



**AIPE**

Associazione Italiana Polistirolo Espanso

**PROTEGGERE E ISOLARE LE  
FONDAZIONI**

SAIE 2004 - *BOLOGNA*

*GIOVEDÌ 14 OTTOBRE 2004*

*Marco Piana*

# **INDICE**

**1. PERCHE' PROTEGGERE E ISOLARE**

**2. L'UTILIZZO DELL'EPS**

**3. L'ISOLAMENTO TERMICO**

**4. L'ISOLAMENTO DALLE VIBRAZIONI**

**5. NORMATIVA**

**6. UN ESEMPIO REALE**

# 1. PERCHE' PROTEGGERE E ISOLARE

Le opere di fondazione svolgono un ruolo sempre più importante per la gestione del cantiere e per la funzionalità dell'opera. Proporre un materiale che permetta di risolvere e superare gli aspetti più problematici e specifici legati all'interazione col terreno, con il clima, con le vibrazioni esterne concorre alla gestione corretta dell'edificio progettato e realizzato per soddisfare ai nuovi requisiti ed alle nuove direttive. Il microclima all'interno dell'edificio è funzione da cause provenienti dall'esterno e le vibrazioni rivestono certamente un aspetto molto singolare.

Alcune fonti di rumore e di vibrazioni possono essere eliminate, altre possono essere ridotte ma nella maggioranza dei casi è necessario intervenire direttamente sull'edificio interessato. Il processo edilizio, presentando inerzie rilevanti a nuove procedure costruttive, propone soluzioni ormai superate che non risolvono e non migliorano la situazione. Innovare utilizzando l'EPS (Polistirene Espanso Sinterizzato) può creare le basi per un'evoluzione di notevole interesse con il coinvolgimento di aspetti termici, acustici e vibrazionali.

La fondazione rappresenta la parte dell'edificio non in vista. Viene generalmente rappresentata con quote negative ed è ricondotta ad un'ipotetica linea di riferimento di quota zero.

Ma soprattutto identifica quella parte di opera sopra cui l'edificio viene ancorato.

Non è necessario sottolineare l'importanza che riveste nel processo di progettazione e di edificazione ma certamente la fondazione è da sempre considerata in secondo ordine rispetto all'opera vera e propria.

Da questa considerazione e dalle constatazioni effettuate in numerosi cantieri sono scaturite nuove proposte per la loro realizzazione per le prestazioni fornite.

Le modalità operative di esecuzione ed i risultati derivanti hanno evidenziato la possibilità di utilizzo, con un livello di efficacia molto elevato, il materiale definito con la sigla EPS ovvero il polistirene espanso sinterizzato.

I principali motivi di questa scelta possono essere ricondotti in modo sintetico e conciso nelle seguenti esigenze:

- 1) L'EPS può essere conformato nella forma desiderata in modo da realizzare casseri a perdere in calcestruzzo.
- 2) Quantità di calcestruzzo per il getto come da stime preventive esistendo un cassero di contenimento.
- 3) Le fondazioni vengono ad essere protette dall'acqua e dall'umidità presente nel terreno.
- 4) Il getto avviene in un contenitore con elevato isolamento termico e quindi può essere effettuato anche con temperature dell'aria e del terreno molto basse o molto elevate.
- 5) La fondazione risulta rivestita con materiale isolante con limitazione dei disperdimenti di energia, da parte dell'intero edificio con eliminazione di ponti termici e di condense superficiali ed interne.
- 6) Lo strato di EPS interposto fra la fondazione ed il terreno crea un giunto elastico che impedisce alle onde vibrazionali di penetrare all'interno della struttura e quindi di trasmettersi ai piani superiori.

Le premesse indicano come il materiale proposto debba possedere caratteristiche prestazionali tali da soddisfare alle molteplici esigenze sopra elencate. In alcuni paesi europei come la Germania e la Norvegia realizzano da molto tempo le opere di fondazione con l'ausilio dell'EPS come materiale per sottofondazione. Anche negli Stati Uniti questa tecnica è stata adottata con una ulteriore motivazione riguardante la facilità di realizzazione e riduzione complessiva dei tempi di esecuzione. Prima di esplicitare come l'EPS sia in grado di soddisfare a quanto richiesto, è necessario sottolineare brevemente da dove proviene e come si ottiene.

## 2. L'UTILIZZO DELL'EPS

Il polistirene (PS) è una delle principali materie plastiche che derivano dal petrolio (fig. 1). Allo stato compatto il Polistirene è un materiale rigido, incolore, trasparente, che è la base per applicazioni molto diversificate.

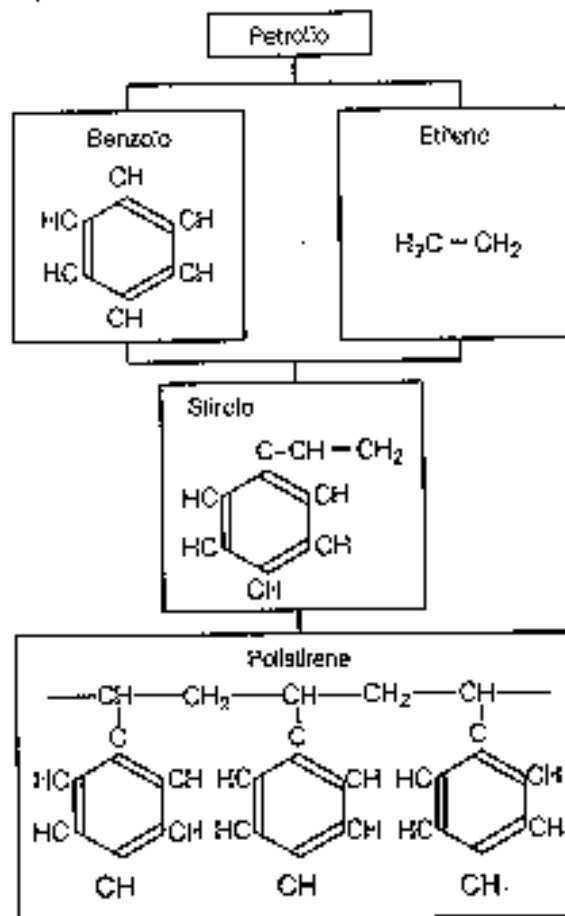


Fig. 1

## Il Polistirene espanso (EPS)

Il Polistirene espanso (EPS) è una delle forme più importanti in cui viene impiegato il Polistirene. In fase di polimerizzazione (cioè l'ultimo passaggio di fig. 1), si scioglie nel polistirene un agente espandente (comunemente pentano, un idrocarburo che, a pressione atmosferica, bolle a temperatura ambiente); altri additivi, in particolare per conferire migliorate caratteristiche di resistenza al fuoco, possono essere aggiunti in questa fase. Il prodotto, quale l'industria chimica lo fornisce ai produttori di EPS, si presenta in forma di granuli di aspetto vetroso (perle), di varia granulometria (0,3-2,8 mm.) secondo gli impieghi cui è destinato. La massa volumica delle perle è di 1030 Kg/m<sup>3</sup>, ma quella apparente delle perle in mucchio è di circa 650 Kg/m<sup>3</sup>. È questo il materiale da cui si parte per produrre l'EPS con il processo più avanti descritto.

## Il processo di produzione dell'EPS (polistirene espanso sinterizzato)

La produzione dei semilavorati e manufatti di EPS avviene con tre modalità (fig. 2) che si espongono nei tratti essenziali per la caratterizzazione merceologica; l'ottenimento di un prodotto di qualità presuppone peraltro un know-how non semplice.

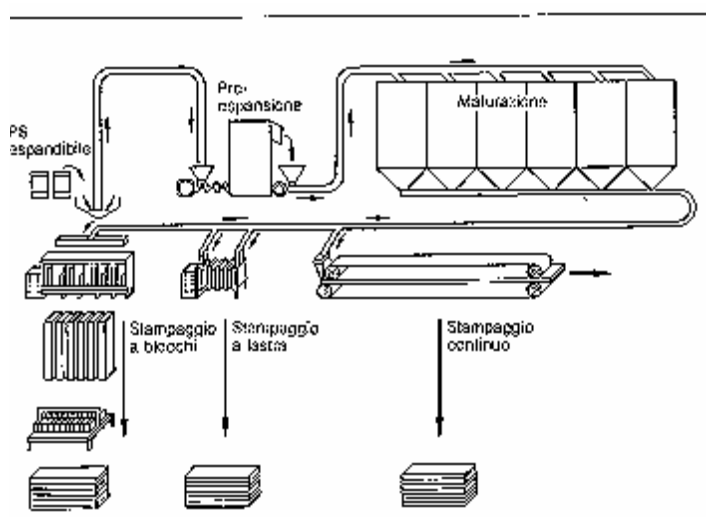


Fig. 2

## **Pre-espansione**

Le perle di PS espandibile vengono pre-espanso, generalmente per mezzo di vapore a temperatura a 90°C, nel cosiddetto pre-espansore. In questo le perle, a seguito della vaporizzazione dell'agente espandente, si rigonfiano fino a 20-50 volte il loro volume iniziale. In questo processo si forma, all'interno delle perle, una struttura a celle chiuse, fondamentale per il successivo impiego come isolamento termico. Il grado di espansione, che dipende essenzialmente dalla durata del trattamento termico nel pre-espansore, determina la massa volumica apparente dei manufatti di EPS e quindi tutte le loro caratteristiche fisiche.

## **Maturazione**

Le perle pre-espanso devono stazionare un certo tempo in sili arieggiati. Con il raffreddamento i residui di espandente e di vapore acqueo condensano nelle singole celle. La depressione che così si forma viene annullata dall'aria che si diffonde all'interno delle celle; in questo modo le perle pre-espanso raggiungono la stabilità necessaria per le fasi successive.

