



POLITECNICO
MILANO 1863

Convegno "Durabilità e sostenibilità dei materiali cementizi"
Progettare materiali cementizi sostenibili e durevoli: i calcestruzzi speciali

Elena Redaelli

9 ottobre 2024

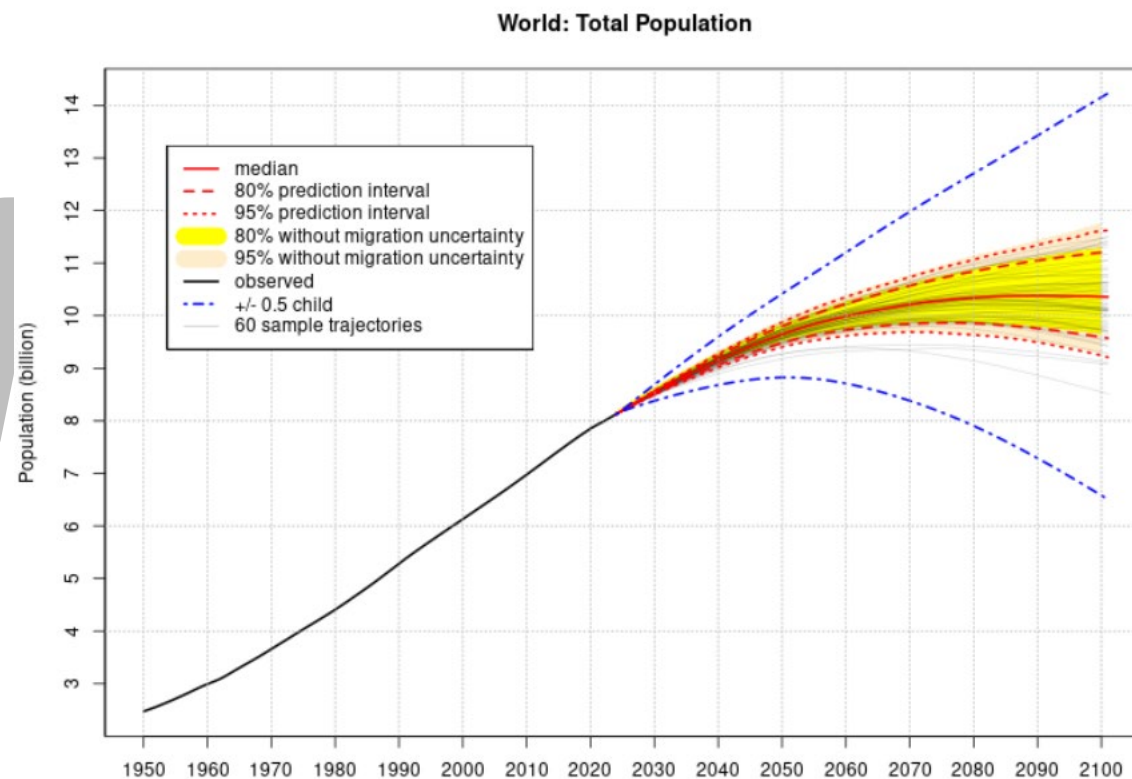
Il calcestruzzo: un materiale da costruzione indispensabile

Il calcestruzzo è un materiale economico, versatile, disponibile praticamente ovunque.

Nel 2020 il consumo globale di calcestruzzo è stato di **14 miliardi di m³** (in Italia **30 milioni di m³**).

Oggi il calcestruzzo affronta la sfida di continuare a sostenere la **crescita** e l'**urbanizzazione** della popolazione mondiale nei prossimi decenni, riducendo le emissioni di CO₂.

Stime di crescita della popolazione mondiale

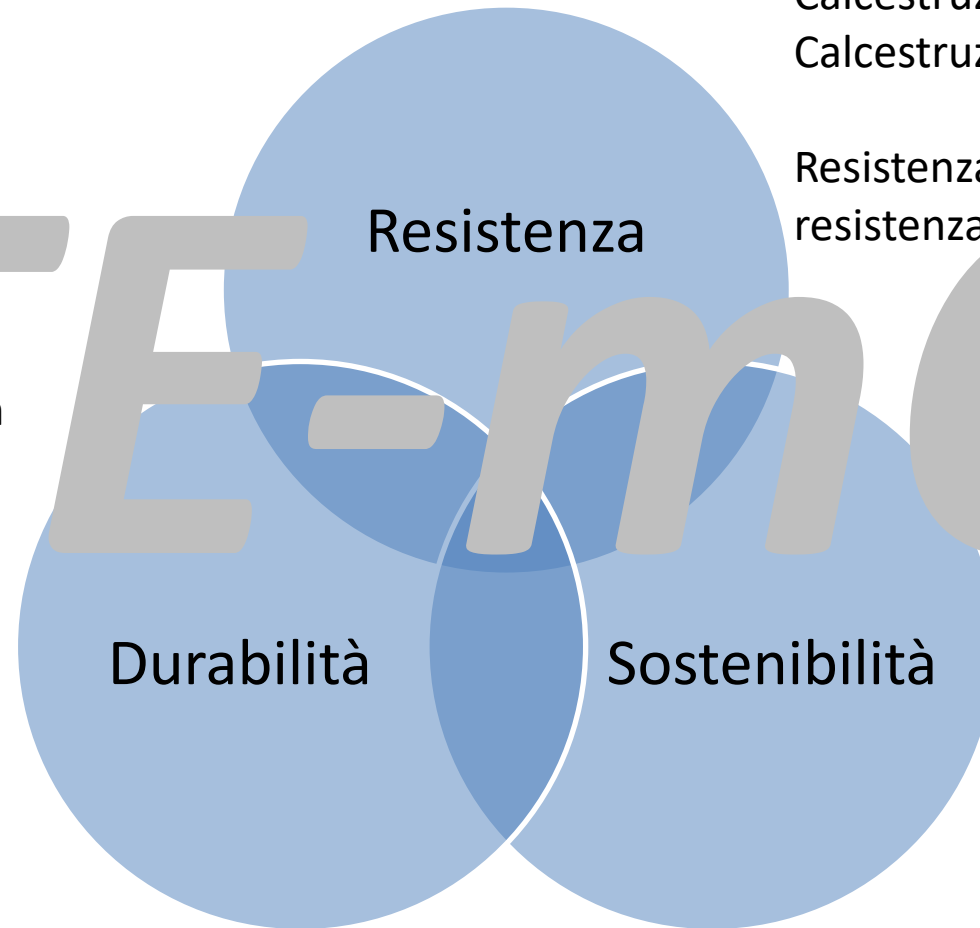


Il Sole 24 Ore.

