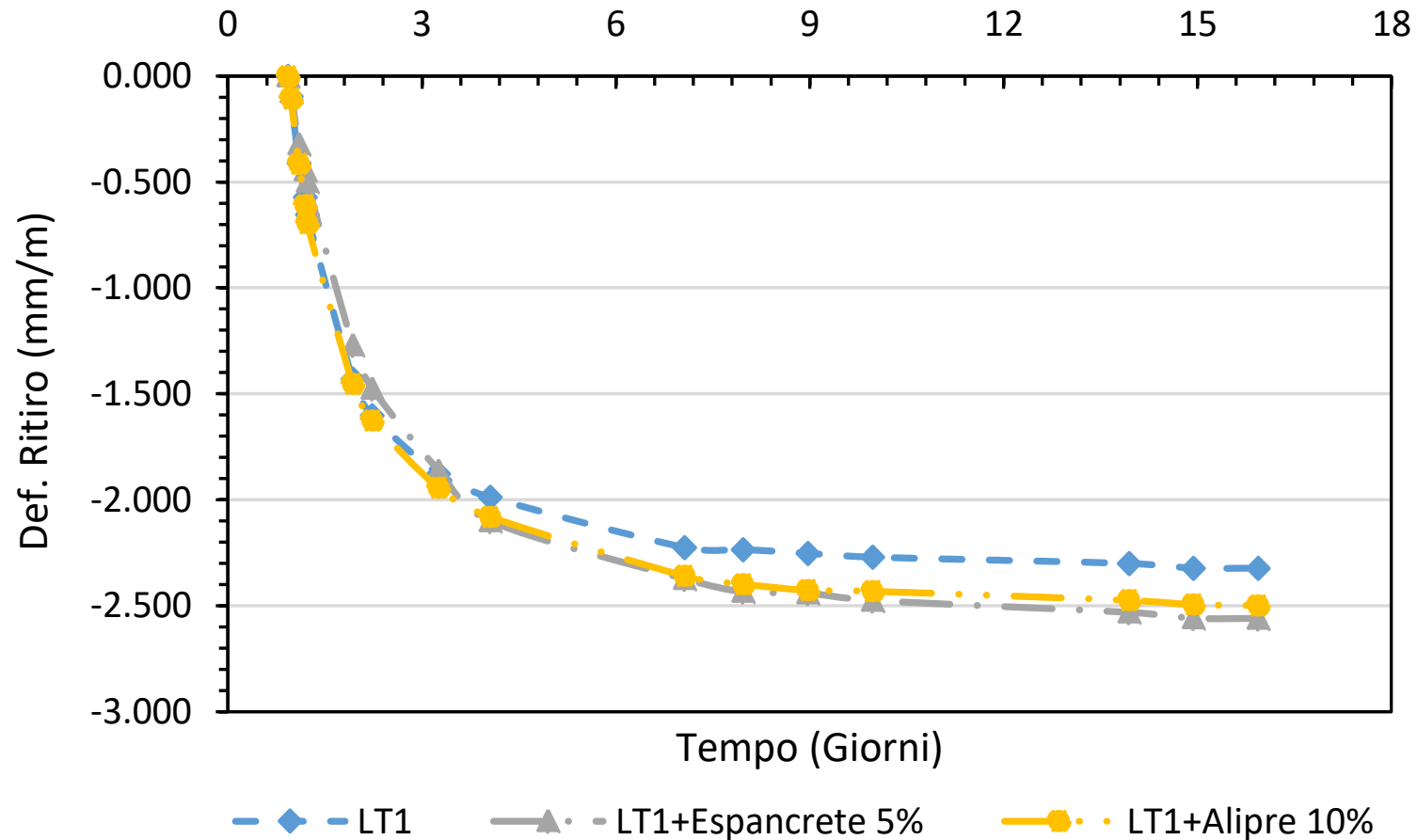
Valutazione delle deformazioni da ritiro per essiccamento: elevati valori di ritiro per essiccamento per il legante geopolimerico (più di tre volte rispetto ai valori misurati per una miscela di confronto realizzata con cemento CEM I 52.5R grigio)



