I LIBRI DI AIPE

ISOLARE LE FONDAZIONI CON L'EPS

Polistirene Espanso Sinterizzato

BE-MA editrice

ISOLARE LE FONDAZIONI CON L'EPS

Polistirene Espanso Sinterizzato

BE-MA editrice

Serie: **I libri di AIPE**

1° titolo: Le condense interne e superficiali
2° titolo: Isolare le fondazioni con l'EPS

Coordinamento del libro:
Marco Piana

BE-MA editrice
via Teocrito, 50 - 20128 Milano
tel 02 2552451
fax 02 27000692

Grafica e impaginazione: Gabriella Ornaghi
Fotolito: BCS - Fotoincisione di Bigliardi Mario
Stampa e confezione: A.G. Bellavite - Missaglia (Lc)

© **1997 BE-MA editrice - Milano**
BE-MA editrice - Milano

Tutti i diritti sono riservati, anche di riproduzione parziale,
a norma di legge e delle convenzioni internazionali.

ISBN 88-7143-193-6

Sommario

Introduzione 7

Le Caratteristiche del materiale e la corretta progettazione 9
Marco Piana

Le vibrazioni negli edifici 31
Marco Masoero

Applicazione simulata di schermi di polistirene per la protezione di edificio dalle vibrazioni 41
Alessandro De Stefano, Donato Sabia, Leonardo Sabia

Le sottofondazioni per lo smorzamento delle vibrazioni esterne 53
Giacomo Kayon

Costruzione di strade, ferrovie e aeroporti 57
Marco Piana

L'EPS come materiale isolante in strutture di fondazione degli edifici 81
Studio effettuato presso Istituto di Ricerca Finlandese

Proposta di Norma Cen - perdita di calore attraverso il terreno 93

La valutazione dell'impatto ambientale da vibrazioni ferroviarie 98
Rosario Ceravolo, Marco Masoero

Isolare le fondazioni: l'EPS polistirene espanso sinterizzato

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.

Marco Piana
AIPE

Le caratteristiche del materiale e la corretta progettazione

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.

Il polistirene

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.

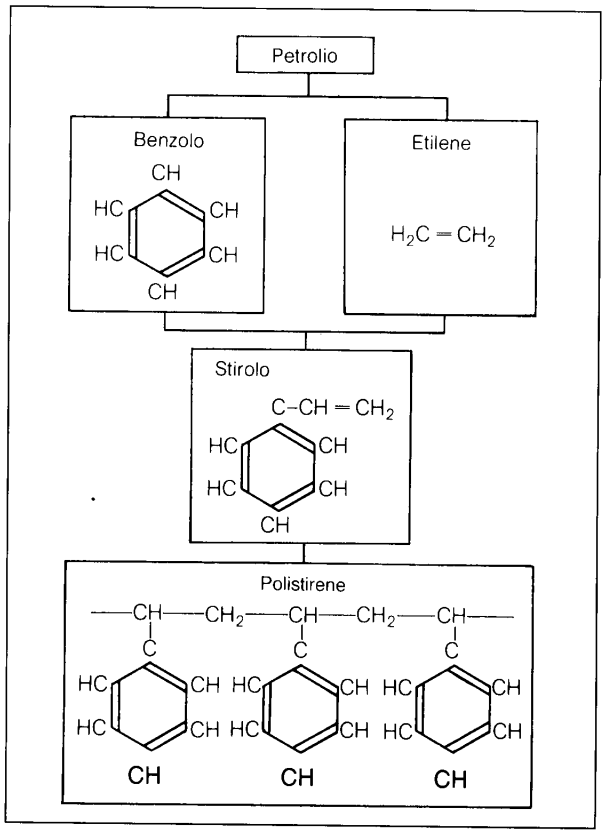


Fig. 1

Il Polistirene espanso (EPS)

Il Polistirene espanso (EPS) è una delle forme più importanti in cui viene impiegato il Polistirene. Per ottenere l'EPS si seguono attualmente due vie:

a) 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/m3, ma quella apparente delle perle in mucchio è di circa 650 Kg/m3. È questo il materiale da cui si parte per produrre l'EPS con il processo più avanti descritto.

b) Successivamente alla polimerizzazione il Polistirene viene unito all'agente espandente ed agli altri eventuali additivi in una trafila, che mescola allo stato fuso gli ingredienti ed estrude la miscela da una filiera, di solito in forma di lastra piana o di tubo, che immediatamente si espande e, raffreddandosi, si irrigidisce nella forma espansa (EPS estruso). Questo materiale risulta più costoso e meno versatile del precedente;ma per le sue peculiari caratteristiche, ha varie applicazioni significative.

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.

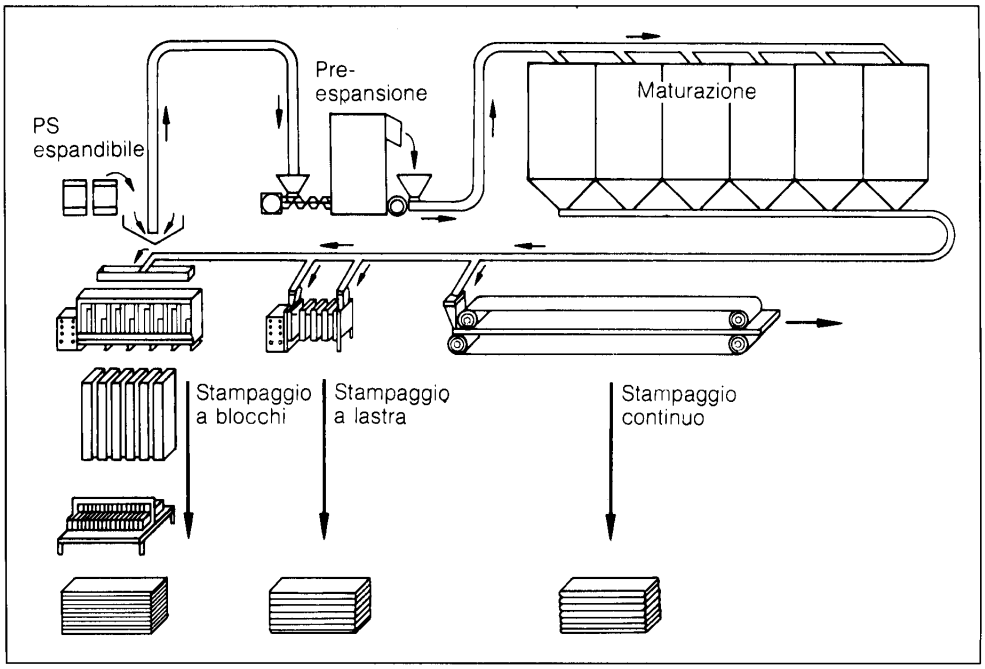


Fig. 2

Pre-espansione

Le perle di PS espandibile vengono pre-espanse, 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-espanse 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-espanse raggiungono la stabilità necessaria per le fasi successive.

Stampaggio

Le perle pre-espanse 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 parallelepipede provviste di fori di entrata per il vapore su tutti i lati, vengono riempite di perle pre-espanse 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-espanse vengono fatte avanzare a passi attraverso una forma, mentre avviene la sinterizzazione; si ottengono così profilati vari, p. es. casserature isolanti.
4) Lastre per isolamento acustico:
Per questo impiego i blocchi o le singole lastre vengono compressi fino ad 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 espanse 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/m3, 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 nè altre emanazioni, nè 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.

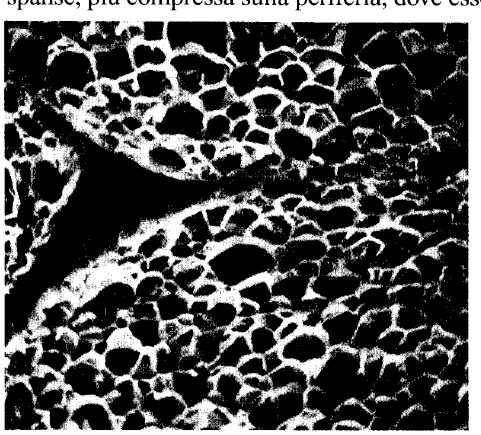


Fig. 3a
Fig. 3b

Per confronto la Fig. 3b, mostra, allo stesso ingrandimento, la struttura di in EPS di qualità scadente: la pre-espansione ecessiva 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 compromette un po' tutte le caratteristiche del prodotto, possono essere molteplici. Per essere sicuri di non prendere dal mercato, dove purtroppo sono presenti, materiali di cattiva qualità, è necessario esigere sempre EPS di qualità garantita ed a marchio di conformità alla norma UNI 7819.

Le caratteristiche necessarie del materiale EPS utilizzato come sottofondazione permettono di evidenziarne le peculiarità.
La tabella sotto riportata indica come nel nostro paese esista una norma UNI (la 7819) che permette di classificare l'EPS in base alla densità e quindi ai valori presentati dei parametri più importanti. Per ogni delle sei esigenze precedentemente espresse è necessario una spiegazione specifica del materiale ottimale da utilizzare.

Classe di prova	Caratteristica	Unità di misura	Tipo					Norme citate per i metodi di prova
			I	II	III	IV A	IV B	
Accettazione	Massa volumica del lotto, min.	Kg/m3	15	20	25	30	35	UNI 6349
	Id.tolleranza per singola lastra (±)	%	6	6	6	6	6	"
	Tolleranze dimensionali max (±):							
	Lunghezza e larghezza, fino a 1000 mm	mm	5	5	5	5	5	UNI 6348
	Lunghezza e larghezza, 1001-2000 mm	mm	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	"
	Lunghezza e larghezza, 2001-4000 mm	mm	10	10	10	10	10	"
	Spessore, fino a 50 mm	mm	2	2	2	2	2	"
	Spessore, 51-100 mm	mm	3	3	3	3	3	"
	Squadratura (scostamento su 500 mm)	mm	2	2	2	2	2	"
Tipo	Resist.a compr.al 10% di schiacc. min.	KPa	50	100	140	180	220	UNI 6350
	Conducibilità termica a 10 °C, max	mW/m.K	39	36	35	34	34	UNI 7745 o
	Id. (in alternativa) a 20 °C, max	mW/m.K	41	37	36	35	35	UNI 7891
	Resistenza a trazione, min	KPa	130	170	220	320	420	UNI 8071
	Deformaz.sotto carico a caldo, max:							
	-2 d, 80 °C, 20 KPa	%	--	4	4	4	4	ISO 7616
	-7 d, 70 °C, 40 KPa	%	--	--	--	4	3	
	Reazione al fuoco (tipi RF)	Categ.	1	1	1	1	1	UNI 8457
Sistema	Stabilità dimensionale a -25 °C, max	%	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	UNI 8069
	Stabilità dimensionale a + 70 °C, max	%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	UNI 8457-
	Reazione al fuoco (tipi RF Centr.Min.)	Classe	1	1	1	1	1	9174-9177
	Resistenza alla diffus. del vapore	Adimens	20-40	30-50	40-70	50-100	60-120	UNI 8054
	Assorbim.acqua per immersione	% vol.	4	3	3	2	2	ISO 2896

Casseri a perdere

Possono essere realizzati con ogni tipo di materiale. A tale scopo le differenze presentate dalle diverse tipologie hanno poca influenza in quanto tutti presentano estrema facilità di lavorazione mediante un'attrezzatura semplicissima. Partendo da lastre, con spessore che deriva dal dimensionamento delle esigenze successive, è possibile realizzare forme diverse adatte alle fondazioni più disperate. Spessore dell'EPS e caratteristiche diventano importanti quando devono essere paragonati con l'opera da realizzare. Il parametro da considerare con più attenzione è senza dubbio la resistenza a compressione.

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/mm²

Massa volumica in Kg/m³	15	20	25	30	35
Sollecitazione di compressione al 10% 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

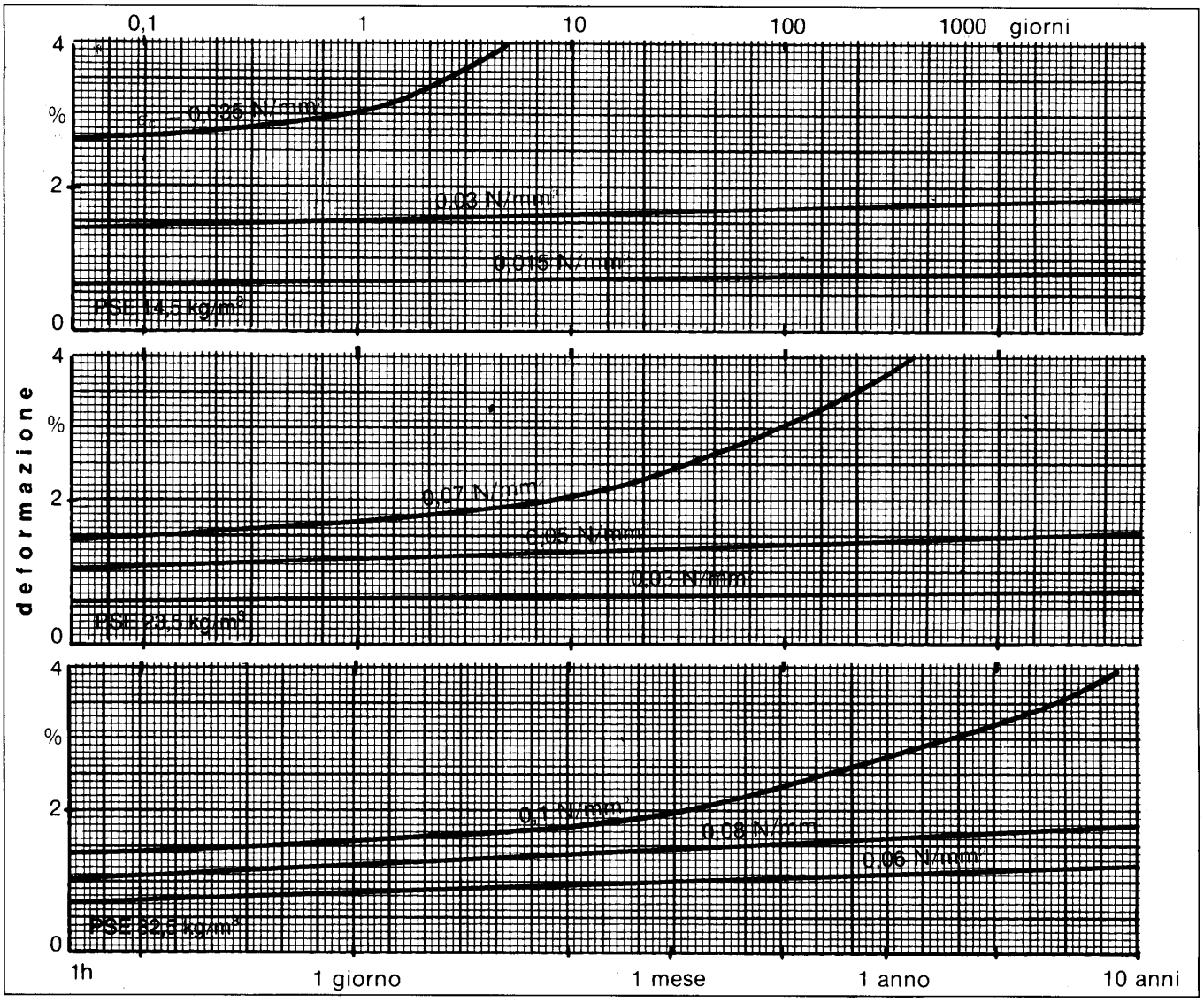
1 N/mm² = 10 Kg/cm²
1 Kg/cm² = 0,1 N/mm²

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

Compressione

	Unità misura	12 Kg/m3	16 Kg/m3	20 Kg/m3	25 Kg/m3	30 Kg/m3
Deformazione 1%	N/mm2	0,02	0,035	0,05	0,07	0,09
Deformazione 5%	N/mm2	0,04	0,07	0,10	0,14	0,18

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).
Gli andamenti della deformazione in funzione del tempo e della densità del materiale sono qui sotto riportati.



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

Sollecitazione permanente a compressione per deformazione < 2%

Massa volumica Kg/m3	Sollecitazione N/mm²	Sollecitazione Kg/cm²
15	0,012-0,025	0,12-0,25
20	0,020-0,035	0,20-0,35
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

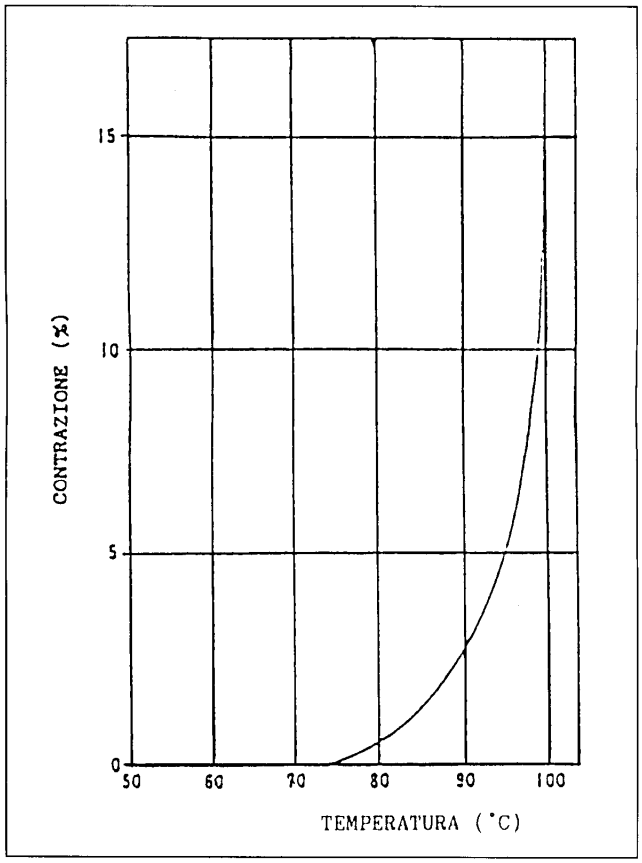
Le temperature massime sopportabili dell'EPS dipendono, come per tutti i termoplastici, dalla durata e dall'intensità della sollecitazione. Senza sollecitazione e per breve tempo l'EPS sopporta temperature di 95°-100°C (p. es. all'atto dell'applicazione di un bitume caldo). Sotto un carico permanente di 20 KN/m² la temperatura limite scende a 80-85 °C (75-80 °C per l'EPS 15). Le prove di stabilità dimensionale considerate dalle normative, p. es. UNI 7819 e ISO 4898, che indicano la deformazione massima ammissibile dopo un determinato periodo sotto carico ad una data temperatura, danno la possibilità di verificare l'idoneità di un EPS per determinate applicazioni. In particolare ISO 4898 prevede una deformazione limite del 5% nelle condizioni e per gli impieghi specificati nella seguente tabella:

Prove di stabilità dimensionale dell'EPS secondo ISO 4998

Classe	Impiego	Massa volumica Kg/m3	Durata della prova	Temper. di prova °C	Sollecit. di compr. KN/m²
I	Non portante	15	48 ore	70	—
II	Carichi limitati	20	48 ore	80	20
III	Carichi maggiori	30	7 giorni	70	40

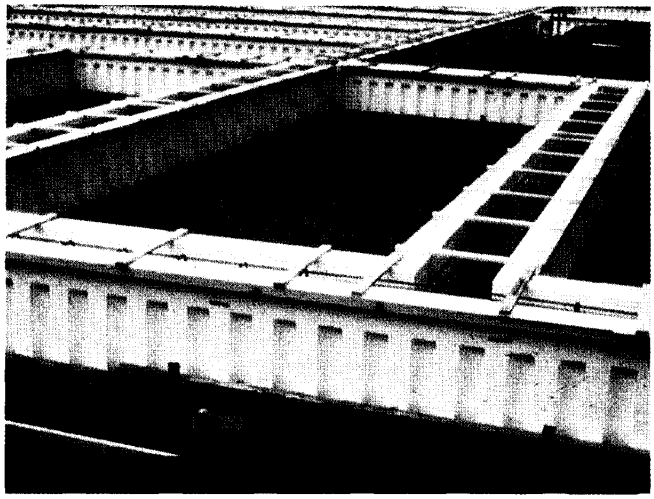
Le prove corrispondenti secondo UNI 7819 prevedono invece deformazioni limiti del 4 o 3% secondo i casi.

A bassa temperatura, poichè il Polistirene non subisce alcuna transizione di fase (cambiamento di struttura) in questo campo, le sue caratteristiche meccaniche possono considerarsi simili a quelle a temperatura ordinaria fino almeno - 200°C. In modo generico viene individuata la temperatura di non modificazione in 70°C.
Nella figura sotto riportata viene evidenziato il comportamento dimensionale al variare della temperatura.



Il coefficiente di dilatazione lineare dell'EPS compreso fra 5. 10-5 m/m . K e 7. 10-5 m/m . K.
Non ha molta importanza nelle applicazioni ordinarie e, se il movimento termico è impedito, le reazioni sui punti di fissaggio sono modeste, dato il valore del modulo elastico del materiale.
Questa caratteristica deve essere tenuta presente nel caso di applicazioni in cui l'isolante può raggiungere temperature elevate.

Densità provino 20 Kg/m3
Dimensioni 10 x 10 x 10 cm
Mantenimento in stufa per 24 ore



Quantità di CLS

Le fondazioni vengono realizzate mediante riempimento di calcestruzzo dei casseri a perdere esaminati nel punto 1, quindi la quantità di quest'ultimo può essere predeterminata con buona approssimazione. Determinare le quantità di CLS per le opere di fondazione risulta senza dubbio un modo per superare una problematica annosa sugli extra costi delle opere in cemento armato. Una conseguenza da non sottovalutare sono anche i tempi ed i costi per realizzare gli scavi relativi.

Protezione

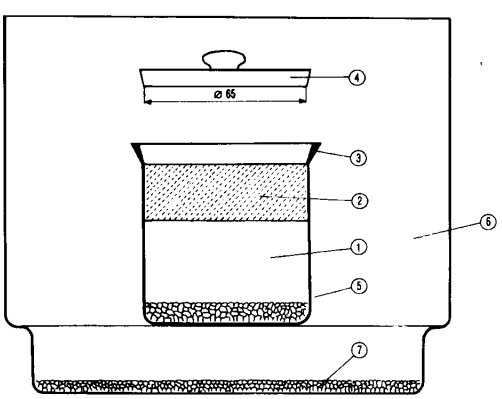
Il getto in calcestruzzo che costituisce la fondazione viene a trovarsi non a diretto contatto con il terreno ma con un prodotto che evidenzia comportamenti particolari in riferimento alla presenza di acqua od umidità. Il parametro che deve essere considerato è rappresentato dal valore di assorbimento d'acqua. La prova che permette di ottenere i valori più significativi è derivata dalla norme ISO 2896. Prevede un'immersione per 7 giorni in acqua di campioni in EPS senza pelle superficiale ed i risultati vengono espressi in % di acqua assorbita rispetto al volume iniziale del campione. La norma italiana UNI 7819 riporta i seguenti valori:

Tipo EPS	% Assorbimento acqua
I	4
II	3
III	3
IV A	2
IV B	2

I valori riportati indicano come anche in presenza di acqua drenante dal terreno in quantità corposa il getto in CLS viene ad essere protetto dall'EPS con valori che normalmente si posizionano sul 2 ± 3%. Questo permette di concludere che i fenomeni di invecchiamento del calcestruzzo e le interazioni fra questo e le armature contenute vengono ad essere quasi annullati. Un secondo dato che deve essere correlato con quanto espresso in precedenza e che evidenzia la possibilità di rilasciare il contenuto di acqua negli strati di materiale posto in vicinanza è la permeabilità al vapore.

Permeabilità e resistenza alla diffusione del vapore d'acqua (PS)
È una caratteristica importante quando si richiede la verifica delle eventuali condensazioni all'interno di una parete (diagramma di Glaser).

La UNI 7819 si limita a fornire, per ogni massa volumica, il campo di valori di questa caratteristica e ad indicare il metodo di misura, che è quello della norma UNI 8054.
Questo metodo prevede che la provetta, circolare di 65 mm di diametro e dello spessore di 25 mm, venga posta a chiudere, con opportune precauzioni, la bocca di un recipiente contenente cloruro di calcio anidro, che mantiene nello stesso un'umidità relativa 0%; il tutto viene posto in un ambiente tenuto a 23°C e 85% U. R. per mezzo di una soluzione satura di cloruro di potassio.
Per mezzo di pesate successive del contenitore si determina la velocità di trasmissione del vapor d'acqua a 23°C (TVA 23), espresso in $\mu g/m^2s$.
La norma prescrive di fare la media di 5 determinazioni.



