



Università degli Studi  
di Palermo

## **LA POMICE PER IL CONFEZIONAMENTO DI CALCESTRUZZI LEGGERI STRUTTURALI**

G. Amato, G. Campione, L. Cavaleri, G. Minafò, M. Papia

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale (DICA)

Università di Palermo

Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy

e-mail: liborio.cavaleri@unipa.it

*(Ricevuto 7 Ottobre 2011, Accettato 12 Ottobre 2011)*

**Key words:** lightweight structural concrete, pumice, mix design, experimental tests.

**Parole chiave:** calcestruzzi leggeri strutturali, pomice, mix design, sperimentazione.

**Sommario.** *Nel presente lavoro vengono proposte e descritte le procedure per il confezionamento di calcestruzzi leggeri strutturali basati sull'uso della pomice. Il lavoro ha l'obiettivo di confrontare alcuni requisiti richiesti dal DM 2008 per i calcestruzzi leggeri strutturali con quelli ottenibili utilizzando come inerte la pomice e prende le mosse da una indicazione della norma americana ACI 213 che colloca la pomice fra gli inerti utilizzabili sia per il confezionamento di calcestruzzi strutturali che di calcestruzzi non strutturali. Nel lavoro si discute come trattare la pomice per ottenere un calcestruzzo leggero di resistenza adeguata e la procedura adottata per il confezionamento dei calcestruzzi in questione. Inoltre si confrontano le caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi ottenuti con quelle di calcestruzzi alleggeriti con argilla espansa, inerte largamente accreditato per il confezionamento di calcestruzzi leggeri strutturali. Vengono infine mostrate le applicazioni possibili per stabilire se la pomice possa realmente entrare a far parte a pieno titolo del gruppo di inerti leggeri per uso strutturale.*

**Abstract.** *In the present paper a procedure for manufacturing pumice lightweight concrete is proposed and described. The paper has the goal of comparing some mechanical requirements of the current Italian code (DM 2008) for structural lightweight concrete to the characteristics of pumice lightweight concrete. The motivation of the work rises from a comment of the American ACI 213 that considers pumice as insert proper also for structural concrete differently from practice in Italy. Through the paper how to process pumice for obtaining a lightweight concrete with strength adequate to structural usage is discussed, moreover the procedure for manufacturing this concrete is described. Also, the mechanical characteristics of the concrete manufactured are compared to the characteristics of lightweight concrete made with expanded clay, that is the inert more widely accredited for lightweight concrete. Finally, some applications are shown that allow to express an opinion on the usability of pumice for manufacturing structural lightweight concrete.*

## 1 INTRODUZIONE E STATO DELL'ARTE

La pomice è una roccia magmatica effusiva che ha prevalentemente origine dal raffreddamento del magma derivante da eruzioni esplosive. La presenza di bolle di gas all'interno del magma ed il rapido raffreddamento fanno in modo che all'interno della roccia si formino delle cavità chiuse che conferiscono alla roccia stessa una elevata leggerezza.

La pomice di origine vulcanica è stata adoperata come aggregato nella produzione di calcestruzzi alleggeriti in molti paesi del mondo. Diverse applicazioni possono essere riscontrate nell'area mediterranea (Italia, Turchia, Grecia e Spagna). Negli Stati Uniti, la pomice adoperata ha principalmente origine dalle cave delle Rocky Mountains e dagli Stati della Costa Occidentale.

Da un punto di vista commerciale, la pomice può essere reperita in forma di grani, caratterizzati da diverse curve di distribuzione granulometrica. Attualmente la produzione è finalizzata solamente ad elementi in calcestruzzo per uso non strutturale, anche se da un punto di vista storico, nell'antica civiltà Romana i conglomerati alleggeriti con pomice venivano spesso adoperati per la realizzazione di strutture (un esempio è rappresentato dalla cupola del Pantheon a Roma).

La pomice presenta diverse caratteristiche che la rendono adatta all'utilizzo per conglomerati cementizi strutturali: si tratta di un materiale inerte, che non ha alcuna reazione chimica con la pasta di cemento o con le armature; la forma poliedrica a spigoli vivi e la scabrezza della superficie esterna dei grani consentono una buona aderenza tra l'inerte grosso e la malta cementizia; la resistenza al fuoco dei grani supera i requisiti minimi imposti dalle normative tecniche. Inoltre, la struttura porosa e la totale assenza di sostanza cristallina assicurano un ottimo isolamento termico e acustico.

Ciononostante, l'impiego della pomice per il calcestruzzo leggero strutturale è stato per lungo tempo limitato, forse troppo cautelativamente, per le sue non eccellenti proprietà meccaniche, come confermato da diverse normative, primo fra tutte il DM '96, che la esclude esplicitamente, inserendola specificamente tra gli inerti adatti al confezionamento di calcestruzzi non strutturali.

Negli ultimi decenni diversi autori hanno cercato di valutare la possibile applicazione degli inerti di pomice nei calcestruzzi per uso strutturale.

Yasar et al.(2003) studiano la resistenza a compressione di calcestruzzi alleggeriti con pomice basaltica e ceneri volanti. Gli autori dimostrano come sia possibile per il calcestruzzo che utilizza questo tipo di inerte raggiungere una resistenza a compressione a 28 giorni di circa 30 MPa, impiegando 500 kg/m<sup>3</sup> di cemento. Ne risulta un peso specifico di circa 1850 kg/m<sup>3</sup>. Si tratta comunque di una miscela particolarmente ricca di cemento, con un aggravio di costi che non giustifica a pieno l'uso della pomice.

Sahin et al. (2003) valutano invece l'influenza del dosaggio di cemento e dei rapporti di aggregato su alcune proprietà meccaniche. Le prove effettuate portano a concludere che attraverso rapporti di aggregato di pomice del 100%, la densità si può ridurre fino a un massimo di circa il 40% rispetto al caso di calcestruzzo ordinario. Elevati dosaggi di cemento (400-500 kg/m<sup>3</sup>) determinano invece incrementi sia della densità che della resistenza a compressione rispettivamente del 3.2% e del 265%, confrontati col provino standard, avente un contenuto in cemento di 200 kg/m<sup>3</sup>. Gli autori quindi confermano che è possibile ottenere valori accettabili di resistenze a compressione solamente adoperando quantitativi di cemento elevati.

