

Comparison of technical and environmental performance of concretes made with sulfoaluminate and ordinary Portland cement

Prestazioni tecniche ed ambientali di calcestruzzi a base di cemento solfoalluminoso in confronto al sistema classico a base di cemento portland.

M. Bianchi¹, R. Bogliolo¹, L. Buzzi¹, M. Paris¹, F. Canonico¹

¹ *Buzzi Unicem SpA, Casale Monferrato (AL), Italy*

In 2003 Buzzi Unicem started the evaluation of the environmental performance of its own products, which led to the publication of the EPD for all its cements produced in Italy. Its performance have been evaluated through an approach that not only considers the impacts during the production stage, but also during the entire life cycle. The sulfoaluminate cements (CSA) are innovative hydraulic binders obtained by grinding a clinker burnt at a temperature of 1300°C, based on raw materials such limestone, bauxite and gypsum. The particular composition of this raw meal enables a significant reduction of CO₂/ton, moreover the obtained clinker has specific performance such as very low shrinkage and high initial strength. On 06/28/2013, Buzzi Unicem obtained the CE marking on CSA binders paving the way towards their use even in structural applications. A comparison of technical and environmental impacts among a concrete produced with an Ordinary Portland Cement and CSA cements is shown in the following article.

Buzzi Unicem ha iniziato nel 2003 un processo di valutazione delle prestazioni ambientali dei propri prodotti che ha portato alla pubblicazione delle EPD di tutti i cementi prodotti in Italia. Tali prestazioni sono valutate attraverso un approccio che non solo considera gli impatti nella fase produttiva, ma durante l'intero ciclo di vita. I cementi solfoalluminosi (CSA) sono leganti idraulici innovativi ottenuti dalla macinazione di un clinker cotto ad una temperatura di 1300°C, a partire da materie prime come calcare, bauxite e gesso. La particolare composizione di questa farina permette un risparmio considerevole di CO₂/ton, inoltre il clinker che si ottiene mostra prestazioni particolari quali bassissimi ritiri igrometrici ed elevate resistenze meccaniche iniziali. In data 28/06/2013, Buzzi Unicem ha ottenuto la marcatura CE sui leganti CSA aprendo la strada al loro uso anche in ambito strutturale. Si propone di seguito un confronto tra gli impatti tecnici ed ambientali di un calcestruzzo prodotto con un classico Cemento Portland ed i cementi CSA.

KEYWORDS: sulfoaluminate cements, sulfoaluminate concrete, LCA, environmental impact/ cementi solfoalluminosi, calcestruzzi solfoalluminosi, valutazione del ciclo di vita, impatto ambientale

1 PARTE GENERALE

1.1 Introduzione

I cementi solfoalluminosi (CSA) sono leganti idraulici innovativi ottenuti dalla macinazione di un clinker cotto ad una temperatura di 1300°C circa, a partire da materie prime come calcare, bauxite e gesso. Tale particolare composizione della farina, decisamente più povera in calcare rispetto alla farina tradizionalmente in uso nella produzione di clinker Portland, permette una riduzione della CO₂ emessa nel ciclo produttivo e consente di ottenere un materiale con prestazioni molto particolari quali bassissimi ritiri igrometrici ed elevate resistenze meccaniche iniziali. In data 28 giugno 2013, Buzzi Unicem

SpA ha ottenuto la marcatura CE¹ sulla linea di leganti solfoalluminosi denominati Buzzi Unicem Next, aprendo la strada all'uso di questi leganti anche in ambito strutturale.

Buzzi Unicem è attualmente l'unica azienda che produce leganti CSA impiegabili anche all'interno di calcestruzzi strutturali in Europa.

In data 18 luglio 2016 anche il DIBt ha concesso l'autorizzazione all'uso di tali leganti all'interno di calcestruzzi strutturali in Germania² (Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-3.15-2130).

Il processo produttivo dei cementi CSA, pur utilizzando gli stessi impianti in uso nella produzione del cemento Portland e le stesse sostanziali procedure operative (produzione clinker ad alta temperatura,

¹ ETA 13/0417, ETA 13/0418, ETA 13/0419

² Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-3.15-2130

macinazione con aggiunta di regolatori di presa) si discosta in maniera importante dalla routine tipica delle cementerie classiche. Le materie prime in uso nella produzione del clinker CSA necessitano infatti di un elevato tenore in Al_2O_3 che viene raggiunto impiegando rilevanti quantità di materie prime apportatrici di questo ossido (principalmente bauxite) e di un importante contenuto di SO_3 (gessi e anidriti). In secondo luogo le temperature massime raggiunte nel processo di cottura sono sensibilmente più basse rispetto a quelle impiegate per la produzione del clinker Portland e ciò rende più critica la fase della cottura: da un lato, la ridotta temperatura non permette il raggiungimento delle condizioni di completa sinterizzazione, dall'altro, il processo è maggiormente esposto a ricircoli di solfati che possono determinare occlusioni dell'impianto.

