



POLITECNICO
MILANO 1863

Corsi di Formazione ATE-mCD – La durabilità del calcestruzzo - 09 ottobre 2025

Interazione dei materiali cementizi con l'ambiente e strategie di sostenibilità

Maddalena Carsana



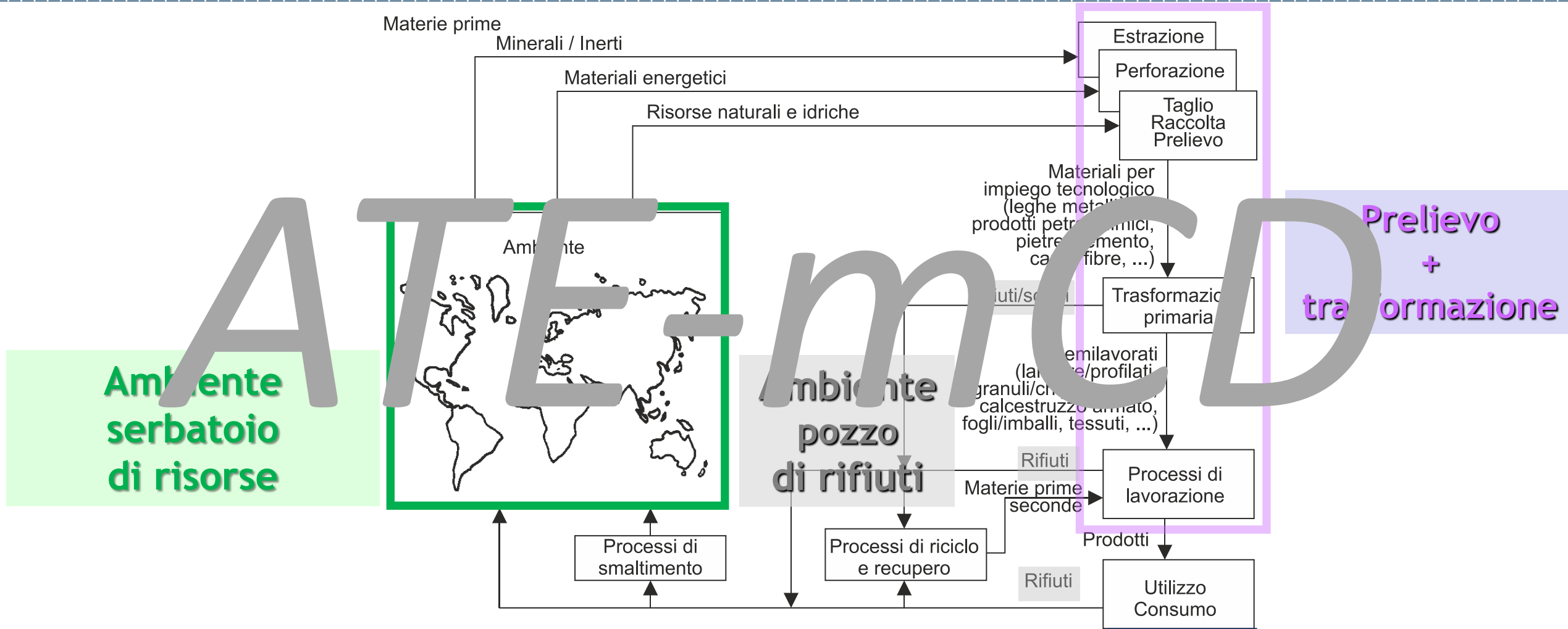
CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI



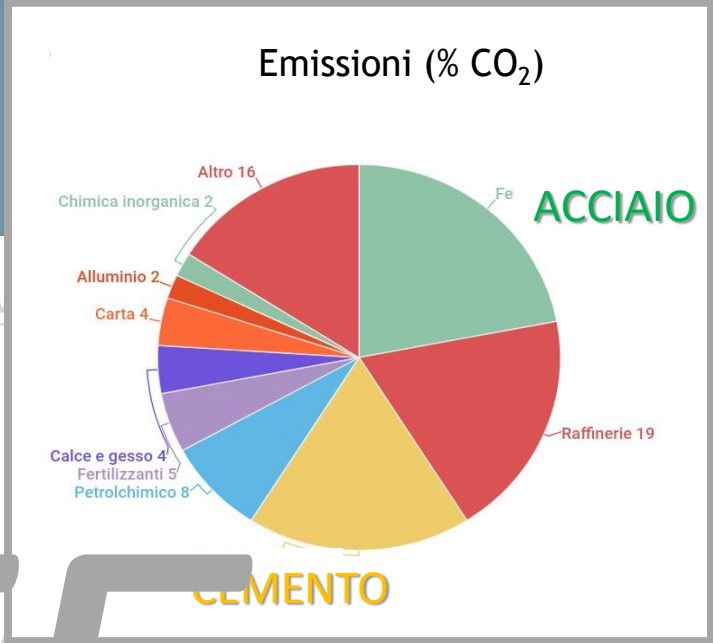
ASSOCIAZIONE
TECNOLOGI
PER L'EDILIZIA



Ciclo di vita dei materiali



Ciclo di vita dei materiali



Ambiente
serbatoio
di risorse

- Riuso
- Riciclo
- Recupero

perdita di
FUNZIONALITA'

Ambiente
pozzo
di rifiuti

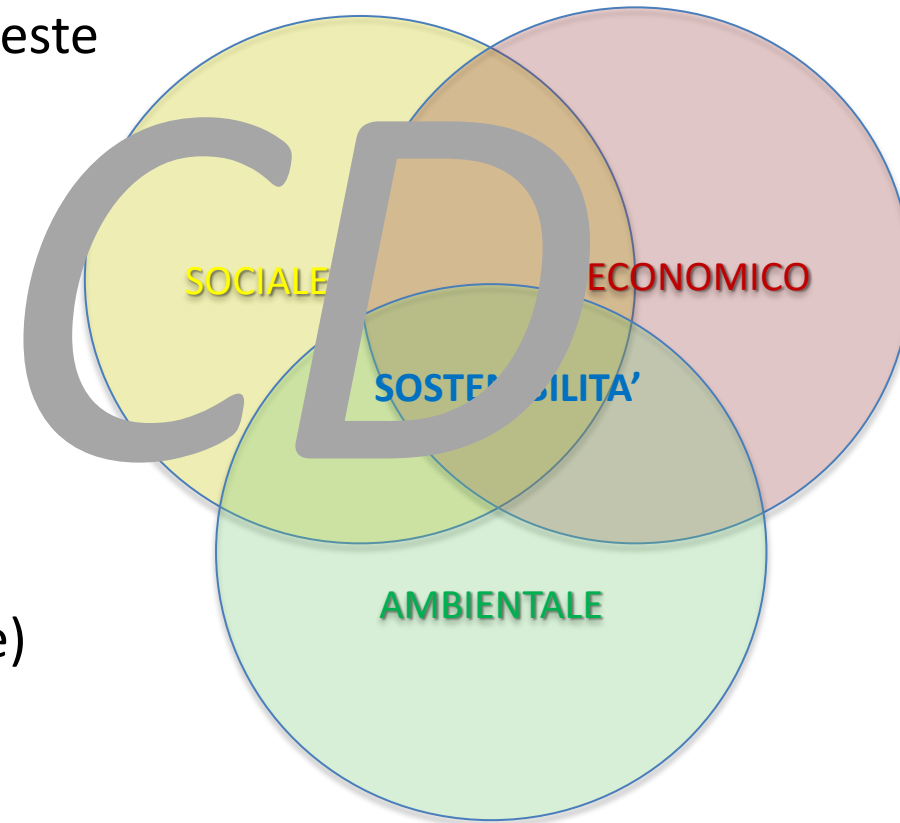
Smaltimento (End of life)

Processi di riciclo
e recupero

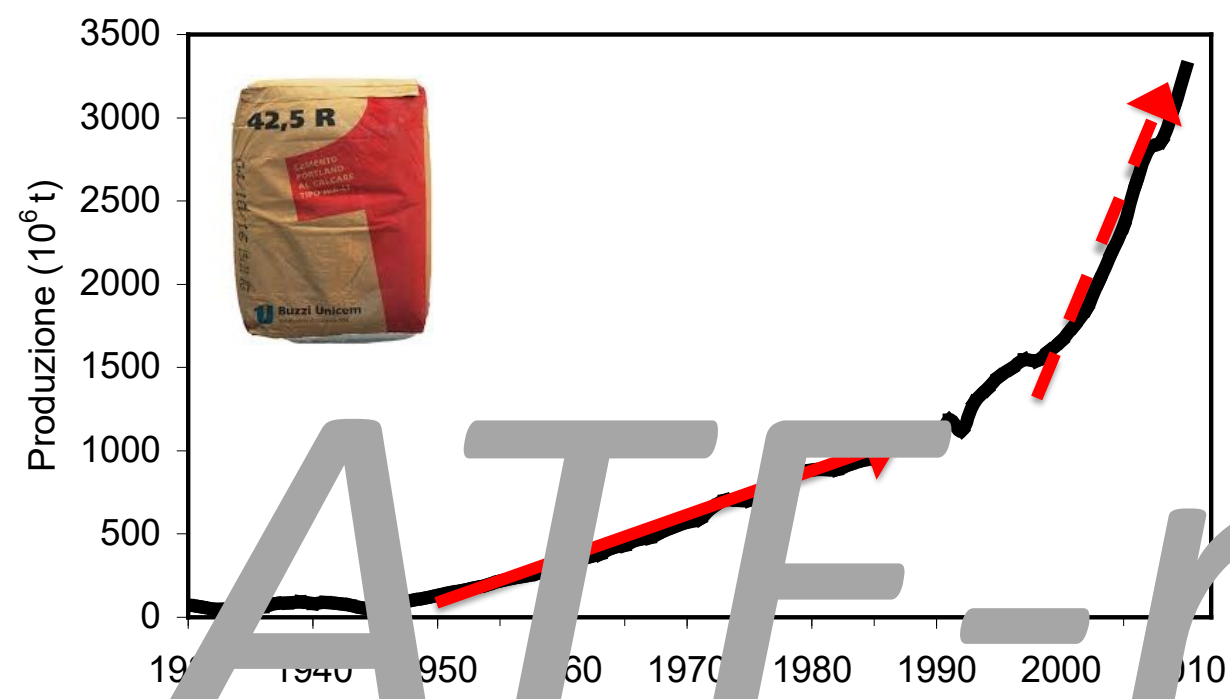
Possibili soluzioni:

- scelta dei materiali e progettazione adeguata alle prestazioni richieste
- sfruttamento delle diverse proprietà dei materiali
(es. strutturale, isolamento...)
- dimensionamento corretto
- allungamento della vita di progetto
- riduzione della pericolosità dei materiali
- «**End of waste**» (cessazione della qualifica rifiuto -> valorizzazione)