Misurazione ritiro legante geopolimerico

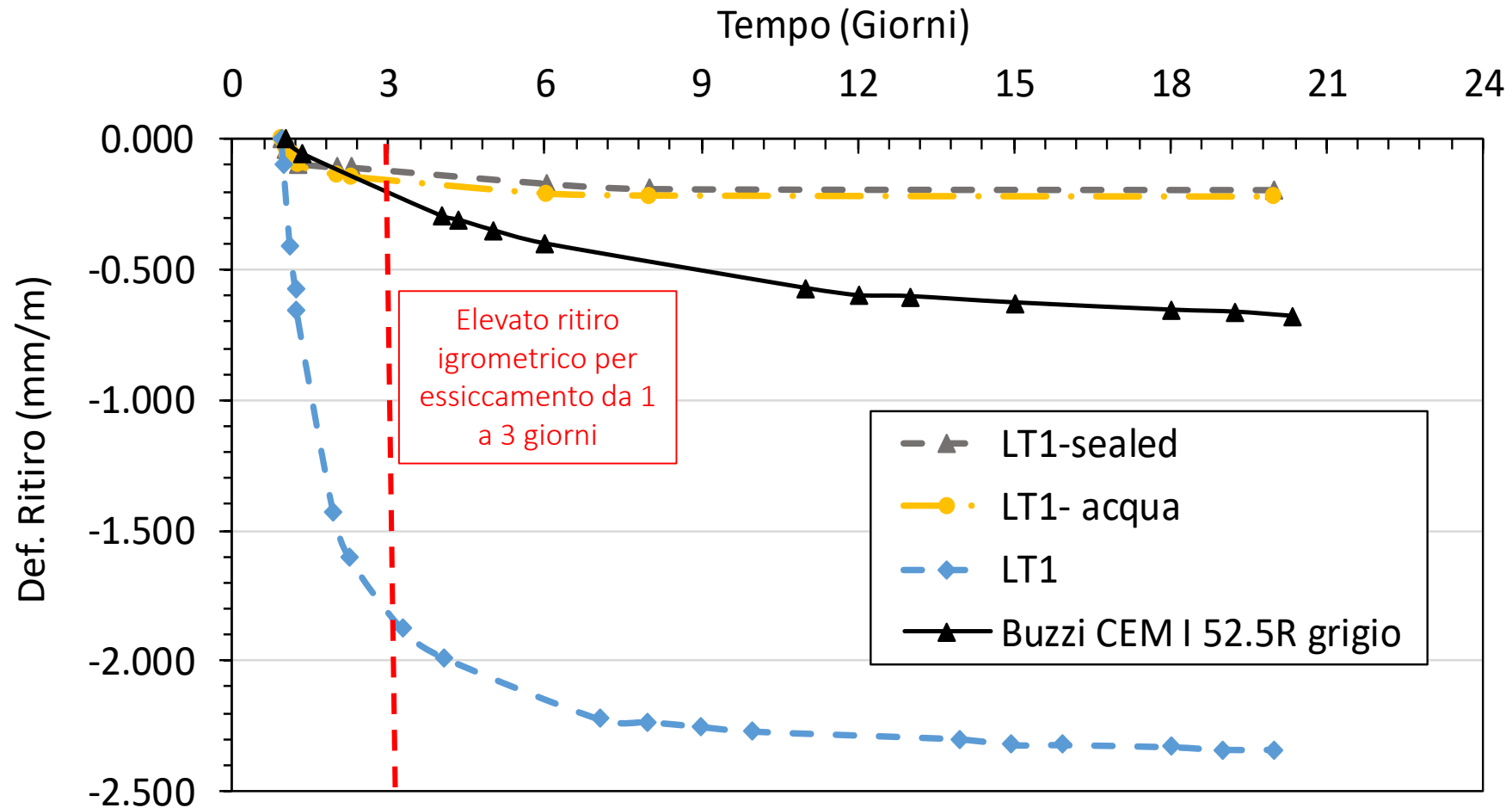
Effetto agenti espansivi nei confronti delle deformazioni da ritiro per essiccamento: realizzate miscele geopolimeriche impiegando sia additivi espansivi (Espacrete) che cementi a base di calcio solfoalluminato (Alipre).