Degrado del calcestruzzo (attacco solfatico, gelo-disgelo, reazione con aggregati reattivi, attacco acido, ...)

Corrosione delle armature (**carbonatazione** e penetrazione di **cloruri**)

Progetto della durabilità



Calcestruzzi ordinari: $R_c = 30-60 \text{ MPa}$

Calcestruzzi ad alte prestazioni: $R_c = 80-200 \text{ MPa}$

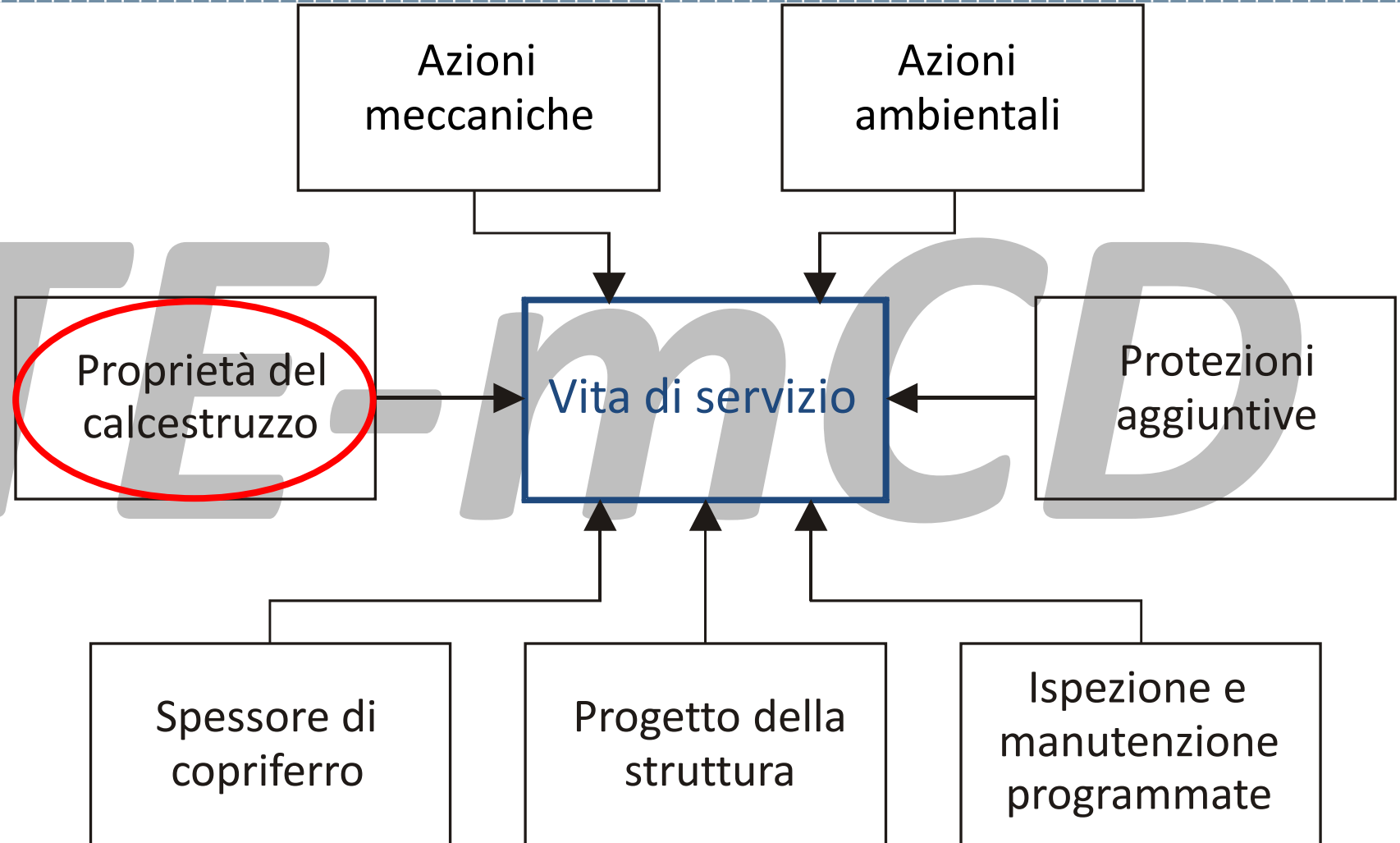
Resistenza a flessione e **trazione**, **tenacità**, resistenza all'impatto, ...

Le **3R**:

- ridurre il clinker nel cemento
- ridurre il cemento nel calcestruzzo
- ridurre il calcestruzzo nelle costruzioni

Progetto della durabilità: fattori

- allo stato fresco
- allo stato indurito



Le prescrizioni sul calcestruzzo vengono formulate a **prestazione garantita** oppure a **composizione prescritta**.

Le prescrizioni minime consistono in:

- classe di resistenza;
- classe di consistenza;
- classe di esposizione;
- diametro massimo dell'aggregato.