Altri studi hanno avuto come obiettivo quello di valutare l'opportunità di migliorare le

caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi alleggeriti attraverso l'uso di fibre in acciaio, o polimeriche. Ad esempio Campione et al. (2001) e Duzgun et al. (2005) dimostrano che, aumentando il contenuto di fibre, si ottiene un aumento della resistenza a compressione e di quella a trazione indiretta, anche se con contemporaneo aumento del peso specifico. Risulta pertanto difficoltosa la definizione di mix che incrementino sufficientemente la resistenza senza perdere il requisito fondamentale del calcestruzzo indurito, cioè la leggerezza.

Altri studi sono stati indirizzati a valutare l'effetto dell'aggiunta di fibre: Libre et al. (2011) hanno recentemente mostrato che l'uso di basse percentuali di fibre (circa lo 0.4%) ha una scarsa influenza sulle proprietà meccaniche del calcestruzzo indurito in termini di resistenza, ma comunque conferisce al calcestruzzo un comportamento più duttile senza alterarne significativamente il peso specifico.

Nonostante la presenza di diverse ricerche finalizzate alla caratterizzazione del materiale, esistono ancora pochi studi riguardanti applicazioni ad elementi strutturali realizzati con calcestruzzo con inerti di pomice. Tra questi, il lavoro di Cavaleri et al. (2003) mostra i risultati di prove condotte su setti in c.a. caricati lungo il piano medio da forze verticali e laterali.

Queste prove dimostrano che le pareti di taglio realizzate con calcestruzzo di pomice hanno prestazioni simili a quelle realizzate con aggregati in argilla espansa e pertanto l'applicazione di tali conglomerati può essere vantaggiosa nei paesi dove la pomice è localmente disponibile.

In Amato et al. (2011) si valuta invece la possibilità di utilizzare calcestruzzo di pomice per il confezionamento di blocchi per muratura armata. In ragione delle prestazioni conseguibili, gli autori concludono che l'uso di calcestruzzo di pomice per tale tipologia strutturale può essere notevolmente vantaggioso in ragione della sua leggerezza e della conseguente diminuzione delle forze inerziali in caso di evento sismico.

Il presente lavoro si inquadra nel contesto sopra descritto. Viene mostrato come definire il mix design e come ottenere un conglomerato capace di soddisfare i requisiti normativi minimi in termini di resistenza meccanica. In particolare si fa riferimento a due diversi mix, l'uno per la realizzazione di setti e l'altro per la realizzazione di blocchi per muratura armata.

Nel lavoro viene fatto costantemente riferimento alle indagini sperimentali citate precedentemente (Cavaleri et al. 2003 per i setti e Amato et al. 2011 per i blocchi per muratura armata) discutendo alcuni dettagli della fase preliminare della sperimentazione non adeguatamente approfonditi in quei lavori, e rivalutandone le conclusioni alla luce delle indicazioni del DM 2008. In particolare viene dettagliatamente mostrato come è stato definito il mix design alla base dei modelli testati, evitando l'uso di additivi o fibre e senza ricorrere a dosi massicce di cemento, ma introducendo alcuni semplici accorgimenti nella realizzazione.

I risultati ottenuti vengono confrontati con quelli relativi a campioni analoghi con argilla espansa, aggregato leggero largamente diffuso e inequivocabilmente ammesso dalle norme per l'uso strutturale. Il confronto è effettuato in termini di prestazioni non solo del materiale ma anche degli elementi strutturali realizzati con i due diversi impasti

## **2 LA POMICE USATA**

La pomice adoperata in questo studio (Figura 1) proviene da Lipari ed è caratterizzata da un contenuto in silicio elevato (circa il 70%) rispetto ai valori medi di altre pomici (50-60%). La composizione chimica è riportata in dettaglio in Tabella 1.

Tabella 1. Composizione chimica della pomice.

Componenti	Massa (%)
Silice (SiO <sub>2</sub> )	71.75
Oss. di Alluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	12.33
Ossido Ferrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.98
Ossido di Calcio (CaO)	0.70
Ossido di Magnesio (MgO)	0.12
Ossido di Sodio (Na <sub>2</sub> O)	3.59
Ossido di Potassio (K <sub>2</sub> O)	4.47
Anidride Solforica (SO <sub>3</sub> )	0.18
Altro	4.88

La pomice è generalmente disponibile sul mercato in forma di grani aventi diametro nominale massimo pari a 20 mm; l'insieme comprende una parte fine con pezzatura inferiore a 3 mm nonché una parte polverulenta che tende ad avvolgere i singoli grani.

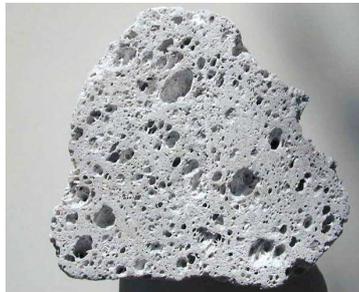


Figura 1. Spaccato di un grano di pomice

La curva granulometrica dell'aggregato, così come disponibile commercialmente, è mostrata in Figura 2.

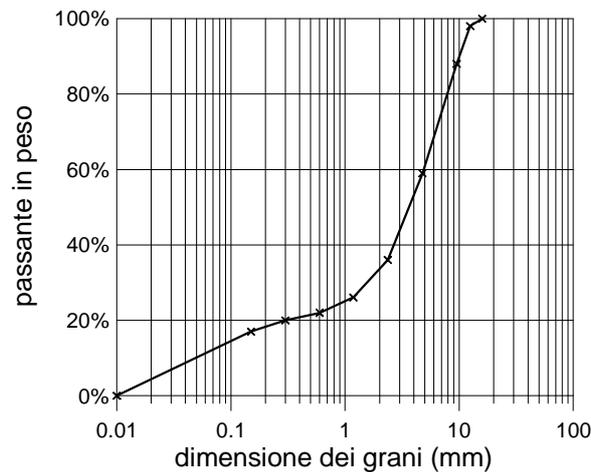


Figura 2. Curva granulometrica commerciale per gli aggregati di pomice

### 3 IL DM 2008 ED ALTRE NORME

L'attuale normativa italiana, DM II TT 14-01-2008, consente (par. 11.2.9.2) l'impiego di aggregati leggeri conformi alla direttiva europea UNI EN 13055-1 e nella circolare esplicativa

617/2009 ne regola l'utilizzo, prevedendo classi di resistenza variabili dalla LC 16/18 fino alla LC 55/60. Tuttavia la stessa normativa al par.7.4.2.1 (cioè nel capitolo che riguarda la progettazione sismica) non consente l'uso di calcestruzzi di classe inferiore alla C20/25 apparendo così in contraddizione con quanto espresso nella circolare, a meno che la indicazione del par. 7.4.2.1 non sia da intendersi esclusivamente riferita a quei componenti strutturali a cui è demandata la resistenza nei confronti delle azioni sismiche. In questo caso, ad esempio in una struttura intelaiata in c.a. travi e pilastri potrebbero essere realizzati con un calcestruzzo di classe almeno C20/25, mentre i solai potrebbero essere realizzati con calcestruzzi di resistenza inferiore. E' comunque importante osservare che l'attuale DM 2008 non fa alcuna classificazione degli aggregati leggeri ma focalizza l'attenzione sulle resistenze da raggiungere indipendentemente dal tipo di aggregato leggero utilizzato.

