

**MATERIALI** ■

Interamente dedicato ai calcestruzzi leggeri, l'articolo fornisce una completa panoramica sui relativi metodi di produzione, caratteristiche e proprietà nonché tipologie d'impiego.

## Il calcestruzzo leggero

di L. COPPOLA\*, S. MONOSI\*\*, M. COLLEPARDI\*\*  
 \* Erco, Engineering Concrete, Sarsano (TV)  
 \*\* Dipartimento di Scienza dei Materiali e della Terra, Università di Ancona

Il calcestruzzo leggero è un conglomerato cementizio la cui massa volumica (variabile tra 300 e 1850 kg/m<sup>3</sup>) è sensibilmente inferiore a quella di un calcestruzzo ordinario (solitamente compresa tra 2200 e 2600 kg/m<sup>3</sup>).

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. La presenza di vuoti

rende però il calcestruzzo leggero meno resistente meccanicamente alla compressione e all'abrasione rispetto ad un calcestruzzo ordinario; tuttavia, non sempre queste proprietà risultano essenziali nel campo dell'ingegneria civile (intonaci termoisolanti, massetti per pavimenti, ecc.).

L'introduzione di un sistema di vuoti nel conglomerato cementizio, e quindi la produzione del calcestruzzo leggero, si realizza sostanzialmente in tre modi, ciascuno dei quali è caratterizzato

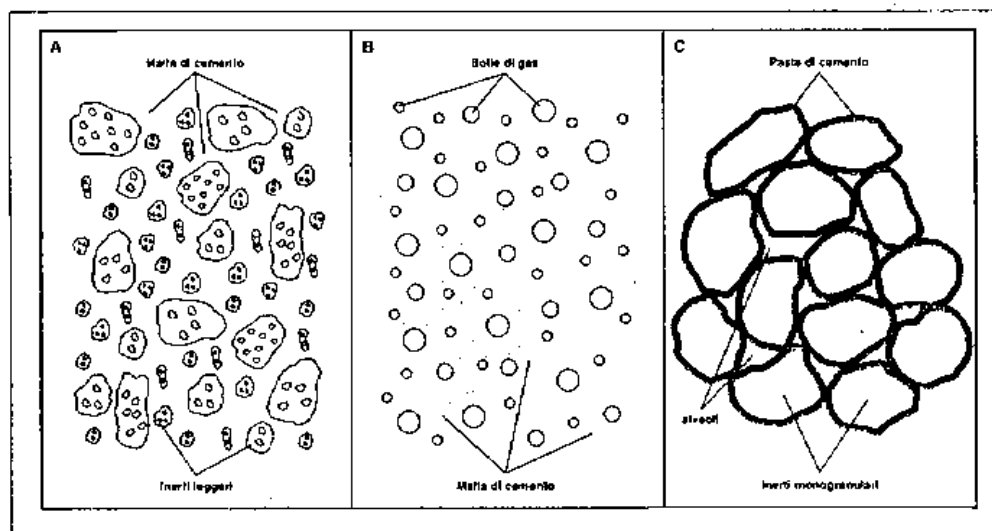
da una diversa microstruttura:

- 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 (fig. 1A);

- 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 (fig. 1B);

- utilizzando un inerte grosso

Fig. 1 - Struttura schematica dei calcestruzzi leggeri: A) calcestruzzo con inerti leggeri; B) calcestruzzo cellulare; C) calcestruzzo alveolare.



ordinario monogranulare 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 (fig. 1C).

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 «calcestruzzi alveolari».

È possibile, ovviamente, realizzare dei calcestruzzi leggeri combinando due dei tre sistemi menzionati: calcestruzzi alveolari con inerti leggeri oppure calcestruzzi cellulari con inerti leggeri.

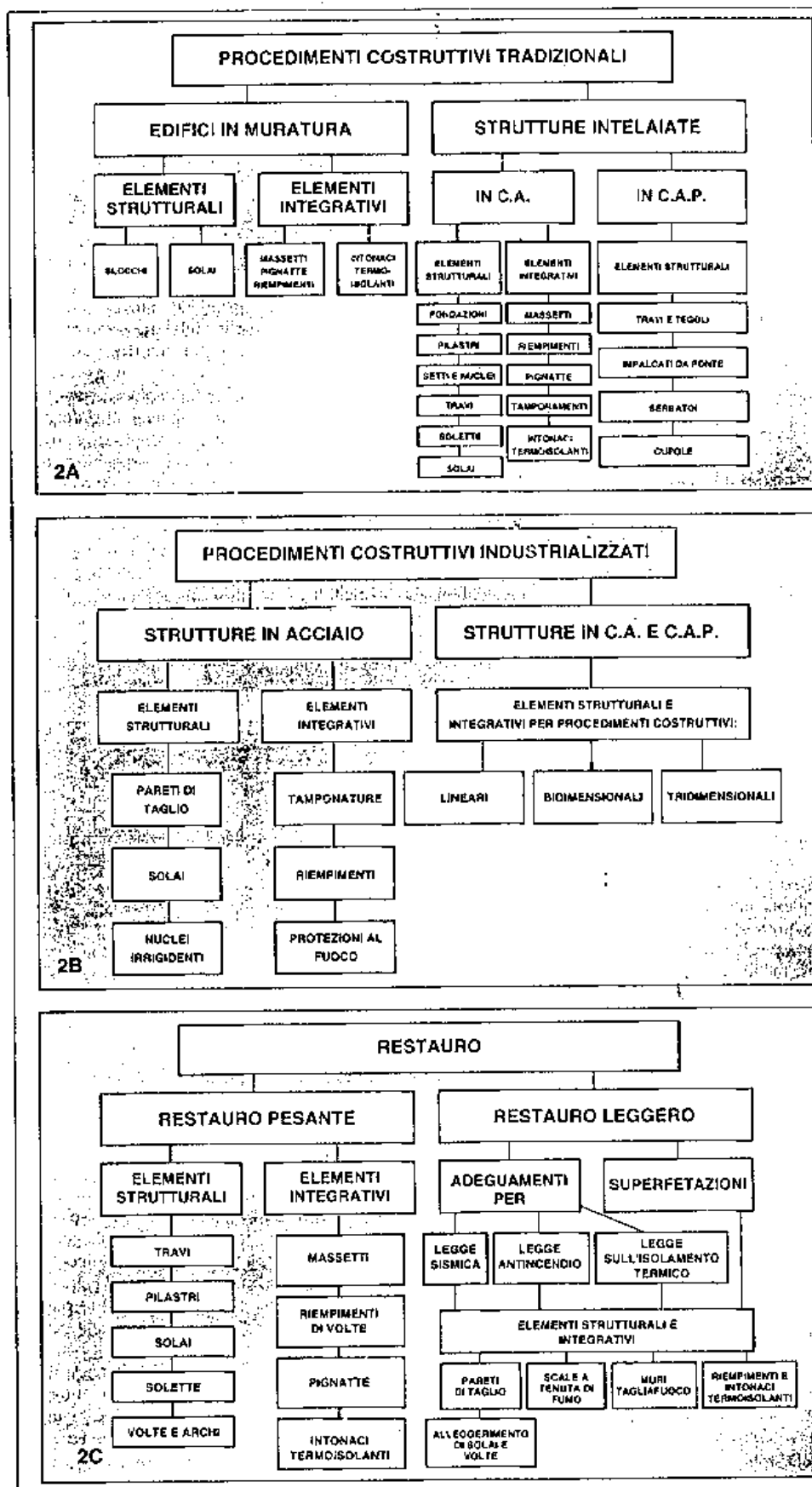
Prescindendo dalla microstruttura, i calcestruzzi leggeri possono essere classificati in base alla massa volumica secca e alla resistenza meccanica a compressione, entrambe determinate dopo 28 giorni di stagionatura, in:

*a) Calcestruzzi leggeri termoisolanti*  
Si tratta di calcestruzzi leggeri con una massa volumica variabile tra 300 e 800 kg/m<sup>3</sup>, le cui resistenze meccaniche a compressione variano tra 0,5 e 7 MPa. Questi calcestruzzi vengono utilizzati esclusivamente come materiale da riempimento, oppure come rivestimenti coibenti.

*b) Calcestruzzi leggeri strutturali*  
Sono calcestruzzi leggeri con massa volumica variabile tra 1300 e 1850 kg/m<sup>3</sup>, generalmente confezionati con inerti leggeri artificiali, le cui resistenze meccaniche a compressione variano tra 18 e 60 MPa. Questi calcestruzzi sono destinati alla realizzazione di strutture armate (ad armatura lenta o precompressa) e non.

Essendo la massa volumica considerevolmente più elevata di quella dei calcestruzzi leggeri

Fig. 2 - Impieghi del calcestruzzo leggero: A) nei procedimenti costruttivi tradizionali; B) nei procedimenti costruttivi industrializzati; C) nel restauro degli edifici in muratura.



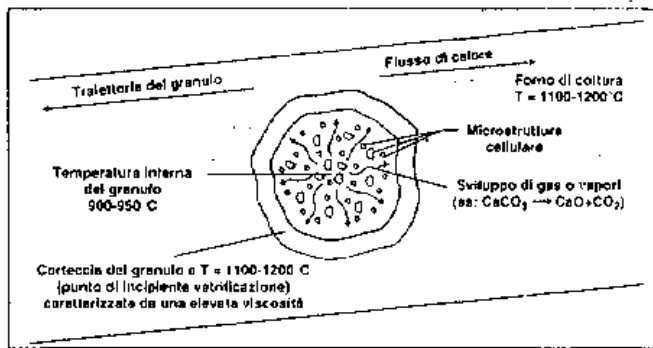


Fig. 3 - Condizioni ottimali per la produzione delle argille espanse.

termoisolanti, i calcestruzzi leggeri strutturali posseggono una resistenza termica non elevata, ma comunque sostanzialmente migliore di quella dei calcestruzzi ordinari.