## **Stampaggio**

Le perle pre-espanso e stabilizzate possono ora essere trasformate in manufatti o semilavorati di EPS in vari modi:

### 1) Stampaggio di blocchi e taglio a lastre:

Le blocchiere, costituite da forme parallelepipedo provviste di fori di entrata per il vapore su tutti i lati, vengono riempite di perle pre-espanso e sottoposte di nuovo all'azione del vapore saturo; si raggiungono ora temperature di 110-120 °C, le perle si rigonfiano ulteriormente e, diventate appiccicose, si saldano fra di loro ("sinterizzano") per effetto della loro pressione interna, fino a formare un blocco omogeneo di espanso. Dopo un breve periodo di raffreddamento, i blocchi vengono sformati e messi in deposito per un periodo variabile da alcuni giorni a due mesi, durante il quale raggiungono la stabilità necessaria per le diverse applicazioni. Di qui vengono prelevati per il taglio in lastre, che avviene con seghe a nastro o a filo caldo e per eventuali altre operazioni meccaniche, come sagomature dei bordi, ottenute per fresatura.

## 2) Stampaggio di lastre e altri manufatti:

Il processo è lo stesso descritto per i blocchi, ma le lastre vengono stampate singolarmente in apposite macchine automatiche. Si ha il vantaggio di ottenere direttamente la forma desiderata, senza ulteriori lavorazioni meccaniche; ciò è particolarmente utile per le forme non piane (p. es. sottotegole, lastre con contorni sagomati, cassonetti, lastre con superficie decorata a rilievo, coppelle).

## 3) Stampaggio continuo:

In un processo (v fig. 2) la sinterizzazione in forma di lastra piana continua viene fatta avvenire fra due nastri mobili di acciaio; all'uscita le lastre vengono rifilate e tagliate alla lunghezza voluta. In altri processi continui le perle pre-espansive vengono fatte avanzare a passi attraverso una forma, mentre avviene la sinterizzazione; si ottengono così profilati vari, p. es. cassetture isolanti.

## 4) Lastre per isolamento acustico:

Per questo impiego i blocchi o le singole lastre vengono compressi fino ad  $\frac{1}{3}$  dello spessore originario e lasciati espandere di nuovo, ottenendo una caratteristica elastica più favorevole (minor rigidità dinamica) per l'impiego nei solai galleggianti per l'isolamento dai rumori da calpestio.

## 5) Lastre per drenaggio:

sono costituite da perle espansive del diametro di 7-10 mm. , unite fra loro soltanto nei punti di contatto mediante una saldatura di estensione più limitata o con speciali collanti; le lastre hanno così una elevata porosità, che permette la permeabilità all'acqua voluta per questa applicazione.



## Caratteristiche dell'EPS

### Aspetto e struttura

Le lastre e gli altri manufatti di EPS sono oggetti leggeri, la cui massa volumica è compresa generalmente fra 10 e 40 kg/m<sup>3</sup>, quindi essi presentano una grande capacità di galleggiamento (se ne sono avute clamorose applicazioni in recuperi navali), che non viene perduta nemmeno dopo prolungata immersione totale in acqua; ciò dimostra che le celle di cui l'EPS è formato, sono essenzialmente chiuse e impermeabili. Il colore dell'EPS è bianco, la struttura è rigida, ma tenace, quindi senza la tendenza di altri espansi rigidi a sbriciolarsi.

Non ha odore né altre emanazioni, né dà alcun problema al contatto con la pelle.

Ad un esame microscopico (fig. 3a) si rivela la struttura a celle poliedriche delle singole perle espanse, più compressa sulla periferia, dove esse si saldano fra di loro.

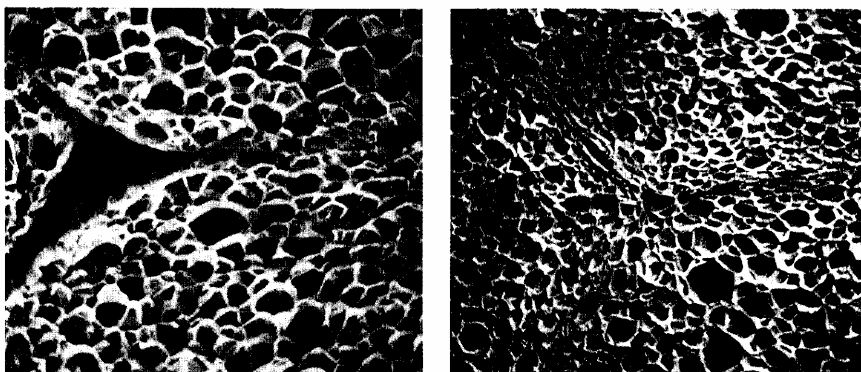


Fig. 3a  
Fig. 3b

Per confronto la fig. 3b, mostra, allo stesso ingrandimento, la struttura di un EPS di qualità scadente: la pre-espansione eccessiva ha portato alla formazione di celle troppo grandi e senza più sufficiente capacità di saldatura all'atto dello stampaggio; i vuoti residui fra le perle riducono evidentemente la resistenza meccanica e possono al limite annullare l'impermeabilità all'acqua (come si fa volutamente nelle lastre per drenaggio). Le cause della cattiva sinterizzazione, che compromettono un po' tutte le caratteristiche del prodotto, possono essere molteplici.

## Caratteristiche meccaniche

Le caratteristiche meccaniche possono essere sintetizzate dalla resistenza alla compressione sotto carichi di breve durata e di lunga durata. Inoltre sono interessanti al fine della progettazione anche i dati relativi alla resistenza alla trazione, alla flessione ed al taglio. Vi sono numerose normative che possono essere seguite per ricercare i dati sopra ricordati. La prima relazione che va utilizzata fra la sollecitazione e la deformazione che risulta lineare fino al 3% di deformazione. Oltre a tale limite il materiale presenta una deformazione permanente progressiva della struttura cellulare senza però mai arrivare ad una vera e propria rottura. Una convenzione europea assume come riferimento una deformazione pari al 10% dello spessore come limite oltre al quale è bene non andare e come valore di utilizzo a lunga durata è bene non superare i valori attorno al 3%. Le caratteristiche di base possono essere così riassunte:

### Caratteristiche meccaniche dell'EPS in N/mm<sup>2</sup>

Massa volumica in Kg/m <sup>3</sup>	15	20	25	30	35
Sollecitazione di compressione al 10°/a di deforazione	0,07-0,12	0,12-0,16	0,16-0,20	0,18-0,26	0,23-0,27
Resistenza a trazione	0,15-0,23	0,25-0,32	0,32-0,41	0,37-0,52	0,42-0,58
Resistenza a flessione	0,16-0,21	0,25-0,30	0,32-0,40	0,42-0,50	0,50-0,60
Resistenza al taglio	0,09-0,12	0,12-0,15	0,15-0,19	0,19-0,22	0,22- 0,26
Modulo elastico a compressione	3,80-4,20	4,40-5,40	5,90-7,20	7,40-9,00	9,00-10,80

$$1 \text{ N/mm}^2 = 10 \text{ Kg/ cm}^2$$

$$1 \text{ Kg/cm}^2 = 0,1 \text{ N/mm}^2$$



Un altro dato di interesse è il valore della compressione in funzione di diversi limiti della deformazione:

### Compressione

	Unità misura Kg/m <sup>3</sup>	12 Kg/m <sup>3</sup>	16 Kg/m <sup>3</sup>	20 Kg/m <sup>3</sup>	25 Kg/m <sup>3</sup>	30
Deformazione 1% 0,09	N/mm <sup>2</sup>	0,02	0,035	0,05	0,07	
Deformazione 5% 0,18	N/mm <sup>2</sup>	0,04	0,07	0,10	0,14	

Questi valori devono essere verificati con carichi di lunga durata in quanto i materiali plastici presentano tutti un fenomeno definito di "CREEP" ovvero di modificazione della prestazione se la sollecitazione rimane permanente con determinati valori (normalmente elevati).

È quindi evidente che una sollecitazione di lunga durata deve essere tale da non superare un livello di deformazione del  $2 \pm 3\%$  e quindi i valori ritenuti di riferimento sono:

### Sollecitazione permanente a compressione per deformazione < 2%

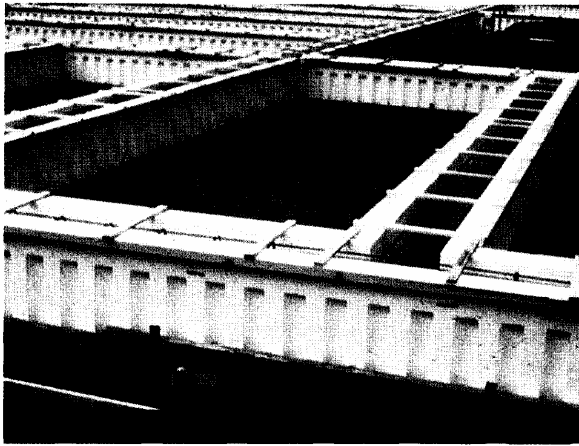
Massa volumica	Sollecitazione	
	N/mm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Kg /m <sup>3</sup>		
15	0,012-0,025	0,12-0,25
20	0,020-0,035	0,020-0,035
25	0,028-0,050	0,28-0,50
30	0,036-0,062	0,36-0,62
35	0,044-0,074	0,44-0,74

### Resistenza al calore e basse temperature

Le temperature massime sopportabili dell'EPS dipendono, come per tutti i termoplastici, dalla durata e dall'intensità della sollecitazione. Senza sollecitazione e per breve tempo l'EPS sopporta temperature di 95°-100°C (p. es. all'atto dell'applicazione di un bitume caldo). Sotto un carico permanente di 20 KN/m<sup>2</sup> la temperatura limite scende a 80-85 °C (75-80 °C per l'EPS 15).