APPROCCIO OLISTICO DELLA SOSTENIBILITÀ (Concrete centre, 2007)



Settore dei materiali cementizi

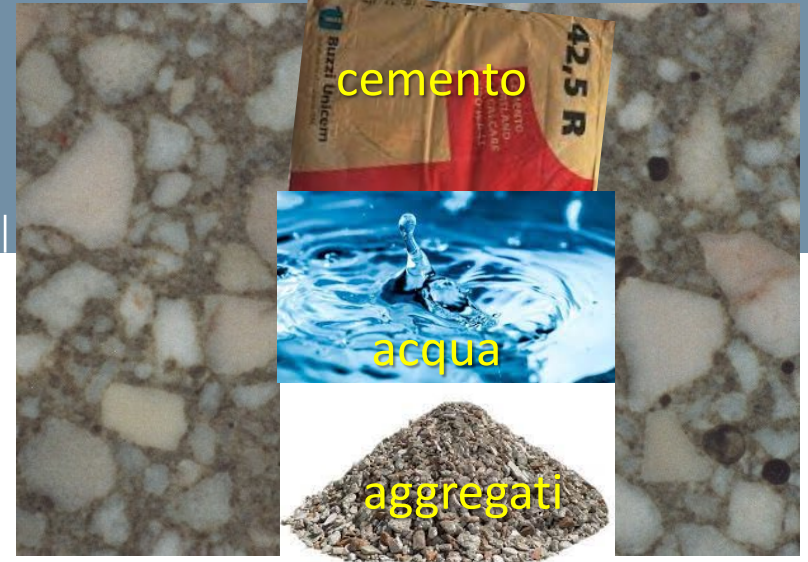


Produzione annua mondiale (tonnellate), 2022

Calcestruzzo	~ 20 bilioni
Cemento Portland	4,2 bilioni
Acciaio	1,85 bilioni
Carbone	8,4 bilioni
Petrolio greggio	~ 4,3 bilioni
Grano	791 milioni
Sale	290 milioni
Zucchero	180 milioni

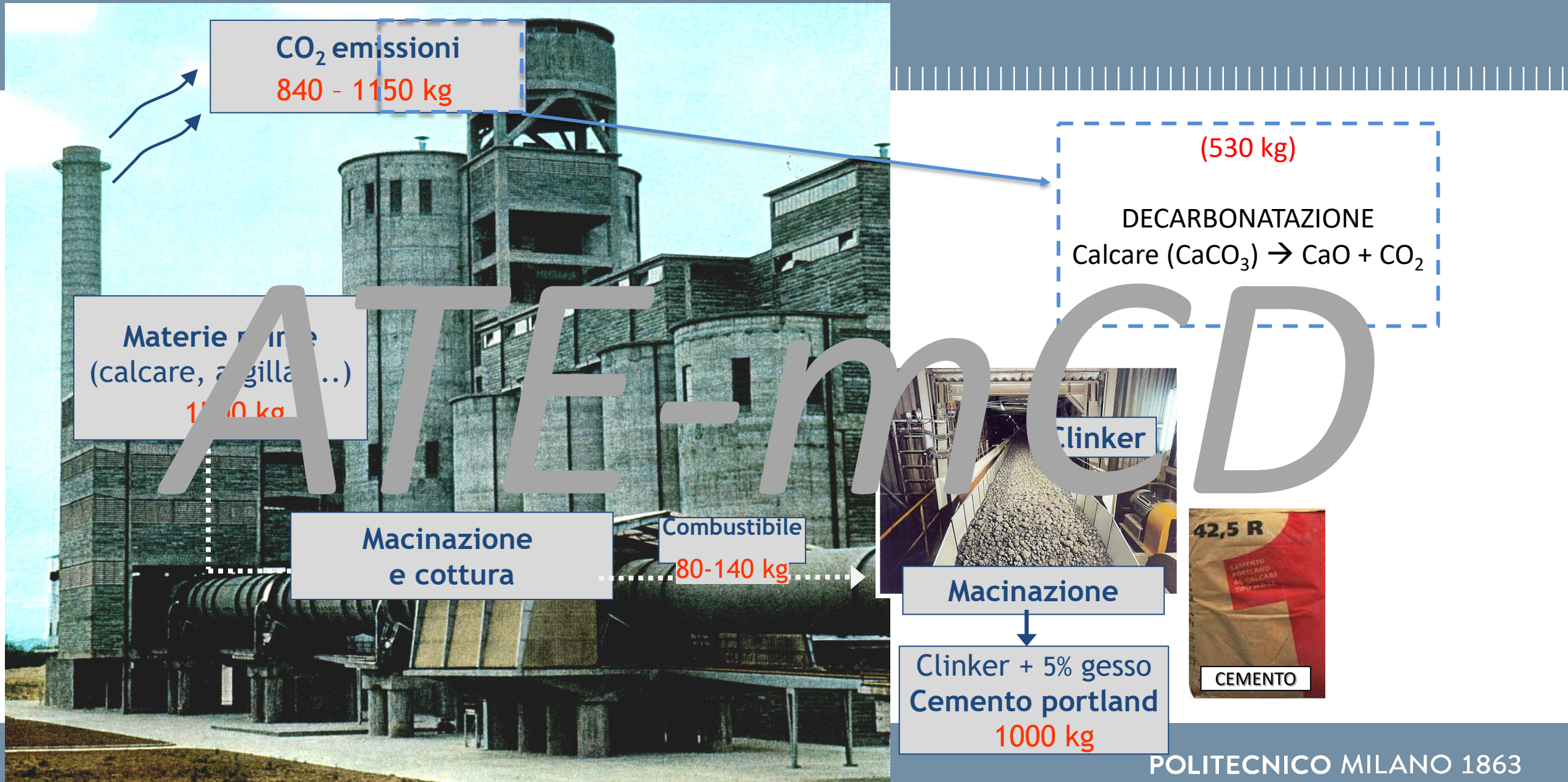
2022
↓
18 (10⁶ ton)
in Italia

20 Burj Khalifa
(Dubai)



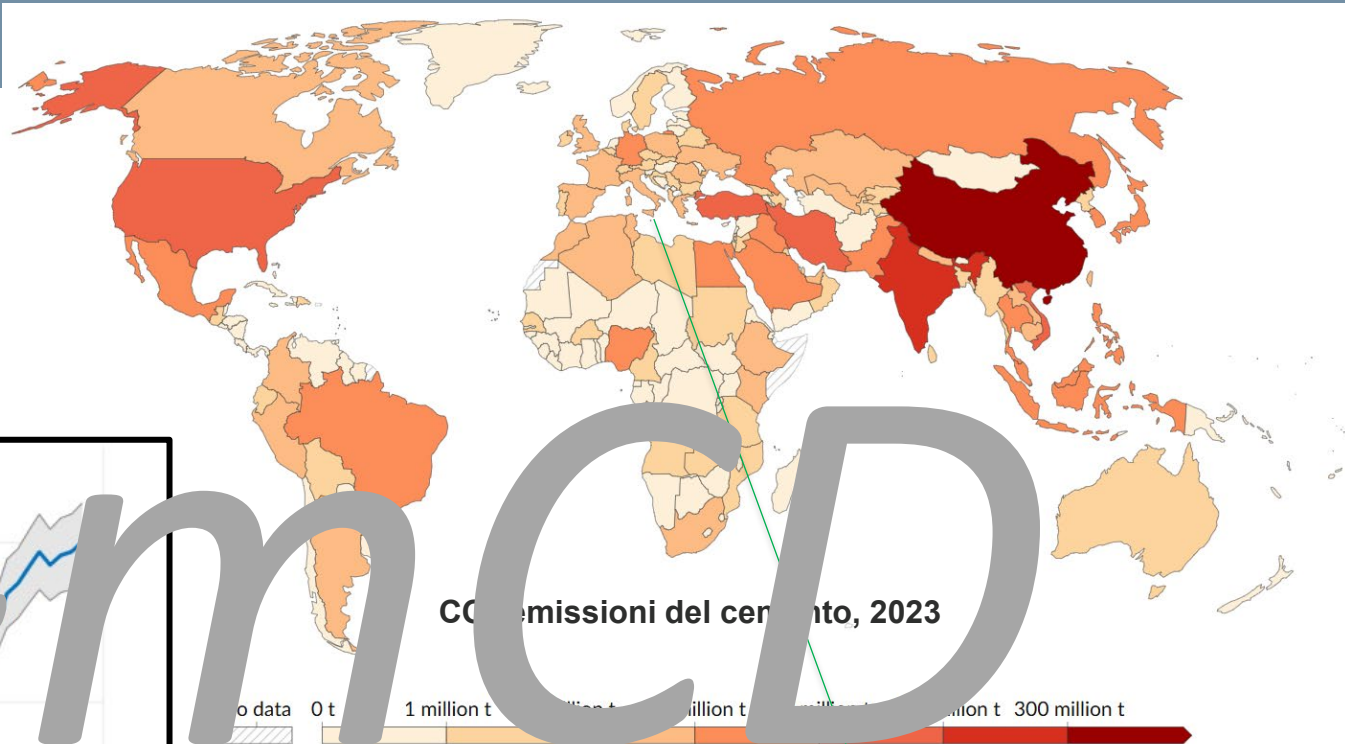
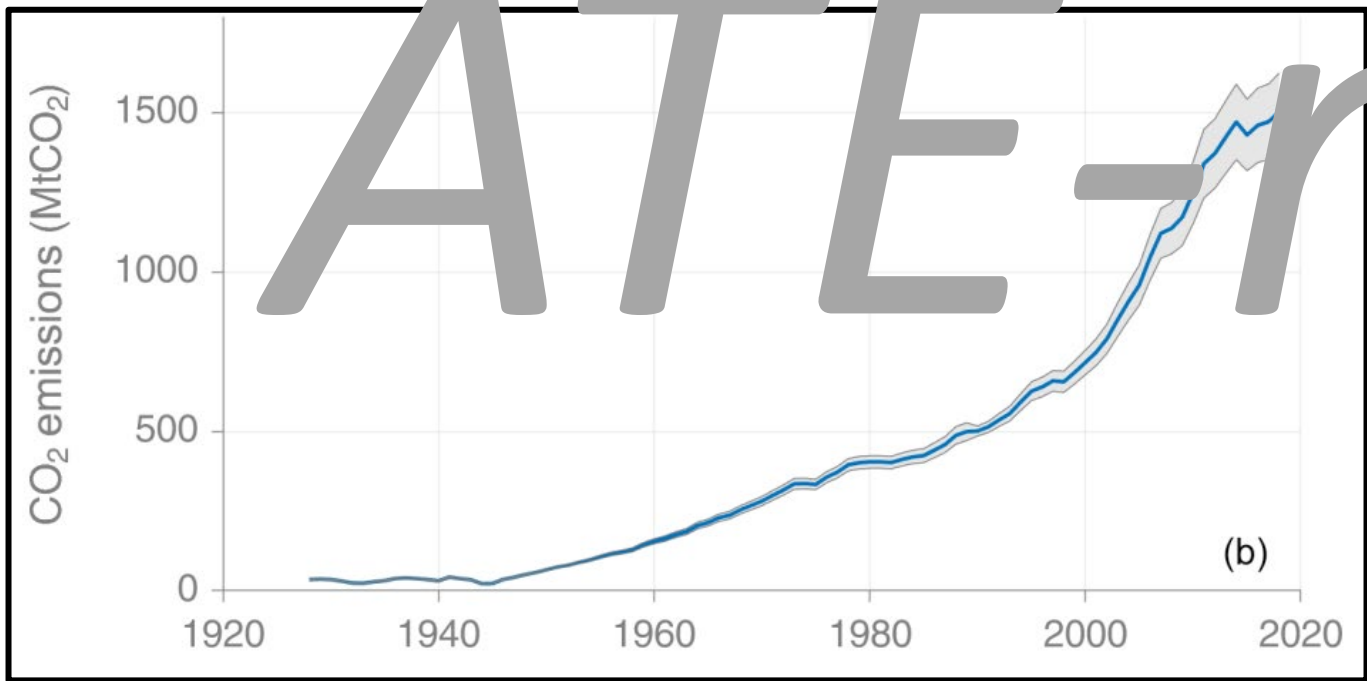
disponibilità costi
versatile
durevole
adattabilità

