



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# CLASSE DI SOSTENIBILITA' AMBIENTALE PER IL CALCESTRUZZO AD USO STRUTTURALE

Prof. Ing. Luigi Coppola

Napoli, 17 Novembre 2023

# GREEN-HOUSE GAS EMISSIONS: CONCENTRAZIONE IN ATMOSFERA ED EMISSIONI COMPLESSIVE

Nel 2020 la concentrazione di CO<sub>2</sub> è risultata pari a **413.2 ppm** nel 2020  
**Δ (rispetto al periodo pre-industriale) = + 48-50%**

Nel 2022 le emissioni di CO<sub>2</sub> complessive sono risultate pari a **41-42 miliardi di ton (41 - 42Gt)**



## SETTORE EDILE: 10 Gt

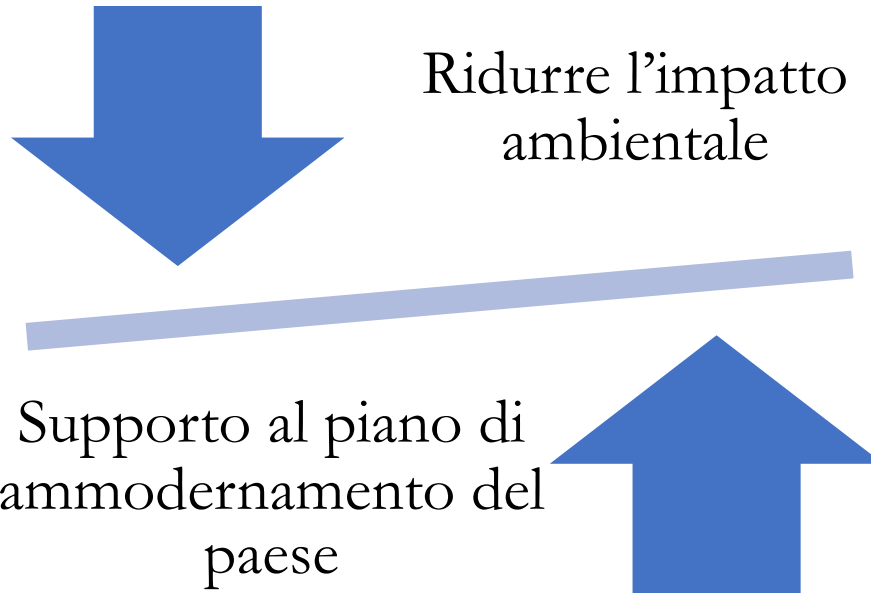
**Nel 2019 le emissioni di CO<sub>2</sub> del settore edile sono state le più alte mai registrate con circa 10 Gt di CO<sub>2</sub> all'anno**

- 24% sul totale**
- 28% di quella legata alla produzione di energia**



# SETTORE DELLE COSTRUZIONI IN ITALIA: ESIGENZE ANTITETICHE

È necessario rispondere a due esigenze palesemente antitetiche



Ridurre l'impatto ambientale

Supporto al piano di ammodernamento del paese





# I «NUMERI» DEL CALCESTRUZZO IN ITALIA – 33.1 mio m<sup>3</sup>

	2021	2020	2019
Produzione europea	413,6 milioni m <sup>3</sup>	383,6 milioni m <sup>3</sup>	372,4 milioni m <sup>3</sup>
Produzione italiana	35,8 milioni m <sup>3</sup>	28,7 milioni m <sup>3</sup>	28,4 milioni m <sup>3</sup>
Produzione pro capite EU	0,6 m <sup>3</sup> /persona	0,6 m <sup>3</sup> /persona	0,6 m <sup>3</sup> /persona
Produzione pro capite IT	0,7 m <sup>3</sup> /persona	0,7 m <sup>3</sup> /persona	0,7 m <sup>3</sup> /persona
Impianti di betonaggio IT	≈ 1800	≈ 1850	≈ 1900
Imprese produttrici in IT	≈ 850	≈ 900	≈ 1000
Addetti	≈ 11500	≈ 11500	≈ 12000
Produzione media per impianto	19,89 mila m <sup>3</sup>	15,49 mila m <sup>3</sup>	14,96 mila m <sup>3</sup>
Fatturato complessivo	2,911 miliardi €	2,348 miliardi €	2,472 miliardi €



# I «NUMERI» DEL CEMENTO IN ITALIA

Secondo il rapporto di filiera di Federbeton, in Italia, la produzione di cemento nel 2022, frutto del lavoro di 39 unità produttive classificate in «Officine di macinazione» e «Cementerie a ciclo completo», ha toccato il tetto dei **18.8 milioni di tonnellate**.



# I «NUMERI» DEL CEMENTO IN ITALIA

	2022		2021	
Tipo	tonnellate	%	tonnellate	%
I	2.269.986	12%	3.026.153	15%
II/A-L	9.011.222	48%	10.074.363	49%
II/B-L	4.038.447	21%	4.357.340	21%
II/B-M	126.277	1%	138.066	1%
II/B-P	141.686	1%	147.283	1%
III/A	792.578	4%	560.017	3%
III/B	48.843	0%	34.339	0%
IV/A	1.762.038	9%	1.525.074	7%
IV/B	498.535	3%	675.580	3%
V/A	106.928	1%	82.823	0%
<b>Totale Nazionale</b>	<b>18.796.540</b>	<b>100%</b>	<b>20.621.037</b>	<b>100%</b>

81%

4 %

12 %



# L'IMPATTO AMBIENTALE DEL CEMENTO PORTLAND

Estrazione  
calcare e argilla

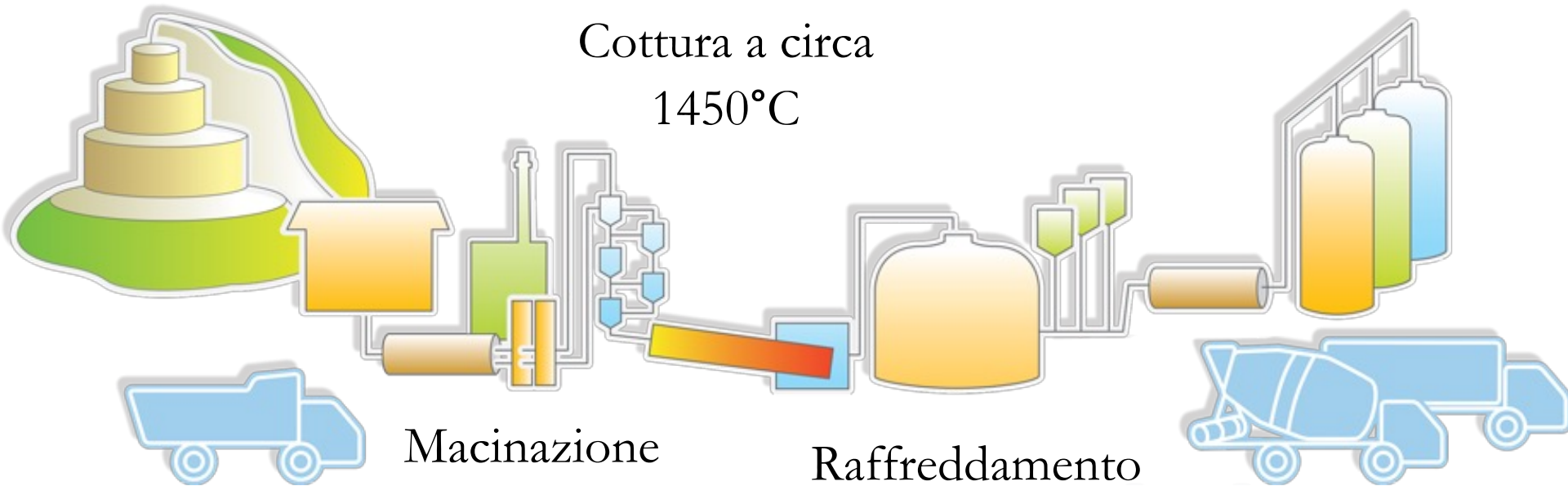
Stoccaggio e  
vendita

Cottura a circa  
 $1450^{\circ}\text{C}$

Macinazione

Raffreddamento  
e macinazione

Trasporto



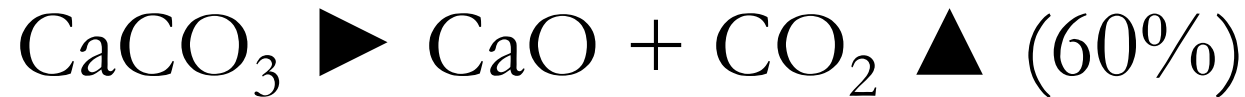
$$\text{GWP} = 0,98 \text{ kg CO}_2 / \text{kg cement}$$

In particolare, la **calcinazione dei carbonati rappresenta circa il 60%** della CO<sub>2</sub> emessa, mentre la restante CO<sub>2</sub> deriva dal **consumo di energia durante il processo produttivo**

# GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP) CEMENTO PORTLAND

**GWP (calcinazione)**

**0,59 kg CO<sub>2</sub> / kg cemento ptl**



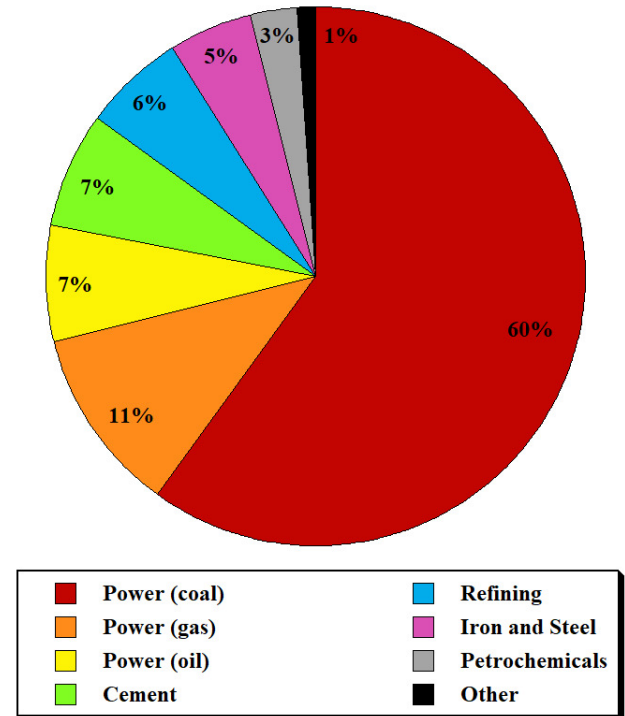
(se impiegassimo combustibili green a emissione zero di CO<sub>2</sub> comunque rimarrebbe un'impronta carbonica pari a circa 0,6 kg CO<sub>2</sub>/kg di cemento ptl)



# L'IMPATTO AMBIENTALE DEL CEMENTO E CALCESTRUZZO

Si stima che la produzione di calcestruzzo sia responsabile del 9% delle emissioni totali di gas serra (come tutte le centrali termoelettriche a petrolio), di cui il 7% attribuibile alla produzione del solo cemento.