Agenti espansivi non efficaci.

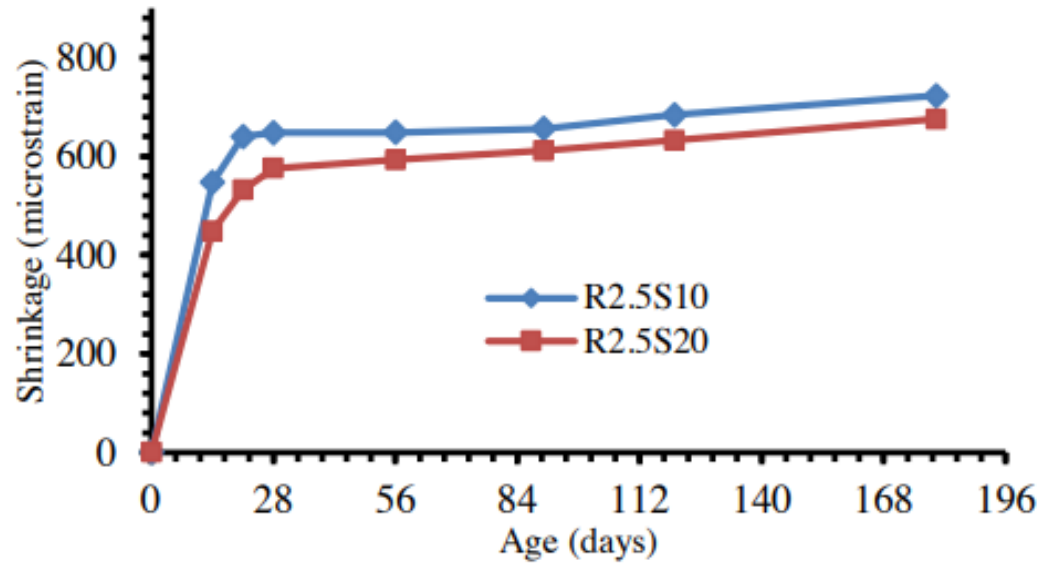


Misurazione ritiro legante geopolimerico

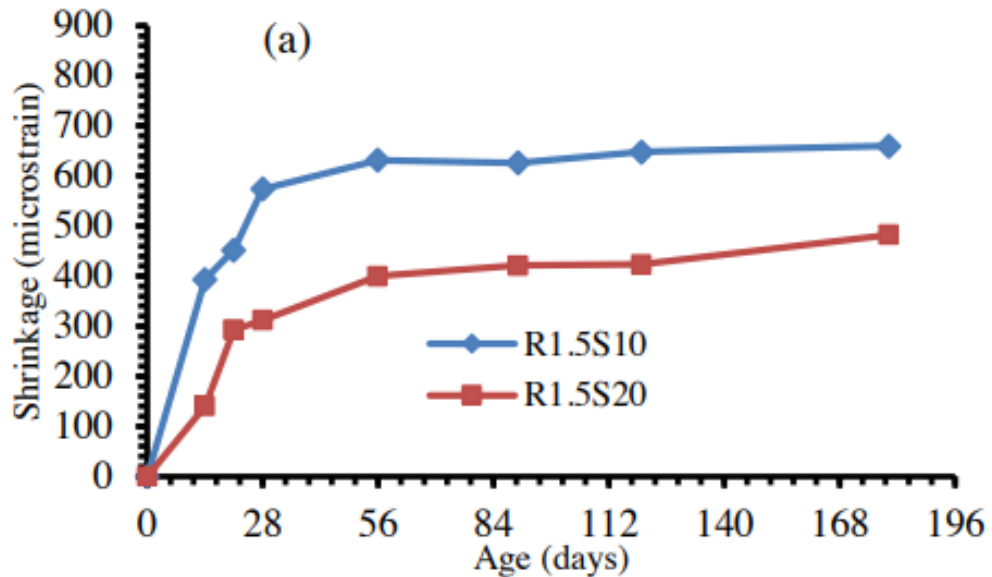
Confronto sperimentale: deformazioni ritiro autogeno – essiccamento: prescrizioni sul tempo minimo di stagionatura per i leganti geopolimerici al fine di ridurre le deformazioni da ritiro per essiccamento (**Tempo minimo cura: 3 giorni**)