I problemi sopra descritti possono tuttavia essere risolti o perlomeno tenuti sotto controllo e la produzione di questi clinker è possibile anche nei comuni forni da cemento con significativi benefici dal punto di vista delle emissioni di NO_x e CO_2 .

Buzzi Unicem produce tre tipologie di leganti CSA, ognuno dei quali ha un suo specifico settore di applicazione. La tabella 1 ne descrive le caratteristiche chimiche e mineralogiche.

I leganti CSA sono stati oggetto di intensi studi negli ultimi anni. In particolare possono essere citati alcuni lavori rivolti allo studio del processo di cottura e dei meccanismi di idratazione.

L'idratazione dei cementi solfoalluminosi viene studiata dal punto di vista chimico e mineralogico in Gastaldi et al. (in press), Aranda e de la Torre (2013), Winnefeld e Lothenbach (2010); Bernardo et al. (2006), Gastaldi et al (2012) e Irico et al (2013) sono alcuni esempi di lavori riguardanti l'evoluzione microstrutturale delle paste di CSA.

I risultati di questi lavori mostrano che il principale prodotto d'idratazione dei cementi CSA è l'ettringite che si sviluppa massivamente nelle prime ore di idratazione.

La combinazione di leganti CSA e leganti Portland costituisce la migliore soluzione per sfruttare le particolari proprietà di questi cementi, abbatterne i costi e ridurre le emissioni di CO_2 in calcestruzzo senza pregiudicare le caratteristiche di durabilità. In un sistema misto, contenente legante a base di clinker Portland e legante CSA, si possono mettere in risalto le seguenti particolarità:

- sviluppo di elevate quantità di ettringite già nelle prime ore dell'idratazione;
- completa formazione dei prodotti di idratazione;
- raggiungimento di un pH nella soluzione dei pori pari a c.a. 12.5 (nel cemento Portland si osservano valori prossimi a $pH=13.5$);
- presenza di fenomeni di compensazione del ritiro;
- elevato sviluppo delle resistenze meccaniche a breve;

Sul tema dell'applicazione dei cementi CSA in calcestruzzo si trovano invece pochi riferimenti in letteratura. A parte alcuni lavori di ricercatori cinesi relativi agli anni '80, possono essere citati alcuni lavori più recenti: in Paul et al. (2015) si affronta il tema dell'aggressione da cloruri, in Canonico et al. (2010) viene descritto il comportamento, in termini di durabilità, di diversi calcestruzzi a base CSA, Bertolini et al. (2015) e Canonico et al. (2015) illustrano il comportamento a corrosione dell'acciaio in calcestruzzi a base CSA.

A partire dal 2003, Buzzi Unicem ha iniziato un processo di valutazione delle prestazioni ambientali dei propri prodotti, che ha portato alla pubblicazione delle EPD – Dichiarazione Ambientale di Prodotto di tutti i cementi prodotti in Italia. Tali prestazioni sono valutate attraverso un approccio che considera non solo gli impatti nella fase produttiva, ma durante l'intero ciclo di vita del prodotto tramite uno studio LCA – Life Cycle Assessment. La Dichiarazione Ambientale di Prodotto, dettagliata per ogni cemento prodotto, può essere scaricata dal sito dell'azienda³.

Tabella 1. Leganti CSA prodotti da Buzzi Unicem / CSA cement produced by Buzzi Unicem.

Denominazione legante	Ref.*	Next SR03	Next SL05	Next SL03
Blaine (cm^2/gr)	3100	5200	4300	4800
Classe cemento	42.5	52.5	42.5	42.5
C_4A_3S (%)		47	16	16
C_3S (%)	62.3		36.5	38.7
C_2S (%)	9.3	16.3	9.6	10.1
C_3A (%)	3.1	3.9	3.2	3.8
C_4AF (%)	3.6	2.1	3.1	3.3
$CaSO_4$ (%)	0.5	12.1	11.2	10.3
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (%)	4.6		2.8	2.6
CaO (%)	62.35	42.51	53.79	56.08
SiO_2 (%)	18.34	9.09	13.80	14.70
Al_2O_3 (%)	4.38	25.39	11.04	11.95
Fe_2O_3 (%)	3.48	1.35	2.32	1.62
SO_3 (%)	2.64	14.35	10.07	9.39
Cl ⁻ (%)	0.02	0.02	0.04	0.05
Na_2O eq. (%)	1.04	0.56	0.73	0.79
PPC (%)	5.22	1.90	3.80	2.90

*CEM II A LL 42.5 R

1.2 Obiettivo del lavoro

Il presente articolo descrive i risultati di un progetto portato avanti da Buzzi Unicem volto a confrontare le prestazioni tecniche ed ambientali di calcestruzzi progettati con cementi CSA.

Partendo da un calcestruzzo di riferimento, sono stati realizzati diversi impasti variando la tipologia di legante ed il rapporto acqua/cemento.

³ www.buzziunicem.it/

Sono inoltre state impiegate diverse tipologie di additivi, al fine di definire l'influenza che il fluidificante ha sullo sviluppo delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo.