### c) Calcestruzzi leggeri a resistenza moderna

Sono calcestruzzi leggeri con proprietà meccaniche intermedie tra quelle dei calcestruzzi strutturali e termoisolanti.

La loro massa volumica varia infatti tra 800 e 1300 kg/m<sup>3</sup> e le resistenze meccaniche tra 7 e 18 MPa. Questi calcestruzzi leggeri sono destinati alla realizzazione di strutture per le quali non si richiede un particolare impegno dal punto di vista statico, ma per le quali si vuole garantire un livello accettabile di comfort termico.

In generale il costo per m<sup>3</sup> di calcestruzzo leggero è superiore 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 in maniera rilevante 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 co-

struire 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 com-

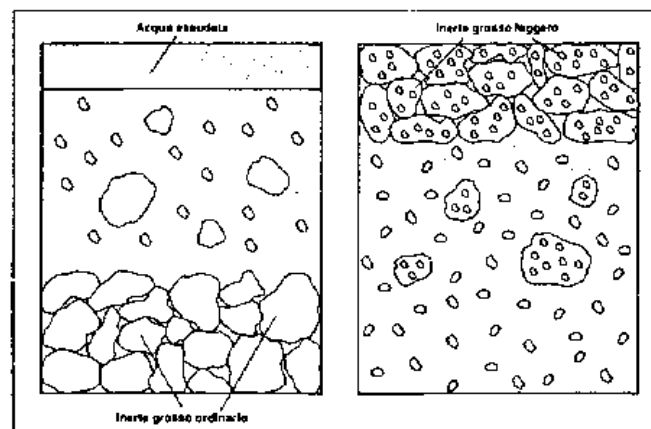


Fig. 4 - Segregazione in un calcestruzzo ordinario e leggero.

pensato dalla maggiore superficie abitabile.

Con il calcestruzzo leggero è possibile costruire sopraelevazioni di costruzioni esistenti che non sono sufficientemente resistenti da poter sopportare il peso di strutture in calcestruzzo ordinario e che quindi richiederebbero dei complessi interventi di adeguamento per aumentarne la capacità portante. Inoltre, l'impiego del calcestruzzo leggero 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.

Il calcestruzzo leggero tuttavia possiede una minore duttilità rispetto al calcestruzzo ordinario: duttilità elevate sono richieste invece per strutture antisismiche, in quanto maggiore è la duttilità del materiale, maggiore è la sua capacità di deformarsi nel campo plastico, e quindi maggiore è la capacità di dissipare energia prima di collassare. Questo handicap del calcestruzzo leggero può essere comunque eliminato se si conferisce duttilità alle sezioni più a rischio (es.: nodi trave - pilastro) con una opportuna staffatura con passo non superiore a 10 cm. D'altra parte gli stessi accorgimenti debbono essere adottati

mentri strutturali consente di ridurre il numero dei cavi di pre-compressione.

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.

Al fine di contenere il consumo energetico per usi termici negli edifici riducendo le dispersioni di calore verso l'esterno, si è molto diffusa negli ultimi anni la tecnica del «rivestimento a cappotto»: si tratta di rivestimenti che impediscono, nel periodo invernale e estivo, la trasmissione del calore per irraggiamento e per conduzione rispettivamente e che allo stesso tempo risolvono i problemi di condensa legati ai ponti termici. In questo campo vengono ampiamente utilizzate malte cosiddette coibenti, realizzate con inerti leggeri, in particolare con polistirolo espanso, sfruttando le eccellenti qualità di isolamento di questi materiali.

Nella fig. 2 (pag. 73) sono riassunti i diversi impieghi del calcestruzzo leggero.

### 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 muccluo

(minore di  $1100 \text{ kg/m}^3$ ) inferiore a quella degli inerti impiegati per il confezionamento dei calcestruzzi ordinari ( $1500 - 1700 \text{ kg/m}^3$ ).

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.

### Gli inerti leggeri naturali

Appartengono alla categoria degli aggregati leggeri naturali la pomice, la scoria, il tufo e la terra di diatomee; ad eccezione della terra di diatomee di origine elastica, gli inerti leggeri naturali sono tutti di origine vulcanica.

Sicuramente l'inerte leggero naturale che è stato più largamente impiegato nel confezionamento di calcestruzzi è la pomice, una roccia di origine vulcanica, di colore chiaro, avente una microstruttura porosa costituita da piccole celle interconnesse, formatesi durante il raffreddamento della lava fusa a seguito dello sviluppo di gas e vapori, mentre la massa era ancora viscosa.

Conosciuta fin dall'epoca dei Romani è stata estesamente utilizzata per la realizzazione delle murature di terme e templi: la cupola del Pantheon fu realizzata con un «calcestruzzo» di calce e pomice.

La pomice possiede una massa volumica in mucchio variabile tra  $500$  e  $900 \text{ kg/m}^3$ , e delle buone caratteristiche isolanti ( $K = 0.1 - 0.2 \text{ Kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$ ), ma purtroppo anche dei valori elevati di assorbimento. Con questo inerte leggero è possibile confezionare calcestruzzi con una massa volumica variabile tra  $700$  e  $1400 \text{ kg/m}^3$ .

### Gli aggregati leggeri artificiali

Gli inerti leggeri artificiali si dividono in 2 categorie:

- aggregati leggeri che acquistano la struttura cellulare in seguito a trattamenti termici ad alta temperatura di sostanze inorga-

niche, attraverso l'espansione termica di gas e di vapori oppure mediante agglomerazione di polveri finissime;

- aggregati leggeri di natura organica i quali possono essere ottenuti come prodotti di sintesi di alcune sostanze o mediante trattamenti di stabilizzazione chimica e fisica di cascami di origine vegetale.

### Gli inerti leggeri artificiali di origine inorganica

Come materie prime per la produzione degli inerti di origine inorganica vengono impiegati generalmente la perlite, la vermiculite, depositi naturali di argille, scisti e ardesie, oppure prodotti di scarto di alcuni processi industriali come la loppa d'altoforno o le ceneri volanti ottenuti, rispettivamente, dal processo di produzione dell'acciaio e da quello di produzione

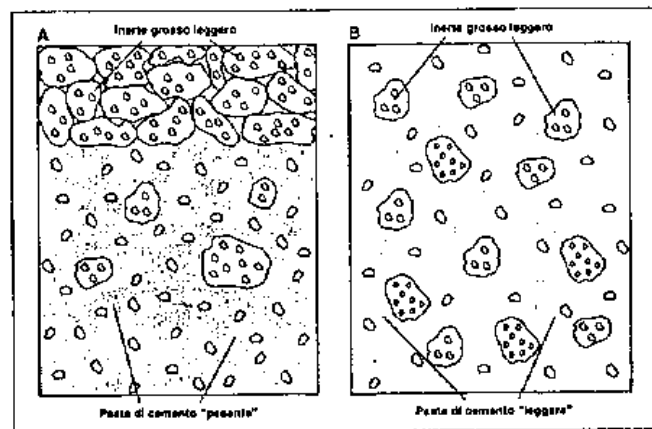


Fig. 5 - Calcestruzzi leggeri senza (A) e con (B) additivi «stabilizzanti».

dell'energia elettrica nelle moderne centrali a carbone.

La perlite è una roccia vulcanica di natura silicea che a temperatura tra i  $900$  e i  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  fonde e aumenta di volume per sviluppo di vapore, dando luogo ad un materiale a struttura cellulare con un massa volumica in mucchio variabile tra  $30$  e  $240 \text{ kg/m}^3$ . I calcestruzzi confezionati con perlite hanno una resistenza meccanica molto bassa e un ritiro elevato; pertanto essi vengono impiegati per rea-

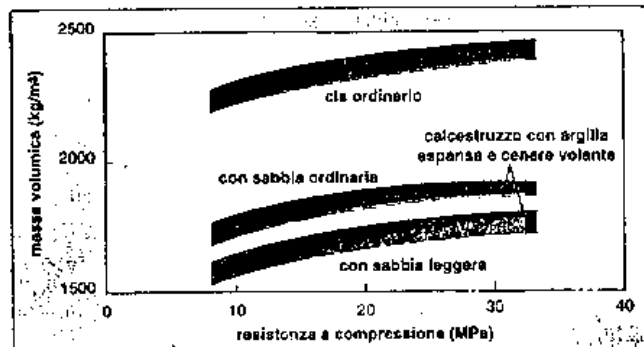


Fig. 6 - Campi di esistenza della massa volumica e della resistenza meccanica a compressione di diversi calcestruzzi.

lizzare elementi di tamponatura non portanti oppure rivestimenti coibenti.

La vermiculite ha una struttura scistosa molto simile a quella della mica. A temperatura variabile tra i  $650$  e i  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , la vermiculite libera l'acqua interstiziale, e lo sviluppo di vapore

argille, gli scisti e le ardesie espanse.