Apparecchio per la misura della permeabilità al vapor d'acqua. 1 - Bicchiere • 2 - Provetta • 3 - Sigillante • 4 - Disco metallico • 5 - Cloruro di calcio • 6 - Essicatore o cella • 7 - Soluzione satura di cloruro di potassio

Dal valore TVA 23 si ottiene la permeabilità ∂ in ng/Pa.m.s. con la relazione:

$$\delta = \frac{TVA_{23} \cdot s}{\Delta p}$$

dove se lo spessore della provetta in mm e Δ la differenza di pressione di vapore in Pa, cui la stessa è soggetta. Per le condizioni di prova definite, si ha:

$$\delta = \frac{TVA_{23} \cdot 25}{2390} = 0{,}0105\ TVA_{23}$$

Il rapporto fra la permeabilità δ_A dell'aria in quiete e quella δ del materiale è poi il coefficiente μ (adimensionale) di resistenza alla diffusione del vapore, che è il dato più frequentemente usato nei calcoli termoigrometrici.
Poichè a 23°C è δ_A = 186,1 ng/m.s.Pa, si ha quindi

$$\mu = \frac{\delta_A}{\delta} = \frac{186{,}1}{0{,}0105\ TVA_{23}} = \frac{17724}{TVA_{23}}$$

Il quadro dei valori δ e μ che la UNI 7819 riporta per i vari tipi di EPS unificati il seguente:

Tipo	Permeabilità (ng/m.s. Pa)	Resistenza alla diffusione μ (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: μ
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).

δ = permeabilità al vapore [Kg/s m Pa]

μ = fattore di resistenza alla diffusione del vapore

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

$\mu = 1$ riferito all'aria

δ aria = 193×10^{-12} kg/S m Pa

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

Esempi:

1 EPS 20 Kg/mc $\mu = 40$
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/mc $\mu = 40$
il valore di permeabilità sarà:

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

$$= 4{,}8 \times 10^{-9} \quad \text{g/s m Pa}$$

3 EPS 20 Kg/mc $\delta = 4{,}8 \times 10^{-12}$ Kg/s m Pa
il valore del fattore di resistenza sarà:

$$\mu = \frac{\delta \text{ a}}{\text{materiale}} = \frac{193 \times 10^{-12}}{4{,}8 \times 10} = 40$$

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

Permeanza al vapore $M = \frac{\delta}{\text{spessore}}$ [Kg/S m² Pa]

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

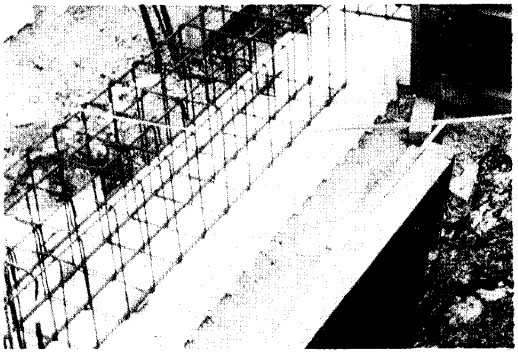
Combinando i valori dei parametri sopra citati è possibile identificare un materiale idoneo alle esigenze previste dalla costruzione al fine di garantire un giusto equilibrio fra terreno, acqua, umidità, esposizione ecc. ecc.

Getto isolato

Numerose sono le informazioni ed i dati relativi ai getti in CLS relativamente alle condizioni climatiche dello stesso. Le basse temperature come quelle elevate inducono reazioni indesiderate. Per un analisi specialistica è bene riferire la propria ricerca a testi specifici. Per ciò che concerne il getto effettuato in casseri di EPS è possibile evidenziare che il prodotto viene inserito in un contenitore che permette di mantenerne la temperatura per il tempo necessario al fine delle reazioni per l'indurimento corretto. Le esperienze condotte hanno evidenziato che gli effetti positivi sono veramente importanti con mantenimento della resistenza richiesta, la possibilità di evitare additivi particolari e soprattutto anche in climi caldi si ottiene una sorta di termostatazione a temperatura limitata evitando l'evaporazione dell'acqua in tempi troppo brevi. Un altro aspetto da non sottovalutare in alcune zone ed in alcuni periodi è l'effettuazione del getto sul terreno gelato che comporta certamente una variazione delle caratteristiche del materiale gettato a contatto con lo stesso e quindi la formazione di strati di CLS con caratteristiche differenti nella stessa massa.

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 qui a fianco. Il dato, che emerge in modo evidente, permette di definire che un edificio su argilla disperde molto meno rispetto ad un analogo si 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 situa-

Categoria	Tipo terreno	Conduttività termica λ (w/mK)	Capacità termica (J/m3K)
1	argilla	1,5	$3,0 \times 10^6$
2	sabbia	2,0	$2,0 \times 10^6$
3	roccia	3,5	$2,0 \times 10^6$

zione 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)
Le relazioni caratteristiche dei tre differenti coefficienti sono:

a $H_D = \sum A_\mu + \sum L_\psi + \sum X$
A = area degli elementi che delimitano la superficie esterna
μ = trasmittanza termica degli elementi con area A
L = lunghezza dei ponti termici lineari
ψ = trasmittanza termica dei ponti termici lineari
X = trasmittanza termica dei ponti termici puntiformi

b H_G = Ls
per edificio con fondazione continua sul terreno
Ls = $A_{\mu o} + P\,A\,Y$
A = area fondazione
P = perimetro fondazione
AY = circa pari a 1.
μ_o = trasmittanza termica

$$\mu_o = \frac{\lambda}{0{,}5\,B^1 + dt}$$

λ = conduttività terreno che per casi generali si considera 2 W / m k

$$B^1 = \frac{A}{0{,}5\,P}$$

dt = spessore equivalente
dt = $W + \lambda\,(Rsi + Rf + Rse)$
Rsi = resistenza superficiale interna
Rf = resistenza della fondazione
Rse = resistenza superficiale esterna

c H_μ deve essere calcolato secondo una procedura al quanto complessa che in questa sede non ha scopo di essere riportata.
Il materiale di cui si tratta, ovvero l'EPS, presenta le seguenti caratteristiche termiche:

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, cosicchè 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). Poichè 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, che si misura con i metodi delle norme UNI 7745 e UNI 7891, 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/m³, l'aumentata dimensione delle celle e quindi il minor numero di schermi che il flusso termico deve traversare fanno aumentare la trasparenza nell'infrarosso e quindi la quantità di calore che passa per irraggiamento. Oltre i 50 kg/m³la conduttività aumenta lentamente per il maggior contributo della conduzione nella parte solida del materiale.

La Fig. 4 dà un valore medio indicativo di λ a temperatura ambiente, in un ampio campo di masse volumiche. Il valore minimo di λ si trova fra 30 e 50 kg/m³, cioè al limite superiore della massa volumica dei prodotti commerciali; il limite inferiore di questa non dovrebbe scendere sotto i 15 kg/m³ considerati dalla norma UNI 7819, per non penalizzare troppo questa caratteristica.

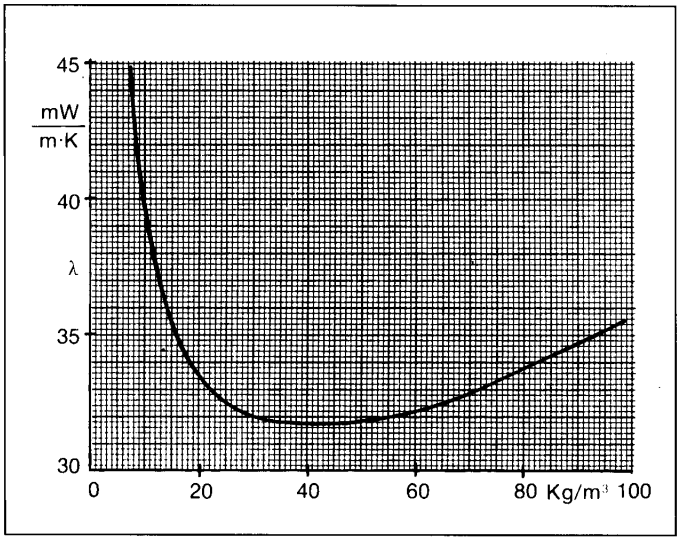


fig. 4

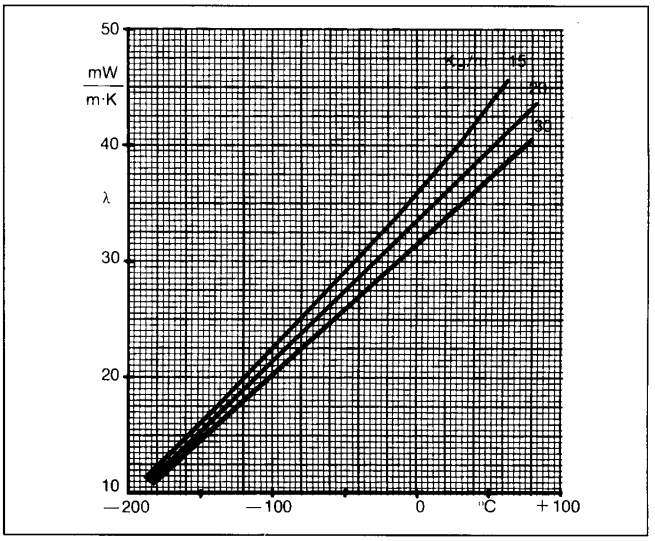
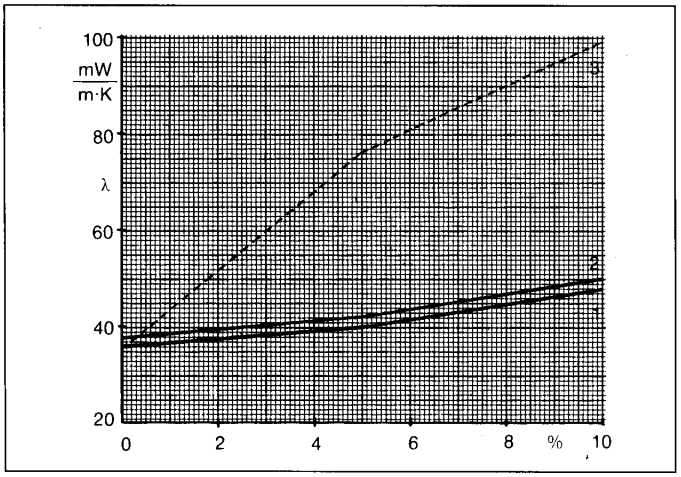


fig. 5

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/m³, 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 valore di λ alle temperature più basse, che permette interessanti applicazioni.

fig. 6



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 un materiale a bassa resistenza alla diffusione del vapore, a temperatura ambiente.

1. : EPS 16 Kg/m³

2: EPS 30 Kg/m³

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/m³ e ancora rilevabile sull'EPS da 20 kg/m³, 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 λ rispetto al valore a 30 mm (di solito impiegato nelle misure di laboratorio) e rispetto a 100 mm, cui si riferisce la norma UNI 7357.

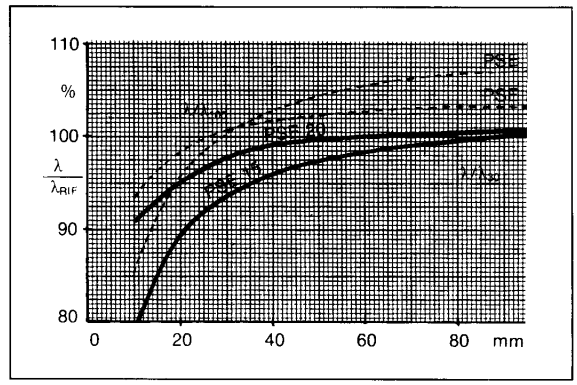


fig. 7

Conduttività termica secondo UNI 7819
La norma UNI 7819 prescrive i valori massimi della conduttività dell'EPS, misurata si campioni di 30 mm di spessore, opportunamente condizionati, alla temperatura media di 10 °C oppure 20 °C. La tabella qui sotto riporta questi valori.

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

Massa volumica (kg/m3)	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					
λ m per EPS UNI 7819	41	37	36	36	
λ per EPS UNI 7819	45	41	40	40	

Conduttività termica di riferimento
La norma UNI 7357 Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento degli "edifici" definisce, al punto 7. 1. 2. le condizioni cui si devono riferire i valori di misura λ 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 20°C
- spessore 100 mm
- valore non superato dal 90% della produzione.

I valori di λ m che la UNI 7357 assume per l'EPS conforme a UNI 7819 sono pure riportati nella precedente tabella.

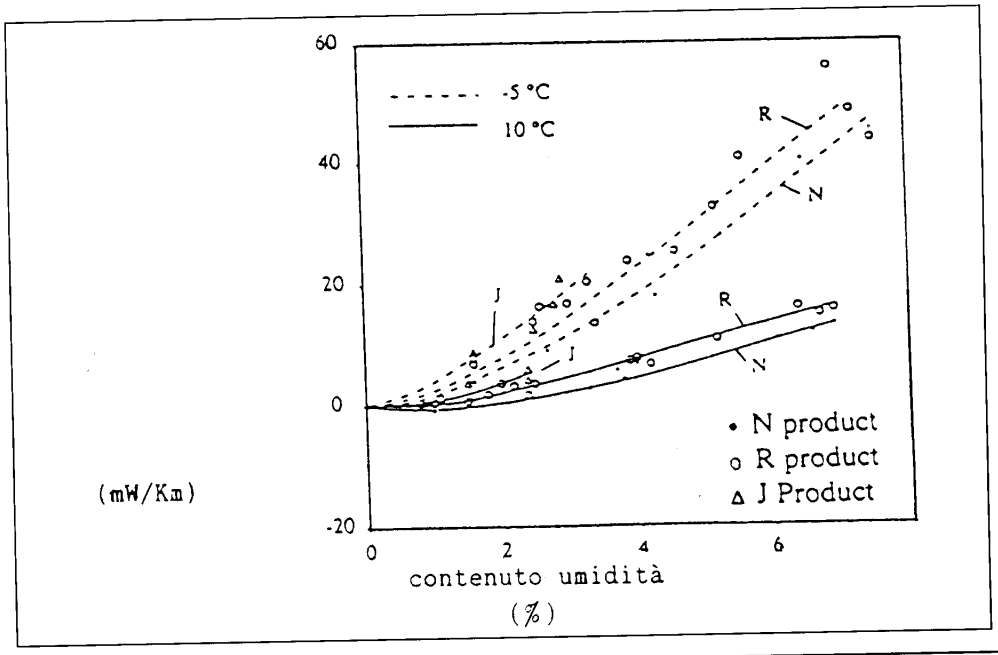
Conduttività termica utile al calcolo

Lo stesso punto 7. 1. 2. della UNI 7357 prescrive che nei calcoli che sono l'oggetto della UNI 7357 si debbano impiegare non i valori di riferimento λ_m sopra definiti, bensì dei valori maggiorati λ, 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 m prevista è il 10% e pertanto i valori λ di calcolo sono quelli riportati nelle apposite righe della tabella precedente.
Quando le condizioni di impiego, per temperatura o spessore, non coincidono con quelle di riferimento, i valori di conduttività utile di calcolo dell'EPS possono essere modificati in base ai dati di Fig. 5 e Fig. 7.
L'isolamento termico creato dallo strato di EPS dipende in gran parte dal contenuto di umidità dato che il materiale rimane a contatto con il terreno per tutta la durata dell'opera.
Per riportare alcuni dati significativi relativi al grado di isolamento termico in rapporto al contenuto di umidità alcuni istituti stranieri hanno realizzato alcune sperimentazioni e prelevato alcuni campioni da casi realizzati per studiare la problematica. I risultati finali sono confortanti e confermano i valori che vengono riscontrati mediante prove di laboratorio utili creando i metodi proposti dalle norme in atto. Il primo riferimento di dati è scaturito ad alcuni interventi realizzati in anni differenti di cui si sono prelevati campioni di EPS che sono stati sottoposti a verifica.

ETA' COSTRUZIONE	DENSITA' EPS SECCO	UMIDITA' CONTENUTA IN CAMPO	UMIDITA' CONTENUTA DOPO 28 GIORNI DI IMMERSIONE IN ACQUA DEL CAMPIONE PRELEVATO
5	15.0	1.8	5.2
7	14.5	5.0	3.1
8	13.4	0.5	4.3
8	13.7	1.7	5.1
8	14.1	1.7	5.1
8	24.0	2.1	2.1
9	16.6	2.5	3.8
11	10.7	2.4	1.9
11	11.4	1.3	3.9
MEDIA	14.8	2.1	3.8

I risultati sono nella tabella riportata qui a fianco.
La ragionevole secondaria verifica è stata di verificare cosa cambia nell'EPS al variare del proprio contenuto di umidità. I risultati ottenuti sono riportati nel grafico qui sotto;



dove:
N = EPS con 15 Kg/m³
R = EPS con 20 Kg/m³
J = EPS con 33 Kg/m³

Le prove sono state condotte con due temperature di riferimento a - 5°C ed a + 10°C.

I valori di conduttività termica sono riportati come variazione rispetto al valore di riferimento pari a zero.
Si può notare che un aumento del valore di λ di 0,01 W/Km (ovvero minore del 30% rispetto al valore del materiale secco) corrisponde ad un valore di contenuto in umidità pari al 2 ÷ 3% in volume.

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 perchè 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 MN/m3e 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≤ Kg/m³), considera i tipi della tabella a lato.

Rigidità dinamica dell'EPS per isolamento dal calpestio

Spessore t.q. mm	Spessore sotto carico di 2 kN/m² mm	Rigidità dinamica MN/m3
17	15	30
22 *	20	20
27	25	15
33	30	15
38 *	35	10
44	40	10

* Tipi da preferire

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, nonchè 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

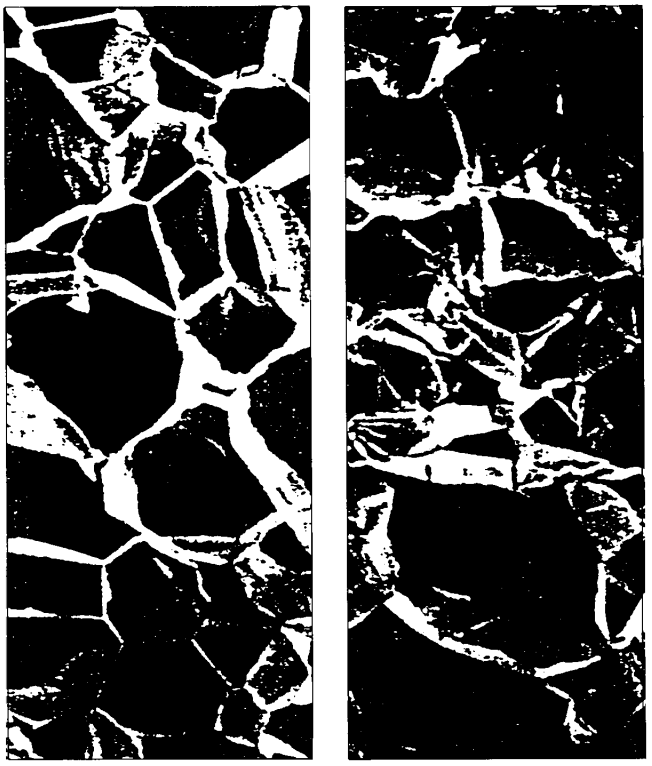
Il primo viene prodotto come precedentemente espresso e quindi dai blocchi vengono ricavate le lastre di dimensioni volute. Il procedimento di produzione dell'EPS elasticizzato parte infatti da normali blocchi di EPS, di massa volumica intorno a 13 kg/m^3, ottenuti però con granulometrie e condizioni 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 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 W/mK, come valore di calcolo secondo la UNI 7357.

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 tondeggiante 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.

A B



Sezioni di PSE al microscopio elettronico a scansione (200 X)
A: (sinistra) espanso normale
B: (destra) espanso elasticizzato (Montedipe)

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 200x200 mm e dello spessore commerciale da esaminare, si 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 kPa, che simula la massa del pavimento galleggiante. A questa piastra viene fissato rigidamente un eccitatore di vibrazioni assiali di frequenza varibile e un eccelerometro. La frequenza viene variata fino ad individuare la frequenza di risonanza f_R (Hz), per la quale massima l'ampiezza delle oscillazioni.
La rigidità dinamica S' data dalla somma

materiale	rigidità dinamica (MN/m³)
EPS Tradizionale	60 - 120
EPS Elasticizzato	310 - 30

$$S' = S'_G + S'_L \ (MN/m^3)$$

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:

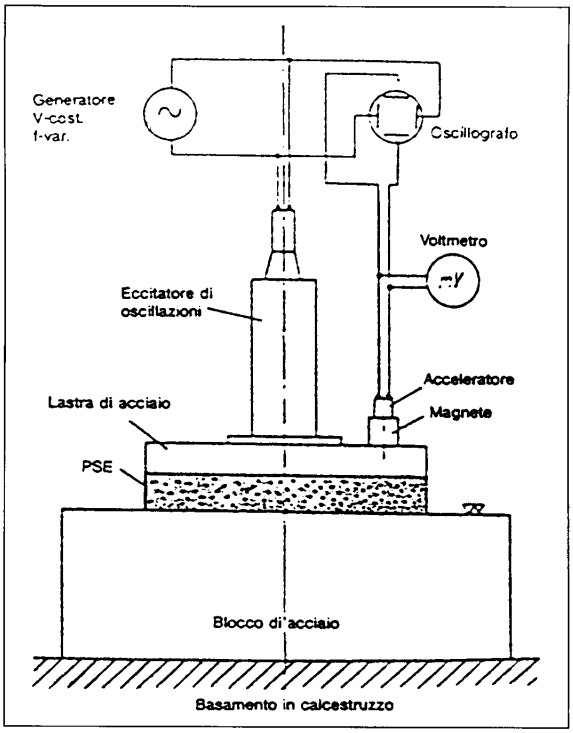
$$S'_G = 4 \cdot 10^{-5} \, m' f_R^2 \ (MN/m^3)$$

dove m' (kg/m³) è la massa areica della piastra oscillante (comprendente quella dell'eccitatore).
La rigidità dinamica S'_L dell'aria delle celle è data dalla relazione:

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

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.



Schema dell'apparecchio per la misura della rigidità dinamica (Weber - Plasticonstruction 1976, p. 8)

Spessore senza carico d_L mm	Spessore sotto carico d_B mm	Classe di rigidità dinamica MN/m3	Resistenza termica m^2 K/W
17	15	30	0,33
22	20	20	0,44
27	25	15	0,55
33	30	15	0,66
38	35	10	0,77
44	40	10	0,88

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 oppurtune 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.

Sostanze inerti per l'EPS

- Acqua, acqua di mare, soluzioni saline
- Materiali da costruzione (calce, cemento, gesso ecc.)
- Sali (p. es. efflorescenze di salnitro), concimi
- Soluzioni alcaline (idrato sodico e potassico, soluz. ammoniacali, acqua di calce, candeggianti, acqua ossigenata, concimi liquidi)
- Saponi e detersivi sintetici
- Acidi diluiti e acidi deboli (p. es. citrico, carbonico, acidi urici)
- Acidi concentrati (cloridrico 35%, nitrico 50%, solforico 95%)
- Alcoli (metilico, etilico, ecc.)
- Glicoli, glicerina
- Oli siliconici
- Bitumi, adesivi e masse bituminose a base acquosa.

Sostanze che attaccano o distruggono l'EPS

- Esteri (acetati, ftalati, diluenti per vernici)
- Eteri (etilico, glicolico, diossano)
- Chetoni (acetone, cicloesanone)
- Composti organicialogenati (trielina, tetracloruro di carbonio, fluorocarburi)
- Ammine, ammidi, nitrili
- Idrocarburi aromatici (benzolo, stirolo, toluolo, ecc.) cicloesano
- Benzina e vapori di benzina
- Gasolio, olio combustibile, olio di paraffina, vaselina (sostanze con azione più limitata)
- Ragia minerale, trementina
- Bitumi e masse bituminose con solventi
- Derivati dal catrame

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 sterne, 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 si 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, perchè 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.

Marco Masoero
Dipartimento di Energetica - Politecnico di Torino

Le vibrazioni negli edifici

Caratteristiche del fenomeno e riferimenti normativi

Introduzione

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 intemazionali (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'intemo defl'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 ricettore 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(t), definito attraverso la relazione:

$$a_{RMS} = [(1/T) \int_0^T a^2(t)\, dt]^{1/2} \qquad (1)$$

dove T rappresenta il tempo di integrazione. 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 sè (accelerazione o velocità di vibrazione) al relativo livello, espresso in dB, e definito, nel caso dell'accelerazione, come:

$$L_a = 20 \log (a_{RMS}/a_0) \qquad (2)$$

dove:

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

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.
La misura delle grandezze precedentemente elencate consente una valutazione del fenomeno da un punto di vista strettamente fisico. Se si vuole invece fornire degli indicatori di tipo psico-fisico, legati cioè alla capacità percettiva dell'uomo, occorre definire un criterio di pesatura dei valori oggettivi ottenuti con la misurazione della grandezza fisica, basato sulla risposta dell'organismo umano ad una sollecitazione vibratoria di determinate caratteristiche. I fattori che determinano la risposta soggettiva dell'individuo sono essenzialmente i seguenti:

- l'andamento temporale del fenomeno vibratorio: la vibrazione può essere considerata sostanzialmente costante quando il livello (rilevato con costante di tempo slow - 1 s) varia nel tempo in un intervallo di ampiezza inferiore a 5 dB, non costante quando la variazione supera i 5 dB, o impulsiva quando costituita da eventi di breve durata caratterizzati da un rapido innalzamento del livello (cfr. UNI 9614);
  la direzione di propagazione della vibrazione, riferita alla postura del soggetto esposto indicando convenzionalmente come asse Z quello passante per il coccige e la testa, asse X quello passante per la schiena e il petto e asse Y quello passante per le due spalle (cfr. UNI 9614);

- la gamma di frequenze rilevanti: come detto, in campo edilizio l'intervallo normalmente considerato compreso fra 1 e 80 Hz..