Emissioni globali di CO<sub>2</sub>



Emissioni di CO<sub>2</sub> (GWP) : 0,98 kg<sub>CO2</sub>/kg

# L'IMPATTO AMBIENTALE DEL CEMENTO: EMISSIONI SPECIFICHE ANIDRIDE CARBONICA (2021)

- TASSO DI SOSTITUZIONE DEL CLINKER: 21%

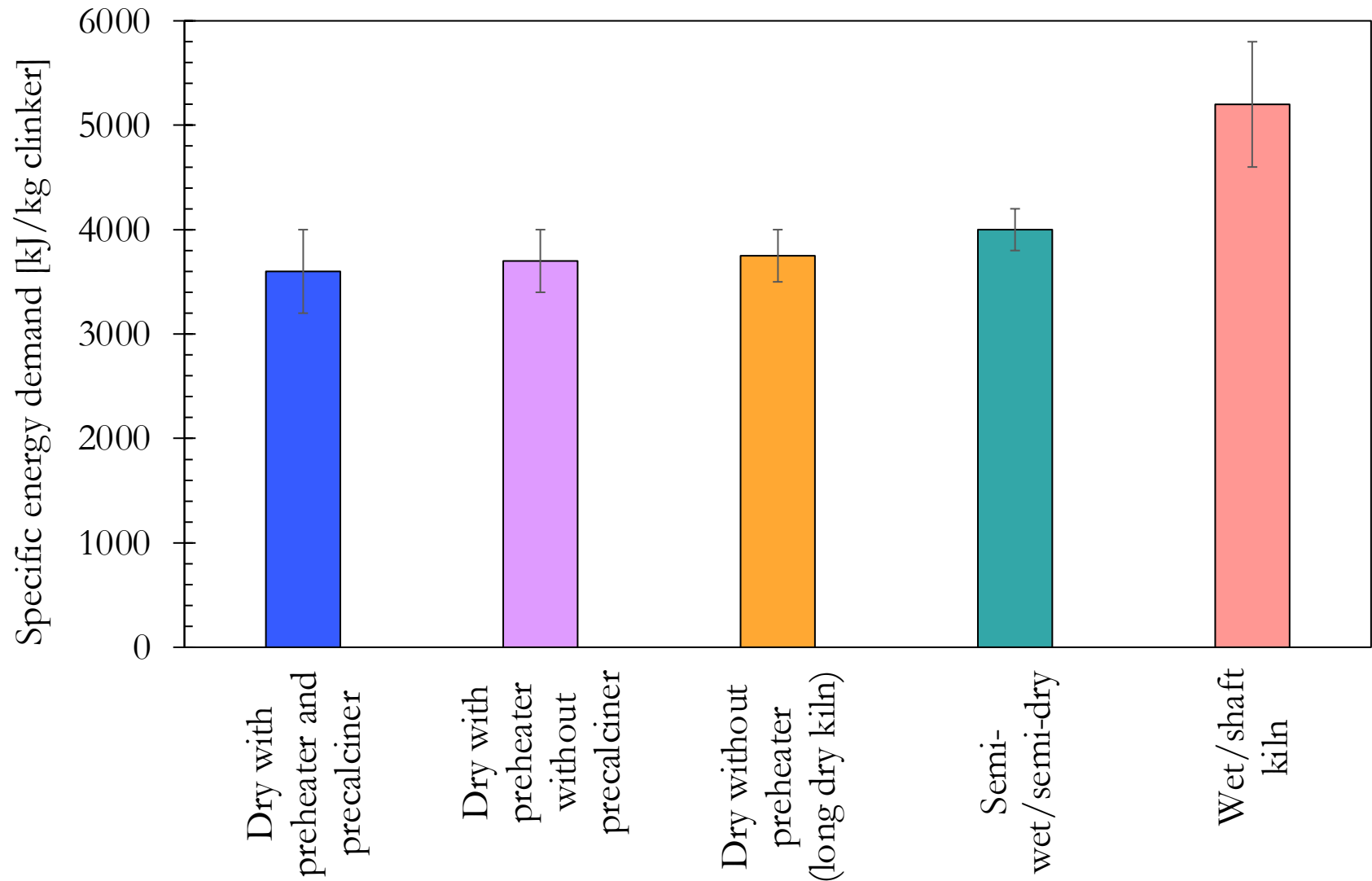
Emissioni di CO<sub>2</sub> (GWP) CLINKER : 0,807 kg<sub>CO2</sub>/kg

Emissioni di CO<sub>2</sub> (GWP) CEMENTO : 0,65 kg<sub>CO2</sub>/kg

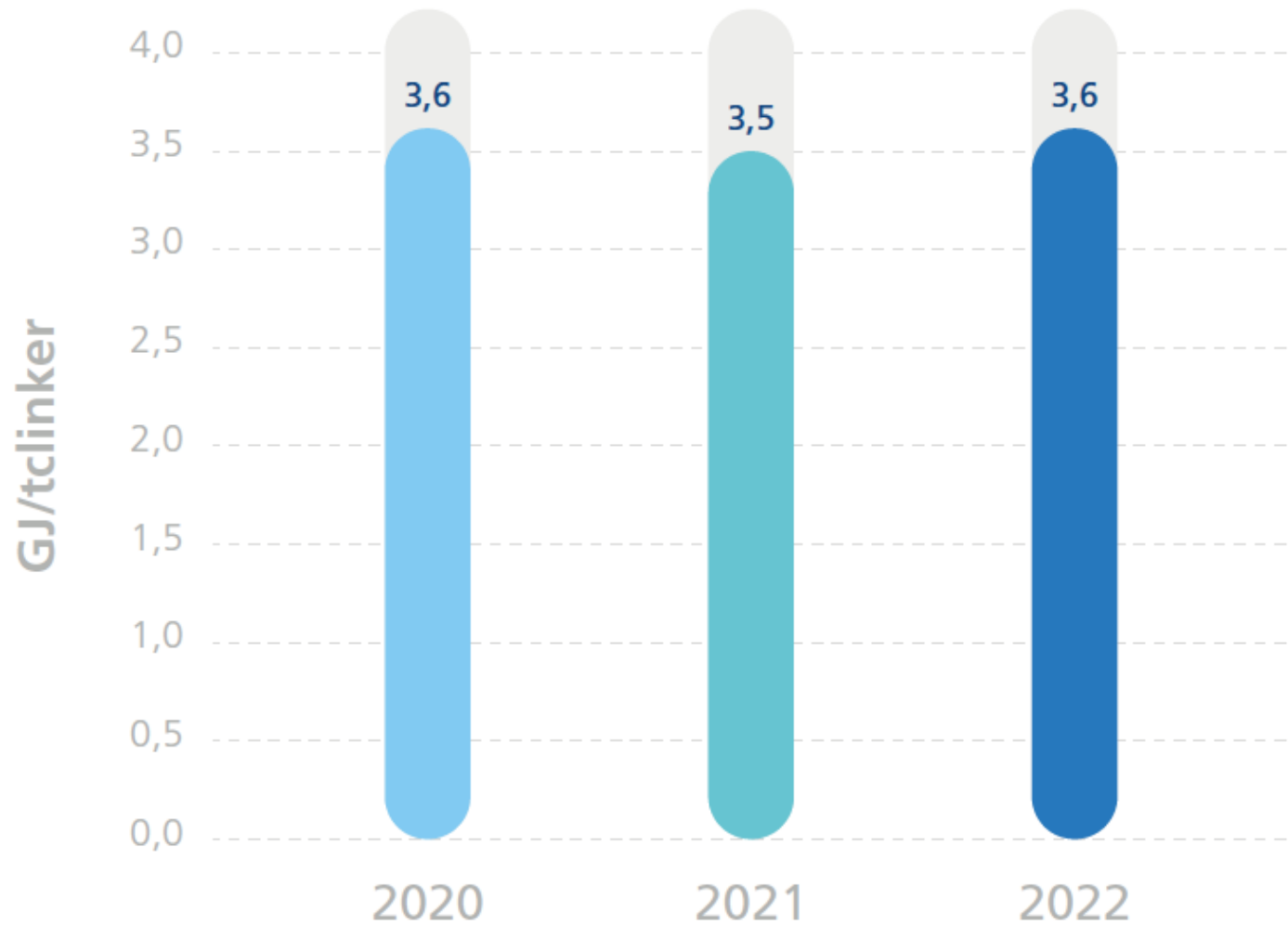




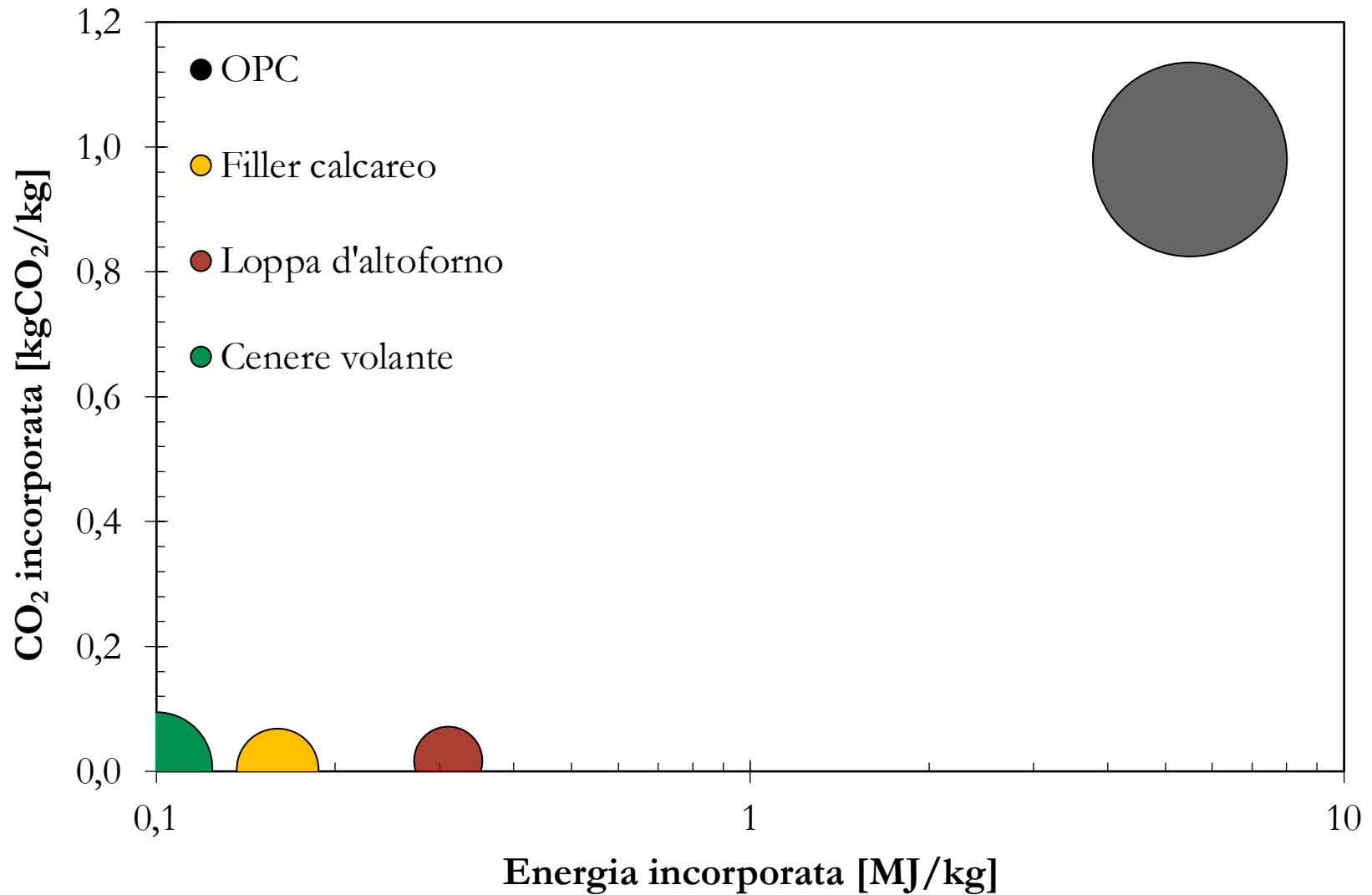
# GROSS ENERGY REQUIREMENT (GER)