Per essere idonee alla produzione degli inerti espansi le materie prime debbono contenere delle sostanze (pirite, ematii, gesso e sostanze organiche) capaci, per riscaldamento, di decomporre con sviluppo di gas e, contemporaneamente, di trasformarsi in una massa piroplastica molto viscosa in modo da intrappolare al suo interno i gas prodotti. Le condizioni ottimali si raggiungono allorché mentre i gas si sviluppano mentre il granulo è al cosiddetto «punto di incipiente vetrificazione», cioè quando esso è avvolto da una pellicola completamente vetrificata con una viscosità tale da impedire la fuoriuscita del gas (fig. 3). In questa situazione, dopo aver raffreddato il materiale, esso si presenta sotto forma di granuli a microstruttura cellulare interna e con la superficie costituita da una «corteccia» vetrosa impermeabile la quale conferisce all'inerte un basso assorbimento.

L'assorbimento degli inerti leggeri è un fattore determinante nel proporzionamento (*mix-design*), ma soprattutto nel trasporto e nel pompaggio del calcestruzzo: 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 la-

vorabilità. Il processo di produzione degli inerti espansi consiste inizialmente in uno splateamento delle argille dal banco di cava e nella formazione di un deposito che viene lasciato stagionare; successivamente l'argilla viene frantumata, laminata e quindi omogeneizzata e impastata con acqua e con additivi per favorire e mantenere costante l'espansione durante la cottura. Successivamente l'argilla viene nuovamente laminata, quindi granulata e sottoposta al trattamento di cottura.

Il trattamento di cottura rappresenta il momento più importante del ciclo produttivo; esso viene effettuato in forni rotanti realizzati in materiale refrattario: i granuli crudi di argilla vengono introdotti nel forno dall'alto e avanzano verso il basso, grazie alla lenta rotazione e alla leggera inclinazione del forno, subendo quindi un riscaldamento in controcorrente.

Inizialmente il forno rotativo impiegato per la produzione degli inerti espansi era simile a quello utilizzato nell'industria del cemento; oggi si preferisce il forno costituito da tre cilindri in cascata: nel primo l'argilla viene preriscaldata a 800 °C, nel secondo avviene la cottura vera e propria a temperature superiori a 1100 °C, e nel terzo cilindro l'argilla viene raffreddata a 150 °C. Questo tipo di forno permette di ottenere lo sviluppo del gas contemporaneamente alla «vetrificazione» della massa; infatti, siccome lo sviluppo del gas avviene prima dei 1100 °C - temperatura necessaria per ottenere la massa plastica viscosa - per impedire che tale sviluppo si esaurisca prima che la fusione sia in atto, è necessario preriscaldare i granuli di argilla crudi e successivamente innalzare bruscamente la temperatura fino a 1000 - 1200 °C: la permanenza del materiale a questa temperatura non deve protrarsi oltre i dieci minuti onde evitare l'agglomerazione dei granuli.

È da segnalare che il maggiore inconveniente lamentato negli anni scorsi con i calcestruzzi

leggeri era costituito da indesiderate espansioni localizzate dei manufatti, con fessurazioni che in alcuni casi portavano al distacco del copriferro. A questo inconveniente è fondamentalmente imputabile il forte rallentamento nell'impiego del calcestruzzo leggero che, favorito anche dalle crisi energetiche degli anni '70, avrebbe potuto conquistare vaste fette di mercato nel settore edilizio.

I suddetti inconvenienti erano dovuti principalmente ad una

Oltre alle argille vengono impiegate per la produzione di inerti leggeri le loppe d'altoforno. Per l'espansione delle loppe d'altoforno vengono utilizzati due differenti processi:

- *Machine Process*: la loppa agitata rapidamente in un forno a temperature superiori a 1200 °C, assieme a una determinata quantità di acqua, viene successivamente raffreddata e quindi macinata;

- *Water Jet Process*: la loppa viene riscaldata a temperature tra

**Gli inerti leggeri artificiali di origine organica**

Gli inerti leggeri di natura organica, in passato utilizzati solo occasionalmente per la produzione di calcestruzzi, vengono oggi correntemente impiegati per la realizzazione di malte coibenti ad elevato potere termoisolante. Essi si suddividono in:

- inerti leggeri ottenuti dalla sintesi di sostanze organiche;

- inerti leggeri ottenuti mediante trattamento di stabilizzazione chimico-fisica di cascami di origine vegetale.

Tra gli inerti leggeri di natura organica sintetica, di gran lunga il più utilizzato è il granulato di polistirolo espanso in forma di perle o pastiche, con massa volumica in mucchio variabile tra 12 e 14 kg/m<sup>3</sup>. A differenza di tutti gli altri aggregati leggeri il granulato di polistirolo non assorbe acqua. Tuttavia, a causa di una scarsa aderenza tra il granulato di polistirolo e la pasta di cemento è opportuno rivestire l'inerte con sostanze «aggrappanti», oppure utilizzare nella preparazione delle malte resine polimeriche in emulsione acquosa che ne migliorano l'aderenza alla matrice cementizia. Il maggior impiego del polistirolo espanso è costituito dalla produzione di malte coibenti ad elevato potere di isolamento termico. Tra i materiali naturali di origine organica usati come inerti per calcestruzzi il più importante è la segatura. Anche se costituita prevalentemente di cellulosa, la segatura contiene anche degli zuccheri, sostanze queste che possono rallentare significativamente la presa e soprattutto l'indurimento del calcestruzzo. Pertanto, affinché la segatura possa essere impiegata nel calcestruzzo, deve essere sottoposta ad alcuni trattamenti preliminari tesi a privarla di quelle sostanze (tannini) che ne possono rallentare lo sviluppo delle resistenze meccaniche.

L'impiego di tale inerte risulta comunque fortemente limitato a causa di un elevato ritiro per essiccamento del calcestruzzo (cir-

**TAB. 1 - RELAZIONE APPROSSIMATA TRA RESISTENZA A COMPRESSIONE E CONTENUTO DI CEMENTO CEM I 42.5 PER CALCESTRUZZI A CONSISTENZA PLASTICA.**

Resistenza a compressione (MPa)	Contenuto di cemento (kg/m <sup>3</sup> )	
	inerte fino leggero	inerte fino ordinario
20	200-230	200-230
25	250-300	250-300
30	300-360	280-360
35	350-400	330-400
40	400-460	380-460

scelta infelice delle materie prime (eccesso di calcare) e ad un errato processo di cottura che impediva alla calce (CaO), prodotta per decomposizione termica del calcare (CaCO<sub>3</sub>), di combinarsi con la silice delle argille, con il risultato che negli inerti leggeri restavano dei «bottaccioni» di CaO. Il fenomeno è simile a quello che si registra in seguito ad un incompleto «spegnimento» della calce «stracotta» durante la produzione della calce idrata. I bottaccioni degli inerti leggeri sono molto pericolosi in quanto, data l'elevata temperatura (1100-1200 °C) a cui si formano, hanno una microstruttura estremamente densificata.

Pertanto, la loro trasformazione in Ca(OH)<sub>2</sub>, avviene molto lentamente, quando cioè l'inerte si trova nel calcestruzzo già indurito, provocando un aumento di volume localizzato e quindi il sollevamento e il distacco della malta che circonda l'inerte stesso.

1200 e 1400 °C in presenza di acqua introdotta nella massa con un getto ad alta pressione.

In entrambi i casi la microstruttura cellulare è dovuta all'intrappolamento del vapore e dei gas, sviluppatosi per decomposizione di alcuni costituenti presenti nella loppa, nella massa fusa.

La struttura cellulare si può ottenere, come già si è detto, anche per agglomerazioni di polveri finissime, quali le ceneri volanti. Le ceneri volanti vengono mescolate con polveri di carbone e prima di essere sottoposte al trattamento termico vengono pellettizzate oppure estruse; successivamente, durante la cottura, la polvere di carbone, bruciando, permette di ottenere dei pellets a struttura cellulare. Recentemente è stato proposto un metodo di agglomerazione della cenere volante basato sull'impiego di acqua e cemento, il cui potere legante assicura la formazione di pellets a microstruttura porosa.



ca 10 volte più grande di quello che normalmente si registra per gli altri calcestruzzi leggeri), non tanto quindi per le caratteristiche meccaniche che invece risultano eccellenti, tanto che la resistenza meccanica a compressione può raggiungere anche valori di 35 MPa. Il maggior impiego dei calcestruzzi con segatura è nella fabbricazione di blocchi da costruzione, dove l'effetto del ritiro viene minimizzato con l'aggiunta di una sufficiente quantità di sabbia ordinaria.

## IL CALCESTRUZZO CON INERTI LEGGERI

Il calcestruzzo con inerti leggeri è un calcestruzzo confezionato sostituendo, in parte o in tutto, l'aggregato ordinario con un aggregato più leggero. La densità del calcestruzzo con inerti leggeri può variare tra 300 e 1850 kg/m<sup>3</sup>, la sua resistenza meccanica tra 1 e 40 MPa. Tuttavia, lo sviluppo e la produzione di nuovi tipi di inerti leggeri ar-

Il calcestruzzo con inerti leggeri allo stato fresco subito dopo il mescolamento dei suoi ingredienti, il calcestruzzo si presenta come una miscela di solidi, gli inerti, dispersi in un liquido, la pasta di cemento. In questa fase esistono due caratteristiche fondamentali del calcestruzzo da tenere in considerazione: la lavorabilità e la segregazione.

La lavorabilità è la più importante proprietà reologica del calcestruzzo leggero fresco. I fattori che influenzano la lavorabilità sono il contenuto d'acqua, il rapporto inerte/cemento, la distribuzione granulometrica e l'angolarità degli inerti, la presenza di additivi.