Lo studio LCA (Life Cycle Assessment) del cemento è stato condotto ai sensi della norma ISO 14040, per evidenziare i carichi ambientali ed energetici e confrontare i risultati con quelli ottenuti da un cemento di riferimento tipo Portland CEM II A LL 42.5 R.

Lo studio relativo al clinker CSA è stato condotto raccogliendo i dati di produzione ed emissione durante una campagna produttiva effettuata nello stabilimento di Robilante nel 2016.

I dati di alimentazione di materie prime e combustibili, nonché i dati misurati attraverso il sistema di monitoraggio in continuo delle emissioni e i monitoraggi in discontinuo per i microinquinanti, sono stati inseriti in un idoneo software.

Per completare l'inventario con i dati relativi alle fasi del ciclo di vita precedenti le attività svolte all'interno della cementeria, è stato utilizzato il software Simapro (Versione 8.0.3), che ha permesso di integrare le informazioni raccolte in sito con quelle provenienti dalla banca dati inserita all'interno del modello stesso e di ultimare l'inventario per il processo oggetto dello studio.

La semplicità di utilizzo del modello di calcolo e la ricchezza della banca dati rendono il Simapro uno strumento adatto alla redazione di un inventario del ciclo di vita in modo veloce e affidabile.

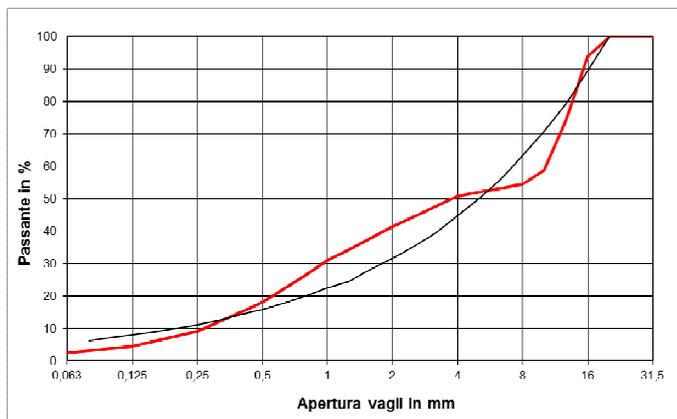
2 PARTE SPERIMENTALE

2.1 Materiali e metodi di prova

Per il confezionamento dei calcestruzzi sono stati utilizzati un cemento Portland di riferimento (CEM II A LL 42.5 R) e due cementi solfoalluminosi marcati CE (Next Binder SL05 e Next Binder SL03) dotati 350kg/m^3 . I leganti CSA contengono acido citrico (0.5%) come ritardante di presa

Gli aggregati utilizzati nell'impasto sono di provenienza della cava di CO.GE.FA. di Torrazza Piemonte e sono costituiti dalle seguenti frazioni granulometriche: sabbia fine 0-2 mm, sabbia granita 0-5 mm, pietrischetto 8-15mm, pietrisco 15-25 mm. La distribuzione granulometrica del mix design è mostrata in figura nr. 1.

Figura 1. Distribuzione granulometrica aggregati, curva di Füller in nero e distribuzione granulometrica in rosso / grainsize distribution of the concrete aggregate, Füller curve in black and aggregate distribution in red



Sono state utilizzate due tipologie di additivi fluidificanti liquidi, Sika CC39 T75 e Sika CC39 NX, a dosaggio variabile con l'obiettivo di raggiungere una classe di consistenza S5 (slump maggiore di 210 mm) e di mantenerla per 60 minuti.

L'impasto in calcestruzzo è stato effettuato con una mescolatrice a bicchiere in un ambiente termostato a 20°C . I provini di forma cubica $15\times 15\times 15$ cm sono stati stagionati a 20°C e al 95% di umidità relativa.

Le prove di ritiro sono state effettuate in accordo alla norma UNI 6555-73.

Sul calcestruzzo sono state effettuate le seguenti prove: slump (in accordo a norma UNI EN12350-2), mantenimento lavorabilità, massa volumica (in accordo a norma UNI EN 12350-6), resistenze a compressione (in accordo a norma UNI EN 12390-3) a 5 ore, 8 ore, 24 ore, 7 giorni e 28 giorni.

2.2 Prove in calcestruzzo

La tabella nr. 2 e la tabella nr. 3 riportano i risultati delle prove condotte sui calcestruzzi al variare del contenuto d'acqua ed al variare della tipologia di additivo fluidificante.