RITIRO E VISCOSITA' CALCESTRUZZI GEOPOLIMERICI - LETTERATURA

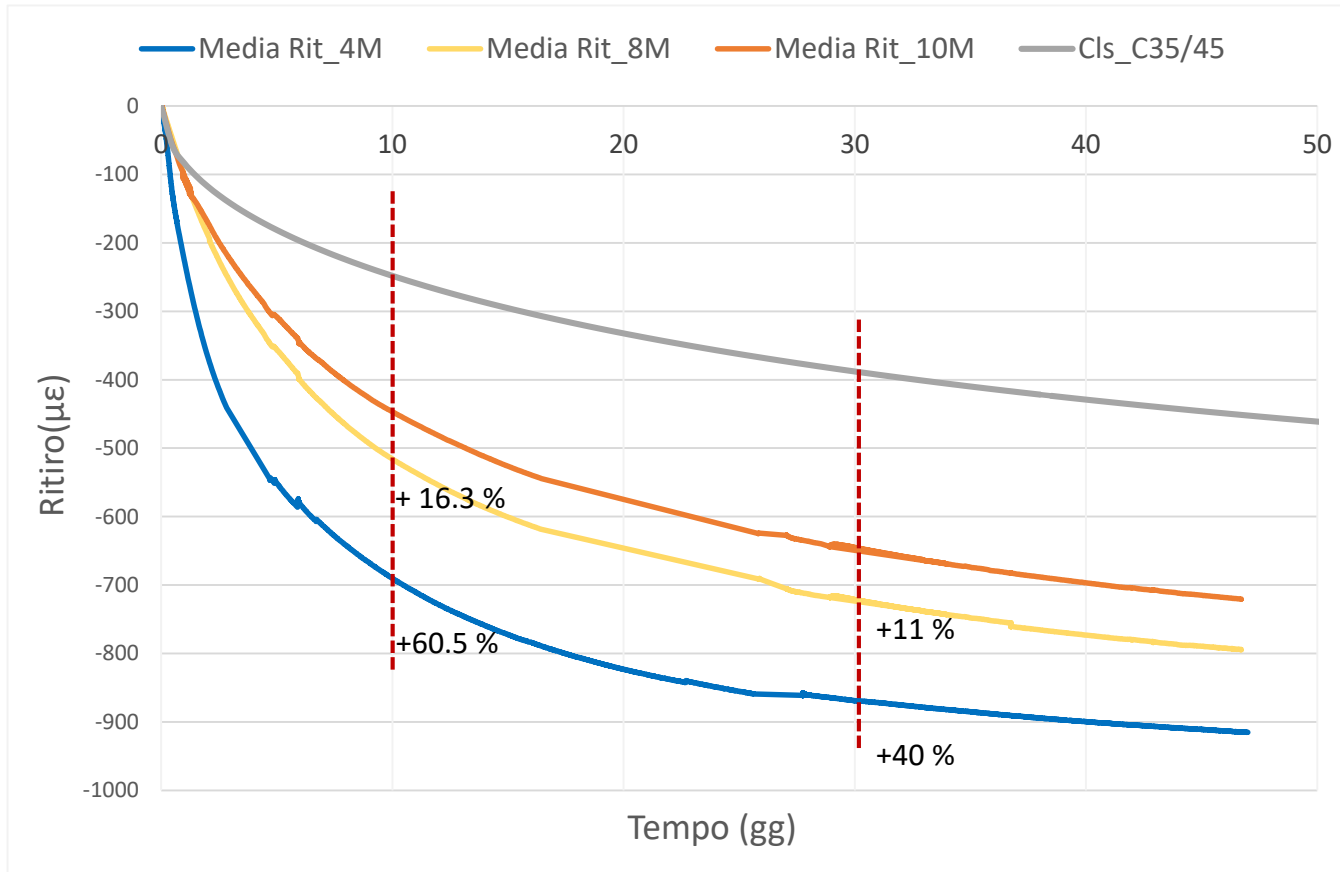


R2.5S10	GPC con rapporto SS/SH=2.5 e con contenuto di scorie del 10%
R2.5S20	GPC con rapporto SS/SH=2.5 e con contenuto di scorie del 20%



R1.5S10	GPC con rapporto SS/SH=1.5 e contenuto di scorie del 10%
R1.5S20	GPC con rapporto SS/SH=1.5 e con contenuto di scorie del 20%

- Ritiro