La definizione di criteri che consentano di misurare e valutare gli effetti soggettivi delle vibrazioni problema di notevole complessità, trattato da numerose normative a livello nazionale e internazionale che sono tuttora in evoluzione.

Gli studi svolti in questo campo indicano che:

- per vibrazioni nella direzione dell'asse Z (verticale) il corpo, sia in posizione eretta che seduta, ha il massimo di sensibilità in termini di accelerazione nel campo di frequenza 4÷8 Hz;
- per vibrazioni sugli assi X e Y (orizzontali) esiste un massimo di sensibilità nell'intervallo di frequenza 1÷ 2 Hz;
- la tolleranza a vibrazioni orizzontali minore sotto i 5 Hz rispetto a quella per vibrazioni sull'asse Z, ma è più grande (di circa 10 dB) per frequenze maggiori;
- per quanto concerne la posizione, la sensibilità maggiore in posizione seduta, e questo particolarmente accentuato alle frequenze più basse;
- per soggetti in posizione eretta esiste un minimo di sensibilità a 1.7 Hz e un massimo tra 6 e 15 Hz.

La norma ISO 2631 prevede due metodi di valutazione. Il primo metodo prescrive l'esecuzione di rilievi di accelerazione in bande di terzi di ottava nelle tre direzioni confrontando i livelli spettrali con le curve limite fornite dalla norma. Il secondo metodo (più semplificato del precedente) consiste nel determinare mediante opportuni filtri che riproducono la risposta soggettiva a vibrazioni di varia frequenza, valori globali di accelerazione RMS pesata; l'accelerazione di vibrazione pesata in frequenza viene indicata con il simbolo a_w e il corrispondente livello con il simbolo L_w.

Merita sottolineare che i due approcci sopra delineati sono concettualmente simili a metodologie adottate in acustica.

Il disturbo da rumore viene infatti talvolta quantificato sovrapponendo lo spettro misurato del rumore con curve convenzionali che rappresentano un criterio di valutazione normalizzato (ad esempio le curve NR - Noise Rating); in altri casi si fa riferimento ad un unico valore di livello globale pesato attraverso le curve di ponderazione normalizzate, la più utilizzata delle quali è la ben nota curva A.

Le vibrazioni di livello non costante possono essere valutate in termini di disturbo a partire dall'indicatore livello equivalente di accelerazione $a_{w,eq}$ rilevato/calcolato in un intervallo di tempo prestabilito T:

$$a_{w,eq} = [(1/T\int[a_w(t)^2\, dt]^{1/2} \qquad (3)$$

dove la durata di T dipende ovviamente dalla natura del fenomeno in esame. Anche in questo caso è evidente l'analogia con il concetto di livello di pressione sonora (pesata A) equivalente ($L_{A,eq}$) comunemente utilizzato per quantificare il disturbo da rumore ambientale.

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, rigidezze 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 sostanziahnente 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'intemo 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 letteratura, 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.
Ricavato quindi per via analitico-numerica o per via sperimentale, il valore del livello di vibrazione in corrispondenza del punto ricettore, l'accettabilità del dato deve essere valutata alla luce di opportuni riferimenti normativi, per una descrizione dei quali si rimanda ai paragrafi che seguono.

Normative di riferimento

Si esaminano in questo paragrafo alcune recenti normative ISO e UNI che costituiscono un utilissimo riferimento per la valutazione del disturbo e/o del rischio di danno strutturale in edifici interessati da fenomeni di vibrazione. Per quanto riguarda il disturbo, i principali riferimenti sono costituiti dalla norma ISO 2631 "Evaluation of human exposure to whole body vibration" ed in particolare dalle parti 1 "General requirements" e 2 "Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz)". La norma ISO 2631 assume particolare rilevanza pratica poichè ad

essa fanno riferimento le Norme tecniche per la redazione degli Studi di impatto Ambientale, per la componente ambientale "Vibrazioni", emanate come DPCM 28.12.1988.
Alla citata norma ISO 2631 fa riferimento, seppur con alcune non trascurabili differenze, la norma UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo".
Per quanto riguarda invece il rischio da danno strutturale, il riferimento normativo italiano costituito dalla UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici'.
Merita inoltre ricordare, fra le norme di Paesi stranieri, la norma tedesca DIN 4150 "Structural vibration in buildings" (Part 1: Principles, predetermination and measurement of vibration parameters; Part 2: Effects on humans in buildings; Part 3: Effects on structures" e la norma britannica BS 6472 "Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1-80 Hz)".

ISO 2631/2 "Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 to 80 Hz)

La ISO 2631-2 si applica a vibrazioni trasmesse da superfici solide lungo gli assi x, y e z per persone in piedi sedute o coricate. Il campo di frequenze considerato è di 1-80 Hz e il parametro di valutazione è il valore efficace dell'accelerazione. La norma definisce tre curve base per le accelerazioni e tre curve base per le velocità (in funzione delle frequenze di centro banda definite per terzi di ottava) che rappresentano le curve approssimate di ugual risposta in termini di disturbo, rispettivamente per le accelerazioni riferite all'asse Z, agli assi X,Y e alla combinazione dei tre assi (i valori numerici delle curve base sono riportati in Tabella 1).
L'annex A della ISO 2631-2 (che non rappresenta peraltro parte integrale della norma) fornisce informazioni sui criteri di valutazione della risposta soggettiva alle vibrazioni; in pratica sono riportati i fattori di moltiplicazione da applicare alle curve base delle accelerazioni e delle velocità al variare del periodo di riferimento (giorno e notte), del tipo di vibrazione (vibrazioni continue o intermittenti, vibrazioni transitorie) e del tipo di insediamento (ospedali laboratori di precisione, residenze, uffici, industrie); i valori dei fattori di moltiplicazione sono indicati in Tabella 2.
Le vibrazioni devono essere misurate nel punto di ingresso nel corpo umano e deve essere rilevato il valore RMS di accelerazione perpendicolarmente alla superficie vibrante. Nel caso di edifici residenziali in cui non facilmente definibile un asse specifico di vibrazione, in quanto lo stesso edificio può essere usato da persone in piedi o coricate in diverse ore del giorno, la norma presenta una curva limite che tiene conto delle condizioni più sfavorevoli combinate in tre assi.

UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo

Nella norma viene definito il metodo di misura delle vibrazioni di livello costante e non costante immesse negli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi. I locali o gli edifici vengono classificati a seconda della loro destinazione d'uso in:

- aree critiche
- abitazioni
- uffici
- fabbriche

Diversa sensibilità viene attribuita alle abitazioni nel periodo diurno dalle ore 7.00 alle 22. 00 e nel periodo notturno definito dalle ore 22. 00 alle 7. 00.
Nell'Appendice della norma UNI 9614, che non costituisce parte integrante della norma, si indica che la valutazione del disturbo associato alle vibrazioni di livello costante deve essere svolta confrontando i valori delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, o i corrispondenti livelli più elevati riscontrati sui tre assi, con una serie di valori limite riportati nei prospetti II e III (Tabella 3). Quando i valori o i livelli delle vibrazioni in esame superano i limiti, le vibrazioni

possono essere considerate oggettivamente disturbanti per il soggetto esposto.
Nel caso di vibrazioni di tipo impulsivo è necessario misurare il livello di picco dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza; tale livello deve essere successivamente diminuito di 3 dB al fine di stimare il corrispondente livello efficace. I limiti (Tabella 4) possono essere adottati se il numero di eventi impulsivi giornalieri non è superiore a tre. Nel caso si manifestino più di tre eventi impulsivi giornalieri i limiti fissati per le abitazioni gli uffici e le fabbriche vanno diminuiti in base al numero di eventi e alla loro durata, moltiplicandoli per un fattore correttivo F. Nessuna riduzione può essere applicata per le aree critiche. Nel caso di impulsi di durata inferiore a 1 s si deve porre $F = 1.7\text{-}N^{-0.5}$. Nel caso di impulsi di durata superiore a 1 s si deve porre $F = 1.7\text{-}N^{-0.5}.t^{k}$, con k = 1.22 per pavimenti in calcestruzzo e k = 0.32 per pavimenti in legno. Qualora i limiti così calcolati risultassero inferiori ai limiti previsti per le vibrazioni di livello stazionario, dovranno essere adottati questi ultimi valori.

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 vibratori 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, nonchè 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.) nonchè ad eccitazioni 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 vibratori 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 supefficie di scorrimento potenziale (Tipo d); terreni granulari, sabbie, ghiaie (senza coesione) e argille coesive sature (Tipo e) e materiale di riporto (Tipo f).

Tabella 1

Valori numerici per le curve base delle accelerazioni (ISO 2631-2)

FREQUENZA	ACCELERAZIONE in $m/s^2 \times 10^{-3}$		
	ASSE Z	ASSI X,Y	ASSI COMBINATI X,Y,Z
1	10	3.6	3.6
1.25	8.9	3.6	3.6
1.6	8	3.6	3.6
2	7	3.6	3.6
2.5	6.3	4.51	3.72
3.15	5.7	5.68	3.87
4	5	7.21	4.07
5	5	9.02	4.3
6.3	5	11.4	4.6
8	5	14.4	5
10	6.3	18	6.3
12.5	7.81	22.5	7.8
16	10	28.9	10
20	12.5	36.1	12.5
25	15.6	45.1	15.6
31.5	19.7	56.8	19.7
40	25	72.1	25
50	31.3	90.2	31.3
63	39.4	114	39.4
80	50	144	50

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 massimne ammissibili per l'edificio nel suo complesso misurate alla fondazione, per i campi di frequenze < 10 Hz, 10÷50 Hz e 50÷100, sono:

- 20÷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.

Conclusioni

L'articolo ha sinteticamente passato in rassegna le metodologie ed i riferimenti normativi di interesse per la valutazione degli effetti delle vibrazioni negli edifici.
L'argomento riveste notevole interesse pratico, data la crescente attenzione al tema della qualità e della sicurezza degli ambienti abitativi e di lavoro.
Le metodologie di indagine teorico-numerica e sperimentale sono complessivamente ben definite, anche se la loro applicazione richiede una notevole competenza sull'argomento ed esperienza pratica, soprattutto per quanto riguarda l'esecuzione dei rilievi strumentali.
Sul fronte della normativa, sia in sede internazionale (ISO) e sia a livello nazionale (UNI) è stato effettuato in questi anni un notevole sforzo per sviluppare norme tecniche dettagliate ed aggiornate.
Tuttora in evoluzione, su questo terreno, il problema della definizione di criteri quanto più oggettivi per consentire di valutare il disturbo degli individui esposti alle vibrazioni a partire da dati fisici rilevati o calcolati.

Tabella 2
Fattori di moltiplicazione delle curve base (ISO 2631-2 Annex A)

DESTINAZIONE D'USO	PERIODO	VIBRAZIONI CONT. O INTERMITTENTI	VIBRAZIONI TRANSITORIE
Luoghi di lavoro critici (camere operatorie, teatri laboratori di precisione, ecc.)	Giorno Notte	1	1
Edifici residenziali	Giorno Notte	2÷4 1.4	30÷90 1.4÷20
Uffici	Giorno Notte	4	60÷128
Luoghi di lavoro	Giorno Notte	8	90÷128

Tabella 3
Limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, di livello costante e non costante, validi per l'asse Z e gli assi X e Y (ISO 9614)

DESTINAZIONE D'USO	a m/s^2	L dB
	Asse Z	
Aree critiche	$5.0 \cdot 10^{-3}$	74
Abitazioni (Notte)	$7.0 \cdot 10^{-3}$	77
Abitazioni (Giorno)	$10.0 \cdot 10^{-3}$	80
Uffici	$20.0 \cdot 10^{-3}$	86
Fabbriche	$40.0 \cdot 10^{-3}$	92
	Assi X e Y	
Aree critiche	$3.6 \cdot 10^{-3}$	71
Abitazioni (Notte 5.0 . 10-3		74
Abitazioni (Giorno)	$7.2 \cdot 10^{-3}$	77
Uffici	$14.4 \cdot 10^{-3}$	83
Fabbriche	$28.8 \cdot 10^{-3}$	89

Tabella 4

Limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, validi per le vibrazioni impulsive (ISO 9614)

DESTINAZIONE D'USO	Asse Z m/s^2	Assi E e Y m/s^2
Aree critiche	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$3.6 \,.\, 10^{-3}$
Abitazioni (Notte)	$7.0 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \,.\, 10^{-3}$
Abitazioni (Giorno)	0.30	0.22
Uffici	0.64	0.46
Fabbriche	0.64	0.46

Alessandro De Stefano, Donato Sabia, Leonardo Sabia
Politecnico di Torino, Dip. Ingegneria Strutturale

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

Introduzione

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.

L'efficacia dello schermo, per, dipende non soltanto dalla capacità di taglio locale sulle ampiezze delle onde elastiche incidenti attraverso il suolo, ma anche dalla dinamica globale del sistema suolo-schermo-struttura.
Nel seguente lavoro si evidenzierà come l'analisi preventiva della risposta dinamica, effettuata con l'ausilio di un modello numerico, importante per una scelta avveduta e per un dimensionamento corretto del sistema isolante.

Lo schermo isolante

Lo schermo isolante utilizzato per le simulazioni numeriche è costituito da lastre di polistirene alveolare, denoninato commercialmente AIPOR, 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/m3 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.

I modelli numerici

Sono stati predisposti tre modelli FEM (Finite Element Models), identici salvo che per la scelta delle proprietà meccaniche del materiale isolante degli schermi
I modelli sono stati allestiti utilizzando il codice di calcolo COSMOS (S.R.A.C.).
Essi rappresentano una semplice struttura piana, costituita da un plinto massivo e rigido, due pilastri in calcestruzzo armato, una traversa superiore rigida, una parete contro terra in laterizio.
Sono stati utilizzati elementi "shell" a quattro nodi per rappresentare le sezioni delle parti massive ed elementi "beam" per simulare i pilastri, il muro e la traversa superiore.
Lo schema, eguale per i tre modelli, illustrato dalle figure I ed 1 bis (quest'ultima evidenzia il dettaglio della struttura); la tabella I associa a ciascun componente strutturale, con riferimento alle didascalie della fig. 1 bis, la sigla del materiale che ad esso è attribuito.

Tabella 1
Materiali associati ai componenti strutturali

Componente strutturale	Sigla identificativa del materiale (con riferimento alle figg, 1 e 1 bis)
Plinto	MP 1
Suolo	MP 2
Materiale isolante 1 (AIPOR GL)	MP 3 (a)
Materiale isolante 2 (AIPOR GLS)	MP 3 (b)
Pilastri	MP 4
Traversa rigida sommitale	MP 5
Muro contro terra	MP 6

Nella tabella 2 sono riportati i caratteri distintivi dei tre diversi modelli, con riferimento al tipo di schermo isolante adottato per ciascuno di essi. Si osservi che si è preso in considerazione solo il polistirene di maggior densità (20 k g/m^3) ritenendolo più adeguato ad una utilizzazione sotto fondazione, quale contemplata dallo schema delle figure 1 ed 1 bis.

Tabella 2
Caratteristiche distintive dei modelli numerici

Identificazione del modello numerico	Caratteri distintivi
Modello 1	Non vi è materiale isolante tra struttura e suolo
Modello 2	Strato di isolante AIPOR GLS (MP 3 b)
Modello 3	Strato isolante di AIPOR GL (MP 3 a)

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^2]	Modulo di Poisson v	Modulo tangenziale [N/mm^2]	Densità di massa [kg/m^3]
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	-

Determinazione sperimentale delle proprietà meccaniche.
Le caratteristiche meccaniche delle lastre di polistirene, usate come schermo anti-vibrazioni, sono

state rilevate presso il Laboratorio sperimentale del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Torino utilizzando un attuatore idraulico reversibile servocontrollato elettronicamente con azione programmabile (MTS). I saggi sottoposti a prova erano prismi di AIPOR di dimensioni 70x70x50 mm. Essi sono stati sollecitati dall'attuatore in direzione parallela al lato più corto, imponendo cicli di carico e scarico parziale, con controllo automatico dello spostamento relativo tra le facce ortogonali alla direzione di sollecitazione. Alcune prove cicliche (quasi-statiche) sono state effettuate con bassa velocità di esecuzione: altre (dinamiche) con velocità maggiore (3 cicli al secondo). In tutti i casi si è provveduto ad imporre un precarico iniziale, corrispondente ad uno spostamento di 5 mm (pari al 10% dello spessore iniziale), effettuando poi cicli di carico scarico tra 4 e 6 nM con una escursione di ± 1 mm rispetto alla configurazione di precarico. Le figure 2,3 e 4 illustrano, a titolo di esempio, l'esito delle prove quasi-statiche su alcuni saggi. Le sigle riportate sulle figure indicano la densità (12 o 20 k g/m^3) e la qualità di comportamento elastico (GL o GLS). La cifra presente alla fine della sigla in alcuni saggi indica il numero d'ordine del saggio; non indicata in corrispondenza del primo tra saggi uguali sperimentati in successione. Le prove quasi statiche sono state utilizzate per verificare la stabilizzazione dei cicli di isteresi e per ricavare la stima del coefficiente di smorzamento relativo. Vale, infatti, la relazione $\zeta = A_{ist} / A_{tot} \bullet (1 / 4\pi)$, ove: ζ indica lo smorzamento relativo e A_{ist} / A_{tot} è il rapporto tra l'area di isteresi di un semiciclo (energia dissipata) e l'area sottesa tra la curva di carico e l'asse degli spostamenti (energia assorbita). La figura 5 mostra uno dei cicli di isteresi e riporta l'area racchiusa in un ciclo intero (il doppio di quella di semiciclo). Il valor medio dello smorzamento relativo, valido per tutti i saggi, circa pari a 0,02. Le prove dinamiche sono, invece, utilizzate per definire il modulo elastico tangente, da utilizzare come stima del modulo elastico nelle simulazioni di dinamica vibratoria. Nelle figure 6 e 8 sono illustrate le risposte dinamiche di saggi di materiale SA20 con qualità elastica GLS e GL rispettivamente. Le figure 7 e 9 isolano alcuni cicli dalle stesse prove per maggiore chiarezza rappresentativa. I moduli elastici, dedotti con il metodo dei minimi quadrati, sono indicati nella tabella 3.

Eccitazione e risposte dinamiche

L'eccitazione è attuata imponendo sul suolo, in corrispondenza del nodo 162 (vedi fig. 1), in direzione verticale, un accelerogramma ottenuto dagli Autori misurando le accelerazioni verticali su una rotaia al passaggio di una motrice tranviaria. Le figure 11-22 riportano le risposte dinamiche nel tempo nel nodo 1387 (fig.1), per i tre modelli, secondo lo schema indicato nella seguente tabella 4. Le unità di misura appartengono al sistema SI.

Tabella 4: contenuto delle figure 11-21

Figura	Direzione	Grandezza rilevata
11	orizzontale	spostamento
12	orizzontale	accelerazione
13	verticale	spostamento
14	verticale	accelerazione
15	orizzontale	spostamento
16	orizzontale	accelerazione
17	verticale	spostamento
18	verticale	accelerazione
19	orizzontale	spostamento
20	orizzontale	accelerazione
21	verticale	spostamento
22	verticale	accelerazione

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/s²]	Spostamento massimo orizzontale disp-x [mm]	Accelerazione massima verticale acc-y [m/s²]	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

Conclusioni

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, poichè riduce il disturbo fisiologico, soprattutto quando l'eccitazione costituita da vibrazione con rilevante energia nel dominio delle frequenze più elevate. Gli schermi di AIPOR 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.

Bibliografia

[1] J.M.FIELDS - "*Railway Noise and Vibration Annoyance in Residential Areas*"- Journal of Sound and Vibration, 66(3) 445-448, 1979
[2] E.TASSILY, N.VINCENT - "*Prévision et Contrôle des Vibrations Transises au Sol par le Trains*"- Revue Générale des Chemins de Fer, 108 année, Décembre, 1989
[3] E.E.UNGAR, E.K.BENDER -"*Vibration Produced in Buildings by Passage of Subway Trains: Parameter Estimation for Preliminary Design*" - Inter-Noise 75 Sendai, Japan, pp. 491-498, 1975
[4] G.F.MILLER, H.PURSEY - "*The Field and Radiation Impedence of Mechanical Radiators on the Free Surface of a Semi-Infinite Isotropic Solid*" - Proc. R. Soc. London, vol. 223, pp. 521-54, 1954
[5] J.MELKE, S.KRAENER - "*Diagnostic Methods in the Control of Railway Noise and Vibration*" - Journal of Sound and Vibration, 87, pp. 377-386, 1983
[6] R.D.WOODS - "*Screening of Surface Waves in Soils*" - J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, vol. 94, n. SM4, pp.951-979, luglio 1968
[7] G.VOLBERG - "*Propagation of Ground Vibrations near Railway Tracks*" - Journal of Sound and Vibration, 87, n.2, 1983
[8] J.T.NELSON, H.J.SAURENMAN - "*State of the Art Review Prediction and Control of Groundborne Noise and Vibration from Rail Transit Trains*" - U.S. Department of Transportation Report UMTA-06-0049-83-4, 1983

[9] K.ISHII, A.TACHIBANA - "*Field Measurement of Structure-borne Sound in Buildings*"- Acoustical Society of America Reprint No. L 10, 1978
[10] "*Erschutterungen im Bauwesen*" - DIN 4150, 1986
[11] Toronto Traffic Commission - "*Yonge subway Northern Extension Noise and Vibration Study*" - Book 1, Report RD 115/3, 1976
[12] P.NELSON - "*Transportation noise reference book*"- Butterworths, 1987 -
[13] H.H.BOLT, L.L.BERANEK, R.B.NEWMANN - "*Handbook of Acoustic Noise Control*" WADC TR, pp. 52-204, dic. 1952
[14] "*Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration*" - ISO Standard 2631, 1974
[15] "*Guide for the Evaluation of Human Exposure to Vibration and Shock in Buildings: Addendum 1: Acceptable Magnitudes of Vibration*" Standard Addendum ISO-2631 L:DADI, 1980
[16] "*Guide to the Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings*" Draft Standard ANSI-53.29, 1983
[171 "*Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings (1 Hz to 80 Hz)*"- Bs 6472, 1984