C30/37

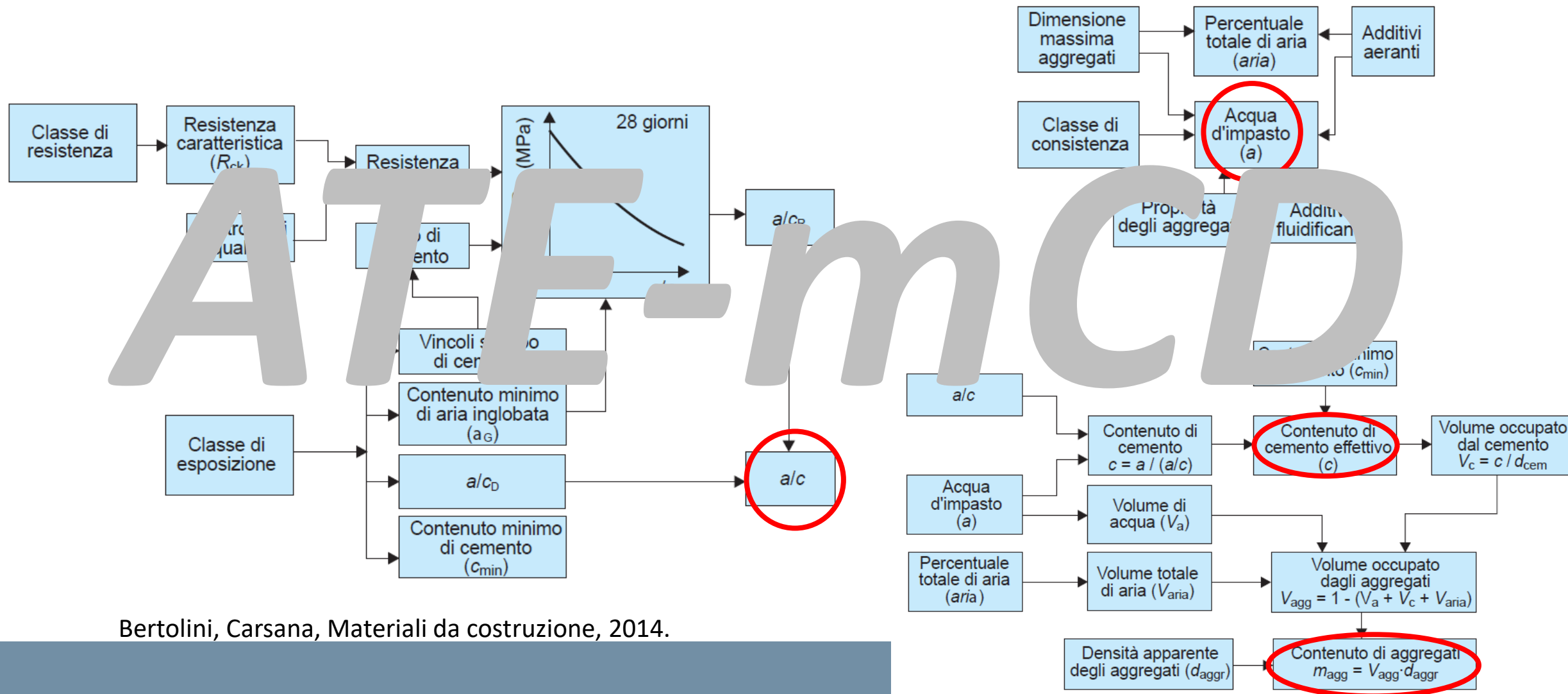
S4

XC1

$D_{max} = 25 \text{ mm}$

La scelta del tipo e del dosaggio di ingredienti è il risultato del **mix design**.

Progetto della miscela (*mix design*)



Bertolini, Carsana, Materiali da costruzione, 2014.

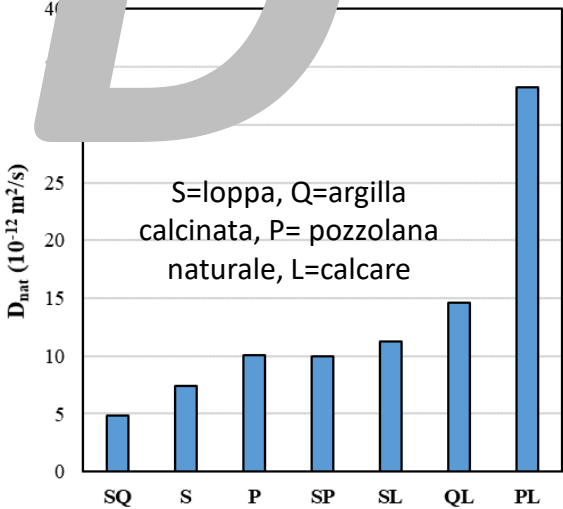
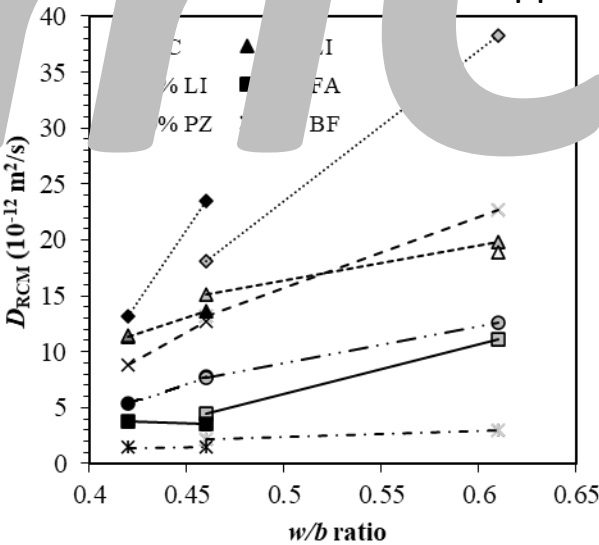
Scelta del tipo di cemento

- CEM I: Portland
- CEM II: Portland con aggiunte (S, D, P, Q, V, W, L)
- CEM III: D’altoforno (S)
- CEM IV: Pozzolanico (D, P, Q, V, W)
- CEM V: Composito (S, P, Q, V)
- CEM VI: Composito (S, P, V, L)
- + classe di resistenza (+ resistenza ai solfati)



2024		
Tipo	tonnellate	%
I	1.924.085	10
II/A-L	6.461.658	33
IV/B-L	5.381.521	28
II/B-M	534.885	3
II/B-P	172.815	1
III/A	1.575.377	8
III/B	163.977	1
IV/A	2.353.290	12
IV/B	573.548	3
V/A	219.957	1
Totale Nazionale		19.361.115 100

Rapporto di filiera Federbeton, 2024.



Dosaggio minimo di cemento

Il dosaggio di cemento deve essere $\geq C_{\min}$. Questo non significa che aumentare il dosaggio di cemento si traduca in un calcestruzzo migliore.

Classe di esposizione		Descrizione (abbreviata)	Max. a/c	Min. resist. (MPa)	Min. cemento (kg/m ³)
1. Nessun rischio	X0	Molto secco	—	C12/15	—
2. Corrosione da carbonatazione	XC1	Secco o saturo	0.65	C20/25	260
	XC2	Umido, raram. secco	0.60	C25/30	280
	XC3	Moderatamente umido	0.55	C30/37	280
	XC4	Cicli asciutto-bagnato	0.50	C30/37	300
3. Corrosione da cloruri non da acqua di mare	XD1	Moderatamente umido	0.55	C30/37	300
	XD2	Umido, raram. secco	0.55	C30/37	300
	XD3	Cicli asciutto-bagnato	0.45	C35/45	320
4. Corrosione da cloruri da acqua di mare	XS1	Atmosfera marina	0.50	C30/37	300
	XS2	Sommerso	0.45	C35/45	320
	XS3	Zone spruzzi e maree	0.45	C35/45	340



Materials and Structures (2009) 42:973–982
DOI 10.1617/s11527-008-9436-0

ORIGINAL ARTICLE

Minimum cement content requirements: a must or a myth?

R. Wassermann · A. Katz · A. Bentur

- R_c dipende da a/c, non da c
- assorbimento d'acqua aumenta con c
- penetrazione di cloruri aumenta con c
- carbonatazione dipende da a/c, non da c

Le proprietà del calcestruzzo dipendono fortemente da diversi aspetti operativi, come per esempio:

- dosaggio e controllo degli ingredienti;
- miscelazione e trasporto;
- messa in opera;
- costipazione;
- stagionatura.