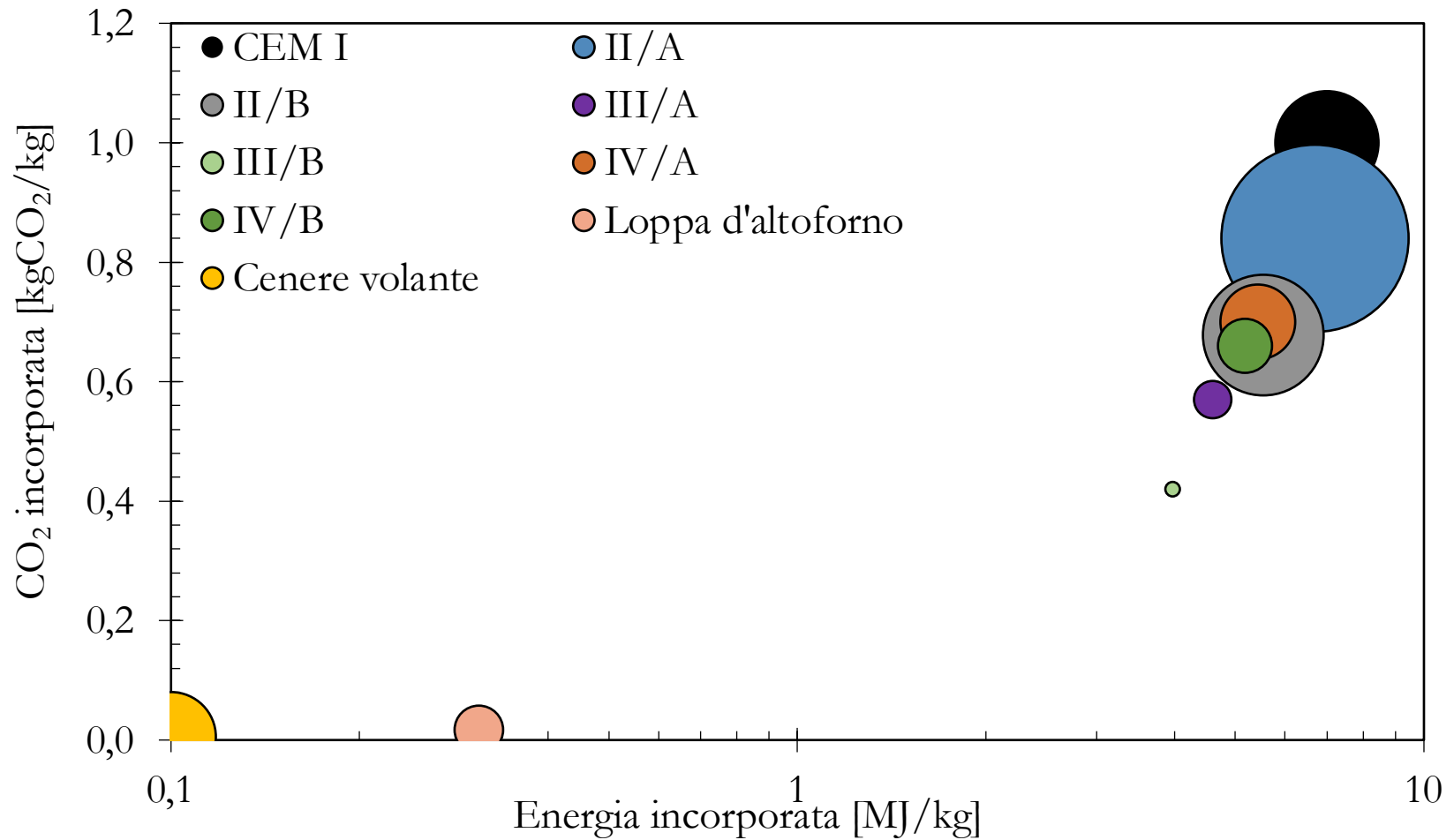
# L'IMPATTO AMBIENTALE DEL CEMENTO: Energia termica



# L'IMPATTO AMBIENTALE DEI LEGANTI E POZZOLANE



# GWP e GER: cementi tradizionali e materiali cementizi supplementari



# CEMENTI SOSTENIBILI EN 197-6

Table 1 — Cement with recycled concrete fines

Main types	Notation of the products (types of cement)		Composition (percentage by mass) <sup>a</sup>											Minor additional constituents
			Main constituents											
			Clinker	Recycled concrete fines	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone		
	natural	natural calcined					siliceous	calcareous	L <sup>c</sup>	LL <sup>c</sup>				
Type name	Type notation	K	F	S	D <sup>b</sup>	P	Q	V	W	T	L <sup>c</sup>	LL <sup>c</sup>		
CEM II	Portland-recycled-fines cement	CEM II/A-F	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-F	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Portland-composite cement <sup>d</sup>	CEM II/A-M	80-88	6-14	←----- 6-14 -----→								0-5	
		CEM II/B-M	65-79	6-29	←----- 6-29 -----→								0-5	
		CEM II/C-M	50-64	6-20	←----- 16-44 -----→								0-5	
	CEM VI	Composite cement	CEM VI	35-49	6-20	31-59	—	—	—	—	—	—	—	0-5
<sup>a</sup> The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents. <sup>b</sup> In case of the use of silica fume, the proportion of silica fume is limited to 6 % to 10 % by mass. <sup>c</sup> In case of the use of limestone, the proportion of the sum of limestone and recycled concrete fines (sum of L, LL and F) is limited to 35 % by mass. <sup>d</sup> The number of main constituents other than clinker is limited to two and these main constituents shall be declared by designation of the cement (for examples, see Clause 6). In case of the use of both F and (L or LL) in the composition, the number of main constituents other than clinker is limited to three and these main constituents shall be declared by designation of the cement.														



# CEMENTI SOSTENIBILI EN 197-5

prospetto 1 **Cemento Portland-composito CEM II/C-M e Cemento Composito CEM VI**

Tipi principali	Denominazione dei prodotti (tipi di cemento)		Composizione (percentuale in massa) <sup>a)</sup>										
			Costituenti principali										Costituenti secondari
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumo di silice	Pozzolana		Cenere Volante		Sciisto calcinato	Calcare		
						naturale	naturale calcinata	silicea	calcarea				
	Nome	Denominazione	K	S	D <sup>b)</sup>	P	Q	V	W	T	L <sup>c)</sup>	LL <sup>c)</sup>	
CEM II	Cemento Portland-composito <sup>d)</sup>	CEM II / C-M	50-64	-----36-50-----									0-5
CEM VI	Cemento Composito	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
<div>a) I valori nel prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.</div> <div>b) Qualora utilizzati, la proporzione di fumi di silice è limitata al 6-10% in massa.</div> <div>c) Qualora utilizzato, la proporzione di calcare (somma di L, LL) è limitata al 6-20% in massa.</div> <div>d) Il numero di costituenti principali diversi dal clinker è limitato a due e questi costituenti principali devono essere dichiarati nella designazione del cemento (per gli esempi vedere il punto 6).</div>													



# CEMENTI SOSTENIBILI EN 197-6

Table 1 — Cement with recycled concrete fines

Main types	Notation of the products (types of cement)		Composition (percentage by mass) <sup>a</sup>											Minor additional constituents
			Main constituents											
			Clinker	Recycled concrete fines	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone		
	natural	natural calcined					siliceous	calcareous	L <sup>c</sup>	LL <sup>c</sup>				
Type name	Type notation	K	F	S	D <sup>b</sup>	P	Q	V	W	T	L <sup>c</sup>	LL <sup>c</sup>		
CEM II	Portland-recycled-fines cement	CEM II/A-F	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-F	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Portland-composite cement <sup>d</sup>	CEM II/A-M	80-88	6-14	«----- 6-14 -----»								0-5	
		CEM II/B-M	65-79	6-29	«----- 6-29 -----»								0-5	
		CEM II/C-M	50-64	6-20	«----- 16-44 -----»								0-5	
	CEM VI	Composite cement	CEM VI	35-49	6-20	31-59	—	—	—	—	—	—	—	0-5

<sup>a</sup> The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents.

<sup>b</sup> In case of the use of silica fume, the proportion of silica fume is limited to 6 % to 10 % by mass.

<sup>c</sup> In case of the use of limestone, the proportion of the sum of limestone and recycled concrete fines (sum of L, LL and F) is limited to 35 % by mass.

<sup>d</sup> The number of main constituents other than clinker is limited to two and these main constituents shall be declared by designation of the cement (for examples, see Clause 6). In case of the use of both F and (L or LL) in the composition, the number of main constituents other than clinker is limited to three and these main constituents shall be declared by designation of the cement.

# CEMENTO COMPOSITO – CEM VI – EN 197-5 e EN 197-6

DENOMINAZIONE	K	S	P	V	L	LL	F
CEM VI (S-P)	35-49	31-59	6-20	-	-	-	
CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	
CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	6-20	-	
CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	6-20	
CEM VI (S-F)	35-49	31-59					6-20





# L'IMPATTO AMBIENTALE DEGLI AGGREGATI

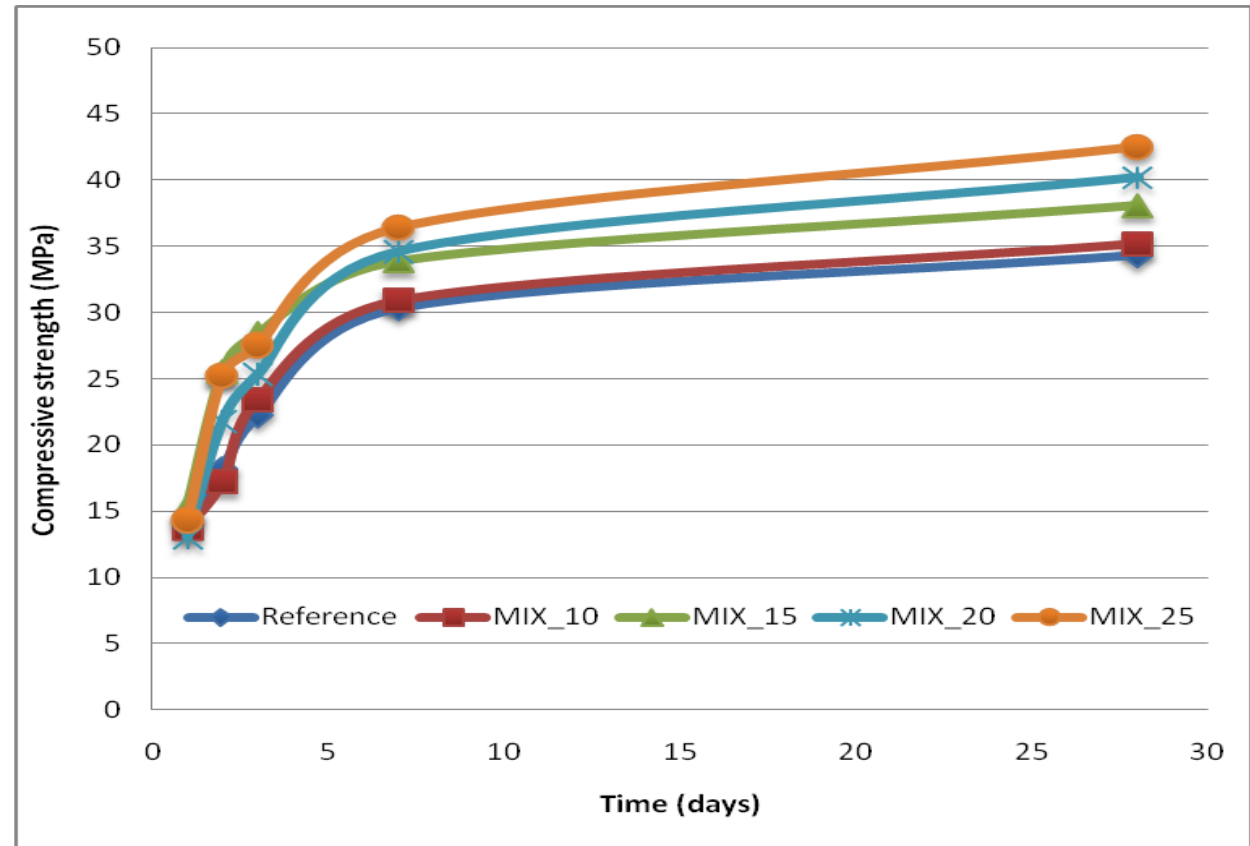
Ingredienti	GER [MJ/kg]	GWP [kgCO <sub>2</sub> /kg]
Cemento Portland	3.6 – 5.5	0.83-0.98
Additivi Superfluidificanti	26-31	1.0 – 2.0
CSHNS	26-31	1.1
<b>Aggregati tondeggiante</b>	<b><math>4.8 \cdot 10^{-2}</math></b>	<b><math>1.65 \cdot 10^{-3}</math></b>
<b>Aggregati frantumati</b>	<b><math>5.5 \cdot 10^{-2}</math></b>	<b><math>2.10 \cdot 10^{-3}</math></b>

