



POLITECNICO
MILANO 1863

Corsi di Formazione ATE-mCD – La durabilità del calcestruzzo - 9 ottobre 2025
Sviluppi nella produzione del calcestruzzo: nuovi tipi di leganti, aggregati e acque di riciclo
Federica Lollini



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE
TECNOLOGI
PER L'EDILIZIA

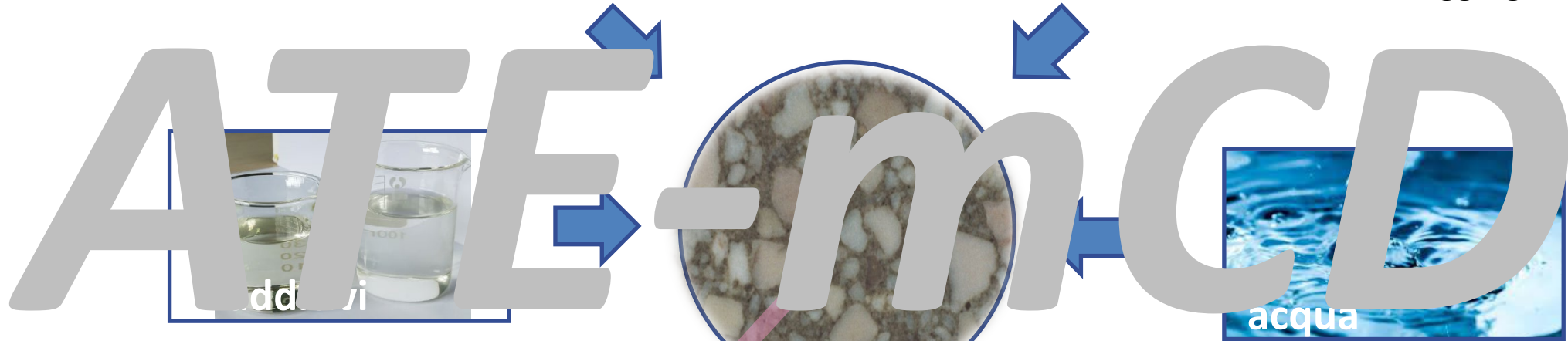


Calcestruzzo

- riduzione consumo di energia
- riduzione consumo materie prime
- cementi alternativi



- aggregati artificiali
- aggregati riciclati
- aggregati carbonatati
- aggregati contaminati



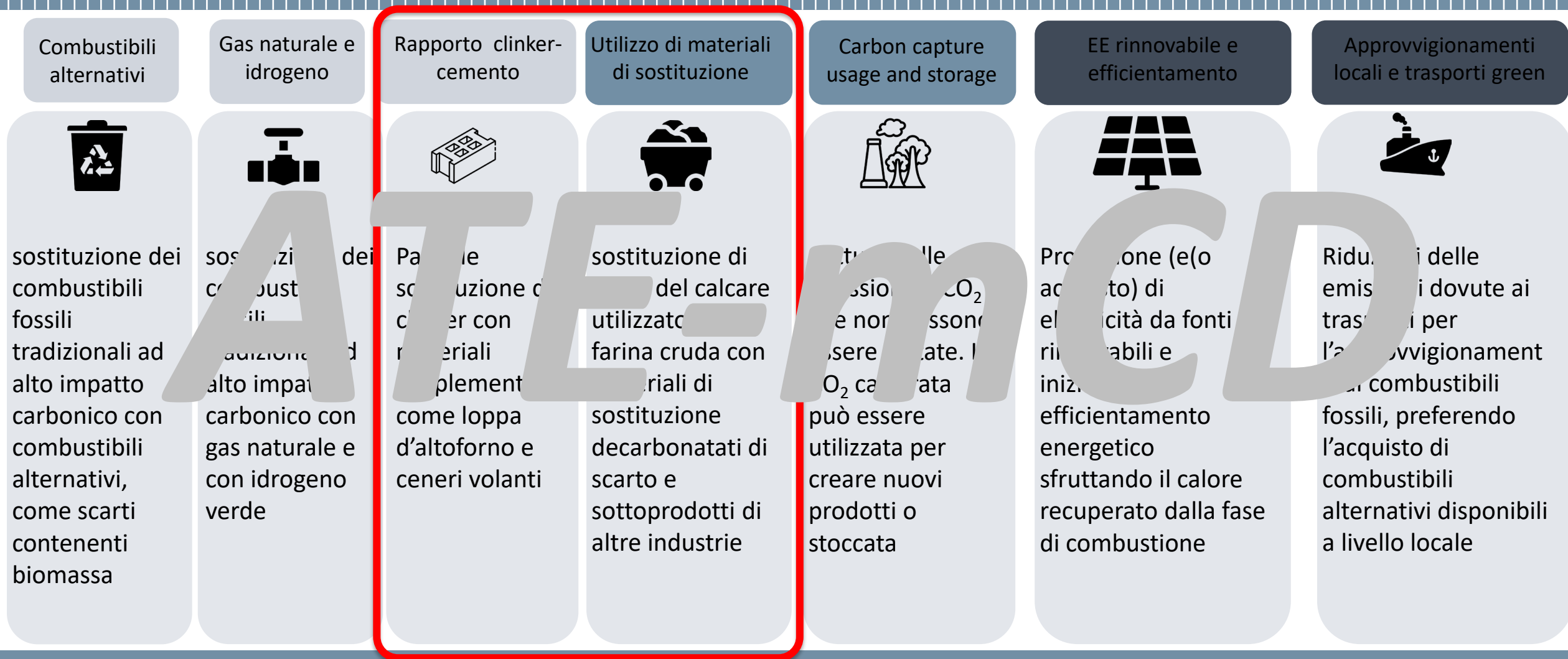
- acqua contaminata



+
**ARMATURE
acciaio**

- armature resistenti a corrosione
- armature non in acciaio

Le leve di decarbonizzazione



Tipi di cemento

Norma UNI EN 197-1:2011: Cemento - Composizione, specificheazioni e criteri di conformità per cementi comuni.