Le minori deformazioni da ritiro sono relative a campioni caratterizzato da una molarità maggiore.



Aumenta il rapporto $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, aumenta anche la deformazione da ritiro;

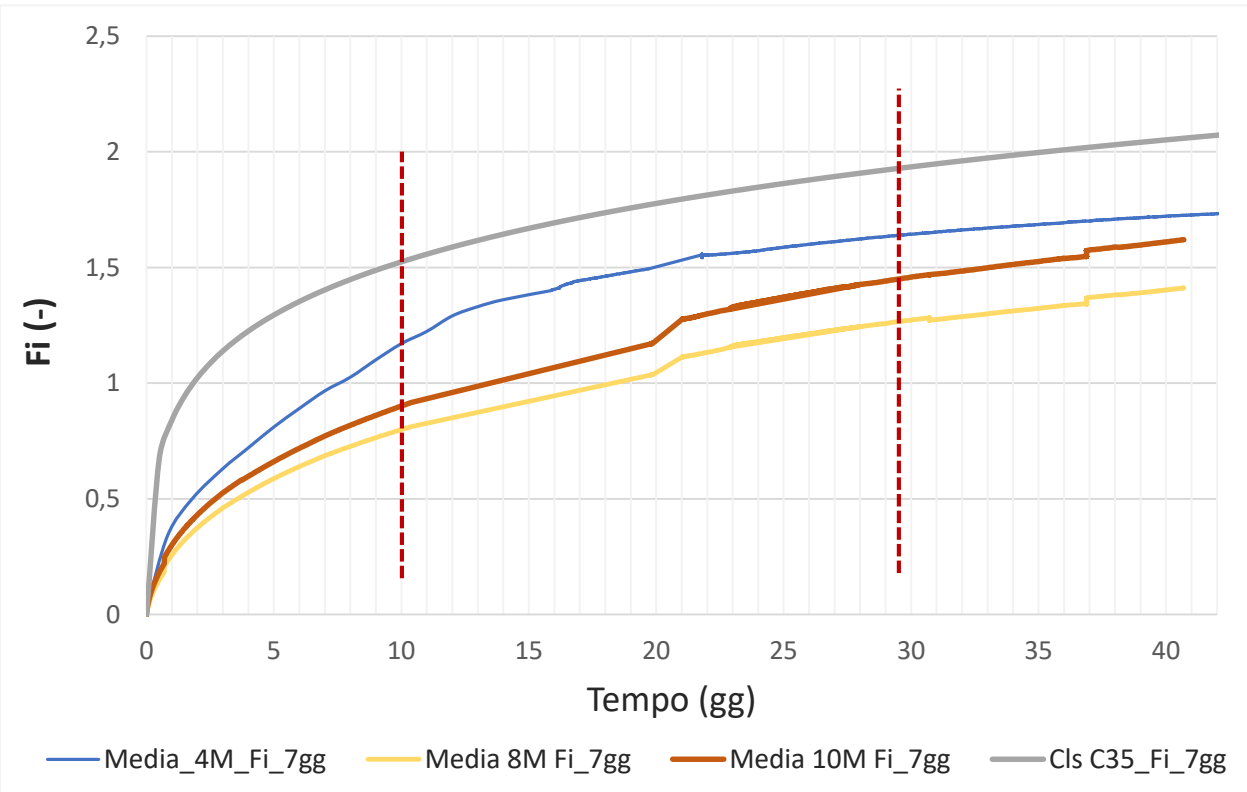
- Mix 4M $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 5$
- Mix 8M $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.4$
- Mix 10M $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.9$