Tasso di sostituzione: 0.44%

CONSUMO NAZIONALE AGGR. = 62.6 mio ton



# AGGREGATI DA RICICLO O DI ORIGINE ARTIFICIALE



## Destinazione finale degli aggregati riciclati prodotti dagli impianti di trattamento - 2018

**ECONOMIA CIRCOLARE**

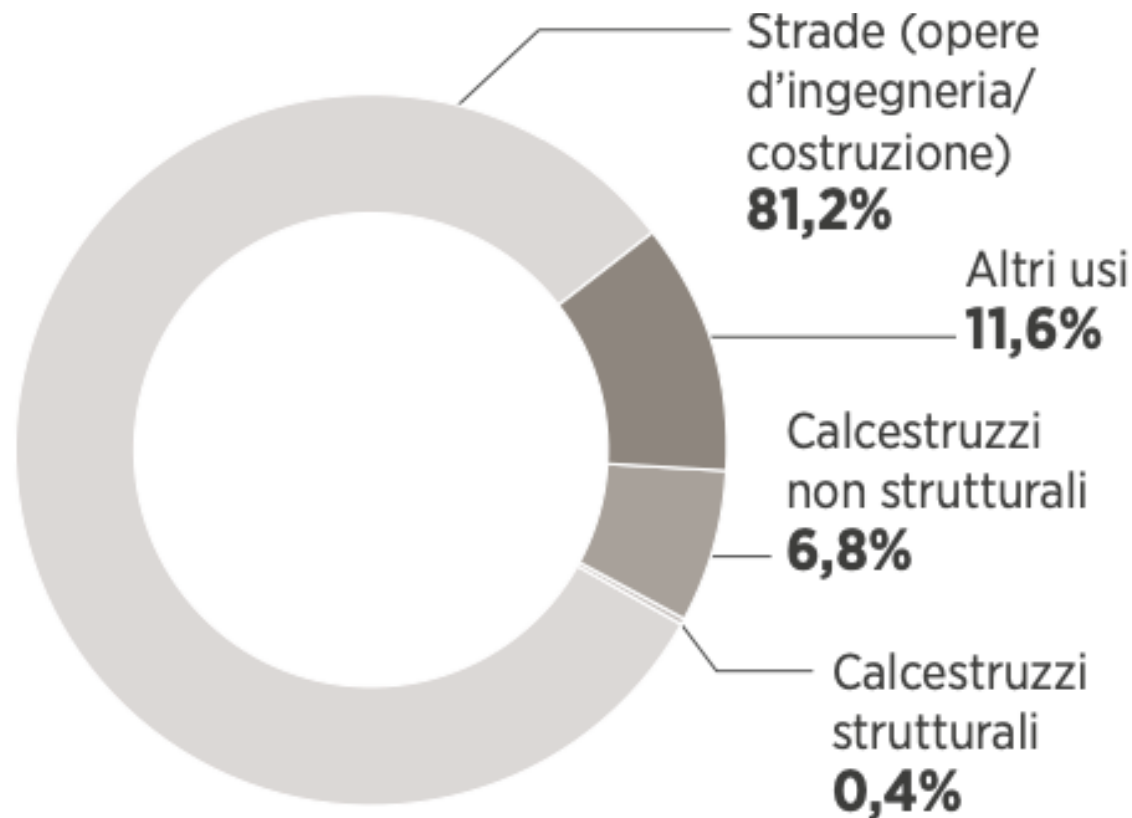
L'Italia capofila in Europa nel riciclo di rifiuti edili. E ora serve un cambio di passo

Alexis Paparo — a pag. 8

**80%**

**TASSO DI RECUPERO**  
La percentuale di materia derivante da attività di costruzione e demolizione recuperata in Italia nel 2021 (+21,7% sul 2020). I dati, in anteprima, arrivano dal rapporto Rifiuti Speciali Ispra 2023

**Rifiuti edili, l'Italia recupera l'80%**



# IMPATTO AMBIENTALE DEGLI ADDITIVI

Ingredienti	GER [MJ/kg]	GWP [kgCO <sub>2</sub> /kg]
Cemento Portland	3.6 – 5.5	0.83-0.98
<b>Additivi Superfluidificanti</b>	<b>26-31</b>	<b>1.0 – 2.0</b>
<b>CSHNS</b>	<b>26-31</b>	<b>1.1</b>
Aggregati tondeggianti	$4.8 \cdot 10^{-2}$	$1.65 \cdot 10^{-3}$
Aggregati frantumati	$5.5 \cdot 10^{-2}$	$2.10 \cdot 10^{-3}$



# LA FILIERA DEGLI ADDITIVI PER CALCESTRUZZI

- Dosaggio medio di additivo per  $\text{m}^3$  pari a: 3.53 kg (circa 5 kg di  $\text{CO}_2/\text{m}^3$ )
- riduzione acqua 20% - circa  $40\text{kg}/\text{m}^3$  in meno
- circa  $70\text{ kg}/\text{m}^3$  in meno di cemento e, quindi, una riduzione di  $\text{CO}_2$  di circa  $45\text{ kg}/\text{m}^3$ )



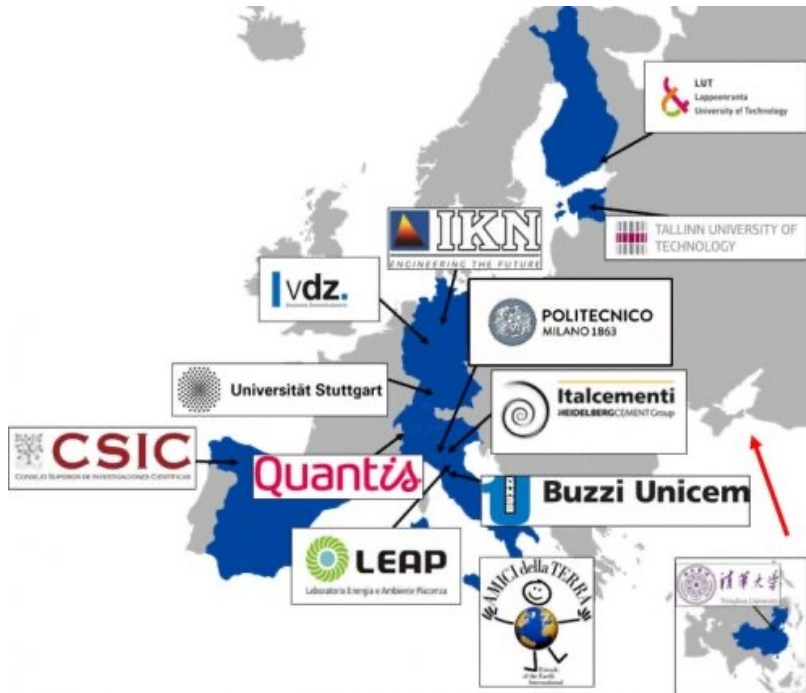
# 2030 PORTLAND CEMENT DEMAND: 2 Gt

- Demand for cement (2030): 4.8 Gt
  - Fly ash available: 1.5 Gt
  - Blast furnace slag available: 0.3 Gt
  - Demand for cement (2030): 3.0 Gt
  - Replacement rate with natural limestone/pozzolans: (0.75 Gt)
  - Other binders (i.e. calcium sulphoaluminate cement): 0.25 Gt
- Clinker to be produced: 2 Gt

**NO. NON E' POSSIBILE**  
**SOSTITUIRE IL CEMENTO**  
**PORTLAND**



# IL CARBON CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE (CCUS)



## Progetto CLEANker

Tecnologia implementata nella  
cementeria Buzzi Unicem di **Vernasca**  
(**Piacenza**) da 1300 kton/anno.

09.10.2020



CLEAN clinker by calcium  
looping for low-CO<sub>2</sub> cement

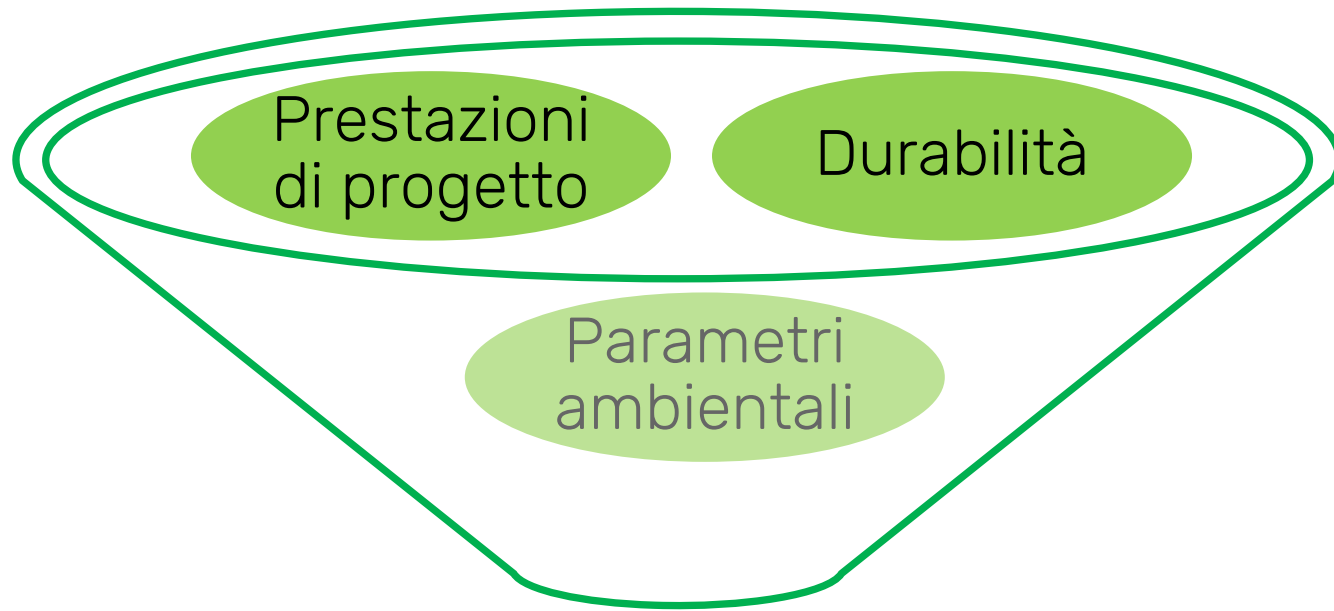
**CLEANker**



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# EASI (EMPATHETIC ADDED SUSTAINABILITY INDEX)



$$EASI = \frac{n \cdot \prod_1^n Prestazione \cdot \prod_1^n Durabilita'}{\sum_1^n Impatto ambientale}$$

Empatia [comp. del gr. ἐν «in» e -patia,]. In psicologia, in generale, la capacità di comprendere lo stato d'animo e la situazione emotiva di un'altra persona, in modo immediato, prevalentemente senza ricorso alla comunicazione verbale. Più in particolare., il termine indica quei fenomeni di partecipazione intima e di immedesimazione attraverso i quali si realizzerebbe la comprensione estetica.



# EASI (EMPATHETIC ADDED SUSTAINABILITY INDEX)

$$\prod_1^n Performance$$

Le “Performance” vengono selezionate in relazione alle specifiche proprietà elastiche e fisiche dei materiali da costruzione.



# EASI (EMPATHETIC ADDED SUSTAINABILITY INDEX)

$$\prod_1^n \textit{Durability}$$

La “Durability” prende in esame le proprietà del materiale da costruzione in relazione ai potenziali attacchi aggressivi cui è esposto in servizio unitamente ai ferri di armatura.



# ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION (EPD)

Dichiarazione Ambientale di Prodotto (Environmental Product Declaration) è uno schema di certificazione volontario, nato in Svezia ma di valenza internazionale.

Le prestazioni, riportate nella EPD, devono basarsi sull'Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment LCA). L'obiettivo principale di una EPD è quello di fornire informazioni rilevanti, verificate e confrontabili relative all'impatto ambientale di un prodotto o di un servizio.