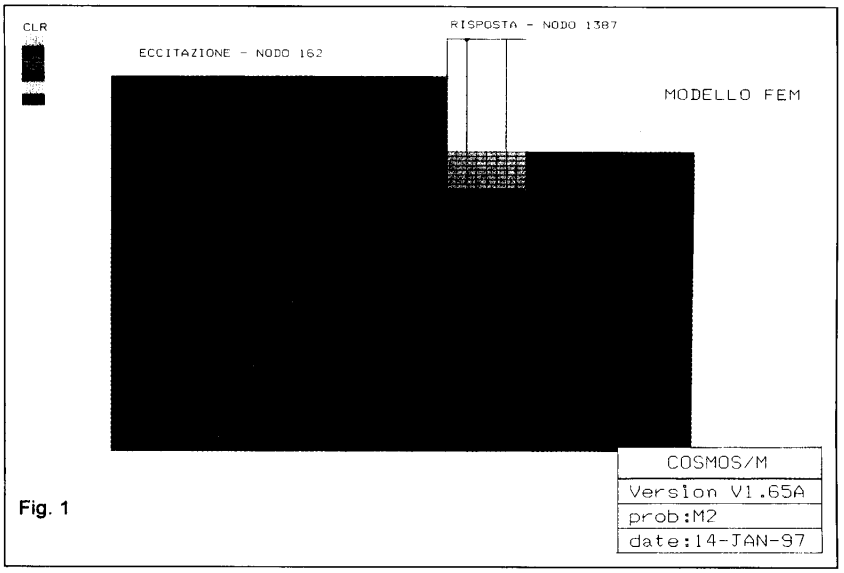


Fig. 1

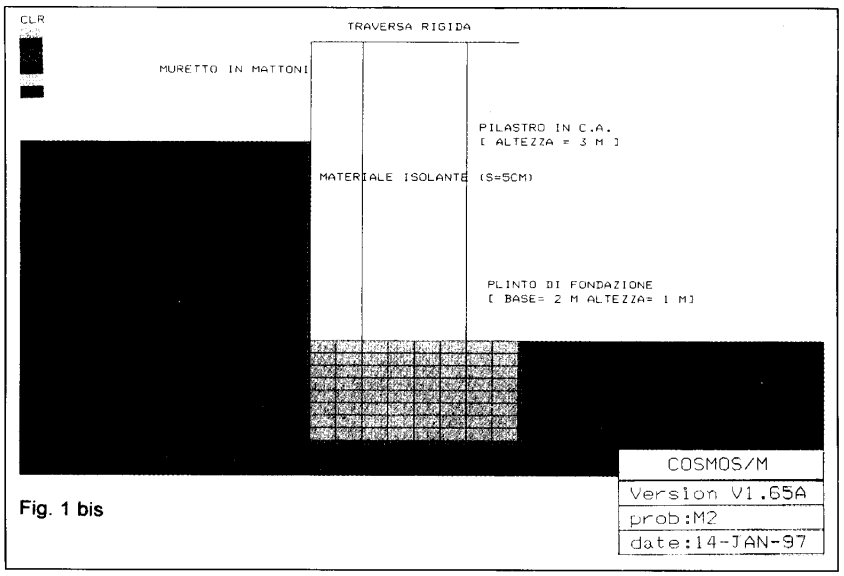


Fig. 1 bis

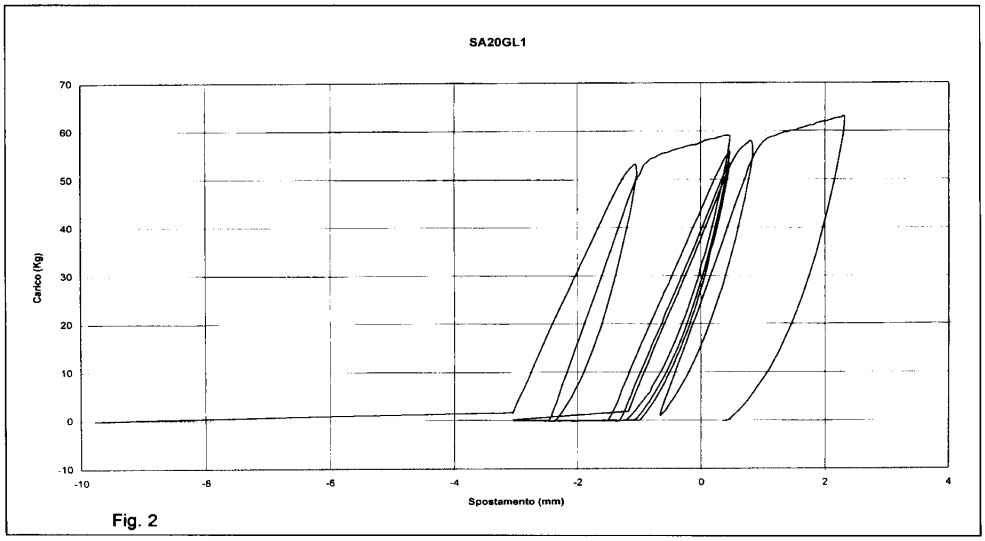


Fig. 2

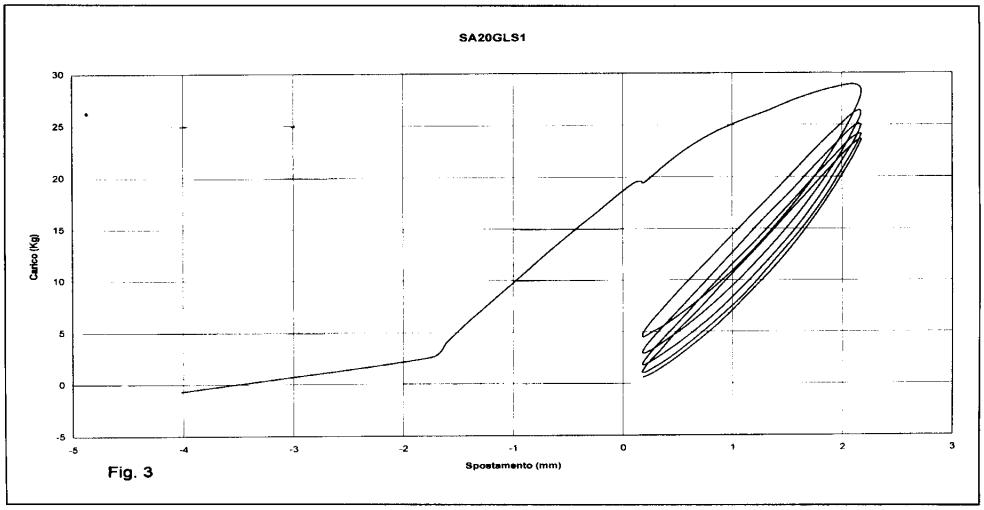


Fig. 3

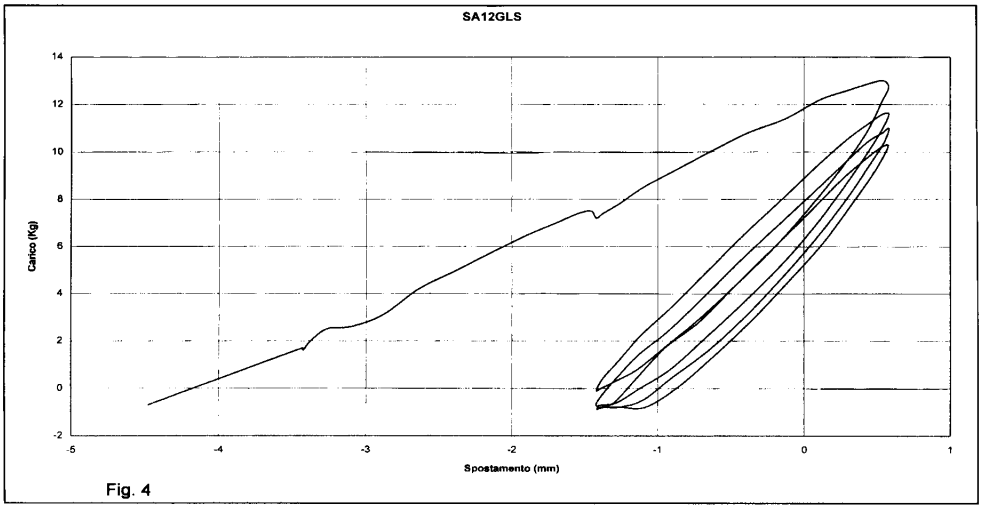


Fig. 4

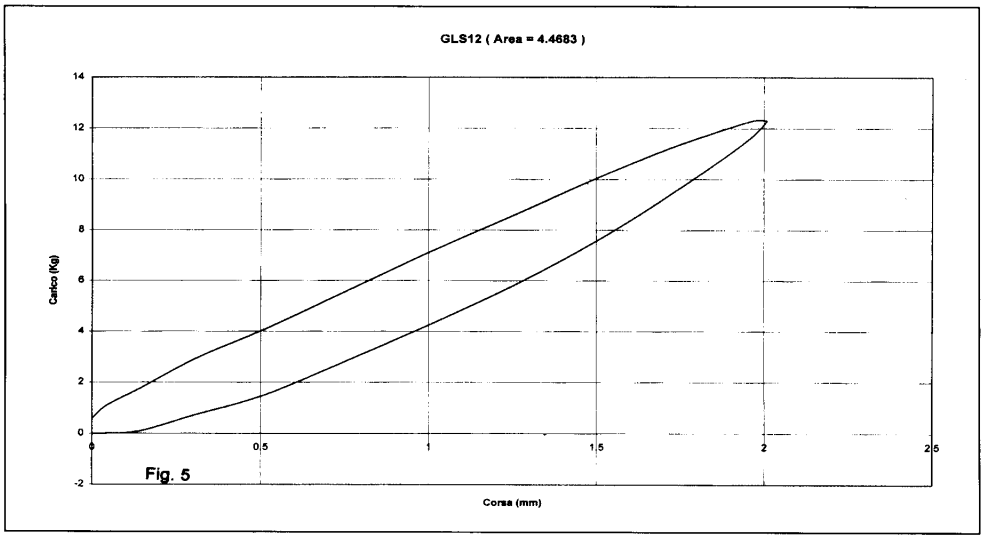


Fig. 5

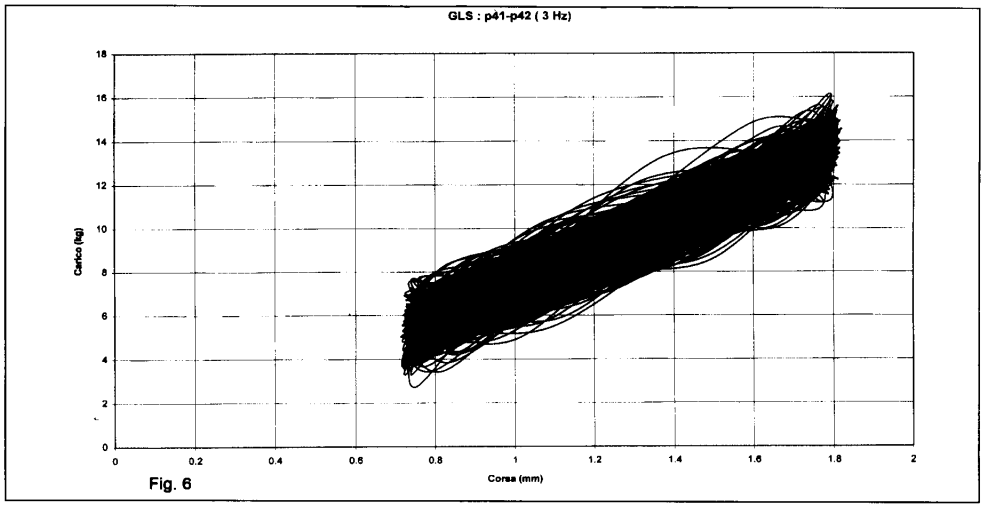


Fig. 6

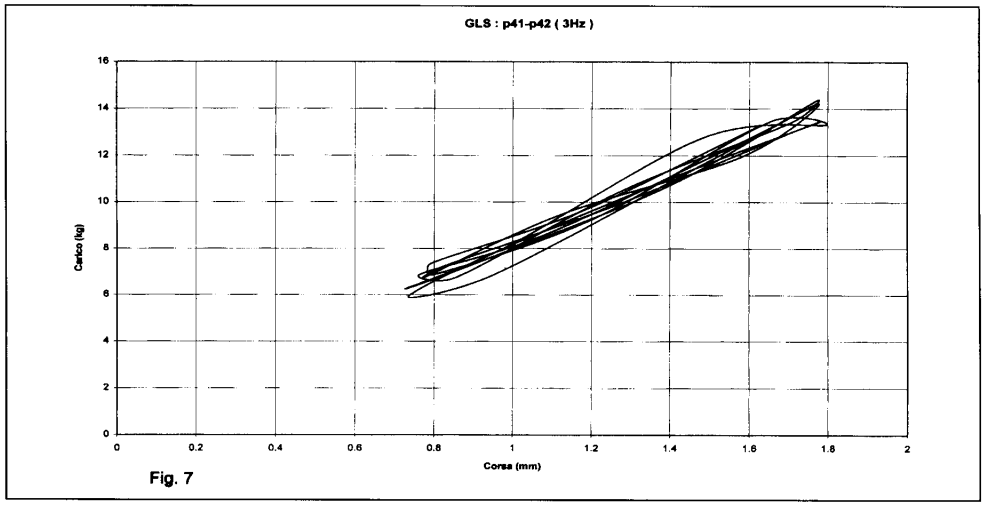


Fig. 7

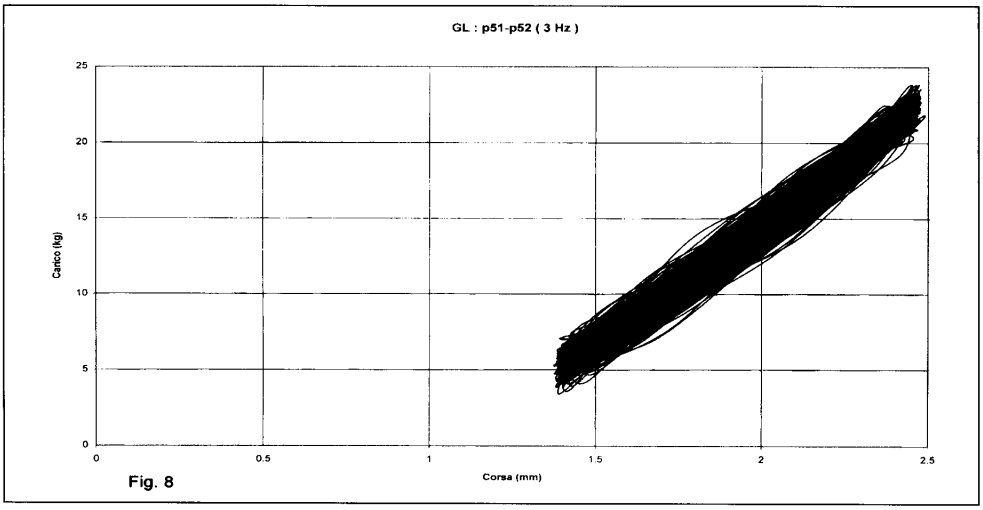


Fig. 8

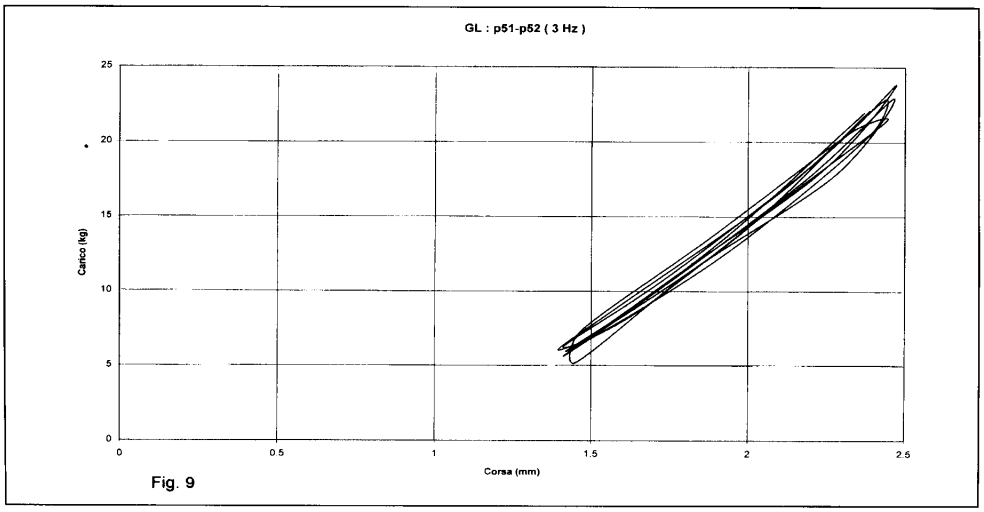


Fig. 9

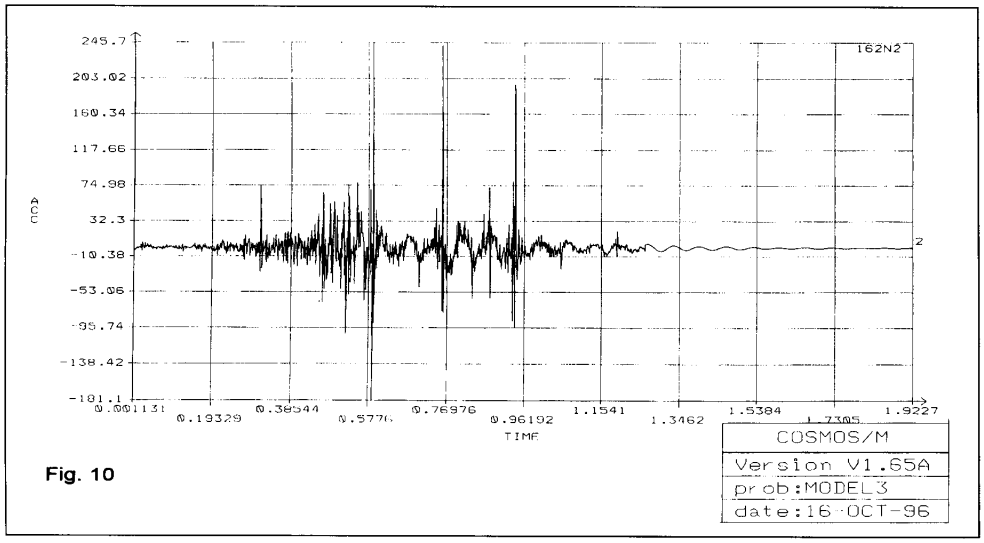


Fig. 10

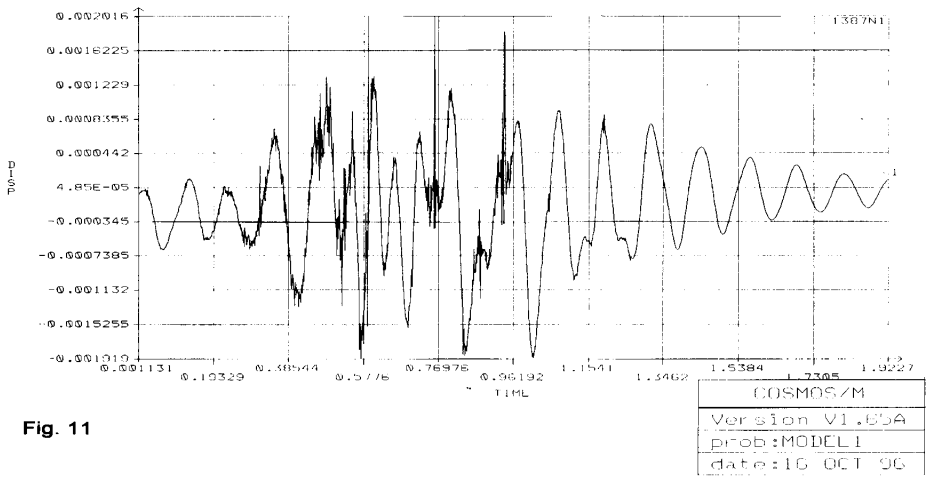


Fig. 11

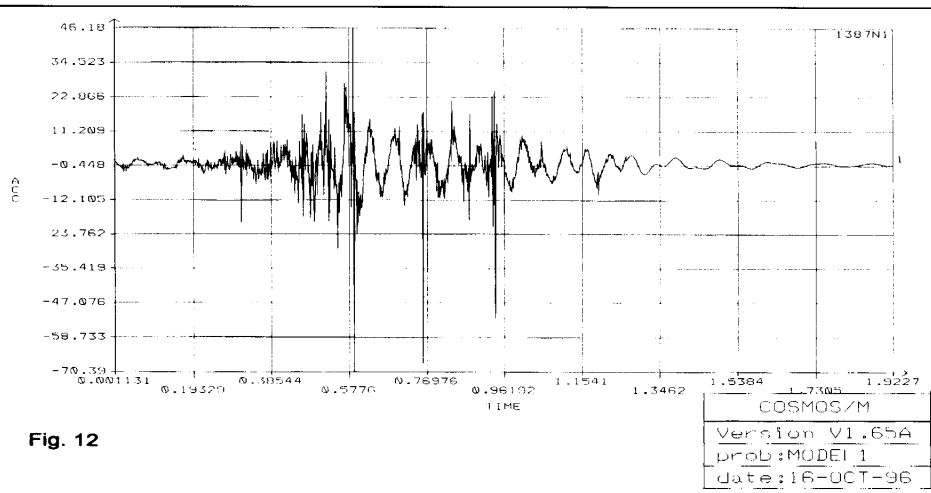


Fig. 12

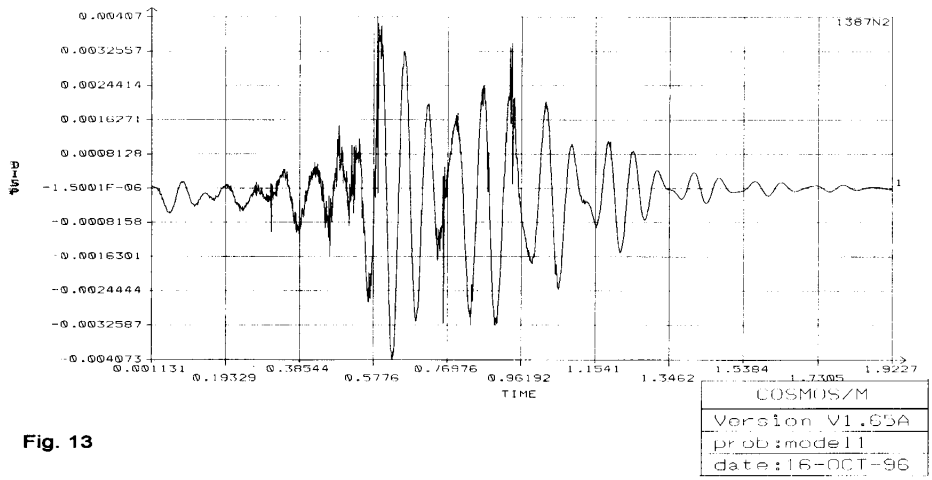


Fig. 13

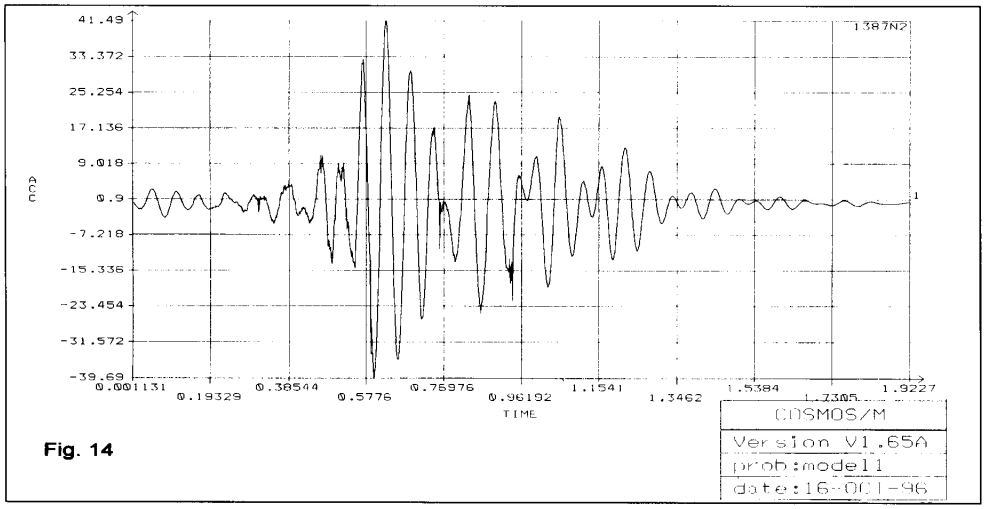


Fig. 14

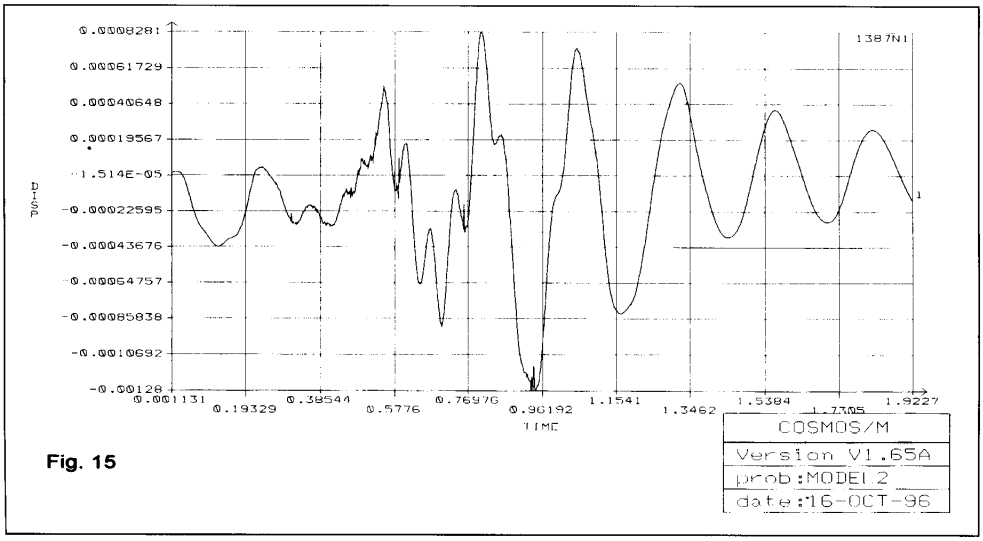


Fig. 15

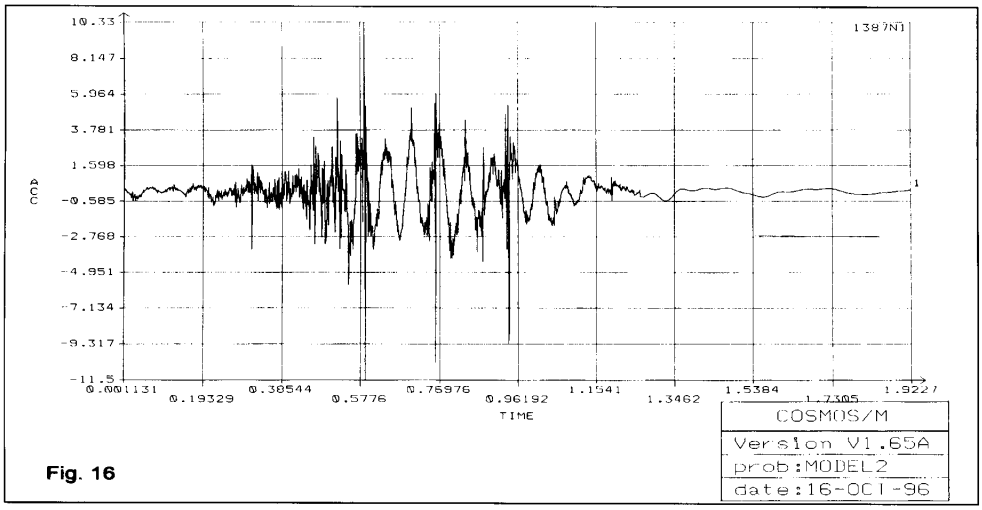


Fig. 16

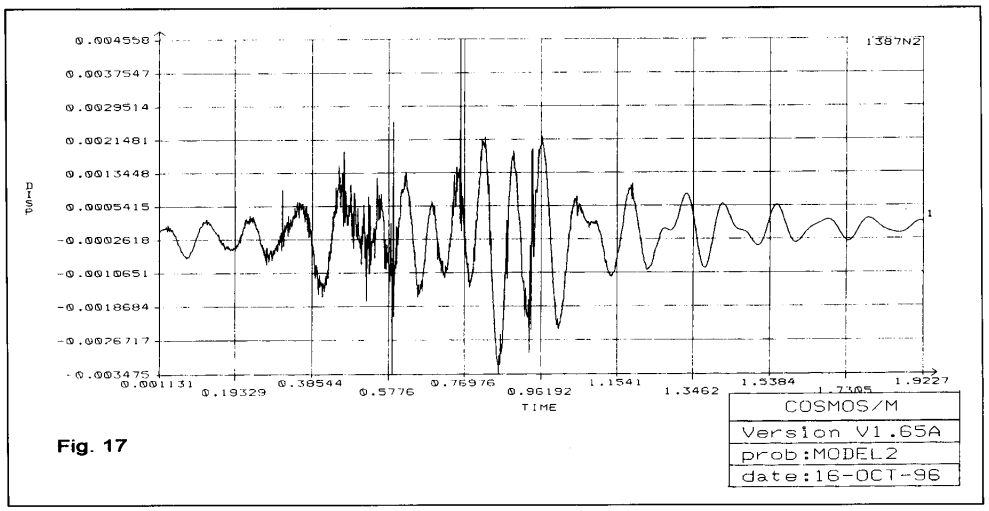


Fig. 17

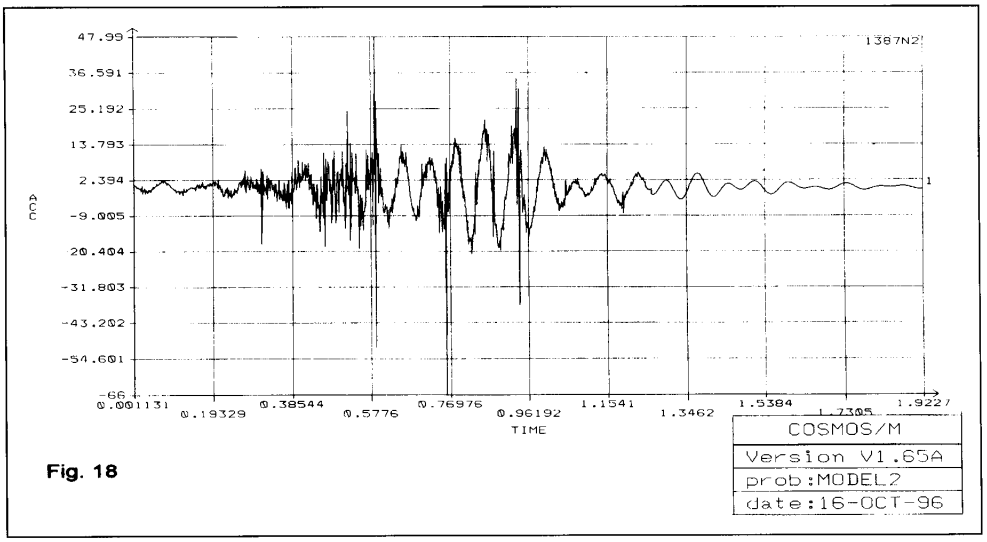


Fig. 18

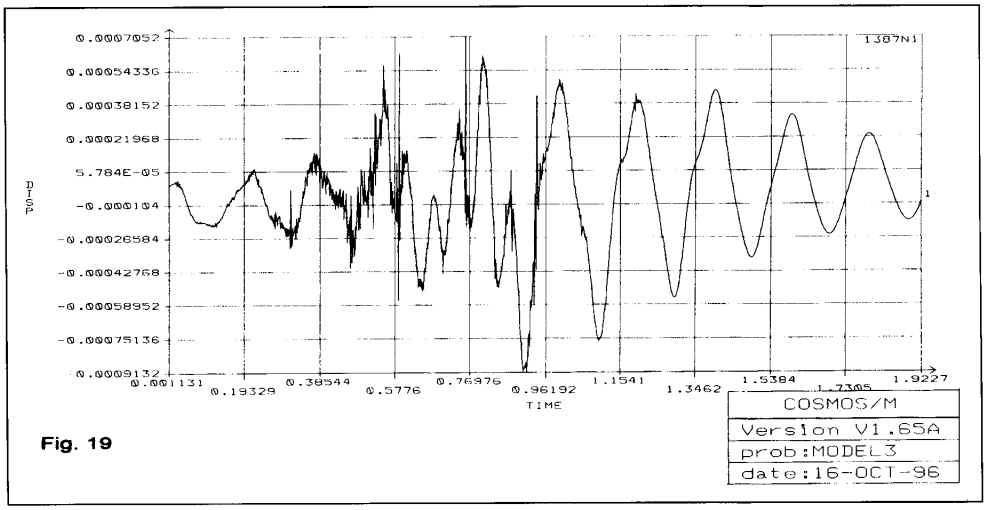


Fig. 19

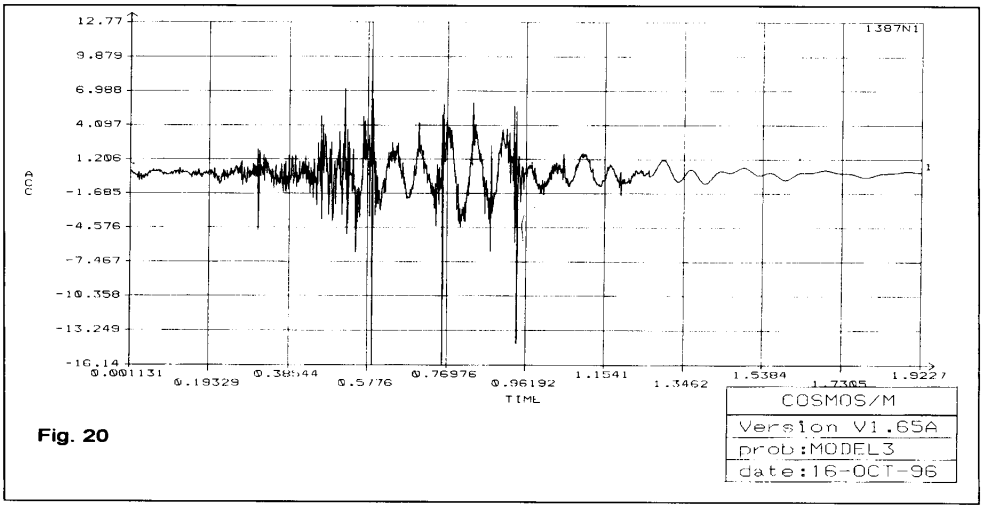


Fig. 20

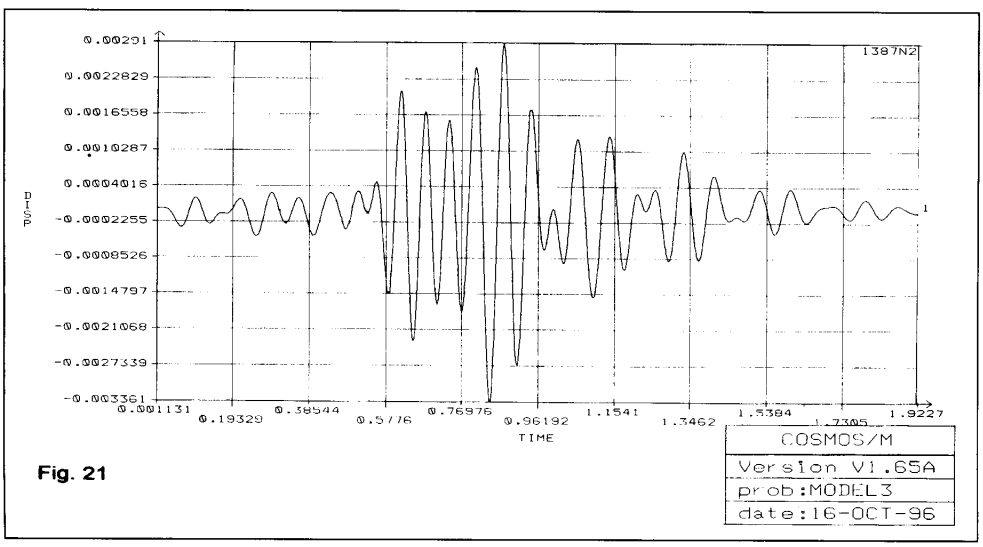


Fig. 21

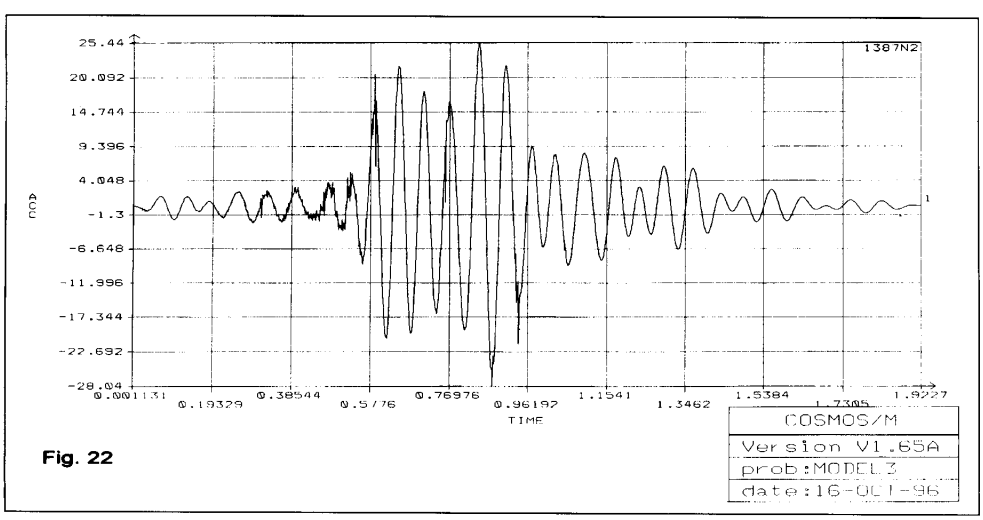


Fig. 22

Giacomo Kayon
Istituto Sperimentale delle Ferrovie

Le sottofondazioni per lo smorzamento delle vibrazioni esterne

Le Ferrovie dello Stato ampiamente presenti su tutto il territorio nazionale hanno raggiunto un elevato livello di sperimentazione dei materiali utilizzati in ambito specifico. Le F.S. non hanno ancora iniziato ad utilizzare l'EPS (polistirene espanso sinterizzato) in campo ferroviario come ammortizzante per le vibrazioni in quanto la sperimentazione sullo stesso è ancora in fase di sviluppo.
L'EPS è un materiale che presenta alcune caratteristiche particolari: è inerte all'acqua di mare, ai materiali da costruzione, ai saponi, agli acidi non particolarmente concentrati ed ai bitumi a base acquosa.
Alcune sostanze come gli eteri e i bitumi possono invece attaccare l'EPS; nonostante questo il materiale si mantiene come una sostanza del tutto inerte, per tale motivo sono state intrapprese sperimentazioni per utilizzare l'EPS e verificare le prestazioni nel tempo. Un altro interessante aspetto dell'EPS è il basso valore di CRIP (deformazione permanente sotto carico nel tempo), per cui l'EPS debolmente sollecitato (0,015 N/m^2 = 0,1 Kg/cm2) può essere considerato un materiale ottimale per sottofondazioni.
L'EPS a distanza di 1 anno presenta un bassissimo valore di crip e dopo 10 anni questo valore si incrementa molto debolmente. L'EPS verrà utilizzato quando la curva di sollecitazione sarà idonea e quindi in una sottofondazione dove i livelli di carico sono bassi. Questo assicura che il valore di crip per 10 anni di utilizzo sarà quasi nullo.