Viscosità



Confronto risultati ottenuti

- Viscosità 7 giorni



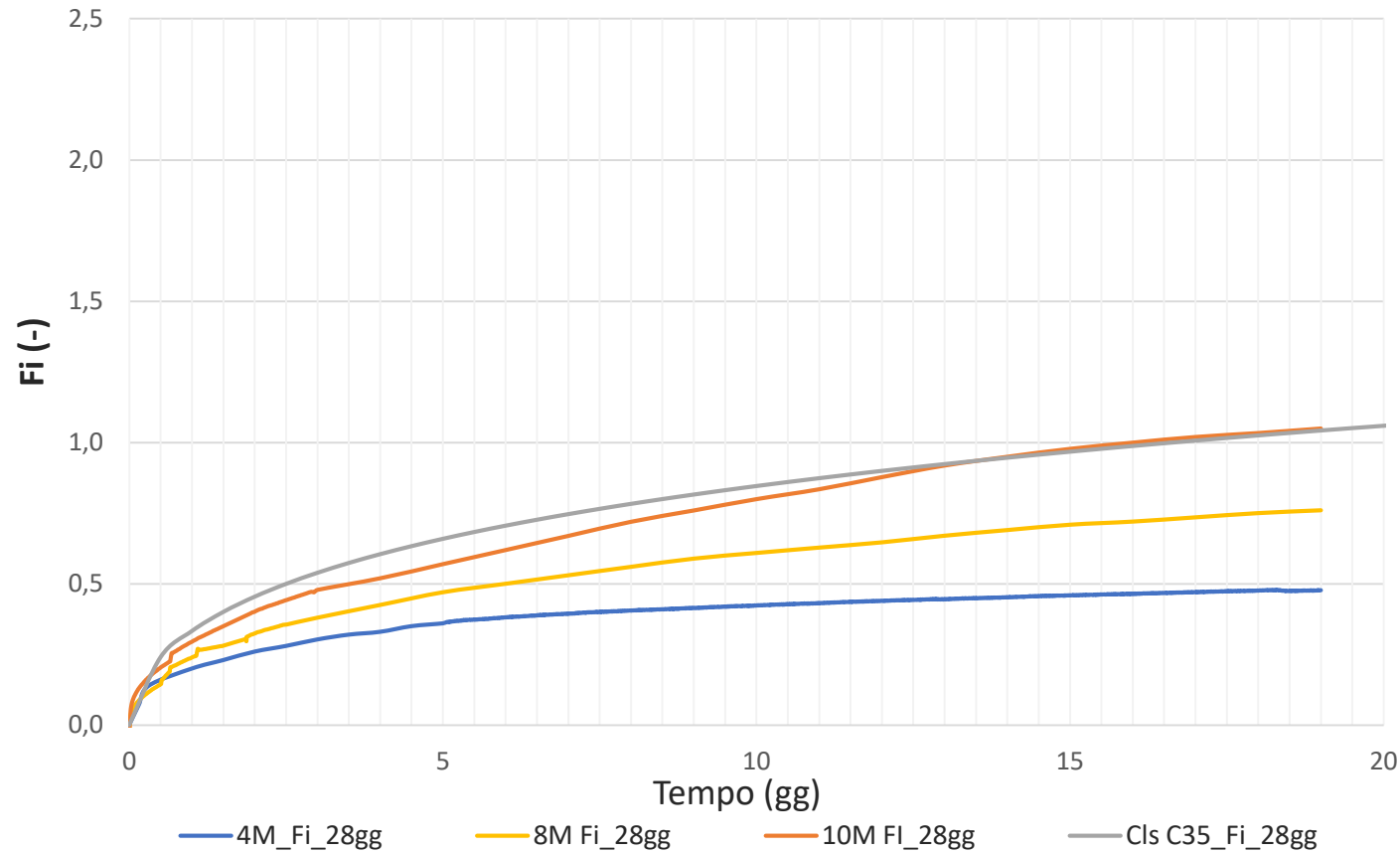
I Mix 8M e 10M presentano proprietà comparabili.