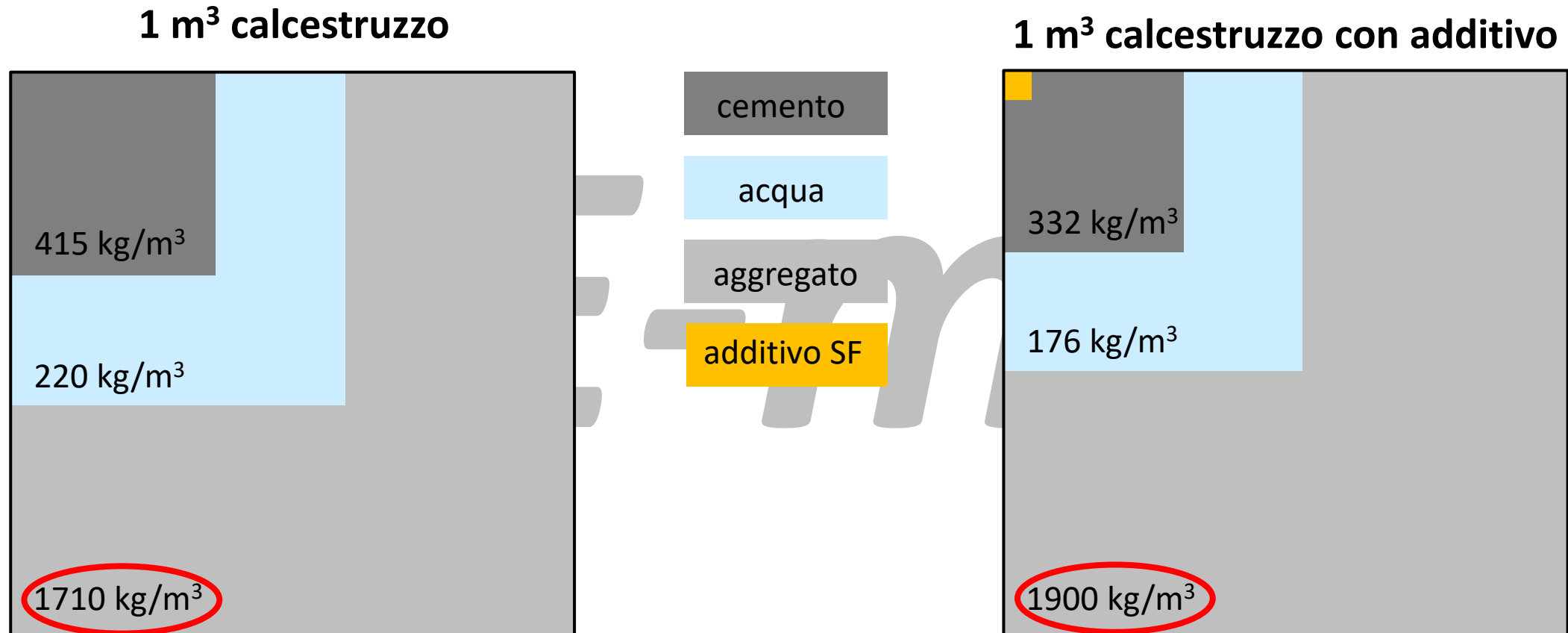
Gli additivi consentono di migliorare le proprietà allo stato fresco e indurito e ridurre l'incidenza di fattori quali le condizioni ambientali, la qualità della manodopera, lo sviluppo del calore di idratazione e il ritiro. Molti degli avanzamenti nella tecnologia del calcestruzzo sono avvenuti grazie allo sviluppo degli additivi.

Tra i più importanti vi sono gli additivi **fluidificanti** e **superfluidificanti**, usati per:

- aumentare la lavorabilità;
- diminuire a/c;
- ridurre il dosaggio di cemento a pari a/c.

Altri additivi: acceleranti, ritardanti, aeranti, ritentori d'acqua, modificatori di viscosità, espansivi, inibitori di corrosione, ...

Non dimentichiamo il bilancio volumetrico!



I calcestruzzi speciali differiscono da quelli ordinari per una o più delle seguenti caratteristiche:

- proprietà allo stato fresco e indurito;
- ingredienti (cemento, aggregati, additivi);
- mix design (prescrizioni);
- messa in opera.

Tra i principali vi sono:

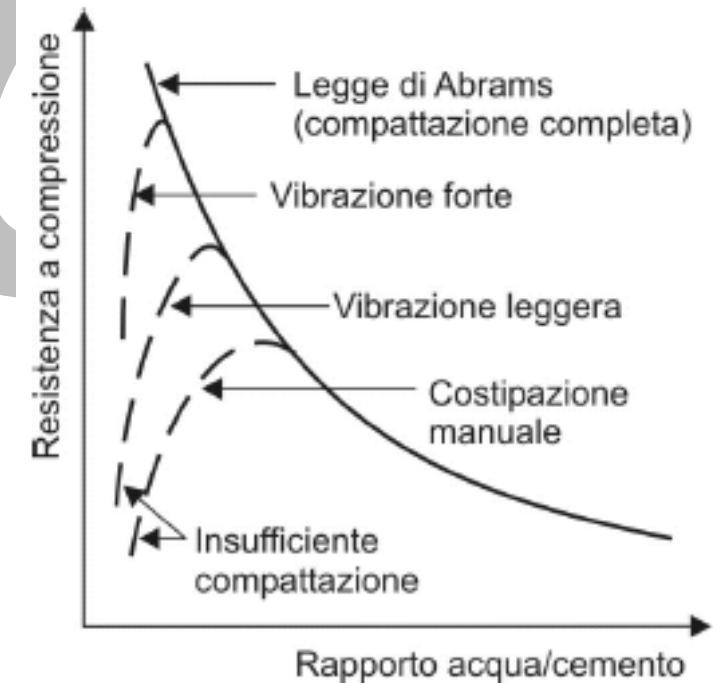
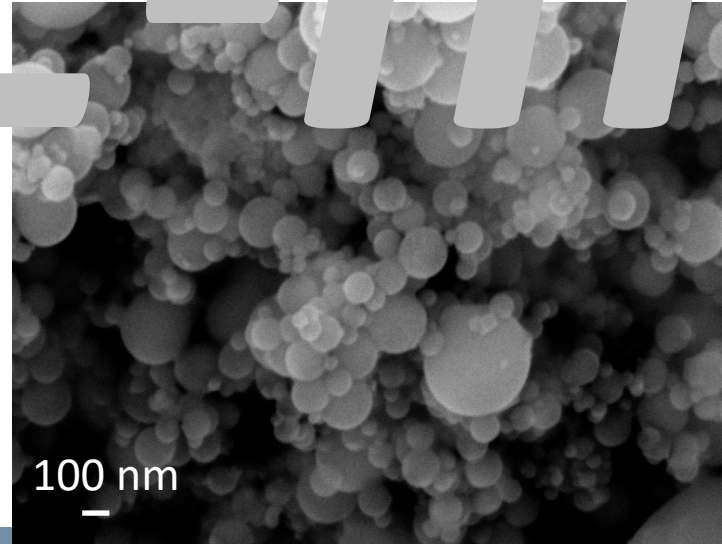
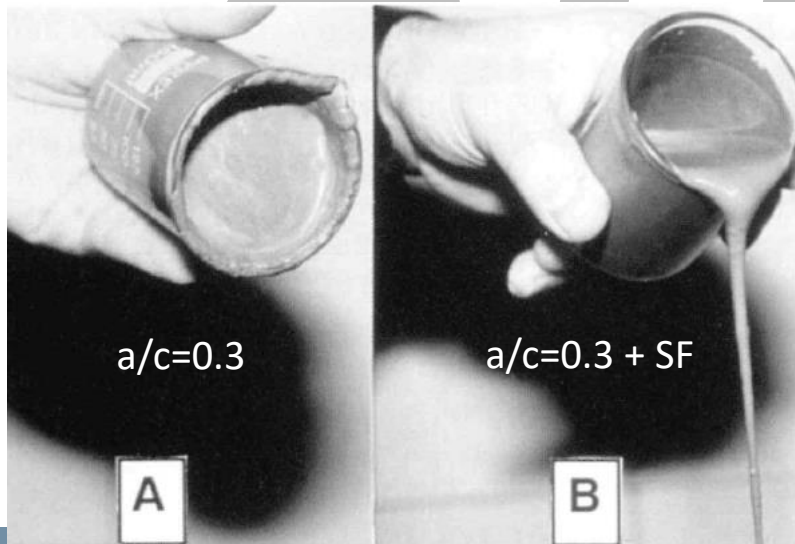
- calcestruzzi ad alte prestazioni → migliore resistenza meccanica;
- calcestruzzi fibrorinforzati → migliore tenacità e resistenza agli urti;
- calcestruzzi autocompattanti → migliore lavorabilità;
- calcestruzzi leggeri → minore densità;

(e loro combinazioni).

Calcestruzzi ad alte prestazioni (High-Performance Concrete, HPC)

Sono nati come calcestruzzi ad alta resistenza (High-Strength Concrete, HSC) e poi si sono evoluti in calcestruzzi HPC. Sono caratterizzati da:

- basso rapporto acqua/cemento ($< 0.3-0.4$), grazie ad additivi SF;
- uso di aggiunte minerali (tipicamente fumo di silice);
- uso di aggregati speciali (spesso con ridotto D_{max}).



L'affinamento della struttura dei pori, ottenuto grazie al basso a/c e all'effetto filler e pozzolanico del fumo di silice, si traduce in:

- alta resistenza a compressione ($R_c = 80-100$ MPa);
- elevata resistenza alla penetrazione di sostanze aggressive;
- elevato ritiro da auto-essiccamento.



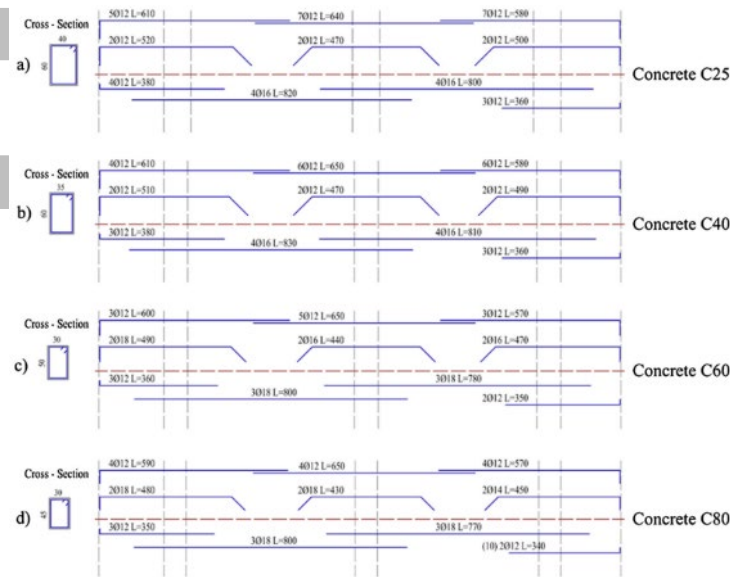
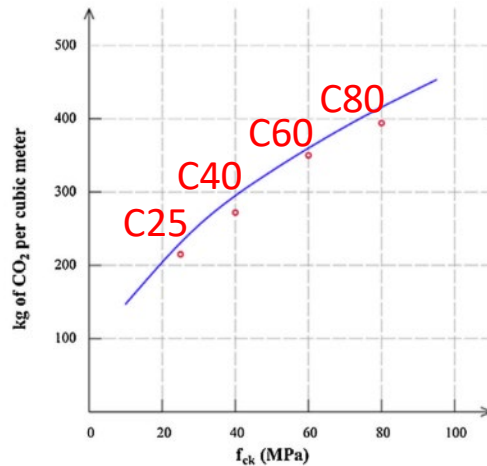
Tipiche composizioni dei calcestruzzi HPC

Miscela	A	B	C	D	E	F	G	H
Ingredienti (kg/m ³)								
- cemento portland	534	500	315	513	163	228	425	450
- fumo di silice	40	30	36	43	54	46	40	45
- ceneri volanti	59	-	-	-	-	-	-	-
- loppa d'altoforno	-	-	137	-	325	182	-	-
- aggregato fine	623	700	745	685	730	800	755	736
- aggregato grosso	1069	1100	1130	1080	1100	1110	1045	1118
- acqua totale	139	143	150	139	136	138	175	143
Rapporto acqua/legante	0.22	0.27	0.31	0.25	0.25	0.30	0.38	0.29
Slump (mm)	255	-	-	-	200	220	230	230
Resistenza su cilindro (MPa)								
- 1 giorno	-	-	-	-	13	19	-	35
- 2 giorni	-	-	-	65	-	-	-	-
- 7 giorni	-	-	67	91	72	62	-	68
- 28 giorni	-	93	83	119	114	105	95	111
- 56 giorni	124	-	-	-	-	-	-	-
- 3 mesi	-	107	93	145	126	121	105	-
- 1 anno	-	-	-	-	136	126	-	-

→ possono essere considerati «sostenibili»?

Caso di studio: NSC vs. HSC in edifici bassi e alti

- Confronto della CO₂ prodotta dai materiali usati per costruire edifici residenziali di diversa altezza, utilizzando calcestruzzi a normale resistenza (NSC, C25 e C40) e alta resistenza (HSC, C60 e C80)
- Progettazione strutturale FEM

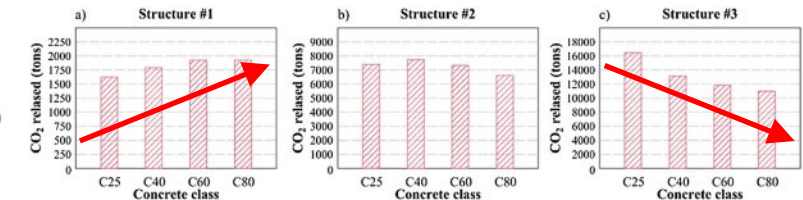
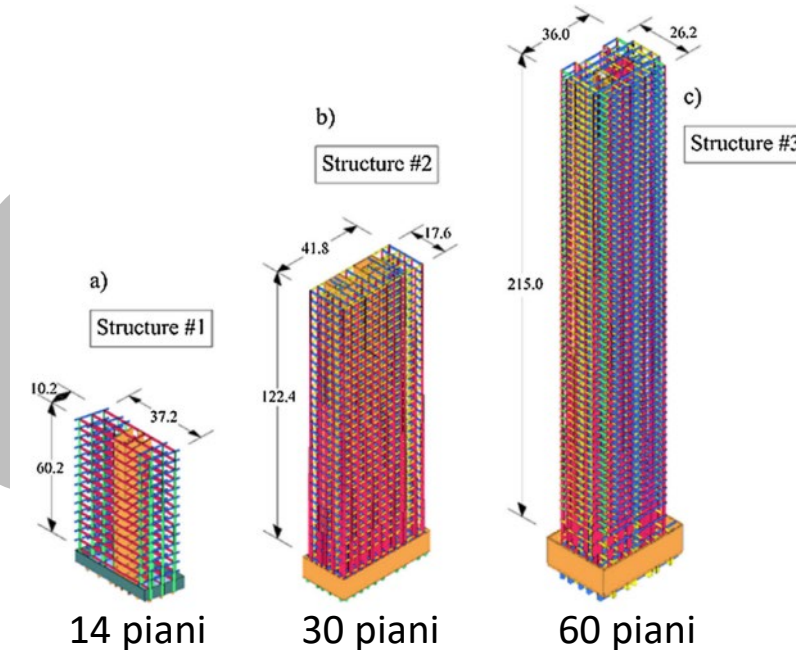


Case study

The carbon footprint of normal and high-strength concrete used in low-rise and high-rise buildings

A.P. Fantilli*, O. Mancinelli, B. Chiaia

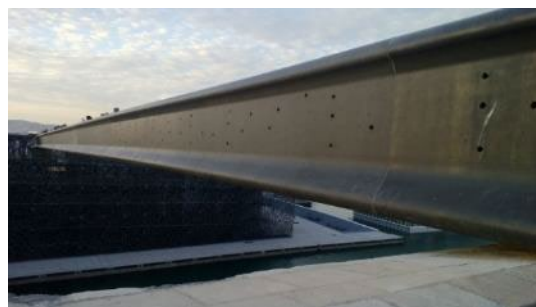
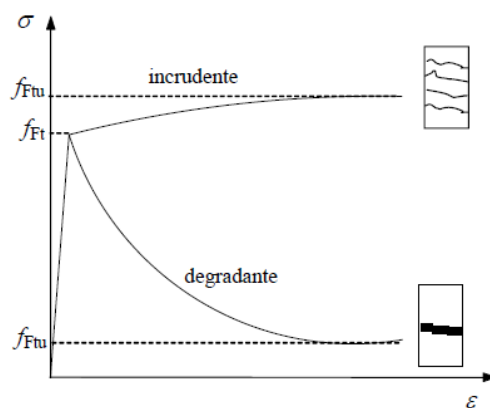
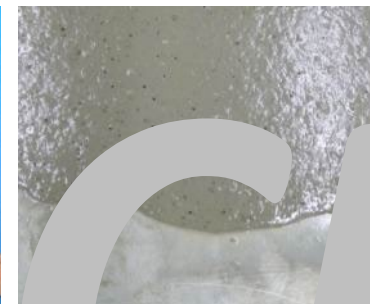
Poli Tecnico di Torino - DISEG, Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129, Torino, Italy



Calcestruzzi ad altissime prestazioni (UHPC e UHPFRC)

I calcestruzzi UHPFRC sono materiali ad altissime prestazioni caratterizzati da:

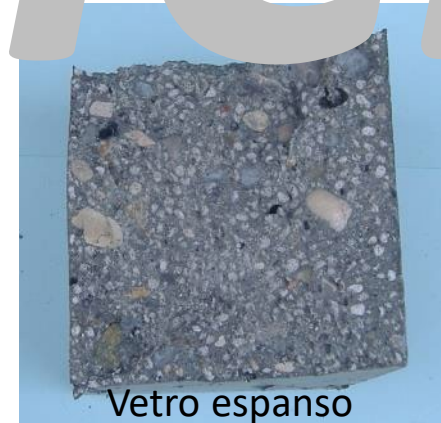
- rapporto acqua/legante ≤ 0.2 ;
- aggiunte minerali (fumo di silice);
- resistenza a compressione > 120 MPa;
- aggiunta di fibre metalliche;
- comportamento auto-compattante e auto-riparante.



Calcestruzzi leggeri (Light-Weight Concrete, LWC)

Sono calcestruzzi con densità compresa tra 200 kg/m^3 e 2000 kg/m^3 (calcestruzzi ordinari hanno invece densità di $2300\text{-}2400 \text{ kg/m}^3$). La bassa densità può essere ottenuta:

- con additivi schiumogeni (calcestruzzi cellulari);
- con aggregati grossi (no-fines concrete o calcestruzzi alveolari);
- con aggregati leggeri (calcestruzzi alleggeriti).



Carsana, RACTSI, 2021.

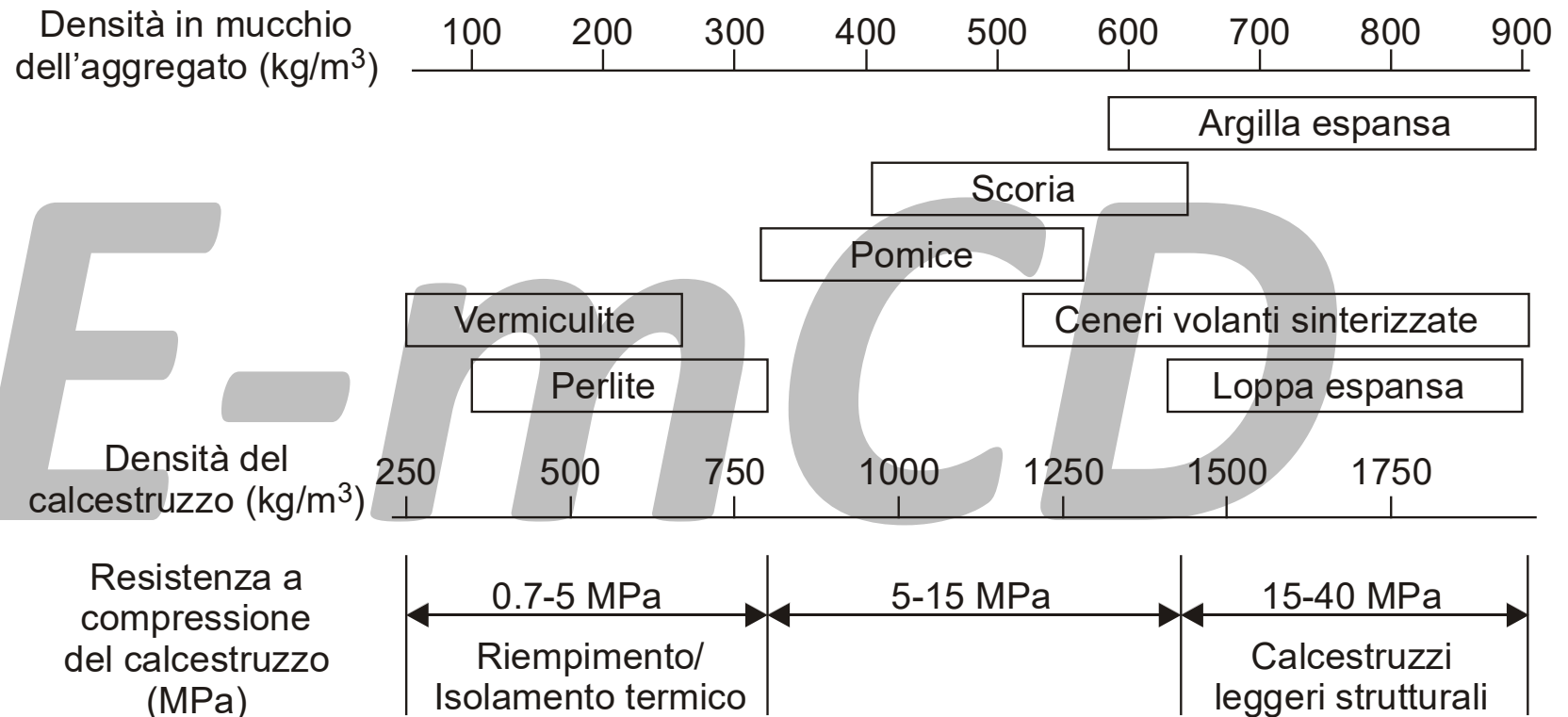
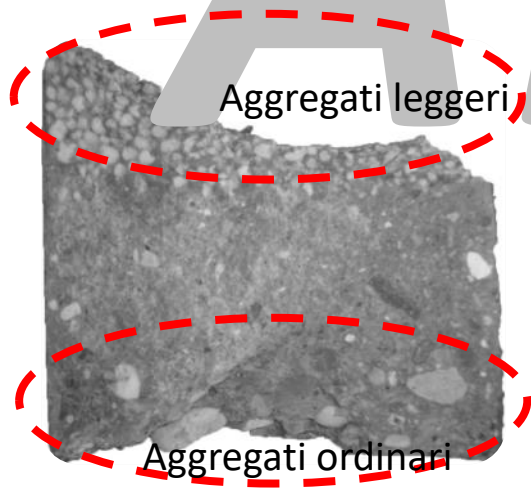
Carsana et al., ACI Mat

J, 2017. **POLITECNICO MILANO 1863**

Proprietà e applicazioni dei calcestruzzi LWC

Possibili limitazioni:

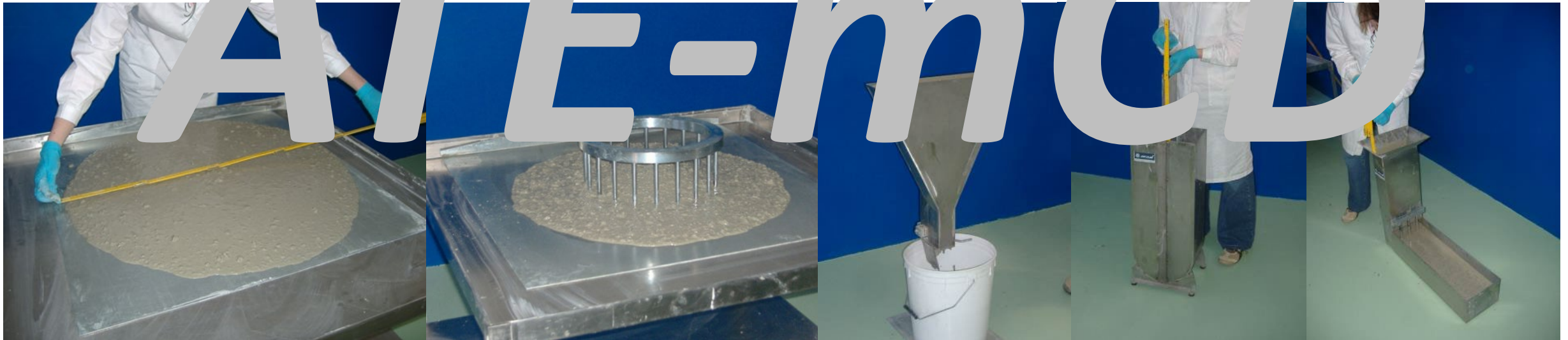
- assorbimento d'acqua;
- segregazione da galleggiamento;
- durabilità???



Calcestruzzi autocompattanti (Self-Compacting Concrete, SCC)

Sono calcestruzzi con altissima lavorabilità ($> S5$), combinata con elevata resistenza alla segregazione. Hanno elevata mobilità anche in spazi ristretti e non necessitano di compattazione.

Prove e classi di lavorabilità specifiche.



Slump flow

J-ring

V-funnel

U-box

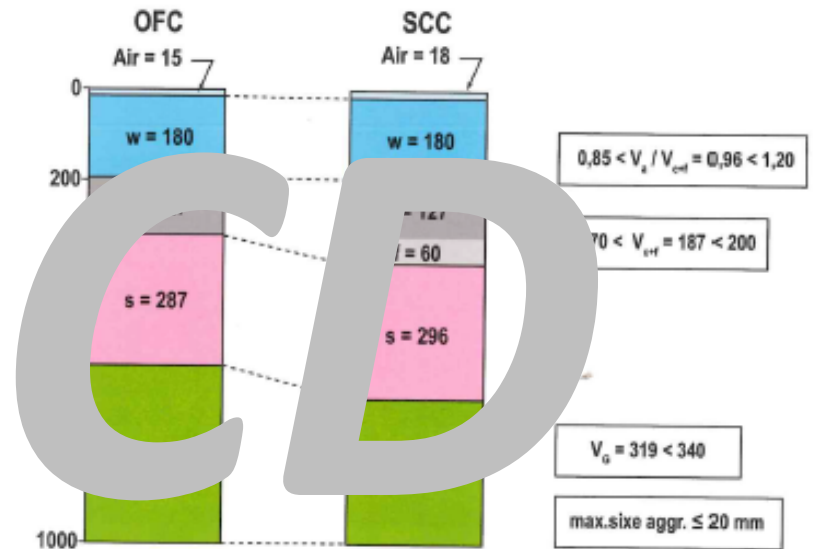
L-box

Composizione e proprietà dei calcestruzzi SCC

- elevato rapporto $V_{\text{matrice}}/V_{\text{aggregato}}$
- ridotto volume e D_{max} aggregato ($< 20 \text{ mm}$)
- aggiunta di fini (calcare macinato)
- additivo superfluidificante e modificatore di viscosità



Collepari, The new concrete, 2006.



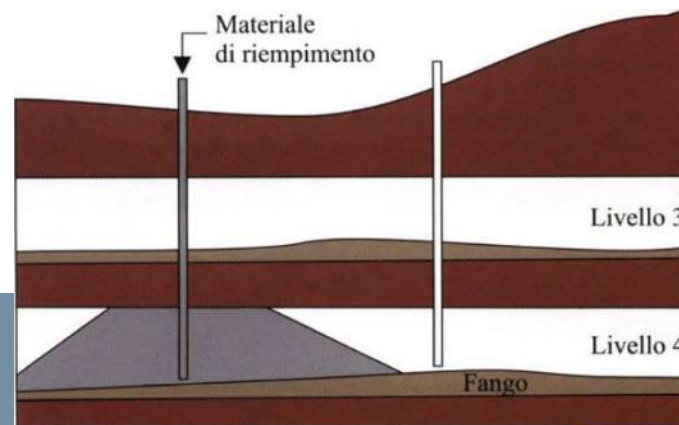
Collepari, The new concrete, 2006.

Caso di studio: Ex miniere di gesso di Santa Brigida (BG)

Rischio di dissesto idrogeologico

Requisiti del materiale di riempimento:

- accessibilità solo dall'esterno (presenza all'interno di acqua e fango);
- allagamento delle gallerie con acque contenenti solfati;
- proprietà meccaniche paragonabili a quelle di un terreno;
- miscela colabile;
- volumi di riempimento elevati;
- costi ridotti.

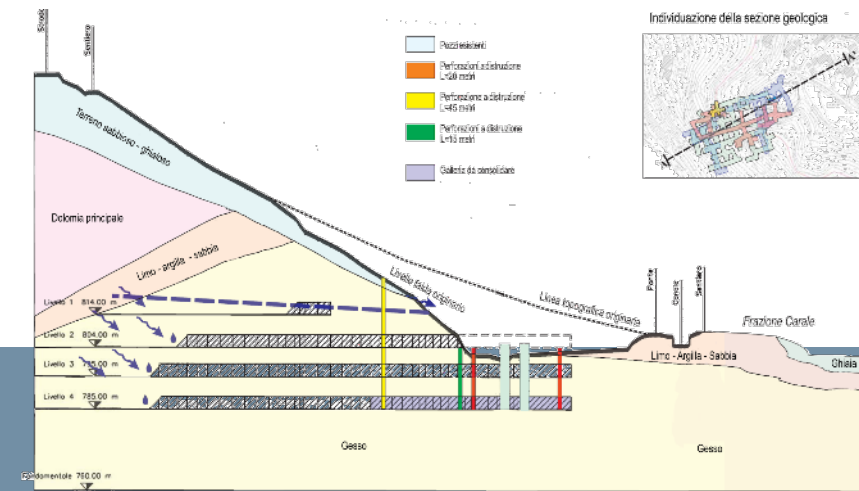
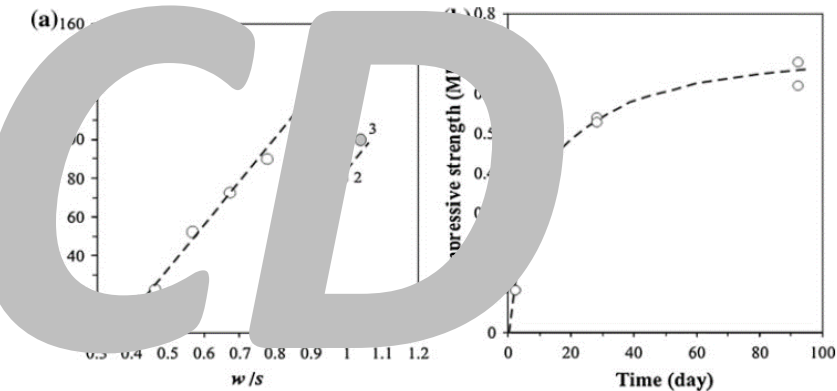
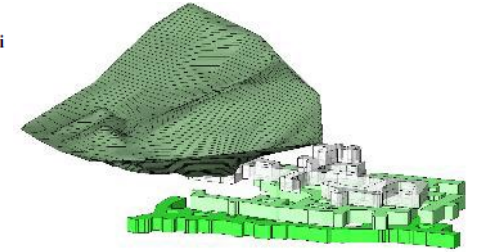


Materials and Structures (2012) 45:53–65
DOI 10.1617/s11527-011-9748-3

ORIGINAL ARTICLE

Fluidized soil–cement mixes for backfilling of flooded cavities

Maddalena Carsana · Luca Bertolini



Grazie dell'attenzione!

elena.redaelli@polimi.it



ASSOCIAZIONE
TECNOLOGI
PER L'EDILIZIA