Production stage			Construction stage		Use stage							End of life stage				Other environmental information
Raw materials supply	Transport	Manufacturing	Transport	Construction	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	Demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recovery - Recycling potential
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
x	x	x	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND



# ESEMPIO DI ALCUNI PARAMETRI EPD

PARAMETRO	UNITA' DI MISURA	DEFINIZIONE
GWP	Kg CO <sub>2</sub> eq	Potenziale di riscaldamento globale
ODP	Kg CFC <sub>11</sub> eq E <sup>-8</sup>	Potenziale di riduzione dello strato di ozono stratosferico
POCP	Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	Potenziale di formazione di ozono troposferico
AP	Kg SO <sub>2</sub> eq	Potenziale di acidificazione del suolo e dell'acqua
EP	kgPO <sub>4</sub> <sup>+</sup> eq	Potenziale di eutrofizzazione
ADPE	Kg Sb eq E <sup>-4</sup>	Potenziale di esaurimento abiotico delle risorse non fossili
ADPF	MJ	Potenziale di esaurimento abiotico delle risorse fossili
PERE	MJ	Uso di energia primaria rinnovabile escludendo le risorse energetiche usate come materie prime
PERM	MJ	Uso di risorse energetiche primarie rinnovabili usate come materie prime
PERT	MJ	Uso totale di risorse energetiche primarie rinnovabili
PENRE	MJ	Uso di energia primaria non rinnovabile senza le risorse energetiche primarie non rinnovabili usate come materie prime
PENRM	MJ	Uso di risorse energetiche primarie non rinnovabili usate come materie prime
PERNT	MJ	Uso totale di risorse energetiche primarie non rinnovabili usate come materie prime
SM	MJ	Uso di risorse materiali secondarie
RSF	MJ	Uso di combustibili secondari rinnovabili
NRSF	MJ	Uso di combustibili secondari non rinnovabili
FW	m <sup>3</sup>	Consumo diretto di acqua
MFR	kg	Materiali a riciclo



L'obiettivo che ci si è posti in questa analisi è quello di inserire all'interno di questo modello matematico fondato su dati sperimentali e bibliografici dei **dati riportati nelle EPD** dei diversi prodotti utilizzati per realizzare il calcestruzzo

$$EASI - EPD = \frac{4 \cdot \left(C \frac{X}{Y}\right) \cdot \frac{1}{D_{appCO_2}} \cdot \frac{1}{D_{appCl^-}} * N(85\%)}{\sum_1^n (GWP + PERNT + FW + NRMC)}$$

# Range GWP per tipologia di cemento

Tipo di cemento	Range		
	GWP min [kg/ton]	GWP max [kg/ton]	GWP medio di tutte le cementerie [kg/ton]
I 52.5R	778	1028	923
I 42.5R	906	927	915
II/A-LL 42.5R	742	934	829
II/A-LL 32.5R	739	802	766
IV/A(P-V) 42.5N SR	749	788	769
IV/A(P) 42.5R SR	726	790	760
IV/A(P) 42.5N SR	661	764	711
IV/A(V) 32.5R	664	743	708
II/B-LL 32.5R	499	789	686
IV/A(V) 42.5R SR	529	769	674

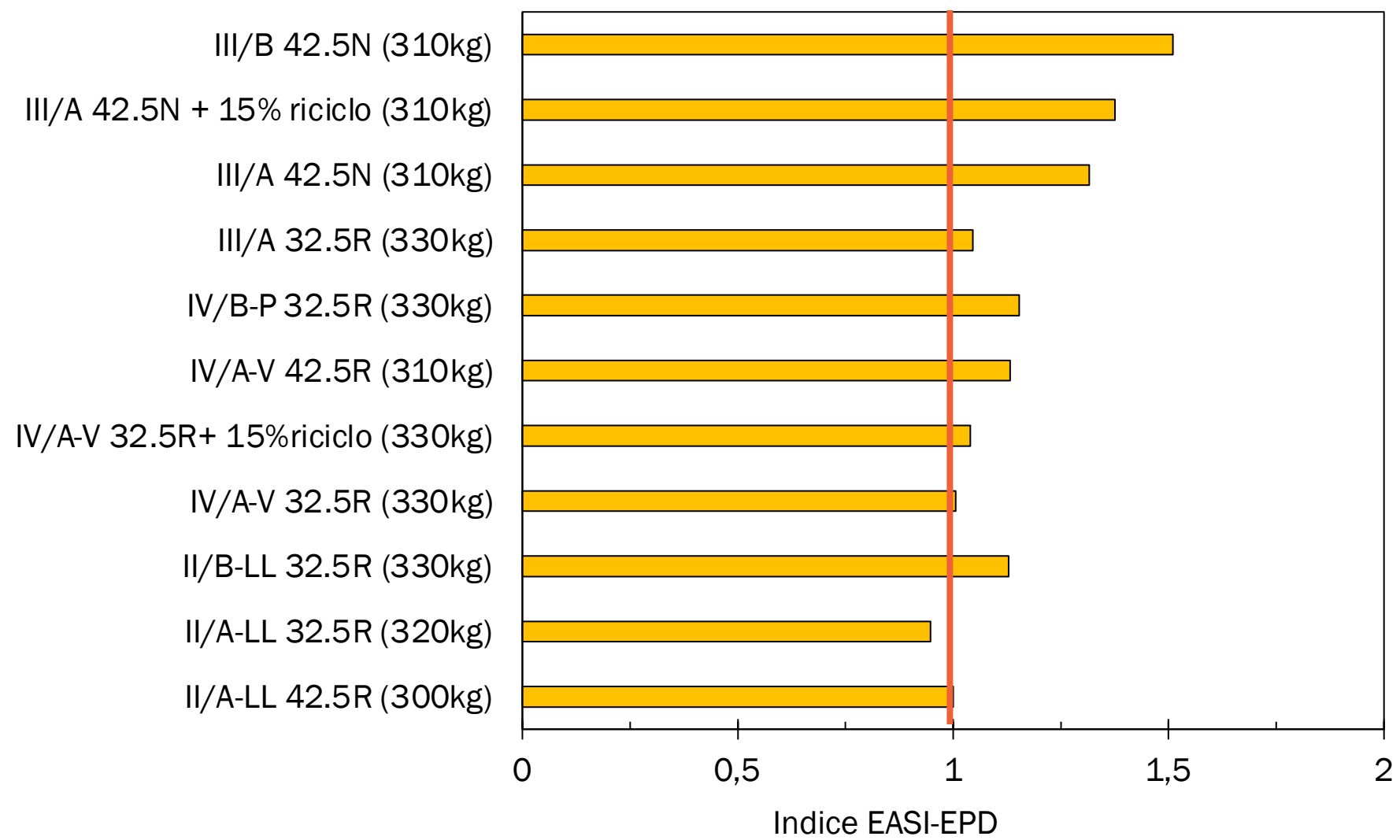


# Range GWP per tipologia di cemento

Tipo di cemento	Range		
	GWP min [kg/ton]	GWP max [kg/ton]	GWP medio di tutte le cementerie [kg/ton]
IV/A(P) 32.5R SR		645	645
II/B-P 32.5R		644	644
III/A 42.5R		619	619
II/B-LL 42.5R		612	612
IV/B(V) 32.5R LH/SR	547	641	593
IV/B(P) 32.5R LH/SR	554	645	592
III/A 32.5R LH	531	627	579
III/A 42.5 N	545	624	573
IV/A-V 32.5N-LH		549	549
IV/B(V-Q) 32.5N-LH		541	541
III/A 32.5N LH	504	540	522
III/B 42.5N LH/SR	353	477	391

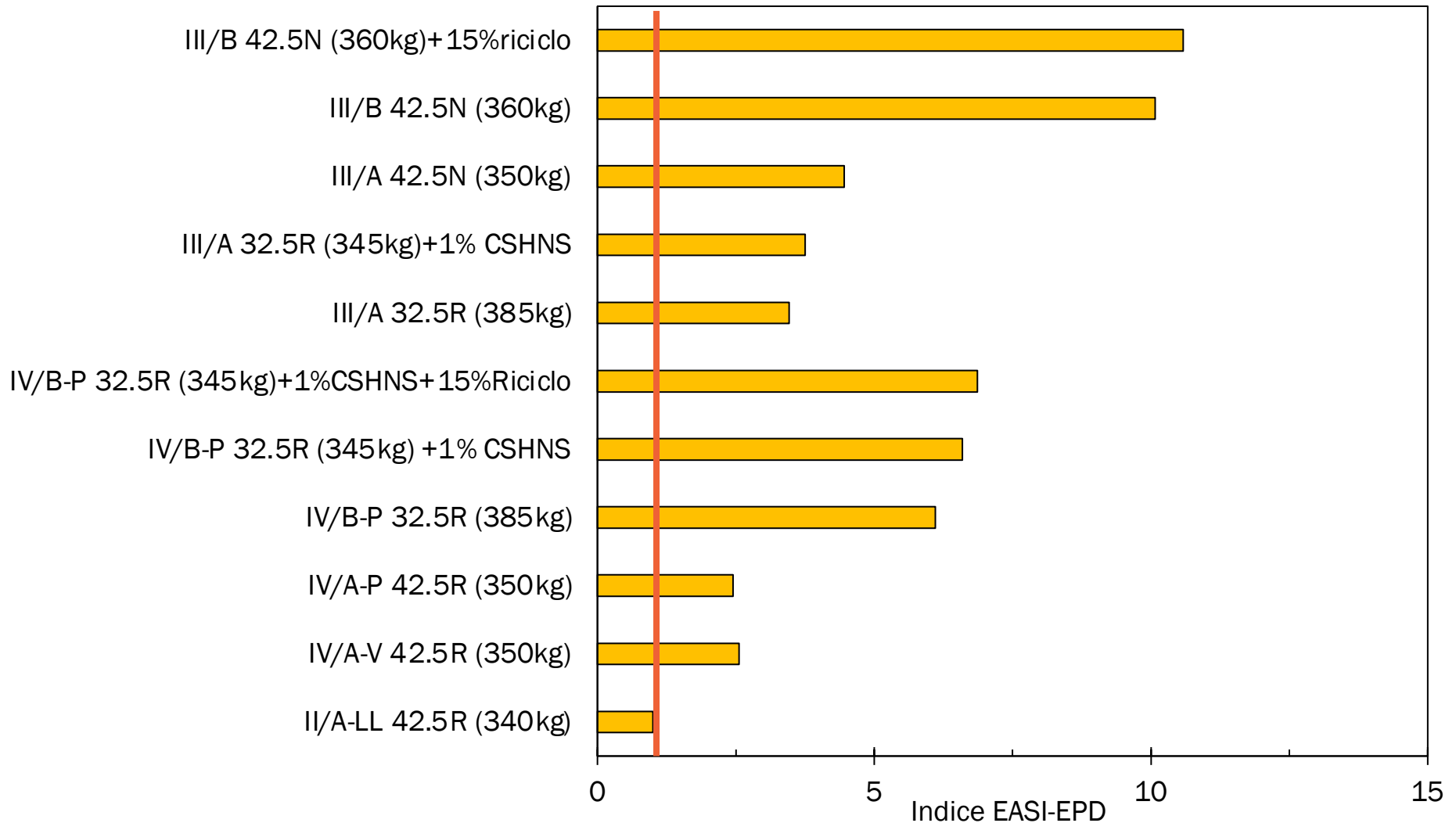


EASI-EPD:XC1-XC2 – C25/30 –  $a/c_{max} = 0.60$  –  $C_{min} = 300 \text{ kg/m}^3$