Tabella 2. Prestazioni miscela di calcestruzzo confezionata con additivo CC39T75 / Performances of the concrete mixture prepared with superplastizicer CC39T75

	Rif.		Next SL05		Next SL03	
Codice miscela	62	61	64	65	67	68
Contenuto d'acqua (L/m^3)	170	190	170	190	170	190
Contenuto legante (Kg/m^3)	350		350		350	
Rapporto a/c	0.49	0.54	0.49	0.54	0.49	0.54
Additivo CC39 T75 (L/m^3)	3.3	2.6	3.1	2.3	3.7	2.7

Slump (mm) t=0	230	235	160	220	200	220
Slump (mm) t=30'	230	230	150	220	200	220
Slump (mm) t=60'	220	230	140	210	180	210
Resistenze						
Meccaniche (MPa):						
5 ore			6.2	6.3	10.0	10.4
8 ore			13.6	13.8	15.9	14.3
24 ore	14.8	13.5	21.2	23.2	27.4	24.1
7 giorni	38.7	35.1	28.0	26.7	37.8	31.4
28 giorni	45.0	40.4	40.9	38.9	43.6	38.3

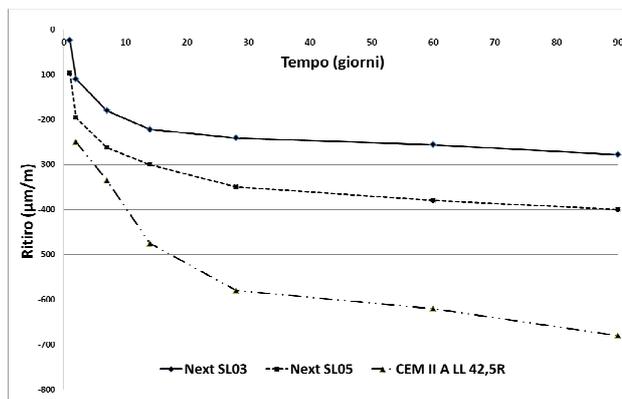


Tabella 3. Prestazioni miscela di calcestruzzo confezionata con additivo CC39 NX / Performances of the concrete mixture prepared with superplastizicer CC39 NX

	Rif.		Next SL05		Next SL03	
Codice miscela	77	78	79	80	82	83
Contenuto d'acqua (L/m ³)	170	190	170	190	170	190
Contenuto legante (Kg/m ³)	350		350		350	
Rapporto a/c	0.49	0.54	0.49	0.54	0.49	0.54
Additivo CC39 NX (L/m ³)	1.9	1.0	2.9	1.9	2.9	1.9
Slump (mm) t=0	230	250	190	210	180	220
Slump (mm) t=30'	230	250	185	210	180	210
Slump (mm) t=60'	230	250	180	200	170	210
Resistenze						
Meccaniche (MPa):						
5 ore			9.8	6.6	20.7	15.2
8 ore			16.2	12.3	25.4	20.4
24 ore	22.9	13.4	26.2	20.6	36.2	28.1
7 giorni	38.5	30.9	29.6	22.4	44.5	36.8
28 giorni	44.6	36.9	51.6	44.6	56.3	48.6

Nel grafico nr 1 si riportano i dati ottenuti sulla prova di ritiro in calcestruzzo, condotta a parità di acqua e dosaggio di legante.

Visti i risultati delle prove in calcestruzzo condotte al variare del rapporto acqua/cemento, in cui sono emerse prestazioni molto elevate per i calcestruzzi CSA in combinazione con l'additivo CC39NX, si è deciso di realizzare una nuova serie di impasti riducendo il contenuto di legante; i risultati sono mostrati nella tabella nr. 4. Tali dati sono stati utilizzati per lo studio LCA del calcestruzzo in quanto confrontabili a livello di resistenze meccaniche a 28 giorni.

Tabella 4. Prestazioni miscela di calcestruzzo a diverso dosaggio di legante con 180 L/m³ d'acqua / Performances of the concrete mixture prepared with different binders amount and 180 L/m³ of water

	Rif.	Next SL05	Next SL03
Codice miscela	76	90	91
Contenuto d'acqua (L/m ³)	180	180	180
Dosaggio legante (kg/m ³)	350	330	320
Rapporto a/c	0.51	0.55	0.56
Additivo CC39NX (L/m ³)	2.9	1.8	1.8
Resistenze			
Meccaniche (MPa):			
5 ore		6.0	12.9
8 ore		14.1	16.2
24 ore	17.0	23.7	23.5
7 giorni	34.3	27.3	30.0
28 giorni	41.0	46.1	42.7

2.3 Studio LCA del cemento e della miscela di calcestruzzo

Le norme internazionali relative alla realizzazione di uno studio sul ciclo di vita del prodotto prevedo-

no, per i prodotti da costruzione, oltre 20 impatti ambientali.

Visto l'obiettivo dello studio si è scelto di limitare i risultati ai principali impatti ambientali, descritti nella tabella nr. 5. Inoltre, considerato che lo scopo principale dello studio è il confronto tra due prodotti analoghi, le fasi d'uso e di fine vita non sono state considerate in quanto, teoricamente, sono le stesse per entrambi.