### Prove di stabilità dimensionale dell'EPS secondo ISO 4998

Classe	Impiego	Massa volumica Kg/m <sup>3</sup>	Durata della prova	Temper. di prova °C	Sollecit. di compr. KV/m <sup>2</sup>
I	Non portante	15	48 ore	70	—
II	Carichi limitati	20	48 ore	80	20
III	Carichi maggiori	30	7 giorni	70	40



## Permeabilità al vapore

Il rapporto fra la permeabilità  $\delta_A$  dell'aria in quiete e quella  $\delta$  del materiale è poi il coefficiente  $\mu$  (adimensionale) di resistenza alla diffusione del vapore, che è il dato più frequentemente usato nei calcoli termoigrometrici.

$$\mu = \frac{\delta_A}{\delta}$$

Il quadro dei valori  $\delta$  e  $\mu$  per i vari tipi di EPS unificati è il seguente:

Tipo	Permeabilità (ng/m.s. Pa)	Resistenza alla diffusione $\mu$ (adimensionale)
I	9-5	20-40
II	6-4	30-50
III	5-3	40-70
IV A	4-2	50-100
IV B	3-1,5	60-120

I materiali in genere, e gli altri isolanti in modo particolare, reagiscono in modo differente al passaggio del vapore. Vengono utilizzate normalmente due grandezze per esprimere la caratteristica di trasmissione del vapore:

- 1) Permeabilità al vapore
- 2) Fattore di resistenza alla diffusione del vapore:  $\mu$

La permeabilità è un valore effettivo, quindi il numero che identifica la permeabilità è espresso in Kg/s m Pa ed è la reale quantità di vapore che transita attraverso il materiale (ovvero la quantità di vapore Kg che transita in un secondo attraverso un metro di spessore con la differenza di pressione di un Pascal).

Il fattore di resistenza invece è un valore adimensionale quindi il numero che lo identifica qualche cosa di relativo. Infatti viene riferito all'aria che ovviamente avrà valore unitario.

È possibile passare da una grandezza all'altra mediante semplici relazioni che tengono presente la permeabilità dell'aria. I valori numerici riportati sono stati derivati dalla norma UNI 10351.

(Materiali da costruzione, conduttività termica e permeabilità al vapore).

$\delta$  = permeabilità al vapore [Kg/s m Pa]

$\mu$  = fattore di resistenza alla diffusione del vapore

$$\mu = \frac{\delta_{aria}}{\delta_{materiale}} \quad \text{riferito ad un materiale}$$

$$\mu = 1 \quad \text{riferito all'aria}$$

$$\delta_{aria} = 193 \times 10^{-12} \text{ kg/S m Pa}$$

$\mu S$  = quantità che pone in relazione lo spessore del materiale rispetto a quello dell'aria

Esempi:

1. EPS      20 Kg/m<sup>3</sup>       $\mu = 40$

$S = 0,05$  m spessore

$\mu \times S = 40 \times 0,05 = 2,0$  m

significa che 0,05 m (= 5 cm) di EPS corrispondono a 2,0 m di aria.

2. EPS      20 Kg/m<sup>3</sup>       $\mu = 40$

il valore di permeabilità sarà:

$$\delta = \frac{\delta_{aria}}{\mu} = \frac{193 \times 10^{-12}}{40} = 4,8 \times 10^{-12} \text{ Kg/s m Pa}$$
$$= 4,8 \times 10^{-9} \text{ g/s m Pa}$$

3. EPS      20 Kg/mc  $\delta = 4,8 \times 10^{-12}$  Kg/s m Pa

il valore del fattore di resistenza sarà:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_{materiale}} = \frac{193 \times 10^{-12}}{4,8 \times 10^{-12}} = 40$$

Per completezza è bene riportare altre grandezze che si incontrano nelle verifiche delle condense superficiali e/o interstiziali.

$$\text{Permeanza al vapore } M = \frac{\delta}{\text{spessore}} \text{ [Kg/S m}^2 \text{ Pa]}$$

$$\text{Resistenza al vapore } R = \frac{1}{M}$$

## **Comportamento biologico**

L'EPS non costituisce nutrimento per alcun essere vivente, microrganismi compresi, quindi non marcisce o ammuffisce. Al più, se molto sporco, in certe condizioni, microrganismi si possono insediare nella sporcizia e l'EPS agisce semplicemente da supporto e non prende parte ai processi biologici. Anche i batteri del suolo non attaccano l'EPS.

L'EPS, come altri materiali di scarsa durezza, può essere roso da piccoli animali insetti, che ne sfruttano la buona coibenza termica per farvi il nido. Ciò può accadere in particolare in applicazioni agricole (stalle, sili). Si può ovviare con opportune disinfestazioni (tenendo presente la sensibilità dell'EPS ai solventi) o meglio impedendo l'accesso ai roditori con reti inossidabili e agli insetti con intonaci di rivestimento.

Per la sua stabilità chimica e biologica l'EPS non costituisce un pericolo per l'igiene ambientale e per le falde acquifere. Non vi sono controindicazioni al deposito nelle discariche e alla combustione nei forni di incenerimento.



L'EPS in opera nella coibentazione edilizia non presenta alcun fattore di pericolo per la salute; si tenga presente in proposito che il Polistirene compatto e l'EPS come materiale da imballaggio sono ammessi dalla legislazione come materiali che possono venire a contatto con le sostanze alimentari.

Anche il maneggio e le eventuali lavorazioni meccaniche connesse con la messa in opera dell'EPS sono assolutamente innocui e in particolare non vi è pericolo di inalazione di particelle o di manifestazioni allergiche.

Anche le tracce di espandente e di stirolo monomero non polimerizzano che possono essere presenti nell'EPS di recente produzione si disperdono rapidamente e, anche in locali chiusi, non sono più rilevabili a distanza di qualche mese dalla produzione, che è un tempo che comunque decorre fra la produzione dell'EPS e l'occupazione di un edificio.

### **Comportamento all'invecchiamento**

Per invecchiamento di un materiale si intende la variazione (generale in peggio) delle sue caratteristiche nel corso del tempo, dovuta a cause interne (tensioni, transizioni strutturali, ecc.) o esterne, sia legate alle sollecitazioni imposte, sia alle condizioni ambientali di impiego. L'analisi qui svolta delle influenze che i fattori ambientali, come temperatura e umidità, e le sollecitazioni di lavoro hanno sulle caratteristiche dell'EPS mostra che esso può garantire per un periodo illimitato le prestazioni che gli vengono richieste.

Ciò è dimostrato da 30 anni di esperienza applicativa su scala vastissima e in particolare da numerose verifiche delle caratteristiche, effettuate su EPS in opera da decenni. Sono quindi da confutare recisamente le voci di scarsa stabilità nel tempo, che si sono spinte fino ad affermare l'esistenza di una "sublimazione", affermazione fisicamente senza senso.

L'origine di queste voci, quando non è da attribuire a concorrenza scorretta, va fatta risalire a pratiche imprenditoriali scorrette, che hanno ritenuto di poter approfittare della difficoltà di verificare l'effettiva applicazione del materiale nelle intercapedini: in effetti tali voci non si riferiscono mai a situazioni più controllabili, anche se oggettivamente più difficili, come l'isolamento esterno sotto intonaco. Naturalmente la migliore assicurazione del permanere nel tempo delle prestazioni dell'EPS è data dall'impiego di materiale a norma.

Un fattore ambientale non trattato precedentemente, perché non corrisponde mai ad effettive condizioni di impiego, è l'effetto della radiazione solare ultravioletta.

Questa radiazione, cui l'EPS può trovarsi esposto nel deposito in cantiere e durante la messa in opera, provoca un ingiallimento e infragilimento superficiale, che in molti casi non dà luogo ad alcuna riduzione delle prestazioni, mentre in altri, come nel rivestimento con intonaco, può compromettere l'aderenza della finitura.

Una corretta pratica di cantiere evita facilmente questo inconveniente.

### 3. L'ISOLAMENTO TERMICO

L'isolamento termico presentato dal materiale EPS posto esternamente alle opere di fondazione rappresenta un effetto molto importante e certamente elemento discriminante nella fase di progettazione dell'intera opera. Isolare le fondazioni, secondo stime effettuate da organismi ufficiali americani in merito al risparmio energetico, permette di recuperare sino al 20% sulle spese di gestione del riscaldamento dell'edificio soprattutto se questo è di tipo isolato (es. abitazione indipendente). L'argomento è diventato di interesse allargato ed è stato approfondito sino a redigere una bozza di norma europea che permette di calcolare i disperdimenti di calore attraverso il terreno. In questa sede non è certo possibile riportare tutto quanto previsto dalla regolamentazione ma solo una sintesi ragionata. Un dato interessante è relativo al materiale che normalmente va a contatto con la fondazione: il terreno. Le caratteristiche termiche sono riportate nella tabella seguente:

categoria	Tipo terreno	Conducibilità termica $\lambda$ (w/mK)	Capacità termica (J/m <sup>3</sup> K)
1	Argilla	1,5	3,0 x 10 <sup>6</sup>
2	Sabbia	2,0	2,0 x 10 <sup>6</sup>
3	Roccia	3,5	2,0 x 10 <sup>6</sup>

Il dato, che emerge in modo evidente, permette di definire che un edificio su argilla disperde molto meno rispetto ad un analogo su roccia. La presenza di acqua nel terreno complica in modo notevole i calcoli, facendo introdurre un coefficiente Gw che mediante una complessa procedura permette di tenere conto di questo aspetto. In ogni caso il valore di w varia in media 1,1 ÷ 1,3. Il parametro che tiene conto dei disperdimenti termici verso il terreno è definito con "coefficiente di accoppiamento fondazione - terreno a regime costante" = L s (W/K). Vengono considerate le tipologie di fondazione più usuale con o senza ventilazione. Ogni situazione viene identificata mediante relazioni di calcolo per valorizzare il coefficiente L s. L'edificio nel suo complesso è sottoposto ad una norma che ne permette di definire il disperdimento energetico totale mediante la relazione:

$$H_{tot} = H_D + H_G + H_U$$

$H_{tot}$  = disperdimento termico totale (W/K)

$H_D$  = coefficiente di trasmissione termica diretto verso l'esterno (W/K)

$H_G$  = (Ls) coefficiente di trasmissione termica verso il terreno (W/K)

$H_U$  = coefficiente di trasmissione termica attraverso spazi non riscaldati (W/K)

## Conduttività termica

La caratteristica più importante dell'EPS è la sua bassa conduttività termica, che lo rende uno dei materiali più usati per l'isolamento termico nell'edilizia e nella tecnica frigorifera. Questa caratteristica deriva direttamente dal fatto che l'EPS è costituito per il 96-99% di aria, chiusa in cellette di dimensioni tali da impedirne i moti convettivi, cosicché la trasmissione del calore può avvenire soltanto per conduzione (che è molto bassa nell'aria) e per irraggiamento (che si riduce rapidamente al moltiplicarsi degli schermi costituiti dalle pareti delle celle). 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. La conduttività termica dell' EPS dipende invece da altri fattori, che è bene conoscere per una corretta interpretazione e impiego dei dati di misura.

## Massa volumica

La conduttività aumenta in modo significativo al diminuire della massa volumica al di sotto di 30 Kg/m<sup>3</sup>, l'aumentata dimensione delle celle e quindi il minor numero di schermi che il flusso termico deve attraversare fanno aumentare la trasparenza nell'infrarosso e quindi la quantità di calore che passa per irraggiamento. Oltre i 50 kg/m<sup>3</sup> la conduttività aumenta lentamente per il maggior contributo della conduzione nella parte solida del materiale.

La fig. 4 dà un valore medio indicativo di  $\lambda$  a temperatura ambiente, in un ampio campo di masse volumiche. Il valore minimo di  $\lambda$  si trova fra 30 e 50 kg/m<sup>3</sup>, cioè al limite superiore della massa volumica dei prodotti commerciali; il limite inferiore di questa non dovrebbe scendere sotto i 15 kg/m<sup>3</sup> per non penalizzare troppo questa caratteristica.

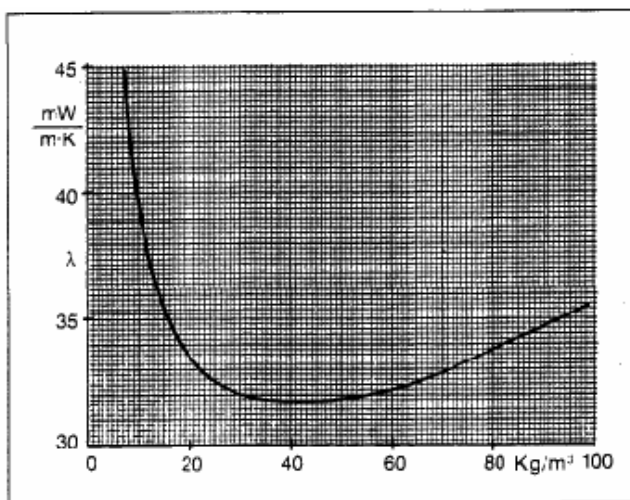


fig. 4

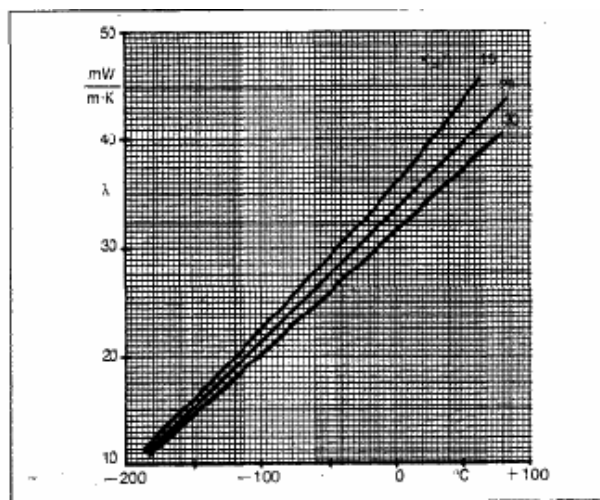


fig. 5

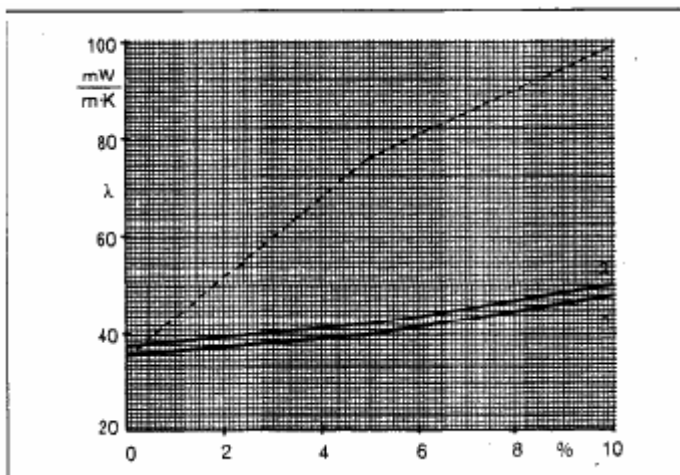


fig. 6

### Temperatura

La conduttività aumenta con la temperatura, seguendo l'andamento della conduttività dell'aria contenuta; l'andamento è regolare e praticamente lineare per l'EPS di più di 15 kg/m<sup>3</sup>, come mostra la fig. 5. Non si evidenziano le singolarità a bassa temperatura mostrate da altri espansi, dovute al cambiamento di fase del gas contenuto nelle celle. Si evidenzia invece il bassissimo fig. 6 valore di  $\lambda$  alle temperature più basse, che permette interessanti applicazioni.

### Umidità

L'influenza del contenuto di umidità sulla conduttività dell'EPS è trascurabile nel campo delle umidità pratiche delle applicazioni edilizie corrette (<0,15% in volume), per effetto del basso assorbimento d'acqua e della resistenza alla diffusione del vapore.

La fig. 6 mostra questo andamento, confrontato con quello di solo un materiale a bassa resistenza alla diffusione del vapore, a temperatura ambiente.

1.: EPS 16 Kg/m<sup>3</sup>

2: EPS 30 Kg/ m<sup>3</sup>

3: Pannello fibre minerali

## Spessore

A causa del diverso contributo che, al variare della massa volumica e dello spessore, danno al trasporto di calore la conduzione (lineare) e l'irraggiamento (non lineare), la conduttività termica, misurata con i metodi citati, su lastre dello stesso materiale, ma di diverso spessore, dà risultati diversi. L'effetto è sensibile per l'EPS da 15 kg/m<sup>3</sup> e ancora rilevabile sull'EPS da 20 kg/m<sup>3</sup>, mentre per masse volumiche superiori non è più avvertibile. L'effetto è poi importante sugli spessori più bassi, ma la misura è praticamente costante sopra i 100 mm. La fig. 7, ricavata da misure di Cammerer, riporta la variazione percentuale di  $\lambda$  rispetto al valore a 30 mm (di solito impiegato nelle misure di laboratorio) e rispetto a 100 mm.

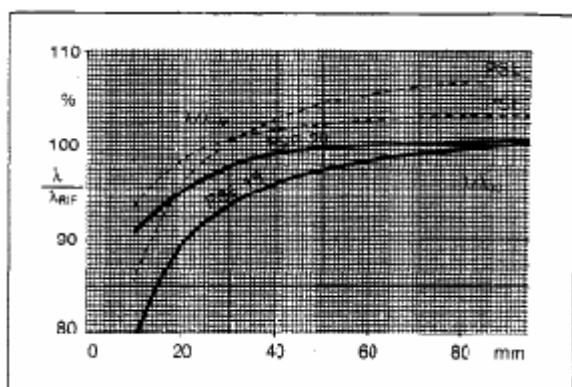


fig. 7

## Conduttività termica

La norma prescrive i valori della conduttività dell'EPS, misurata su campioni di 30 mm di spessore, opportunamente condizionati, alla temperatura media di 10 °C. La tabella qui sotto riporta questi valori.

### Conduttività termica dell'EPS sinterizzato (m W/m . K)

Massa volumica (kg/m <sup>3</sup> )	15	20	25	30	35
UNI 7819 a 10°C	39	36	35	34	34
UNI 7819 a 23°C	41	37	36	35	35
UNI 7357					
$\lambda$ m per EPS	41	37	36	36	
$\lambda$ per EPS	45	41	40	40	

## **Conduttività termica di riferimento**

La norma per il calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento degli edifici definisce le condizioni cui si devono riferire i valori di misura  $\lambda_m$  della conduttività termica dei materiali usati nelle costruzioni, così da avere una corretta base per il loro confronto.

Le condizioni stabilite sono:

- temperatura media 10°C
- - spessore 50 mm
- - valore non superato dal 90% della produzione.

## **Conduttività termica utile al calcolo**

La normativa prescrive che nei calcoli si debbano impiegare non i valori di riferimento  $\lambda_m$  sopra definiti, bensì dei valori maggiorati  $\lambda$ , detti valori utili di calcolo, per tenere conto dell'umidità di equilibrio in opera, dell'invecchiamento, delle tolleranze di spessore e della qualità della posa in opera. Per l'EPS sinterizzato la maggiorazione prevista è del 10 %.

L'aspetto più interessante legato alla protezione delle opere sotto il piano del terreno è riferito alla verifica legata all'isolamento termico delle strutture con il possibile fenomeno della condensa. Quest'ultima è conosciuta come l'effetto più deleterio per le opere in cemento armato. Vengono proposte alcune considerazioni e verifiche di semplice attuazione per permettere il confronto diretto di pareti isolate e non isolate.

## PROTEZIONE E CONDENZA SUPERFICIALE

$$U_{\max} = \frac{t_i - t_s}{t_i - t_e} \alpha_i \quad \text{Trasmittanza termica massima}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

$t_i$  = temperatura interna

$t_e$  = temperatura esterna

$t_s$  = temperatura superficiale di sicurezza pari a temperatura di rugiada + 1°C

$\alpha_i$  = coefficiente liminare interno = 8,14 W/m<sup>2</sup>K

$\alpha_e$  = coefficiente liminare esterno = 23,26 W/m<sup>2</sup>K

$s$  = spessore parete m

$\lambda$  = conduttività termica W/mK

### Locale riscaldato

Aria interna:

$t_i = 20 \text{ °C}$

UR = 70 %

$T_s = 14,4 + 1 = 15,4 \text{ °C}$



Temperatura di rugiada

### Locale non riscaldato

Aria interna:

$$t_i = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{UR} = 70 \%$$

$$T_s = 9,5 + 1 = 10,5 \text{ }^\circ\text{C}$$



Temperatura di rugiada

### Muro contro terra

1.  $T_e = 0 \text{ }^\circ\text{C}$   $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$U_{\max} = \frac{20 - 15,4}{20 - 0} \times 8,14 = 1,87 \text{ W/m}^2\text{K}$$

2.  $T_e = -5 \text{ }^\circ\text{C}$   $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$U_{\max} = \frac{20 - 15,4}{20 - (-5)} \times 8,14 = 1,50 \text{ W/m}^2\text{K}$$

3.  $T_e = 0 \text{ }^\circ\text{C}$   $T_i = 15 \text{ }^\circ\text{C}$

$$U_{\max} = \frac{15 - 10,5}{15 - 0} \times 8,14 = 2,44 \text{ W/m}^2\text{K}$$

4.  $T_e = -5 \text{ }^\circ\text{C}$   $T_i = 15 \text{ }^\circ\text{C}$

$$U_{\max} = \frac{15 - 10,5}{15 - (-5)} \times 8,14 = 1,83 \text{ W/m}^2\text{K}$$



### Per evitare condensa superficiale interna

$$\left. \begin{array}{l} \text{Valore minimo} \quad U = 1,50 \text{ w/m}^2\text{K} \\ \text{Valore massimo} \quad U = 2,44 \text{ w/m}^2\text{K} \end{array} \right\}$$

Parete

$$20 \text{ cm di CLS} \quad \lambda = 1,67 \text{ W/mK}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{0,2}{1,67} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{0,16 + 0,12} = 3,57 \text{ W/m}^2\text{K}$$

+ intonaco interno

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{0,2}{1,67} + \frac{0,015}{0,7} + \frac{1}{\alpha_e}} = 3,32 \text{ w/m}^2\text{K}$$

+ 2 cm EPS

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{0,2}{1,67} + \frac{0,015}{0,7} + \frac{0,02}{0,040} + \frac{1}{\alpha_e}} = 1,24 \text{ w/m}^2\text{K}$$

### CLS

Massa volumica

$$\gamma = 2400 \text{ Kg/m}^3 \quad \lambda = 1,67 \text{ W/mK}$$

1) Coefficiente di maggiorazione per pareti interne  $m = 15\%$  ovvero con assorbimento di acqua dal 2 – 5%

$$\lambda_{\text{utile}} = 1,67 + 15\% = 1,92 \text{ W/mK}$$

2) Coefficiente di maggiorazione per pareti esterne non protette con assorbimento  $>5\%$   
 $m=25\%$

$$\lambda_{\text{utile}} = 1,67 + 25\% = 2,09 \text{ W/mK}$$

Calcolo con  $\lambda$  utile

- 20 cm di CLS

$$U = \frac{1}{0,16 + \frac{0,2}{2,09}} = \frac{1}{0,16 + 0,096} = 3,91 \text{ w/m}^2\text{K}$$

- + intonaco interno

$$U = \frac{1}{0,16 + 0,096 + \frac{0,015}{0,7}} = 3,60 \text{ w/m}^2\text{K}$$

- + 2 cm EPS

$$U = \frac{1}{0,16 + 0,096 + 0,0214 + \frac{0,02}{0,040}} = 1,29 \text{ w/m}^2\text{K}$$

Come esempio, alla problematica sopra riportata, vengono ricordati due approcci:

1. norma italiana UNI 7357 in cui si riportano i metodi per calcolare le trasmittanze termiche degli elementi strutturali contro il terreno
2. norma svizzera SIA 180 in cui vengono riportati i valori limite di trasmittanza termica degli elementi costruttivi compresi quelli a contatto con il suolo

### 1) UNI 7357

Trasmittanza fittizia in pareti contigue al terreno

Muri addossati al terreno

Le dispersioni di calore verso l'esterno restano proporzionali alla differenze  $t_i - t_e$  e per quanto concerne la trasmittanza unitaria si fa uso di una trasmittanza fittizia.

$$K1 = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{h}{\lambda'}}$$

Dove:

K è la trasmittanza unitaria normale del muro;

h è la profondità, in metri, della parte interrata;

$\lambda'$  è la conduttività del terreno umido pari a  $\approx 2,5 \text{ Kcal}/(\text{h.m.}^\circ\text{C})$

## Pavimenti posati sul terreno

### Dispersioni verso l'ambiente esterno

Le dispersioni di calore dei pavimenti verso l'ambiente esterno restano proporzionali alla differenza  $t_i - t_e$ , ma la superficie interessata è una striscia di pavimento adiacente ai muri esterni (se il pavimento è alla quota del terreno circostante) o ai muri interrati (se trattasi del pavimento di un locale parzialmente o totalmente interrato). Detta P la lunghezza in metri dei predetti muri, misurata all'interno del locale, si calcolano le dispersioni basilari  $Q_0$  mediante l'espressione

$$Q_0 = P(2-h) K_1(t_i - t_e)$$

Dove

H è la profondità del pavimento rispetto al terreno circostante;

$k_1$  è la trasmittanza fittizia

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{2}{\lambda'}}$$

Essendo: K la trasmittanza unitaria normale del pavimento;

$\lambda'$  la conduttività del terreno umido

### Dispersioni verso il sottosuolo

Le dispersioni di calore del pavimento verso il sottosuolo sono proporzionali alla differenza tra la temperatura del locale  $t_i$  e la temperatura dell'acqua delle falde superficiali (10÷15 °C) e la superficie interessata è in questo caso l'intera superficie del pavimento quale che sia la quota di esso rispetto al terreno circostante.

Detta K la trasmittanza unitaria normale del pavimento si fa uso di una trasmittanza fittizia

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{1}{C}}$$

Dove C è la conduttanza del terreno.

In condizioni di regime stazionario un valore accettabile per C varia da 1 a 2; poiché peraltro le dispersioni non variano proporzionalmente a  $(t_i - t_e)$  come per le altre pareti occorre riscaldare i locali sotterranei con un circuito separato ove si voglia mantenere una  $t_i$  determinata.

## 2) SIA 180

### Coefficiente U per singoli elementi di costruzione

Nella tabella 1 vengono elencati i coefficienti U massimi che non devono essere superati nei locali riscaldati (temperatura ambientale dell'aria sopra 10°C).

In condizioni normali essi soddisfano pertanto le esigenze in quanto a benessere ed assenza di acqua di condensazione alle superfici.

L'assenza di acqua di condensazione ai ponti termici o in condizioni climatiche particolari dev'essere dimostrata a parte .

Tabella 1 Coefficienti U massimi per singoli elementi di costruzione.

Per motivi energetici (SIA 180/1, SIA 380/1) o esigenze particolari relative al clima esterno o interno possono essere necessari dei coefficienti U più bassi.

	Dalla parte calda	Clima interno	Clima interno	Clima interno
Clima	Dalla parte fredda	Clima esterno e nel terreno < 2 m *** W/m <sup>2</sup> K	Locali non riscaldati W/m <sup>2</sup> K	Nel terreno > 2 m *** W/m <sup>2</sup> K
Tetti (in pendenza/piani)		0,5*	0,5	0,6
Parete		0,6*	0,8	0,8
Finestre/porte-finestre		3,0+	3,0+	-
Porte		3,0+	3,0+	-
Suolo		0,6	0,8	0,8**

\* Per garantire una buona sensazione di benessere, le costruzioni con una massa < 50 Kg/m<sup>2</sup> (senza la copertura del tetto rispettivamente il rivestimento della facciata ventilati) richiedono dei coefficienti k più bassi.

\*\* In locali senza esigenze di benessere termico viene tralasciato il valore limite superiore.

\*\*\* Percorso del flusso termico nel terreno tra elemento di costruzione e clima esterno.

+ In funzione del sistema e della disposizione del riscaldamento, della grandezza delle finestre e della loro distanza dal luogo di soggiorno, sono necessari dei coefficienti k più bassi per ottenere benessere e prevenire la formazione di acqua di condensazione.

#### **4. L'ISOLAMENTO DALLE VIBRAZIONI**

Nel quadro delle tematiche ambientali di interesse in edilizia, quella delle vibrazioni certamente fra le meno conosciute al pubblico dei progettisti e dei costruttori. Il fatto imputabile a svariate circostanze, non ultime l'intrinseca complessità del fenomeno e l'assenza, nella legislazione italiana, di norme che impongano limiti cogenti da rispettare.

Non di meno il tema delle vibrazioni sta riscuotendo notevole interesse, sia per effetto dell'accresciuta sensibilità alla qualità ambientale che si diffusa anche nel nostro Paese in questi ultimi anni sia per il rinnovato impegno nello sviluppo del trasporto su rotaia in ambito urbano ed extra-urbano (che ha nel rumore e nelle vibrazioni l'elemento di maggiore criticità ambientale), sia ancora per l'effetto di "trascinamento" indotto dalle recenti disposizioni di legge riguardanti il rumore (si pensi in particolare alla recente Legge Quadro sul Rumore Ambientale n. 447/95), tematica che presenta evidenti analogie e intersezioni con quella delle vibrazioni.

Questa memoria si propone di delineare le caratteristiche fisiche salienti del fenomeno descrivendone cause ed effetti, di illustrare le principali metodologie di analisi numerica e sperimentale, e di richiamare infine i più importanti riferimenti normativi del settore.

Ci occuperemo in questa sede di vibrazioni generate all'esterno dell'edificio da sorgenti quali il traffico stradale, il trasporto su rotaia, gli impianti e macchinari situati in prossimità di un edificio, tralasciando quindi la tematica, di grande rilevanza in campo industriale, delle vibrazioni associate all'esercizio di impianti produttivi e dei relativi effetti sul personale addetto a tali lavorazioni.

Per quanto riguarda gli effetti delle vibrazioni essi sono classificabili in tre grandi categorie, di seguito elencate per livelli crescenti di intensità del fenomeno:

interferenza con l'impiego di strumenti di precisione disturbo alle persone danni strutturali all'edificio

I riferimenti normativi nazionali (UNI) e internazionali (ISO) di interesse fanno riferimento soprattutto alle due ultime categorie di effetti, ovvero al disturbo alle persone e al danno all'edificio.

##### **Indicatori fisici e psico-fisici**

I fenomeni di vibrazione vengono tipicamente descritti in termini di andamento temporale e/o di distribuzione spettrale di grandezze cinematiche quali spostamento, velocità e accelerazione.

Le vibrazioni di interesse in edilizia presentano una frequenza caratteristica, rilevata all'interno dell'edificio, che tipicamente si situa nell'intervallo  $f = 1 \div 80$  Hz.

Occorre precisare che le frequenze caratteristiche delle tipiche sorgenti di vibrazione possono in realtà interessare valori anche superiori al limite sopra detto, ma nella propagazione da sorgente a ricevitore tali componenti di alta frequenza vengono generalmente filtrate dai mezzi di propagazione intermedi (terreno, fondazioni ecc.), per cui l'effetto sul recettore finale in genere irrilevante.

Merita inoltre sottolineare che l'intervallo delle frequenze di vibrazione presenta una certa sovrapposizione con la gamma delle frequenze udibili (convenzionalmente limitato dalla soglia inferiore di 20 Hz), fatto che giustifica il possibile verificarsi in ambienti interni di rumore di bassa frequenza originato da vibrazioni strutturali che può sovrapporsi sia all'effetto vibratorio vero e proprio, sia al rumore trasmesso per via aerea (caratterizzato, quest'ultimo, da frequenze generalmente più elevate).

Ai fini della valutazione degli effetti di disturbo e/o di danno l'indicatore fisico più frequentemente utilizzato è il valore efficace (RMS) dell'accelerazione di vibrazione, "a".

Talvolta per caratterizzare il fenomeno si utilizza, anziché all'accelerazione, la velocità di vibrazione intesa anch'essa come valore efficace RMS. In molti casi risulta utile, così come in acustica, fare riferimento anziché alla grandezza cinematica in sé (accelerazione o velocità di vibrazione) al relativo livello, espresso in dB, e definito, nel caso dell'accelerazione, come:

$$L_a = 20 \log (a_{RMS}/a_0)$$

dove:

$$a_0 = \text{accelerazione di riferimento} = 10^{-6} \text{ (M/s}^2\text{)}$$

Il trasduttore meccanico-elettrico che si impiega comunemente nei rilevamenti sperimentali l'accelerometro, la cui risposta lineare e costante in frequenza se costante è l'accelerazione a cui sottoposto, al variare della frequenza. Si deduce quindi che avendo a disposizione un segnale elettrico proveniente dall'accelerometro, possibile ottenere un segnale proporzionale alla velocità o allo spostamento operando una o due integrazioni successive del segnale.

## **Analisi del fenomeno**

L'analisi di un fenomeno di vibrazione in edilizia può essere effettuata con l'ausilio di tecniche strumentali e/o di algoritmi di calcolo; l'analisi presuppone un esame dei seguenti fattori:

- sollecitazione dinamica della sorgente
- propagazione nel terreno dell'onda elastica
- accoppiamento terreno-fondazione
- risposta dinamica dell'edificio
- livello di vibrazione nei ricettori
- confronto con valori limite stabiliti dalle normative

In linea di principio, l'analisi della sollecitazione esercitata dalla sorgente può essere affrontata con metodi di simulazione numerica. Si tratta in sostanza di costruire un modello matematico che descriva l'interazione dinamica tra carico e substrato. Considerando a titolo di esempio un convoglio ferroviario, esso dovrà essere descritto in termini di masse dotate di sei gradi di libertà (tre di traslazione e tre di rotazione), e di costanti elastiche e caratteristiche dissipative del sistema di sospensione; il substrato sarà costituito dall'armamento, anch'esso descritto in termini di masse, rigidità e coefficienti di dissipazione dinamica. Tale approccio richiede notevoli competenze specifiche ed è quindi interessante soprattutto per scopi di ricerca o di progettazione avanzata; per le normali esigenze del professionista risulta maggiormente praticabile una caratterizzazione della sorgente basata sul rilevamento sperimentale in situ del livello di vibrazione in prossimità della sorgente stessa.

L'energia vibratoria generata dalla sorgente si propaga nel terreno attraverso onde le cui caratteristiche dipendono sostanzialmente dalla geometria della sorgente. Nel caso di sorgente profonda (ad esempio una linea metropolitana in galleria, oppure una tratta ferroviaria in trincea profonda), la quota maggiore dell'energia viene trasportata da onde cosiddette "di corpo", ovvero da onde di compressione e di taglio. All'interfaccia tra mezzi diversi (tipicamente terreno e aria) compaiono inoltre onde cosiddette di superficie (onde di Love e di Rayleigh), che sono il fattore dominante di trasporto energetico nel caso di sorgenti situate in superficie (ad es. strade o ferrovie a raso o in rilevato). Nella propagazione attraverso il terreno si verifica un'attenuazione del fenomeno vibratorio, dovuta essenzialmente alla divergenza geometrica dell'onda e alle dissipazioni, funzione della natura geolitologica del terreno: rocce e terreni fortemente coesivi e privi di discontinuità trasmettono l'energia vibratoria con minori dissipazioni rispetto a terreni sciolti e dotati di discontinuità strutturali.

Per quanto riguarda infine la propagazione all'interno dell'edificio occorre considerare due fenomeni distinti. L'accoppiamento terreno-fondazione determina un'attenuazione che dipende essenzialmente dalla tipologia di fondazione (su pali platea, trave continua, plinto, ecc.). Nella propagazione attraverso la struttura possono verificarsi effetti di ulteriore attenuazione, ovvero di amplificazione del livello vibratorio, in funzione della tipologia e delle dimensioni della struttura (luci dei solai, condizioni di vincolo, materiali strutturali ecc.). In particolare il fenomeno dell'amplificazione, che può risultare di entità assolutamente non trascurabile, si verifica nei casi in cui lo spettro della sollecitazione trasmessa dalla fondazione alla struttura comprende componenti rilevanti in bande che coincidono con le frequenze proprie di risonanza della struttura medesima; in conseguenza di tale fenomeno può talvolta verificarsi che il livello di vibrazione sia maggiore ai piani alti, ovvero a maggiore distanza dalla sorgente, rispetto ai piani bassi.

I fenomeni di attenuazione/amplificazione sopra descritti sono a rigore variabili con la frequenza e possono essere quantificati attraverso rilevamenti sperimentali oppure attraverso dati di let-

teratura, oppure ancora per mezzo di simulazioni numeriche: in particolare la risposta dinamica della struttura può essere efficacemente valutata attraverso i codici di analisi strutturale agli Elementi Finiti di corrente impiego nella progettazione civile.

### **UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici".**

I danni agli edifici determinati dalle vibrazioni vengono trattati dalla UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici", norma in sostanziale accordo con i contenuti tecnici della ISO 4866 e in cui viene richiamata, sebbene non faccia parte integrante della norma, la DIN 4150 parte 3 "Erschuttemugen im Bauwesen - Einwirkungen auf bauliche Anlagen" del maggio 1986. .

La norma UNI 9916 fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii allo scopo di permettere anche la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica. Altro scopo della norma è di ottenere dati comparabili sulle caratteristiche delle vibrazioni rilevate in tempi diversi su uno stesso edificio, o su edifici diversi a parità di sorgente di eccitazione, nonché di fornire criteri di valutazione degli effetti delle vibrazioni medesime.

La norma considera per semplicità gamme di frequenza variabili da 0. 1 a 150 Hz. Tale intervallo interessa una grande casistica di edifici e di elementi strutturali di edifici sottoposti ad eccitazione naturale (vento, terremoti, ecc.) nonché ad eccitazione causate dall'uomo (traffico, attività di costruzione, ecc.). In alcuni casi l'intervallo di frequenza delle vibrazioni può essere più ampio ma tuttavia le eccitazioni con contenuto in frequenza superiore a 150 Hz non sono tali da influenzare significativamente la risposta dell'edificio.

L'Appendice A della UNI 9916 contiene una guida semplificata per la classificazione degli edifici secondo la loro probabile reazione alle vibrazioni meccaniche trasmesse attraverso il terreno. Nell'ambito di questa classificazione, un sistema dinamico costituito dal terreno e dallo strato di base (magrone) sul quale si trovano le fondazioni oltre che la struttura medesima dell'edificio.

Le strutture comprese nella classificazione riguardano:

- tutti gli edifici residenziali e gli edifici utilizzati per le attività professionali (case, uffici, ospedali, ecc.);
- gli edifici pubblici (municipi, chiese, ecc.);
- edifici vecchi ed antichi, edifici con un valore architettonico, archeologico e storico;
- le strutture industriali più leggere spesso concepite secondo le modalità costruttive in uso per gli edifici abitativi.



La classificazione degli edifici (Prospetto III) basata sulla loro resistenza strutturale alle vibrazioni oltre che sulla tolleranza degli effetti vibratorii sugli edifici in ragione del loro valore architettonico, archeologico e storico. I fattori dai quali dipende la reazione di una struttura agli effetti delle vibrazioni sono:

- la categoria della struttura
- le fondazioni
- la natura del terreno

La categoria di struttura (Prospetto II) è classificata in una scala da 1 a 8 (a numero crescente di categoria corrisponde una minore resistenza alle vibrazioni) in base ad una ripartizione in due gruppi di edifici, edifici vecchi e antichi o strutture costruite con criteri tradizionali (Gruppo 1) e edifici e strutture moderne (Gruppo 2). L'associazione della categoria viene fatta risalire alle caratteristiche tipologiche e costruttive della costruzione e al numero di piani.

Le fondazioni sono classificate in tre classi. La Classe A comprende fondazioni su pali legati in c.a. e acciaio, platee rigide in cemento armato, pali di legno legati tra loro e muri di sostegno a gravità; la Classe B comprende pali non legati in c.a., fondazioni continue, pali e platee in legno; la Classe C infine comprende i muri di sostegno leggeri, le fondazioni massicce in pietra e la condizione di assenza di fondazioni, con muri appoggiati direttamente sul terreno.

Il terreno viene classificato in sei classi: rocce non fessurate o rocce molto solide, leggermente fessurate o sabbie cementate (Tipo a); terreni compattati a stratificazione orizzontale (Tipo b); terreni poco compattati a stratificazione orizzontale (Tipo c); piani inclinati, con superficie di scorrimento potenziale (Tipo d); terreni granulari, sabbie, ghiaie (senza coesione) e argille coesive sature (Tipo e) e materiale di riporto (Tipo f).

L'Appendice B della UNI 9916 contiene i criteri di accettabilità dei livelli delle vibrazioni con riferimento alla DIN 4150 e al Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 24 gennaio 1986 "Norme tecniche relative alle costruzioni in zona sismica."

La parte 3 della DIN 4150 indica le velocità massime ammissibili per vibrazioni transitorie:

- sull'edificio nel suo complesso
- sui pavimenti:  $v < 20$  mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione e le velocità massime ammissibili per vibrazioni stazionarie:
  - sull'edificio nel suo complesso:  $v < 5$  mm/s in direzione orizzontale misurata all'ultimo piano
  - sui pavimenti:  $v < 10$  mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione.

Le velocità di vibrazione massime ammissibili per l'edificio nel suo complesso misurate alla fondazione, per i campi di frequenze  $< 10$  Hz,  $10\div 50$  Hz e  $50\div 100$ , sono:

- $20\div 40$  mm/s nel caso di edifici utilizzati per scopi commerciali, edifici industriali e simili (Categoria 1)

- 5÷ 15 mm/s nel caso di edifici residenziali e simili (Categoria 2)
- 3÷8 mm/s nel caso di strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni e di grande valore intrinseco (Categoria 3).

In corrispondenza del pavimento all'ultimo piano vengono indicate per le tre categorie di edifici velocità di vibrazione ammissibile rispettivamente di 40, 15 e 8 mm/s.

La ISO 4866 fornisce infine una classificazione degli effetti di danno a carico delle strutture secondo tre livelli:

a) Danno di soglia: formazione di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o accrescimento di fessure già esistenti sulle superfici in gesso o sulle superfici di muri a secco; inoltre formazioni di fessure filiformi nei giunti di malta delle costruzioni in muratura di mattoni. Possono verificarsi per vibrazioni di piccola durata, con frequenze maggiori di 4 Hz e velocità di vibrazione di 4÷50 mm/s, e per vibrazioni continue, con velocità 2÷5 mm/s.

b) Danno minore: formazione di fessure più aperte, distacco e caduta di gesso o di pezzi di intonaco di muri a secco; formazione di fessure in murature di mattoni. Possono verificarsi per: a) vibrazioni di piccola durata con frequenze superiori a 4 Hz nel campo di velocità vibrazionale compreso tra 20÷100 mm/s; b) vibrazioni continue associate a velocità di 3÷10 mm/s.

c) Danno maggiore: danneggiamento di elementi strutturali; fessure nei pilastri; aperture di giunti; serie di fessure nei blocchi di muratura.

Possono verificarsi per: a) vibrazioni di piccola durata con frequenze superiori a 4 Hz e velocità vibrazionale compresa tra 20÷200 mm/s; b) vibrazioni continue associate a velocità di 5÷20 mm/s.

## **Applicazione simulata di schermi di polistirene per la protezione di edificio dalle vibrazioni**

L'inquinamento da rumore e vibrazioni è presente in quasi tutti gli ambienti intensamente antropizzati. Spesso la soppressione o la riduzione alla fonte presenta difficoltà difficilmente superabili; il rimedio consiste, allora, nel proteggere gli edifici prossimi alla fonte del disturbo ponendo in opera dispositivi atti ad attenuare l'intensità dei fenomeni.

In presenza di vibrazioni trasmesse attraverso il suolo la protezione di una costruzione esistente può essere ottenuta interponendo uno schermo tra la sorgente delle vibrazioni stesse e la fondazione della costruzione. Lo schermo preso in esame nell'indagine presentata nella seguente memoria una lastra di resina polistirenica ad alveoli chiusi, confezionata con processo di sinterizzazione e progettata appositamente per il tipo di impiego sopra indicato.

Si tratta di una soluzione tecnologicamente semplice e di costo contenuto, che non richiede l'intervento di speciali attrezzature per la posa.

Lo schermo isolante utilizzato per le simulazioni numeriche è costituito da lastre di polistirene espanso sinterizzato dello spessore di 50 mm. Sono state prese in considerazione quattro diverse qualità del materiale, ottenute combinando due densità di massa (12 e 20 kg/m<sup>3</sup> rispettivamente) con due differenti comportamenti meccanici, più rigido e plastico il primo (tipo GL), più deformabile elasticamente il secondo (tipo GLS), ottenuti mediante diverse modalità di confezione. Le proprietà meccaniche di ciascun materiale, identificato con la sigla di cui la tabella 1 illustra il significato, sono riassunte nella tabella 3. I valori scelti sono quasi tutti arbitrari, ma fisicamente significativi in relazione alla natura dei materiali reali cui si riferiscono. Sono state rilevate sperimentalmente, invece, le caratteristiche dei due tipi di polistirene MP 3 (a) e MP 3 (b), impiegati rispettivamente nel modello 3 e nel modello 2. Una parte rilevante degli elementi costituenti i tre modelli dedicata alla rappresentazione del suolo. E' importante che i bordi vincolati del modello siano sufficientemente lontani dalla struttura vera e propria per evitare importanti errori di analisi dovuti alla limitatezza del modello. I vincoli sono realizzati bloccando totalmente i nodi appartenenti ai due lati verticali estremi ed al lato inferiore di ciascun modello.

Tabella 3

***Proprietà meccaniche dei materiali associati al modello numerico***

Materiali	Modulo elastico [N/mm <sup>2</sup> ]	Modulo di Poisson $\nu$	Modulo tangenziale [N/mm <sup>2</sup> ]	Densità di massa [kg/m <sup>3</sup> ]
MP 2 (Suolo)	300	0,15	130	1.800
MP 1- MP 4- MP 5 (Calcestruzzo armato)	30.000	0,2	12.000	2.500
MP 6 (Muratura)	2.000	0,1	350	2.000
MP 3 (a) (Isolante tipo 1)	1,12	0,5	0,4	-
MP3 (b) (Isolante tipo 2)	0,46	0,5	0,15	-

Nella tabella 5 sono riportati, nelle quattro colonne, rispettivamente, i valori di picco di accelerazione orizzontale, spostamento orizzontale, accelerazione verticale e spostamento verticale per i tre modelli numerici. I valori riportati non hanno rilevanza in senso assoluto ma solo in senso relativo; in valore assoluto le risposte appaiono molto elevate, ma ciò dovuto al fatto che, sfruttando la linearità dei modelli, l'eccitazione è stata amplificata per ottenere una migliore risoluzione e affidabilità dei risultati.

Tabella 5

***Risposte massime dei tre modelli nel nodo 1387 (sommità della struttura)***

Identità del modello	Accelerazione massima orizzontale acc-x [M/S <sup>2</sup> ]	Spostamento massimo orizzontale disp-x [mm]	Accelerazione massima verticale acc-y [m/S <sup>2</sup> ]	Spostamento massimo verticale disp-y [mm]
Modello 1	70,4	2	41,5	4,1
Modello 2	11,5	1,3	66	4,6
Modello 3	16,14	0,9	28	3,4

Si può notare come l'attenuazione sulla accelerazione, interponendo lo schermo, sia consistente in direzione orizzontale, ma molto meno in direzione verticale. Non è invece, possibile prevedere a priori, senza una analisi della dinamica globale del sistema complessivo, quale dei due schermi (il più rigido o il più deformabile), offra prestazioni migliori. Infatti in direzione orizzontale sembra più efficiente il materiale più deformabile, mentre in verticale risponde meglio quello più rigido. In termini di spostamenti massimi il materiale più deformabile comporta una amplificazione della

risposta in entrambe le direzioni, mentre il materiale più rigido conduce ad una attenuazione della stessa importanza.

Il taglio delle accelerazioni è positivo, poiché riduce il disturbo fisiologico, soprattutto quando l'eccitazione costituita da vibrazione con rilevante energia nel dominio delle frequenze più elevate. Gli schermi di EPS possono dunque rappresentare una soluzione valida; si sottolinea, però ancora l'importanza di non assumere decisioni progettuali senza una verifica preventiva della risposta dinamica complessiva.

## **Vibrazioni**

L'edificio realizzato in prossimità di una via di comunicazione quale autostrade, ferrovie, metropolitane viene influenzato dagli effetti che le vibrazioni prodotte dai mezzi di trasporto inducono attraverso il terreno. I rumori giungono all'edificio non solo a causa dei mezzi di trasporto ma anche se nelle vicinanze vengono a trovarsi aziende con produzioni particolari (es. presse, vibratori). Il terreno quindi si comporta come tutti i solidi: trasmette le onde in funzione della natura costitutiva e la relativa intensità decresce con la distanza fra sorgente e ricevente.

L'accoppiamento edificio-terreno viene realizzato normalmente facendo appoggiare le fondazioni sullo stesso con profondità crescenti in funzione dell'importanza dell'opera. Permettere di appoggiare l'edificio su sistemi elastici è stata da sempre un'ambizione di alcuni progettisti o dovute ad alcune necessità specifiche.

Il materiale EPS posto come materiale per sottofondazioni presenta anche una caratteristica di interesse specifico: la riduzione delle vibrazioni provenienti dall'esterno. Questo dovuto alla natura dello stesso EPS essendo parzialmente elastico permette di sostenere carichi elevati combinandoli con caratteristiche elastiche considerevoli. È quindi da abbinare quanto qui riportato con i dati del punto 2) per ottenere una visione completa della problematica.

## **Sollecitazioni d'urto**

L'EPS, sottoposto ad urto, per le sue caratteristiche elastiche, è in grado di decelerare gradualmente la massa urtante, restituendo soltanto una frazione dell'energia d'urto. Tale comportamento spiega perché l'EPS è oggi uno dei materiali più importanti per l'imballaggio; questa caratteristica non è tuttavia generalmente interessante nelle applicazioni edilizie.

## Vibrazioni e rumore

La resistenza a vibrazioni e scuotimenti dell'EPS è eccellente, in relazione al suo comportamento elastico-tenace. La stessa caratteristica elastica rende l'EPS di scarso interesse per le applicazioni di assorbimento dei rumori aerei.

Esiste uno speciale tipo di EPS elasticizzato ottenuto per compressione e successiva espansione delle lastre normali, che si è rivelato fra i migliori materiali per l'isolamento dai rumori d'urto e vibrazionali nei cosiddetti "pavimenti galleggianti".

Lo smorzamento dei rumori è tanto più elevato, quanto minore è la cosiddetta "rigidità dinamica" delle lastre di EPS.

Questa caratteristica, che si usa esprimere in  $\text{MN/m}^3$  e ha quindi la dimensione di un modulo elastico diviso una lunghezza, è in effetti l'indice del comportamento elastico del complesso costituito dalla struttura dell'espanso e dall'aria racchiusa, ed è funzione decrescente dello spessore; viene dedotta dalla misura della frequenza di risonanza del sistema costituito dalla lastra di EPS collocata su un supporto rigido e gravata da una massa oscillante standard (v. DIN 52214). L'industria tedesca specializzata in questo tipo di lastre (di massa volumica  $9-1 \leq \text{Kg/m}^3$ ), considera i tipi della tabella a lato.

## Rigidità dinamica dell'EPS per isolamento dal calpestio

Spessore t.q. mm	Spessore sotto carico di $2 \text{ kN/m}^2$ mm	Rigidità dinamica $\text{MN/m}^3$
17	15	30
22	20	20
27	25	15
33	30	15
38	35	10
44	40	10

Un buon materiale elastico deve poter rispondere adeguatamente a queste esigenze:

- resistenza alla compressione adeguata ai carichi previsti, statici e dinamici;
- insensibilità all'acqua e alla colata della malta del massetto; - leggerezza e spessore contenuto;
- inalterabilità nel tempo, imputrescibilità e inattaccabilità da muffe e altri microrganismi;
- maneggevolezza, facile adattabilità, facilità e rapidità di posa in opera;
- buon rapporto prezzo/prestazioni;
- contributo all'isolamento termico del solaio.

Sono stati proposti per questo impiego pannelli a base di fibre minerali, di agglomerati di gomma, di sughero, di fibre sintetiche, nonché di espansi plastici, in particolare Polistirene Espanso elasticizzato. Questa applicazione si è sviluppata soprattutto in Europa del Nord, dove da molto tempo l'isolamento da vibrazioni nelle costruzioni è regolamentato.

Esistono in commercio due prodotti:

- l'EPS tal quale
- l'EPS elasticizzato

Il primo viene prodotto come precedentemente espresso e quindi dai blocchi vengono ricavate le lastre di dimensioni volute. Il procedimento di produzione dell'EPS elasticizzato parte infatti da normali blocchi di EPS, di massa volumica intorno a  $13 \text{ kg/m}^3$ , ottenuti però con granulometrie e condizioni di stampaggio e maturazione opportunamente controllate per massimizzare le caratteristiche cercate. Questi blocchi vengono pressati fino ad  $1/3$  dello spessore originario; tolta la compressione, essi ritornano all'85% circa dello spessore originario, acquistando così una massa volumica intorno a  $15 \text{ Kg/m}^3$ ; in questo stato vengono tagliati in lastre in piani perpendicolari alla direzione della pressione.

Le caratteristiche fisico-chimiche delle lastre così ottenute non risultano alterate da questo trattamento. In particolare la conduttività termica avrà ancora il valore che compete alle lastre di EPS normale della stessa massa volumica, cioè  $0,045 \text{ W/mK}$ .

Con il trattamento di elasticizzazione si modificano invece profondamente le caratteristiche meccaniche dell'espanso, a seguito della deformazione permanente che subisce lo scheletro solido delle celle. La loro forma tondeggianti divenuta lenticolare, allargata perpendicolarmente alla direzione della compressione, e le pareti assumono un aspetto spiegazzato.

Come conseguenza il modulo elastico si abbassa notevolmente, specialmente nella direzione di compressione.

Esiste un metodo di prova indicato da una procedura Tedesca che consente di ottenere il parametro più significativo per l'uso in oggetto ovvero la rigidità dinamica. Come dati di riferimento si può riportare che il polistirene presenta i campi di valori riportati nella tabella qui a fianco. La prova della rigidità dinamica viene eseguita secondo il metodo descritto in DIN 52214 "Determinazione della rigidità dinamica per i pavimenti galleggianti", che è attualmente presa in considerazione per la sua introduzione anche nella normativa italiana. La prova consiste nel porre una provetta di materiale di  $200 \times 200 \text{ mm}$  e dello spessore commerciale da esaminare, su un piano pesante, applicarvi sopra, tramite una malta fluida di gesso, che deve annullare le irregolarità del provino, una piastra di acciaio di spessore tale da esercitare una pressione di  $2 \text{ kPa}$ , che simula la massa del pavimento galleggiante. A questa piastra viene fissato rigidamente un eccitatore di vibrazioni assiali di frequenza variabile e un accelerometro. La frequenza viene variata fino ad individuare la frequenza di risonanza  $f_r(\text{Hz})$ , per la quale massima l'ampiezza delle oscillazioni.

La rigidità dinamica  $S'$  data dalla somma

$$S' = S'_{G'} + S'_L \text{ (MN/m}^3\text{)}$$

della rigidità dinamica  $S'_{G'}$  della struttura solida dell'espanso e di quella  $S'_L$  dell'aria racchiusa nelle sue celle. La rigidità dinamica  $S'_{G'}$  della struttura è data dalla relazione:

$$S'_{G'} = 4 \cdot 10^{-5} m'^2_R \text{ (MN/m}^3\text{)}$$

dove  $m'$  ( $\text{kg/m}^3$ ) è la massa areica della piastra oscillante (comprendente quella dell'eccitatore).

La rigidità dinamica  $S'_L$  dell'aria delle celle è data dalla relazione:

$$S'_L = 113/d_B \text{ (MN/m}^3\text{)}$$

dove  $d_B$  (mm) è lo spessore sotto carico della provetta, come definito dalla DIN 18164.

Lo spessore  $d_B$  dell'isolante sotto carico, unitamente allo spessore senza carico  $d_L$  è l'altra caratteristica specifica dell'espanso per l'isolamento dai rumori di calpestio, in quanto deve essere assicurato che, pur con un modulo elastico ridotto, i cedimenti sotto carico siano contenuti entro limiti accettabili.

La pressione convenzionale sotto la quale misurato lo spessore  $d_B$  è di 2 kPa.

Come ultimi riferimenti in relazione all'EPS utilizzato come sottofondazioni si riportano alcune considerazioni sul comportamento biologico e sull'invecchiamento.

materiale	Rigidità dinamica (MN/m <sup>3</sup> )
EPS tradizionale	60 – 120
EPS elasticizzato	310 - 30



## 5. NORMATIVA

Si ricordano le norme e i progetti di norma che interessano le fondazioni degli edifici:

- regole THK
- SIA 180
- UNI EN 13163 – EPS per isolamento termico
- UNI EN 13370 – Trasferimento di calore attraverso il terreno
- pr EN ISO 13793 - Protezione delle fondazioni contro il gelo
- UNI 9614:1990 – Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo
- UNI 9916:2004 – Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici
- UNI 11048:2003 – Vibrazioni meccaniche ed urti – Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo
- UNI 10350:1999 – Componenti edilizi e strutture edilizie – Prestazioni igrotermiche – Stima della temperatura superficiale interna per evitare umidità critica superficiale e valutazione del rischio di condensazione interstiziale
- UNI EN ISO 13788:2003 – Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia – Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale – Metodo di calcolo

## 6. UN ESEMPIO REALE



Un esempio di applicazione ed utilizzo dell'EPS è la ristrutturazione di edificio rurale situato nella zona geografica del Lago d'Orta. La presenza di unità del terreno, caratteristiche climatiche variabili, piovosità medio-alta ha condotto il progettista alla valutazione di proteggere ed isolare le fondazioni e le rampe di accesso ottenendo inoltre il beneficio della cassetta a perdere per le opere in calcestruzzo gettate in opera.