CEM I: cemento portland (clinker > 95%)

CEM II: cemento portland composito

alla loppa (II/A-S e II/B-S)

al fumo di silice (II/A-D)

alla pozzolana (II/A-P, II/B-P, II/A-Q e II/B-Q)

alle ceneri volanti (II/A-V, II/B-V, II/A-W e II/B-W)

allo scisto calcinato (II/A-T e II/B-T)

al calcare (II/A-L e II/B-L)

composito (II/A-M e II/B-M)

CEM III: cemento d'altoforno (loppa 36-95%)

CEM IV: cemento pozzolanico (pozzolana 11-55%)

CEM V: cemento composito (loppa + pozzolana)



Cenere volante



Fumo di silice



GGBS



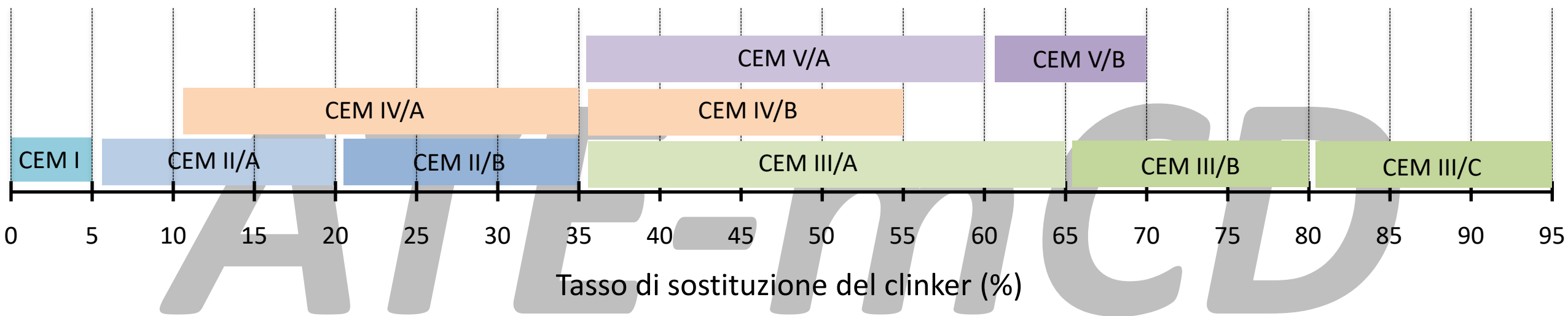
*Pozzolana
naturale*



Metacaolino

Tipi di cemento

Norma UNI EN 197-1:2011: Cemento - Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni.