Tabella 5. Impatti ambientali considerati nello studio LCA / Environmental impacts considered in the LCA study

Impatti ambientali	Unità di misura	Effetto
Emissioni gas a effetto serra	kg CO ₂ eq.	Riscaldamento globale causato da gas ad effetto serra
Consumo energetico	MJ	Consumo di risorse energetiche termiche
Consumi idrici	m ³	Consumo di risorse idriche

Nella tabella nr. 6 si riportano i risultati dello studio, mettendo in confronto gli impatti associati alla produzione di 1 ton di clinker CSA (dati da prova industriale di febbraio 2016) e quelli relativi alla produzione di 1 ton di clinker tradizionale nella cementeria di Robilante (dati verificati nella certificazione EPD dei cementi Buzzi Unicem).

Dai risultati emersi dallo studio emerge che la produzione di CSA comporta un netto miglioramento dell'impatto ambientale associato alle emissioni di CO₂ dei leganti ed al consumo energetico specifico del clinker. Il consumo energetico totale risulta tuttavia superiore per il clinker CSA, ma ciò è legato al fatto che durante la produzione di clinker CSA a cui sono riferiti i dati sono stati utilizzati esclusivamente combustibili fossili tradizionali, mentre normalmente nella produzione clinker portland nello stabilimento di Robilante si utilizzano combustibili alternativi, a minore impatto ambientale, che garantiscono circa il 40% del fabbisogno calorico. Questo è il motivo per cui ad una riduzione del 20% dei consumi energetici, corrisponde una riduzione di "solo" il 16% per quanto riguarda le emissioni di gas serra. L'utilizzo di combustibili alternativi anche per la produzione di clinker CSA, garantirebbe pertanto una ulteriore diminuzione delle emissioni di gas ad effetto serra sia nella fase di combustione oltre che ovviamente nelle fasi precedenti. La produzione ed il trasporto dei combustibili hanno infatti un impatto pesante che si trasmette ai prodotti finali: ciò si può vedere, ad esempio, esaminando i dati della tabella 6 relativi al combustibile fossile che dimostrano l'elevato impatto energetico nel suo ciclo di vita..

Il legante Next SL05 risulta il cemento caratterizzato dal minore impatto energetico totale, pari a 6243 MJ/t mentre tutti i leganti CSA sono caratterizzati da emissioni di CO₂ inferiori rispetto al legante di riferimento.

Al contrario si registra un raddoppio dei consumi idrici. Tale peggioramento non è collegato alla fase di produzione clinker, dove i consumi rimangono invariati, ma deriva in particolare dalla fase di produzione della bauxite ed in minima parte da un maggiore utilizzo di combustibili fossili per la cui lavorazione è richiesto un consumo idrico.

Tale peggioramento sui consumi idrici dei leganti non è però un parametro eccessivamente critico per la produzione di calcestruzzo: infatti, come si può vedere nella tabella 8, la quota di consumo idrico derivante dalla produzione del legante è sostanzialmente ininfluenza rispetto a quella associata alla produzione degli aggregati

Tabella 6. Risultati Studio LCA sui leganti / Results of LCA study on binders

Impatti ambientali	Clinker		Cementi oggetto della sperimentazione			
	CSA	Portland	Rif.	Next SR03	Next SL05	Next SL03
Emissioni (kg CO ₂ eq.)	767	914	831	683	717	778
Consumo energetico specifico* (MJ/t)	3326	3724				
Consumo energetico fossile** (MJ/t)	6870	5430	5640	6640	5770	6180
Consumo energetico alternativo*** (MJ/t)	0	1040	884	0	473	536
Consumo energetico totale (MJ/t)	6870	6470	6524	6640	6243	6716
Consumi idrici (m ³)	1.23	0,61	0.72	1.18	1.16	0.96

* riferito all'impatto energetico relativo unicamente alla cottura del clinker

** riferito all'impatto energetico totale legato anche ai contributi derivanti dalla produzione e trasporto del carbone

*** riferito all'impatto energetico legato all'uso dei combustibili alternativi

Tabella 7. Risultati Studio LCA sui calcestruzzi / Results of LCA study on concrete

	Calcestruzzi oggetto della sperimentazione		
	Rif.	Next SL05	Next SL03
Impatti ambientali			
Emissioni (kg CO ₂ eq./m ³)	305	249	261
Consumo energetico fossile (MJ/m ³)	2310	2170	2250
Consumo energetico non fossile (MJ/m ³)	309	156	171
Consumo energetico totale (MJ/m ³)	2619	2326	2421
Consumi idrici (m ³ /m ³)	2.83	3.02	2.96

Tabella 8. Contribuzione degli impatti ambientali dei calcestruzzi / Environmental impact contributions of the concrete

Contributo	Miscela	GWP	Consumo energetico	Consumo idrico
		kg CO ₂ eq/m ³	MJ/m ³	m ³ /m ³
Cemento	76	291	2279	0.204
	90	237	2056	0.384
	91	249	2151	0.308
Altro Componente *	76	14	340	2.626
	90	12	270	2.636
	91	12	270	2.652

*aggregati, additivi

RISULTATI

2.4 Risultati relativi alle prove in calcestruzzo

I risultati delle prove hanno evidenziato che i leganti CSA possono essere impiegati per il confezionamento di calcestruzzi analogamente a quanto si fa con i comuni cementi Portland.