Il cemento: bilancio delle risorse impiegate

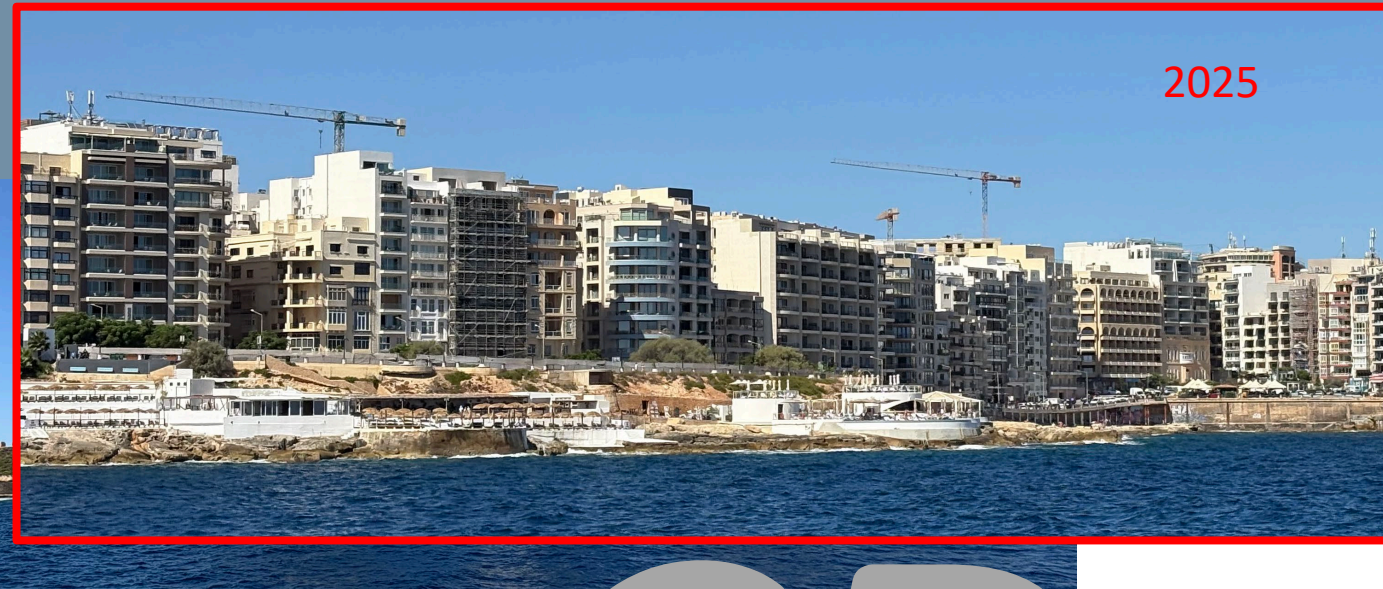
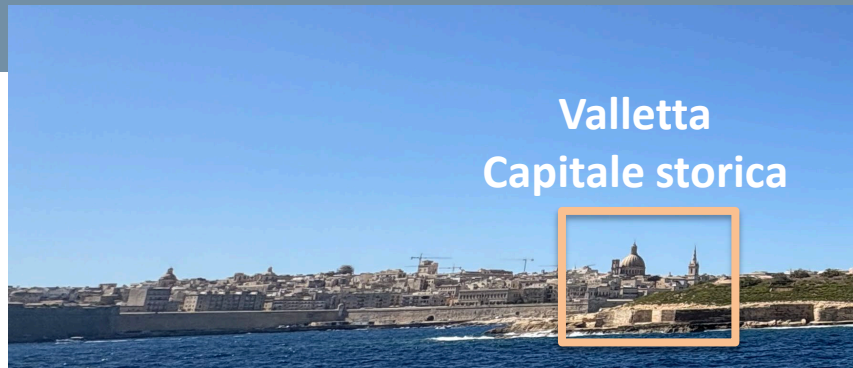


Il cemento: emissioni CO₂

~ 7% delle emissioni mondiali di CO₂



Impatto delle costruzioni sull'ambiente



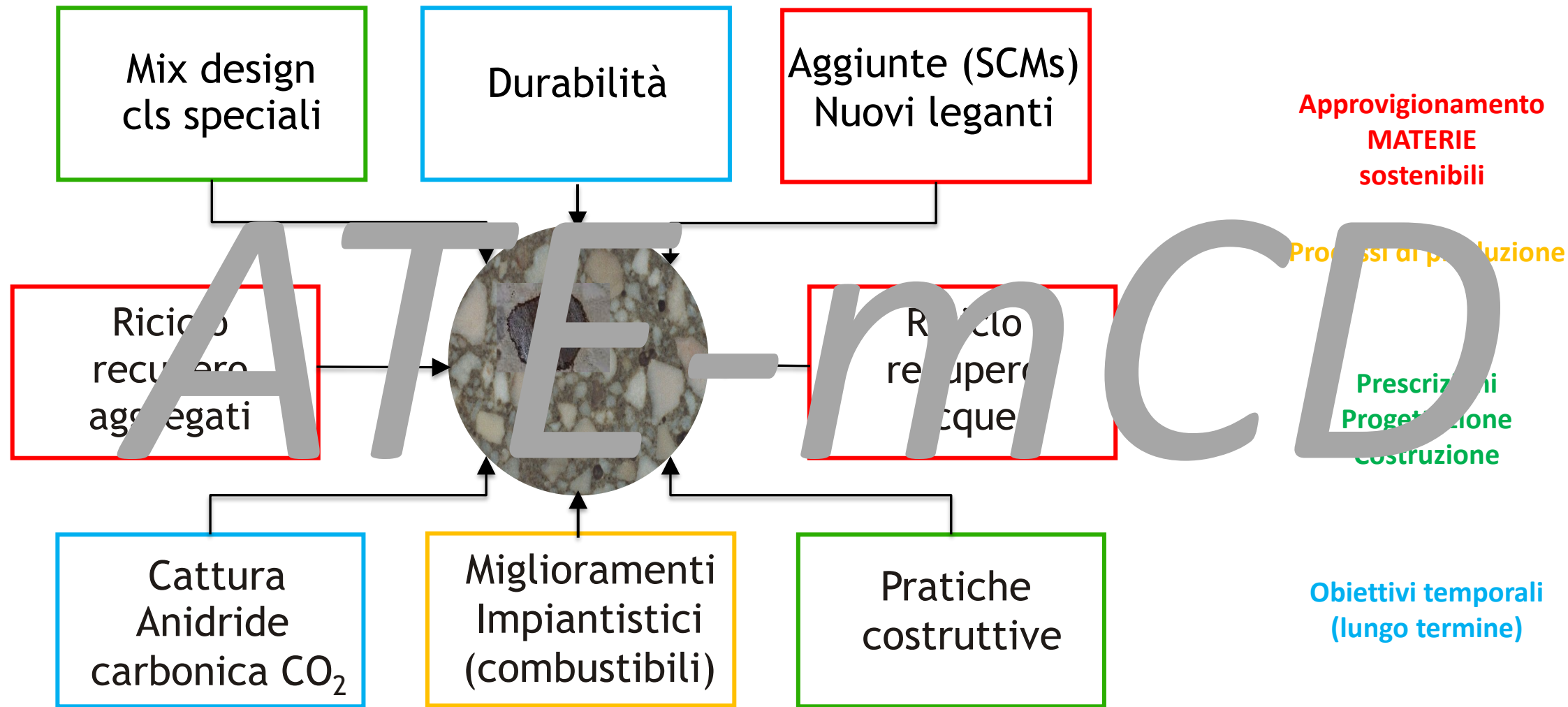
- 500 kg materie prime
- 30-50 kg combustibile
- 280-380 kg CO₂ emessa

Risorsa scarsa
in alcuni paesi

Diminuzione delle
cave disponibili

Come rendere più sostenibile le costruzioni?

Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (1)



Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (2)

- Petcoke e carbon fossile (combustibili tradizionali)
- Biomasse di origine agricola, forestale o da fanghi di depurazione da rifiuti urbani organici (combustibili alternativi)
- Altri rifiuti (pneumatici usati, plastiche, farine animali o oli esausti)

ATE-mCD

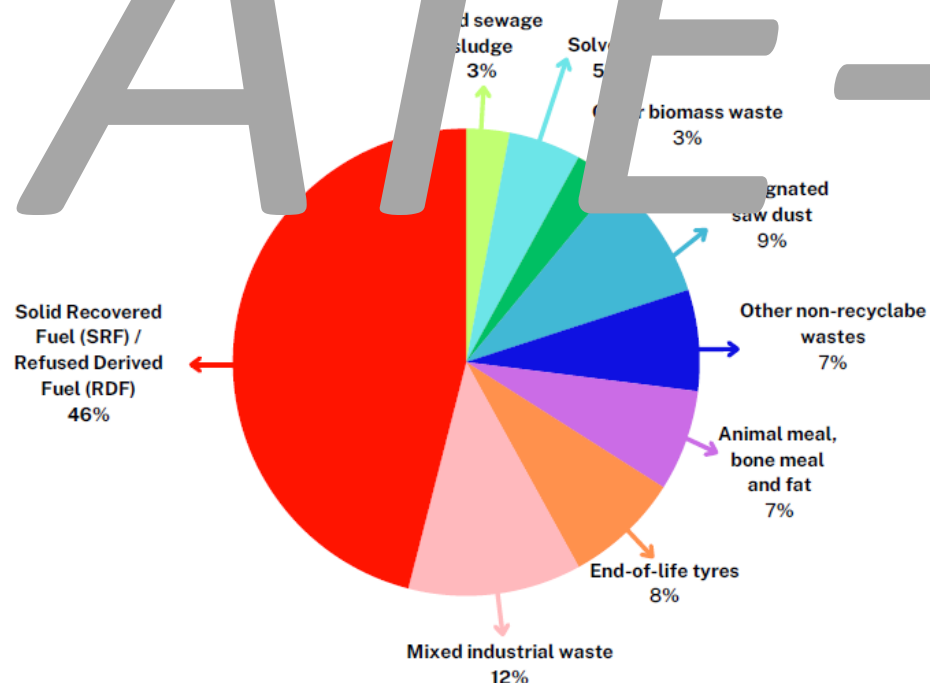
Miglioramenti
Impiantistici
(combustibili)

- Riduzione emissioni CO₂
- Sfruttamento del potere calorifico di rifiuti
- Riduzione del consumo combustibili fossili tradizionali

Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (2)

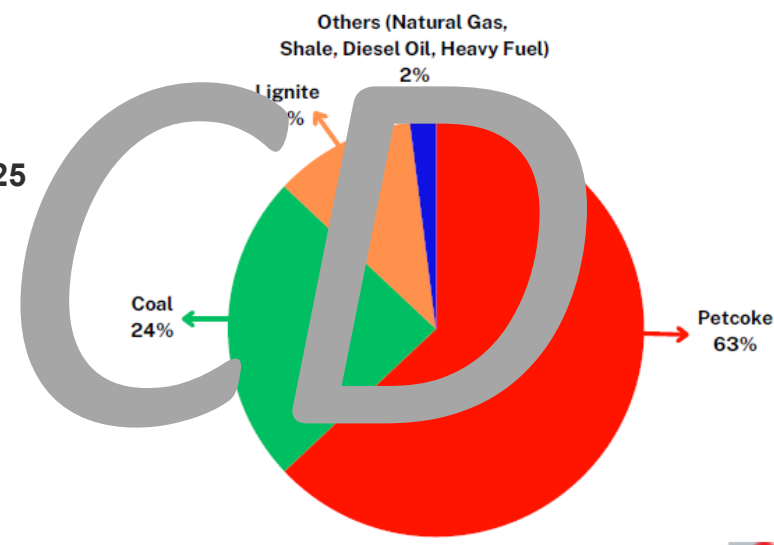
- Petcoke e carbon fossile (combustibili tradizionali)
- Biomasse di origine agricola, forestale o da fanghi di depurazione da rifiuti urbani organici (combustibili alternativi)
- Altri rifiuti (pneumatici usati, plastiche, farine animali o oli esausti)

BREAKDOWN OF CIRCULAR WASTE FUELS 2022 IN THE EU



Cembureau Report, 2025

UPDATE 2022 DATA: FOSSIL FUELS USE IN THE EU

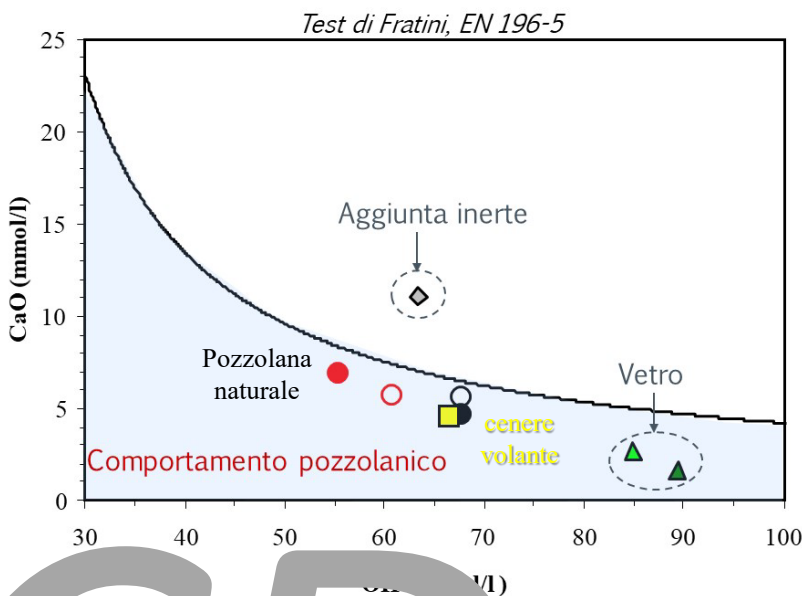


- Riduzione emissioni CO₂
- Sfruttamento del potere calorifico di rifiuti
- Riduzione del consumo combustibili fossili tradizionali

COMPORTAMENTO POZZOLANICO:

- materiale siliceo o silico alluminoso (SiO_2 , Al_2O_3etc.)
- finemente macinata (dell'ordine dei 100 μm)
- struttura amorfa