Differentemente dal DM 2008, il precedente DM 96 specificava nella sua circolare esplicativa che per calcestruzzo leggero doveva comunque intendersi quello realizzato con inerti leggeri artificiali ed in particolare con argilla espansa.

D'altro canto l'EC2, già al tempo del DM '96, non precludeva l'utilizzo di inerti leggeri naturali, a condizione che essi assicurassero le caratteristiche meccaniche minime consentite. In tal senso l'attuale DM 2008 segue il criterio adottato dall'EC2, dando la stessa impostazione alla parte che riguarda il possibile uso degli aggregati leggeri naturali.

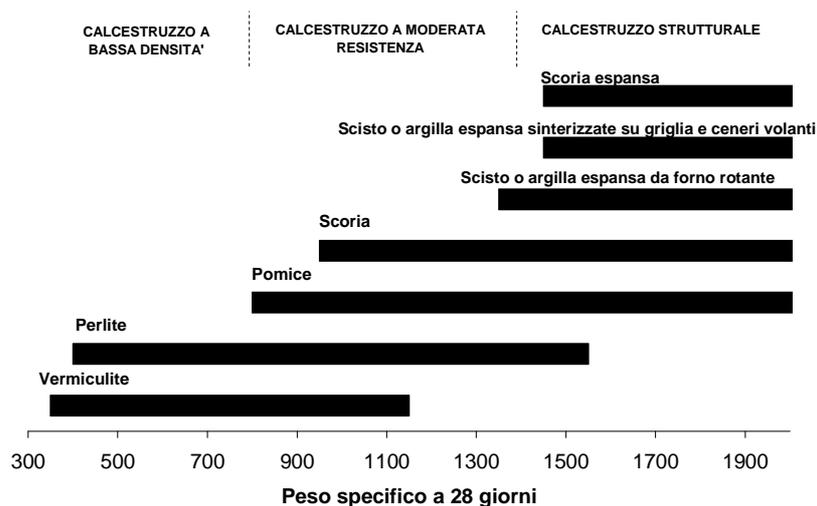


Figura 3. Classificazione degli inerti secondo ACI 213.

Differentemente dalle norme sopra citate, ACI-213 propone la classificazione degli inerti leggeri riportata nella Figura 3. In essa la pomice viene indicata come inerte utilizzabile per il confezionamento di calcestruzzi strutturali ma contemporaneamente viene collocata fra quegli inerti con i quali i calcestruzzi ottenuti sono classificati a moderata resistenza. Ne deriva che l'uso della pomice per calcestruzzi strutturali richiede particolare attenzione e l'adozione di protocolli specifici nel confezionamento che garantiscano il conseguimento di adeguate proprietà meccaniche.

#### 4 MIX DESIGN

Sono stati studiati due diversi mix design in relazione all'uso previsto per il calcestruzzo. Il primo è stato finalizzato al confezionamento di blocchi da usare per muratura armata (Amato et al. 2011); il secondo al confezionamento di setti in c.a. (Cavaleri et al. 2003).

#### 4.1 La miscela per i blocchi da muratura armata

Per ottenere un calcestruzzo di resistenza adeguata sono state seguite le indicazioni fornite dalle normative tecniche europee ed americane (EC2, EC6, MSJC, ACI 211, ACI 213), seguendo le prescrizioni relative agli inerti leggeri artificiali.

Nella scelta dell'assortimento granulometrico si è dovuto tenere conto delle caratteristiche geometriche dei blocchi da muratura armata, che impongono l'uso di un aggregato con dimensione massima del grano adeguata alle cartelle. D'altro canto il blocco deve poter mantenere leggerezza e resistenza, quest'ultima non solo quando è pronto per la messa in opera ma anche subito dopo il confezionamento, per ridurre i tempi morti in produzione.

Dallo studio del mix design e dalla realizzazione dei primi impasti è emersa la necessità di lavare la pomice, per eliminare la parte finissima che ricopre i singoli granuli sotto forma di una pellicola di polvere (pari a circa il 10% in peso). La frazione polverulenta si è visto essere responsabile di una riduzione di resistenza anche del 30%. L'aggregato è stato quindi oggetto di un ciclo di lavaggio con acqua, per essere depurato della polvere in questione.

Dopo avere testato diverse distribuzioni è stata fatta la scelta di usare taglie del grano nell'intervallo 3.1-11.2 mm, la cui curva granulometrica può essere osservata in Figura 4.

La Figura 5 mostra la geometria dei blocchi da realizzare. L'eliminazione della frazione di aggregato con diametro superiore a 11.2 mm, oltre che necessaria per la compatibilità con gli spessori delle cartelle, risulta conveniente poiché all'aumentare del diametro dei grani la resistenza a compressione diminuisce, per la maggiore quantità di vuoti al loro interno.

In conclusione i componenti della miscela sono stati i seguenti: cemento tipo Portland 425, acqua, aggregato di pomice con taglia dei grani compresa fra 3.1 e 11.2 mm, sabbia silicea.

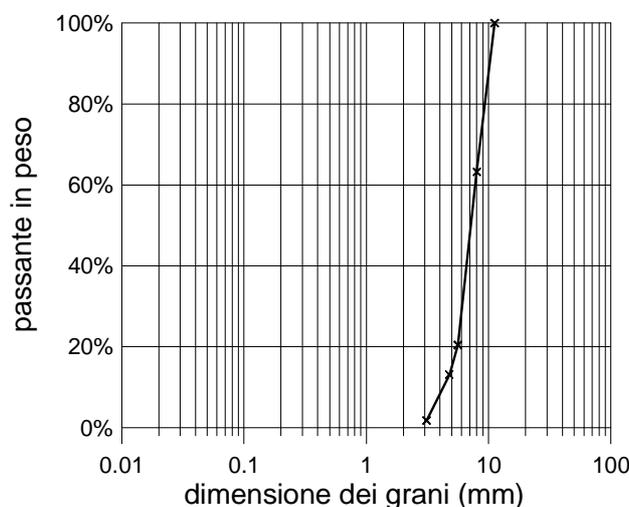


Figura 4. Curva granulometrica della pomice 3.1-11.2.