Il contenuto d'acqua necessario a bagnare la superficie degli inerti saturi a superficie asciutta (inerte con le porosità interne piene di acqua, ma con la superficie asciutta) aumenta al diminuire delle dimensioni massime dell'aggregato: una diminuzione nelle dimensioni degli inerti

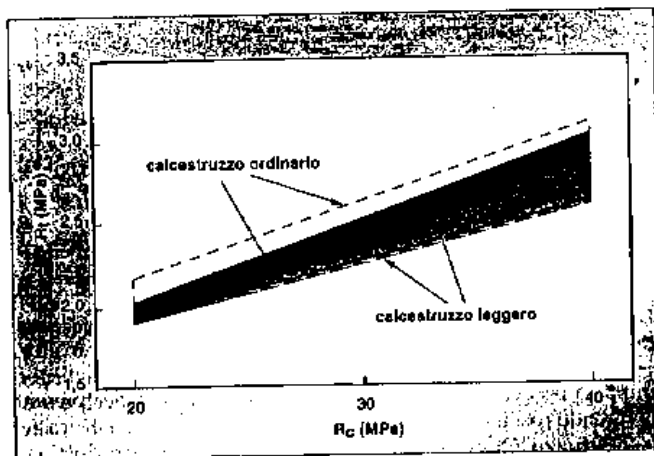


Fig. 7 - Resistenza a trazione indiretta in funzione della resistenza a compressione per calcestruzzi ordinari e leggeri stagionati a umido.

tificiali, soprattutto argille espansive, ha reso possibile la produzione di calcestruzzi (con inerti leggeri) ad elevata resistenza meccanica (circa 60 MPa). Nei paragrafi che seguono vengono esaminate le principali proprietà del calcestruzzo con inerti leggeri sia allo stato fresco che allo stato indurito.

provoca un aumento della superficie specifica degli stessi e quindi una maggiore richiesta d'acqua.

Gli inerti disponibili per il confezionamento del calcestruzzo, pur trovandosi in natura in condizioni di umidità diverse da quelle di saturi a superficie asciutta (s.s.a.), nel calcestruzzo

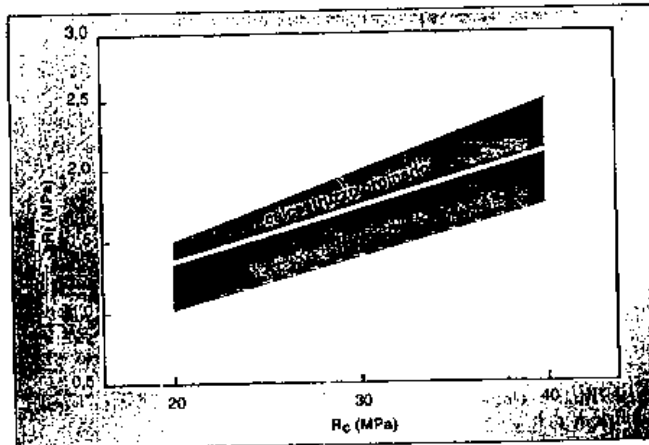


Fig. 8 - Resistenza a trazione indiretta di calcestruzzi ordinari e leggeri stagionati in ambiente secco in funzione della resistenza a compressione.

si troveranno sempre in condizioni s.s.a. Quindi, se essi sono asciutti assorbiranno acqua dall'impasto; viceversa, se sono bagnati cederanno acqua all'impasto.

Per tener conto della quantità di acqua in eccesso o in difetto dovuta alle condizioni di umidità dell'inerte si deve variare opportunamente il quantitativo di inerti e di acqua da introdurre effettivamente in betoniera: per rendere attuabile una tale operazione occorre conoscere l'«assorbimento» degli inerti, e cioè il contenuto di umidità riferito al peso secco che determina la condizione s.s.a., e possedere nella centrale di betonaggio uno strumento di rilevazione in continuo dell'umidità degli inerti che permette di variare l'acqua introdotta in betoniera per ogni «batch».

Tuttavia, nella pratica si preferisce mantenere costante la quantità del conglomerato mantenendo fissa la lavorabilità dell'impasto. Infatti, la regola di Lyse stabilisce che la quantità di acqua necessaria per ottenere una certa lavorabilità con un inerte di determinato diametro massimo è costante.

Purtroppo questo tipo di controllo della qualità del calcestruzzo, già largamente impiegato per il calcestruzzo ordinario, non può essere applicato ai calcestruzzi con inerti leggeri. Infatti, nei calcestruzzi ordinari,

gli inerti avendo bassi valori di assorbimento (di solito 0.1 - 0.3% per le sabbie e 1 - 1.5% per gli inerti grossi), riescono, qualora utilizzati asciutti per confezionare il calcestruzzo, a portarsi in condizioni di s.s.a. nel giro di qualche minuto, rendendo quindi possibile il controllo della qualità del conglomerato tramite il controllo di lavorabilità del calcestruzzo.

Invece, per gli inerti leggeri, a causa degli elevati valori di assorbimento, per ottenere la condizione s.s.a. occorrono almeno 24 ore; se a questo si aggiunge che la velocità di assorbimento degli aggregati nei primi minuti dopo il confezionamento del calcestruzzo varia da inerte a inerte, allora si spiega perché è impossibile operare un controllo di qualità del calcestruzzo tramite un controllo della lavorabilità.

In ogni caso, per evitare perdite eccessive di lavorabilità durante il trasporto del calcestruzzo leggero, si possono apportare delle modifiche alla composizione del calcestruzzo conoscendo l'«assorbimento» dell'inerte leggero dopo mezz'ora di immersione in acqua, in modo da poter determinare il quantitativo di acqua da aggiungere all'impasto per la saturazione dell'inerte nelle prime ore dopo il confezionamento del calcestruzzo. Tuttavia, questo modo di operare non consente di attuare un

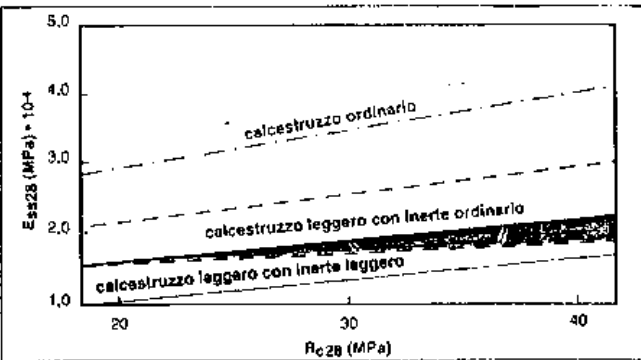


Fig. 9 - Modulo elastico secante a 28 giorni di calcestruzzi ordinari e leggeri in funzione di  $R_{c28}$ .

sufficiente controllo di qualità del calcestruzzo, o almeno un controllo efficace quale quello che si ottiene prebagnando gli inerti per almeno due giorni prima del loro impiego nel conglomerato e allo stesso tempo mantenendo costante la lavorabilità del conglomerato. La segregazione del calcestruzzo esprime la tendenza del conglomerato a separarsi in varie frazioni a causa dell'eterogeneità, di dimensione e di massa volumica, dei materiali che lo compongono. Nel calcestruzzo ordinario si osserva una sedimentazione degli inerti grossi sul fondo, una zona intermedia in cui sono presenti tutti i costituenti il calcestruzzo e infine un accumulo di acqua sulla superficie del conglomerato che prende il nome di acqua di *bleeding*. La segregazione ovviamente provoca una serie di difetti nelle strutture in calcestruzzo: a causa della diversa massa volumica dei vari strati, variano notevolmente le proprietà del conglomerato man mano che ci si sposta in altezza da una zona all'altra della struttura. Questo tipo di inconveniente si registra ovviamente anche per i calcestruzzi leggeri, dove però, a differenza degli inerti ordinari che sedimentano sul fondo, gli inerti leggeri, a causa della loro massa volumica apparente minore di 1.1 kg/l, tendono a «galleggiare» sul calcestruzzo, arricchendo quindi le parti alte dei manufatti di aggregato grosso (fig. 4 pag. 74). Ovviamente un tale inconveniente

risulta molto grave per una struttura; pertanto, si ricorre nel confezionamento del calcestruzzo leggero a additivi capaci di aumentare la coesione del calcestruzzo e allo stesso tempo di ridurre la tendenza al galleggiamento degli inerti grossi. Si tratta sostanzialmente di additivi superfluidificanti contenenti degli agenti tensioattivi, che permettono di introdurre microbolle di aria all'interno del calcestruzzo leggero. L'introduzione delle microbolle di aria ha come obiettivo quello di ridurre la massa volumica della pasta di cemento fino a portarla a valori prossimi alla massa volumica degli inerti leggeri grossi, evitando così il galleggiamento di quest'ultimi (fig. 5 pag. 75).

Il problema della segregazione può accentuarsi nei calcestruzzi che vengono messi in opera per pompaggio. La pressione indotta dalla pompa può esasperare la «smiscelazione» degli ingredienti provocando il blocco del calcestruzzo nei tubi.

Pertanto, per facilitare le operazioni di pompaggio è consigliabile:

- a) aggiungere acqua se il calcestruzzo risulta asciutto e se la diminuzione delle resistenze meccaniche e in generale il peggioramento delle caratteristiche del calcestruzzo indurito, connesse con tale aggiunta, sono compatibili con le prestazioni richieste per il conglomerato;
- b) aggiungere additivi fluidificanti e superfluidificanti per aumentare la lavorabilità (portan-

dola a 15 o 25 cm rispettivamente) di calcestruzzi molto asciutti; c) ridurre l'acqua se il calcestruzzo è fluido e magro, oppure aumentare la frazione fine mediante aggiunta di sabbie a basso modulo di finezza, o di cenere volante, oppure di cemento.