Aggiunte (SCMs)
Nuovi leganti



Cemento
Portland

1824



Dagli
anni
'80 - '90

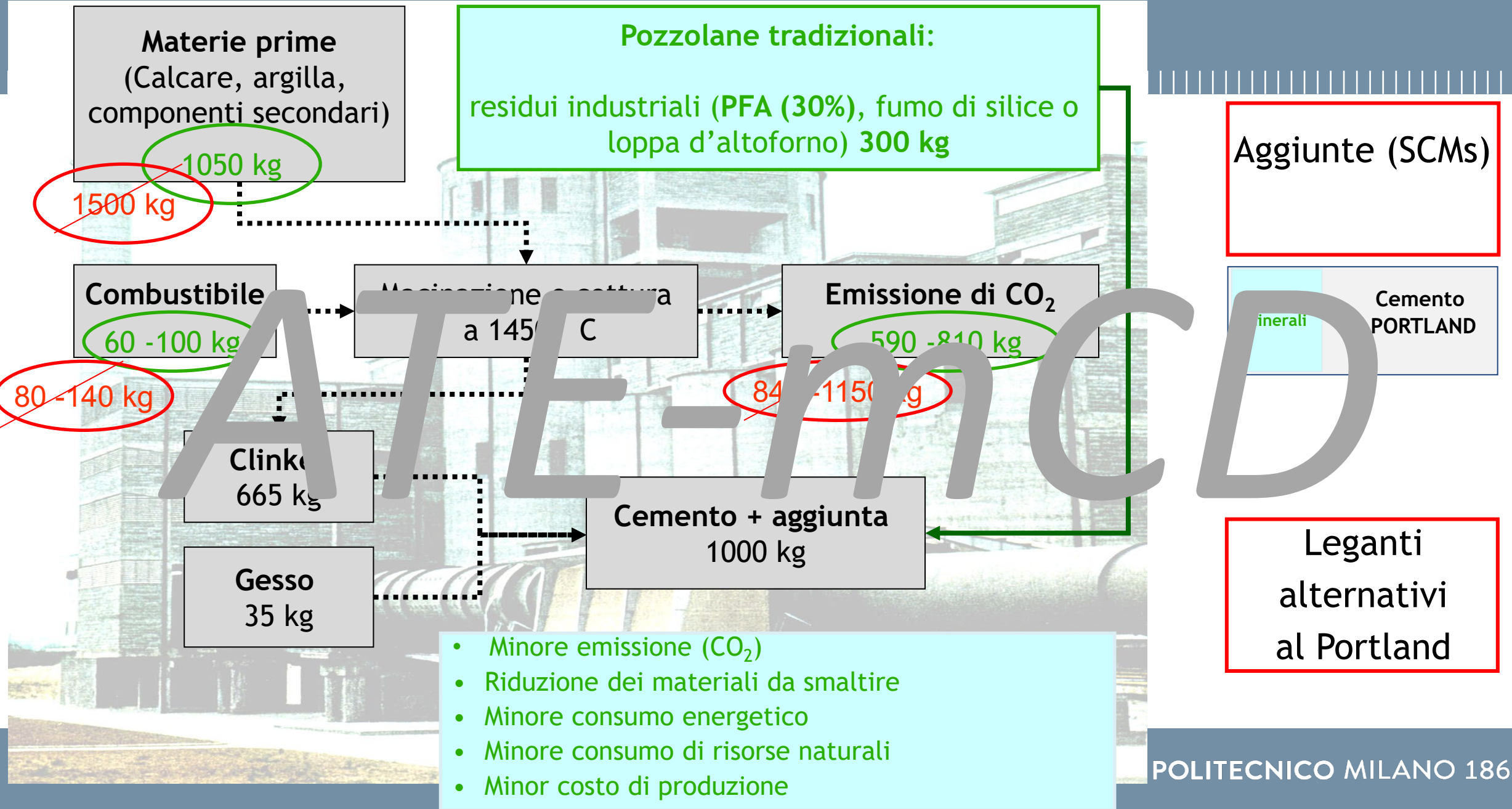


SCMs sostenibili

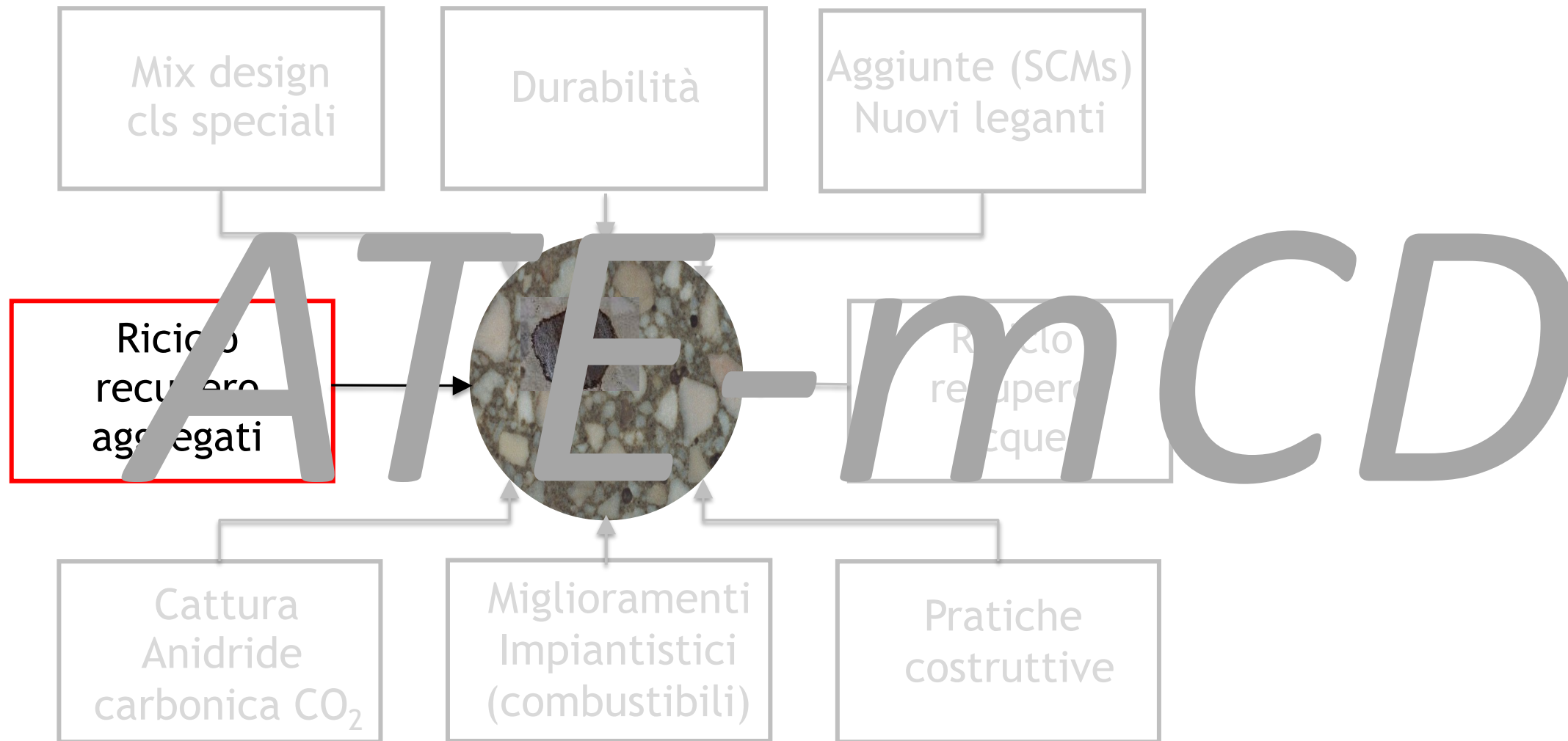
TEMPO (anni)

SCMs (Supplementary Cementitious Materials)
TRADIZIONALI

Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (4)



Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (5)



Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (6)

- costituente predominante di un calcestruzzo sostenibile (60-75% in massa cls ordinario)

Riciclo e recupero rifiuti in sostituzione degli aggregati

(Pierre-Claude Aitcin et al., 2011)



- costituente predominante di un calcestruzzo sostenibile (60-75% in massa cls ordinario)
- Aspetti ECONOMICI/AMBIENTALI/TECNOLOGICI → scelta aggregato riciclato:
 - Costi: scarica/impiego
 - Pulverizzazione, macinazione, rimozione contaminanti, lavaggio, vagliatura
 - Caratterizzazione: distribuzione granulometrica, forma, tessitura e struttura (porosità)
 - Quantità: sostituzione parziale o totale aggregato ordinario
 - Variabilità dello scarto → Δ proprietà del calcestruzzo

Riciclo
recupero
aggregati

Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (6)

- costituente predominante di un calcestruzzo sostenibile (60-75% in massa cls ordinario)
- Aspetti ECONOMICI/AMBIENTALI/TECNOLOGICI → scelta aggregato riciclato
- Deriva prevalentemente dai *residui delle costruzioni e demolizioni (C&D)* → «scarti **INERTI**»
(1 ton/persona-anno di CDW) ~ consumo pro-capite di calcestruzzo

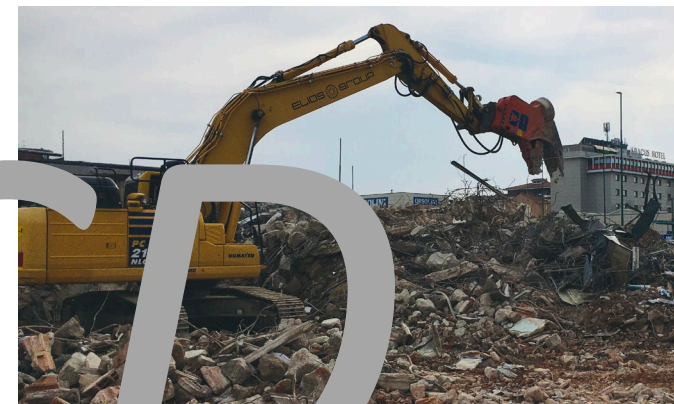
Riciclo
recupero
aggregati

Riduzione problema smaltimento inerte
Conservazione delle risorse naturali

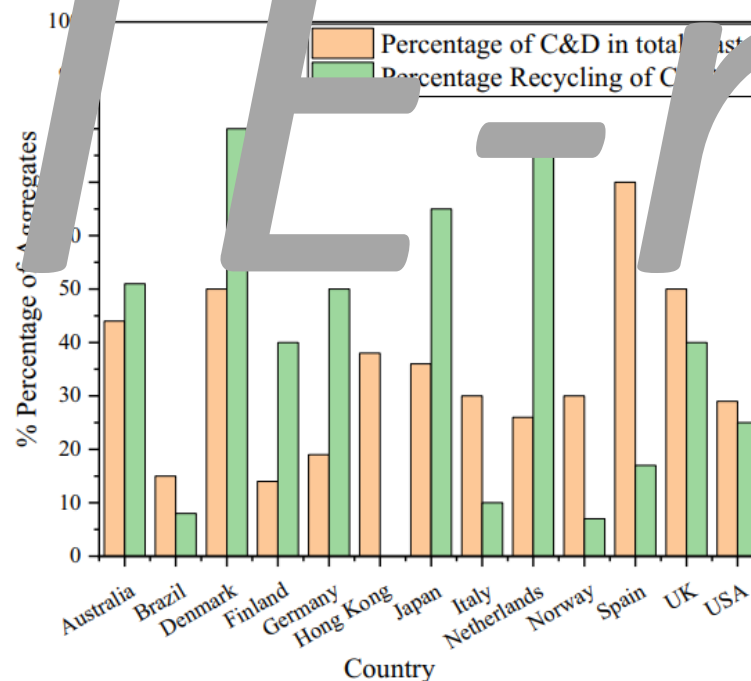
Residui costruzioni			
Terreno di scavo	Demolizioni di strade	Macerie	Materiali di scarto
Terreno superficiale sabbia Ghiaia Argilla materiali lapidei vari	Materiale bituminoso Catrame Pavimentazioni cls Sabbia/ghiaia Materiali lapidei vari	Calcestruzzo terreno Tegole, mattoni malta/gesso legno, plastica, metallo..	Legno, plastica metalli vetro ceramica carta

Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (6)

- costituente predominante di un calcestruzzo sostenibile (60-75% in massa cls ordinario)
- Aspetti ECONOMICI/AMBIENTALI/TECNOLOGICI → scelta aggregato riciclato
- Deriva prevalentemente dai **residui delle costruzioni e demolizioni (C&D)** (1 ton/persona-anno di CDW) ~ consumo pro-capite di calcestruzzo



Riciclo
recupero
aggregati



Residuo costruzioni

Macerie

Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (5)