GGBS



Fumo di silice



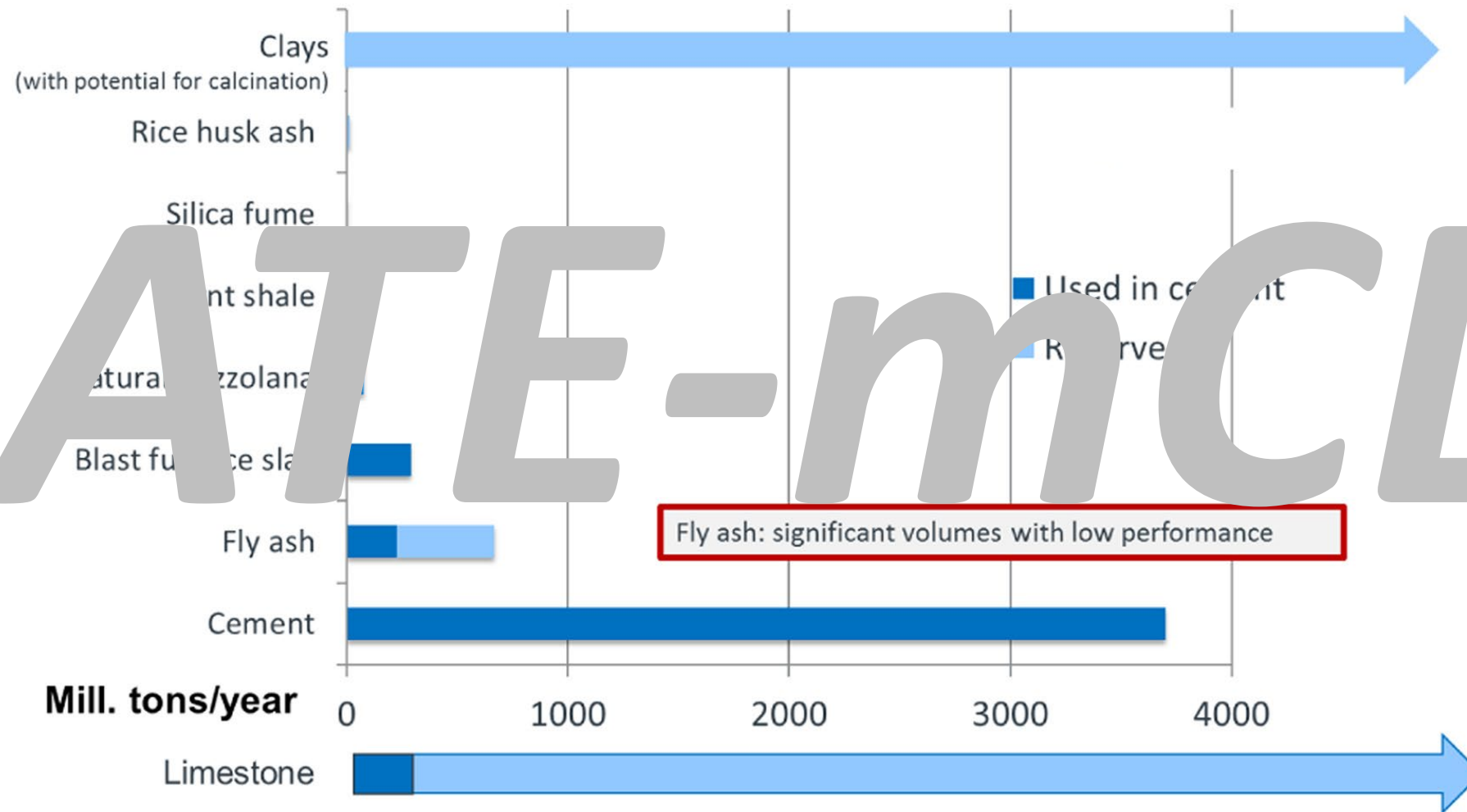
Pozzolana naturale



Cenere volante



Metacaolino

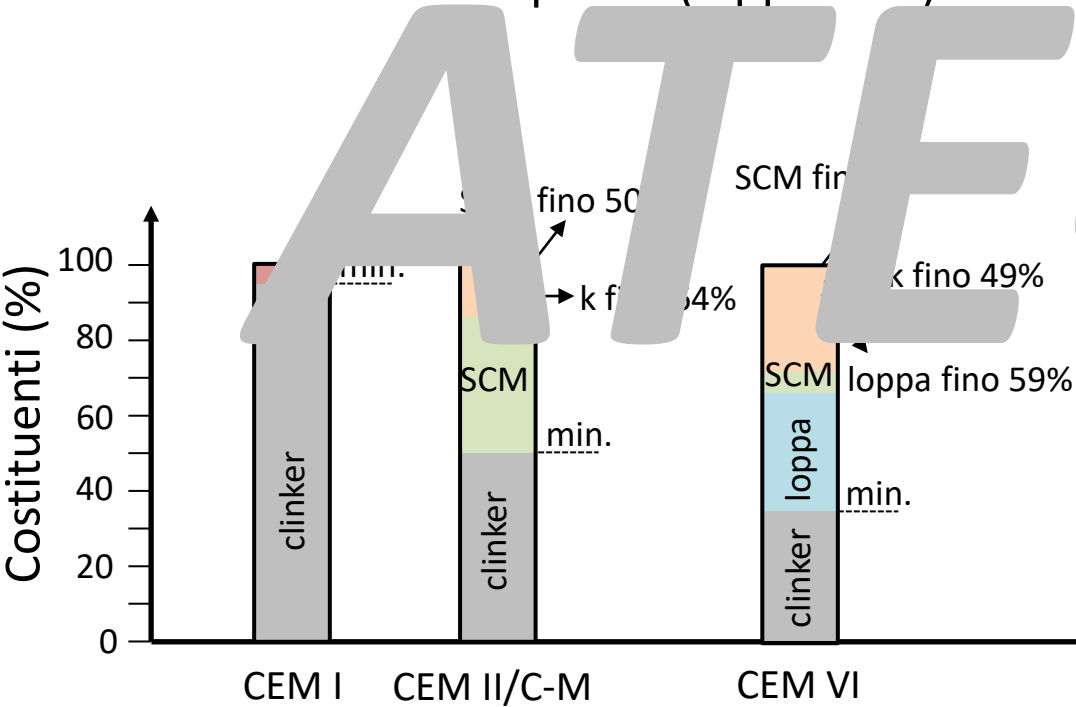


Tipi di cemento

Norma EN 197-5:2021: Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI

CEM II/C-M: cemento portland composito

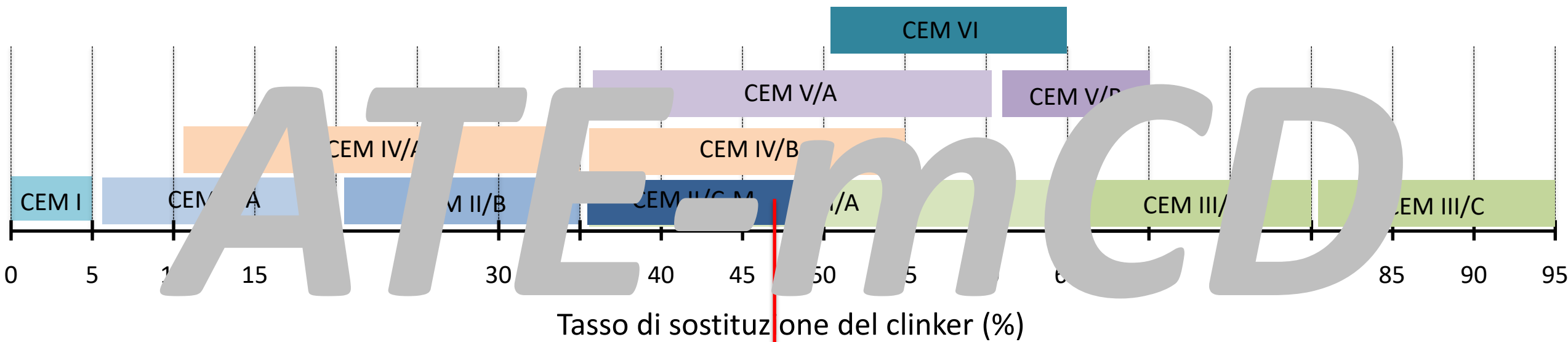
CEM VI: cemento composito (loppla + XX)



Main types	Notation of the products (type of cement)		Composition (percentage by mass a)											Minor additional constituents
			Main constituents											
			Clinker	Pulverised blast-furnace slag	Pulverised slag	Pulverised natural pozzolana	Pulverised natural calcined siliceous	Pulverised natural calcined siliceous	Pulverised natural calcined siliceous	Pulverised natural calcined siliceous	Pulverised natural calcined siliceous	Pulverised natural calcined siliceous	Pulverised natural calcined siliceous	
		K	S	P	O	N	W	T	L	LL				
CEM II	Portland-composite cement d	CEM II/C-M	50-64	<----- 36-50 ----->									0-5	
CEM VI	Composite cement	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	