La lavorabilità è stata per tutte le miscele adeguata ai target e soddisfacente per un impiego industriale in autobetoniera, ad eccezione della miscela nr. 64 che, a causa del ridotto contenuto d'acqua, è risultata meno lavorabile.

Le miscele contenenti legante CSA hanno evidenziato uno sviluppo di resistenze molto elevato già a partire dalle 5 ore dal getto (6.6 MPa con cemento SL05, 15.2 MPa con cemento SL03) mentre a 24 ore dal getto hanno raggiunto prestazioni simili a quelle ottenute dal CEM II/A-LL 42.5R a 7 giorni dal getto (28,1 MPa con cemento SL03).

Le miscele contenenti legante CSA evidenziano inoltre dei ritiri igrometrici decisamente inferiori rispetto a quelli del calcestruzzo di riferimento contenente CEM II/A-LL 42.5R (-278 µm/m per Next SL03 e -400 µm/m per Next SL05 rispetto a -680 µm/m per il cemento Portland a 90 giorni).

Tutte le miscele di calcestruzzo hanno evidenziato una forte influenza delle prestazioni dal rapporto a/c, tuttavia tale effetto è meno marcato per i sistemi contenente CSA a breve stagionatura; infatti osservando i dati di rottura a compressione a 8 ore dal getto (12.3 MPa e 16.2 MPa con cemento SL05 oppure 20.4 MPa e 25.4 MPa con cemento SL03, rispettivamente a a/c=0.54 e 0.49) il rapporto acqua/cemento pare avere un'influenza ridotta.

Il dato più rilevante osservato nel corso dello studio è stato l'effetto dell'additivo fluidificante sull'evoluzione delle resistenze meccaniche. La variazione di additivo (da CC39T75 a CC39NX) non ha infatti avuto un grande impatto sulle prestazioni del calcestruzzo confezionato con il cemento Portland, mentre ha fortemente migliorato le resistenze meccaniche a tutte le scadenze dei sistemi contenenti legante CSA permettendo di guadagnare c.a. 7 MPa con il legante SL05 e c.a. 12 MPa con il legante SL03 a parità di dosaggi di cemento ed acqua. Tale effetto è probabilmente da attribuire alla formulazione degli additivi fluidificanti che possono contenere dei componenti a matrice organica influenzando negativamente lo sviluppo delle resistenze del legante CSA. Tale assunzione, non verificata da prove di laboratorio, sembra essere confermata dal produttore di additivi che riporta la presenza di un ritardante organico (gluconato di sodio) nell'additivo CC39T75.

Il confezionamento di 2 nuovi calcestruzzi a ridotto tenore di cemento (320 kg/m³ e 330 kg/m³ rispetto ai 350 kg/m³ originari) con i due leganti CSA ha poi confermato che in tali condizioni sono raggiungibili resistenze meccaniche ben superiori a quelle tipiche di un cemento CEM II/A-LL 42.5R ottenendo infatti a 28 giorni valori di 46.1 MPa per il calcestruzzo confezionato con 330 kg/m³ di SL05 e 42.7 MPa per il calcestruzzo confezionato con 320 kg/m³ di SL03 rispetto a 41.0 MPa per il calcestruzzo confezionato con il CEM II/A-LL 42.5R.

2.5 Risultati relativa all'analisi LCA

Lo studio LCA ha permesso di ottenere i valori di prestazioni ambientali relative ai cementi ed ai calcestruzzi impiegati nel lavoro sperimentale. I diversi clinker impiegati (Portland e CSA) sono stati prodot-

ti durante campagne produttive a carattere industriale nello stesso impianto (stabilimento di Robilante) pertanto si può ritenere che i risultati dello studio siano tra loro confrontabili ed assimilabili ad una produzione con le BAT (best available technologies). E' importante evidenziare alcune sostanziali differenze legate al processo produttivo del clinker Portland rispetto a quello del clinker CSA, in particolare relativamente alla tipologia di combustibile utilizzato (100% di polverino di Carbone per il CSA ed una miscela di polverino di Carbone e combustibile alternativo CSS per il clinker portland). La tipologia di combustibili impatta infatti fortemente sui consumi specifici in quanto il polverino di carbone (Petcoke) è caratterizzato da un consumo energetico nel suo ciclo di vita molto elevato.