Partendo da una fornitura di pomice pari a 4 m<sup>3</sup> con granulometria 0-15 mm, sono state necessarie due vagliature per ottenere l'assortimento granulometrico di Figura 4: una al crivello da 3,1 mm e una al crivello da 11.2 mm.

E' stata inoltre effettuata un'ulteriore vagliatura al crivello da 8 mm, in maniera tale da ottenere preliminarmente due assortimenti granulometrici, l'uno caratterizzato da dimensioni dei grani variabili da 3.1 a 8 mm (denominato nel seguito Pomice 3-8, Figura 6a) e l'altro con dimensioni dei grani variabili tra 8 e 11.2 mm (Pomice 8-12, Figura 6b).

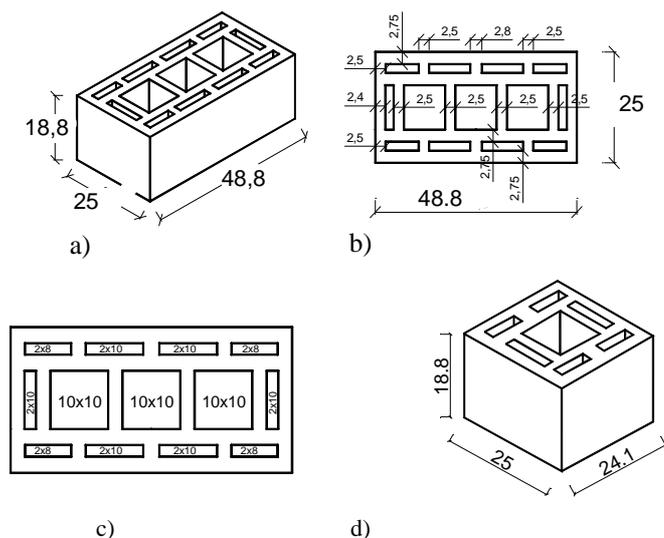


Figura 5. Caratteristiche geometriche dei blocchi (Amato et al. 2011); a) dimensioni esterne; b) dimensioni spessori interni; c) dimensioni celle interne; d) metà blocco.

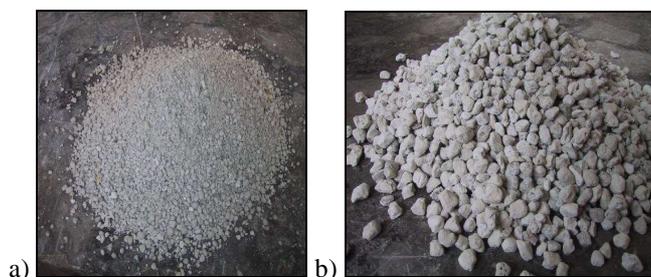


Figura 6. Aggregati di pomice prima del lavaggio; a) Pomice 3-8; b) Pomice 8-12.

Dopo essere stato diviso a costituire le due diverse granulometrie, il materiale è stato stoccato all'aperto.

Inizialmente, nel confezionamento degli impasti si era tenuto conto del tenore di umidità degli aggregati: si era corretta la composizione sostituendo il peso dell'acqua contenuta negli aggregati con l'equivalente in peso degli stessi. In un secondo tempo, per un maggiore controllo sulla composizione della miscela, gli aggregati sono stati essiccati utilizzando dei forni.

E' infatti noto che le caratteristiche del calcestruzzo leggero dipendono dalla presenza di acqua nell'aggregato: un eccesso di acqua indebolisce le forze di adesione tra aggregato e malta; d'altro canto se l'aggregato non è sufficientemente imbibito, lo stesso assorbe acqua dalla malta impedendo la idratazione completa del cemento. In entrambi i casi si verifica una riduzione della resistenza.

Prima di essere destinata alla miscela la pomice è stata tenuta in acqua per 30 minuti, valore ritenuto ottimale da precedenti ricerche (Failla et al. 1982) e confermato dal presente studio. Questa operazione si è svolta ponendo il materiale all'interno di un contenitore metallico a maglie quadre di dimensioni pari a 2 mm, immerso in un fusto pieno d'acqua con un sistema ad argano e puleggia, che ha consentito, alla fine della fase di pre-inumidimento, l'eliminazione dell'acqua in eccesso.

La miscela è stata definita a meno della quantità di cemento e del rapporto acqua/cemento; sulla base di questi due parametri è stato calcolato il volume della pasta cementizia, mentre le percentuali in peso di fine ( $d < 3$  mm) e grosso ( $3.1 \text{ mm} < d < 11.2$  mm) sono state calcolate in

maniera che l'inerte complessivamente (sabbia e pomice) avesse una curva granulometrica appartenente al fuso di Fuller (Fuller e Thompson 1907) relativo ad aggregato con dimensione dei grani inferiore a 15 mm, che si riporta nella Figura 7.

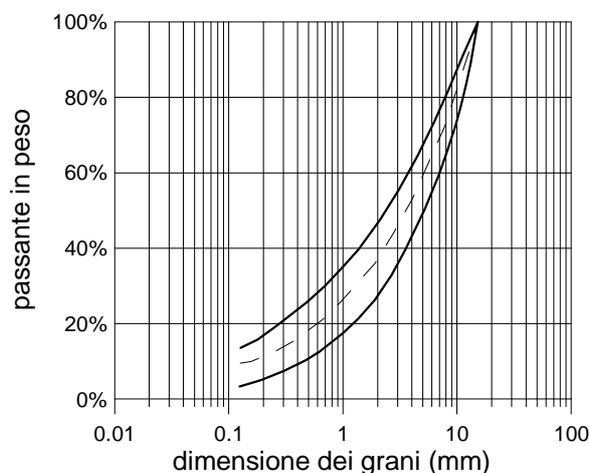


Figura 7. Fuso di Fuller per aggregato con dimensione massima dei grani di 15 mm.

In dettaglio, si è proceduto come segue. Dopo aver fissato il quantitativo di cemento ( $350 \text{ kg/m}^3$ ) ed il rapporto acqua/cemento (0.41 – tale rapporto è stato determinato per tentativi studiando l'influenza dello stesso sulla resistenza), il volume di pasta cementizia  $V_p$  è stato calcolato sommando i valori assoluti dei volumi di cemento, acqua ed aria interna, quest'ultima stimata come il 2% del volume di calcestruzzo. Il volume effettivo di aggregato ( $V_a$ ) è stato determinato come differenza tra il volume unitario e il volume  $V_p$  di pasta di cemento ( $V_a=1-V_p$ ). I risultati sono riassunti in Tabella 2.