Tipi di cemento

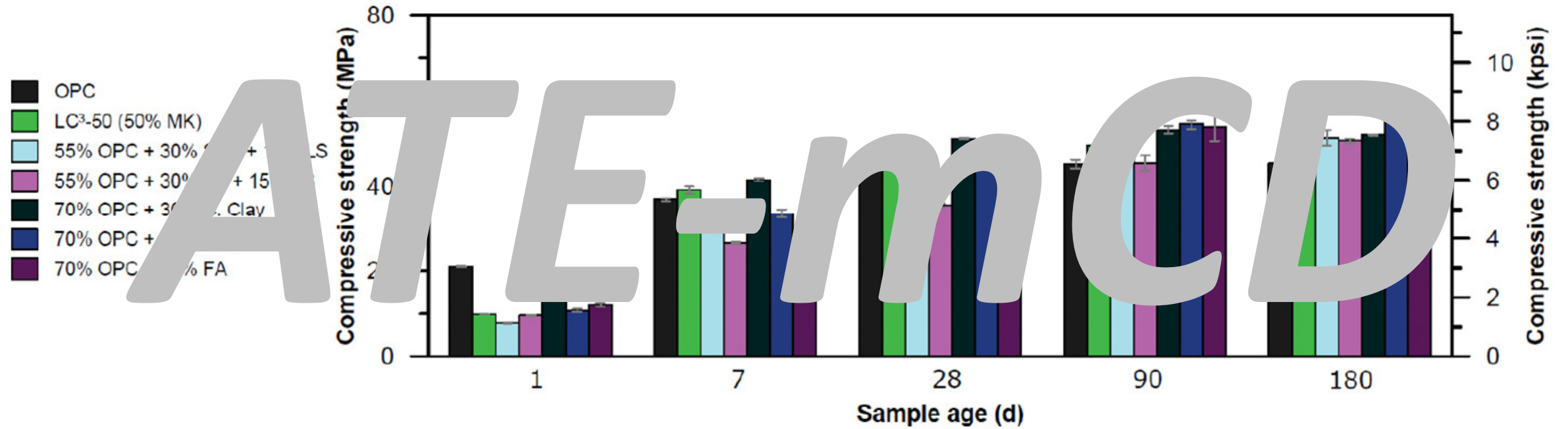
Norma EN 197-5:2021: Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI



LC³: CEM II/C-M (Q-LL)
Contenuto Clinker 50-64%



LC³ – Proprietà allo stato indurito



Cementi solfo-alluminosi

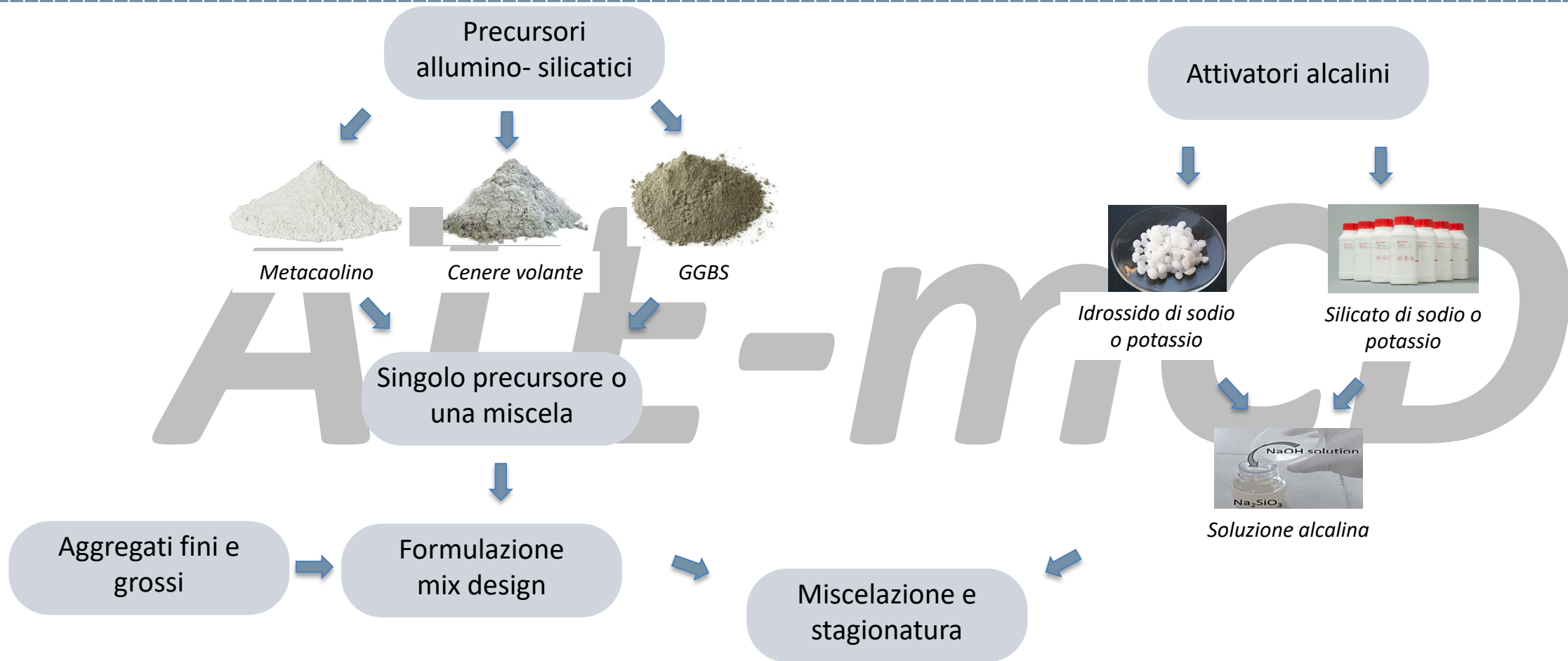
Costituiti da solfollauminati di calcio, silicato bicalcico e gesso, per la cui produzione sono sufficienti temperature attorno a 1300°C (inferiori ai 1450°C necessari per produrre il portland).

Prodotti di idratazione: ettringite e solfoalluminato di calcio idrato

ATE-mCD



Geopolimeri (alkali-activated materials)



Tipi di aggregati

- Aggregati naturali

- estratti in blocchi in cave e successivamente frantumati

- prelevati da depositi naturali di origine alluvionale o glaciale e vagliati



- Aggregati artificiali o industriali: aggregato di origine minerale derivante da un processo industriale che implica una modificazione termica o di altro tipo

- Aggregati riciclati: un materiale realizzato utilizzando rifiuti post-consumo da costruzione e demolizione



Aggregati riciclati nel calcestruzzo – percentuali di sostituzione

Norma UNI 11104:2025 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità -
Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206

le massime percentuali di sostituzione dell'aggregato grosso con **aggregato grosso riciclato** sono definite in relazione alla sua tipologia, alla classe di esposizione e alla classe di resistenza del calcestruzzo.

Aggregati riciclati nel calcestruzzo – percentuali di sostituzione

Norma UNI 11104:2025 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità -
Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206

le massime percentuali di sostituzione dell'aggregato fine con **aggregato fine riciclato** sono definite in relazione alla sua tipologia, alla classe di esposizione e alla classe di resistenza del calcestruzzo.

Aggregati riciclati nel calcestruzzo – percentuali di sostituzione

Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC) – DM 17 gennaio 2018

Tab. 11.2.III

Origine del calcestruzzo	Classe del calcestruzzo	Percentuale di sostituzione
decostruzioni edifici (serie)	C10/13	fino al 10%
decostruzioni solo calcestruzzo e cemento	$\leq C15/20$	fino al 10%
stabilimenti calcestruzzo $\geq 90\%$, (UNI EN 934-1:2009)	$\leq C37/47$	$\leq 30\%$
	$\leq C50/60$	$\leq 20\%$
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati - da qualsiasi classe	Classe minore del calcestruzzo di origine	fino al 15%
	Stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 10%

Materiale multifase

- Pasta di cemento idrata (a, 3)
- Cemento non idrato (b, 1)
- Aggregato naturale (c, 2)
- Aggregato con malta indurita aderente (AM) o pasta di cemento
- Multiple zone di transizione

Elevata variabilità

Influenza delle proprietà

Composizione dipende da:

- Le proprietà e la composizione del materiale originario
- Le operazioni di rottura e il numero di fessure
- La dimensione finale delle particelle (↓ dimensione delle particelle ↑ pasta di cemento aderente)

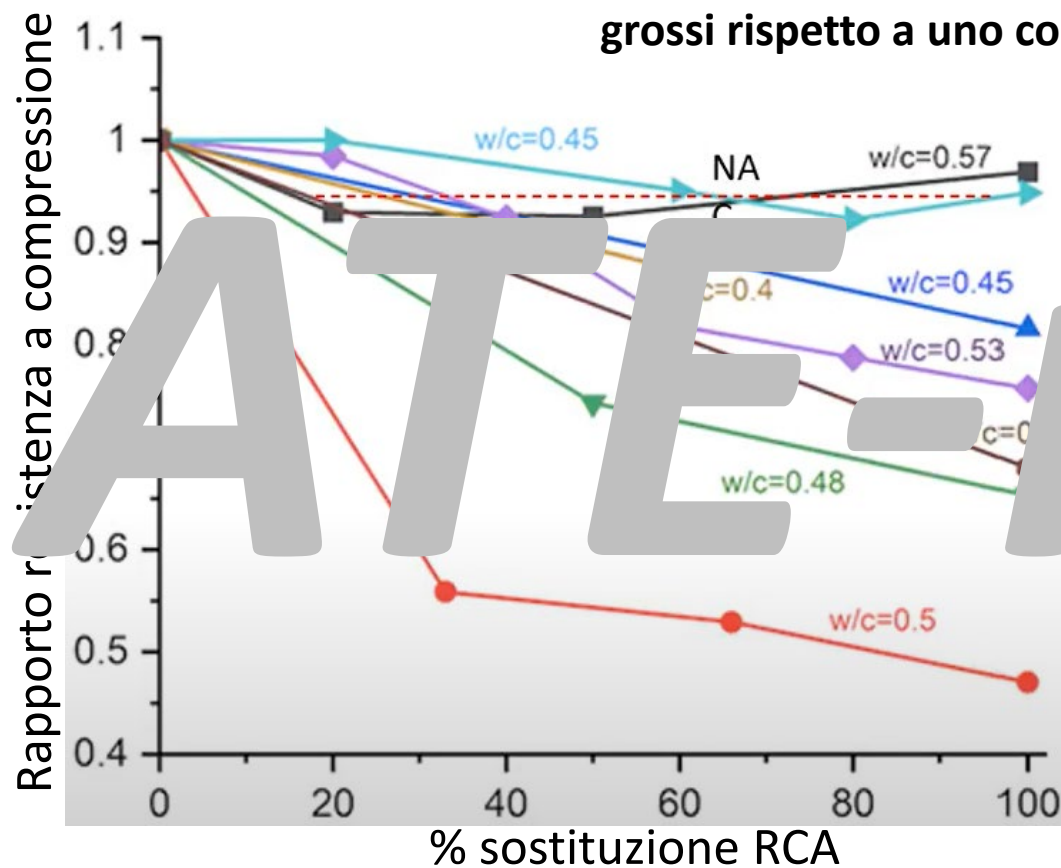
Rispetto all'aggregato naturale

- Maggiore porosità
- Minore densità
- Maggiore assorbimento d'acqua
- Minore resistenza all'abrasione

ATE-mCD

Aggregati riciclati (RCA) – proprietà calcestruzzo

Resistenza a compressione di un calcestruzzo confezionato con aggregati RCA
grossi rispetto a uno con aggregati naturali



- Poon et al., 2001, NAC = 48.3 MPa
- Alkhrdaji et al., 2011, NAC = 34 MPa
- ▲ Crushed granite, 2014, NAC = 42.4 MPa
- ▼ Dimitrakopoulos et al., 2018, NAC = 70 MPa
- ◆ Chen et al., 2019, NAC = 23 MPa
- ▲ Ismail et al., 2019, NAC = 55 MPa
- ▶ Thermo-mechanically treated, NAC = 46.8 MPa
- Cement coated, NAC = 57 MPa

La qualità degli RCA può essere migliorata attraverso:

- Rimozione della malta aderente

- Modifica delle caratteristiche superficiali RCA

- carbonatazione

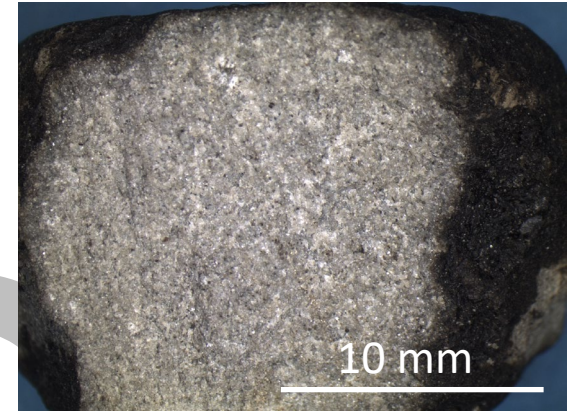
- Rimozione meccanica
- Bagno acido
- Riscaldamento al microonde
- Riscaldamento convenzionale
- Pulizia ad ultrasuoni
- Materiali pozzolanici
- Nano silice/calce
- Bio-deposizione CaCO_3
- Carbonatazione AM o stagionatura CO_2

Il RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)

Il RAP deriva dalla fresatura del manto stradale ed è un materiale granulare costituito da materiale lapideo e scorie d'altoforno inglobati in una matrice bituminosa.

~ **30% RAP** viene riciclato per produrre nuovo asfalto.

Il resto viene stoccato negli impianti di produzione o portato in discarica.