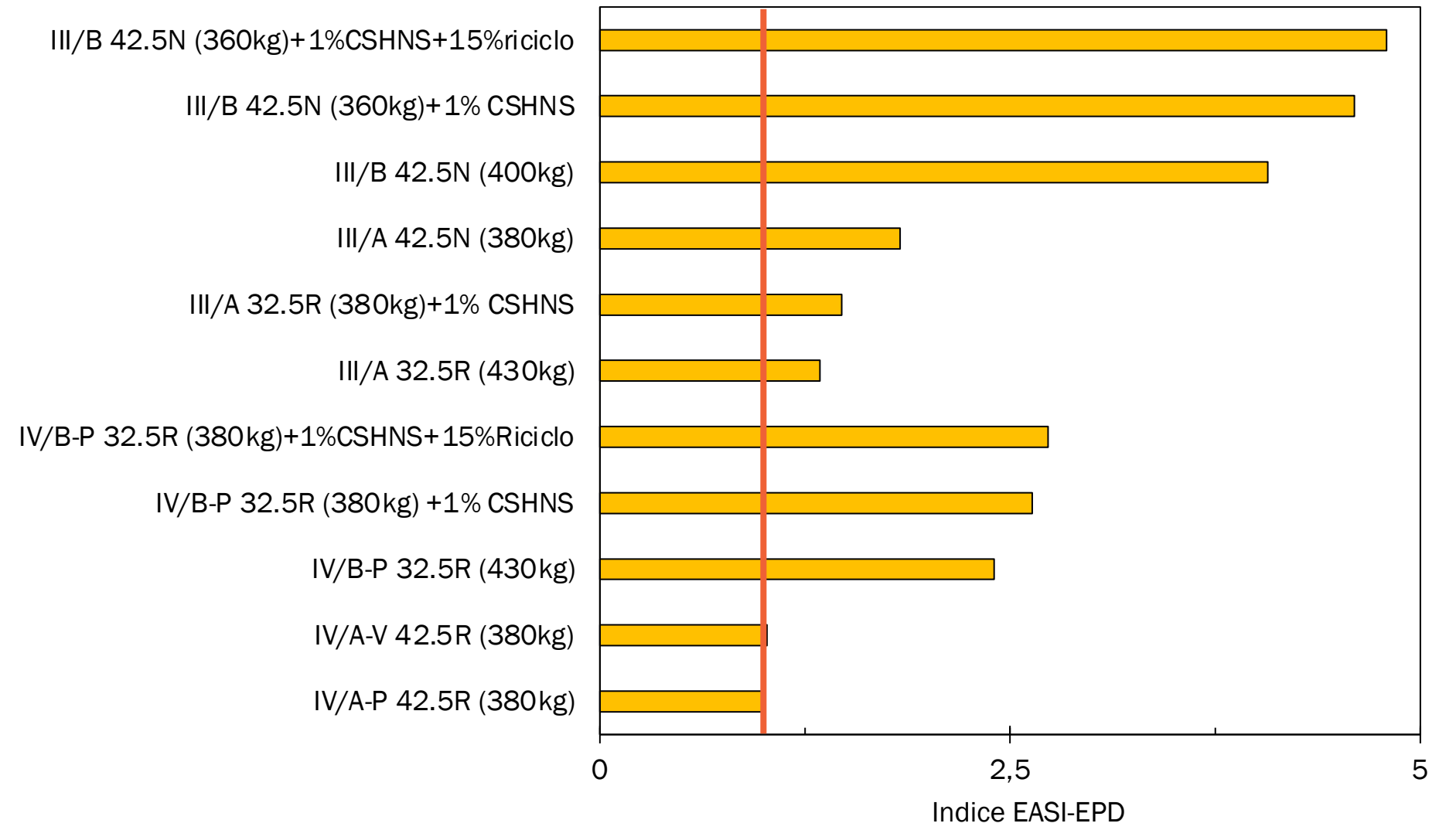




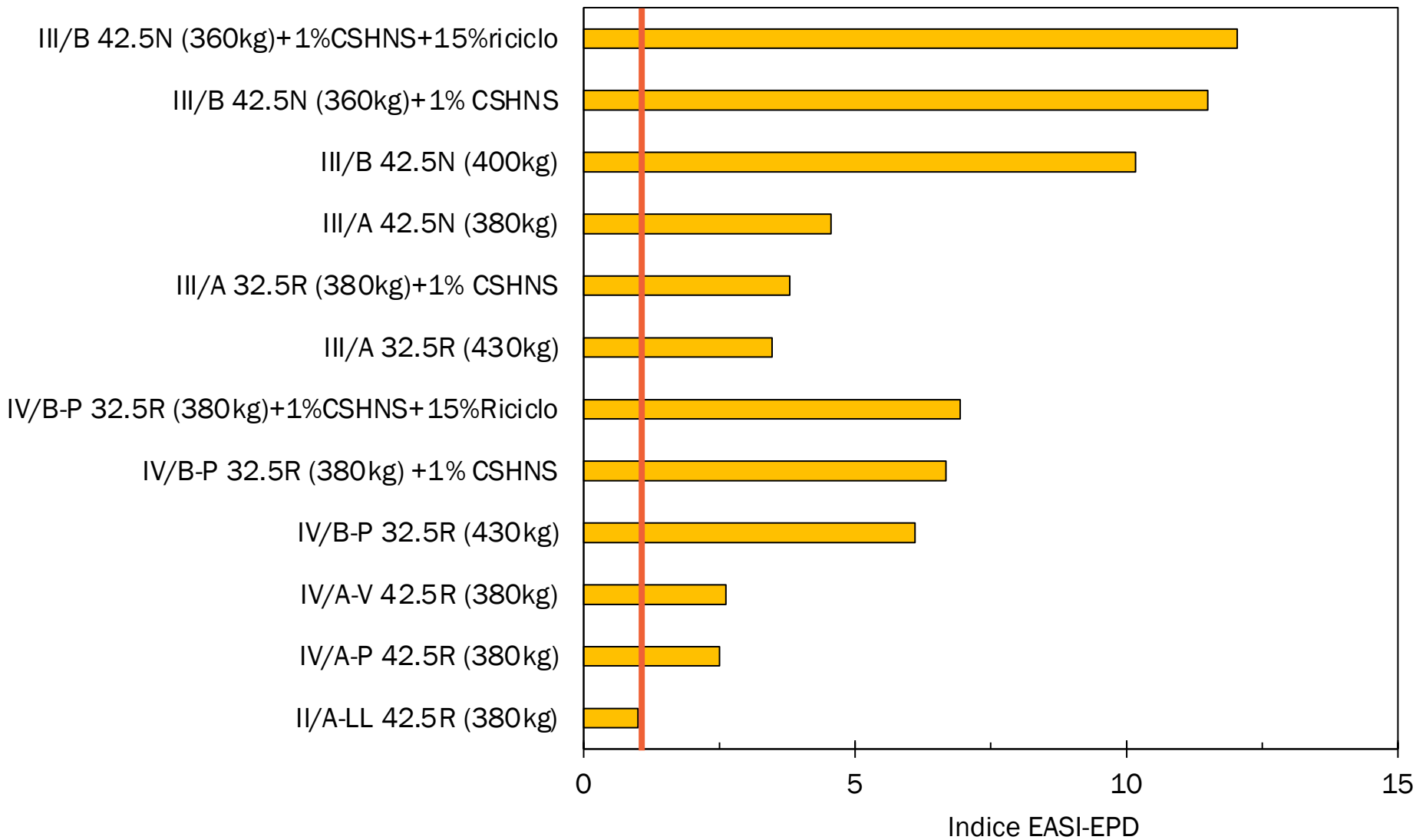
EASI-EPD: XS1- C32/40 -  $a/c_{\max} = 0.50$  -  $C_{\min} = 340 \text{ kg/m}^3$



EASI-EPD: XS2/XS3- C35/45 -  $a/c_{max} = 0.45$  -  $C_{min} = 360 \text{ kg/m}^3$



EASI-EPD: XS2/XS3- C35/45 -  $a/c_{max} = 0.45$  -  $C_{min} = 360 \text{ kg/m}^3$



# LAVORI DI RIFIORIMENTO E RIPRISTINO STATICO DELLA DIGA FORANEA DEL PORTO DI AUGUSTA



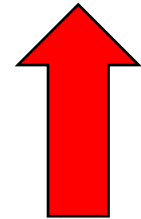
UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

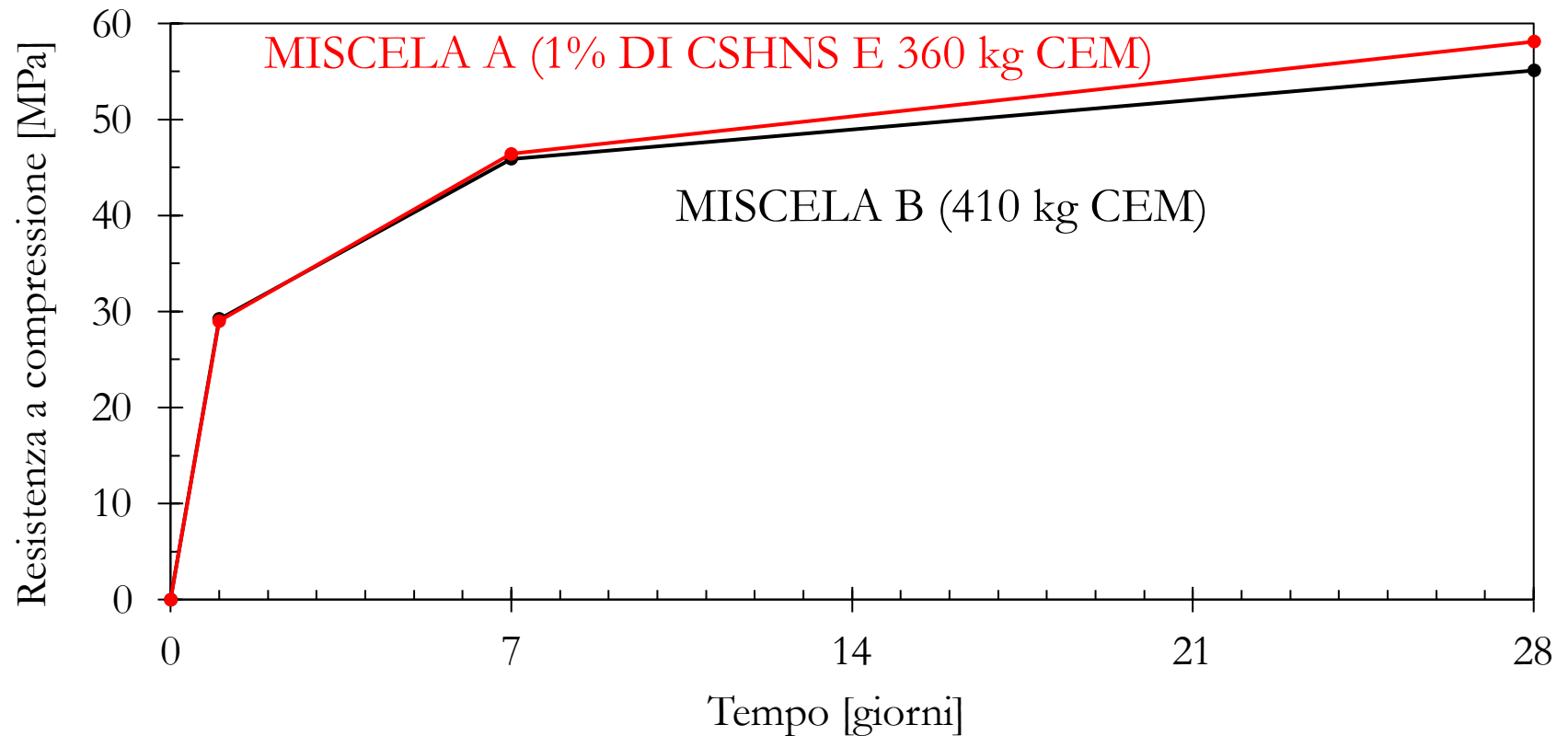
# TESTATE DUE DIVERSE MISCELE

	CEM IV/B	CEM IV/B + CHSNS
Cemento IV/B 32.5 R[kg/m <sup>3</sup> ]	410	360
Additivo superfluidificante [% vs massa cemento]	1.0%	0.9%
Additivo CSHNS [% vs massa cemento]	--	1.0%
Aggregati	1745	1775
a/c	0.39	0.43

AGGIUNTA DI ADDITIVO NUCLEATORE DI CSH  
RIDUZIONE DI 50 kg/m<sup>3</sup> DI CEMENTO



# TESTATE DUE DIVERSE MISCELE



**A 1 giorno le resistenze a compressione sono uguali (nonostante i 50 kg in meno di cemento!!) e a 28 giorni le resistenze della miscela con CSHNS sono addirittura superiori**

# MIX DESIGN CON CEM III/A 42.5 N - LH

	CEM III/A	CEM III/A + CSHNS
<b><u>Cemento III/A 42.5 N [kg/m<sup>3</sup>]</u></b>	<b><u>410</u></b>	<b><u>360</u></b>
Additivo superfluidificante [% vs massa cemento]	1.2 %	1.0 %
Additivo CSHNS [% vs massa cemento]	--	1.0 %
Aggregati	1790	1835
Acqua Efficace	164	151
a/c	0.40	0.42
<b><u>R<sub>C</sub> a 28 giorni [MPa]</u></b>	<b><u>68.5</u></b>	<b><u>68.3</u></b>



$$EASI = \frac{3 \cdot Rc_{28} \cdot \frac{1}{c * q_7} \cdot \frac{1}{D_{app}}}{NRMC + GER + GWP}$$