Se si impiegano inerti di granulometria corretta, il dosaggio di cemento per i calcestruzzi pompati sarà molto simile a quello impiegato per i calcestruzzi tradizionali. In relazione agli additivi occorre precisare che tutti quelli che aumentano la lavorabilità dei calcestruzzi leggeri ne aumentano anche la pompabilità. Gli additivi per migliorare la pompabilità sono: additivi riduttori d'acqua, additivi aeranti e coadiuvanti di pompaggio. Questi ultimi sono costituiti da polimeri idrosolubili caratterizzati da un elevato peso molecolare, capaci di rendere l'acqua di

Il calcestruzzo con inerti leggeri allo stato indurito

Il calcestruzzo con inerti leggeri è costituito, allo stato indurito, da uno scheletro solido (gli inerti leggeri) disperso in una matrice legante (la pasta di cemento indurita).

Tutte le proprietà del calcestruzzo con inerti leggeri (la resistenza meccanica a compressione, a flessione, a trazione, il ritiro, il fluage, ecc.) dipendono dalla qualità della pasta di cemento, ma soprattutto dalle caratteristiche dell'inerte leggero e dal legame che si stabilisce all'interfaccia pasta-aggregato.

In questo paragrafo vengono presentati una serie di risultati basati su numerosi studi di laboratorio e di cantiere. I dati riportati sono comunque conservativi, in ragione del fatto che essi possono variare notevolmente in funzione delle caratteristiche dell'aggregato. A tal

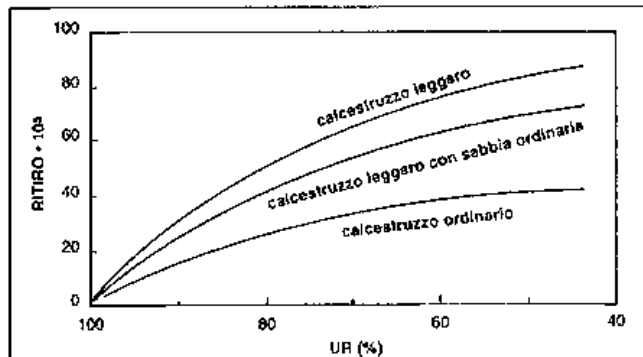


Fig. 10 - Il ritiro di calcestruzzi leggeri e ordinari in funzione dell'umidità relativa.

impasto notevolmente viscosa, favorendo così il pompaggio del calcestruzzo. Questa tecnica si rivela vantaggiosa allorché il calcestruzzo si presenta molto segregabile (di solito accompagnato da inerti in curva discontinua): la pasta di cemento risulta troppo fluida e può quindi «precedere» gli inerti non ben assortiti. In queste condizioni un aumento di viscosità della pasta cementizia rende il calcestruzzo più coesivo, ancorché meno fluido, ed evita quindi la separazione della pasta cementizia dagli inerti.

proposito è bene tener presente che inerti di stessa natura (es: argille espanse), prodotti con analoghi processi di fabbricazione, ma di diversa provenienza, possono dar luogo a calcestruzzi con proprietà sensibilmente diverse.

La resistenza meccanica

a compressione del calcestruzzo con inerti leggeri. La resistenza a compressione del calcestruzzo con inerti leggeri dipende dalla resistenza a compressione della pasta di cemento e degli aggregati leggeri.

nonché dall'aderenza che si stabilisce tra i due materiali. Tuttavia, il limite superiore della resistenza meccanica a compressione (strength ceiling) è determinato dalla resistenza degli inerti leggeri.

Poiché la resistenza dei granuli dipende fortemente dalla massa volumica apparente, ne consegue che aumenti della resistenza meccanica del calcestruzzo si possono ottenere scegliendo un inerte avente massa volumica più elevata. Se non si hanno a disposizione inerti più resistenti, il valore limite della resistenza meccanica può essere comunque aumentato riducendo le dimensioni massime dell'aggregato. Per esempio, diminuendo il diametro massimo di un'argilla espansa con peso in mucchio di 600 kg/m<sup>3</sup> da 19 a 12,7 a 9,52 mm, a parità di rapporto acqua/cemento e di slump, la massima resistenza meccanica aumenta da 38 MPa a 45 e 49 MPa rispettivamente. Notevoli incrementi della resistenza a compressione si possono ottenere sostituendo l'aggregato leggero fine con sabbia ordinaria di buona qualità.

In sostanza qualsiasi provvedimento (salvo l'aumento del contenuto di cemento oltre un certo limite, che provoca un aumento della massa volumica del calcestruzzo), consente di ottenere un conglomerato più resistente meccanicamente alla compressione.

In fig. 6 (pag. 75) sono mostrati indicativamente i campi di esistenza della massa volumica e della resistenza meccanica per i calcestruzzi leggeri, confezionati con sabbia leggera oppure ordinaria, a confronto dei calcestruzzi ordinari.

A causa dell'impossibilità di stabilire con sicurezza la frazione dell'acqua totale da tener in conto nel calcolo del rapporto *a/c*, il più delle volte la resistenza meccanica a compressione viene correlata con il contenuto di cemento associato ad un certo abbassamento al cono, piuttosto che al rapporto acqua/cemento.

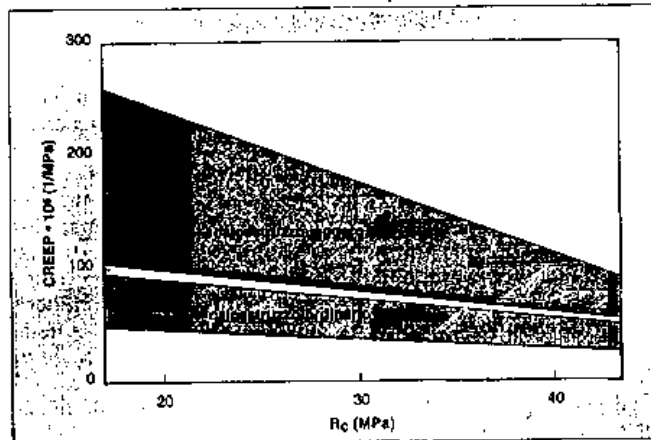


Fig. 11 - Il creep specifico (a 1 anno) di calcestruzzi leggeri e ordinari in funzione dello  $R_c$ .

La tab. 1 (pag. 76) suggerisce il dosaggio di cemento Portland di classe 42.5 (CEM I 42.5) da impiegare in funzione della resistenza meccanica richiesta per un calcestruzzo a consistenza plastica (8-10 cm di slump).

A causa di una maggiore difficoltà degli inerti leggeri a disperdere calore, lo sviluppo delle resistenze meccaniche del calcestruzzo con inerti leggeri è più rapido di quelle del calcestruzzo con inerti ordinari: il rapporto tra la resistenza meccanica a 7 giorni ( $R_{c7}$ ) e quella a 28 giorni ( $R_{c28}$ ) per i calcestruzzi leggeri (solitamente compresa tra 0,8 e 0,9, è maggiore del corrispondente valore (0,7) che si registra per gli impasti ordinari.

La resistenza a trazione del calcestruzzo con inerti leggeri. Sebbene sia molto spesso trascurata, la resistenza a trazione del calcestruzzo è una proprietà molto importante in quanto influenza direttamente sia l'aderenza che si stabilisce tra il conglomerato e le barre d'armatura, che la formazione e l'ampiezza delle fessure nelle strutture.

I metodi sperimentali per valutare la resistenza a trazione del calcestruzzo leggero sono gli stessi di quelli impiegati per il calcestruzzo ordinario: trazione diretta, trazione indiretta e trazione per flessione.

Tuttavia le prove più utilizzate sono quella di trazione indiretta (prova alla brasiliana) e quel-

la di trazione per flessione.

Molto spesso, però, si preferisce sfruttare, per il calcolo della resistenza a trazione diretta, le correlazioni esistenti tra questa grandezza e la resistenza meccanica a compressione. L'Eurocodice propone la seguente correlazione:

$$R_{td} = 0,33 R_{ck}^{2/3} (0,3 + 0,7 \gamma_{cls}/2400) \quad [1]$$

dove:

- $\gamma_{cls}$  è la massa volumica in kg/m<sup>3</sup>;
- $R_{ck}$  è la resistenza caratteristica misurata su cilindri e espressa in MPa.

In fig. 7 (pag. 77) è riportato il valore della resistenza alla brasiliana  $R_t$ , per calcestruzzi ordinari e leggeri, quest'ultimi confezionati con inerte fine ordinario e leggero, stagionati in ambiente umido, in funzione della resistenza a compressione.

Si può notare come la  $R_t$  del calcestruzzo leggero non sia significativamente diversa da quella di un calcestruzzo ordinario di pari resistenza meccanica.

La resistenza a trazione di calcestruzzi leggeri stagionati in ambiente secco è riportata in fig. 8 (pag. 77) in funzione della  $R_c$ .

Si può notare come in ambiente secco la resistenza a trazione indiretta dei calcestruzzi leggeri risulti sensibilmente inferiore a quella del calcestruzzo ordi-

TAB. 2 - ESEMPI DI ADERENZA DI CALCESTRUZZI ORDINARI E LEGGERI ALL'ACCIAIO.