Per ottenere deformazioni inferiori al 2% verranno utilizzati materiali con densità pari a 30-35 Kg/m^3 in modo che le sollecitazioni interne siano minime.
Possono anche essere utilizzate densità di 15 Kg/m^3 facendo attenzione che il valore di crip sia comparabile con l'utilizzo.
Se le sollecitazioni presentano valori di 0,2 - 0,1 Kg/cm^2 dovremo utilizzare un materiale con densità piuttosto alta in modo tale che il crip risulti basso.
Chiaramente l'EPS non potrà essere utilizzato in presenza di forti sollecitazioni ma nelle applicazioni di sottofondazioni. Le linee guida per effettuare un dimensionamento dal punto di vista vibrazionale per le costruzioni derivano da esperienze effettuate nel settore stradale e ferroviario.
Una strada presenta un conglomerato bituminoso e l'EPS può essere pensato e posto come sottofondazione e quindi sotto ad uno strato di ripartizione del carico. Per le Ferrovie il metodo non è completamente diverso anche se più complesso.
Devono essere considerati i carichi agenti e gli strati di sostegno, le azioni ed il propagarsi della perturbazione vibrazionale.
Il materiale smorzante dovrà quindi essere posto in una zona mediana in modo da creare una barriera e resistere ai carichi agenti.
L'azione è creata dal locomotore (peso per asse) mentre la reazione al carico è garantita dalla rotaia, dalla traversa, dal ballast, dallo strato smorzante e dal terreno.
Non è possibile analizzare il dimensionamento di uno strato di EPS posto come strato smorzante in quanto mancano alcuni elementi di tipo sperimentale, l'EPS è un materiale conosciuto ma in campo vibrazionale non ci sono ancora dati sufficienti.

Si dovrà quindi sviluppare una sperimentazione completa seguendo alcune normative e metodi determinare le caratteristiche necessarie ad un corretto dimensionamento.
È necessario mettere in evidenza le dimensioni delle sezioni, i carichi di progetto di tipo statico a bassa frequenza e di tipo dinamico con frequenze dell'ordine di 5-10-15-20-50-60 Hertz. A queste frequenze la rigidezza dinamica è molto importante e deve essere confrontata con gli smorzamenti statici viscosi.
Un secondo punto da approfondire è relativo alle prove di invecchiamento in condizioni reali di utilizzo.
Un'analisi preliminare è stata effettuata sottoponendo a prova alcuni campioni di EPS con differenti densità.

I materiali sperimentati sono di due tipologie

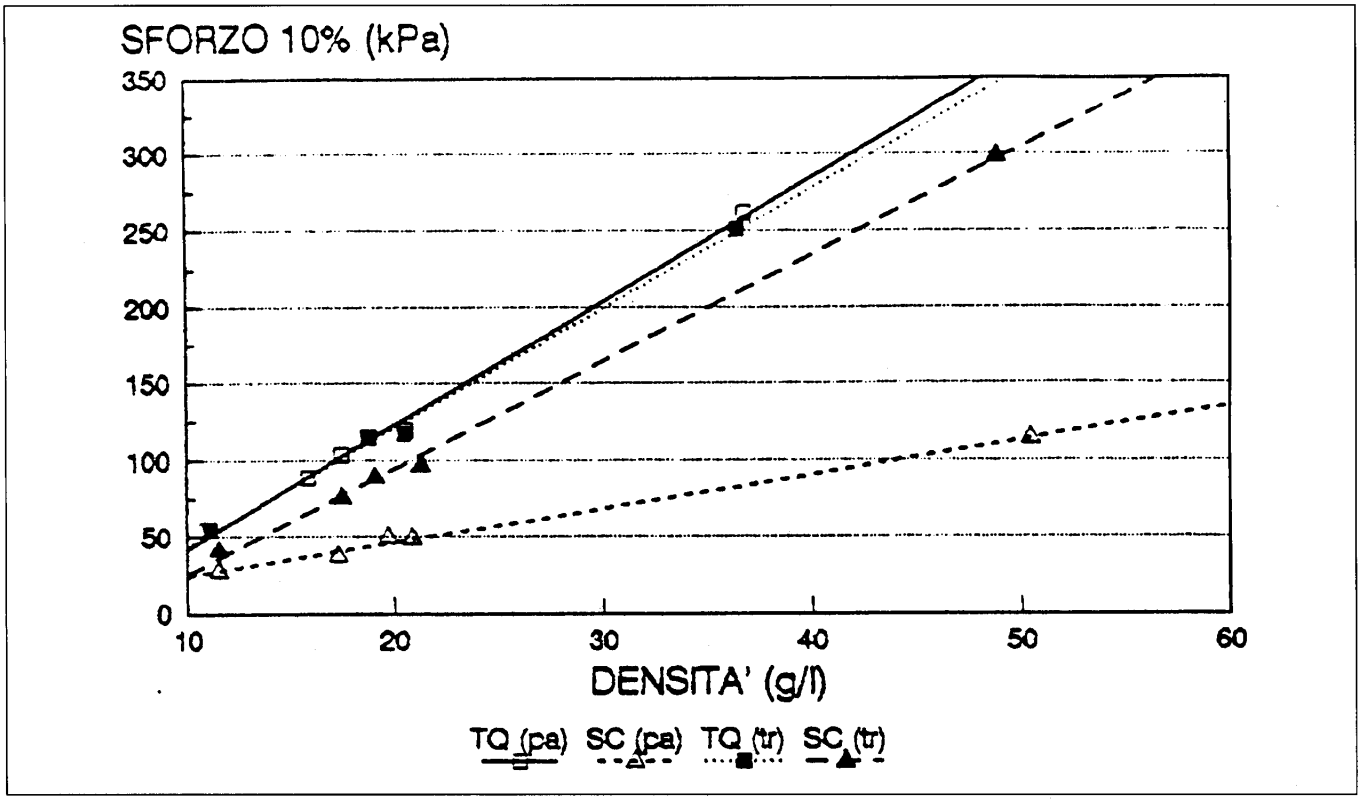
TQ = Tal quale

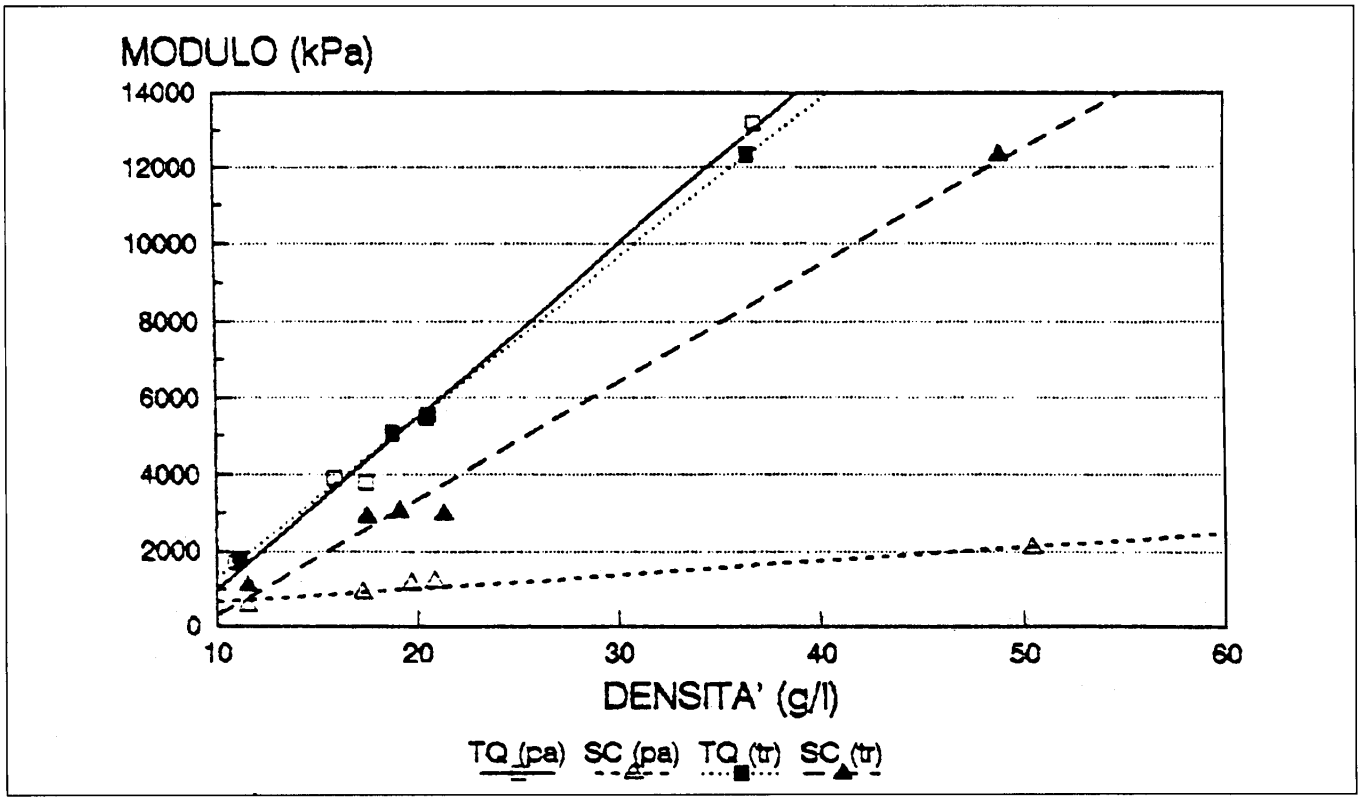
SC = Materiale sottoposto ad uno schiacciamento impulsivo ottenendo un materiale più elastico

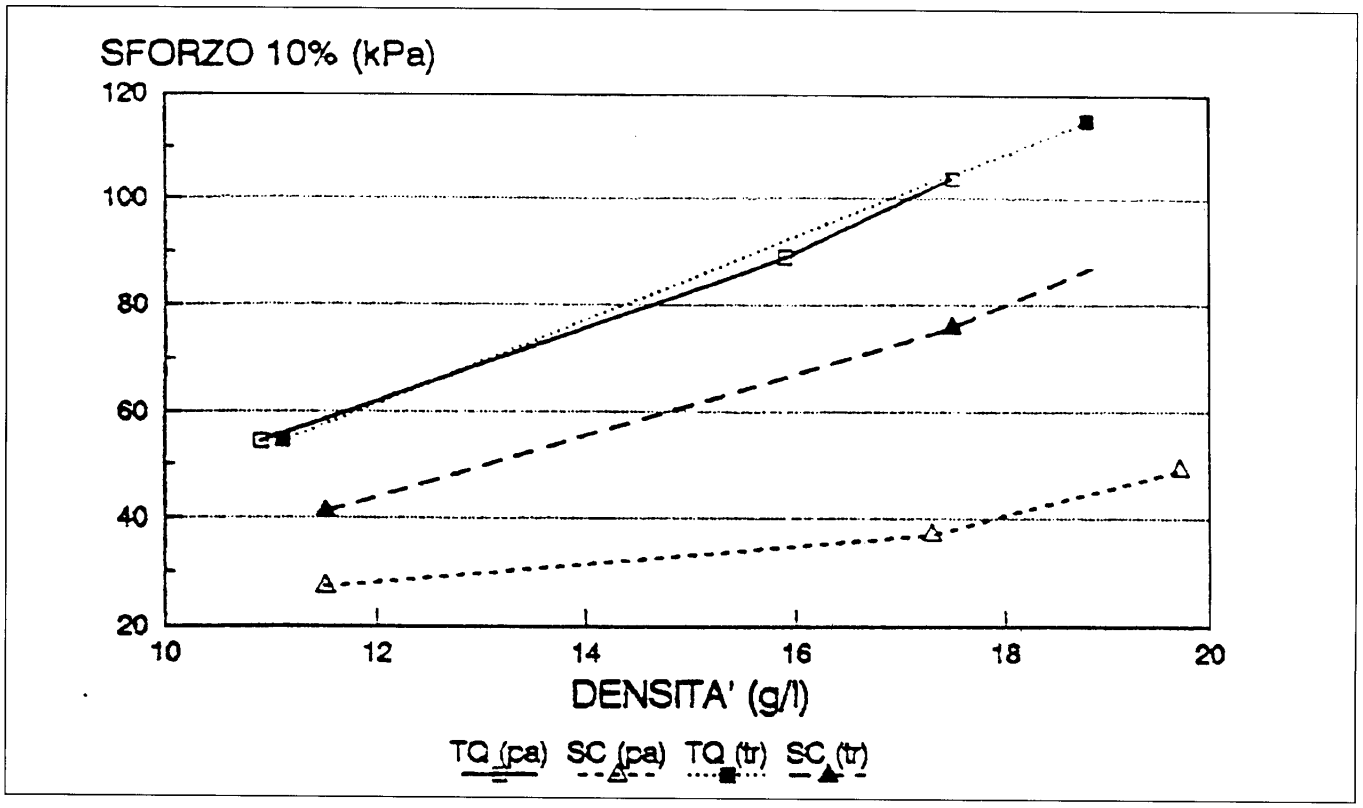
pa = Compressione effettuata in direzione parallela alla direzione di taglio per il tipo TQ ed alla direzione dello schiacciamento per il tipo SC.