Tabella 2. Mix design del calcestruzzo leggero strutturale con inerti di pomice per la realizzazione di blocchi per muratura armata

A/C	Cemento		Acqua effettiva	Aria interna	Volume della pasta di cemento ( $V_p$ )	Volume di aggregato ( $V_a$ )
	[kg]	[ $\text{m}^3$ ]	[ $\text{m}^3$ ]	[ $\text{m}^3$ ]	[ $\text{m}^3$ ]	[ $\text{m}^3$ ]
0.41	350	0.113	0.143	0.020	0.276	0.724

Una volta note le frazioni in volume di pasta di cemento e di aggregato si è passati alla determinazione dei componenti dell'aggregato in termini di percentuali in peso.

Il quantitativo di sabbia (caratterizzata dalla curva granulometrica di Figura 8) è stato ottenuto imponendo la condizione che tutto il passante (in percentuale) fosse sulla curva granulometrica di riferimento di Fuller. Il quantitativo di pomice 3-8 è stato fissato in maniera analoga alla sabbia; infine la frazione di pomice 8-12 è stata desunta come complemento al 100% della somma delle percentuali prima determinate.

Note le masse volumiche, sono stati prima convertiti i pesi degli aggregati in volume e poi è stato determinato il volume della pasta cementizia come complemento al volume unitario secondo la Tabella 2.

Gli impasti di prova sono stati eseguiti a mano, su una superficie liscia e non assorbente, mescolando dapprima la sabbia e l'aggregato leggero ed aggiungendo metà dell'acqua efficace. Successivamente sono stati aggiunti il cemento e il quantitativo di acqua rimanente.

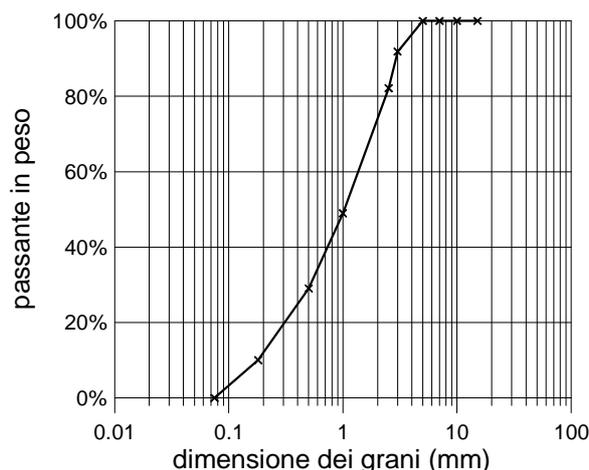


Figura 8. Curva granulometrica della sabbia di frantoio utilizzata.

In definitiva, tenuto conto della maggiore capacità della pomice di assorbire acqua rispetto alla argilla espansa a parità di tempo di imbibizione e quindi di un possibile rilascio della stessa, nonché dei pesi specifici apparenti determinati come descritto più avanti, il dosaggio per un m<sup>3</sup> di calcestruzzo di pomice è risultato quello riportato in Tabella 3.

Tabella 3. Dosaggio per 1 m<sup>3</sup> di cls di pomice

componente	Peso (kg)
Cemento	350
Acqua efficace	133
Sabbia	724
Pomice 3-8	302
Pomice 8-12	181

Per la consistenza, si è ottenuta per la miscela fresca la classe S1 (terra umida, secondo la UNI 9418), determinata al cono di Abrams.

#### 4.2 La miscela per il getto di setti in c.a.

La scelta della distribuzione delle dimensioni degli aggregati è stata condotta considerando gli effetti che questa produce sulla lavorabilità, sul contenuto in cemento, sul contenuto ottimale di aria e sul ritiro.

I grani di pomice di piccola dimensione (con diametro inferiore a 3 mm), così come per il mix precedentemente discusso, sono stati sostituiti da sabbia di peso ordinario, in modo da ottenere una pasta di cemento più rigida rispetto a quella ottenibile con sabbia leggera, rendendo nel contempo il conglomerato più lavorabile.

L'inerte commerciale è stato privato della parte fine ( $d < 3$  mm) tramite setacciatura, e della parte polverulenta tramite lavaggio. Successivamente il prodotto è stato distinto in porzioni di diverso assortimento granulometrico così come fatto nel caso della miscela da utilizzare per il confezionamento di blocchi da muratura armata. In particolare, è stata separata la porzione con dimensione massima del granulo inferiore a 7 mm da quella con dimensione massima dei granuli compresa tra 7 e 15 mm.

In definitiva per ottenere 1 m<sup>3</sup> di miscela, a seguito delle diverse composizioni testate, è risultato ottimale adoperare 350 kg di cemento tipo Portland 425, 175 litri di acqua, 206 kg di pomice 3-7, 260 di pomice 7-15 e 615 kg di sabbia (0-3 mm). In tal modo si è ottenuto un calcestruzzo fresco con peso specifico di 1670 kg/m<sup>3</sup> e peso specifico a 28 giorni di circa

1600 kg/m<sup>3</sup>, risultando quindi il conglomerato classificabile come calcestruzzo di classe D1,6 ai sensi della Circ. 617/2009. Nella miscela erano presenti ulteriori 69 kg di acqua assorbita dai grani di pomice.

Bisogna osservare che nel caso in esame è stato adottato un rapporto acqua/cemento maggiore rispetto alla precedente miscela a vantaggio della lavorabilità ma soprattutto perché non era richiesto il raggiungimento di resistenze importanti nelle 24 ore, non essendo necessario il recupero di casseri come nel caso di produzione di blocchi in stabilimento.

#### 4.3 *Miscela basate sull'uso di argilla espansa*

Sia nel caso dei blocchi che in quello dei setti, si è proceduto, contestualmente alla produzione del calcestruzzo di pomice, al confezionamento di un conglomerato leggero strutturale realizzato con inerti di argilla espansa, che rappresenta il materiale maggiormente diffuso sul mercato per applicazioni strutturali e maggiormente promosso dalle principali norme tecniche internazionali.

Con riferimento alla miscela per la realizzazione dei blocchi da muratura armata, la fornitura consisteva in 4 m<sup>3</sup> di argilla espansa, denominata "Lecastrutturale", con granulometria 0-20 mm. È stato necessario operare tre vagliature: le prime due per eliminare gli intervalli granulometrici 0-3 mm e 12-20 mm, per i motivi già esposti, la terza per suddividere il mucchio nei due con intervallo della dimensione degli inerti 3-8 mm e 8-12 mm, analogamente a quanto fatto per gli inerti di pomice (Figura 9). Nel caso dei setti, sono state ottenute le frazioni 3-7 mm e 7-15 mm.

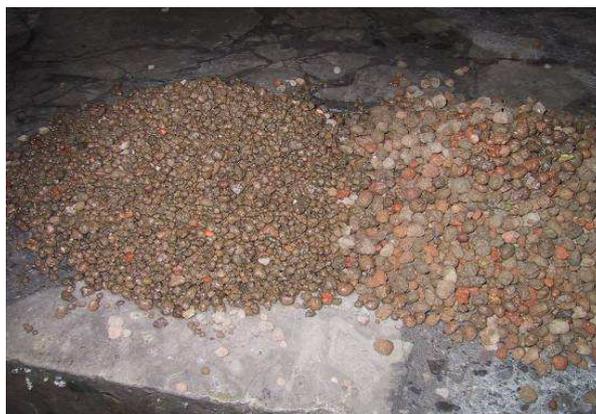


Figura 9. Aggregato di argilla espansa nelle due diverse granulometrie: 3-8 a sx e 8-12 a dx

Le miscele più idonee, anche per questo tipo di inerte, sono state ottenute dopo avere testato l'efficacia di dosaggi diversi. Per il confezionamento di blocchi per muratura armata sono stati utilizzati 350 kg di cemento, 144 kg di acqua efficace, 674 kg di sabbia, 317 kg di argilla 3-8, 161 kg di argilla 8-12. Si è ottenuto un peso della miscela fresca, tenuto conto dell'assorbimento degli inerti immersi in acqua per 30 minuti, di circa 1700 kg/m<sup>3</sup>, con un peso a 28 giorni di circa 1670 kg/m<sup>3</sup>.

Per il confezionamento dei setti, invece, la miscela è stata dosata come di seguito: 350 kg di cemento, 175 litri di acqua efficace, 99 litri di acqua di assorbimento, 237 kg di aggregato con dimensioni 3-7 mm, 304 kg di aggregato con dimensione 7-15 mm, 615 kg di sabbia. Si è ottenuto un peso della miscela fresca di 1780 kg/m<sup>3</sup> ed un peso a 28 giorni di 1680 kg/m<sup>3</sup>.

## 5 CARATTERIZZAZIONE DEGLI INERTI

Preliminarmente alle prove sugli elementi strutturali, si è proceduto all'esecuzione di alcune prove volte a determinare le principali caratteristiche degli inerti utilizzati. Nel seguito vengono descritte le prove eseguite con riferimento alle frazioni 3-8 mm e 8-12 mm al fine di evidenziare le differenze tra pomice e argilla espansa.

### 5.1 Prove sugli aggregati leggeri

Sono state condotte le prove per la determinazione della massa volumica in mucchio, della massa volumica media del granulo, la valutazione sperimentale del coefficiente di imbibizione e prove di compressione sui granuli. Le prove eseguite sono state condotte seguendo gli standard previsti dalla UNI EN 13055-1:2003.

#### 5.1.1 Massa volumica in mucchio

Il materiale, preventivamente essiccato, è stato versato e poi pesato in un contenitore cilindrico con capacità pari a 5000 cm<sup>3</sup>, realizzato appositamente per l'esecuzione di questa prova.

La massa volumica (massa di un volume unitario di materiale, comprendendo nella misura i vuoti nei granuli e fra i granuli) si ottiene rapportando la massa del materiale contenuto nel recipiente al volume effettivo di quest'ultimo.

Tutte le misure sono state effettuate in triplo. In Tabella 4 sono riportati i valori medi. La Tabella evidenzia che la frazione polverulenta contenuta nella pomice commerciale fornisce un apporto non irrilevante alla massa volumica in mucchio.

Tabella 4. Massa volumica del materiale in mucchio

Aggregato	Massa volumica in mucchio [Kg/m <sup>3</sup> ]
Pomice 3-12 commerciale	522.3
Pomice 3-12 lavata	462.8
Pomice 3-8	530.1
Pomice 8-12	452.8
Argilla 3-8	555.9
Argilla 8-12	536.7

#### 5.1.2 Massa volumica media del granulo (peso specifico apparente)

La massa volumica media del granulo o peso specifico apparente (rapporto tra la massa in aria del granulo essiccato ed il volume delimitato dalla superficie del granulo saturato) è stata determinata su campioni essiccati a 110 °C e raffreddati a temperatura ambiente. I valori riportati in Tabella 5 sono stati ottenuti mediando i risultati di prove eseguite in triplo.

Tabella 5. Massa volumica media del granulo

Aggregato	Massa volumica media [kg/m <sup>3</sup> ]
Pomice 3-12 commerciale	1125.9
Pomice 3-12 lavata	927.4
Pomice 3-8	1092.6
Pomice 8-12	927.4
Argilla 3-8	837.1
Argilla 8-12	1072.5

### 5.1.3 Coefficiente di imbibizione

Il coefficiente di imbibizione è la quantità d'acqua che l'inerte può assorbire, in determinate condizioni, espressa in % della sua massa.

L'aggregato leggero assorbe acqua e questo fenomeno condiziona fortemente le caratteristiche dell'impasto, sia in termini di lavorabilità sia in termini di resistenza meccanica. Al riguardo, occorre tenere conto che l'aggregato secco sottrae acqua che dovrebbe essere destinata alla idratazione del cemento, mentre l'aggregato imbibito cede acqua che si aggiunge a quella strettamente necessaria per la idratazione del cemento. I risultati sono stati ottenuti per un tempo di immersione dei granuli di 30 minuti e 24 ore.

Anche in questo caso, i valori riportati nella Tabella 6 sono valori medi ottenuti da tre prove.

Tabella 6. Coefficiente di imbibizione

Aggregato	Coefficiente di imbibizione (%)	
	a 30 min	a 24 h
Pomice 3-12 commerciale	13.4	19.1
Pomice 3-12 lavata	14.1	19.1
Pomice 3-8	22.9	27.8
Pomice 8-12	13.9	19.2
Argilla 3-8	9.45	14.7
Argilla 8-12	9.63	14.6

### 5.1.4 Resistenza dei granuli allo schiacciamento

La resistenza a schiacciamento dei granuli indica la pressione necessaria per imprimere una deformazione prestabilita ad un campione normato di aggregato leggero.

Le prove effettuate sulla pomice commerciale riportate da Failla et (1982) hanno fornito valori di resistenza media a schiacciamento pari a  $2,45 \text{ N/mm}^2$ .

Per quel che riguarda l'argilla espansa, la ditta fornitrice ha dichiarato i seguenti valori:

Leca strutturale 3-8  $5.0 \text{ N/mm}^2$

Leca strutturale 8-12  $4.0 \text{ N/mm}^2$ .

Seppur effettuate su campioni di diversa natura, le prove evidenziano nettamente una maggior resistenza del granulo di argilla espansa. Tale differenza può essere resa irrilevante utilizzando una pasta cementizia con resistenza sufficientemente elevata.

## 5.2 Caratteristiche della sabbia e prove

La sabbia utilizzata per il confezionamento dei conglomerati, denominata "sabbia di frantoio" è stata sottoposta a una serie di analisi allo scopo di determinarne granulometria, massa volumica in mucchio, massa volumica media del granulo.

L'analisi granulometrica è stata condotta seguendo le indicazioni della norma UNI EN 933-1 mentre le prove sono state condotte secondo la UNI 8520. I risultati sono sintetizzati nelle Tabelle 7 e 8, rispettivamente contenenti informazioni sulla massa volumica apparente e sulla massa volumica media del grano.

La curva granulometrica ottenuta è stata già mostrata in Figura 8. Si rileva che la sabbia, nonostante assorba acqua, non sottrae acqua di idratazione perché anche l'acqua assorbita partecipa alla idratazione del cemento.

Tabella 6. Massa volumica apparente

Sabbia di frantoio	Prova 1	Prova 2	Prova 3
Capacità recipiente [kg/m <sup>3</sup> ]	2.99	2.99	2.99
Massa recipiente + inerte [g]	7142.5	7098.4	7237.2
Massa recipiente [g]	1914.1	1914.1	1914.1
Massa volumica apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1748.63	1733.8	1780.3
Massa volumica apparente [kg/m <sup>3</sup> ]		1754.27	

Tabella 7. Massa volumica media del granulo

Sabbia di frantoio	Prova 1	Prova 2
Massa picnometro [g]	205.25	208.75
Massa sabbia essiccata + picnometro [g]	611.42	627
Massa picnometro pieno d'acqua [g]	795.93	794.27
Massa tot. picn. + acqua + sabbia [g]	1059.86	1066.61
Massa vol. acqua a 20° C [g/cm <sup>3</sup> ]	0.99823	0.99823
Massa sabbia satura [g]	408	420
Massa volumica media del granulo saturo [g/cm <sup>3</sup> ]	2.827	2.839
Acqua di assorbimento [%]	0.45	0.42
Massa volumica media del granulo [g/cm <sup>3</sup> ]	2.85	2.861

## 6 PROVE DI COMPRESSIONE SU CAMPIONI DI CALCESTRUZZO

### 6.1 *Il cls per i blocchi da muratura armata*

Per la determinazione delle principali caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi confezionati, sono state eseguite prove di compressione centrata su cubetti di lato 15 cm seguendo le indicazioni della UNI EN 12390.

Al fine di ottenere un primo dato sulla resistenza caratteristica a compressione, sono stati confezionati, per ogni impasto realizzato, sei provini. Il cassero è stato eliminato dopo 24 ore dal getto, quindi i provini sono stati posti a stagionare in ambiente con temperatura di  $20 \pm 2$  °C ed umidità superiore a 90%.

Le prove a compressione sono state effettuate a 3, 7 e 28 giorni. Le prove a 3 e 7 giorni hanno consentito di verificare le resistenze raggiungibili dagli impasti nel breve periodo in relazione alla possibilità di disarmo dei blocchi.

I valori medi della resistenza caratteristica a compressione dei calcestruzzi leggeri, provati a 3, 7 e 28 giorni dal loro confezionamento, sono riportati nella Tabella 9. Dalla tabella si rileva, in particolare, che le resistenze a 28 giorni sono idonee all'utilizzo strutturale per entrambe le miscele, e che i valori sia nel breve che nel lungo periodo risultano molto prossimi nei due casi. Si conferma pertanto la possibilità di utilizzare la pomice per calcestruzzi idonei ai fini strutturali.

Si evidenzia, inoltre, che le diverse resistenze attribuibili alla argilla espansa ed alla pomice si riflettono molto poco sulla resistenza del calcestruzzo, grazie ad un opportuno proporzionamento dei componenti ed alla buona resistenza della matrice cementizia.

Tabella 9. Resistenze cubiche medie a compressione durante il processo di maturazione

Giorni	Cls Pomice [MPa]	Cls Argilla espansa [MPa]
3	14.55	15.35
7	16.22	17.89
28	22.05	23.0

## 6.2 La miscela per i setti in c.a.

Al fine di ottenere la resistenza a compressione ed il modulo elastico, sono state condotte prove di compressione centrata su dieci provini cilindrici di diametro 150 mm ed altezza 300 mm, mentre la resistenza a trazione è stata misurata attraverso prove di tipo “split” (prova brasiliana) su dieci cilindri di diametro 100 mm e lunghezza 200 mm.

Si è ottenuto un valore medio di resistenza cilindrica a compressione pari a 20.5 MPa, un modulo elastico medio di 13854 MPa ed una resistenza indiretta a trazione di 1.9 MPa. I valori ottenuti sono risultati in accordo con le prescrizioni minime delle normative europee (Eurocodice 2 e Circ.617/09) ed americane (ACI 213), che vengono riassunte in Tabella 10.

Tabella 10. Requisiti normativi per il calcestruzzo leggero strutturale

Normativa	Peso specifico massimo [Kg/m <sup>3</sup> ]	Minima resistenza cilindrica caratteristica a compressione [MPa]
EC 2 (Circ.617/09)	2050	16.00
ACI 213	1850	17.24

## 7 LE APPLICAZIONI STRUTTURALI

Come richiamato in precedenza, alcune applicazioni del calcestruzzo leggero strutturale con inerti di pomice riguardano la realizzazione di blocchi per muratura armata (Amato et al. 2011) e di setti in c.a. (Cavaleri et al. 2003).

Nel primo caso, i blocchi descritti al par.4 (Figura 10) sono stati provati a compressione seguendo la norma ASTM C140/08. Il valore medio di resistenza, basato sulla sezione lorda, è risultato uguale a 8.4 MPa lungo la direzione delle cavità interne e 1.9 MPa nella direzione ortogonale. Il primo valore è pertanto compatibile con il valore minimo prescritto dal DM 2008, pari a 5 MPa.

Considerando l'area netta, la resistenza media diventa 13.7 MPa, e dunque il blocco è dotato di resistenza coerente anche con il limite minimo di 13.1 MPa imposto dalle norme americane MSJC e ASTM C-90 che fanno riferimento appunto alla tensione effettiva sul materiale.

I blocchi, realizzati sia in calcestruzzo di pomice che in calcestruzzo di argilla espansa, sono serviti per la realizzazione di pannelli di muratura armata (Figura 11). Le resistenze laterali e i meccanismi di rottura riscontrati per i campioni esaminati sono risultati molto simili nei due casi. Per maggiori dettagli si rimanda al lavoro sopra citato.



Figura 10. Blocchi di calcestruzzo leggero strutturale con inerti di pomice (Amato et al. 2011).

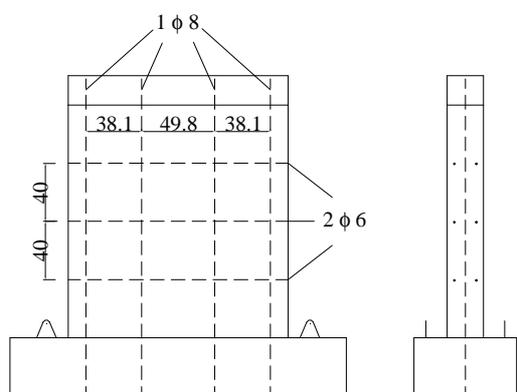


Figura 11. Pannello di muratura armata 150x180x25 cm incluso cordolo in c.a. in testa da 20 cm (Amato et al. 2011).

I setti in c.a. a cui si è fatto precedentemente riferimento hanno le caratteristiche riportate in Figura 12. Anche in questo caso i setti sono stati realizzati sia con calcestruzzo di pomice che con calcestruzzo di argilla espansa. I campioni sono stati assoggettati a storie di carico laterale ciclico, fornendo risultati assolutamente paragonabili. I dettagli della indagine sono riportati in (Cavaleri et al 2003).

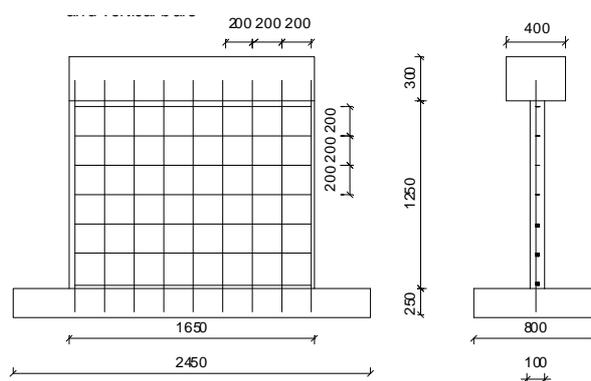


Figura 12. Pannello in c.a. alleggerito con armatura  $\phi 8$  orizzontali e verticali (Cavaleri et al. 2003).

## 8 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state discusse le operazioni più opportune da effettuare per il confezionamento di calcestruzzi leggeri di pomice per due diverse applicazioni strutturali: una riguarda la realizzazione di blocchi per murature armate, l'altra la realizzazione di setti armati.

E' stato evidenziato che la pomice, nel recente passato considerata non idonea per il confezionamento di calcestruzzo strutturale, in realtà, con alcuni accorgimenti, può fornire calcestruzzi di adeguata resistenza meccanica con proporzionamenti analoghi a quelli di calcestruzzi ordinari, senza utilizzare dosi massicce di cemento nelle miscele né ricorrere a componenti aggiuntivi che ne incrementino la resistenza quali fibre di acciaio o carbonio.

I risultati ottenuti dalla sperimentazione, confrontati con quelli ottenuti utilizzando argilla espansa, confermano che la pomice può realmente essere considerata un inerte per il confezionamento di calcestruzzo strutturale leggero, possibilità questa che sembra non essere esclusa dalle indicazioni dell'attuale DM 2008.

## BIBLIOGRAFIA

- ACI 213, 2003. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, Reported by Committee, 213 pp.
- ACI Committee 211, 1991. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211. 1.9.1), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 38 pp.
- ASTM C140 (2008) Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/C0140-08, www.astm.org.
- Amato, G., Campione, G., Cavaleri, L., Minafò, G., Miraglia, N., 2011. The use of pumice lightweight concrete for masonry applications. *Materials and Structures* [in revisione].
- Campione, G., Miraglia, N., Papia, M., 2001. Mechanical properties of steel fibre reinforced lightweight concrete with pumice stone or expanded clay aggregates. *Materials and Structures*, 34, 201-210.
- Cavaleri, L., Miraglia, N., Papia, M., 2003. Pumice concrete for structural wall panels. *Engineering Structures*, 25, 115-125.
- Circolare 2 febbraio 2009, n. 617. Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008.(GU n.47 del 26/02/2009 – Suppl. ordinario n.27).
- DM 14/01/2008. Norme Tecniche per le Costruzioni.(G.U. n. 29 del 24/02/2008).
- Duzgun, O.A., Gul, R., Aydin, A.C., 2005. Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete. *Materials Letters*, 59, 3357-63.
- Eurocode 2, 2006. Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- Eurocode 6, 2006. Design of masonry structures, Part 2: Design considerations, selection and execution of masonry.
- Eurocode 8, 2005. Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
- Failla, A., Mancuso, P., Miraglia, N., Ruisi, V., 1982. Indagine teorico sperimentale sui calcestruzzi leggeri confezionati con inerti di pomice. *L'Industria Italiana del Cemento*, 3: 197-204.
- Fuller, W.B., Thompson, S.E., 1907. The laws of proportioning concrete. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 59,67-143.

- Libre, N.A., Shekarchi, M., Mahoutian, M., Soroushian, P., 2011. Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice. *Construction and Building Materials*, 25, 2458-2464.
- Sahin, R., Demirboga, R., Uysal, H., Gul, R., 2003. The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, 1245–9.
- UNI EN 933-1:1999, Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per stacciatura.
- UNI EN-12390:2009, (UNI EN 12390-3:2009) Parte 3: Prova sul calcestruzzo indurito - Resistenza alla compressione dei provini, (UNI EN 12390-5:2009) Parte 5: Prova sul calcestruzzo indurito - Resistenza a flessione dei provini; (UNI EN 12390-6:2009) Parte 6: Prova su calcestruzzo indurito - Parte 6: Resistenza a trazione indiretta dei provini
- UNI EN 13055-1:2003, Aggregati leggeri - Aggregati leggeri per calcestruzzo, malta e malta per iniezione.
- Yasar, E., Atis, C.D., Kilic, A., Gulsen, H., 2003. Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash. *Materials Letters*, 57(15), 2267-2270.