$Rc_{28}$  è la resistenza a compressione a 28 giorni  
 $q_7$  è il calore di idratazione del cemento a 7 giorni  
 $D_{app}$  coefficiente di diffusione del cloruro



# PARAMETRI PER CALCOLO EASI

	GER/ PERNT [MJ/kg]	GWP [kgCO <sub>2</sub> /kg]	NRMC [kg/kg]	q <sub>7</sub> [kJ/kg]	D <sub>app</sub>
Cemento IV/A 42.5 R	6.05	0.764	1.51	300	$0.60 \cdot 0.3 \cdot 10^{-12}$
Cemento IV/B 32.5 R	5.18	0.654	1.45	264	$0.25 \cdot 0.3 \cdot 10^{-12}$
Cemento III/A 42.5 N-LH	4.65	0.576	1.02	250	$0.40 \cdot 0.09 \cdot 10^{-12}$
Additivi	31.4	1.88	--	--	--
Aggregati	0.0471	0.0017	1.05	--	--



# CALCOLO EASI

	RIF.	CEM IV/B	CEM IV + CSHNS	CEM III/A	CEM III/A + CSHNS
IV/A 42.5 R	380 kg/m <sup>3</sup>	--	--	--	--
IV/B 32.5 R	--	410 kg/m <sup>3</sup>	360 kg/m <sup>3</sup>	--	--
III/A 42.5 N	--	--	--	410	360
Acqua	160	165	155	164	151
Aggregati	1780	1745	1775	1790	1835
Additivi	1% SF	1% SF	0.9% SF + 1% CSHNS	1.2 % SF	1 % SF + 1 % CSHNS
R <sub>c</sub> [MPa]	58	55	58.1	68.5	68.3
GER [MJ/kg]	2502	2335	2175	2145	1986
GWP [kgCO <sub>2</sub> /kg]	301	279	253	249	225
NRMC [kg/kg]	2603	2592	2540	2463	2446
q <sub>7</sub> [kJ/kg]	300	264	264	250	250
<b>EASI</b>	<b>1.00</b>	<b>2.51</b>	<b>3.22</b>	<b>7.49</b>	<b>9.02</b>



# CALCOLO EASI

	RIF.	CEM III/A + 20% ric	CEM III/A + 13% ric	CEM III/A + 14% ric
IV/A 42.5 R	380 kg/m <sup>3</sup>	--	--	
III/A 42.5 N	--	360	360	<b>340</b>
Acqua	160	155	155	150
Aggregati naturali	1780	1536	1669	1669
Additivi	1% SF	0.9% SF +0.8% CSHNS	0.9 % SF +0.8 % CSHNS	0.9 % SF +0.8 % CSHNS
R <sub>c</sub> [MPa]	58	63.4	61.7	62.7
GER [MJ/kg]	2502	1939	1945	1852
GWP [kgCO <sub>2</sub> /kg]	301	221	222	210
NRMC [kg/kg]	2603	2135	2275	2249
q <sub>7</sub> [kJ/kg]	300	250	250	250
<b>EASI</b>	<b>1.00</b>	<b>8.91</b>	<b>8.46</b>	<b>9.44</b>



# PLATEA DI FONDAZIONE THE TRIS



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate



# PLATEA DI FONDAZIONE SKYDROP



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# MIX DESIGN PLATEA DI FONDAZIONE

MISCELA kg/m <sup>3</sup>	CEM IV/B (V) 32.5 N-LH
Sabbia	703
Ghiaietto (4-8 mm)	323
Ghiaietto (8-16 mm)	273
Ghiaietto (16-26 mm)	527
Totale aggregati	1826
<b>Cemento IV/B (V) 32.5 N - LH</b>	<b>350</b>
Acqua	165
Additivo SF	0.9 % vs cemento
Additivo CSHNS	1.0 % vs cemento
Massa volumica fresco [kg/m <sup>3</sup> ]	2348
q <sub>7</sub> [kJ/kg]	210





# FASI DI GETTO



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

$$EASI = \frac{3 \cdot Rc_{28} \cdot \frac{1}{c * q_7}}{NRMC + GER + GWP}$$

$Rc_{28}$  è la resistenza a compressione a 28 giorni  
 $q_7$  è il calore di idratazione del cemento a 7 giorni



# CALCESTRUZZO DI RIFERIMENTO

## CLASSE DI ESPOSIZIONE AMBIENTALE XC2

Requisiti minimi C25/30,  $a/c_{\min} = 0.60$ ,  $c_{\min} = 300 \text{ kg/m}^3$

**Viene ipotizzato un calcestruzzo di pari resistenza  
di quello utilizzato C32/40**

	CLS DI RIFERIMENTO
Cemento II/A-LL 42.5R [kg/m <sup>3</sup> ]	345
Additivo superfluidificante [% vs massa cemento]	1.0%
Aggregati	1885
Acqua	165
$a/c$	0.45



# PARAMETRI PER CALCOLO EASI

	GER/ PERNT [MJ/kg]	GWP [kgCO <sub>2</sub> /kg]	NRMC [kg/kg]	q <sub>7</sub> [kJ/kg]
Cemento II/A-LL 42.5R	6.64	0.841	1.49	335
Cemento IV/B 32.5 N-LH	2.55	0.588	1.01	210
Additivi	31.4	1.88	--	--
Aggregati	0.0471	0.0017	1.05	--



# CALCOLO EASI

	RIF.	CEM IV/B 32.5 N-LH
II/A-LL 42.5R [kg/m <sup>3</sup> ]	345	--
IV/B 32.5 N-LH [kg/m <sup>3</sup> ]	--	350
Acqua [kg/m <sup>3</sup> ]	165	165
Aggregati [kg/m <sup>3</sup> ]	1885	1826
Additivi	1% SF vs massa cemento	0.9 % SF vs massa cemento 1.0 % CSHNS vs massa cemento
R <sub>c</sub> [MPa]	40	40
GER [MJ/kg]	2488	1187
GWP [kgCO <sub>2</sub> /kg]	301	221
NRMC [kg/kg]	2658	2436
q <sub>7</sub> [kJ/kg]	335	210
<b>EASI</b>	<b>1.00</b>	<b>2.21</b>



# EASI EPD 80%

$$\text{EASI EPD 80\%} = \frac{8 \cdot (C(X/Y)) \cdot \frac{1}{D_{appCl^-}}}{\sum_1^n (ETP-FW + GWP + PENRT + POCP + PM + EP_{mar} + EP_{ter} + HTP-c)}$$

ETP-FW: Ecotoxicity water;

GWP: Climate change;

PENRT: Resource use, fossil;

POCP: Photochemical ozone formation;

PM: Particle matter;

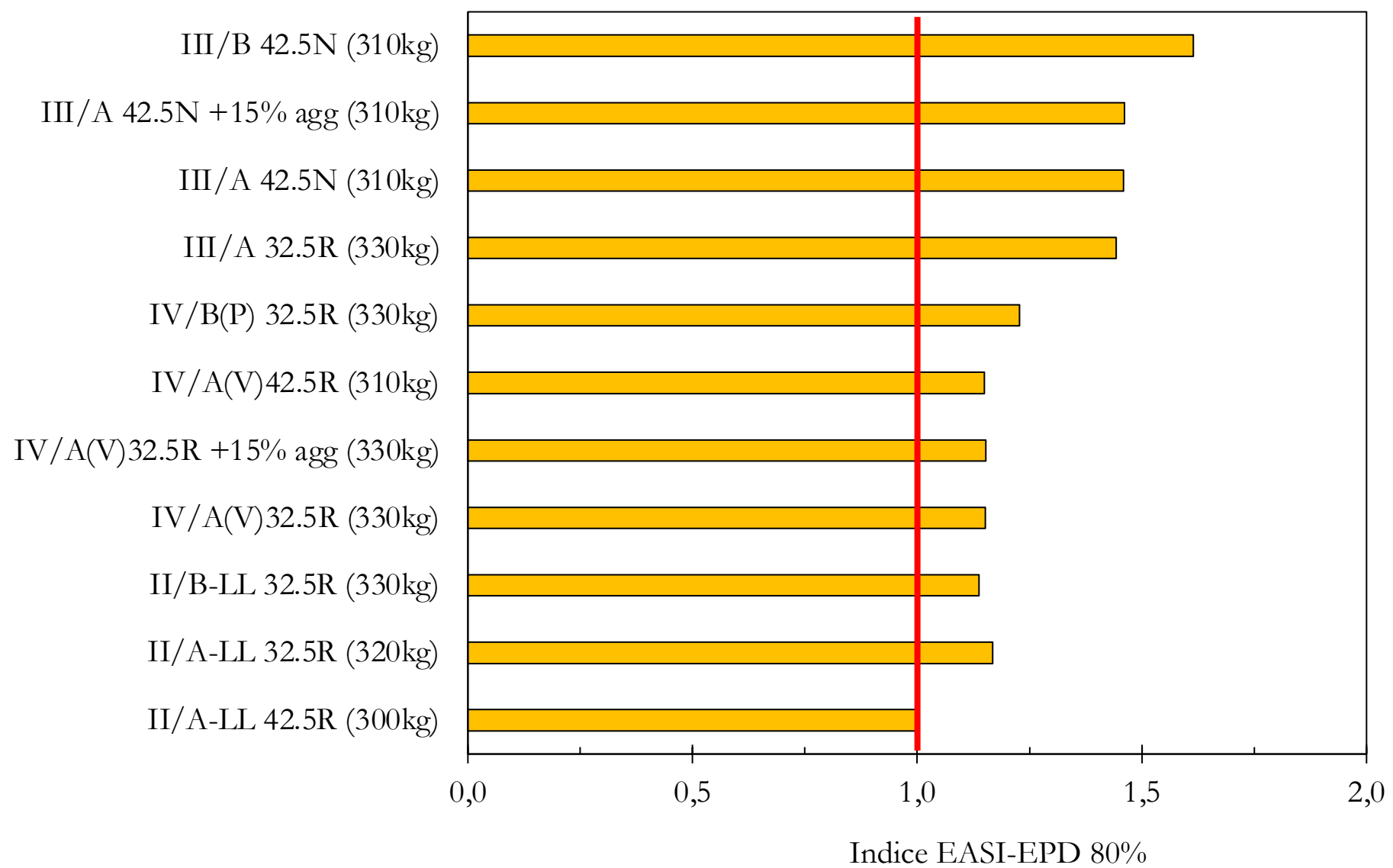
EP<sub>mar</sub>: Eutrophication aquatic marine;

EP<sub>terr</sub>: Eutrophication terrestrial;