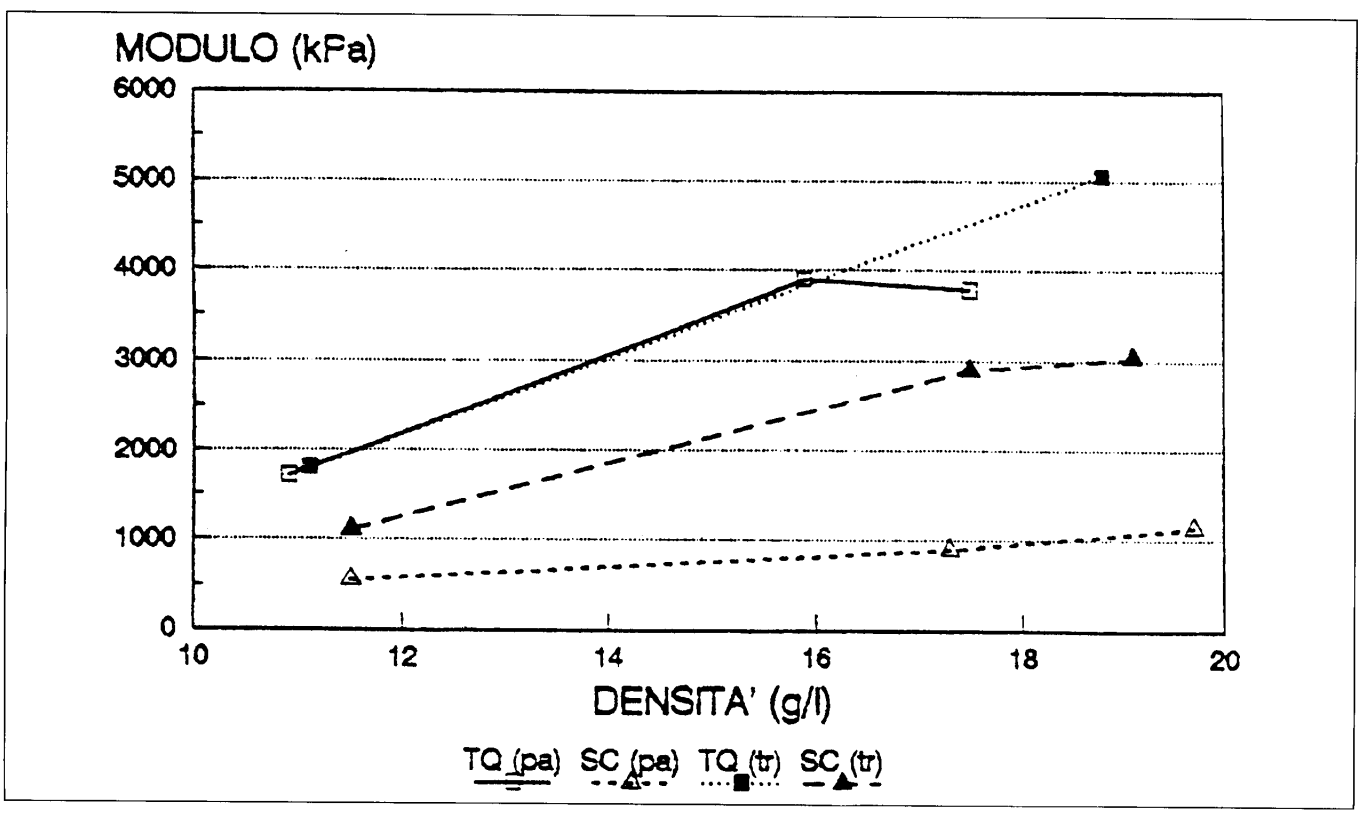
tr = compressione effettuata in direzione perpendicolare alla direzione di taglio per il tipo TQ . ed alla direzione dello schiacciamento per il tipo SC.

I risultati vengono esposti nei quattro grafici alle pagine seguenti, in funzione della densità del materiale.


SFORZO 10% (kPa)
350
300
250
200
150
100
50
0
10
20
30
40
50
60
DENSITA' (g/l)
TQ (pa)
SC (pa)
TQ (tr)
SC (tr)


MODULO (kPa)
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
10
20
30
40
50
60
DENSITA' (g/l)
TQ (pa)
SC (pa)
TQ (tr)
SC (tr)


SFORZO 10% (kPa)
120
100
80
60
40
20
10
12
14
16
18
20
DENSITA' (g/l)
TQ (pa)
SC (pa)
TQ (tr)
SC (tr)


MODULO (kPa)
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
10
12
14
16
18
20
DENSITA' (g/l)
TQ (pa)
SC (pa)
TQ (tr)
SC (tr)

Marco Piana
AIPE

Costruzione di strade, ferrovie e aeroporti

Il polistirene espanso sinterizzato (EPS) nei rilevati, nei riempimenti di muri contro terra e di pile da ponte

Aspetti generali

La realizzazione di vie per la comunicazione su ruote implica la costruzione di una pavimentazione che deve presentare caratteristiche differenti a seconda si tratti di strade, di ferrovie o di aeroporti. Tre aspetti accomunano le pavimentazioni per le tre modalità di trasporto:
1) la formazione di ghiaccio superficiale in presenza di particolari condizioni climatiche;
2) l'assestamento e quindi il cedimento differenziale di alcune zone della pavimentazione;
3) i costi per la realizzazione di riempimenti o terrapieni.
Il primo aspetto viene rimandato a trattazioni specifiche contenute in altre pubblicazioni.
Il secondo ed il terzo aspetto invece sono conseguenze derivanti dal tipo di terreno e dalla tipologia dell'opera da realizzare. La capacità portante dei terreni è una caratteristica basilare per lo studio di un rilevato stradale e quindi per le conseguenze che è in grado di arrecare sia a tempo zero che dopo anni di utilizzo. Annullare quasi totalmente i carichi agenti esterni di un rilevato o di un riempimento, utilizzare metodi costruttivi che permettono di contenere i costi anche a confronto delle tecniche usuali costituiscono considerazioni di indubbio interesse sia per i costruttori sia per i committenti.

Scopo dell'applicazione
Realizzare un rilevato stradale, un terrapieno, portare a livello un muro contro terra oppure una rampa per una pila da ponte richiede un'analisi almeno per due aspetti:
- la capacità portante del terreno
- i costi costruttivi

L'EPS permette di realizzare rilevati e riempimenti con pesi veramente ridotti e costi molto contenuti rispetto alle tecniche di intervento tradizionalmente utilizzate. Il rilevato viene così ad essere costituito da un materiale con peso adeguato in modo da non creare cedimenti differenziali del manto stradale, inoltre l'EPS è un materiale da riporto che evita alcuni principali inconvenienti di movimentazione terra.

I materiali leggeri da riporto
Nei paesi europei la tecnica dei materiali leggeri da riporto viene utilizzata ormai da alcuni decenni. L'esperienza è transitata attraverso materiali come il cemento alleggerito, argilla espansa e materiale da demolizione. Questi prodotti sono stati utilizzati in quanto il terreno ove doveva essere eretto il rilevato presentava caratteristiche meccaniche molto basse tanto da dover intervenire con sistemi di consolidamento. La conseguenza è stata la ricerca del materiale che permettesse di coniugare caratteristiche adeguate a pesi leggeri ed a costi globali contenuti. Dopo ricer-

che e sperimentazioni si è giunti alla considerazione che l'EPS è in grado di garantire tutto questo ed infatti è stato e viene a tutt'oggi impiegato e considerato quale migliore materiale per questa applicazione. I materiali da riporto tradizionali vengono utilizzati in spessori anche considerevoli fino a 3 ÷ 4 m. L'EPS è stato applicato all'inizio in spessori limitati quali 10 cm fino a sperimentare con successo spessori di 5 m fino anche a 10 m. Una seconda considerazione deve essere evidenziata in riferimento al peso del materiale di riporto:

- materiali di riporto tradizionali 2000 Kg/m^3
- materiali leggeri tradizionali di riporto 1000 Kg/m^3
- EPS 20 ÷ 100 Kg/m^3

analizzando le densità in esame con le capacità portanti di terreno incoerenti è facile giungere alla conclusione che con rilevati di peso quasi irrilevante si otterranno pavimentazioni prive di assestamenti differenziali. Un ulteriore aspetto investe i costi finali dell'opera. In questa analisi è bene considerare alcuni elementi che oggi non vengono considerati ma di basilare importanza:

- tempo di realizzazione;
- trasporto materiale di riempimento;
- manutenzioni successive per assestamenti;
- manutenzioni sulle scarpate laterali;
- consolidamento sottofondo rilevato;
- disponibilità materiale tradizionale di riporto evitando impatti ambientali onerosi.

Utilizzo dell'EPS

L'EPS viene utilizzato per tre motivazioni:

- eliminare formazione di ghiaccio della superficie;
- come materiale di riempimento;
- come materiale leggero per rilevati.

In funzione dell'applicazione specifica (ovvero per strade, ferrovie od aeroporti) vengono utilizzate densità da 20 Kg/m^2 a 80 Kg/m^3 con differenti forme e spessori. Inoltre viene utilizzato in quanto un elemento in EPS di dimensioni normali quali ad. 0,5 x 1 x 3 m. con densità 20 Kg/m^3 pesa 30 kg e può essere facilmente movimentato da un unica persona in cantiere. L'EPS presenta estrema facilità nella posa in opera ed anche una elevata adattabilità alle forme che il terreno richiede. Le caratteristiche meccaniche e prestazionali verranno esposte successivamente.

Aspetti ambientali

Il tema inerente agli aspetti ambientali deve essere introdotto analizzando l'intera opera e quindi tutti i materiali che ad essa concorrono. Un rilevato, od una spalla da ponte investe il territorio, ove viene edificato, con importanti conseguenze sia positive sia negative. Sarà sempre un opera non "naturale" ovvero essendo realizzata dall'uomo avrà tutti i connotati della civiltà e della trasformazione. Le motivazioni a cui si giunge perchè l'opera venga realizzata sono però importanti e prioritarie. Poco può servire a scegliere la soluzione della strada in trincea in sostituzione di quella in rilevato: forse il paesaggio viene maggiormente garantito, ma quanti saranno i costi aggiuntivi per non deturpare sopra il piano del terreno!! E quale sarà l'impatto sotto al piano terra? In ogni caso l'opera da realizzare contiene sicuramente un numero elevato di prodotti che col termine naturale hanno poco a che spartire. Quindi l'utilizzo di un prodotto come EPS si pone almeno in modo equipollente con gli attuali. In aggiunta è bene precisare che l'EPS in ogni caso, viene ricoperto, quindi non risulta a vista, rimane nel terreno senza produrre inquinamento, è recuperabile in ogni momento, è di colore bianco quindi sempre individuabile nella massa del rilevato. Un secondo aspetto, non trascurabile, è rappresentato dal materiale di riempimento. Nel caso tradizionale questo viene reperito da cave e trasportato da veicoli con enorme dispendio di tempi, energia, costi. Per questo viene comunque deturpata la zona da cui si ricava il materiale e quindi alla fine si giunge ad un doppio danno ambientale. L'utilizzo di EPS può evitare il traffico di grandi veicoli, il trasferimento di materiale naturale ed il danneggiamento delle aree

di prelievo. Agli aspetti peculiari dell'applicazione possiamo abbinare i sistemi generalizzabili di smaltimento dell'EPS:

- riutilizzo per la fabbricazione di espansi: possibili, entro certe percentuali e per certi impieghi, per scarti e rifiuti puliti;
- trasformazione in ammendanti per terreni, essenzialente come:
  substrato e bonifica di terreno
  ausiliario per il compostaggio
  drenaggio è secondo l'impiego i rifiuti di EPS vengono macinati a granulometrie diverse;
- fusione e granulazione per ricavarne materiale da stampaggio o estrusione per manufatti di limitate esigenze;
- combustione con eventuale ricavo di energia: 1 kg di PSE equivale a 1,2-1,4 litri di olio combustibile; bruciato negli impianti di incenerimento produce soltanto acqua e anidride carbonica;
- discarica: L'EPS, favorendo l'areazione, accellera la decomposizione delle sostanze organiche della discarica e per parte sua non è nocivo nè all'aria, nè al terreno, nè ale acque sotterranee.

Le caratteristiche dell'EPS

L'EPS per le realizzazioni di riempimento deve presentare caratteristiche adeguate e l'azienda produttrice deve attuare una procedura per il controllo della qualità del prodotto da installare. In modo sintetico le caratteristiche principali che l'EPS deve presentare sono:
1) resistenza alla compressione;
2) forma geometrica;
3) resistenza meccanica;
4) durabilità.
I dati relativi al materiale utilizzato devono essere ricercati in base alle sollecitazioni derivanti dall'utilizzo della sede viaria. L'EPS è un materiale prodotto in blocchi o lastre di forme e dimensioni molto diversificate. Il polistirene espanso è una delle forme più importanti in cui viene impiegato il polistirene. Per ottenerlo si seguono attualmente due vie:
a) in fase di polimerizzazione 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 migliori caratteristiche di resistenza al fuoco, possono essere aggiunti in questa fase. Il prodotto, 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^3, ma quella apparente delle perle in mucchio è di circa 650 Kg/m^3. È questo il materiale da cui si parte per produrre il polistirene espanso.
La produzione dei semilavorati e manufatti avviene in tre stadi principali: PRE-ESPANSIONE: le perle vengono pre-espanse, 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. Il grado di espansione, che dipende essenzialmente dalla durata del trattamento termico nel pre-espansore, determina la massa volumica apparente dei manufatti finali; MATURAZIONE: le perle pre-espanse devono stazionare un certo tempo in sili arieggiati; STAMPAGGIO: le perle pre-espanse e stabilizzate possono ora essere trasformate in manufatti o semilavorati con due modi.
1) *Stampaggio di blocchi e taglio a lastre*
Le blocchiere, costituite da forme parallelepipede provviste di fori di entrata per il vapore su tutti i lati, vengono riempite di perle pre-espanse 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 (sinterizzato) 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, du-

rante 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*

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; le più importanti sono riportate nella tabella riportata qui di seguito. Per l'utilizzo nella costruzione di strade, le proprietà più significative dell'EPS sono le seguenti:

- struttura a celle chiuse, che comporta assorbimento d'acqua molto basso;
- resistenza al gelo e imputrescenza;
- non è terreno nutritivo per insetti, muffe, batteri di putrefazione;
- fisiologicamente sicuro, non inquinante per le acque e non contiene espandenti che danneggiano lo strato di ozono;
- buon comportamento sotto carico prolungato, sia statico che dinamico.

Caratteristica	Unità di misura	Tipo				
		I	II	III	IV A	IV B
Massa volumica del lotto, min.	Kg/m3	15	20	25	30	35
Id.tolleranza per singola lastra (±)	%	6	6	6	6	6
Tolleranze dimensionali max (±): Lunghezza e larghezza, fino a 1000 mm	mm	5	5	5	5	5
Lunghezza e larghezza, 1001-2000 mm	mm	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Lunghezza e larghezza, 2001-4000 mm	mm	10	10	10	10	10
Spessore, fino a 50 mm	mm	2	2	2	2	2
Spessore, 51-100 mm	mm	3	3	3	3	3
Squadratura (scostamento su 500 mm)	mm	2	2	2	2	2
Resist.a compr.al 10% di schiacc. min.	KPa	50	100	140	180	220
Conducibilità termica a 10°C, max	mW/m.K	39	36	35	34	34
Id. (in alternativa) a 20°C, max	mW/m.K	41	37	36	35	35
Resistenza a trazione, min	KPa	130	170	220	320	420
Deformaz.sotto carico a caldo, max: -2 d, 80°C, 20 KPa	%	--	4	4	4	4
-7 d, 70°C, 40 KPa	%	--	--	--	4	3
Reazione al fuoco (tipi RF)	Categoria	1	1	1	1	1
Stabilità dimensionale a -25°C, max	%	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Stabilità dimensionale a + 70°C, max	%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Reazione al fuoco (tipi RF Centr.Min.)	Classe	1	1	1	1	1
Resistenza alla diffus. del vapore	Adimens.	20-40	30-50	40-70	50-100	60-120
Assorbim.acqua per immersione	% vol.	4	3	3	2	2

Forme e dimensioni

La geometria più utilizzata per questo impiego è il parallelepipedo con tutti gli angoli retti avente dimensione

2000 x 1000 x 500 mm.
3000 x 1000 x 500 mm.

Le dimensioni devono essere garantite in modo che non vi sia una variazione maggiore dell'1%. La planarità della faccia deve presentare una variazione non superiore ai 3 mm. L'altezza totale del rilevato viene raggiunta sovrapponendo diversi blocchi di dimensioni sopra riportate. È anche possibile realizzare elementi con dimensioni differenti e studiati appositamente per ottimizzare l'altezza o la larghezza dell'opera. Essendo l'EPS un materiale lavorabile in modo molto semplice e veloce è possibile adattare i blocchi alle differenti situazioni.

Densità

La densità è il parametro che maggiormente influenza le caratteristiche meccaniche e funzionali. La determinazione del valore da utilizzare è funzione dell'utilizzo e della geometria che deve essere realizzata. I valori di densità più utilizzati sono i seguenti:
20 kg/m^3, 30 kg/m^3, 40 kg/m^3 con variazione relativa di caratteristiche e di costi. La densità maggiormente utilizzata per rilevati stradali è di 20 ÷ 25 kg/m^3.

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 è 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/mm2

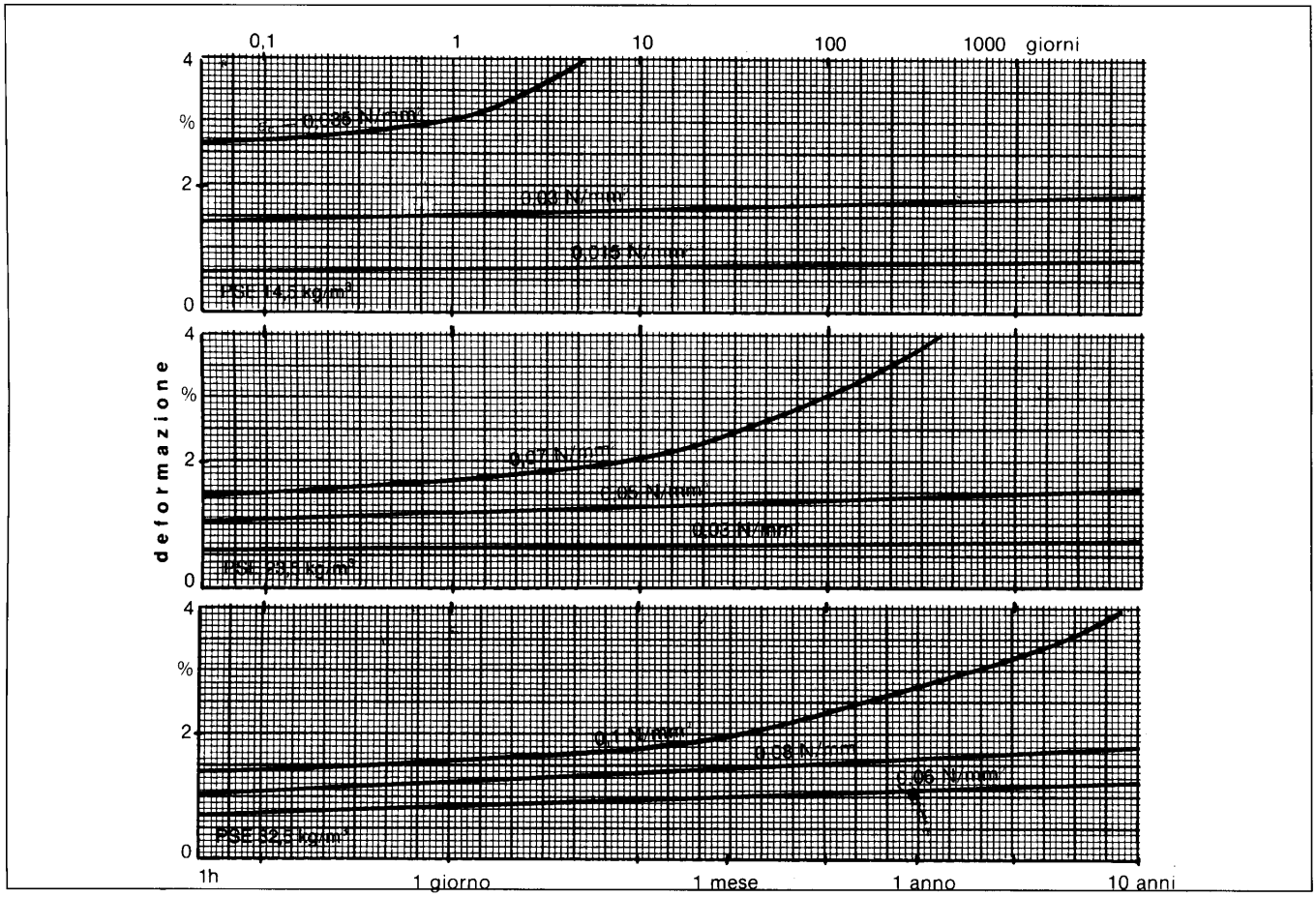
Massa volumica in Kg/m3	15	20	25	30	35
Sollecitazione di compressione al 10% di deforazione	0,07-0,12	0,12-0,16	0,16-0,20	0,18-0,26	0,23-0,27
Resistenza a trazione	0,15-0,23	0,25-0,32	0,32-0,41	0,37-0,52	0,42-0,58
Resistenza a flessione	0,16-0,21	0,25-0,30	0,32-0,40	0,42-0,50	0,50-0,60
Resistenza al 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 N/mm^2 = 10 Kg/cm^2
1 Kg/cm^2 = 0,1 N/mm^2

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

COMPRESSIONE						
	Unità misura	12 Kg/m²	16 Kg/m²	20 Kg/m²	25 Kg/m²	30 Kg/m²
Deformazione 1%	N/mm²	0,02	0,035	0,05	0,07	0,09
Deformazione 5%	N/mm²	0,04	0,07	0,10	0,14	0,18

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). Gli andamenti della deformazione in funzione del tempo e della densità del materiale sono i seguenti:



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

SOLLECITAZIONE PERMANENTE A COMPRESSIONE
PER DEFORMAZIONE < 2 %

Massa volumica Kg/m3	Sollecitazione N/mm²	Sollecitazione Kg/cm²
15	0,012-0,025	0,12-0,25
20	0,020-0,035	0,20-0,35
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

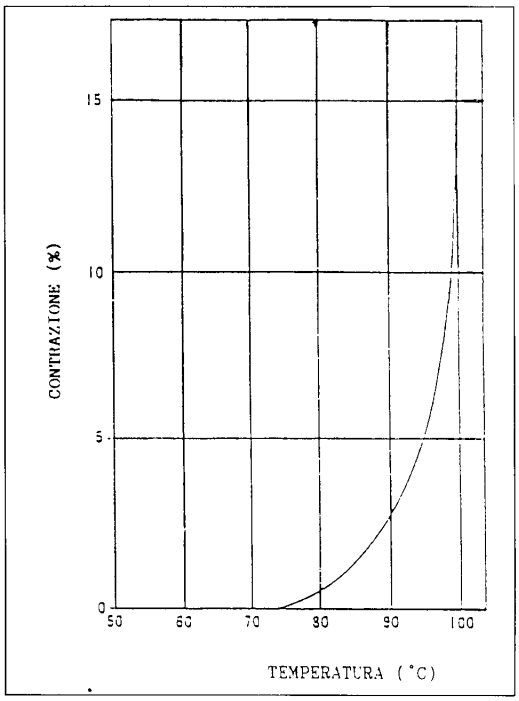
Resistenza al calore e basse temperature

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/m² la temperatura limite scende a 80-85 °C (75-80 °C per l'EPS 15). Le prove di stabilità dimensionale considerate dalle normative, p.es. UNI 7819 e ISO 4898, che indicano la deformazione massima ammissibile dopo un determinato periodo sotto carico ad una data temperatura, danno la possibilità di verificare l'idoneità di un EPS per determinate applicazioni. In particolare ISO 4898 prevede una deformazione limite del 5% nelle condizioni e per gli impieghi specificati nella seguente tabella:

PROVE DI STABILITA' DIMENSIONALE
DELL'EPS SECONDO ISO 4998

Classe	Impiego	Massa volumica Kg/m3	Durata della prova	Temper. di prova 'C	Sollecit. di compr. KN/m²
I	Non portante	15	48 ore	70	—
II	Carichi limitati	20	48 ore	80	20
III	Carichi maggiori	30	7 giorni	70	40

Le prove corrispondenti secondo UNI 7819 prevedono invece deformazioni limiti del 4 o 3% secondo i casi. A bassa temperatura, poichè il Polistirene non subisce alcuna transizione di fase (cambiamento di struttura) in questo campo, le sue caratteristiche meccaniche possono considerarsi simili a quelle a temperatura ordinaria fino almeno - 200°C. In modo generico viene individuata la temperatura di non modificazione in 70 °C. Nella figura sotto riportata viene evidenziato il comportamento dimensionale al variare della temperatura.



