

IL CALCESTRUZZO STRUTTURALE CON AGGREGATI LEGGERI PER LA REALIZZAZIONE DI MANUFATTI PREFABBRICATI

L. Coppola*, S. Collepari*, P. Bellinzona**

*Enco, Engineering Concrete – Spresiano (TV)

**Laterite Spa – Rubbiano (PR)

1. RIASSUNTO

I calcestruzzi leggeri strutturali confezionati con aggregati di argilla espansa sono caratterizzati da una resistenza specifica (intesa come rapporto tra la resistenza a compressione e la massa volumica) superiore a quella conseguibile con un conglomerato cementizio confezionato con aggregati ordinari. Grazie a questa proprietà, calcestruzzi leggeri strutturali con argilla espansa risultano particolarmente convenienti per la realizzazione di strutture prefabbricate di grossa luce laddove il peso proprio della struttura rappresenta l'aliquota preponderante dei carichi agenti sul manufatto.

L'effettivo impiego del calcestruzzo leggero strutturale è legato alla possibilità di confezionare conglomerati che posseggano resistenze caratteristiche identiche a quelle ($R_{ck} = 50-60 \text{ N/mm}^2$) conseguibili con i tradizionali calcestruzzi prodotti con aggregati ordinari, ma caratterizzati, nel contempo, da una massa volumica inferiore a 1850 kg/m^3 .

Il raggiungimento di questo obiettivo è strettamente legato all'impiego di un aggregato leggero che coniughi le caratteristiche di leggerezza con quelle di elevata resistenza che consenta, cioè, di produrre un conglomerato leggero strutturale in cui l'"anello debole" della catena, rispetto alle sollecitazioni di compressione cui il materiale è assoggettato, sia rappresentato dalla matrice cementizia e non (come invece avviene per gli inerti leggeri di scadente qualità) nell'aggregato leggero.

Nella presente memoria vengono riportati i risultati di una indagine sperimentale che ha avuto come obiettivo quello di studiare le proprietà reologiche, fisiche ed elasto-meccaniche di calcestruzzi leggeri strutturali confezionati con argille espanse Leca Terrecotte. La ricerca ha evidenziato che impiegando aggregati leggeri caratterizzati da valori ridotti dell'assorbimento d'acqua è possibile confezionare conglomerati leggeri di elevata fluidità, e conseguentemente di facile messa in opera, caratterizzati da pratica assenza sia di segregazione che di *bleeding*.

I dati sperimentali, inoltre, hanno evidenziato che è possibile conseguire dopo un trattamento termico a vapore convenzionale di 18h, e dopo 28 giorni, resistenze meccaniche a compressione superiori rispettivamente a 35 e 50 N/mm^2 , contenendo il dosaggio di cemento a 400 kg/m^3 circa, e limitando i valori di massa volumica su calcestruzzo secco nell'intervallo tra 1750 e 1800 kg/m^3 .

L'indagine sperimentale ha, altresì, messo in evidenza che i valori di resistenza a trazione, a trazione per flessione e aderenza acciaio/calcestruzzo del conglomerato leggero strutturale sono uguali o leggermente superiori rispetto a quelli ottenibili con un calcestruzzo ordinario di pari resistenza meccanica a compressione. I risultati ottenuti, quindi, indicano che il calcestruzzo leggero con aggregati Leca Terrecotte possiede uno stesso comportamento, in termini di resistenza alla fessurazione, di un calcestruzzo di pari R_{ck} confezionato con aggregati ordinari.

Il modulo elastico del calcestruzzo leggero – come atteso – è risultato inferiore a 30 GPa e, quindi, minore rispetto ai valori ottenibili per un conglomerato ordinario. La diminuzione della rigidità del calcestruzzo, a parità di deformazioni di natura termigrometrica, induce negli elementi strutturali stati tensionali di trazione minori di quelli impressi in una struttura realizzata con calcestruzzo ordinario.

In accordo con i risultati sperimentali il calcestruzzo leggero strutturale studiato ha presentato un'eccellente stabilità dimensionale evidenziando valori di ritiro igrometrico e di deformazioni lente sostanzialmente identici a quelli di un calcestruzzo ordinario di pari resistenza. Questo significa che le cadute di tensione nelle strutture in calcestruzzo leggero strutturale sono paragonabili a quelle delle strutture in conglomerato ordinario.

La ricerca condotta, infine, ha fornito valori particolarmente positivi della penetrazione dell'anidride carbonica e dei cloruri che è risultata inferiore rispetto a quella registrata per il corrispondente calcestruzzo ordinario di pari resistenza meccanica a compressione. La minore penetrazione della CO₂, in particolare, sembrerebbe correlata alla maggiore basicità dell'aggregato leggero Leca Terrecotte rispetto agli inerti ordinari; la minore diffusione del cloruro, invece, potrebbe essere ascritta all'attività pozzolanica dell'aggregato leggero e al conseguente benefico effetto sulla penetrazione del cloruro che viene ridotta grazie all'adsorbimento di questi ioni da parte dei prodotti della reazione pozzolanica.

2. INTRODUZIONE

Il calcestruzzo leggero è un conglomerato cementizio la cui massa volumica (variabile tra 300 e 2000 kg/m³) è sensibilmente inferiore a quella di un calcestruzzo ordinario (solitamente compresa tra 2200 e 2600 kg/m³).

La ridotta massa volumica del calcestruzzo leggero è imputabile alla presenza di un sistema di vuoti i quali, oltre alla leggerezza, conferiscono al materiale delle eccellenti proprietà di isolamento termico ed assorbimento acustico (1).

L'introduzione di un sistema di vuoti nel conglomerato cementizio, e quindi la produzione del calcestruzzo leggero, si realizza sostanzialmente in tre modi (2), ciascuno dei quali è caratterizzato da una diversa microstruttura:

- sostituendo gli inerti ordinari con inerti leggeri naturali o artificiali caratterizzati nella maggior parte dei casi da un'elevata porosità e quindi da una ridotta massa volumica;
- inglobando nella malta un sistema di bolle d'aria oppure di gas di dimensioni dell'ordine del mm, mediante aggiunta all'impasto di schiuma preformata oppure di sostanze capaci di sviluppare gas in ambiente alcalino;
- utilizzando un inerte grosso ordinario mongranulare i cui granuli vengono legati da un sottile strato di sola pasta di cemento, in modo da creare un sistema di alveoli grossolani tra i granuli dell'inerte.

Nel primo caso si parla di "calcestruzzi con inerti leggeri", nel secondo di "calcestruzzi cellulari", anche se a rigore si dovrebbe parlare di "malte cellulari", nel terzo di "calcestruzzo alveolari".

I calcestruzzi con inerti leggeri, e quelli prodotti con aggregati di argilla espansa in particolare, sono tra i conglomerati alleggeriti quelli più interessanti giacché essi consentono di coniugare il requisito di "leggerezza" con le esigenze di carattere statico richieste per un conglomerato da destinare alla realizzazione di strutture prefabbricate armate e precomprese. Suddetti calcestruzzi, definiti anche conglomerati leggeri

strutturali, sono caratterizzati da massa volumica variabile tra 1400 e 2000 kg/m³ (DM 09/01/96) le cui resistenze meccaniche a compressione variano tra 18 e 70 MPa.

Essendo la massa volumica considerevolmente più elevata di quella dei calcestruzzi leggeri termoisolanti, i calcestruzzi leggeri strutturali posseggono una resistenza termica non elevata ma comunque sostanzialmente migliore di quella dei calcestruzzi ordinari.

In generale il costo per m³ di calcestruzzo leggero è superiore rispetto a quello di un calcestruzzo ordinario, sia per un maggior costo di produzione degli aggregati leggeri rispetto a quelli ordinari, sia perché la bassa densità territoriale delle fonti di approvvigionamento degli inerti leggeri fa sì che il costo del trasporto incida sul costo totale del calcestruzzo. Tuttavia, in particolari situazioni, l'impiego del calcestruzzo leggero può risultare più economico in quanto, per la sua leggerezza, diminuiscono i carichi permanenti della struttura, e quindi è possibile ridurre le dimensioni degli elementi strutturali. Il peso minore dell'ossatura portante permette, inoltre, di costruire anche su terreni di scarsa portanza, senza dover ricorrere a tipologie di fondazione complesse e costose, ma soprattutto consente, a parità di pressioni trasmesse al terreno, di realizzare edifici con uno sviluppo verticale maggiore: il maggior costo del calcestruzzo leggero in questi casi risulta ampiamente compensato dalla maggiore superficie abitabile (3).

Inoltre, l'impiego del calcestruzzo leggero strutturale riduce le forze d'inerzia che insorgono allorché la struttura è soggetta ai movimenti tellurici, consentendo una diminuzione delle armature a parità di sezione, oppure a parità di armature una diminuzione della sezione resistente (4). Il vantaggio di utilizzare il calcestruzzo leggero in luogo di quello ordinario risulta molto più pronunciato nelle strutture precomprese; infatti, la riduzione del peso proprio degli elementi strutturali consente di ridurre il numero dei cavi di precompressione.

Si deve comunque notare che la maggiore applicazione del calcestruzzo leggero strutturale rimane la produzione di manufatti prefabbricati, utilizzati sia come elementi integrativi di strutture intelaiate tradizionali, sia come elementi strutturali e integrativi di procedimenti costruttivi industrializzati. Infatti, grazie ai bassi costi di realizzazione, movimentazione e trasporto dei manufatti, il calcestruzzo leggero rappresenta il materiale ideale per manufatti prefabbricati.

In questi ultimi anni si è inoltre assistito ad un notevole incremento nell'uso di blocchi di calcestruzzo leggero per la realizzazione di tramezzi e murature portanti. L'uso del calcestruzzo leggero consente al solito di ridurre i carichi permanenti, ma anche di migliorare l'isolamento termico e la resistenza al fuoco degli edifici (5).

3. GLI AGGREGATI LEGGERI

Gli aggregati leggeri impiegati per la produzione dei calcestruzzi si contraddistinguono per la microstruttura cellulare o fortemente porosa, cui consegue una massa volumica in mucchio (minore di 1100 kg/m³) inferiore a quella degli inerti impiegati per il confezionamento dei calcestruzzi ordinari (1500 – 1700 kg/m³).

Gli inerti leggeri possono essere naturali oppure artificiali, ottenuti cioè sottoponendo dei materiali naturali o artificiali ad un ciclo di lavorazione capace di produrre dei granuli con una struttura cellulare o fortemente porosa. Tuttavia, gli aggregati leggeri che rivestono una particolare importanza per la produzione dei calcestruzzi leggeri strutturali destinati al settore della prefabbricazione sono quelli artificiali di origine inorganica.

Appartengono a questa categoria gli aggregati leggeri a base di argille espanse che grazie ai ridotti valori di assorbimento risultano particolarmente indicati nella realizzazione di calcestruzzi strutturali di elevata resistenza meccanica.

Nel caso specifico delle argille espanse le materie prime contengono naturalmente delle sostanze capaci, per riscaldamento, di modificarsi con sviluppo di gas e, contemporaneamente, di trasformarsi in una massa piroplastica molto viscosa in modo da intrappolare al suo interno il gas prodotto e di consentire in tal modo l'espansione. Il processo avviene in grandi forni rotanti (diametro di ca. 4,5 m e lunghezza di ca 70 m) costituiti da due cilindri in cascata: nel primo l'argilla viene preriscaldata a ca. 600 °C mentre nel secondo avviene la fase piroplastica dell' argilla, e quindi l'espansione, a ca. 1150 °C. Dopo raffreddamento il prodotto si presenta sotto forma di granuli a microstruttura cellulare interna con la superficie costituita da una scorza vetrosa la quale conferisce all'inerte una consistente resistenza meccanica e un basso assorbimento.

L'assorbimento degli inerti leggeri è un fattore determinante sia per l'ottenimento di calcestruzzi strutturali di adeguate prestazioni elasto-meccaniche, sia nel trasporto e nel pompaggio del calcestruzzo: infatti inerti con assorbimento elevato richiedono dei lunghi periodi di prebagnatura (addirittura 1 o 2 giorni) al fine di evitare che, dopo il confezionamento del calcestruzzo, l'assorbimento di acqua dall'impasto da parte dell'inerte insaturo provochi eccessive perdite di lavorabilità.

4. ATTIVITA' SPERIMENTALI: METODOLOGIE DI PROVA, RISULTATI E DISCUSSIONE

L'obiettivo della ricerca sperimentale è stato quello di ottimizzare la composizione di un calcestruzzo leggero da utilizzare per calcestruzzi preconfezionati nel rispetto di vincoli prestazionali e compositivi prefissati sia sulla base della normativa vigente per i calcestruzzi leggeri (UNI 7548, D.M. 09/01/96 e relative istruzioni tecniche) con funzione strutturale.

4.1 Obiettivi Prestazionali

Nell'ottimizzazione del calcestruzzo leggero strutturale si è fatto riferimento ai seguenti obiettivi prestazionali:

- Resistenza a compressione media alla fine di un trattamento a vapore convenzionale (R_{cmv}) = 35-40N/mm²;
- Trattamento a vapore convenzionale: 2 ore di prestagionatura a 20°C, 3 ore di riscaldamento da 20 a 65°C, 8 ore a 65°C, 5 ore di raffreddamento da 65°C a 20°C
- R_{ck} = 50-60 N/mm²;
- Massa Volumica: 1900-1950 kg/m³ (1750-1850 kg/m³ su provini asciutti);
- Lavorabilità per 30':S4 (slump 16-20 cm);
- Messa in opera : tradizionale, senza pompa.

4.2 Vincoli compositivi

I vincoli prestazionali summenzionati dovevano essere conseguiti con i seguenti materiali:

Cemento:	CEM I 52.5R
Additivi:	Superfluidificante (a base melamminica o naftalinica)
Aggregati leggeri:	LECA TERRECOTTE in due pezzature "0-6" mm e "6-12" mm

4.3 Programma di prove eseguito

La prima fase della sperimentazione è consistita nella caratterizzazione degli aggregati utilizzati.

Si è proceduto, quindi, alla realizzazione di vari impasti preliminari attraverso i quali individuare sia il tipo di additivo fluidificante meglio compatibile con il tipo di calcestruzzo studiato, sia la composizione ottimale del conglomerato sul quale eseguire la completa caratterizzazione fisico-meccanica attraverso le seguenti misure:

- Slump o spandimento a 0 e 30 min dalla fine della miscelazione (UNI 9418 o UNI 8020);
- Massa volumica del calcestruzzo fresco (UNI 6394);
- Resistenza a compressione a 1, 7 e 28 giorni di stagionatura (UNI 6132);
- Resistenza a trazione alla brasiliana a 1, 7 e 28 giorni di stagionatura (UNI 6135);
- Resistenza a trazione per flessione a 1, 7 e 28 giorni di stagionatura (UNI 6133);
- Determinazione del modulo elastico statico a compressione a 1, 7 e 28 giorni di stagionatura (UNI 6556);
- Aderenza acciaio-calcestruzzo mediante prove di sfilamento (*pull-out*) secondo procedura Rilem-Fip CEB;
- Ritiro igrometrico fino a 90 giorni (UNI 6555);
- Deformazione viscosa fino a 90 giorni sotto una tensione di carico applicata (su provini maturati per 28 giorni) pari a circa 1/3 della tensione di rottura;
- Velocità di penetrazione "accelerata" dell'anidride carbonica (in ambiente con CO₂ al 30% in volume) e del cloruro (per immersione in soluzione acquosa di NaCl al 3.5%).

4.3.1 Caratterizzazione delle materie prime

La caratterizzazione degli aggregati utilizzati (sabbia naturale e Leca Terrecotte "0-6" e "6-12" mm) è stata effettuata attraverso le seguenti misure:

- Analisi granulometrica della sabbia naturale (UNI 8520/5);
- Analisi granulometrica degli aggregati leggeri (UNI 8520/5 e non UNI 7549/3 per poter eseguire la combinazione granulometrica con la sabbia);
- Massa volumica in mucchio della sabbia naturale asciutta (UNI 8520/6);
- Massa volumica in mucchio degli aggregati leggeri asciutti (UNI 7549/4);
- Massa volumica media s.s.a. e assorbimento della sabbia naturale (UNI 8520/13);
- Massa volumica media degli aggregati leggeri asciutti (UNI 7549/5);
- Coefficiente di imbibizione (assorbimento) da 1 a 7gg degli aggregati leggeri (UNI 7549/6);

In Tabella 1 e 2 vengono riportati i dati relativi all'analisi granulometrica, assorbimento, massa volumica in mucchio e massa volumica media rispettivamente per le sabbie e gli aggregati leggeri utilizzati.

Tabella 1: analisi granulometrica, massa volumica e assorbimento delle sabbie

Aggregato	SABBIA 0/2 mm	SABBIA 0/4 mm
Tipo	Naturale	Naturale
Apertura Vaglio UNI (mm)	Passante %	Passante %
4	100	100
2	99	77
1	90	48
0.5	59	26
0.25	26	16
0.125	2	6
0.063	0	2
resto	0	0
Modulo di finezza	2.24	3.27
M_{vmedia} (Kg/m³)	2660	2700
M_{vmucchio}(Kg/m³)	1650	1800
Assorbimento (%)	0.60	1.08

Tabella 2: analisi granulometrica, massa volumica e assorbimento degli aggregati leggeri

INERTE:	TERRACOTTA 0-6 mm	TERRACOTTA 6-12 mm
Apertura Vaglio UNI (mm)	Passante %	Passante %
10	100	100
8	100	100
4	94	7
2	35	0
1	7	0
0,5	1	0
0,25	0	0
0,125	0	0
resto	0	0
Modulo di finezza	4,6	5,9
M_{vmedia} (Kg/m³)	1670,0	1375,0
M_{vmucchio}(Kg/m³)	950,0	750,0
Assorbimento	4% (30'), 6%(1g) 7.5% (3gg), 8.5% (7gg)	5% (30'), 7%(1g) 10% (3gg), 11% (7gg)

4.3.2 Impasti preliminari

Sono stati realizzati una serie di impasti preliminari attraverso i quali sono stati messi a confronto vari tipi e dosaggi di additivi superfluidificanti unitamente a diverse proporzioni tra aggregati leggeri e sabbia naturale. Nella fase iniziale della ricerca, per cercare di limitare il più possibile la variazione delle condizioni di prova tra i vari impasti, si è deciso di utilizzare le Terrecotte preliminarmente asciugate considerando poi un assorbimento d'acqua durante l'impasto pari a quello valutato sulle singole Terrecotte a 30'.

Tutti gli impasti preliminari presentavano una discreta coesione e assenza di segregazione. Malgrado ciò, nella misura della lavorabilità attraverso lo *slump* (UNI 9418), è stato sempre registrato un abbassamento del cono di calcestruzzo improvviso e leggermente di taglio. Rispetto ad un calcestruzzo tradizionale, infatti, il calcestruzzo leggero non riesce ad abbassarsi con continuità sotto l'azione del proprio peso. Per questo motivo si è ritenuta più significativa la misura di consistenza dell'impasto ottenuta tramite la prova di spandimento con 15 colpi (UNI 8020) usualmente utilizzata per calcestruzzi ordinari fluidi.

Questa prima serie di impasti preliminari ha determinato la scelta dell'additivo melamminico in forma liquida come superfluidificante da adottare nella ricetta definitiva e l'impiego della misura della lavorabilità tramite spandimento su tavola a scosse invece che attraverso la valutazione dello *slump*.

In una seconda serie di impasti preliminari sono state confrontate sabbie naturali con differenti granulometrie e moduli di finezza oltre a diverse combinazioni granulometriche tra aggregati leggeri e sabbia. In Tabella 3 vengono riportati gli impasti più significativi relativi all'influenza del tipo e del dosaggio di sabbia combinata con gli aggregati leggeri. Come si può osservare la sostituzione della sabbia fine 0/2 (Mix C) con una sabbia più grossolana 0/4 (Mix D) ha consentito, pur conservando un'ottima coesione ed assenza di segregazione dell'impasto, un aumento della lavorabilità iniziale con un minor rapporto acqua cemento.

L'aumento della frazione di sabbia rispetto all'inerte leggero (Mix G) e l'impiego delle Terrecotte umide anziché asciutte ha ulteriormente migliorato la conservazione della lavorabilità nel tempo rispetto ai Mix D ed F senza, tuttavia, aumentare la massa volumica del conglomerato oltre i limiti previsti per questo tipo di calcestruzzi leggeri (1950 kg/m³ su calcestruzzo non essiccato).

Alla fine degli impasti preliminari, dunque, la composizione del mix G è risultata quella con caratteristiche reologiche e meccaniche ottimali e quindi prescelta per la realizzazione dell'impasto definitivo sul quale eseguire la caratterizzazione completa del materiale.

4.3.3 Composizione e caratterizzazione allo stato fresco del calcestruzzo con Leca Terrecotte ottimizzato

In base ai risultati preliminari è stata realizzato l'impasto definitivo caratterizzato dalla seguente composizione in peso:

- | | |
|--|------------------------|
| • Cem I 52.5 (Colacem) : | 425 kg/m ³ |
| • Aggregato leggero Leca Terrecotte 0-6 mm s.s.a.
(saturato con l'acqua di assorbimento del 6% valutato ad 1g) : | 395 kg/m ³ |
| • Aggregato leggero Leca Terrecotte 6-12 mm s.s.a.
(saturato con l'acqua di assorbimento del 7% valutato ad 1g) : | 285 kg/m ³ |
| • Sabbia 0-4 mm s.s.a. : | 600 kg/m ³ |
| • Additivo superfluidif. melamminico (soluz. al 40%) | 6.34 kg/m ³ |
| • Acqua (esclusa l'acqua di assorbimento degli aggregati) | 205 kg/m ³ |
| • a/c (compresa acqua additivo) | 0.51 |

Tabella 3 – Impasti preliminari con diversi tipi e dosaggi di sabbia.

Mix	Cem I 52.5R kg/m ³	Terra cotta 6/12 s.s.a kg/m ³	Terra cotta 0/6 s.s.a kg/m ³	Sabbia naturale s.s.a.		Additivo superfluidif. : Mapefluid M318 (soluz. 40%) kg/m ³	% su peso cem	Acqua kg/m ³	a/c (con acqua additivo)	Slump (cm) Spandim. (%)		Massa Volumica (kg/m ³)		R _{c28gg} (maturaz. a vapore) N/mm ²	M _{v28gg} (maturaz. a vapore) kg/m ³
				tipo	kg/m ³					0'	30'	0'	30'		
D*	409	271	383	0 / 2	572	6,12	1,49	189	0,47	17	10	1830	1820	44	1880
										55	45				
F*	417	276	390	0 / 4	592	6,23	1,49	187	0,46	18	15	1870	1870	50	1900
										72	48				
G°	428	289	398	0 / 4	608	6,23	1,49	187	0,51	20	13	1946	1927	50	1950
										90	60				

* Utilizzate TC asciutte (Umidità = 0.09%). Calcolo a/c e rese con assorbimento TC 6/12 e 0/6 a 30' (5% e 4% rispett.)

° Utilizzate TC tal quali : (umidità TC 6/12= 9.7% TC 0/6= 6.5%).

Calcolo a/c e rese con assorbimento TC 6/12 e 0/6 a 24h (7% e 6% rispett.)

Come per l'impasto preliminare G, gli aggregati leggeri Leca Strutturale sono stati utilizzati non asciutti ma con un'umidità del 9.5% e 6.5% rispettivamente per TC6/12 e TC0/6. Volendo esprimere la **composizione** in termini di **volume** e riferirla agli aggregati leggeri asciutti si avrà:

• Cem I 52.5 :	135 lt/m ³
• Aggregato leggero Leca Terrecotte 0-6 mm asciutta :	225 lt/m ³
• Aggregato leggero Leca Terrecotte 6-12 mm asciutta :	195 lt/m ³
• Sabbia 0-4 mm s.s.a. :	220 lt/m ³
• Additivo superfluidif. melamminico (soluz. al 40%)	5 lt/m ³
• Acqua (esclusa l'acqua di assorbimento degli aggregati)	205 lt/m ³
• Aria intrappolata	15 lt

Sul calcestruzzo allo stato fresco sono state eseguite le seguenti misure

• Spandimento a 0':	125 %
• Spandimento a 30':	80 %
• Massa volumica a 0':	1925 kg/m ³
• Massa volumica a 30':	1935 kg/m ³

Come si può osservare dai dati soprariportati, i valori di lavorabilità dell'impasto definitivo sono stati ulteriormente migliorati rispetto all'impasto G preliminare adottando una procedura di miscelazione leggermente diversa: prima di aggiungere tutti i componenti, gli inerti leggeri sono stati premiscelati per 5' con circa il 20% dell'acqua d'impasto. Con i valori di lavorabilità ottenuti, la messa in opera e la compattazione del conglomerato risultano del tutto soddisfacenti anche in assenza di una prolungata vibrazione.

4.3.4 Proprietà meccaniche del calcestruzzo

Il calcestruzzo con la composizione descritta nel precedente paragrafo è stato sottoposto ad una stagionatura accelerata caratterizzata dal seguente ciclo di maturazione a vapore di 18h:

- Prestagionatura a 20°C per 2h
- Riscaldamento da 20°C a 65 °C in 3h
- Maturazione a 65°C per 8h
- Raffreddamento da 65°C a 20°C in 5h

Sui provini così stagionati, alle stagionature di 18 h (scassero), 7 e 28 giorni sono state effettuate misure di massa volumica (su provini non essiccati), resistenza meccanica a compressione, a flessione (R_f) e a trazione indiretta (brasiliana) R_t . Per la valutazione della R_{ck} e della aderenza acciaio/calcestruzzo, in conformità alle relative normative, sono stati anche confezionati provini maturati per 28 giorni a 20°C ed U.R del 95%.

Nelle Tabelle 4 e 5 sono riportati i risultati di queste prove ottenuti dalla **media delle misure su due provini** per ogni stagionatura.

Tabella 4: Misure della massa volumica e della resistenza a compressione.

Resist. a compressione media (N/mm^2)				Massa volumica (kg/m^3)			
18h vap	7gg vap	28gg vap	28gg 20°C	18h vap	7gg vap	28gg vap	28gg 20°C
36	44	50	54	1965	1960	1990	1935

Tabella 5: Misure della resistenza a trazione (R_t) e a flessione (R_f).

Resist. a trazione brasiliiana: R_t (N/mm^2)			Resist. a flessione: R_f (N/mm^2)			Pull-out	
18h vap	7gg vap	28gg vap	18h vap	7gg vap	28gg vap	$\tau_{28gg\ 20^\circ C}$ (N/mm^2)	Tipo rottura
2,4	3,4	3,9	4,3	5,3	6,6	19,0	cls

I valori ottenuti per la resistenza meccanica a compressione soddisfano i requisiti di resistenza allo scasso di $35-40 N/mm^2$ e di $R_{ck} \geq 50 N/mm^2$ ($R_{cm28gg} \geq 53.5 N/mm^2$).

I valori della massa volumica allo stato indurito su provini non essiccati risultano in linea con la richiesta di $1900 - 1950 kg/m^3$ (corrispondente a circa $1750-1800 kg/m^3$ su provini essiccati, intervallo limite previsto dalla UNI 7548 per i calcestruzzi leggeri con funzione strutturale e $R_c \geq 25MPa$)

I risultati di resistenza a trazione per flessione (circa 1/8 di quella a compressione), di trazione indiretta brasiliiana (circa 1/15 di quella a compressione) e di aderenza acciaio-calcestruzzo appaiono congruenti con i corrispondenti valori di resistenza a compressione e con i dati riportati in letteratura.

E' interessante notare come i valori ottenuti per R_f ed R_t sono uguali se non addirittura superiori a quelli ottenibili con un calcestruzzo ordinario di pari resistenza meccanica a compressione. I risultati ottenuti, quindi, indicano che il calcestruzzo leggero con Leca terrecotte in termini di resistenza alla fessurazione si comporta allo stesso modo di un conglomerato ordinario di pari R_{ck} .

Allo stesso modo è interessante notare come il valore della tensione di aderenza è paragonabile a quello che si può conseguire con un calcestruzzo con aggregati ordinari di eccellente qualità meccanica ($R_{ck} \geq 40 N/mm^2$).

Con il calcestruzzo maturato a vapore sono stati confezionati anche i provini cilindrici necessari per la prova di modulo elastico statico secante (E_s) in compressione alle stagionature di 7 e 28 giorni (Tabella 6), valutato come media delle misure effettuate su tre

provini. La prova consiste nel determinare la deformazione elastica sotto un carico che, attraverso tre cicli di carico-scarico, viene incrementato da un valore di $f_c/10$ a $f_c/3$, dove f_c è la resistenza meccanica media a compressione ottenuta su 3 provini di stessa forma cilindrica. La valutazione della deformazione (in corrispondenza di $f_c/3$) è stata effettuata tramite l'ausilio di una coppia di *strain-gauge* applicati lungo l'asse del cilindro in posizioni diametralmente opposte.

Da un punto di vista pratico è degno di nota il minor modulo elastico (circa 28000 MPa a 28 gg) contro un valore di circa 40000 MPa per un calcestruzzo ordinario pari a R_{ck} (50 MPa). Il minor modulo elastico comporta una minore tensione indotta dalle deformazioni contrastate di origine termica o igrometrica e, quindi, una minore tendenza del calcestruzzo leggero alla fessurazione.

Tabella 6: Misure del modulo elastico statico secante (E_s).

7gg vap	28gg vap
E_s (MPa)	E_s (MPa)
23000	28500

4.3.5 Ritiro igrometrico e deformazione viscosa del calcestruzzo leggero

Sul calcestruzzo maturato per 24 h a 20°C e UR del 95% sono state eseguite anche misure di ritiro igrometrico fino a 90gg in ambiente a 20°C e 50% di umidità calcestruzzo. I risultati di queste prove sono riportate in Tabella 7.

I dati indicano che le variazioni dimensionali sono relativamente contenute (probabilmente per la matrice cementizia di bassa porosità che ostacola l'evaporazione dell'acqua) e comunque paragonabili ai valori di ritiro che si registrano sui calcestruzzi ordinari di buona qualità.

Tabella 7: Misure del ritiro igrometrico.

Ritiro ($\mu m/m$)						
3gg	7gg	14gg	21gg	28gg	60gg	90gg
100	150	190	300	340	390	499

In Tabella 8 sono riportati i valori attualmente disponibili sulla deformazione viscosa misurata, in un ambiente con temperatura di 20°C e con U.R. del 70%, su provini cilindrici maturati a vapore. Alla stagionatura di 28 giorni i provini sono stati sottoposti ad un carico di 11 N/mm² pari a circa 1/3 della resistenza meccanica a compressione misurata alla stessa stagionatura su provino cilindrico. L'elevata resistenza meccanica del conglomerato e la sua maturazione a vapore hanno determinato una deformazione viscosa del

calcestruzzo leggero molto contenuta, confrontabile con quella registrata su calcestruzzi confezionati con aggregati ordinari di pari prestazioni meccaniche.

Tabella 8: Misura della deformazione viscosa (fluage o creep).

Deformazione viscosa ($\mu\text{m/m}$)						
3gg	7gg	14gg	21gg	28gg	60gg	90gg
133	178	210	260	338	490	575

4.3.6 Resistenza del calcestruzzo alla penetrazione dell'anidride carbonica e dei cloruri

Per quanto riguarda le misure di velocità di penetrazione dell'anidride carbonica (in ambiente con CO_2 al 30% in volume) e del cloruro (per immersione in soluzione acquosa di NaCl al 3.5%), il calcestruzzo leggero è stato messo a confronto con un calcestruzzo di pari rapporto a/c confezionato con aggregati ordinari.

I risultati riportati in Tabella 9 mostrano le eccellenti prestazioni del calcestruzzo leggero, migliori di quelle del conglomerato di massa volumica ordinaria di pari resistenza meccanica, in termini di una maggiore resistenza alla penetrazione dell'anidride carbonica e del cloruro. Come si può meglio vedere dal grafico della Fig. 1, la penetrazione della CO_2 (in mm) è proporzionale alla radice del tempo (in giorni), secondo un coefficiente K che è simile a quello del calcestruzzo ordinario. Tuttavia, nel calcestruzzo con aggregato Terrecotte la CO_2 (ancorché ad elevata concentrazione rispetto a quella dell'aria naturale) non penetra assolutamente per circa 1 mese: questo tempo è ovviamente molto più lungo se il calcestruzzo è esposto alla penetrazione di CO_2 dell'aria naturale. Questo singolare e positivo comportamento in presenza dell'inerte leggero Terrecotte meriterebbe un approfondimento per i risvolti scientifici e pratici che potrebbero conseguire. E' ipotizzabile, per ora, che la maggiore difficoltà che incontra la CO_2 a penetrare nel calcestruzzo con inerte Terrecotte possa essere messa in relazione con una maggiore basicità di questo inerte rispetto a quello naturale.

Per quanto riguarda la penetrazione dei cloruri, il grafico in Fig. 2 evidenzia, una più lenta diffusione del cloruro all'interno del calcestruzzo leggero rispetto a quello ordinario di pari a/c e resistenza. Anche questo positivo e sorprendente risultato meriterebbe un approfondimento per i benefici che potrebbe conseguire le strutture in calcestruzzo leggero nelle opere marittime, stradali ed autostradali nei confronti del cloruro e quindi della corrosione delle armature metalliche.

Allo stato attuale è ipotizzabile che la minore diffusione del cloruro (Tabella 9 e Fig. 2) sia da mettere in relazione con una certa attività pozzolanica esplicita dalla Terrecotte come tipicamente avviene per i materiali argillosi sottoposti a trattamento termico.

Tabella 9: Misure di penetrazione della CO₂ e del cloruro (Cl⁻)

Misura	calcestruzzo	Esposizione* all'agente aggressivo per:							
		2gg	7gg	14gg	21gg	28gg	45gg	60gg	90gg
Penetrazione e CO₂ (mm)	leggero (R _{c90gg} =57MPa)	0	0	0	0	0	1	2	4
	ordinario** (R _{c90gg} =55MPa)	0	0	1	2	2	3	4	6
Penetrazione e Cl⁻ (mm)	leggero (R _{c90gg} =57MPa)	0	4	7	8	8	9	13	15
	ordinario** (R _{c90gg} =55MPa)	5	8	10	11	12	14	18	21

* Dopo 28 gg di stagionatura

** Composizione nominale: 410 kg/m³ Cem I 52.5R; 210 kg/m³ acqua;

6.4 kg/m³ superfluidificante melamminico, 865 kg/m³ sabbia 0/4; 865 kg/m³ ghiaio 4/12

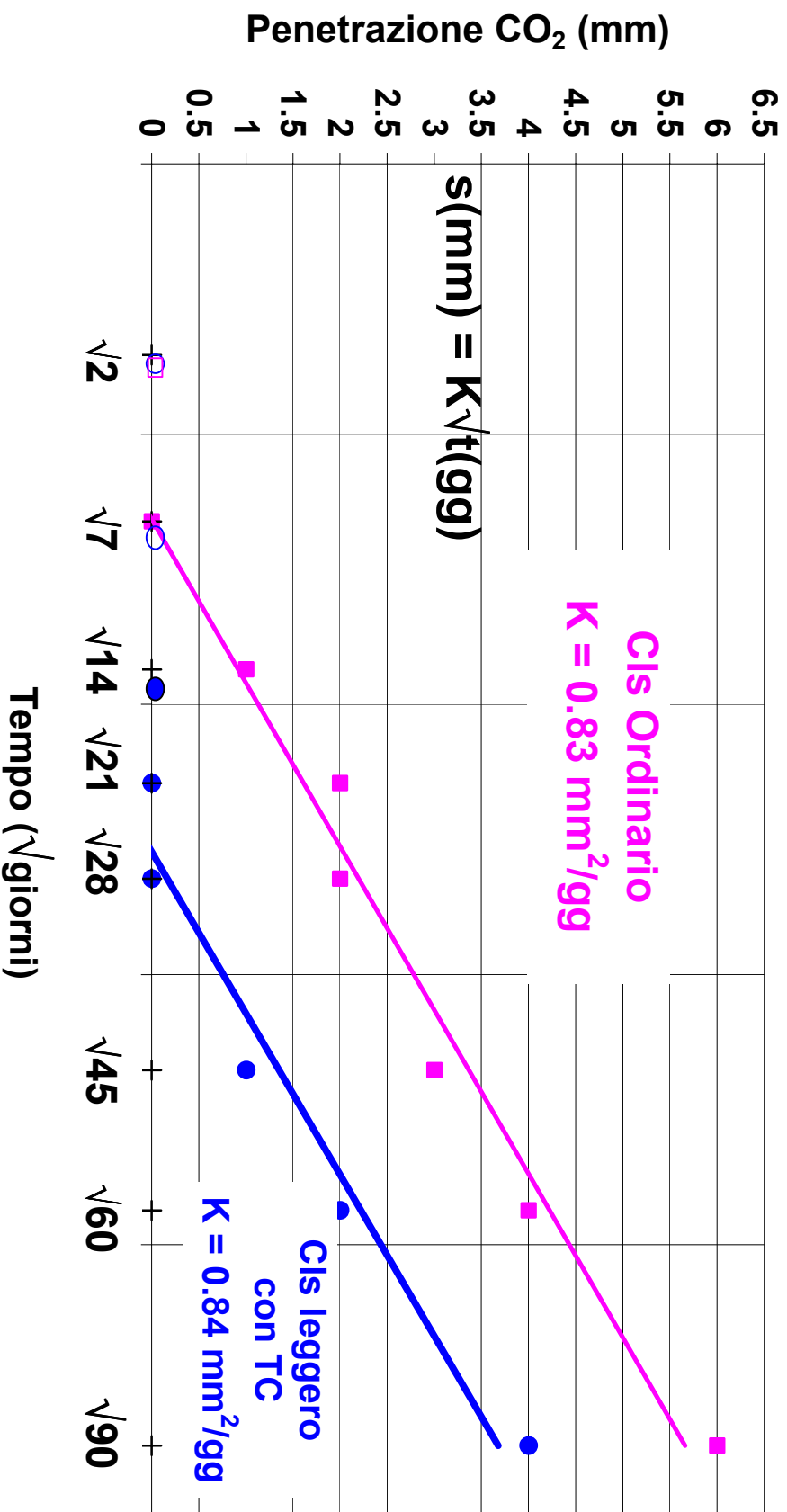


Fig.1 - Penetrazione della CO₂ (s) in funzione del tempo per calcestruzzo ordinario e leggero di pari a/c (0.51) e resistenza (54 N/mm²).

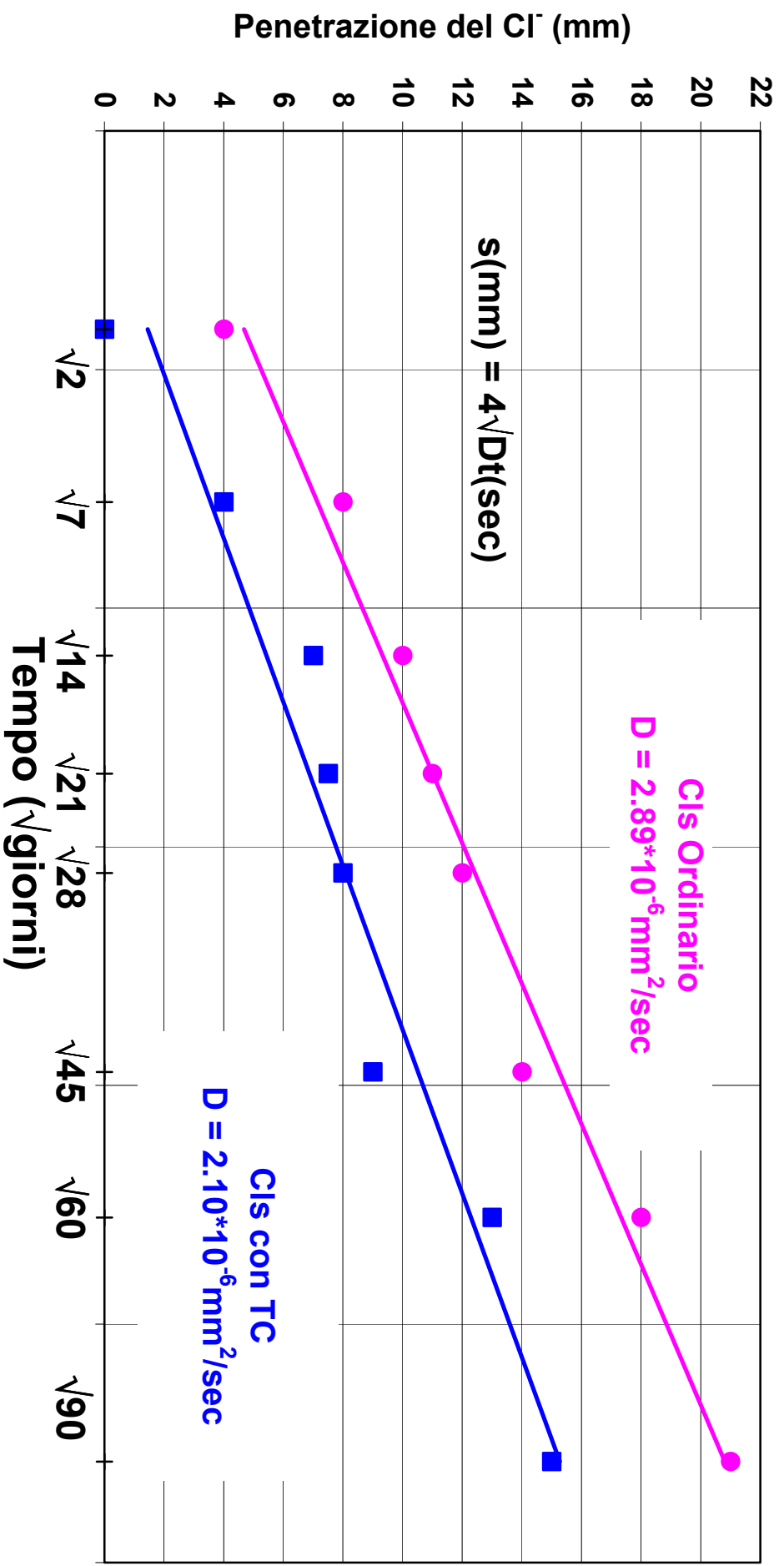


Fig.2 - Penetrazione del cloruro (s) in funzione del tempo per calcestruzzo ordinario e leggero di pari a/c (0.51) e resistenza (54 N/mm^2).

5. CONCLUSIONI

I risultati conseguiti hanno messo in evidenza che impiegando un aggregato leggero (Leca Terrecotte) caratterizzato da un ridotto assorbimento:

- è possibile confezionare calcestruzzi leggeri strutturali caratterizzati da massa volumica di 1900 - 1950 kg/m³ (valori misurati su materiale saturo di acqua pari a circa 1750 - 1800 kg/m³ su calcestruzzo secco) con una R_{ck} di circa 50 MPa;
- il modulo elastico è pari a 28500 MPa. Tale valore comporta, che a parità di deformazioni (termiche o igrometriche) contrastate, la tensione indotta nel calcestruzzo leggero è minore di quella di un calcestruzzo ordinario di pari resistenza meccanica;
- il calcestruzzo leggero strutturale studiato presenta una stabilità dimensionale (in termini di basso ritiro igrometrico e bassa deformazione viscosa) paragonabile a quella dei calcestruzzi ordinari di pari prestazioni meccaniche ma più pesanti;
- particolarmente positivi (e per un certo verso sorprendenti in quanto non segnalati nella letteratura tecnica) appaiono i risultati di penetrazione della CO₂ e del cloruro all'interno del calcestruzzo leggero rispetto a quelli registrati per un calcestruzzo ordinario di pari resistenza meccanica; la minore penetrazione della CO₂ potrebbe ipoteticamente essere correlata con la maggiore basicità degli aggregati leggeri Leca Terrecotte rispetto agli inerti ordinari; analogamente, per la minore diffusione del cloruro si potrebbe invocare una certa benefica attività pozzolanica degli aggregati leggeri Leca Terrecotte, attività che notoriamente rallenta la diffusione del cloruro attraverso il copriferro verso i ferri di armatura.

6. BIBLIOGRAFIA

- (1) S Short, W. Kinniburgh, *Lightweight concrete*, Applied Science Publishers, London (1978).
- (2) ACI 213, *Guide for structural lightweight aggregate concrete*, J. Amer. Concr. Inst., 64, 433 (1967).
- (3) L. Coppola, S. Monosi, M. Collepari, Il calcestruzzo leggero, Il Nuovo Cantiere, n° 9 ottobre (1995).
- (4) R. Calzona, *Il conglomerato leggero strutturale*, Ed. di Scienza e Tecnica, Milano (1982).
- (5) M. Collepari, L. Coppola, *Materiali Innovativi per Calcestruzzi Speciali*, Cap. VII, Ed. Enco (1990).