Accumulo di RAP



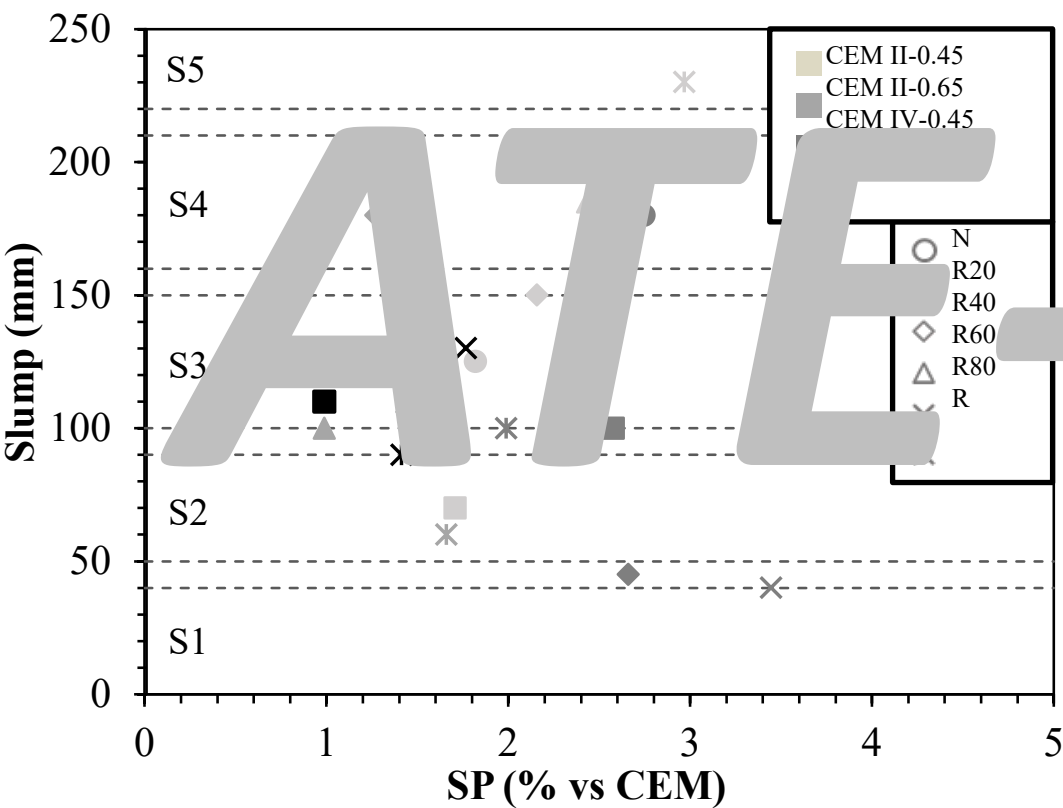
RAP



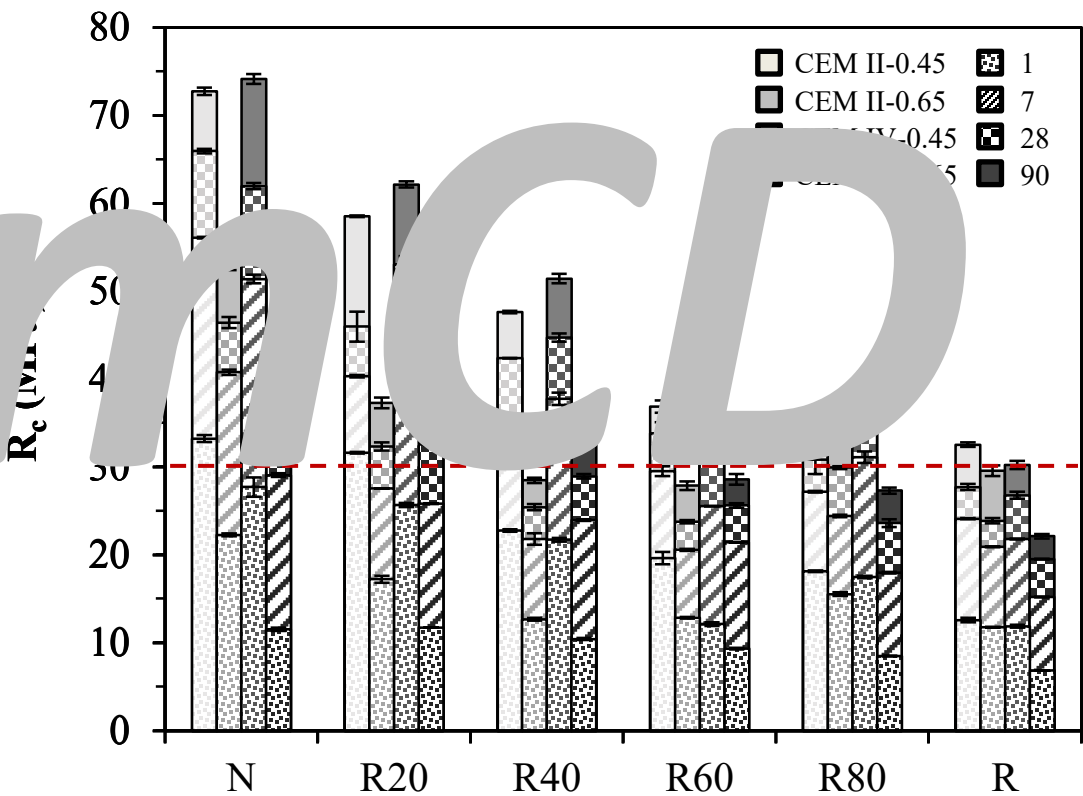
Aggregato naturale

II RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)

Stato fresco



Stato indurito



Impiego dell'acqua:

- Miscelazione (circa il 15-18% del vol. calcestruzzo).
- Stagionatura
- Lavaggio attrezzature (sistemi di miscelazione, betoniere, ...)

consumo $\sim 1.5 \times 10^{12}$ litri/anno di
acqua **potabile**

Per essere sostenibile, un sistema di gestione delle acque deve provvedere a:

- Uso efficiente dell'acqua
- Riduzione del consumo della risorsa primaria
- Ottimizzazione del processo di depurazione delle acque di processo
- Riutilizzare al massimo le acque trattate

Impiego dell'acqua:

- Miscelazione (circa il 15-18% del vol. calcestruzzo).
- Stagionatura
- Lavaggio attrezzature (sistemi di miscelazione, betoniere, ...)

consumo $\sim 1.5 \times 10^{12}$ litri/anno di
acqua **potabile**

L'acqua di impasto non dovrà contenere materie organiche o sali aggressivi od altri materiali che possono interferire con i processi di presa ed indurimento, influenzare le proprietà meccaniche e causare efflorescenze e macchie sulla superficie del calcestruzzo.

Impiego dell'acqua:

- Miscelazione (circa il 15-18% del vol. calcestruzzo).
- Stagionatura
- Lavaggio attrezzature (sistemi di miscelazione, betoniere, ...)

consumo $\sim 1.5 \times 10^{12}$ litri/anno di
acqua **potabile**

EN 1008

Acqua potabile **Ok**

Acqua di recupero dei processi dell'industria del calcestruzzo

Acqua di origine sotterranea

Acqua naturale di superficie e acque reflue industriali

~~Acqua marina e salmastra~~

~~Acque nere~~

Controlli

L'acqua di recupero dei processi nell'industria del calcestruzzo è il liquido di processo (principalmente acqua di lavaggio di autobetoniere e aggregati) che viene raccolto, trattato per separare i solidi sospesi (fango di cemento) e poi riutilizzato nel processo di produzione del calcestruzzo.

1. **Raccolta:** L'acqua di lavaggio proveniente dal processo di pulizia delle autobetoniere e degli aggregati viene accumulata in vasche.
2. **Agitazione:** Per evitare la sedimentazione dei solidi, il liquido viene mantenuto in agitazione.
3. **Microfiltrazione:** L'acqua viene poi inviata a un sistema di microfiltrazione che separa l'acqua pulita dal fango di cemento.
4. **Recupero:** L'acqua microfiltrata viene raccolta in un serbatoio per essere nuovamente utilizzata nel processo produttivo.

L'idoneità all'utilizzo dell'acqua di recupero dai processi dell'industria del calcestruzzo o di sue combinazioni (es. con acque provenienti da altre fonti), deve essere conforme a:

- Requisiti per ispezione preliminare

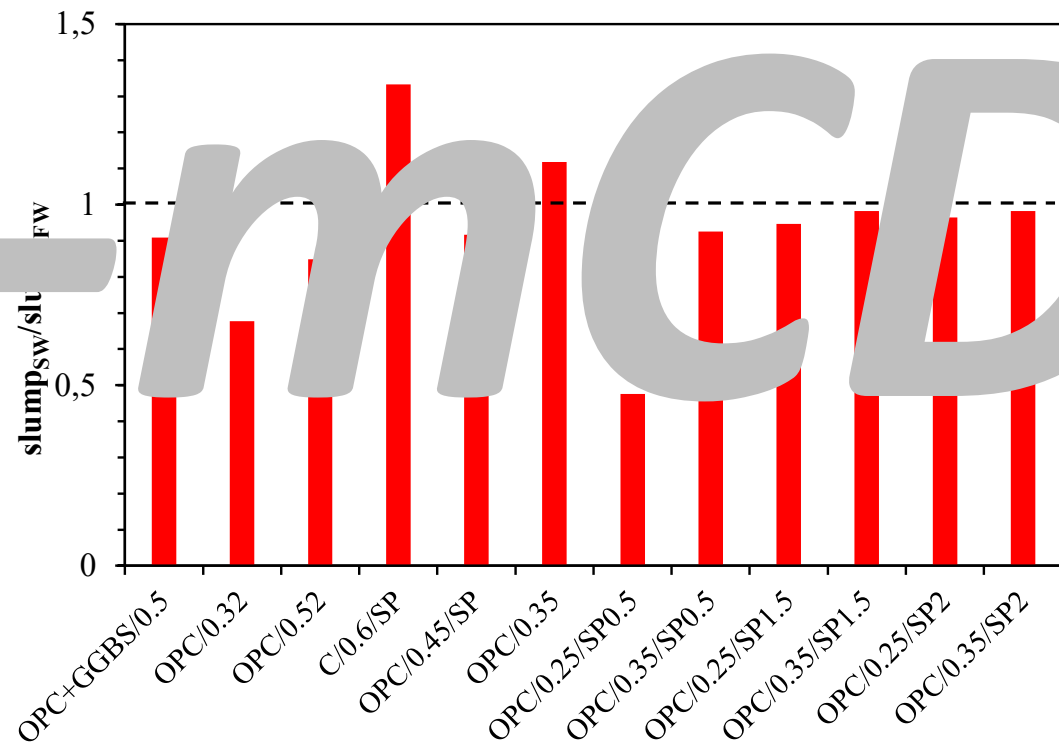
- Requisiti per le sostanze dannose

- Tempi di presa e resistenza

Quali sono gli effetti dell'acqua di mare sulle proprietà del calcestruzzo?

Stato fresco

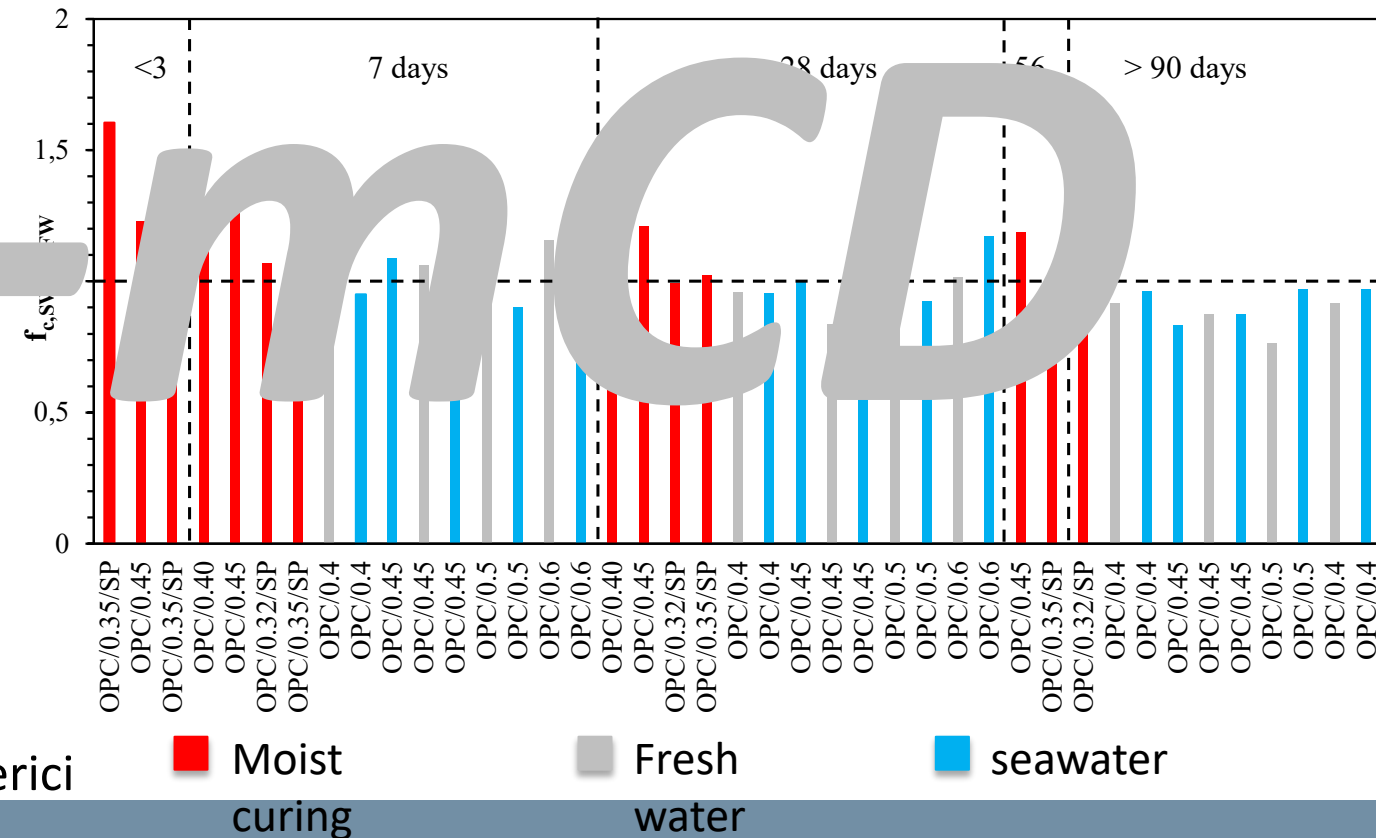
- lavorabilità (slump)
- slump flow
- Tempo di presa
- viscosità
- Contenuto d'aria
- densità



Quali sono gli effetti dell'acqua di mare sulle proprietà del calcestruzzo?

Stato indurito

- Resistenza a compressione
- Resistenza a flessione
- Resistenza a trazione
- Modulo di elasticità
- Densità
- Ritiro igrometrico
- Resistenza agli agenti atmosferici





Quali sono gli effetti dell'acqua di mare sulle proprietà del calcestruzzo?

...e se le tradizionali armature in acciaio al carbonio fossero sostituite da armature aventi maggiore resistenza alla corrosione?

- JCI Technical Committee 121A - Use of Sea Water in Concrete
Chair: Nobuaki Otsuki, Tokyo Institute of Technology
Report on the Use of Seawater in Concrete
- ACI Technical Committee 243 – Seawater Concrete
Chair: A. Nanni, University of Miami

Grazie dell'attenzione



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE
TECNOLOGI
PER L'EDILIZIA