Densità provino 20kg/m³
Dimensioni 10 x 10 x 10 cm
Mantenimento in stufa per 24 ore

Il coefficiente di dilatazione lineare del PSE è compreso fra 5.10-5 m/m .K e 7.10-5 m/m .K. Non ha molta importanza nelle applicazioni ordinarie e, se il movimento termico è impedito, le reazioni sui punti di fissaggio sono modeste, dato il valore del modulo elastico del materiale. Questa caratteristica deve essere tenuta presente nel caso di applicazioni in cui l'isolante può raggiungere temperature elevate.

Resistenza al fuoco

L'EPS, quale composto di carbonio e idrogeno, è di sua natura un materiale combustibile. Esso inizia la sua decomposizione a circa 230-260 °C, con emissione di vapori infiammabili, ma soltanto a 450-500 °C si ha una accensione. La successiva propagazione della fiamma avviene spontaneamente nell'EPS normale, se vi è sufficiente apporto di ossigeno, mentre nell'EPS a migliorato comportamento al fuoco (EPS/RF), ottenuto con opportuni additivi, la propagazione cessa al venir meno della causa di innesco. Le normative distinguono il comportamento in proposito dei materiali combustibili con una opportuna classifica. L'EPS normale si colloca generalmente all'ultimo gradino (Classe 5 secondo il D.M. 26.6.84 italiano) e l'EPS/RF al primo (Classe 1).
1). Le norme applicative prescrivono i limiti di impiego di ciascuna classe nei singoli casi. Si riportano invece qui alcune considerazioni generali sul comportamento al fuoco dell'EPS, che possono utilmente servire per una valutazione del rischio di impiego, anche nei casi non contemplati dalla normativa.
1) L'EPS richiede una certa energia per la sua accensione; anche per i tipo normale una scintilla o una sigaretta accesa non sono sufficienti: la loro energia viene asportata come calore di fusione. Il materiale, fondendo, tende poi a ritrarsi dalla sorgente di innesco, anche di una certa intensità; quindi in particolare l'EPS/RF brucia in effetti soltanto in un incendio generalizzato.
2) Il contributo dell'EPS in termini di bilancio energetico di un incendio, è modesto, in relazione alla sua bassa massa volumica: 1 dm³ di EPS da 15 kg/m³ ha un potere calorifico di 5500 J contro 84.000 J dello stesso volume di legno di abete.
3) L'EPS si trova generalmente protetto da altri materiali e non ha immediata disponibilità dell'aria necessaria alla sua combustione (circa 130 volte il suo volume).
4) La combustione può sviluppare, come gas tossici, essenzialmente ossido di carbonio, non diversamente dai materiali lignei presenti nella costruzione o nell'arredamento, ma in proporzione più ridotta, come mostra la tabella riportata nella pagina seguente (prova del Laboratorio Chimico di Stato di Vienna, secondo DIN 53436: provini da 300x15x10 mm., temperatura 600°C, portata d'aria 100 L/h)

COMPONENTI TOSSICI DEI GAS COMBUSTI
DI MATERIALI DA COSTRUZIONE (p.p.m.)

Materiale	Ossido di Carbonio	Stirolo	Benzolo e omologhi	Composti alogenati
EPS normale	1.000	400	40	--
EPS/RF	1.000	50	30	11
Legno di abete	15.000	--	--	--
Pannello truciolare	69.000	--	1.000	--
Sughero espanso	29.000	--	1.000	--

La tabella dimostra anche che i gas sviluppati non sono corrosivi.
5) La produzione di fumi opachi dell'EPS/RF è più ridotta di quella dell'EPS normale e comunque proporzionata, rispetto agli altri materiali combustibili presenti, alle piccole quantità in peso normalmente applicate.
6) Il pericolo di distacco di rivestimenti in EPS, in caso di incendio, dipende essenzialmente dal tipo di fissaggio. Le parti o le gocce fuse che cadono, se l'EPS/RF, non sono infiammate e non contribuiscono quindi alla propagazione dell'incendio.
7) La differenza di costo fra i tipi normali e quelli RF è modesta e ha già consigliato in vari paesi, l'adozione esclusiva dei tipi RF per tutte le applicazioni edilizie, anche quelle in cui potrebbe essere ammesso il tipo normale; ciò evita confusioni e pericoli di incendio di materiale in deposito in cantiere.

Resistenza agli agenti chimici e biologici
L'EPS non è intaccato dai materiali da costruzione correnti; le due tabelle riportate nelle pagine 26-27 danno un quadro del comportamento dell'EPS a contatto di molti gruppi di sostanze.
Particolare attenzione deve essere posta al contatto con vernici, collanti, impermeabilizzanti, che possono contenere solventi del Polistirene. Nei casi incerti è bene eseguire una prova pratica prima dell'impiego, eventualmente a temperatura più elevata, p.es. 50 °C, per abreviare la prova.
L'EPS in opera 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 è 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 polimerizzato che possono essere presenti nell'EPS di recente produzione si disperdono rapidamente. L'EPS non costituisce nutrimento per alcun essere vivente, microrganismi compresi, quindi non marcisce o ammufisce.
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.
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.

Sostanze inerti per l'EPS

- Acqua, acqua di mare, soluzioni saline
- Materiali da costruzione (calce, cemento, gesso, ecc.)
- Sali (p.es. afflorescenze di salnitro), concimi
- Soluzioni alcaline (idrato sodio e potassio, soluzioni ammoniacali, acqua di calce, candeggianti, acqua ossigenata, concimi liquidi)
- Saponi e detersivi sintetici
- Acidi diluiti e acidi deboli (p.es. citrico, carbonico, acidi urici)
- Acidi concentrati (cloridrico 35%, nitrico 50%, solforico 95%)
- Alcoli (metilico, etilico, ecc.)
- Glicoli, glicerina
- Oli siliconici
- Bitumi, adesivi e masse bituminose a base acquosa

Sostanze che attaccano l'EPS

- Esteri (acetati, ftalati, diluenti per vernici)
- Eteri (etilico, glicolico, diossano)
- Chetoni (acetone, cicloesanone)
- Composti organici alogenati (trielina, tetracloruro di carbonio, fluorocarburi)
- Ammine, ammidi, nitrili
- Idrocarburi aromatici (benzolo, stirolo, toluolo, ecc.), cicloesano
- Benzina e vapori di benzina
- Gasolio, olio combustibile, olio di paraffina, vaselina (sostanze con azione pió limitata)
- Ragia minerale, trementina
- Bitumi e masse bituminose con solventi
- Derivati del catrame

Assorbimento d'acqua

Il comportamento dell'EPS a fronte dell'acqua non dà adito a limitazioni per gli impieghi edilizi e per l'isolamento termico. L'acqua non scioglie l'EPS, nè attraversa le pareti delle celle chiuse e non può quindi venire assorbita se non fra gli interstizi residui fra le perle espanse.
L'assorbimento per immersione, eseguito generalmente su cubetti di 50 mm. di lato, ritagliati da blocchi e lastre di EPS rappresenta, più che un comportamento in una situazione che non si verifica in pratica, un indice della buona saldatura fra le perle espanse; esso ammonta al massimo al 5% in volume per l'EPS 15 e al 3% per l'EPS 30, dopo un anno di immersione; questi valori vengono raggiunti in alcune settimane e restano poi costanti.
Più interessante per l'impiego è l'assorbimento per capillarità, che è praticamente nullo, e soprattutto l'assorbimento dell'aria umida.
Un EPS 20, a contatto con aria con 95% di U.R. per 90 giorni, ha mostrato un assorbimento dello 0,7% in peso, mentre prove EPS 30 hanno dato i seguenti valori di assorbimento all'equilibrio:
U.R. 60% 1,7 % in peso
U.R. 90% 2,0 % in peso
U.R. 100 % 2,3 % in peso
Sono valori ancora inferiori alla metà di quelli che DIN 52612 considera non superati nel 90% dei casi e che, come visto trattando la conduttività termica, non influenzano praticamente questa caratteristica.
La conoscenza della caratteristica di diffusione del vapore è importante per poter controllare gli eventuali fenomeni di condensazione.
I tecnici esprimono questa caratteristica preferibilmente come rapporto μ (adimensionale) fra lo

RESISTENZA ALLA DIFFUSIONE DEL VAPORE DELL'EPS		
Massa volumica (Kg(m3)	μ minimo	μ massimo
15	20	40
20	30	50
25	40	70
30	50	100
35	60	120

spessore d'aria che offre la stessa resistenza al passaggio del vapore e lo spessore di materiale in questione. Per l'EPS il valore di μ è compreso entro limiti che vanno crescendo con la massa volumica, come mostra la tabella seguente, tratta da UNI 7819.
Dai valori relativi μ è possibile ricavare i valori assoluti della resistenza alla diffusione del vapore, sapendo che la resistenza di uno spessore di 1 m. di aria, nel campo da -20 a + 30 °C, secondo DIN 4108/5, ammonta a 1,5 . 10 m^2 hPa/Kg.
Questa relazione permette di ricavare il valore di μ dai valori di permeabilità (inverso della resistenza) di laboratorio o di norma, che sono riferiti a differenze di pressione di vapore, spessore, tempi, unità di massa, variamente definiti.

Durabilità

Per invecchiamento di un materiale si intende la variazione (generalmente 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 decisamente 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 inopportune, che hanno ritenuto di poter approfittare della difficoltà di verificare l'effettiva applicazione del materiale nelle intercapedini: in effetti tali voci si riferiscono a situazioni non più controllabili. 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, perchè 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, una corretta pratica di cantiere evita facilmente questo inconveniente.

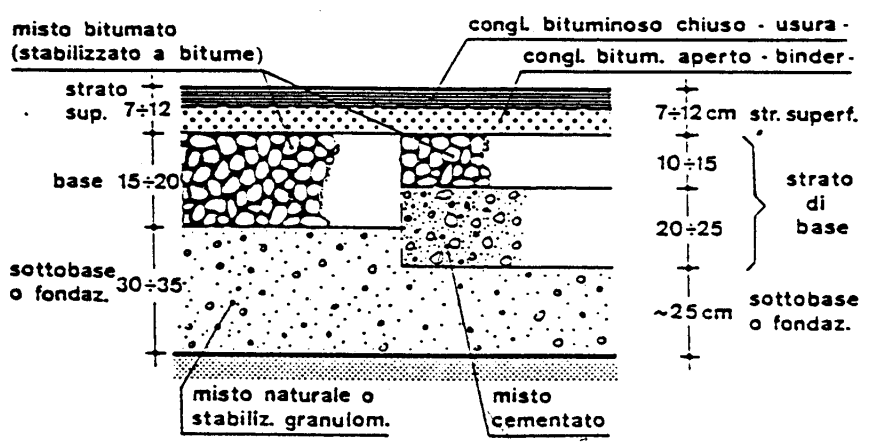
Le regole di progettazione

I carichi agenti e l'EPS

Nelle applicazioni considerate i carichi agenti possono essere così riassunti:

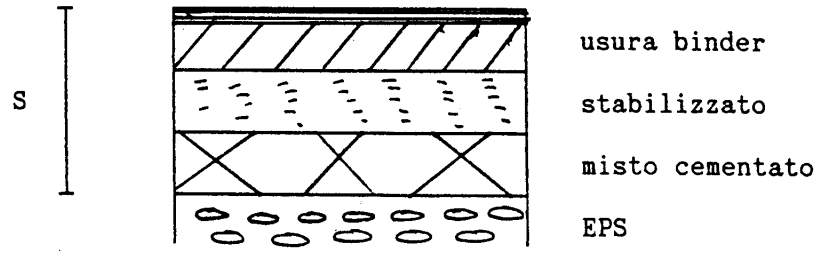
- pressione del terreno
- pressione idraulica
- carichi degli strati superiori
- carichi agenti esterni
- pressione laterale
- spinta idrostatica di gallegiamento
- azioni sismiche
- carichi impattivi

Quanto riportato deve essere considerato per una corretta progettazione del rilevato o del muro di ritegno; si rimanda quindi ad una trattazione specifica l'analisi dei carichi agenti. Per quanto concerne il rapporto con l'EPS invece, è da sottolineare che la pressione laterale deve essere considerata nel caso in cui i carichi superiori causino una deformazione plastica nel materiale. Questa deve essere quantificata in modo particolare nei casi di realizzazione di muri contro terra. Il valore della spinta laterale da considerare è pari a circa 0,1 volta il carico agente esterno. Di interesse generale invece sono i carichi agenti esterni dipendenti dai veicoli transitanti nel caso di riempimenti o di muri di sostegno per opere accessorie ad arterie veicolari. Il carico agente può essere isolato ed identificato nella ruota con pneumatico.
La forza che è in grado di scaricare corrisponde al valore della pressione di gonfiaggio dello stesso riferito all'impronta su terreno.
I carichi massimi da considerare per ruota sono:
veicoli industriali 8 Kg/m²
autovetture 2 Kg/m²
Una stratigrafia di riferimento può essere la seguente:

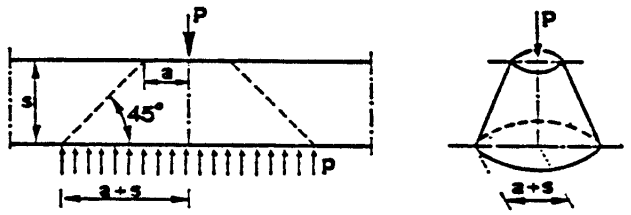


- Soprastruttura moderna di tipo flessibile per strade a medio ed elevato traffico. Gli spessori indicati devono intendersi orientativi.

I carichi agenti sull'EPS vengono ripartiti dalla stratigrafia seguente:



Un valore di S approssimativo può essere di circa 45 cm.)
Il carico agente viene così ad essere considerato:



- Distribuzione del carico secondo l'*Asphalt Institute*.

con le seguenti relazioni

$$P = \pi\,(a+s)^2\,p \rightarrow p = \frac{P}{\pi\,(a+s)^2}$$

$$S = 0{,}564\sqrt{\frac{P}{p}} - a$$

dove:
P = pressione gonfiaggio ruota per avere appoggio [Kg]
p = pressione sul sottofondo [Kg/cm^2]
S = spessore strati superficiali e base [cm]
ad esempio
1) area appoggio = 150 cm^2
pressione gonfiaggio = 2 Kg/cm^2
P = 2 x 150 = 300 Kg
S = 45 cm.
a = 7 cm.

$$p = \frac{300}{\pi\,(7+45)^2} = 0{,}035\ \text{Kg/cm}^2$$

2) area appoggio = 400 cm^2
pressione gonfiaggio = 8 Kg/cm^2
P = 8 x 400 = 3200 Kg
S = 45 cm.
a = 11 cm.

$$p = \frac{3200}{\pi\,(11+45)^2} = 0{,}32\ \text{Kg/cm}^2$$

Inoltre è anche possibile definire con metodo analitico le caratteristiche fisico meccaniche dello strato di sotto fondazione ovvero dell'EPS. L'analisi si basa sul metodo definito dei "Moduli di elasticità" (E). Il modulo elastico dello strato considerato si ricava da prove sperimentali me-

diante carico uniforme su piastra circolare e mediante la relazione:

$$E = \frac{\pi}{2} \quad \frac{pa}{f}$$

dove
f = cedimento
p = pressione agente
a = raggio piastra (usualmente 2a = 30 cm).
Associando la teoria della "deflessione massima consentita" con quella dei "moduli di elasticità" è possibile definire il valore di E e di f riferita al pneumatico agente.

$$f = \frac{p\,d}{E\,p} \quad \frac{p\,d}{f}$$

f max = 13 - 2,6 log N [cm]
dove
p = pressione gonfiaggio ruota [Kg/cm^2]
d = diametro impronta (d = 2a) [cm]
N = numero di veicoli pesanti transitanti in una giornata
E p = modulo elastico del materiale dello strato in funzione del pneumatico [Kg/cm^2]
f max = freccia massima [cm]
Si riportano alcuni esempi di calcolo per l'EPS da utilizzare:
1) p = 8 Kg/cm^2 d = 30 cm
N = 1000
f max = 13 - 2,6 log N = 5,2 cm

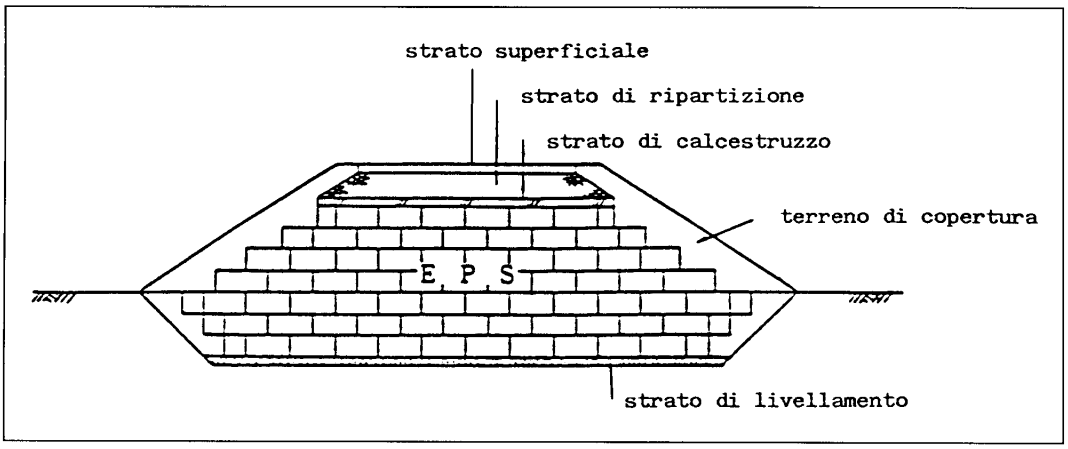
$$Ep = \frac{8 \times 30}{5{,}20} = 46\ Kg/\ cm^2$$

materiale EPS con densità 20 Kg/m^3
2) p = 8 Kg/cm^2 d = 30 cm
N = 2000 f max = 13 - 2,6 log N = 4,4 cm

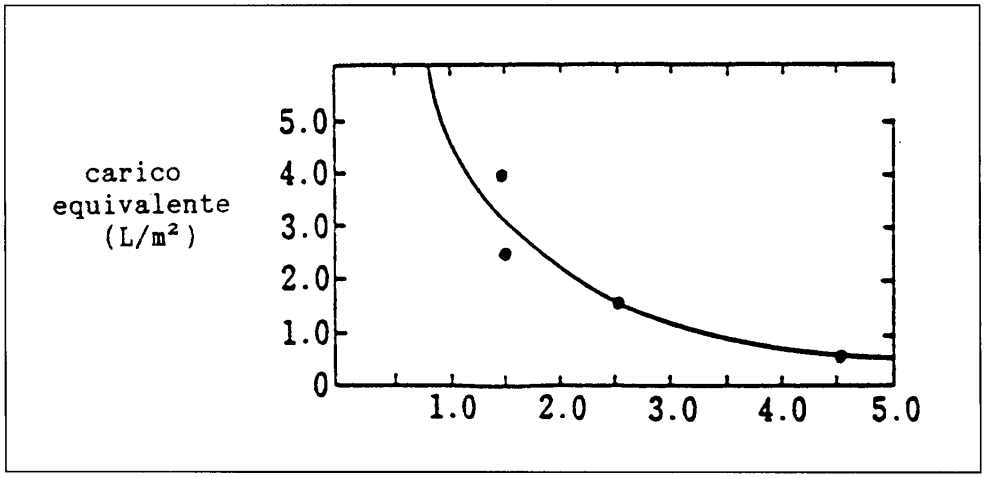
$$Ep = \frac{8 \times 30}{4{,}4} = 54\ Kg/cm^2$$

materiale EPS con densità 20 o 25 Kg/cm^3
p = 8 Kg/cm^2 d = 30 cm
N = 5000
f max = 13 - 2,6 log N = 3,38 cm

$$Ep = \frac{8 \times 30}{3{,}38} = 71\ Kg/cm^2$$



materiale EPS con densità 25 o 30 Kg/cm³



Con le relazioni sopra ricordate e con i dati fisico/meccanici precedentemente riportati è possibile dimensionare il rilevato ed il riempimento con EPS. Il valore di N da riportare nella relazione della freccia massima è il seguente:

	N (veicoli/giorno)
Traffico pesante limitato	< 300
traffico pesante medio	300 ÷ 1000
traffico pesante elevato	1000 ÷ 3000
traffico pesante notevole	> 3000

N indica il numero di veicoli pesanti per senso di marcia aventi peso complessivo maggiore di 250 q.

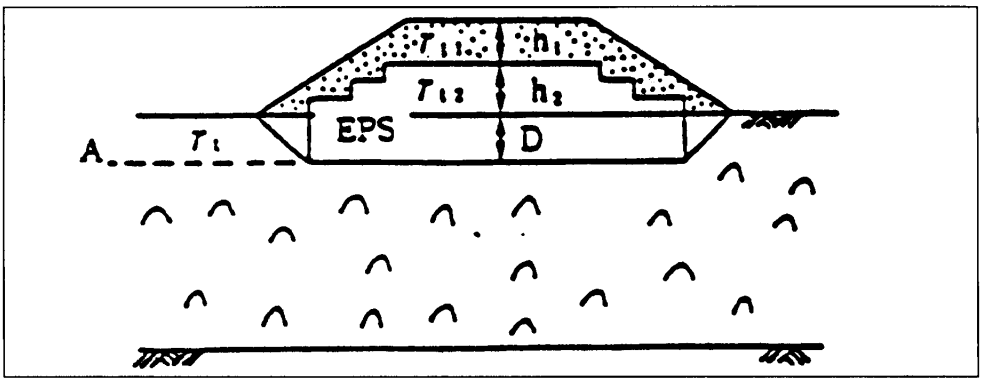
I terrapieni

Questa applicazione dell'EPS permette di migliorare la stabilità dell'opera e di prevenire possibili slittamenti del terreno di appoggio.

Una base necessaria per il dimensionamento dell'opera deriva dalla relazione fra traffico veicolare e spessore del rilevato in EPS. Il traffico veicolare è intenso come carico ripetitivo e trasformato in carico statico equivalente

L'analisi prosegue con la considerazione di due effetti:

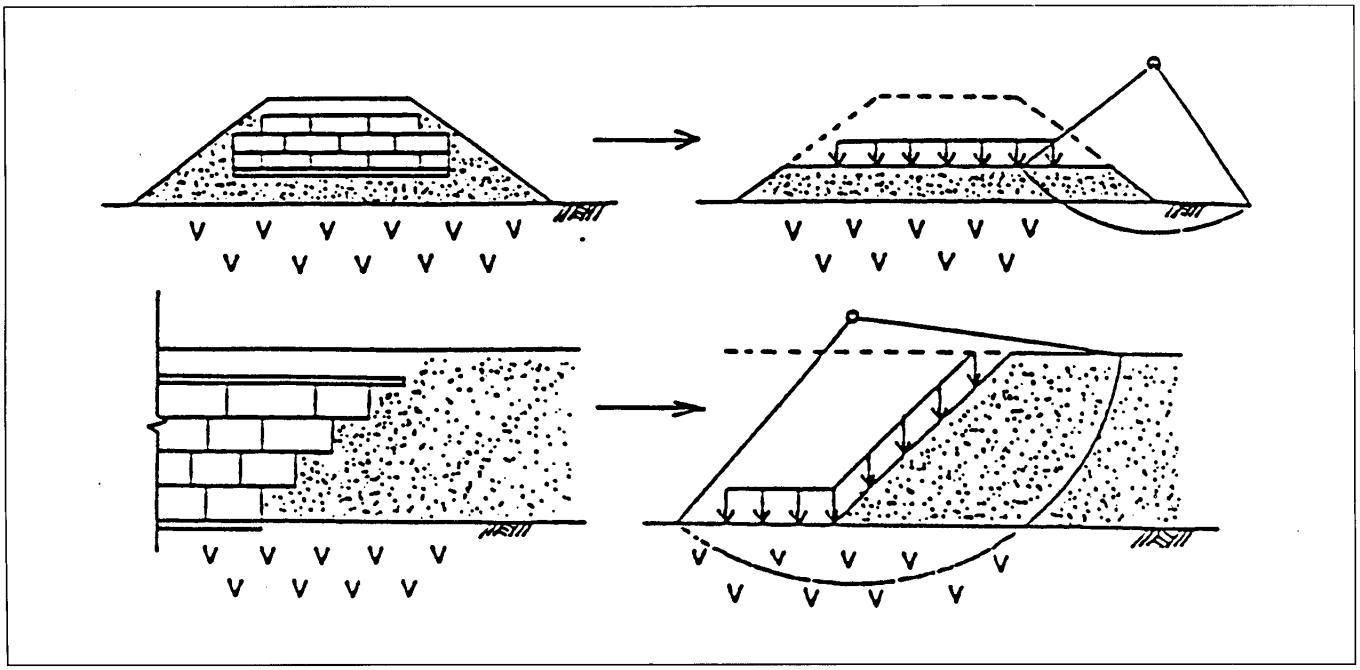
a) incremento di tensione sulla superficie di fondo del rilevato in EPS dovuta ai carichi agenti.