Lo studio LCA ha messo in evidenza che il clinker CSA può essere prodotto con un consumo energetico specifico inferiore del 10% rispetto al clinker Portland. Le emissioni di CO₂ sono risultate inferiori del 16% per il clinker CSA rispetto al clinker Portland. Inoltre, tutte le formulazioni a base di cemento CSA utilizzate in questo studio permettono di raggiungere riduzioni di CO₂ rispetto al CEM II/A-LL 42.5R: la riduzione massima è stata ottenuta per il Next SR03 ed è pari al 18%. Considerando anche gli impatti associati al ciclo di vita del combustibile (impatti energetici totali) si osserva come il legante CSA Next SL05 risulti il più efficiente in termini energetici con 6.243 MJ/t rispetto ai 6.524 MJ/t del CEM II/A-LL 42.5R, con una riduzione di energia pari al 4.3%. Tali dati sono fortemente influenzati dal carattere sperimentale della cottura di clinker CSA. E' infatti molto probabile che i consumi specifici relativi alla produzione di clinker CSA si possano ulteriormente ridurre in futuro considerando un impianto produttivo a regime per un periodo prolungato. Inoltre sono state prese in esame unicamente materie prime di origine naturale, è altresì possibile che l'impiego di un materiale alternativo alla bauxite possa in una certa misura migliorare ulteriormente gli impatti.

I calcestruzzi CSA permettono di raggiungere a 28 giorni dal getto le stesse prestazioni meccaniche dei calcestruzzi di riferimento a base di CEM II/A-LL 42.5R, con un significativo miglioramento delle prestazioni meccaniche a breve termine e con un minore dosaggio di legante. Tale risultato ha delle dirette conseguenze sugli impatti ambientali dei calcestruzzi: lo studio LCA effettuato sui calcestruzzi evidenzia infatti una riduzione di CO₂ associata al calcestruzzo pari al 18% e 14% rispettivamente con legante Next SL05 e Next SL03 contro al riferimento a base CEM II/A-LL 42.5R ; a livello di impatti energetici, si osserva inoltre una riduzione dei consumi energetici pari al 11% e 7.5% con legante Next SL05 e Next SL03 rispetto al calcestruzzo a base di CEM II/A-LL 42.5R.

Il consumo idrico del leganti CSA risulta superiore rispetto a quello del legante di riferimento e questo risultato impatta anche sul consumo idrico in calcestruzzo che risulta anch'esso superiore per i leganti CSA. Tuttavia, come si può osservare dalla tabella nr. 8, il consumo idrico nei calcestruzzi è principalmente legato a contributi derivanti da altri componenti, quali le sabbie e gli aggregati, e non dal cemento.

3 CONCLUSIONI

Over the last few years many studies and publications concerning the sulphoaluminate binders as a new class of hydraulic binders have appeared.

Buzzi Unicem is the only European producer having in its catalog a range of CSA binders that can also be used in structural applications.

The experimental work proposed in this article shows some of the performance obtainable from the use of these special binders in concrete. The use of CSA cements allows the achievement of higher mechanical strengths at 28 days compared to the use of the ordinary Portland cements, thereby enabling a reduction in the concrete binder content of 8-10%.

A further advantage consists in the achievement of high values of mechanical strength even a few hours after the concrete casting (20 MPa at 5 hours) and a significant reduced shrinkage (-300 $\mu\text{m} / \text{m}$) compared to concrete made with Ordinary Portland cement -800 $\mu\text{m} / \text{m}$

The workability obtained in the concretes cast with CSA binders shows a similar behavior to the concretes cast with ordinary Portland cements, while in this study the achievement of the final mechanical performance depends significantly on the choice of the superplasticizer used.

From the environmental point of view the concrete prepared with CSA cement: (1) reached the lowest value in terms of CO₂ emission (249 kg CO₂ eq./m³) and embodied energy (2326 MJ/m³) compared to the reference concrete made with CEM II/A-LL 42.5; (2) are characterized by high early strength already after 5h from casting and significant strengths after 28 days.

The CSA binders described in this paper are for sure of great interest to the construction concrete infrastructure industry. The use of a concrete able to develop considerable mechanical strength a few hours after being cast and characterized by reduced shrinkage could enable the different organization of the casting in some complex construction sites, simplifying some operations/steps and speeding up others, especially within environmental contexts characterized by cold harsh climates.

The use of a specific superplasticizer and the higher cost of CSA binders compared to ordinary Portland cement may be barriers to their dissemina-

tion, however it is very likely that greater knowledge and experience regarding the performance of these innovative cements could give the needed boost to their spread, initially on sites having special needs.

The technical features presented in this paper are derived from the study of a material that is still interested by a process of further optimization from what concern the production process. It is likely that in the next month's, thanks to technical improvement and a deeper knowledge of the production process, lower CO₂ and embodied energy could be achieved, thus enabling a further reduction of these parameters also in concrete.

I leganti CSA sono una nuova classe di leganti idraulici oggetto negli ultimi anni di intensi studi e pubblicazioni.

Buzzi Unicem è l'unico produttore Europeo che abbia attualmente a catalogo una gamma di leganti CSA che possano essere impiegati anche in ambito strutturale.

Il lavoro sperimentale presentato in questo articolo evidenzia le caratteristiche ottenibili dall'impiego di questi cementi in calcestruzzo.

In particolare l'uso di cementi CSA permette di raggiungere: (1) resistenze meccaniche superiori a quelle tradizionalmente ottenibili con i cementi Portland permettendo quindi una riduzione del contenuto di legante in calcestruzzo pari al 8-10%; (2) elevati valori di resistenze meccaniche già a poche ore dal getto di calcestruzzo (20 MPa a 5 ore); (3) un ritiro igrometrico decisamente ridotto (ca. 300 µm/m) rispetto ai calcestruzzo a base di cemento Portland (ca. 700 µm/m).

I leganti CSA mostrano un comportamento analogo ai comuni cementi Portland per quanto riguarda il mantenimento della lavorabilità, mentre dallo studio è chiaramente emerso che la scelta dell'additivo fluidificante è cruciale per il raggiungimento delle prestazioni meccaniche finali.

Dal punto di vista delle prestazioni ambientali i calcestruzzi preparati con leganti CSA hanno mostrato: (1) i valori più bassi relativamente alla CO₂ eq ed al consumo energetico avendo infatti mostrato i minori contributi legati alle emissioni di CO₂ (249 kg CO₂ eq./m³) ed al consumo energetico (2.326 MJ/m³); e (2) considerevoli resistenze meccaniche già a 5 ore dal getto ed elevate resistenze meccaniche a 28 giorni.

I leganti CSA descritti nell'articolo sono di sicuro interesse per il settore delle costruzioni di infrastrutture in calcestruzzo. E' evidente che l'impiego di un calcestruzzo in grado di sviluppare resistenze meccaniche considerevoli già a poche ore del getto e caratterizzato da ritiro fortemente ridotto potrebbe permettere una diversa organizzazione delle fasi di getto all'interno di cantieri complessi, semplificando alcune operazioni di getto e velocizzandone altre,

specialmente all'interno di contesti ambientali caratterizzati da climi rigidi.

La necessità di impiegare un additivo fluidificante specifico ed il maggiore costo dei cementi CSA rispetto ai comuni cementi Portland costituiscono ad ora le principali barriere alla diffusione di questi leganti nel settore dei calcestruzzi strutturali, tuttavia è molto probabile che una maggiore conoscenza ed esperienza delle prestazioni di questi cementi innovativi potrebbe dare la spinta necessaria alla loro diffusione, inizialmente all'interno di cantieri con esigenze particolari.

Le considerazioni tecniche discusse in questo articolo sono basate sullo studio di un materiale che è oggetto di ulteriori ottimizzazioni dal punto di vista del processo produttivo. È pertanto molto probabile che nei prossimi mesi, grazie a migliorie tecniche e ad una maggiore conoscenza del processo si riescano a raggiungere valori di emissioni di CO₂ e consumi energetici inferiori rispetto a quelle attuali, permettendo quindi un'ulteriore riduzione di questi parametri ambientali anche in calcestruzzo.

REFERENCES

- D. Gastaldi, F. Canonico, L. Capelli, E. Boccaleri, M. Milanese, L. Palin, G. Croce, F. Marone, K. Mader, M. Stamparoni, In situ tomographic investigation on the early hydration behaviors of cementing systems, *Constr. Build. Mater.* 29 (2012) 284–290.
- S. Irico, D. Gastaldi, F. Canonico, G. Magnacca, Investigation of the microstructural evolution of calcium sulfoaluminate cements by thermoporometry, *Cem. Concr. Res.* 53 (2013) 239–247.
- G. Paul, E. Boccaleri, L. Buzzi, F. Canonico, D. Gastaldi, Friedel's salt formation in sulfoaluminate cements: A combined XRD and ²⁷Al MAS NMR study, *Cem. Concr. Res.* 67 (2015) 93–102.
- D. Gastaldi, G. Paul, L. Marchese, S. Irico, E. Boccaleri, S. Mutke, L. Buzzi, F. Canonico. Hydration products in sulfoaluminate cements: evaluation of amorphous phases by XRD / solid-state NMR. *Cem. Concr. Res. (in press)*
- F. Winnefeld, B. Lothenbach, Hydration of calcium sulfoaluminate cements – Experimental findings and thermodynamic modeling, *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 1239-1247.
- M.A.G. Aranda, A.G.de La Torre, Sulfoaluminate cement, in: F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, J. Labrincha, V.M. John (Eds.) *Eco-Efficient Concrete*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2013, pp. 488
- G. Bernardo, A. Telesca, G.L. Valenti, A porosimetric study of calcium sulfoaluminate cement pastes cured at early ages, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 1042–1047. 14]
- F. Canonico, L. Buzzi, P. Schäffel, Durability properties of concrete based on industrial calcium sulfoaluminate cement, In: *International Congress on the Durability of Concrete*, Trondheim, Norway, 2012, p. A2-2.
- L. Bertolini, M. Bianchi, L. Buzzi, F. Canonico, L. Capelli, Corrosion behaviour of steel embedded in calcium sulfoaluminate-cement concrete, *International Congress on the Chemistry of cement*, Beijing, China 2015,.
- F. Canonico, F. Bertola, L. Bertolini, L. Buzzi, M. Carsana, Steel corrosion behaviour in real-size concrete elements prepared with sulpho-aluminate cements, *Ibausil*, Weimar Germany, 2015, HV 13-B A.