Caratteristiche di calcestruzzo	Lavorabilità slump (cm)	a/c	Aderenza (MPa)			
			7 giorni		28 giorni	
			Liscia	Ader. miglior.	Liscia	Ader. Miglior.
400 Kg/m <sup>3</sup> di CEM I 42.5 senza additivo	10	0.45	1	15	1	15
400 Kg/m <sup>3</sup> di CEM I 42.5 e additivo SF*	21	0.32	4	21	4	26
500 Kg/m <sup>3</sup> di CEM I 42.5 senza additivo SF* cls leggero (1800 Kg/m <sup>3</sup> )	10	0.48	0.5	7	1	9
500 Kg/m <sup>3</sup> di CEM I 42.5 con additivo SF* cls leggero (1800 Kg/m <sup>3</sup> )	21	0.38	2	15	2	21

\* SF additivo superfluidificante



nario. Siccome le strutture reali, nella maggior parte dei casi, maturano in ambienti insaturi di vapore, la resistenza a trazione di strutture in calcestruzzo con inerti leggeri risulta sempre inferiore a quella delle strutture in calcestruzzo ordinario, di pari  $R_c$ , del 15-30%. Inoltre i valori di  $R_t$ , sia per il calcestruzzo ordinario che per quello leggero, risultano più bassi rispetto a quelli ottenuti stagionando il conglomerato a umido (fig. 7), per effetto delle tensioni di trazione aggiuntive indotte dal ritiro.

La misura della resistenza a trazione per via indiretta può essere effettuata sottoponendo un travetto a una sollecitazione di flessione in modo da indurre in alcune sezioni del provino uno sforzo di trazione. Numerosi dati a disposizione confermano che non vi è una sostanziale differenza nella resistenza a trazione per flessione ( $R_f$ ) tra calcestruzzi leggeri e ordinari, se entrambi vengono stagionati a umido.

Se invece i calcestruzzi sono stagionati in ambiente secco, i risultati sono estremamente erratici e non riproducibili.

In ogni caso la resistenza a flessione risulta sempre maggiore di quella a trazione diretta in quanto, nella prova di flessione la massima tensione si raggiunge solo nella fibra più lontana dall'asse neutro, mentre nella prova di trazione diretta la massima tensione si raggiunge in tutte le fibre della sezione. Quindi, maggiore è la probabilità, in quest'ultimo caso, di trovare l'anello debole della catena. L'Eurocodice propone tra la resistenza a flessione e quella a trazione diretta la seguente correlazione:

$$R_f = 2 R_{td} \quad [2]$$

**Il modulo elastico del calcestruzzo con inerti leggeri**  
La deformazione del calcestruzzo che precede la rottura dipende dal suo modulo elastico ( $E_{cs}$ ). Esso, a sua volta, dipende dai moduli elastici dei materiali

che lo compongono: l'inerte e la pasta di cemento.

La sabbia e l'inerte grosso ordinario posseggono un modulo elastico molto maggiore di quello degli inerti leggeri; pertanto, il calcestruzzo con inerti leggeri possiede un modulo elastico inferiore a quello del calcestruzzo ordinario. In fig. 9 (pag. 78) è riportato il modulo elastico statico secante a 28 giorni ( $E_{cs,28}$ ) di calcestruzzi con inerti leggeri e ordinari in funzione di  $R_{ct}$ . Mediamente si può assumere che il modulo elastico di un calcestruzzo strutturale con inerti leggeri varia tra 1/2 e 3/4 di

dove  $R_{ct}$  è la resistenza a compressione media al tempo  $t$ , espressa in MPa.

La normativa italiana impone che il modulo elastico dei calcestruzzi leggeri strutturali venga determinato per via sperimentale. Il basso valore del modulo elastico, e quindi la maggior deformabilità del calcestruzzo con inerti leggeri, costituisce sotto certi aspetti una caratteristica favorevole. Infatti, tutte le coazioni risultano più basse di un calcestruzzo ordinario; conseguentemente, anche le fessurazioni dovute a tali sollecitazioni risultano di minore entità.

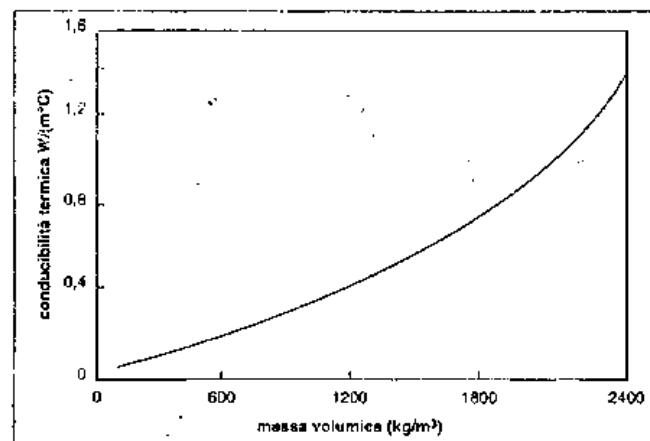


Fig. 12 - La conducibilità termica del calcestruzzo in funzione della sua massa volumica secca.

quello di un calcestruzzo ordinario di pari resistenza a compressione.

L'Eurocodice propone di calcolare il modulo elastico statico secante a 28 giorni del calcestruzzo leggero con la seguente relazione:

$$E_{cs,28} = 9500 (R_{ct} + 8)^{1/3} \cdot (\gamma_{cl}/2400)^2 \quad [3]$$

dove  $R_{ct}$  è la resistenza caratteristica a compressione a 28 giorni misurata su cilindri, espressa in MPa.

L'AcI Code propone, invece, di calcolare il modulo elastico ad un certo tempo  $t$  ( $E_{cs,t}$ ) utilizzando la seguente relazione:

$$E_{cs,t} = \gamma_{cl}^{1.5} \cdot 0.043 (R_{ct})^{1/2} \quad [4]$$

**Il ritiro da essiccamento del calcestruzzo con inerti leggeri**

Il ritiro è la contrazione subita dal calcestruzzo quando esso si trova in un ambiente con un'umidità relativa inferiore al 95%. Responsabile del ritiro del calcestruzzo è la sola pasta di cemento la quale, cedendo acqua all'ambiente insaturo di vapore, si contrae. Gli inerti, invece, non subiscono alcuna variazione dimensionale per effetto dell'umidità relativa dell'ambiente.

Il ritiro del calcestruzzo è molto importante in quanto, se esso si manifesta in una struttura vincolata, crea delle sollecitazioni di trazione che possono fessurare il conglomerato cementizio data la sua bassa resistenza a

trazione. Il ritiro del calcestruzzo leggero dipende dagli stessi parametri che influenzano il ritiro del calcestruzzo ordinario, cioè dal rapporto  $a/c$ , da quello inerte/cemento ( $i/c$ ) e dalla rigidità dell'inerte.

Nel calcestruzzi leggeri strutturali il ritiro finale è molto elevato se confrontato con quello di un calcestruzzo ordinario di stessa composizione (pari  $a/c$  e  $i/c$ ) a causa della minore rigidità degli inerti leggeri rispetto a quelli ordinari (fig. 10 pag. 78). Se è vero che a tempi lunghi il ritiro del calcestruzzo leggero è sempre maggiore di quello di un calcestruzzo ordinario di stessa composizione (pari  $a/c$  e  $i/c$ ), a tempi brevi invece, il ritiro del calcestruzzo leggero può risultare inferiore a quello del calcestruzzo ordinario.

Infatti, se nel confezionamento del calcestruzzo sono stati utilizzati inerti leggeri saturi di acqua, questi cederanno acqua alla pasta di cemento allorché questa si essicca, attenuando così momentaneamente le contrazioni dovute al ritiro. Quando tutta l'acqua assorbita dall'inerte è stata ceduta alla pasta di cemento, il calcestruzzo leggero subirà delle contrazioni da ritiro superiori a quelle del calcestruzzo ordinario. Infatti gli inerti leggeri, per il basso modulo elastico, non possono contrastare le variazioni dimensionali dovute al ritiro così efficacemente come invece fanno gli inerti ordinari.

Una sostituzione parziale dell'inerte fine leggero con sabbia ordinaria riduce drasticamente il ritiro.

Secondo la normativa italiana, come anche il codice modello CEB-FIP, il ritiro a tempo infinito del calcestruzzo leggero è pari a 1.5 volte quello del corrispondente calcestruzzo ordinario di pari composizione. Conseguentemente si verifica che:

1) in una struttura in calcestruzzo leggero vincolata isostaticamente, gli accorciamenti saranno maggiori rispetto a quelli di una analoga struttura in calcestruzzo ordinario;

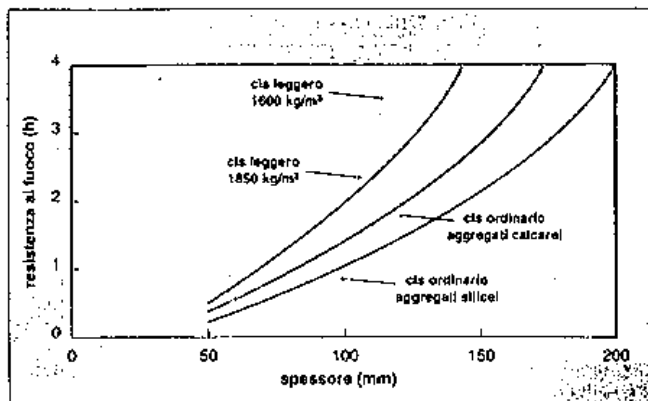


Fig. 13 - Resistenza al fuoco di pannelli di calcestruzzo leggero e ordinario.

2) le cadute di tensione nei cavi da precompresso, per effetto del ritiro, sono maggiori per le strutture in calcestruzzo leggero rispetto a quelle in calcestruzzo ordinario;

3) nelle strutture iperstatiche, pur essendo il ritiro della struttura in calcestruzzo leggero maggiore di quello di un'analoga struttura in c.a. ordinario, grazie al basso valore del modulo elastico del calcestruzzo leggero, lo stato tensionale indotto dal ritiro è minore di quello che si registra per le strutture in calcestruzzo ordinario.

### Lo scorrimento viscoso del calcestruzzo con inerti leggeri

Lo scorrimento viscoso, o *creep*, è la deformazione che subisce il calcestruzzo, oltre quella elastica, allorché è sottoposto a una tensione di carico costante. Il *creep* dipende da numerosi fattori quali il rapporto *a/c*, il dosaggio di cemento, il modulo elastico degli inerti, la resistenza del calcestruzzo all'età di messa in carico.

In fig. 11 (pag. 79) viene riportato il *creep* specifico (*creep* per unità di tensione di carico) di calcestruzzi leggeri e ordinari mantenuti sotto un carico costante per un anno in funzione della resistenza meccanica a compressione (*R<sub>c</sub>*).

La fig. 11 mostra che il *creep* specifico di un calcestruzzo leggero è superiore a quello di un calcestruzzo ordinario. La figura suggerisce anche che per dimi-

nuire il valore dello scorrimento viscoso è necessario ricorrere a calcestruzzi con elevata resistenza meccanica a compressione. Un incremento di *R<sub>c</sub>* da 20 a 35 MPa per il calcestruzzo leggero riduce il valore del *creep* del 20-40%.

Un'ulteriore riduzione del *creep* si può ottenere maturando il calcestruzzo leggero con trattamenti a vapore ad alta pressione.

In assenza di dati sperimentali secondo l'Eurocodice lo scorrimento viscoso di un calcestruzzo leggero può essere assunto eguale a 1.2 volte quello di un calcestruzzo ordinario di pari modulo elastico.

### L'ADERENZA ACCIAIO-CALCESTRUZZO CON INERTI LEGGERI

L'aderenza si mobilita tra calcestruzzo e acciaio allorché uno dei due materiali tende a scorrere rispetto all'altro.

L'aderenza dipende da numerosi fattori: ovviamente dalla qualità del conglomerato, dalla natura chimico-fisica delle superfici a contatto, dalla qualità degli inerti, ecc.

In generale, la resistenza allo scorrimento per le strutture in c.a. a barre lisce dipende dalla qualità (rapporto *a/c*) della pasta di cemento, mentre per le strutture in c.a. con barre a aderenza migliorata dipende dall'«ingranamento» degli inerti tra i risalti delle barre.

Nel primo caso, il calcestruzzo

con inerti dovrebbe possedere un'aderenza circa uguale a quella del calcestruzzo ordinario di pari rapporto *a/c*; invece, nel secondo, avendo gli inerti leggeri una resistenza al taglio inferiore a quella degli inerti ordinari, l'aderenza del calcestruzzo con inerti leggeri è minore.

Le norme considerano l'aderenza del calcestruzzo leggero minore di quella del calcestruzzo ordinario, sia in presenza di barre lisce, che di barre a aderenza migliorata.

Per esempio, la normativa italiana impone una riduzione delle tensioni di aderenza mediante il coefficiente  $\eta_s = 0.8$ . Inoltre, essa prescrive per le strutture in conglomerato leggero armato un aumento delle lunghezze di sovrapposizione delle barre del 25%, limitando il loro diametro a 20 mm. L'impiego congiunto di argilla espansa e additivi superfluidificanti consente di ottenere valori di aderenza paragonabili a quelli ottenuti con inerti ordinari (tab. 2 pag. 79).

zata dalla massa volumica del conglomerato: maggiore è la massa volumica, maggiore è la conducibilità del materiale (fig. 12).

Pertanto, i calcestruzzi leggeri posseggono dei coefficienti di conducibilità termica inferiori a quelli del calcestruzzo ordinario.

Un aumento dell'umidità del calcestruzzo fa aumentare sensibilmente la sua conducibilità termica: le norme ACI suggeriscono di incrementare il valore della conducibilità termica desunto dalla fig. 12 del 6% per ogni 1% di aumento dell'acqua libera nel calcestruzzo.

La resistenza al fuoco del calcestruzzo con inerti leggeri. I calcestruzzi leggeri hanno una migliore resistenza al fuoco rispetto ai calcestruzzi ordinari grazie alla più bassa conducibilità termica rispetto ai calcestruzzi ordinari e alla stabilità degli aggregati leggeri fino a temperature di 1000 - 1100 °C.

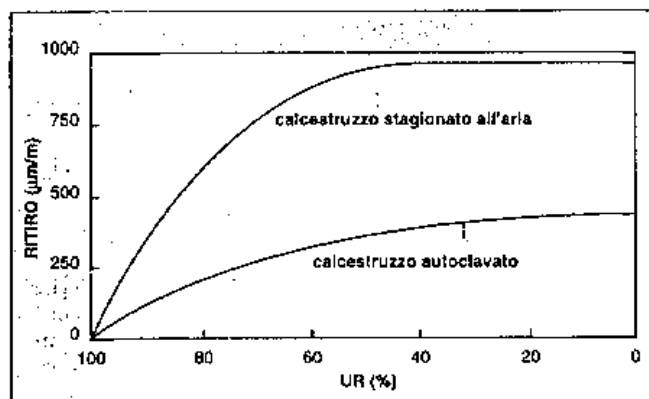


Fig. 14 - Il ritiro del calcestruzzo cellulare in funzione dell'UR.

### Le proprietà termiche del calcestruzzo con inerti leggeri

Il coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo leggero varia da  $7$  a  $11 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ed è pertanto circa uguale a quello del calcestruzzo ordinario, i cui valori variano da  $9$  a  $13 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  e da  $6$  a  $9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  per calcestruzzi con inerti silicei e calcarei rispettivamente.

La conducibilità termica del calcestruzzo è fortemente influen-

La resistenza al fuoco di pannelli realizzati con diversi calcestruzzi, espressa come attitudine (tempo in ore) del materiale a conservare le proprie caratteristiche chimico-fisiche, è maggiore quanto più bassa è la massa volumica del calcestruzzo leggero.

Per i calcestruzzi ordinari la resistenza al fuoco aumenta se si sostituiscono gli aggregati silicei con quelli calcarei (fig. 13).

## IL CALCESTRUZZO AERATO O CELLULARE

Come già detto, uno dei metodi per produrre il calcestruzzo leggero consiste nell'introdurre bolle d'aria nella pasta di cemento in modo da ottenere un materiale con una microstruttura cellulare, a volte simile ad una spugna gommosa (calcestruzzo cellulare aerato). Il calcestruzzo cellulare, con opportune modifiche nella composizione e nel metodo di produzione può essere prodotto in un campo di densità compreso tra 400 e 1450 kg/m<sup>3</sup>.

Il calcestruzzo aerato viene utilizzato in unità prefabbricate oppure gettato in opera. Le unità prefabbricate sono usualmente autoclavate: il calcestruzzo subisce una maturazione accelerata mediante un trattamento a vapore che avviene a pressioni superiori a quella atmosferica; pertanto deve essere effettuato in appositi recipienti a tenuta (autoclavi). Il calcestruzzo autoclavato richiede l'impiego di sabbia silicea e consente di sostituire il cemento, in tutto o in parte, con idrossido di calcio Ca(OH)<sub>2</sub>.

L'autoclavaggio consente di ottenere un materiale leggero che allo stesso tempo possiede una buona resistenza meccanica a compressione e un basso ritiro per essiccamento.

Il calcestruzzo aerato maturato all'aria ha spesso meno della metà della resistenza del calcestruzzo cellulare autoclavato di pari massa volumica, e un ritiro

per essiccamento quattro o cinque volte superiore.

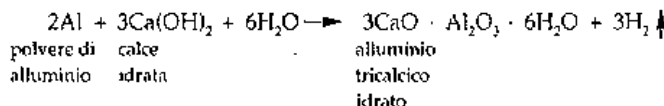
Le unità prefabbricate si producono in forma di blocchi piani e di pannelli per pareti, tetti, solai, architravi, ecc. Il calcestruzzo aerato in opera viene usato come rivestimento isolante per tetti, nonché per tutte quelle applicazioni che hanno come principale obiettivo la diminuzione della conducibilità termica.

Il calcestruzzo aerato, come si è detto, è prodotto creando un sistema di microbolle in un impasto composto di cemento Portland o calce e da una base sifce-

Vi sono diversi modi in cui possono formarsi le bolle d'aria all'interno dell'impasto:

- per lo sviluppo di gas dovuto ad una reazione chimica all'interno della massa nello stadio liquido o plastico;
- aggiungendo al legante una schiuma preformata, tipo quella usata negli estintori, oppure additivi aeranti.

Il primo metodo consiste nell'aggiungere all'impasto un metallo in polvere (di solito alluminio) che in ambiente alcalino reagisce con sviluppo di idrogeno, secondo la formula:



Una quantità di Al pari allo 0,2% del peso del cemento produce vuoti che assommano a 1/4 del volume totale. Al posto dell'alluminio, si può usare pol-

TAB. 4 - RITIRO IGROMETRICO DI CALCESTRUZZI ALVEOLARI.

Tipo di inerte	Rapporto cemento/inerte	Rapporto acqua/cemento	Ritiro per essiccamento T = 50 °C UR = 50%
Ghiaia naturale di fiume	1:8	0.40	0.016 · 10 <sup>-3</sup>
	1:10	0.45	0.018 · 10 <sup>-3</sup>
	1:12	0.50	0.020 · 10 <sup>-3</sup>
Basalto	1:8	0.35	0.022 · 10 <sup>-3</sup>
	1:10	0.40	0.023 · 10 <sup>-3</sup>
	1:12	0.45	0.028 · 10 <sup>-3</sup>
Pietra calcarea frantumata	1:8	0.40	0.016 · 10 <sup>-3</sup>
	1:10	0.45	0.019 · 10 <sup>-3</sup>
	1:12	0.50	0.022 · 10 <sup>-3</sup>

vere di zinco che reagisce in modo analogo.

Per favorire l'innesco della reazione si può aumentare l'alcalinità iniziale della fase acquosa con aggiunta di idrossido di sodio.

Il secondo metodo, impiegato soltanto per la produzione di impasti stagionati all'aria, consiste nell'incorporare nella malta una schiuma preformata prodotta separatamente con un macchinario portatile relativamente economico.

Questo è il metodo o il processo della «schiuma preformata». In tale metodo, il cemento e la sabbia costituenti il legante sono

gegeneristico che industriale.

Il peso di volume varia da 400 a 1300 kg/m<sup>3</sup> e le resistenze meccaniche a compressione (R<sub>c</sub>) da 1.5 a 50 MPa per i calcestruzzi autoclavati e da qualche MPa fino a 7 MPa per gli impasti maturati all'aria. Il modulo elastico è compreso tra 650 e 4000 MPa. La resistenza al taglio, e quindi l'aderenza ai ferri d'armatura, è molto bassa, valutabile intorno a 1/40 - 1/50 della R<sub>c</sub>. I calcestruzzi autoclavati, oltre a essere più resistenti, hanno un ritiro notevolmente più basso di quello dei calcestruzzi stagionati all'aria (fig. 14 pag. 81).

A parità di massa volumica i calcestruzzi aerati autoclavati hanno uno scorrimento viscoso più basso degli altri calcestruzzi leggeri. Inoltre, i calcestruzzi cellulari posseggono eccellenti proprietà di isolamento termico, resistenza al fuoco e durezza al gelo. Proprio a causa del basso valore della conducibilità termica, il calcestruzzo aerato è considerato una ottima protezione nei riguardi del fuoco, specie se è presente una armatura metallica.

## IL CALCESTRUZZO ALVEOLARE

Il calcestruzzo alveolare si ottiene mescolando cemento, acqua e inerte grosso di tipo monogranulare; la sabbia è in tutto o in parte eliminata e il cemento è dosato in difetto, cioè in quantità appena sufficiente ad avvolgere gli inerti grossi con uno spessore di pasta o malta di cemento di qualche mm.

TAB. 3 - RESISTENZA MECCANICA A COMPRESIONE DI CALCESTRUZZI ALVEOLARI.

Tipo di inerte	Massa volumica (kg/m <sup>3</sup> )	Resistenza a compressione (MPa)
Ghiaia di quarzite naturale	1840	8.8
Ghiaia di selce irregolare	1580	4.9
Pietra calcarea frantumata	1820	7.0
Granito frantumato	1700	7.8

versati in una impastatrice standard di calcestruzzo e in essa si introduce una schiuma stabile prodotta in uno speciale generatore per mezzo di un appropriato agente schiumante. Quindi si continua a miscelare dopo l'introduzione della schiuma in modo da assicurare una buona distribuzione delle microbolle d'aria nell'impasto.

Una variazione a tale tipo di processo sta nell'aggiungere direttamente all'impasto un tensioattivo che durante il mescolamento favorisce l'inglobamento d'aria.

La principale caratteristica del calcestruzzo aerato è la sua bassa densità, ma vi sono altre proprietà di eguale interesse sia in-

Si distinguono due categorie di calcestruzzi alveolari:

- a inerte normale;
- a inerte leggero.

Le applicazioni più importanti del calcestruzzo alveolare sono blocchi, pannelli e getti in opera, pareti di ripartizione, pareti non portanti, chiusure verticali per strutture armate, controsoffittature per pavimenti di piano e per tetti.

Poiché la resistenza a compressione dipende dal numero di contatti che si stabiliscono tra gli inerti, è molto importante la scelta di una granulometria media con granuli di dimensioni maggiori di 5 mm e minori di 39 mm. Inoltre, la quantità di elementi piatti non deve superare il 10%.

Per assicurare una resistenza adeguata è opportuno usare un impasto con rapporto (in peso) cemento: inerte = 1:8 e un rapporto  $n/c = 0.4$ .

La tab. 3 fornisce i valori di  $R_c$  per alcuni calcestruzzi alveolari. Diversamente da altre forme di calcestruzzo leggero, il ritiro per essiccamento del calcestruzzo alveolare è particolarmente basso, come appare in tab. 4.

La velocità con cui si manifesta il ritiro per essiccamento del calcestruzzo monogranulare è molto più rapida di quella del calcestruzzo ordinario: l'80% del ritiro totale avviene nei primi 100 giorni; nello stesso arco di tempo il calcestruzzo ordinario esplica solo il 60% del ritiro totale.

Il difetto di malta, in quanto riduce l'assorbimento per capillarità, limita la possibilità di migrazione dell'acqua, con il risultato che i calcestruzzi alveolari hanno una buona resistenza al gelo.

I calcestruzzi alveolari, essendo molto permeabili non garantiscono una protezione contro la corrosione delle armature. Inoltre, il difetto di malta che li contraddistingue si tramuta in una insoddisfacente aderenza alle barre d'armatura, tanto da consigliare l'impiego come conglomerato cementizio per strutture armate.

Una delle proprietà caratterizzanti del calcestruzzo monogranulare è il basso contenuto di cemento: nei calcestruzzi magri esso può essere inferiore a 70-130 kg per  $m^3$  di calcestruzzo. Infatti, l'assenza di una grande area superficiale di particelle di sabbia che debbono essere rivestite con pasta di cemento, consente di confezionare il calcestruzzo con dosaggi di cemento molto bassi.

Con un normale aggregato la massa volumica del calcestruzzo monogranulare varia tra 1600 e 2000  $kg/m^3$ , ma usando inerti leggeri monogranulari si può ottenere un calcestruzzo alveolare con una massa volumica di 650  $kg/m^3$ .

Gli inerti leggeri usati per la fabbricazione del calcestruzzo monogranulare sono inerti naturali, scorie di altoforno e scorie schiumose; inoltre, vengono usate le ceneri volanti, le argille, gli scisti e le andesie espanse.

L'inerte leggero ottimale per il confezionamento dei calcestruzzi alveolari deve avere un trattenuto al setaccio da 20 mm ( $T_{20}$ ) inferiore al 5% mentre il trattenuto al setaccio da 10 mm ( $T_{10}$ ) deve essere superiore al 90%. Prima dell'impiego nel calcestruzzo l'inerte deve essere lavato accuratamente per eliminare eventuali tracce di argilla che comprometterebbero l'aderenza alla matrice cementizia.

Un ulteriore vantaggio conseguente all'utilizzo del calcestruzzo monogranulare è quello di ridurre al minimo la mano d'opera specializzata; inoltre, i tempi di costruzione risultano notevolmente brevi.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. 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] R. Calzona, *Il conglomerato leggero strutturale*, Ed. di Scienza e Tecnica, Milano (1982).



## "CHIARE FRESCHE DOLCI ACQUE..."

Così le cantava il poeta...

Oggi, ovunque sia necessario un rapido drenaggio delle acque,

Compasso le ha studiate per intervenire

con prodotti specifici

all'altezza delle aspettative

degli operatori del settore.

**CANALETTE DI DRENAGGIO**

in calcestruzzo polimerico

adatte ai più svariati impieghi:

dalle zone adatte al traffico ai

passaggi pedonali e ciclabili, dai

parcheggi stradali a quelli sopraelevati,

dagli impianti sportivi agli aeroporti...

Costruite per essere resistenti all'usura e agli agenti atmosferici e

inquinanti, per la superficie liscia e la sezione circolare, garantiscono un

rapido e ottimale deflusso delle acque.

Con o senza pendenza preformata, le canalette sono disponibili in diversi

modelli e sezioni e consentono, per il loro design, un ottimo ancoraggio

ed un'elevata resistenza ai carichi.

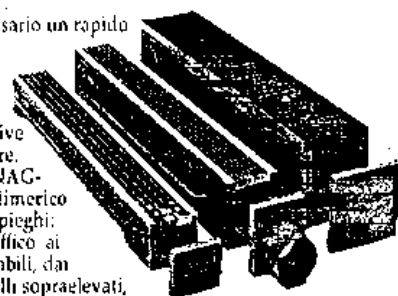
Tanti sono quelli che si affidano ai nostri prodotti. E lo fanno perché

sanno di trovare il massimo in sicurezza, affidabilità e semplicità

d'utilizzo.

Siate anche voi dei nostri, e scoprirete il vantaggio di affidarsi a

Compasso.



**COMPASSO**

**NUOVE IDEE PER L'EDILIZIA**

Per maggiori informazioni o per ricevere il nostro "Catalogo generale", spedite coupon a: COMPASSO Srl - Via Ragazzi del 99, n° 12 - 42100 Reggio Emilia

Nome \_\_\_\_\_ Cognome \_\_\_\_\_

Ditta \_\_\_\_\_

Via \_\_\_\_\_

Cap. \_\_\_\_\_ Città \_\_\_\_\_

Telex \_\_\_\_\_ Fax \_\_\_\_\_