Riempimento cavità

Costruzioni

Riciclo
recupero
aggregati



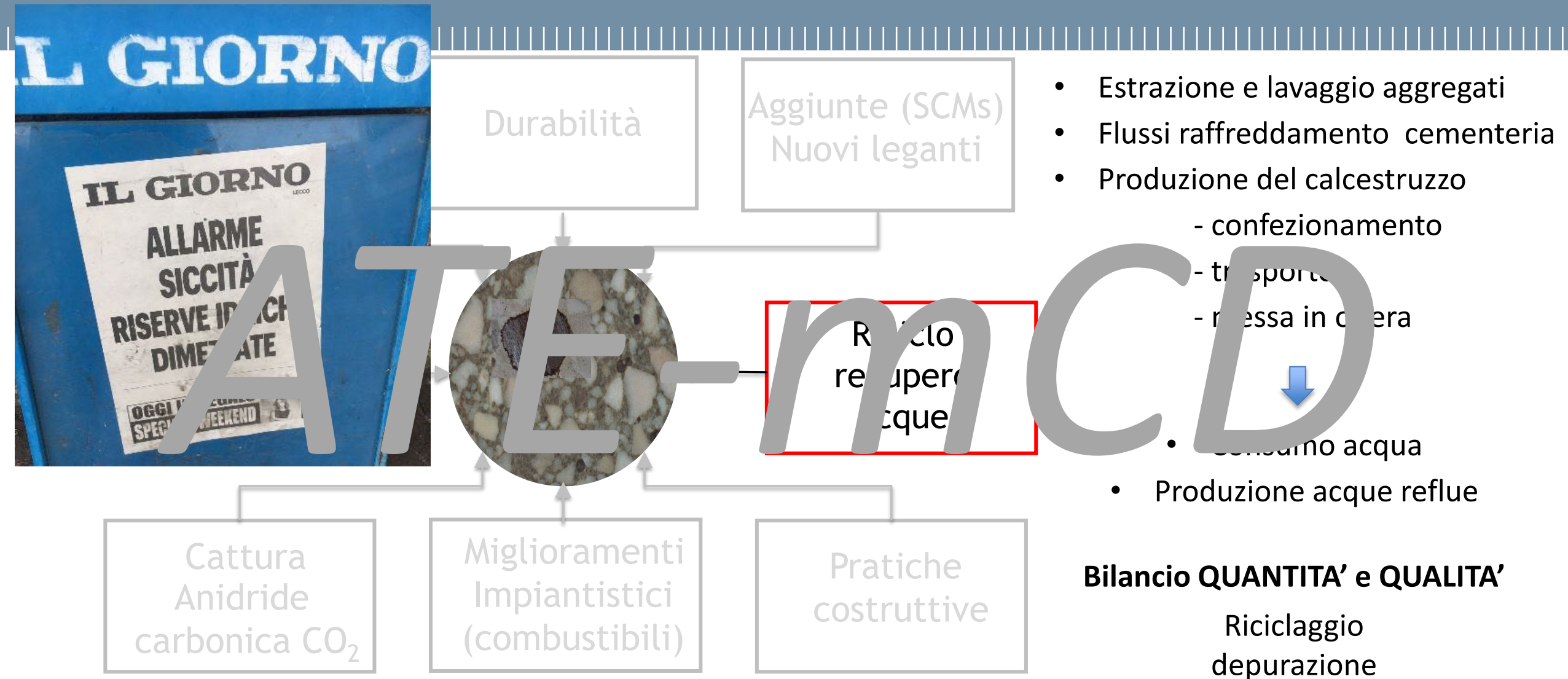
Casi di studio – Materiali cementizi

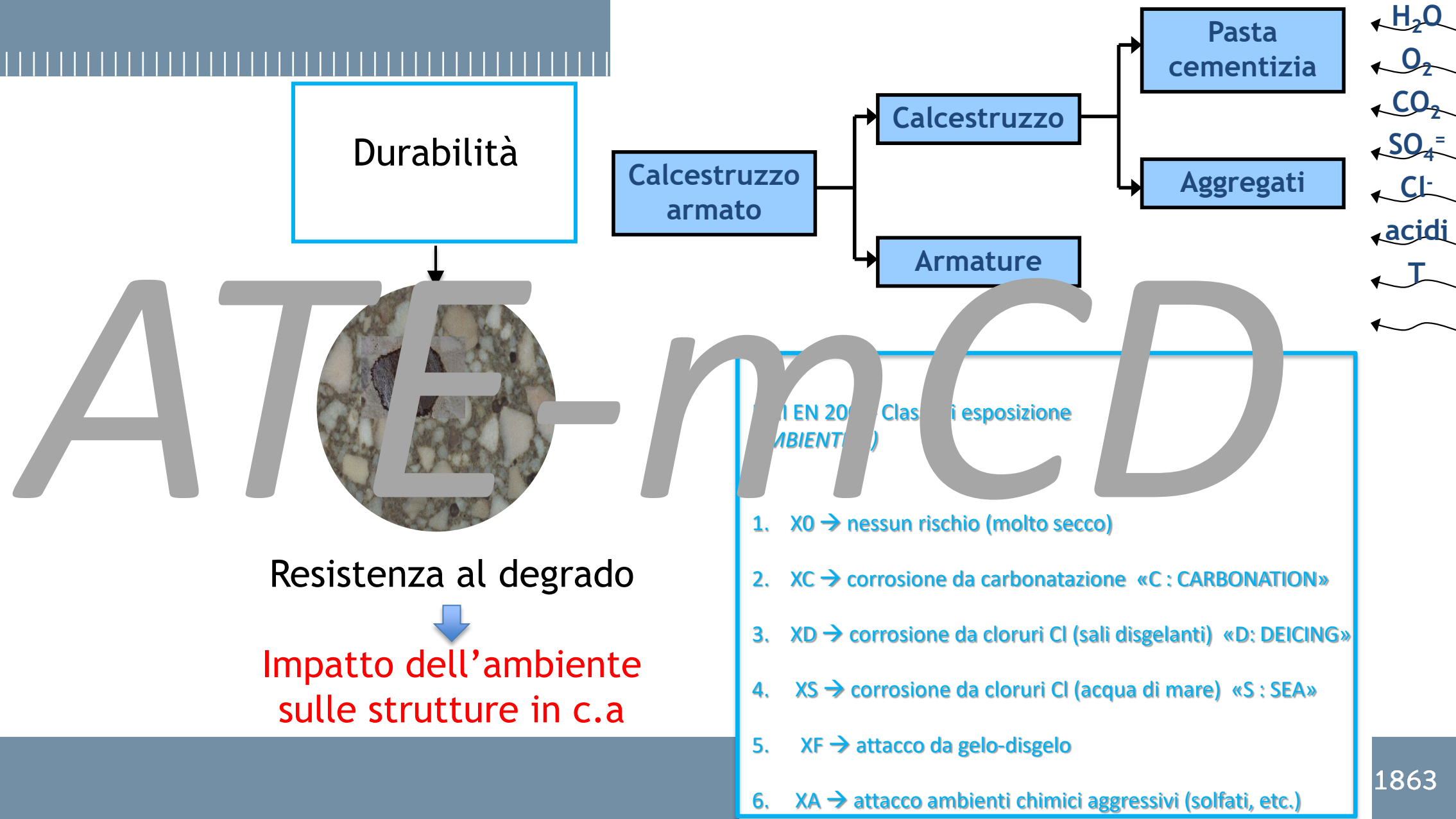
Terreno di scavo

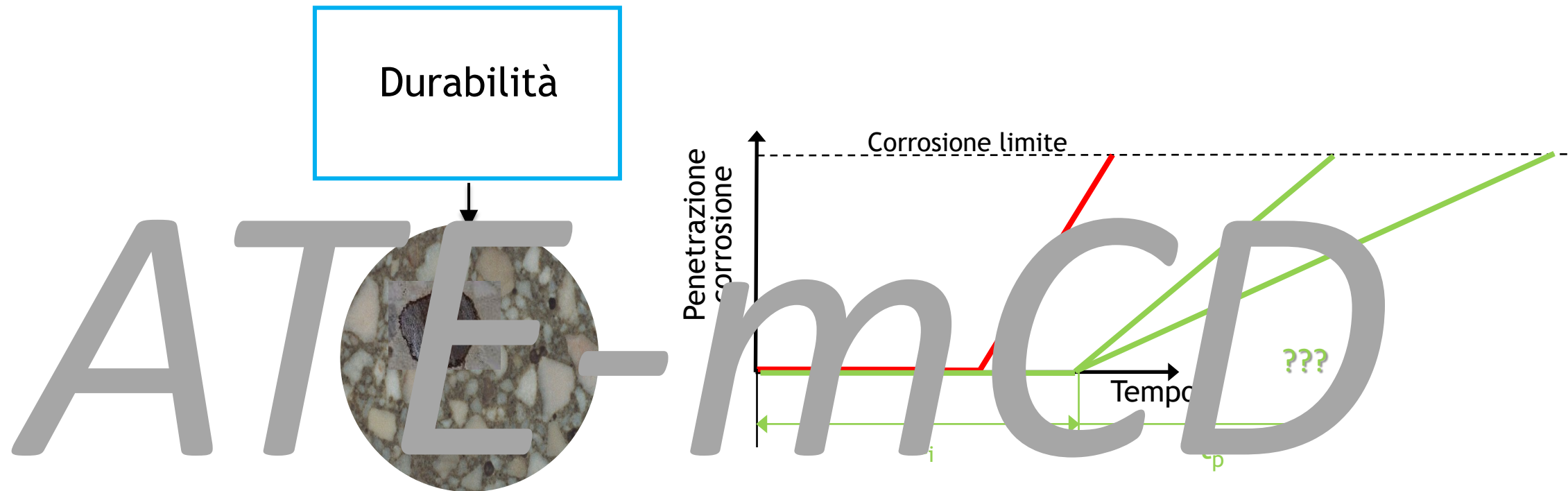
Demolizioni di strade

Macerie

Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (6)



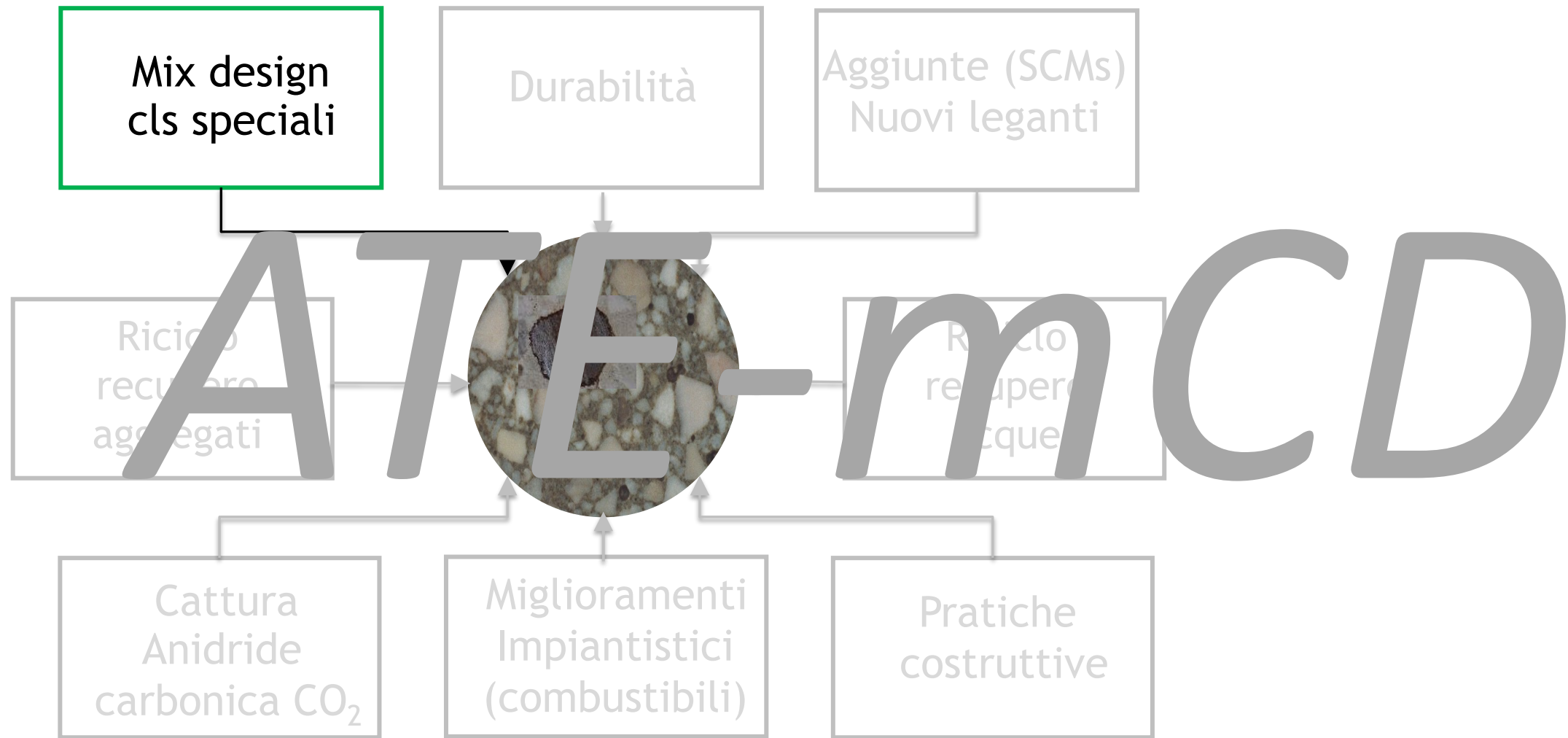




- Vita servizio (> 50 anni)
- Ambiente molto aggressivo

- diminuzione interventi di riparazione
- allungamento vita servizio
- contenimento nuove strutture

Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (9)



Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (10)

Mix design
cls speciali

Prescrizioni

Classe di
resistenza

Classe di
esposizione

Classe di
lavorabilità

Diametro
massimo degli
aggregati

Mix design



Ricetta

Cemento

Acqua

Aggregati

Additivi



Alcune scelte speciali:

- materiali impiegati
- composizione
- proprietà
- messa in opera

CL

SOSTENIBILI

Dagli
anni
'70 - '90



ADDITIVI + CLS SPECIALI

CLS ORDINARI

Cemento
Portland
1824

TEMPO (anni)