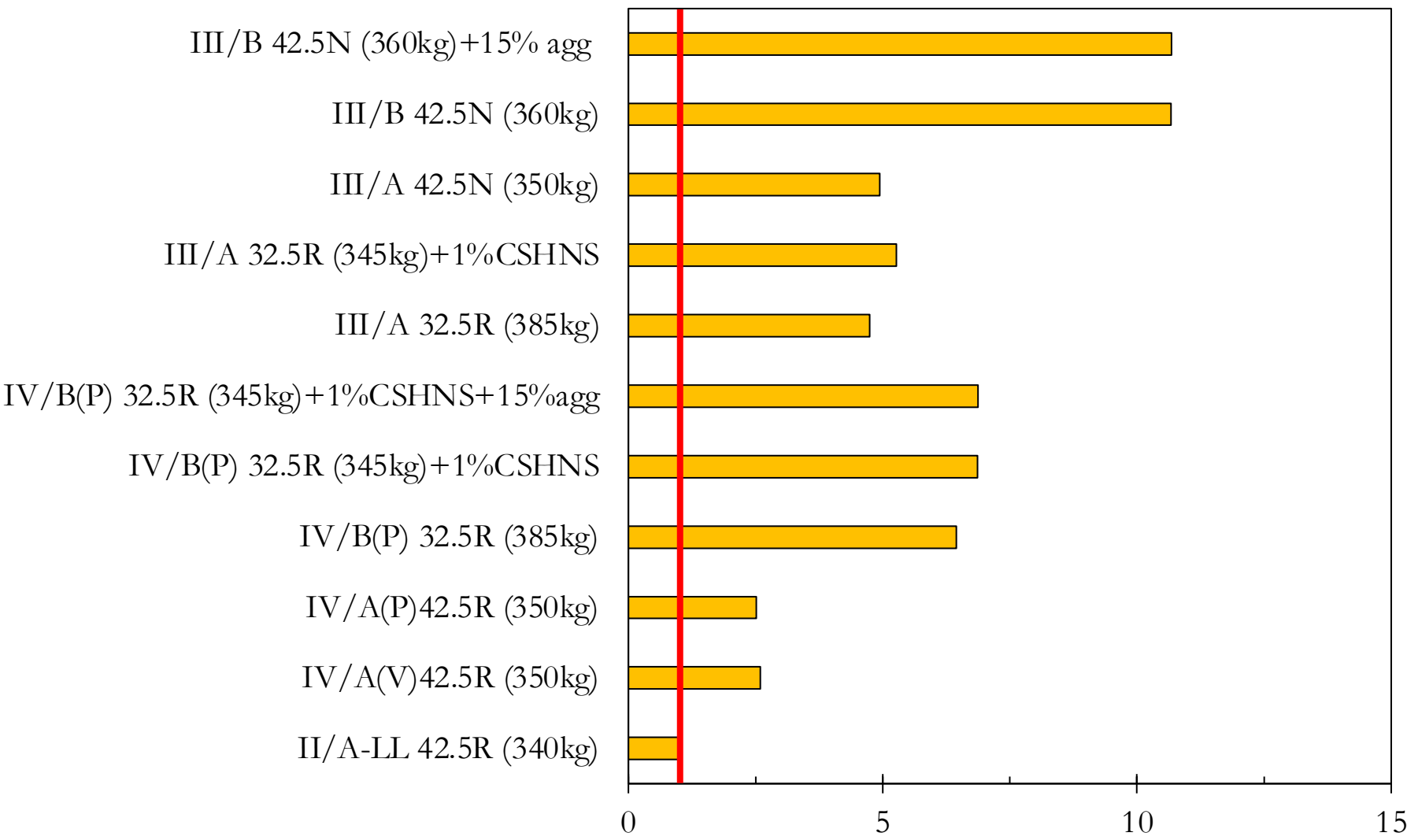
HTP-c: Human toxicity non-cancer.



EASI-EPD-80%:XC1-XC2 - C25/30 -  $a/c_{max} = 0.60$  -  $C_{min} = 300 \text{ kg/m}^3$



EASI-EPD 80%: XS1 – C32/40 –  $a/c_{max} = 0.50$  –  $C_{min} = 340 \text{ kg/m}^3$



# VISIONE COMPLETA IMPATTO AMBIENTALE??

La classe di  $\text{CO}_2$  tiene in considerazione il quantitativo di anidride carbonica emessa dalla produzione delle materie prime (A1), dal trasporto alla centrale di betonaggio (A2), dalla produzione del calcestruzzo (A3).



# CLASSE DI CO<sub>2</sub> (A1+A2+A3)

A1: Estrazione materie prime, elettricità e combustibili primari;

A2: Trasporto al sito di produzione;

A3: Fase di produzione.

	2020	2021	2022
<b>Aggregati</b>	33 km	37 km	36 km
<b>Cemento</b>	99 km	98 km	99 km
<b>Additivi</b>	173 km	178 km	181 km
<b>Costituenti minori</b>	119 km	119 km	124 km





CLASSE	QUANTITATIVO DI CO <sub>2</sub> EMESSA [kgCO <sub>2</sub> ]/m <sup>3</sup>
A	< 150
B	151 ÷ 200
C	201 ÷ 250
D	251 ÷ 300
E	301 ÷ 400
F	401 ÷ 500
G	> 501

CLASSE	% AGGREGATO ARTIFICIALE/RICICLO
++++	> 31%
+++	21% ÷ 30%
++	11% ÷ 20%
+	1% ÷ 10%
-	0



# CLASSE DI CO<sub>2</sub>

Classe di resistenza	Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> calcestruzzo Standard Mix	Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> calcestruzzo High Early Strength Mix	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> calcestruzzo ITALIA
C25/30	306	413	135-300
C30/37	346	466	150-300
C35/45	385	519	150-300
C45/55	404	546	-

	Maximum Global Warming Potential Limits for GSA Low Embodied Carbon Concrete (kilograms of carbon dioxide equivalent per cubic meter - CO <sub>2</sub> e kg/m <sup>3</sup> )		
Specified compressive strength (f <sub>c</sub> in PSI)	Standard Mix	High Early Strength	Lightweight
up to 2499	242	326	462
2500-3499	306	413	462
3500-4499	346	466	501
4500-5499	385	519	540
5500-6499	404	546	N/A
6500 and up	414	544	N/A

The targets in GSA's March 2022 "Low Embodied Carbon Concrete Standards" reflect a 20 percent reduction from the GWP (CO<sub>2</sub>e) limits the New Buildings Institute proposes in "Lifecycle GHG Impacts in Building Codes" (January 2022). Chart: General Services



# CLASSE DI CO<sub>2</sub> (A1+A2+A3)

	2020	2021	2022
Aggregati	33 km	37 km	36 km
Cemento	99 km	98 km	99 km
Additivi	173 km	178 km	181 km
Costituenti minori	119 km	119 km	124 km

A2 -Trasporto			A3- Miscelazione
Cemento	Aggregati	Additivi	Produzione cls
3.78	10.8	0.05	3.56

Nella Fase A2+A3 si emettono circa **18.20 kg<sub>CO2</sub>/m<sup>3</sup>**

**CLASSE CO<sub>2</sub>(A1+A2+A3): XC1-XC2 – C25/30 – a/c<sub>max</sub> = 0.60 – C<sub>min</sub> = 300 kg/m<sup>3</sup>**

Tipo cemento	Quantità cemento	Quantità aggregati	Additivo SF	GWP cem [kgCO <sub>2</sub> /ton]	TOT CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	CLASSE
II/A-LL 42.5R	300	1895	0.6%	829	273	<b>D</b>
II/A-LL 32.5 R	320	1875	0.6%	766	270	<b>D</b>
IV/A (V) 32.5 R	330	1865	0.8%	708	260	<b>D</b>
II/B-LL 32.5 R	330	1865	0.8%	686	253	<b>D</b>
IV/A (V) 42.5 R	310	1885	0.6%	674	234	<b>C</b>
IV/B (P) 32.5 R	330	1865	0.8%	592	220	<b>C</b>
III/A 32.5 R	330	1865	0.8%	579	217	<b>C</b>
III/A 42.5 N	310	1875	0.6%	573	202	<b>C</b>
III/B 42.5 N	310	1875	0.6%	391	146	<b>A</b>



CLASSE CO<sub>2</sub>(A1+A2+A3): XC4 - C32/40 - a/c<sub>max</sub> = 0.50 - C<sub>min</sub>= 340 kg/m<sup>3</sup>  
 CLASSE CO<sub>2</sub>(A1+A2+A3): XC4/XS1 - C32/40 - a/c<sub>max</sub> = 0.50 - C<sub>min</sub>= 340 kg/m<sup>3</sup>

Tipo cemento	Quantità cemento	Quantità aggregati	Additivo SF	GWP cem [kgCO <sub>2</sub> /ton]	TOT CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	CLASSE
II/A-LL 42.5R	340	1885	1.0%	829	309	<b>E</b>
IV/A (P) 42.5 R	350	1875	1.0%	760	294	<b>D</b>
IV/A (V) 42.5 R	350	1875	1.0%	674	264	<b>D</b>
IV/B (P) 32.5 R	385	1845	1.2%	592	258	<b>D</b>
IV/B (P) 32.5 R + 1% CSHNS	345	1880	1.2%	592	233	<b>C</b>
III/A 32.5 R	385	1845	1.2%	579	253	<b>D</b>
III/A 32.5 R + 1% CSHNS	345	1880	1.2%	579	229	<b>C</b>
III/A 42.5 N	350	1875	1.0%	573	228	<b>C</b>
III/B 42.5 N	360	1865	1.0%	391	168	<b>B</b>

CLASSE CO<sub>2</sub>(A1+A2+A3): XS2/XS3- C35/45 -  $a/c_{max} = 0.45$  -  $C_{min} = 360 \text{ kg/m}^3$

Tipo cemento	Quantità cemento	Quantità aggregati	Additivo SF	GWP cem [kgCO <sub>2</sub> /ton]	TOT CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	CLASSE
IV/A (P) 42.5 R	380	1880	1.0%	760	319	<b>E</b>
IV/A (V) 42.5 R	380	1880	1.0%	674	284	<b>D</b>
IV/B (P) 32.5 R	430	1840	1.2%	592	285	<b>D</b>
IV/B (P) 32.5 R + 1% CSHNS	380	1880	1.2%	592	255	<b>D</b>
III/A 32.5 R	430	1840	1.2%	579	280	<b>D</b>
III/A 32.5 R + 1% CSHNS	380	1880	1.2%	579	250	<b>C</b>
III/A 42.5 N	380	1880	1.2%	573	248	<b>C</b>
III/B 42.5 N	400	1860	1.2%	391	187	<b>B</b>
III/B 42.5 N + 1% CSHNS	360	1885	1.2%	391	168	<b>B</b>



CLASSE	QUANTITATIVO DI CO <sub>2</sub> EMESSA [kgCO <sub>2</sub> ]/m <sup>3</sup>
A	< 150
B	151 ÷ 200
C	201 ÷ 250
D	251 ÷ 300
E	301 ÷ 400
F	401 ÷ 500
G	> 501

CLASSE	% AGGREGATO ARTIFICIALE/RICICLO
++++	> 31%
+++	21% ÷ 30%
++	11% ÷ 20%
+	1% ÷ 10%
-	0



# CLASSE DI RICICLATO

CLASSE	% DI AGGREGATO ARTIFICIALE
++++	$> 31\%$
+++	$21\% \div 30\%$
++	$11\% \div 20\%$
+	$1\% \div 10\%$
-	0





# CALCOLO CLASSE DI CO<sub>2</sub>

Tipo cemento	Quantità cemento	Quantità aggregati naturali	Additivo SF	GWP cem [kgCO <sub>2</sub> /kg]	TOT CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	CLASSE
IV/A 42.5R	380	1780	1.0 %	0.764	301	<b>E</b>
III/A 42.5 N-LH + 0.8% CSHSN +20% ric	360	1536	0.9 %	0.576	221	<b>C++</b>
III/A 42.5 N-LH + 0.8% CSHSN +13% ric	360	1669	0.9 %	0.576	222	<b>C++</b>
III/A 42.5 N-LH + 0.8% CSHSN +14% ric	340	1669	0.9 %	0.576	210	<b>C++</b>

**VOCE DI CAPITOLATO DEL CALCESTRUZZO  
C35/45, XS3-XA2, D32, S5, C10.2, CO<sub>2</sub>: C++**



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

GWP AGGREGATI = 0.0017 kgCO<sub>2</sub>/kg  
GWP ADDITIVI = 1.88 kgCO<sub>2</sub>/kg

# CALCOLO CLASSE DI CO<sub>2</sub>

Tipo cemento	Quantità cemento	Quantità aggregati naturali	Additivo SF	GWP cem [kgCO <sub>2</sub> /kg]	TOT CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	CLASSE
II/A-LL 42.5R	345	1885	1.0 %	0.841	301	<b>E</b>
IV/B 32.5 N-LH + 1% CSHSN	350	1826	0.9 %	0.588	221	<b>C</b>

VOCE DI CAPITOLATO DEL CALCESTRUZZO  
C30/37, XC2, D32, S5, C10.2, CO<sub>2</sub>: C



La classe di CO<sub>2</sub> è un approccio veloce e intuitivo per **iniziare a sensibilizzare** i progettisti e i tecnici a capire quantitativamente l'impatto ambientale del calcestruzzo.



# GRAZIE PER L'ATTENZIONE



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate