

CALCESTRUZZO ALLEGGERITO CON EPS

Quaderno Tecnico AIPE - Volume 40



CALCESTRUZZO ALLEGGERITO CON EPS

Quaderno Tecnico AIPE - Volume 40

Testi a cura di AIPE | Associazione Italiana Polistirene Espanso | Marco Piana

CALCESTRUZZO ALLEGGERITO CON EPS | VOLUME 40

AIPE - Associazione Italiana Polistirene Espanso
Via Giovanni da Procida, 11 - 20149 Milano
Telefono: + 39 02 33 60 65 29
Mail: aipe@epsass.it
Sito: www.aipe.biz

INDICE

01 Premessa	pag.04
02 Il calcestruzzo	pag.05
03 I calcestruzzi leggeri	pag.08
04 La preparazione dei calcestruzzi leggeri polistirolici	pag.10
05 Caratteristiche principali dei calcestruzzi leggeri polistirolici	pag.11
06 Altre caratteristiche	pag.15
07 Campi d'impiego	pag.16
08 Alcuni confronti	pag.18
09 Il riciclo	pag.20
10 Valori sperimentali	pag.21
11 Chi è AIPE	pag.27
Bibliografia	

1. PREMESSA

Lo scopo di questo volume è di sottolineare le interessanti caratteristiche di un prodotto sicuramente non nuovo per l'edilizia, ma che non ha ancora convinto completamente gli addetti ai lavori: **il calcestruzzo alleggerito con sfere di polistirolo espanso.**

La limitata informazione che ha finora avuto questo prodotto, oltre alla sua relativa "giovinezza", ha fatto sì che nell'ambiente delle costruzioni si continuasse a prediligere l'uso di calcestruzzi alleggeriti con la più comune argilla espansa, vermiculite, pomice e simili, trascurando i vantaggi forniti dal polistirolo espanso in termini di isolamento termico, acustico e di resistenza all'umidità.

Il documento illustra in maniera esaustiva, ma al contempo semplice, le caratteristiche principali dei calcestruzzi leggeri polistirolici, mettendole a confronto in primo luogo con quelle dei calcestruzzi tradizionali, ma anche con quelle dei calcestruzzi leggeri più comuni (con argilla espansa).

L' introduzione contempla cosa siano i calcestruzzi, i diversi tipi di calcestruzzo leggero oggi utilizzati per poi procedere al confronto che prenderà in considerazione alcuni aspetti fondamentali per determinare l'effettiva validità del prodotto, quali densità e peso, resistenza meccanica, capacità termiche ed acustiche.

2. IL CALCESTRUZZO

Si definisce **calcestruzzo** un materiale ottenuto dalla miscelazione di alcuni componenti nelle giuste proporzioni, anche se in tal modo lo facciamo sembrare più facile di quanto in realtà non sia. Infatti la combinazione dei componenti deve essere regolata da precise norme relative alle caratteristiche dei componenti, alle loro proporzioni e alle modalità d'impiego.

La corretta combinazione di cemento, inerti fini e grossi (sabbia e ghiaia) e acqua, determina la formazione di un materiale con struttura simile ad una pietra artificiale con massa chiusa e compatta; ciascuno degli elementi che lo compongono ha una propria funzione ed è legato all'altro da rapporti reciproci.

2.1 "CALCIS STRUCTIO" - CENNI STORICI

Il termine **"calcestruzzo"** deriva dal latino **"calcis structio"**, che significa struttura composta da calce; solamente dopo il XVIII sec. sono chiamati in questo modo tutti i conglomerati artificiali costituiti dall'impasto tra un legante, acqua, sabbia e frammenti di pietra di varia durezza. Il composto analogo utilizzato dai Romani veniva invece chiamato **"caementum"**.

La differenza tra il moderno calcestruzzo e il **"caementum"** sta non solo nel metodo di posa, ma anche nel tipo di legante utilizzato: oggi si usa il cemento, mentre in passato la calce aerea. Il calcestruzzo viene utilizzato in tutte le epoche grazie alla notevole riduzione dei costi del legante ottenuta grazie all'aumento del volume dell'impasto mediante l'inserimento di uno scheletro pietroso che ne migliora anche la resistenza meccanica.

La diffusione in larga scala di questo prodotto risale alla metà del secolo scorso, come anche l'introduzione del cemento armato, che unisce la resistenza a compressione del calcestruzzo con quella a trazione del ferro.

2.2 LA PASTA

Dalla **combinazione di acqua e cemento si ottiene la pasta**, in cui si sviluppano le reazioni fondamentali per la formazione del calcestruzzo: l'acqua infatti, quando entra in contatto con i granuli di cemento avvia il processo di idratazione che determina l'indurimento della pasta.

In questa fase, più che in altre, è fondamentale utilizzare la giusta quantità di acqua in proporzione al cemento usato, in modo da determinare un corretto indurimento, ma anche il giusto grado di fluidità in funzione della lavorazione che se ne deve fare. Questo rapporto varia infatti a seconda del tipo di calcestruzzo che si vuole ottenere e delle caratteristiche dei materiali componenti, anche se per i calcestruzzi tradizionali i rapporti non variano mai di molto.

2.3 LA MALTA

Se si mescola la pasta con dell'inerte si ottiene la **malta**. Queste due componenti vanno miscelate in modo da ottenere una massa compatta e priva di vuoti, facendo cioè in modo che i granuli dell'inerte siano completamente avvolti dalla pasta.

È quindi essenziale che il rapporto pasta-sabbia sia corretto, per evitare la formazione di pori che altererebbero le caratteristiche del prodotto. La sabbia deve in oltre avere una granulometria varia in modo che il vuoto tra un granulo e l'altro sia ridotto al minimo.

2.4 IL CALCESTRUZZO

L'ultimo passaggio per ottenere il calcestruzzo è quello di aggiungere alla malta l'inerte grosso (ghiaia). Il primo è l'elemento fondamentale per determinare le caratteristiche del composto, il secondo costituisce lo scheletro. Questo ha minor importanza rispetto all'inerte fine, ma anche le sue caratteristiche devono essere tenute sotto controllo. Anche in questo caso è fondamentale che ci sia un giusto rapporto tra malta e ghiaia, stabilito in base alle esigenze, come anche un certo assortimento delle dimensioni dell'inerte per ridurre i vuoti e la malta utilizzata.

TIPODI CLS	CEMENTO		SABBIA		GHIAIA		ACQUA	
	Quantità (Kg)	Parti	Quantità (m³)	Parti	Quantità (m³)	Parti	Quantità (l)	Parti
MAGRONE	150-200	1	0,4	3	0,8	5	120-140	3/4-1
CLS MAGRO	200-250	1	0,4	2,5	0,8	4,5	100-120	2/3
CLS NORMALE	300	1	0,4	2	0,8	4	120	1/2
CLS GRASSO	350-400	1	0,4	1,5	0,8	3	140-160	2/5-1/2

In tabella: **Quantità e rapporti delle componenti dei calcestruzzi tradizionali**

2.5 CARATTERISTICHE PRINCIPALI

Essendo un materiale eterogeneo, le sue caratteristiche dipendono da molti fattori, tra cui la quantità di cemento, il rapporto acqua cemento, la quantità e la granulometria delle sabbia e della ghiaia.

I requisiti richiesti si riferiscono sostanzialmente al materiale fresco e a quello indurito. Quando ancora fresco deve presentarsi compatto e senza vuoti, ma soprattutto lavorabile, cioè abbastanza fluido da poter essere gettato e costipato in massa compatta ed uniforme dentro le casseforme.

La fluidità è direttamente proporzionale alla quantità di acqua presente nell'impasto, ma come abbiamo detto prima il calcestruzzo deve essere il più asciutto possibile, perciò si cercherà sempre di dargli il minimo di fluidità richiesto.

Dopo il getto, per il fenomeno dell'idratazione del cemento, il calcestruzzo indurisce; dopo la stagionatura deve possedere certi requisiti, primo dei quali la resistenza meccanica, che significa cioè elevata compattezza della sua massa, ovvero corretta proporzione tra i suoi componenti e accurata esecuzione del getto e delle casseforme.

2.5.1. IL CEMENTO

Il cemento viene prodotto in vari tipi e grazie alle loro differenti caratteristiche permettono di ottenere calcestruzzi dalle diverse peculiarità. I più comuni sono: il cemento Portland, quello pozzolanico, quello d'altoforno e quello alluminoso.

2.5.2 L'ACQUA

L'acqua è una componente insostituibile in quanto determina l'indurimento del cemento attraverso il processo di idratazione. Fondamentale, oltre alla quantità utilizzata, è la purezza, cioè il contenuto di sostanze nocive come limo, argilla humus, acidi organici e sali: l'acqua più sicura è quindi quella potabile, anche se a volte si può usare acqua di altra provenienza se accuratamente controllata. Anche piccole percentuali di impurità possono ridurre la capacità di presa e indurimento del calcestruzzo.

2.5.3. GLI INERTI

Gli inerti o aggregati possono essere sia di tipo naturale che artificiale e costituiscono lo scheletro del calcestruzzo: costituiscono l'80% in volume di un calcestruzzo tradizionale.

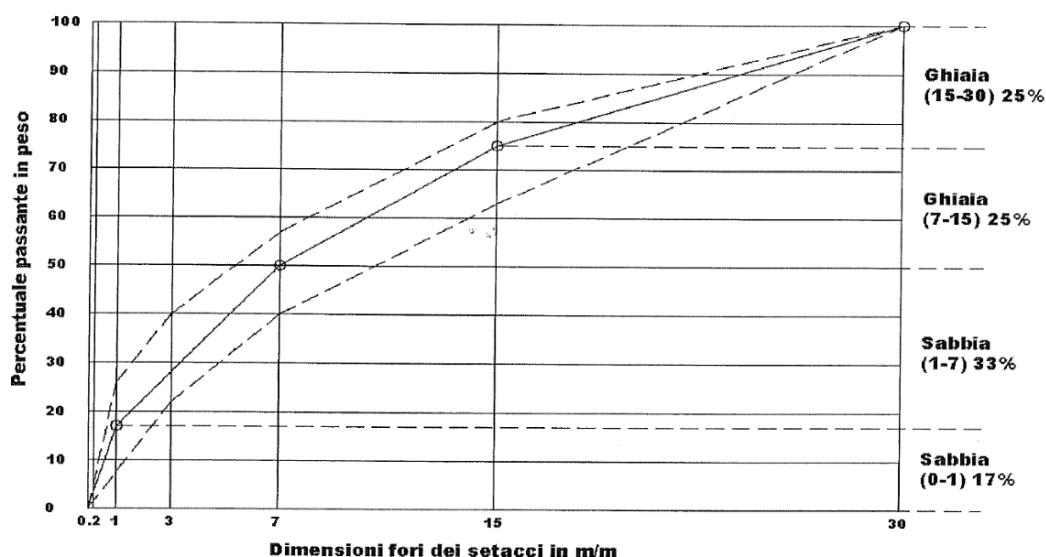
Possono essere distinti tra pesanti e leggeri. I primi, più comunemente usati, sono di solito ghiaie, pietrischi e sabbie. I secondi, che vengono usati per la preparazione dei calcestruzzi leggeri, hanno un piccolo peso specifico dovuto al materiale di cui sono fatti e alla loro tessitura cavernosa.

Le dimensioni determinano un'ulteriore classificazione, generalmente tra fini e grossi, ma queste classi possono a loro volta essere ulteriormente suddivise; secondo le norme italiane l'inerte fino ha dimensioni comprese tra 0 e 7mm, mentre quello grosso è maggiore di 7mm.

La massima dimensione dell'inerte grosso viene stabilita in funzione dell'uso che se ne deve fare. Per quanto riguarda le caratteristiche richieste dalla normativa, gli inerti si classificano in base alla loro resistenza meccanica e all'assenza di impurità, oltre che alla granulometria eterogenea.

Per controllare la composizione di un inerte nei confronti delle sue dimensioni vengono generalmente usate delle curve granulometriche di riferimento; dall'osservazione di alcune di queste, si potrebbe dire che nella miscela di un calcestruzzo gli inerti debbono avere proporzioni così definite: 50% sabbia, 50% ghiaia.

Bisogna però tener presente che quanto maggiori sono i requisiti richiesti tanto più accurato deve essere lo studio della sua composizione granulometria.



Curva granulometrica degli inerti del calcestruzzo

3. I CALCESTRUZZI LEGGERI

I calcestruzzi sono ottenuti mediante la mescola di un legante, solitamente cemento, di acqua, che ha lo scopo di attivare il processo di idratazione e quindi l'indurimento, e di aggregati di vario genere e pezzatura. I calcestruzzi cosiddetti leggeri si distinguono da quelli "tradizionali" per il fatto che sostituiscono in parte gli aggregati naturali, pietrisco e ghiaia, con aggregati leggeri, naturali o artificiali.

Come noto, la qualità e la quantità degli inerti utilizzati può influire notevolmente sulle caratteristiche del calcestruzzo prodotto, soprattutto in termini di:

- **Densità (D)**
- **Resistenza meccanica (E)**
- **Conducibilità termica (λ)**

Gli inerti si possono definire collaborativi quando le loro caratteristiche appena elencate sono simili a quelle della pasta cementizia utilizzata; se questi invece partecipano esclusivamente in termini di volume, cioè quando, E e A sono differenti rispetto a quelli della pasta, vengono detti "virtuali".

Gli aggregati che costituiscono i calcestruzzi leggeri sono appunto di tipo virtuale.

La classificazione dei calcestruzzi viene spesso fatta in base alla loro densità; si identificano quindi quattro categorie:

TIPI DI CLS	DENSITA' (D)		TIPI DI INERTI
CLS PESANTI	2400<(D)>3000	Kg/m ³	Ad alta densità
CLS ORDINARI	2000<(D)>2400	Kg/m ³	Tradizionali
CLS ALLEGGERITI	600<(D)>2000	Kg/m ³	Leggeri (argilla espansa)
CLS LEGGERI	100<(D)>600	Kg/m ³	Virtuali (polistirolo)

Classificazione dei calcestruzzi in base alla densità

Il calcestruzzo potrà comunque ritenersi leggero anche se la sua densità dovesse superare i 600 Kg/m³, sempre che l'inerte utilizzato possa considerarsi di tipo virtuale.

Si può a questo punto fare un'ulteriore suddivisione di quelli che sono i calcestruzzi leggeri:

- **CLS cellulari**
- **CLS polistirolici**
- **CLS Polycem**

I calcestruzzi cellulari vengono alleggeriti con l'introduzione nell'impasto di bolle d'aria, attraverso l'introduzione di aria compressa o di schiume dense durante la preparazione dell'impasto in betoniera.

I calcestruzzi polistirolici sostituiscono, come suggerisce il nome, il polistirolo agli inerti classici, così come si fa normalmente anche con materiali di altra natura come argilla espansa, pomice, vermiculite che danno invece origine ai cosiddetti CLS alleggeriti per via della loro massa più elevata.

Questo prodotto, fin dagli anni '60, ha dato diversi problemi ai costruttori per via dell'estrema leggerezza delle sfere di polistirolo che galleggiano sulla superficie della malta. Il problema fu risolto già negli anni '70, grazie al trattamento delle sfere con tensioattivi in modo da renderle meglio miscelabili.

I calcestruzzi Polycem consistono nella combinazione di quelli cellulari con quelli polistirolici in modo da unire la fluidità dei primi e la leggerezza dei secondi.

Ciascuno dei tre prodotti appena elencati offre caratteristiche differenti sul piano tecnologico, su quello prestazionale e su quello economico. I CLS cellulari garantiscono resistenza meccanica e conducibilità termica simili a quelle dei CLS polistirolici, ma, a differenza di questi ultimi che si preparano con una betoniera comune, necessitano di un macchinario apposito per la loro produzione.

I Polycem, offrono una conducibilità termica molto ridotta, ma garantiscono una più limitata resistenza a compressione rispetto ai cellulari e ai polistirolici presi separatamente ed inoltre, fino a qualche anno fa, necessitavano anch'essi di un macchinario apposito per la loro preparazione. Risulta quindi difficile stabilire quale tra questi sia il migliore compromesso, anche perché in questi ultimi anni gli additivi e le schiume utilizzate si sono evolute molto velocemente.

4. LA PREPARAZIONE DEI CALCESTRUZZI LEGGERI POLISTIROLICI

Di fondamentale importanza per ottenere le massime prestazioni dal prodotto è il corretto metodo di preparazione. Anche il corretto modo di gettare e l'attenta cura del materiale gettato concorrono alla miglior riuscita del manufatto desiderato.

4.1 ATTREZZATURE

Le attrezzature che servono al confezionamento ed al getto dei calcestruzzi polistirolici sono quelle normalmente usate nei cantieri tradizionali; in particolare, in caso di getti importanti, si può far uso di autobetoniere.

È agevole l'uso della benna con la gru a torre, mentre per il pompaggio si può impiegare qualsiasi tipo di pompa da calcestruzzo ed in particolare i tipi continui a schiacciamento; è infine possibile usare anche il nastro trasportatore se non si supera un'inclinazione del 60%.

4.2 MATERIALI

Il legante più indicato è il Portland di tipo pozzolanico; nel caso di preparazione di intonaci si usa aggiungere calce idraulica e adesiva. Questi leganti sono i più adatti per ridurre il pericolo di fessurazioni nel prodotto finito.

L'inerte utilizzato è ovviamente il polistirolo espanso e trattato; è commercializzato in sacchi da 5 Kg l'uno (170 l circa), abbastanza ingombranti ma già dosati granulometricamente.

La curva granulometria del polistirolo non è significativa per quanto riguarda la resistenza meccanica e il potere isolante, lo è invece per il controllo del volume dei vuoti tra una sfera e l'altra.

L'inerte reale da usare nei cls polistirolici è la sabbia. Il rapporto acqua cemento (A/C) è del tutto simile a quello dei cls tradizionali, cioè varia a seconda del tipo di uso che se ne deve fare. Si possono utilizzare praticamente tutti gli additivi impiegati nei cls classici: acceleranti, fluidificanti, anticongelanti, ecc.

Densità (Kg/m ³)	Polistirene Espanso (m ³)	Cemento (Kg)	Sabbia (Kg)	Acqua (Kg)
400	1	200	65	100
600	0,95	250	210	125
1000	0,8	400	375	190
1400	0,7	450	710	210

Dosaggi per calcestruzzo leggero

4.3 PREPARAZIONE

La preparazione dei calcestruzzi leggeri polistirolici è del tutto simile a quella del calcestruzzo tradizionale.

4.4 MATURAZIONE E CURA

La maturazione avviene quasi esclusivamente all'aria e naturalmente, fatta eccezione per i casi di prefabbricazione. Per la cura è consigliabile ricorrere alla copertura dei getti con fogli di materiale plastico e dove non è possibile, ad esempio per gli intonaci, è sufficiente mantenere umide le superfici.

5. CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEI CALCESTRUZZI LEGGERI POLISTIROLICI

Le differenze sostanziali tra i calcestruzzi tradizionali e quelli leggeri sono dovute fondamentalmente alla sostituzione degli inerti naturali con sfere di polistirene espanso, che ne muta le prestazioni e quindi gli impieghi.

Il polistirene è una delle principali materie plastiche, è un materiale rigido, incolore e trasparente; il polistirene espanso (EPS) è una delle forme più importanti in cui viene utilizzato il polistirene.

Questo, utilizzato come "inerte virtuale", dopo il processo di espansione, viene poi trattato con additivi, resine e cemento che gli impediscono di galleggiare nella pasta cementizia; le sfere sono ruvide e di colore grigiastro e hanno diametro variabile da 1 a 6 mm.

All'interno dell'impasto non partecipa al processo di idratazione dei cementi; può coesistere con inerti reali e sopporta processi di maturazione accelerata.

Scheda tecnica dei polistiroli per calcestruzzi leggeri

Nomenclatura	Polistirolo o polistirene espanso, abbreviato con EPS
Derivazione	Derivato dal petrolio, mediante un processo chimico è trasformato in piccolissime perle, nelle quali viene aggiunto pentano, che funge da gas espandente
Ottenimento	Con l'ausilio del vapore acqueo a temperatura attorno ai 90/100°C, il pentano si espande e la perla di EPS aumenta il suo volume iniziale di 20/50 volte
Trattamento	La sinterizzazione e il processo di saldatura delle perle avvengono unicamente mediante vapore acqueo, senza l'utilizzo di clorofluorocarburi, CFC né collanti. Per la produzione di cls leggeri si aggiungono additivi resine e cemento
Aspetto	Sfere grigio biancastre, con superficie ruvida e granulometria continua con diametro medio tra 1 e 6 mm
Densità	In mucchio: 25 Kg/m ³
Volume dei vuoti	98% aria, 2% idrocarburo Pentano
Disponibilità	Confezione in sacchi da 200 Lt (5 sacchi = 1 m ³)
Comportamento all'acqua	Permeabile al vapore, ma impermeabile all'acqua. Assorbe una minima parte dell'acqua d'impasto. Non solubile
Comportamento al fuoco	combustione senza esalazioni tossiche, si accende solo oltre i 450-500°C
Riciclabilità	Riciclabile al 100%; gli scarti di EPS sono particolarmente indicati per la realizzazione di cls leggeri se macinati e usati come inerte
Durata	Le analisi svolte sulle influenze che i fattori ambientali e le sollecitazioni di lavoro hanno sulle caratteristiche dell'EPS mostrano che può garantire per un periodo illimitato le prestazioni richieste

5.1 DENSITA'

Oggi i CLS polistirolici vengono prodotti con densità variabile da 200 a 1850 Kg/m³ e oltre, anche se quelli usati più comunemente variano dai 400 ai 1000 Kg/m³. Ad ogni modo, quelli con densità inferiore agli 800 Kg/m³ non si possono però considerare omogenei per via del casuale riempimento degli spazi lasciati vuoti da dalle sfere; questo dato influenzerà molto la resistenza meccanica del prodotto ottenuto.

La densità del calcestruzzo ottenuto con i comuni aggregati varia in genere da 2200 a 2600 Kg/m³; il peso delle opere in calcestruzzo è di conseguenza elevato e può rappresentare una parte importante del carico che insiste su una determinata struttura.

A volte risulta quindi vantaggioso realizzare CLS con densità inferiore, ad esempio in applicazioni non strutturali in cui la resistenza meccanica del conglomerato è irrilevante come nei sottofondi di pavimento; a volte invece si deve unire alla bassa densità una certa capacità meccanica. L'obiettivo è quindi quello di ottenere un aggregato che garantisca una certa capacità portante ed il minor peso possibile. I calcestruzzi leggeri consentono riduzione del peso da 600 fin oltre 2000 Kg in meno ogni metro cubo rispetto ai CLS tradizionali.

Alla diminuzione del peso, dovuta all'introduzione di sfere di polistirolo nel conglomerato, aumentano, anche le capacità di isolamento termico, ma diminuisce invece la resistenza meccanica. Per applicazioni strutturali la densità non può essere ridotta eccessivamente, viceversa i calcestruzzi di più bassa densità sono vantaggiosi quando si deve privilegiare leggerezza e isolamento termico.

L'American Concrete Institute fa una distinzione tra cls leggeri strutturali e non in base alla loro densità, che per i primi è compresa tra 1350 e 1850 Kg/m³ e che devono garantire inoltre una resistenza superiore a 17MPa; per i secondi è invece compresa tra 300 e 800 Kg/m³. Le densità indicate normalmente si riferiscono al campione asciutto poiché durante il processo di idratazione del calcestruzzo si può osservare una perdita di peso dell'ordine del 10%, superiore a quella dei cls ordinari.

5.2 CAPACITA' DI ISOLAMENTO TERMICO

Le eccezionali prestazioni garantite da questi tipi di calcestruzzo per quanto riguarda la conducibilità termica sono dovute alle ottime caratteristiche di isolante del polistirolo amalgamato nella mescola.

Queste caratteristiche derivano direttamente dal fatto che il polistirolo è costituito per il 96-99% di aria, chiusa in cellette di dimensioni tali da impedire i moti convettivi, cosicché la trasmissione del calore può avvenire soltanto per conduzione e per irraggiamento. Poiché l'aria interna è in equilibrio con quella esterna, la caratteristica di conduttività termica non varia nel tempo, come avviene con altri espansi che contengono nelle celle altri gas. Annegare il polistirolo nei massetti, nei pilastri o nelle pareti portanti, può permettere addirittura di eliminare lo strato aggiuntivo di isolante esterno, o comunque di ridurre lo spessore.

Tipo di calcestruzzo	Densità (D) Kg/m ³	Conducibilità termica (λ) W/mK
Tradizionale	2100-2800	0,9-1,5
Alleggerito con argilla espansa	600-1600	0.15-0,8
Leggero	300-1400	0,1-0,5
Polistirolo tradizionale	150-300	0,04-0,08
Polistirolo additivato (Polycem)	300-1300	0,08-0,4

Conducibilità termica relative ai diversi calcestruzzi e alle diverse densità

5.3 ASSORBIMENTO D'ACQUA

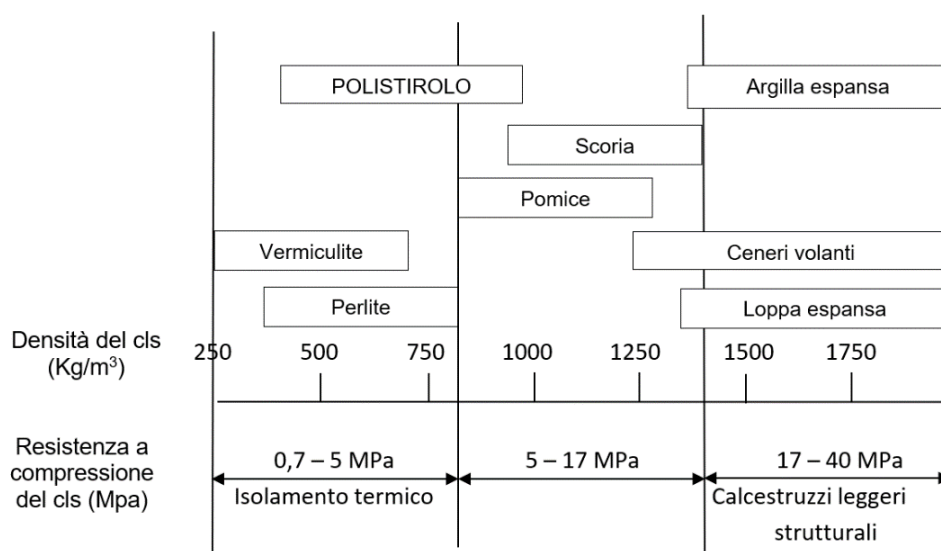
L'isolamento termico è negativamente influenzato dall'umidità; la maggior parte dei materiali da costruzione ha grande affinità con l'acqua che può penetrarvi alterandone le prestazioni in termini di durata e di isolamento, poiché ne aumenta la conduttività.

Il comportamento dell'EPS a fronte dell'acqua non dà adito a limitazioni per gli impieghi edilizi e per l'isolamento termico in particolare. L'acqua non scioglie l'EPS, né attraversa le pareti delle celle chiuse e non può quindi venire assorbita, garantendo un elevato grado di isolamento anche nelle condizioni più estreme. Nel caso specifico dei calcestruzzi alleggeriti con polistirolo, possiamo quindi dire che grazie alla permeabilità al vapore, piuttosto elevata rispetto agli altri CLS a bassa densità, l'impregnazione è ostacolata dalla idrorepellenza delle sfere di polistirolo e dalla forma labirintica della struttura della malta cementizia. Questo garantisce grande resistenza ai fenomeni di capillarità e, come detto, ridotta resistenza alla diffusione del vapore acqueo in surplus, che così non condensa anche con sbalzi di temperatura elevati.

Inoltre, grazie alla sua impermeabilità, durante le fasi di preparazione non è necessario considerare nell'acqua totale d'impasto anche quella che normalmente viene assorbita dagli altri aggregati leggeri; operazione di norma molto delicata in quanto un errore di valutazione potrebbe compromettere sia la resistenza meccanica che la lavorabilità del calcestruzzo.

5.4 RESISTENZA MECCANICA

L'impiego di aggregati leggeri naturali o artificiali consente di ottenere calcestruzzi leggeri di varia densità e di conseguenza di varia resistenza meccanica.



Compressione in funzione dell'aggregato utilizzato

Data la scarsa rispondenza dei CLS polistirolici alla legge di Hooke, non è possibile utilizzare i metodi di calcolo dei cementi amati tradizionali; questo determina una certa difficoltà nel fornire indicazioni utili al dimensionamento di questi prodotti. I dati di riferimento comunemente utilizzati sono ottenuti per via analitica poiché fino a qualche anno fa i dati sperimentali delle prove di laboratorio non erano disponibili in quantità sufficiente. Come si può notare, i dati relativi alla resistenza meccanica a trazione e a compressione sono normalmente più bassi rispetto a quelli dei CLS tradizionali per via dello scarso aiuto fornito al cemento dello scheletro in polistirolo. Qualche piccolo accorgimento, come rendere l'impasto con polistirolo il più omogeneo possibile o usare cementi più lenti per minimizzare le fessure per ritiro, può migliorare le cose anche se in maniera limitata. I risultati sperimentali hanno però confermato che il modulo di elasticità è inferiore a quello di un calcestruzzo ordinario per via della minor rigidità degli inerti rispetto a quelli correntemente utilizzati. Questo, da un lato riduce la rigidità dei manufatti realizzati in cls leggero, dall'altro determina una riduzione delle tensioni interne di origine termo-igrometrica riducendo quindi la tendenza alla fessurazione.

6. ALTRE CARATTERISTICHE

6.1 ISOLAMENTO ACUSTICO

La trasmissione di energia sonora attraverso un generico componente può avvenire secondo due distinte modalità: per via aerea e per percussione diretta del componente stesso. È questo il caso dei solai che entrano in vibrazione ad esempio per colpa dello scalpiccio e che, a causa della sua rigidità, è in grado di trasmettere il suono anche a grande distanza dalla sua fonte. Anche se per ridurre questo tipo di diffusione del suono, le soluzioni migliori sono quelle multistrato o a pavimento galleggiante, non si deve trascurare che, grazie alle elevate prestazioni fonoassorbenti dell'EPS, i calcestruzzi polistirolici sono in grado di ridurre la trasmissione se utilizzati per realizzare sottofondi leggeri o blocchi per murature. Oltre però ad essere superiore in prestazioni acustiche ai cls tradizionali, presentano un maggior potere fonoassorbente per i rumori di ambiente (echi e rimbombo) anche in confronto agli altri cls leggeri e alleggeriti.

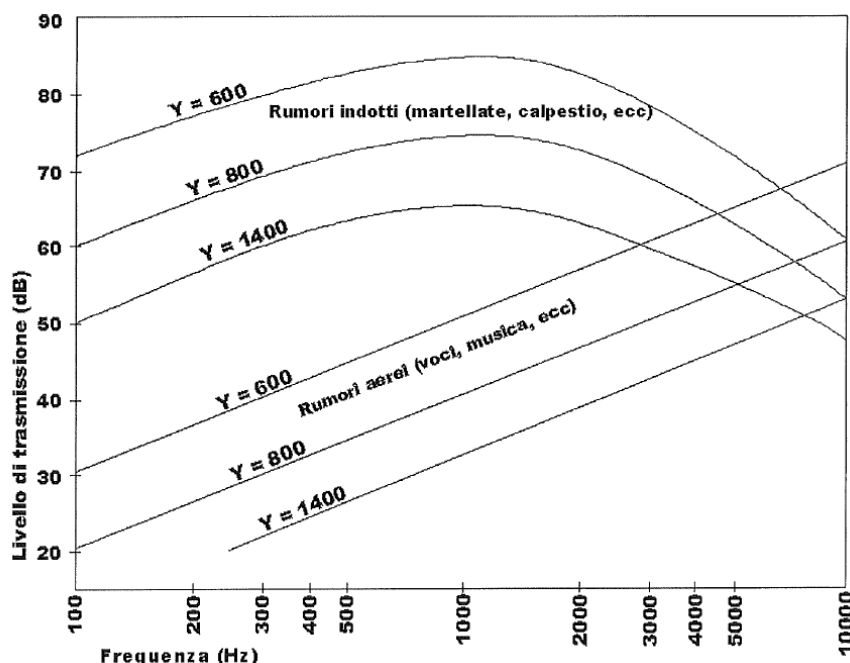


Grafico 3
Effetti dell'isolamento acustico
di CLS polistirolici
a seconda della densità

6.2 COMPORTAMENTO AL FUOCO

L'EPS è un materiale che partecipa alla combustione e i prodotti della sua combustione sono soltanto anidride carbonica e acqua; pertanto non risulta tossico.

Per l'accensione spontanea è necessaria una grossa quantità di energia (450 - 500° C), quindi scintille o piccole braci incandescenti non sono in grado di avviare la combustione. Sotto l'azione del calore le particelle espanse tendono a contrarsi e quindi ad allontanarsi dalla fonte di calore prima di incominciare a decomporsi.

Ad ogni modo non si può ritenere che il polistirolo a vista sia un materiale in grado di soddisfare le norme di prevenzione incendi. Questo però vale per lastre di polistirolo montate in modo che possano entrare in contatto diretto con fiamme o grosse fonti di calore.

Per quanto riguarda le particelle disperse all'interno di un complesso come nel caso dei calcestruzzi polistirolici, il comportamento è da ritenersi completamente diverso.

Infatti in questo caso l'EPS è sottratto ad un possibile contatto diretto con una eventuale causa di innesco, oltre che al contatto con aria necessaria per la sua combustione. In generale si può addirittura affermare che dalle prove di laboratorio risulta che questo tipo di cls leggero resiste al fuoco molto meglio di un cls tradizionale; basti pensare che dopo oltre 2,5 ore a 150° C la struttura rimane inalterata, fatta eccezione per i primi centimetri (non più di 2) in cui le particelle incominciano a rammollire ed a temperatura di circa 450°C si trasformano in co - CO₂ e vapore acqueo.

Nelle prove di contatto diretto con fiamma il CLS resiste per oltre 2 ore mantenendo anche in questo caso inalterata la struttura, fatta eccezione per il collasso delle particelle superficiali (non più di 3 cm).

7. CAMPI D'IMPIEGO

Oltre ai settori d'impiego tipici dei calcestruzzi ordinari, esiste un'estrema varietà di applicazioni propria dei calcestruzzi leggeri.

È inoltre facile assimilare certe attitudini dei CLS alleggeriti a quelle dei CLS leggeri, ma alcuni aspetti della tecnologia di questi ultimi risultano assolutamente unici.

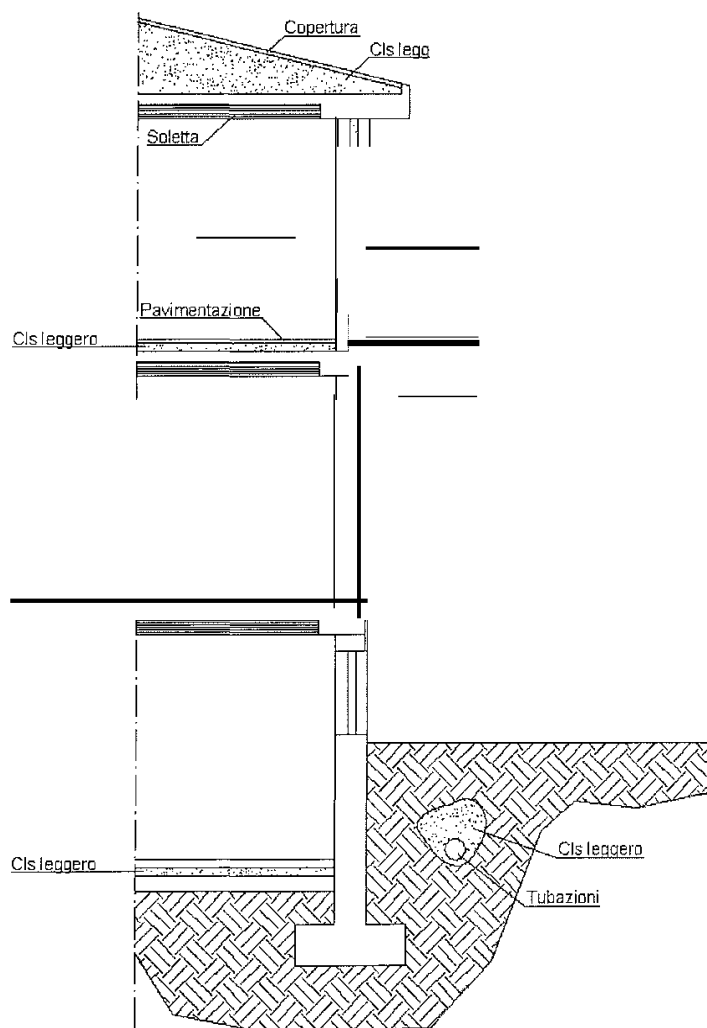
I getti diretti su liquidi liberi ed anche i getti subacquei; i grandi getti di bloccaggio e i grandi getti in zone dove gli inerti tradizionale e quelli alleggeriti sono difficili da reperire, sono solo alcuni esempi.

I CLS polistirolici sono generalmente poco fluidi, quindi si prestano bene a getti di alcuni metri di spessore con una discreta resistenza meccanica; se additivati, si può aumentarne la fluidità, per quegli impieghi che richiedono maggior lavorabilità, ma bisogna però tener conto della segregazione degli inerti.

Certo è che non si può far assomigliare a tutti i costi il calcestruzzo leggero a quello classico aumentandone densità e dosaggio.

È necessario capirne la natura e sfruttarne le caratteristiche all'interno del loro ambito specifico, mantenendo resistenze del tutto simili a quelle delle murature tradizionali.

Nell'edilizia residenziale come in quella industriale i calcestruzzi leggeri sono solitamente indicati per realizzare pendenze e sottofondi leggeri o isolamenti termici.



Possibili impieghi dei CLS leggeri nell'edilizia residenziale tradizionale

Anche se questi sono gli usi più frequenti, esistono numerosissimi altri campi d'impiego:

- Riempimento di cavità più o meno profonde (quando serve colmare grosse con un materiale resistente, stabile nel tempo e che non assesti)
- Ripristini o risanamenti in costruzioni antiche (per ridistribuire i carichi di una pavimentazione su una struttura o volta in mattoni)
- Fondazioni
- Bloccaggio e isolamento di condutture interrate (per posare tubi di varia natura sul fondo di scavi irregolari, evitare i problemi di riassetamento del rinterro o isolare tubi sotterranei in temperatura senza ulteriori coibentazioni)
- Bloccaggio di vasche interrate (offre una buona protezione alle eventuali pareti metalliche e costituisce una valida barriera dalle correnti vaganti)
- Strutture con bassa resistenza meccanica

- Fondazioni in zone paludose (grazie alla capacità di galleggiare sui liquidi e indurire su qualsiasi tipo di terreno)
- Blocchi per murature e solai (forati e non forati)
- Elementi prefabbricati (pannelli di tamponamento e solai misti in metallo e cls leggero)
- Applicazioni speciali e grandi getti (per riempire cavità tra le murature dei tunnel e la roccia riducendo al minimo il peso).

Oltre ai già elencati aspetti possono essere anche considerate le seguenti applicazioni:

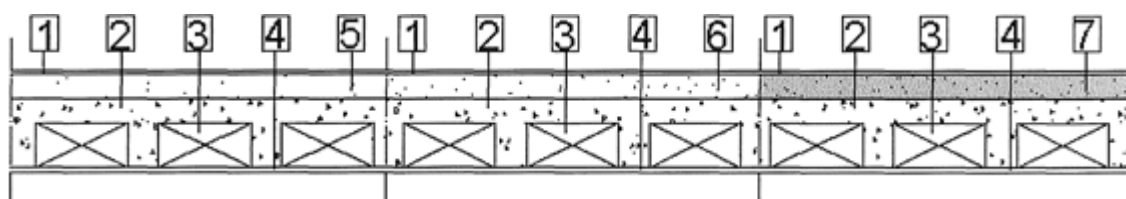
- Formazione di pendenze
- Sottofondi molto leggeri
- Riempimento di sottotetti

8. ALCUNI CONFRONTI

Il confronto tra le prestazioni dei CLS leggeri, alleggeriti e tradizionali utilizzati nelle applicazioni appena elencate, non è sempre facile. Il più delle volte deve essere compiuto caso per caso a seconda delle contingenze, soprattutto quando si parla di costi.

Diverso è quando si parla di caratteristiche quali il peso o la trasmissione termica.

SOLAIO IN LATEROCEMENTO



		Spessore	Peso al m ² (Kg)	Conducibilità (W/mK)
1	Manto impermeabile	0,011	10	0,16
2	CLS strutturale	0,085	200	1,25
3	Blocchi in laterizio	0,14	120	0,3
4	Intonaco civile	0,02	40	0,8
5	Massello in malta ordinaria	0,08	180	1,15
6	Massello in CLS alleggerito con argilla espansa	0,08	114	0,3
7	Massello in CLS leggero	0,08	24	0,084

PESO TOTALE PER m²:Manufatto tradizionale: **550 Kg**Manufatto con CLS alleggerito con argilla espansa: **484 Kg**Manufatto con CLS leggero: **394 Kg****COEFFICIENTI DI TRASMISSIONE TERMICA:**Manufatto tradizionale: **1,12 W/m²hK**Manufatto con cls alleggerito con argilla espansa: **0,90 W/m²hK**Manufatto con cls leggero: **0,56 W/m²hK**

Come si può osservare dai valori sopra riportati, la riduzione del peso è di circa il 30% rispetto a quello di un manufatto tradizionale, non vi è nemmeno una riduzione della resistenza a compressione poiché il CLS leggero è stato sostituito ad una parte non portante della struttura.

Risulta inoltre evidente il vantaggio in termini di resistenza al passaggio del calore; si può infatti notare come il coefficiente di trasmissione termica sia inferiore del 50% rispetto a quello di una struttura di tipo tradizionale.

COEFFICIENTI DI TRASMISSIONE TERMICA:Manufatto tradizionale: **1,13 W/m²hK**Manufatto con cls alleggerito con argilla espansa: **0,86 W/m²hK**Manufatto con cls leggero: **0,37 W/m²hK**

Anche in questo caso il manufatto eseguito con cls leggero garantisce un isolamento termico tre volte superiore (quasi 70%) a quello di una normale intercapedine utilizzata nelle murature tradizionali e due volte superiore a quella del manufatto eseguito con cls alleggerito.

COEFFICIENTI DI TRASMISSIONE TERMICA:Manufatto tradizionale: **0,77 W/m²hK**Manufatto con cls alleggerito con argilla espansa: **2,43 W/m²hK**Manufatto con cls leggero: **1,25 W/m²hK**

In questo caso il peso del manufatto in cls leggero è di poco superiore a quello isolato con la lana di roccia; non bisogna però sottovalutare l'aumento della resistenza meccanica garantito dal rivestimento in cls, l'elevata impermeabilità che, al contrario della lana di roccia, richiede una semplice guaina impermeabile, la più lunga durata nel tempo.

Anche il coefficiente di trasmissione termica è più elevato del manufatto eseguito con lana di roccia, che comunque rimane uno dei materiali maggiormente isolanti, ma risulta essere la metà del più simile manufatto eseguito con cls alleggerito con argilla espansa.

9. IL RICICLO

Il riciclo del polistirolo è una pratica diffusa, normalmente attuata, entro i limiti di convenienza economica per gli scarti di produzione industriale. Gli scarti pre-consumo provengono dall'attività di prima trasformazione e dalle lavorazioni secondarie effettuati dagli stessi produttori e dai tagliatori; il 90 % degli scarti post-consumo deriva invece dagli imballaggi.

Il punto critico per il riciclo dell'EPS è la sua leggerezza, sia come materiale che come manufatto; la densità apparente del materiale a fine vita oscilla tra 5 e 15 Kg/m³.

Ciò è vero però solo nel caso in cui il materiale sia perfettamente impaccato, come accade per gli imballi standard; nel caso di imballi misti buttati alla rinfusa, la densità apparente può scendere anche alla metà del valore prima indicato. Esiste una notevole produzione di scarti di EPS a livello commerciale ed industriale, settori più facili del domestico che richiederebbe un sistema di raccolta sul territorio di tipo estensivo e visto che le aziende devono comunque sostenere delle spese di smaltimento di tali manufatti. Inoltre negli scarti domestici è difficile separare quelli sporchi per evitare la commistione con materiali diversi, cosa invece molto più semplice per quanta riguarda gli scarti industriali in cui l'inquinamento è costituito essenzialmente da parti in ferro e legno facilmente separabili prima della macinazione.

Le possibilità di riutilizzo dell'EPS sono sostanzialmente:

- 1. Utilizzo come "carica" nella produzione di nuovi articoli in EPS**
- 2. Trasformazione in granulato di polistirolo compatto**
- 3. Utilizzo come inerte leggero in calcestruzzi e malte**
- 4. Combustione con produzione di calore**

Le prime due sono ovviamente le più esigenti in termini di grado di purezza del materiale; potrebbero quindi riutilizzare gli scarti post consumo puliti, ben separati, staccati e raccolti presso fonti selezionate.

La combustione con recupero di calore non è considerata riciclaggio dalla normativa vigente, anche se nell'impossibilità di farne altro uso risulta conveniente per la sua capacità calorifica e per le ridotte emissioni inquinanti; la destinazione di parte della raccolta a fini energetici potrebbe consentire lo smaltimento e la valorizzazione delle frazioni più inquinate.

L'utilizzo come inerte leggero rappresenta una nicchia di mercato dedicata ad applicazioni specifiche. Non bisogna infatti dimenticare l'enorme quantità di EPS "sporco" che risulta difficile da riutilizzare in altri processi di riciclo; ed esempio, nell'edilizia, pannelli isolanti fissati alle pareti tramite collanti o annegati nella malta dei rivestimenti o dei sottofondi che non possono più essere da essi separati, possono invece essere macinati in maniera più meno fine e fornire ottimo materiale di alleggerimento, sia nei calcestruzzi che negli elementi prefabbricati leggeri.

AIPE con la collaborazione di aziende associate ha creato una rete che provvede alla raccolta e al riciclo di imballi e scarti di polistirolo espanso.

I soci AIPE offrono alle amministrazioni che ne facciano richiesta il seguente servizio:

- **Fornitura sacchi di polietilene per la raccolta del polistirolo espanso**
- **Ritiro di sacchi pieni, secondo tempi convenuti al raggiungimento del volume stabilito**
- **In alternativa, disponibilità a ricevere gratuitamente presso la propria sede i sacchi pieni, senza vincolo di quantità.**

10. VALORI SPERIMENTALI

Alcune aziende produttrici di cementi, di EPS e di additivi hanno sottoposto a prove sperimentali in differenti laboratori di prova i prodotti ottenuti preparando mescole con differenti densità.

L'EPS viene impiegato per preparare malte alleggerite o "calcestruzzi polistirolici" o "CLS leggeri".

A) EPS

L'EPS a tal fine si presenta con le seguenti caratteristiche:

Ottenimento	Per espansione del polistirolo espandibile
Trattamento	Additivi, resine e cemento che promuovono la miscibilità con la malta cementizia
Aspetto	Sferoidi grigi, con superficie ruvida, a granulometria continua con diametro medio $\varnothing$ variabile da 1 a 6 mm
Densità (Kg/m³)	In mucchio: ~ 25 Apparente: ~ 40
Volume di vuoti (l/m³ oppure dm³/m³)	In mucchio: ~ 400
Comportamento con acqua	Non solubile Non igroscopico: assorbe in minima parte l'acqua di impasto durante la mescola e consente l'impiego del normale rapporto A/C = 0,5÷0,55
Durata	In sacchi, si conserva indefinitamente

Il polistirolo trattato si comporta da inerte virtuale, appare come un inerte reale ai fini della mescola, del getto e della costipazione in cassaforma. Non interviene nel processo di idratazione dei cementi. Può coesistere con inerti reali e sopporta procedimenti di maturazione accelerata mediante additivi o trattamenti fisici.

B) DENSITA' E MESCOLA

Possono essere preparate mescole con densità da 300 a 1000 Kg/m³ (e anche superiori).

I **componenti della mescola** sono i seguenti: **cemento – sabbia – acqua – EPS – additivo**.

La preparazione di **1 m³ di mescola tipo con densità di circa 400 Kg/m³** contiene i seguenti componenti:

CEMENTO	300 -350 Kg
ACQUA	necessaria al rapporto A/C = 0,4 ÷ 0,5
SABBIA	100 Kg
EPS	800 litri
ADDITIVI	0,5 litri

Per densità diverse la composizione della mescola può essere approssimativamente come indicato nella tabella sottostante:

Densità (kg/m ³)	H ₂ O (litri)	Additivo (litri)	Sabbia (Kg)	Cemento (Kg)	Polistirolo (litri)
400	150	0.3-0.7	100	330	840
500	155	0.5	110	330	800
600	160	0.5	210	320	740
700	165	0.5	320	320	700
800	170	0.5	410	310	640
900	175	0.5	520	310	600
1000	180	0.5	610	310	530

TABELLA DOSAGGI COMPONENTI DELLA MESCOLA

C) CARATTERISTICHE MECCANICHE

Le caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi polistirolici sono determinate da fattori diversi quali tipo di cemento, quantità di acqua, maturazione, modalità di preparazione, tipo di additivo. Le differenti caratteristiche fra i due prodotti più utilizzati ed alternativi tra loro sono le seguenti:

Differenze all'impiego fra CLS polistirolici e CLS cellulari

Polistirolico	Cellulare
A 28 giorni la resistenza meccanica è superiore all'80% di quella finale. Lo scarto tra i risultati medi di cantiere, per la resistenza meccanica, è di circa il 15 ÷ 20%. I getti possono eseguirsi su grandi profondità. Il getto è poco fluido e sopporta la pendenza.	A 28 giorni la resistenza meccanica è inferiore al 50% di quella finale. Lo scarto tra i risultati medi di laboratorio e quelli medi di cantiere, per la resistenza meccanica, può giungere al 25%. I getti vanno eseguiti per strati sottili. Il getto è fluido e non sopporta la pendenza.

La resistenza a compressione dei calcestruzzi polistirolici in funzione della densità e della maturazione confezionati con cemento e rapporto acqua/cemento di 0,50:

γ [kg/m ³]		S/C (rapporto in peso)	σ_c [kg/cm ²] all'età di:			
Asciutto	Al getto		7 giorni	1 mese	6 mesi	1 anno
350	380	1/1	5	8	9	10
	375	2/1	4	6	7	8
400	430	1/1	7	10	12	13
	425	2/1	5	7	9	10
500	540	1/1	12	17	21	23
	535	2/1	10	14	16	18
600	650	1/1	18	25	31	33
	645	2/1	14	20	24	26
700	750	1/1	27	37	45	49
	745	2/1	21	29	35	38
800	855	1/1	35	49	60	64
	845	2/1	28	38	47	50
1000	1060	1/1	62	88	104	111
	1045	2/1	47	67	80	85
1200	1260	1/1	87	123	147	156
	1245	2/1	68	96	114	121
1400	1460	2/1	93	132	157	166
	1445	3/1	77	110	130	139

Resistenza a compressione di CLS polistirolici con A/C = 0.5 a seconda del tipo di cemento usato e dell'età, assumendo $crc = 1$ per il polistirolico confezionato con Portland 425 all'età di 28 dì ($crc_{425, 28}$).

Tipo di cemento	crc / $crc_{425, 28}$ alle età di			
	7 giorni	28 giorni	6 mesi	1 anno
Portland 325	0.49	0.76	0.95	1.03
Portland 425	0.75	1.00	1.18	1.20
Portland 525	0.94	1.25	1.48	1.5

La resistenza meccanica a trazione, crt , dei cls polistirolici è un poco migliore della sua equivalente nei cls cellulari.

$$\sigma_t = 0,50 \cdot 3 \sqrt{\sigma_c^2}$$

Ove:

crt = resistenza a trazione del cls polistirolico, in Mpa

crc = resistenza a compressione, in Mpa

Modulo di elasticità

In prima approssimazione vale, anche per i polistirolici, la formula di Schaffler modificata

$$EI = 8000 \sqrt{\gamma^3 \sigma_t}$$

Ove:

$E1$ = modulo di elasticità per i cls leggeri;

γ = massa volumica del cls leggero asciutto;

$crc1$ = resistenza a compressione del cls leggero

D) CARATTERISTICHE TERMICHE

Il parametro ricercato sperimentalmente è la conducibilità termica λ (W/mK) in funzione della densità della miscela. Viene proposta una serie di dati derivati da mescole effettuate con additivi differenti in quanto i dati riscontrati evidenziano una rilevante variabilità. Tutte le prove sono state effettuate a temperatura media di 20 °C con dimensioni dei campioni di 500 x 500 mm.

Densità (Kg/m³)	Spessore provino (mm)	A (W/mK)
412	60	0.104
400	70	0.107
500	70	0.125
500	56	0.130
181	60	0.060
345	60	0.095
200	60	0.060
250	60	0.088
300	60	0.096
350	60	0.102
400	60	0.109
500	60	0.106
400	70	0.110
500	70	0.125

400	Non conosciuto	0
500	Non conosciuto	0
600	Non conosciuto	0
700	Non conosciuto	0
800	Non conosciuto	0
900	Non conosciuto	0
1000	Non conosciuto	0

La capacità termica del calcestruzzo polistirolico è la seguente:

Densità (Kg/m³)	Capacità termica (Kcal/m³)
300	70
1330	260

E) PERMEABILITA' AL VAPORE

La permeabilità al vapore viene espressa comunemente attraverso il coefficiente μ adimensionale in funzione della densità:

Densità (Kg/m³)	μ
358	13.0
383	14.4
432	14.6

F) DILATAZIONE TERMICA LINEARE

È disponibile un dato di riferimento sperimentale nel range di temperatura da -20 a +70°C in funzione della densità:

Densità (Kg/m ³)	Coefficiente α (1/K)
200	20×10^{-6}

e della temperatura:

Temperatura	0 ÷ 25°C	25 ÷ 45°C	45 ÷ 80°C	100°C
Coeff. Dilataz. termica	$9 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$0,80 \cdot 10^{-6}$

G) ISOLAMENTO ACUSTICO

Prove effettuate su solette con metodo ISO 140-8 e ISO 717-2.

La prova sperimentale ed i dati relativi sono riferiti alle seguenti condizioni:

- Dimensioni soletta 3.35 x 2.95 m
- Pavimento con piastrelle di spessore 1 cm
- Calcestruzzo Polistirolico di densità 350 Kg/m³ e di spessore 9 cm
- Soletta di supporto in C.A. di spessore 14 cm

L'indice di attenzione al rumore da calpestio risulta di:

$\Delta L_w = 16.4$ dB

H) COMPORTAMENTO AL FUOCO

Il materiale confezionato con densità media di 400 Kg/m³ presenta le seguenti caratteristiche:

- Punto di infiammabilità $T > 300^\circ\text{C}$
- Classe di reazione al fuoco: classe B

11. CHI È AIPE

AIPE - Associazione Italiana Polistirene Espanso senza fini di lucro è stata costituita nel 1984 per promuovere e tutelare l'immagine del polistirene espanso sinterizzato (o EPS) di qualità e per svilupparne l'impiego. Le aziende associate appartengono sia al settore della produzione delle lastre per isolamento termico che a quello della produzione di manufatti destinati all'edilizia ed all'imballaggio.

Fanno parte di AIPE le aziende produttrici della materia prima, il polistirene espandibile, fra le quali figurano le più importanti industrie chimiche europee. Un gruppo di Soci è costituito dalle aziende fabbricanti attrezzature per la lavorazione del polistirene espanso sinterizzato e per la produzione di sistemi per l'edilizia.

A livello internazionale l'Associazione rappresenta l'Italia in seno a EUMEPS, l'organizzazione europea che raggruppa le associazioni nazionali dei produttori di EPS. L'Associazione inoltre opera a stretto contatto con Enti e Istituzioni finalizzando la propria attività alla redazione di norme e protocolli nei settori edilizia, imballaggio ed economia circolare.

Collabora attivamente alla promozione della raccolta e riciclo dell'EPS in sinergia con COREPLA e con CORTEXA in qualità di partner tecnico per veicolare, diffondere e condividere la cultura dell'isolamento a cappotto di qualità.

Sostiene e promuove la ricerca di nuovi progetti di riciclo a livello nazionale ed europeo e partecipa ad ICESP, la piattaforma italiana dei principali attori dell'economia circolare ed è coinvolta in circuiti virtuosi di alcune tipologie di manufatti, tra cui le cassette per il pesce e gli imballaggi in EPS.

BIBLIOGRAFIA

- AA.W., *"Calcestruzzo leggero strutturale"*, Levi AITEC (1974)
- V. Alunno Rossetti, *"Il calcestruzzo: materiali e tecnologia"*, McGraw Hill libri Italia, Milano (1995)
- A. Bertola, *"I calcestruzzi leggeri"*, Hoepli, Milano (1983)
- L. Bertolini, P. Pedferri, *"Scienza e tecnologia dei materiali, leganti e calcestruzzo"*, Città Studi Edizioni, MI
- A. Castagnetti, *"I calcestruzzi leggeri"*, ITEC, Milano (1974)
- M. Collepari, *"scienza e tecnologia del cls"*, Hoepli, Milano (1991)
- M. Gonzaga, G. Usai, *"Manuale pratico del calcestruzzo: guida pratica per progettisti"*, U. Morelli FI (1984)
- U. Menicali, *"I materiali dell'edilizia storica"* La nuova Italia Scientifica Roma (1992)
- A. Neville, *"Le proprietà del cls"*, Sansoni, Firenze (1980)
- V. Pacetti, *"Il calcestruzzo nell'edilizia moderna: tecnologie e applicazioni"*, Dedalo libri, Bari 1966
- Calcestruzzi leggeri confezionati con polistirene espanso: caratteristiche e destinazioni d'uso*
- Borghi Corrado, *INGENIO* articolo