POLITECNICO MILANO 1863

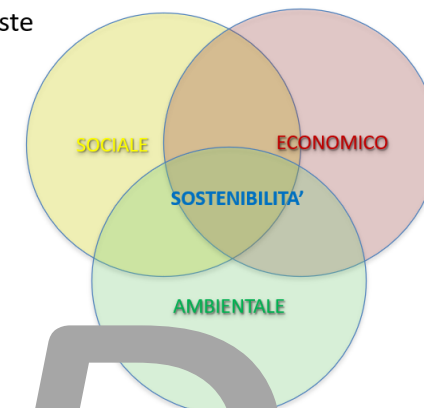
Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (10)

Mix design
cls speciali

Possibili soluzioni:

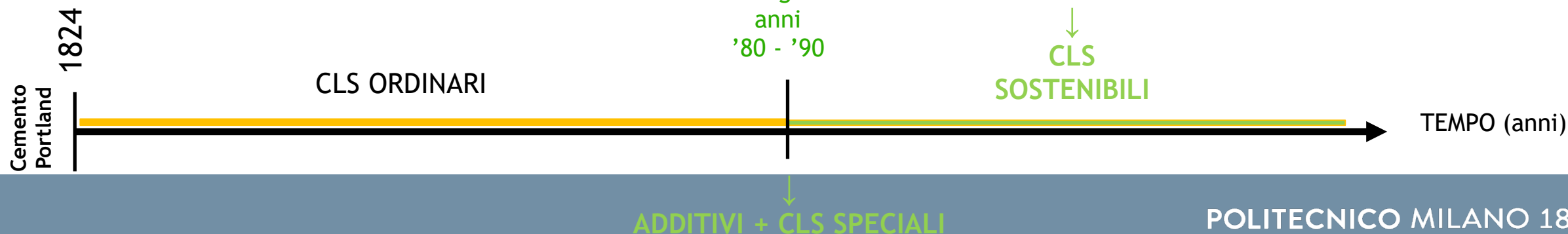
- scelta dei materiali e progettazione adeguata alle prestazioni richieste
- sfruttamento delle diverse proprietà dei materiali (es. strutturali, isolamento...)
- dimensionamento corretto
- allungamento della vita di progetto
- riduzione della pericolosità dei materiali
- «**End of waste**» (cessazione della qualifica rifiuto -> valorizzazione)

APPROCCIO OLISTICO
DELLA SOSTENIBILITÀ
(Concrete centre, 2007)



Alcune soluzioni speciali:

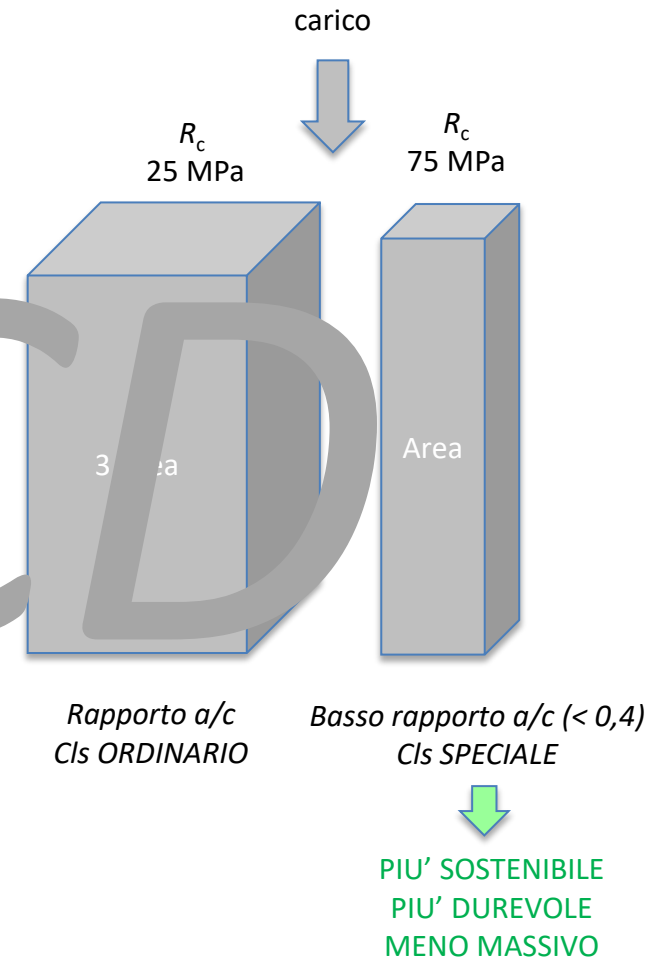
- materiali impiegati
 - composizione
 - proprietà
 - messa in opera



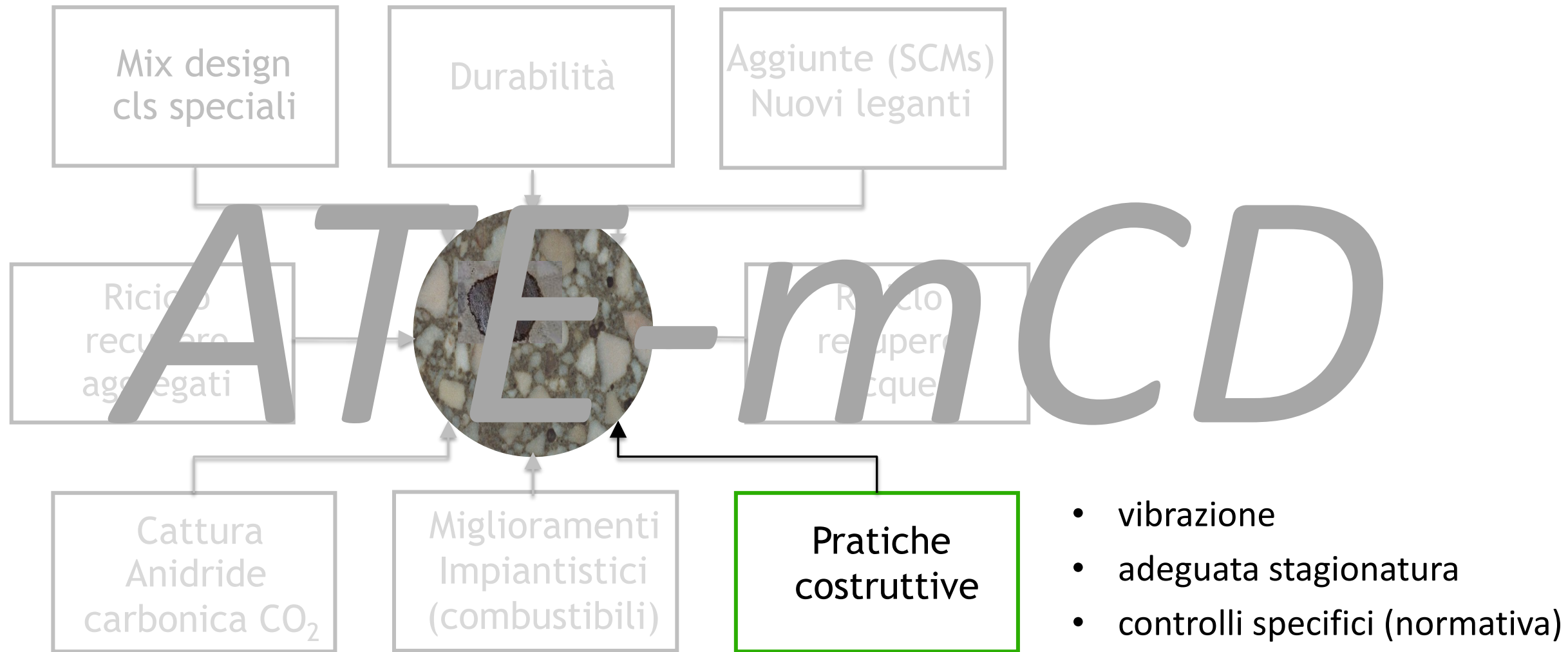
Mix design cls speciali

Il calcestruzzo ordinario

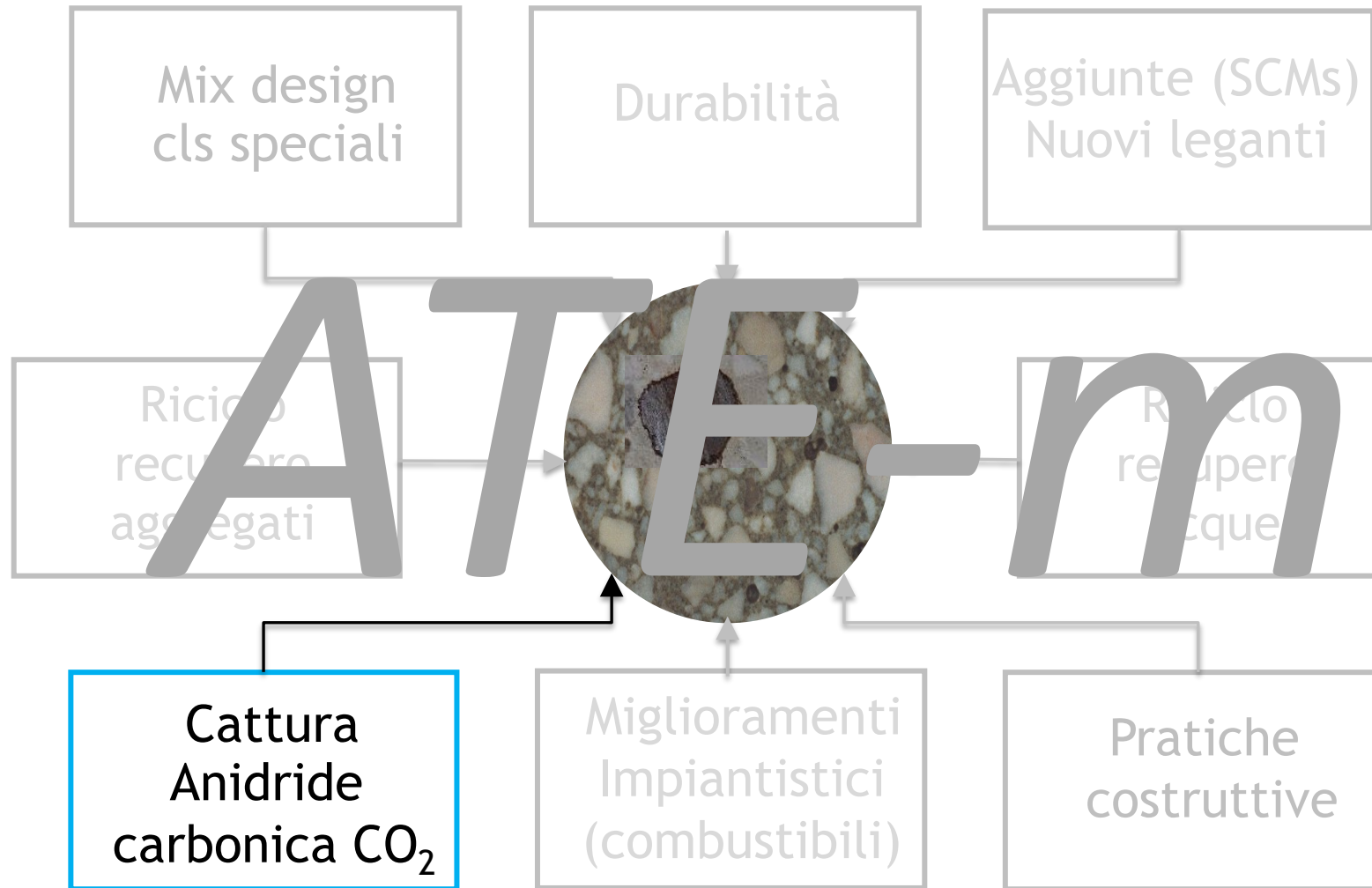
- porosità
- massa volumica
- fragilità (fessurazione)



Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (8)



Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (8)



- Capacità del calcestruzzo di assorbire CO₂



- Corrosione da carbonatazione se il **calcestruzzo è armato !!!!**
- Spessore carb = $K_{carb} \cdot (\text{tempo})^{1/2}$

Settore dei materiali cementizi – STRATEGIE SOSTENIBILI (8)

<https://www.heidelbergmaterials.com> (2025-09-25)



Cattura
Anidride
carbonica CO₂

Miglioramenti
Impiantistici

- Impianti di cattura e stoccaggio della CO₂
- Cementificio a basse emissioni (UK)

DECARBONIZZAZIONE (2050)

Ciclo di vita

Approccio
Ciclo di vita



Ruolo dei materiali cementizi sul ciclo di vita delle costruzioni

Approccio

Ciclo di vita
struttura



Riuso
Elementi strutturali funzionali

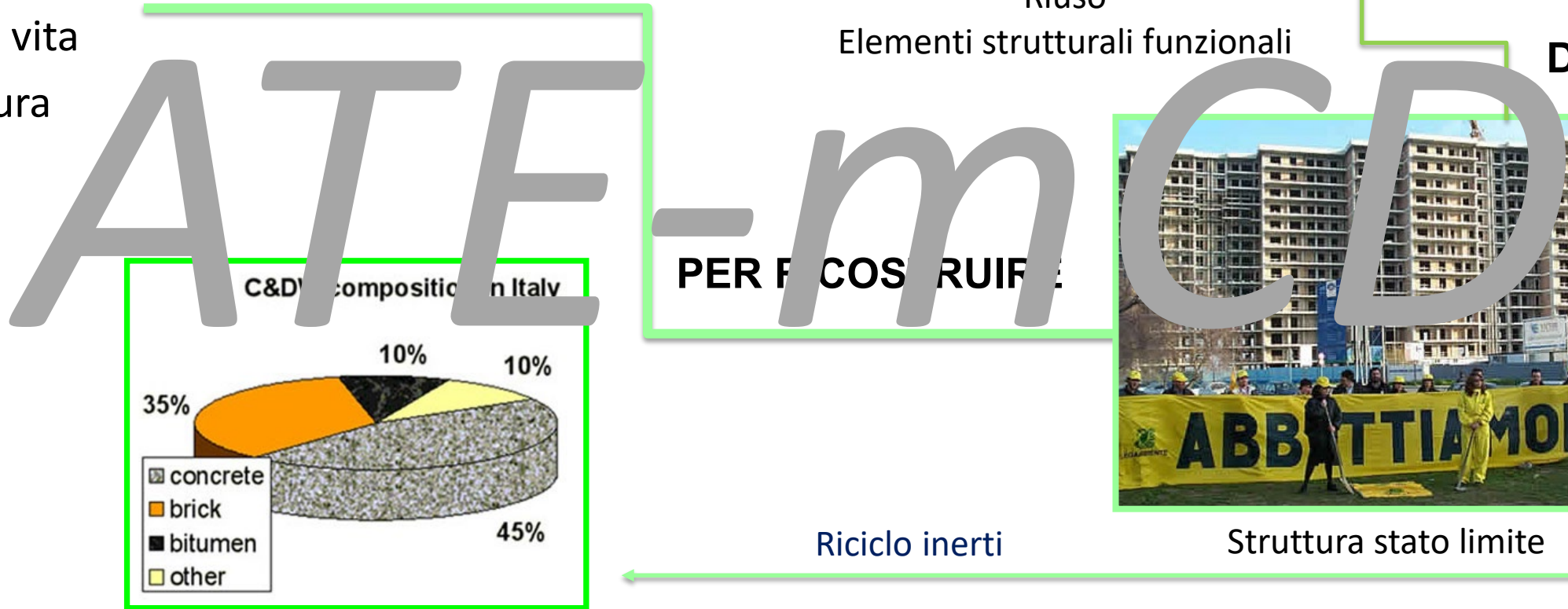
Decostruire



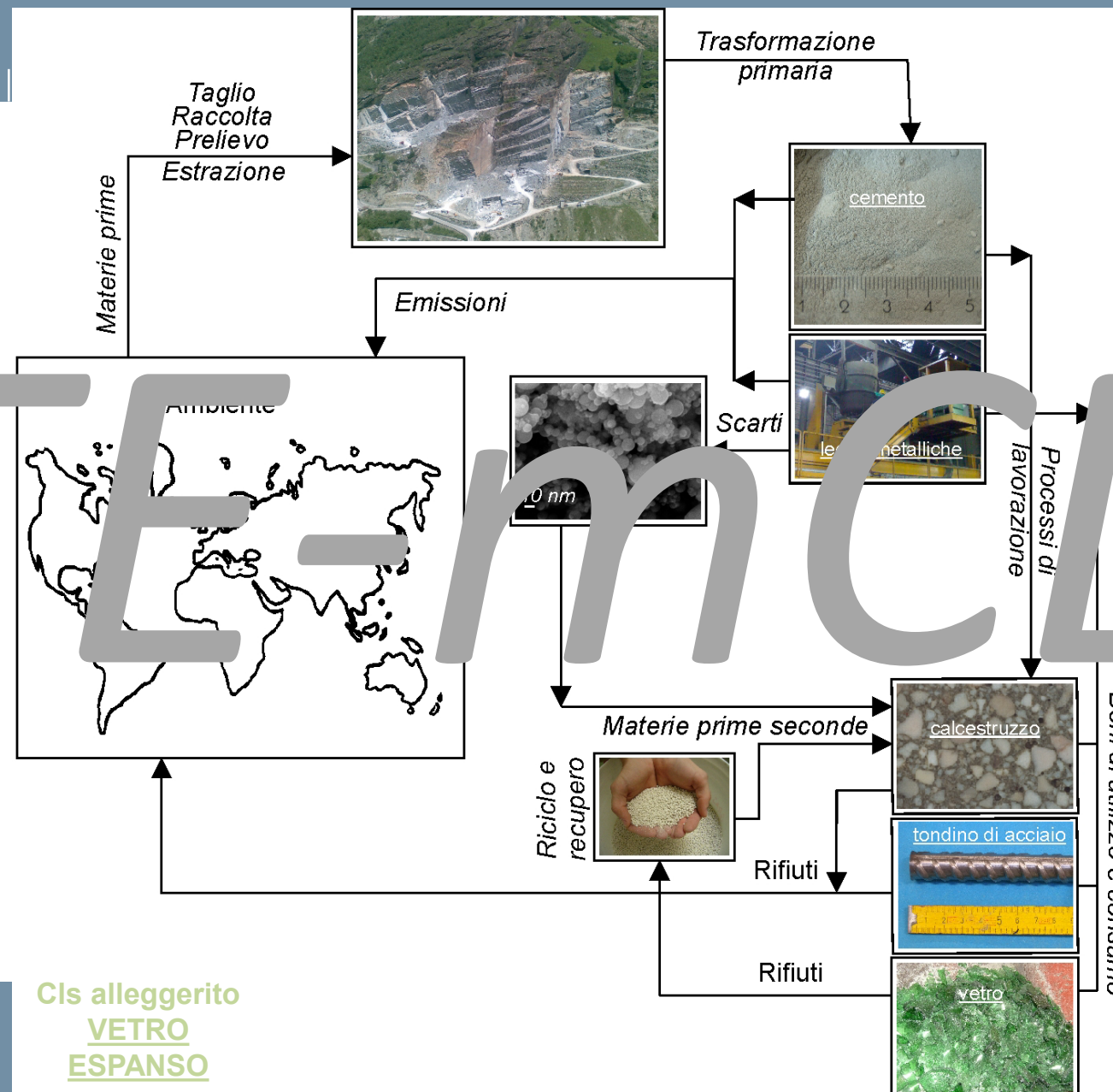
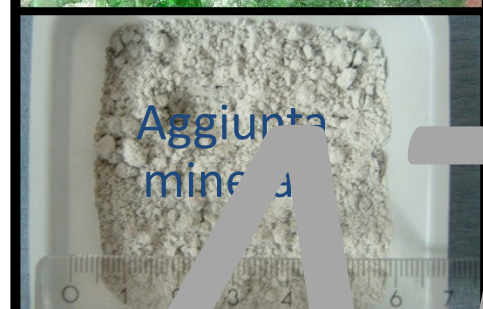
Demolire

Riciclo inerti

Struttura stato limite



Sviluppo calcestruzzo armato sostenibile



Il calcestruzzo deve essere progettati specificamente in funzione del tipo di applicazione, utilizzando le materie prime e le proporzioni più adatte, anche con lo scopo di tutelare il benessere delle generazioni future.

In effetti, la proprietà più interessante di tali materiali è che possono essere realizzati per soddisfare svariate combinazioni di prestazioni, molto più facilmente di altri materiali.

.....Quando si sarà presa coscienza della versatilità del calcestruzzo, forse, si potrà pensare anche di **abbandonare i tariffari al metro cubo** e si potranno **formulare tariffari** che considerano nuove unità di misura per le strutture: **1 MPa di resistenza meccanica, 1 anno del ciclo di vita di servizio, il costo energetico** per garantire una certa prestazione.

Se la percezione del calcestruzzo, anche nell'opinione pubblica, passerà da quella di un materiale che costa poco e che inquina tanto a un materiale adattabile che si può impiegare al suo meglio per ogni applicazione, anche l'ambiente e la qualità delle strutture in c.a ne trarranno vantaggio.....

Luca Bertolini, Materiali da Costruzioni, Vol. II, CittaStudi, 2014

Grazie dell'attenzione



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE
TECNOLOGI
PER L'EDILIZIA