Nella fase iniziale si nota che il 4M risulta essere più viscoso in linea con le proprietà meccaniche ottenute nei primi giorni di stagionatura..

Le previsioni da norma per un calcestruzzo C35/45 mostrano un incremento più rapido durante i primi giorni e poi un valore che si mantiene con un incremento medio di 25 % più alto.



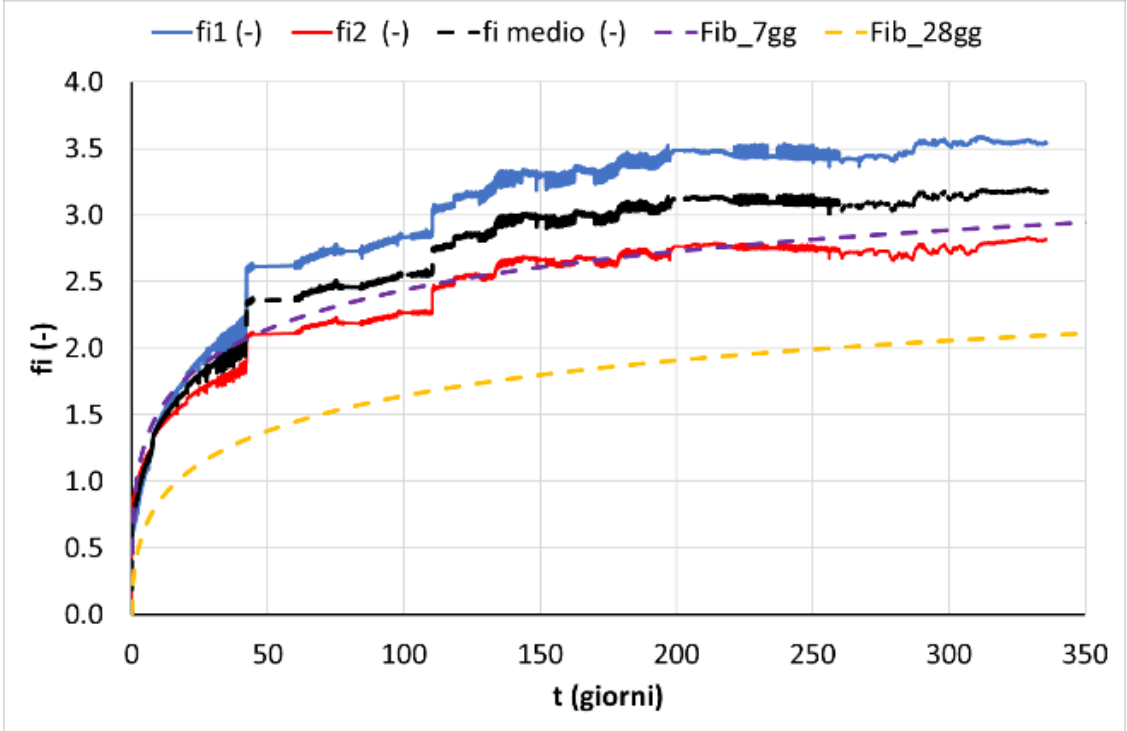
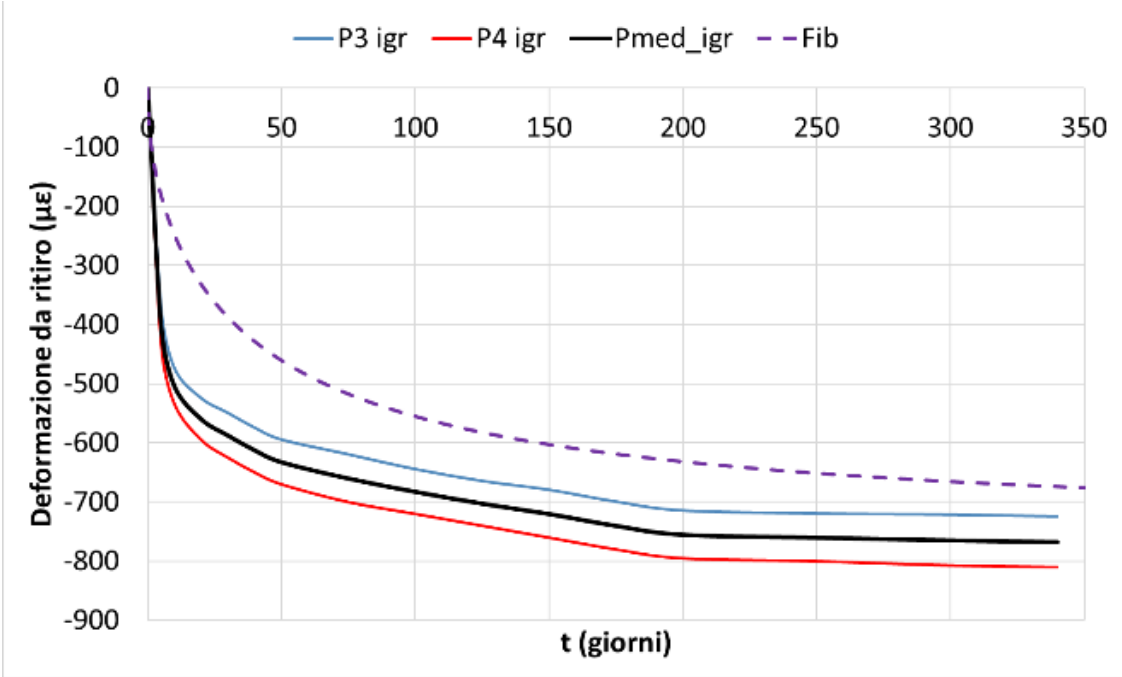
- Viscosità 28 giorni



I valori ottenuti si riferiscono ai primi 20 giorni dall'inizio della prova, quindi dai trend preliminari si nota che il mix 4M presenta le deformazioni inferiori.

Nel tempo potrebbe essere che anche il calcestruzzo meno molare riesce a reagire di più, dando proprietà differite più ridotte.

RITIRO E VISCOSITA'





Rete dei Laboratori Universitari
di Ingegneria Sismica e Strutturale



PROMOSSA DA
6 / 13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

Bologna, 9-11 ottobre 2024

Calcestruzzi Innovativi a basso impatto ambientale
Prof Ing Claudio Mazzotti – UNIBO