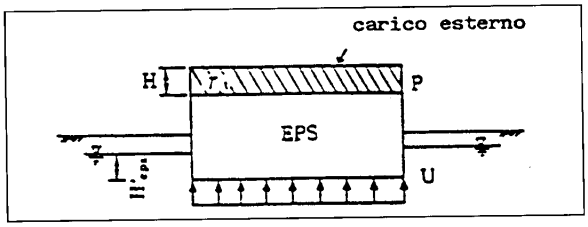
$A\sigma = P_1 = P_o$
$P_1 = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 (h_2 + D) + W_L$
$P_o = \gamma_o D$
dove
P_1 = pressione sulla superficie di fondo del rilevato in EPS
comprendente anche i carichi dovuti al traffico
P_o = pressione sulla superficie (linea A) di scavo dovuta al terreno che è stato eliminato
γ_1 = densità degli strati superficiali e di base riferiti alla spessore
h_1 = spessori strati superficiali e di base
γ_2 = densità EPS
h_2 = spessore EPS
W_L = carico equivalente di traffico
γ_o = densità terreno preesistente
D = spessore escavazione

b) cedimenti dovuti alla consolidazione del terreno sottostante l'EPS. Al centro del rilevato è possibile ipotizzare il seguente cedimento C:
$C = m \Delta P H$
dove
m = coefficiente di compressione volumetrico del terreno al di sotto di EPS (cm^2/Kg)
ΔP = incremento di pressione sul terreno dovuta al rilevato costruito (Kg/cm^2)
H = spessore terreno rimanente con caratteristiche limitate
(ovvero spessore terreno fra il fondo dell'EPS ed il primo strato di terreno coerente)
Il rilevato deve essere verificato secondo una doppia procedura.

1) Stabilità
La verifica della stabilità del rilevato con materiale di riporto in EPS viene effettuata mediante lo studio della possibile superficie di slittamento con il metodo del cerchio. Nella verifica lo spessore di EPS viene considerato un carico a tutti gli effetti ed è sufficiente che il cerchio non



lambisca la superficie di contatto fra EPS e terreno nella zona a rischio di slittamento.



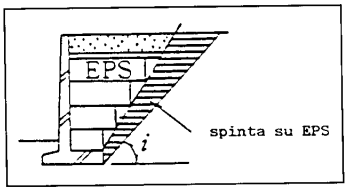
2) Galleggiamento

L'EPS è un materiale super leggero e quindi il galleggiamento dello stesso in condizioni particolarmente gravose deve essere considerato. Il fattore di sicurezza è dato da:

$F_s = P / \mu$

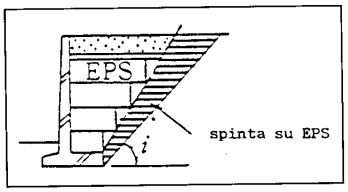
dove $P = \sum \gamma$ carichi agenti esterni dal livello della falda verso l'alto

$U = \gamma_W \cdot H_{EPS}$ spinta idrostatica
con γ_W = densità dell'acqua
H_{EPS} spessore di EPS dalla falda verso il basso



Il peso proprio dell'EPS ed il relativo attrito sul terreno no vengono considerati.
Il valore di F_s deve essere > 1.2

Nel caso in F_s non soddisfi quanto sopra si deve ridurre lo strato di escavazione o prevedere sistemi di drenaggio dell'acqua.



I riempimenti per muri contro terra e per pile da ponte

L'applicazione di EPS è rivolta al riempimento dello spazio fra il muro di contenimento e la scarpata del terreno. La forma dell'EPS è generalmente trapezioidale. La pressione del terreno sulla superficie dell'EPS dipende dal tipo di terreno e dalla sua inclinazione.
La pressione eventuale causata viene calcolata con il metodo della spinta delle terre su di una superficie inclinata. Può accadere che avvenga anche il caso inverso ovvero l'EPS posto a forma di trapezio in modo che sul muro di contenimento non vi sia spinta:
Devono essere effettuate almeno due verifiche: 1) Verifica allo slittamento Il fattore di sicurezza Fs deve soddisfare all'equazione seguente:
Fs > 1.5

$$F = \frac{(W+Pv)\ tg\ \delta + c \cdot B}{P_H}$$

W = peso proprio muro
Pv = componente verticale della pressione del terreno
P_H = componente orizzontale della pressione del terreno
tg δ = coefficiente di attrito
c = coefficiente di coesione
B = larghezza della base di appoggio

2) Verifica al ribaltamento

$M_R > M$

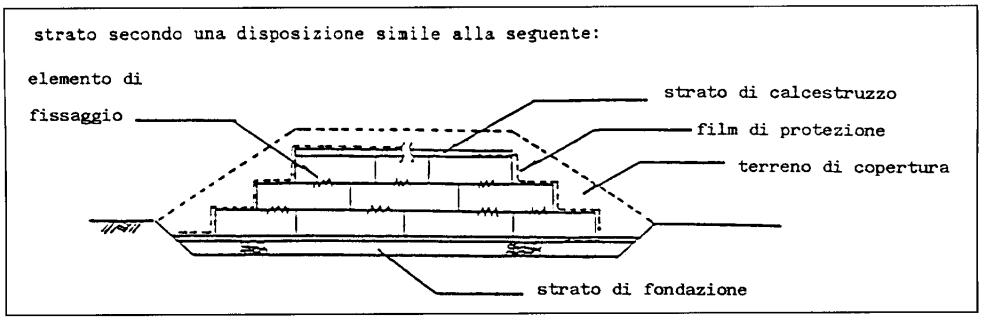
$M_R = W \cdot a + Pv \cdot b$ momento resistente
$M = P_H \cdot h$ momento ribaltante
W = peso proprio muro
a = distanza in orizzontale fra il centro di rotazione ed il centro di gravità del muro
b = distanza in orizzontale fra il centro di rotazione e l'asse di P_v
h = distanza in verticale fra il piano di appoggio del muro e l'asse di P_H

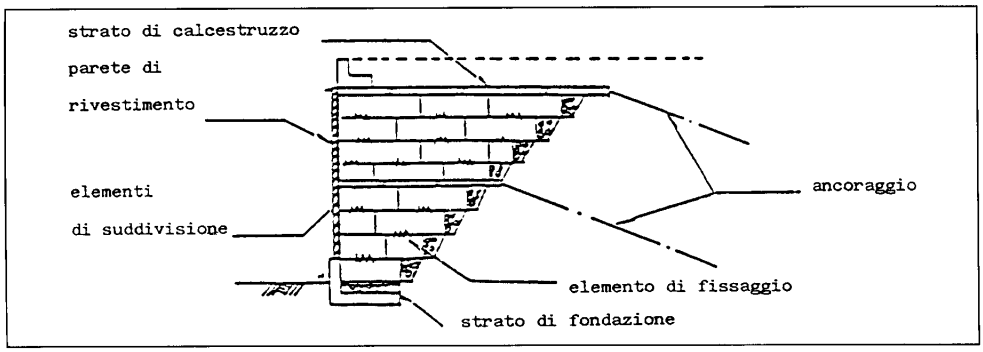
Sollecitazioni da terremoto

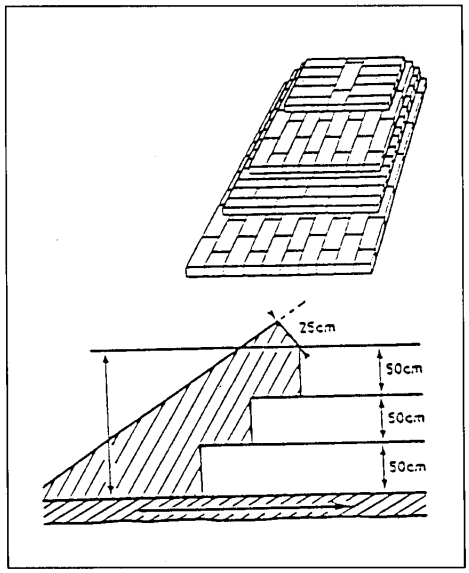
I concetti di analisi per quanto riguarda le sollecitazioni da terremoto rivolte ai rilevati o muri di contenimento sono ancora in via di sviluppo. Inoltre l'analisi di un materiale omogeneo è fondamentalmente più facilitata rispetto ad un'analisi per un sistema a strati disomogenei. Le regole di base per i rilevati ed i muri di contenimento in cui è stato utilizzato EPS sono le seguenti:
a) la solidità generale dell'opera deve essere verificata entro limiti definiti ovvero entro la larghezza massima della base del rilevato e del ribaltamento delle opere accessorie.
b) Il ripristino di opere con EPS è relativamente più facile di quelle tradizionali.
c) I metodi di verifica si avvalgono di modelli vibrazionali di provenienza sperimentale.
d) Le masse in gioco sono disposte in modo non tradizionale. Nella zona superiore vi sono elementi con massa elevata mentre nella zona centrale vi è una massa limitata se non quasi nulla. I modelli di analisi considerano la zona in EPS come elemento elastico ma con massa nulla.
e) I metodi costruttivi dello strato in EPS, come si potrà verificare nel punto 5, prevede che tra i diversi strati venga utilizzato un elemento metallico di collegamento. Questo permette di ottenere una doppia azione: ancorare tra loro gli strati; permettere un'attenuazione dell'onda sismica per frizione interna.

Metodi costruttivi

Preparazione del terreno
Il terreno si cui viene posto il primo strato di EPS deve essere ben livellato se l'opera è un rilevato e predisposto a gradoni se si tratta di un muro di contenimento. Nel caso di rilevati lo strato superficiale di terreno viene asportato. Nel caso di scavo particolarmente profondo è buona norma dotare il terreno di sistemi idonei alla fuori uscita di acqua piovana per evitare che questa stagni e peggiori la portanza dello strato di appoggio. In molti casi si utilizza uno strato di sabbia come zona livellata ove appoggiare i blocchi in EPS.







Trasporto e stoccaggio dell'EPS

Il trasporto di EPS viene effettuato dal produttore al cantiere con mezzi idonei per l'ottimizzazione dello stesso. Lo stoccaggio viene effettuato accatastando i blocchi. Se l'opera viene eseguita in tempi entro i 6 mesi non è necessario ricorrere ad alcuna precauzione, in caso contrario è buona norma proteggere la superficie esterna dai raggi ultravioletti. Questi in ogni caso producono solo una variazione di aspetto esterno senza però danneggiare il materiale e diminuire le caratteristiche prestazionali.

Installazione dell'EPS

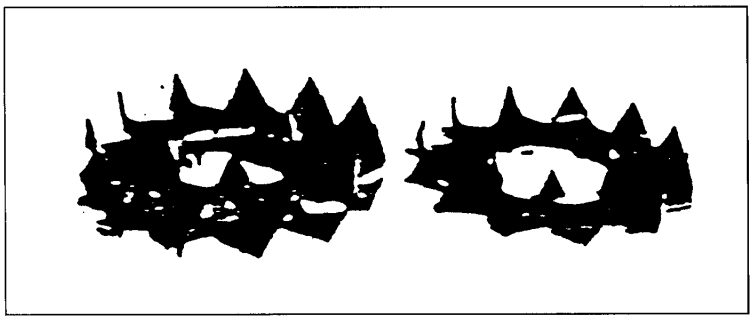
I blocchi vengono messi in opera a giunti sfalsati per ogni strato secondo una disposizione simile alla seguente:

Le fasi principali di posa in opera sono:

• I blocchi devono essere fatti asciugare nel caso di presenza di elevati quantitativi di acqua all'interno degli stessi.

• I blocchi vengono posizionati per strati compattandoli tra di loro in modo che la linea di giunzione non provochi fessure superiori a 10 mm. di larghezza.

• La sistemazione dei blocchi lungo la linea periferica del rilevato deve avere un ricoprimento di terreno di almeno 25 cm. con disposizione.



• I blocchi dell'ultimo strato devono essere collegati ai sottostanti con barre in ferro poste verticalmente per evitare che durante le operazioni di costruzione vengano asportate dalle operazioni stesse o da forte vento.

• I blocchi vengono, nella maggioranza dei casi, posti in opera con un elemento posizionato fra uno strato ed il successivo. Questo elemento che permette l'ancoraggio a doppia faccia è realizzato in materiale metallico con protezione anticorrosiva.

Realizzazione degli strati superiori all'EPS

Ultimata la posa dei blocchi in EPS vengono stesi gli strati di materiale cementizio e bituminoso per realizzare la parte terminale dell'opera. Le esperienze realizzate indicano una sequenza di strati così costituita:

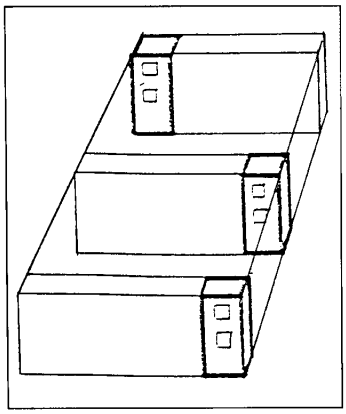
a) film in polietilene o PVC da sovrapporre all'ultimo strato di blocchi in EPS per proteggere quest'ultimo durante la stesura del materiale di finitura e per proteggerlo da possibili infiltrazioni di olii e solventi;

b) strato di conglomerato cementizio di ripartizione del carico e di irrigidimento della struttura. E' bene porlo in opera con sistemi a pompa. In questo strato che può essere di spessore dai 15 ai 20 cm. possono essere posti gli ancoraggi per eventuali protezioni laterali della carreggiata;

c) strato di misto bitumato;

d) strato di conglomerato bituminoso aperto (binder);

e) strato di congllomerato bituminoso chiuso (strato di usura).



Qualità e controlli

La qualità dell'EPS è importante per realizzare il rilevato con materiale idoneo e con lo stesso livello prestazionale. I controlli più importanti possono essere così riassunti:

• densità

• resistenza alla compressione

• forma geometrica e tolleranze dimensionali

• assorbimento all'acqua

Il controllo della qualità invece viene effettuato dal blocco che viene posto in opera ad 500 1000 3000 mm. da cui si devono estrarre alcune parti con le modalità seguenti:

Volume di riempimento	N° blocchi da analizzare
< 500 m^3	3
500 ÷ 1000 m^3	4
> 1000 m^3	5

I valori dei parametri analizzati sono ricavabili dalla normativa italiana.

Normativa e legislazione

Le norme relative ai rilevati o muri di contenimento devono essere riferite ai sistemi generali. Regole particolari per l'utilizzo di EPS esistono in Paesi esteri in cui l'utilizzo è stato sancito da numerose applicazioni (ad esempio Norvegia, Svezia, Germania, Francia). Le norme invece per la ricerca delle caratteristiche dell'EPS sono le seguenti:

UNI 7819	Materie plastiche cellulari rigide - Lastre in polistirene espanso per isolamento termico - Tipi, requisiti e prove
Norme citate in UNI 7819	
UNI 6348	Materie plastiche cellulari rigide e flessibili a base di materie plastiche e di elastomeri - Misura delle dimensioni lineari (corrisponde a ISO 1923)
UNI 6349	Idem-Determinazione della massa volumica apparente (corrisponde a ISO 845)
UNI 6350	Materie plastiche cellulari rigide - Determinazione delle caratteristiche a compressione (corrisponde a ISO 844)
UNI 7357 + F.A.101	Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento degli edifici
UNI 7745 + F.A.112	Materiali isolanti - Determinazione della conduttività termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia
UNI 7891 + F.A.113	Idem. Determinazione della conduttività termica con il metodo dei termoflussimetri
UNI 8054	Materie plastiche cellulari rigide - Determinazione della velocità di trasmissione del vapor d'acqua (corrisponde a ISO 1663)
UNI 8069	Idem - Determinazione della stabilità dimensionale (corrisponde a ISO 2796)
UNI 8071	Idem - Determinazione delle caratteristiche a trazione (corrisponde a ISO 1926)
UNI 8457	Materiali combustibili suscettibili di essere investiti dalla fiamma su una sola faccia - Reazione al fuoco mediante applicazione di una piccola fiamma (corrisponde a CSE RF 2/75 A*)
UNI 8804	Isolanti termici - Criteri di campionamento e di accettazione dei lotti
UNI CR 005	Reazione al fuoco di materiali sottoposti all'azione di una piccola fiamma d'innesco in presenza di calore radiante (corrisponde a CSE RF 3/77 *)
ISO 2896	Materie plastiche cellulari rigide - Determinazione dell'assorbimento d'acqua (corrisponde a prog. UNI - PLAST 273 in revisione)
ISO 4898	Materie plastiche cellulari rigide per l'impiego nell'isolamento termico in edilizia
ISO 7616	Deformazione a compressione sotto carico statico a caldo

Deve essere ricordato che a livello europeo esiste un gruppo di studio CEN /TC 227 che analizza gli aspetti tecnici delle vie di comunicazione terrestri, in cui sarà discussa una norma relativa ai blocchi in EPS per riparto leggero.

** Suppl. ord. G.U. n° 234 del 25.8.84*

Esperienze realizzative

Vengono riportate le esperienze più significative realizzate nei Paesi della Comunità Europea:

Paese	Anno di costruzione	Lunghezza (m)	Volume (m^3)	Altezza (m)	Larghezza (m)
Akershus	1972	85	700	1.1	85
Akershus	1973	115	1000	1.5	115
Akershus	1975	120	560	2.7	139
Vest-Agder	1976	50	400	1.0	50
Akershus	1976	160	1000		160
Akershus	1976	65	250	1.1	65
Telemark	1976	80	800	2.5	80
Oslo	1977	110	4000	4.2	110
Ostfold	1977	70	1700	2.5	70
Vestfold	1977	40	360	3.0	12
Vest-Agder	1977	7	100	1.5	7
Buskerud	1977	12	250	3.0	1
Vestfold	1977	6 + 6	360	3.0	-
Akershus	1977	350	1800	0.5	350
Vestfold	1977		1200	4.0	40
Ostfold	1978	40	1600	3.5	40
Akershus	1978	40	2000	3.0	40
Vest-Agder	1978	40	1500	?	40
Oslo	1978		3135	3.0	180
Buskerud	1979	15	700	4.5	15
Buskerud	1979	15	800	5.5	15
Buskerud	1979	20	100	1.0	20
Nordland	1979	200	4000	1.5	200
Sor-Tr.	1979	125	1100	2.0	125
Nordland	1979		4000	1.5	250
Buskerud	1979		100		
Akershus	1979		500	3.5	30
More og R.	1980		1148	3.5	32
Sogn og Fj.	1980	30	450	5.0	30
Ostfold	1980	50	1500	2.0	50
Ostfold	1980	70	2000	2.0	70
More og R.	1980		20	4.5	
Buskerud	1980		150	1.0	40
More og R	1981		150	2.5	30
Oslo	1981		?	2.0	60
Nord-Tr.	1982	220	800	1.8	44
Vest-Agder	1982		2400	4.0	
Vestfold	1982		1500	1.0	140
Nord-Tr.	1982		800	2.5	
Buskerud	1982		1420	2.0	70
Vestfold	1983		?		
Oslo	1983		2300	5.5	90
Vestfold	1983		200	2.0	20
Ostfold	1983		320	1.0	20
Troms	1983	6320	480	2.5	40
Vestfold	1983		3500	1.5	200
Sogn og Fj.	1983		1500	1.0	200
Telemark	1983		?		

Paese	Anno di costruzione	Lunghezza (m)	Volume (m^3)	Altezza (m)	Larghezza (m)
Nordland	1983		440	1.0	60
Nordland	1983		180	1.0	36
Aust-Agder	1983		850	1.0	140
Finnmark	1983		1500	4.0	40
Vestfold	1984		?		
Vestfold	1984		600	2.0	100
Finnmark	1984		?		
Akershus	1984		150	2.5	20
Ostfold	1984		320	3.5	40
Ostfold	1984		155	1.0	50
Ostfold	1984		140	2.0	10
Finnmark	1984		500		
Rogaland	1984		540	4.0	55
Vestfold	1984		720	2.0	30
Akershus	1984		500	1.0	60
Nord-Tr.	1984	200	576	2.5	25
Nord-Tr.	1984	9010	550	1.5	30
Telemark	1984		1500		
Finnmark	1984		3000		
Oslo	1985		6000		
Buskerud	1985		700		
Buskerud	1985		450		
Akershus	1985		1500		
Akershus	1985		1200	3.5	40
Akershus	1985		2000	3.0	50
Akershus	1985		100		
Nordland	1985		700	1.0	108
Nordland	1985		530	2.5	41
Vestfold	1985		400	2.0	200
Nordland	1985		290	1.5	
Nordland	1985		?	1.0	
Nordland	1985		550	1.5	27
Oppland	1985	4200	1500	2.0	75
Oslo	1985		600	4.0	20
Buskerud	1985		150	0.5	100
Finnmark	1985		200	1.0	30
Buskerud	1985		5000	1.6	
Vestfold	1986		500	1.5	100
Nordland	1986		3100	2.0	
Nordland	1986		392	2.0	
Nordland	1986		1000	1.5	120
Buskerud	1986		750	1.5	55
Akershus	1986		800		
Akershus	1986		1200		
Vest-Agder	1986		500	2.0	70
Buskerud	1986		80	1.5	
Oslo	1986		3100	7.0	60
More og R.	1986		500	4.0	50

Paese	Anno di costruzione	Lunghezza (m)	Volume (m^3)	Altezza (m)	Larghezza (m)
More og R.	1986		1290	2.5	100
Nord-Tr	1987	1700	1400	2.0	180
Nord-Tr	1987	5010	895	1.5	70
Nord-Tr	1987	1625	1050	2.5	54
Telemark	1987		400	2.5	35
Telemark	1987		150		
Nordland	1987		?		
Aust-Agder	1987		2000	3.0	
Aust-Agder	1987		1000		
Telemark	1987		288	2.8	
Vestfold	1987		12000		
Akershus	1987		8000		
Oslo	1987		600	3.5	50
Vest-Agder	1987		70		
Akershus	1988		200		
Akershus	1988		350	1.5	30
Nord-Tr.	1988	7400	3400	3.0	53
Oslo	1988		400		
Oslo	1988		500	6.0	50
Vestfold	1988		1300	4.0	110
Vestfold	1988		2800		110
Aust-Agder	1988		500	1.3	50
Vestfold	1988		3000		
Vestfold	1989		10700	3.0	
Ostfold	1989		3500		
Akershus	1989		2200	3.5	80
Buskerud	1989		350		
Hordaland	1989		200	1.5	40
Nordland	1989		798	1.5	
Nordland	1989		430	1.0	
Vestfold	1989		9600		
Ostfold	1989		4600		
Ostfold	1989		1300	6.0	150
Ostfold	1989		250	1.5	20
Akershus	1990				
Oppland	1990				
Vestfold	1990		4400		
Buskerud	1990		100	2.0	30
Buskerud	1990		300		
Buskerud	1990		100	2.0	20
Akershus	1990		2500	6.0	80
Akershus	1990		1200	4.7	200
Hordaland	1990		400	4.0	20
Buskerud	1990		700		
Akershus	1990		3000	2.5	60
Aust Agder	1990		2000		
Nord Tr.	1990		875		
Nord Tr.	1990		1000		

Paese	Anno di costruzione	Lunghezza (m)	Volume (m^3)	Altezza (m)	Larghezza (m)
Akershus	1990		2500		
Vesfold	1990		10500		
Ostfold	1991		2000		
Akershus	1991		9500		
Vestfold	1991		10000		

Studio effettuato presso Istituto di ricerca Finlandese

L'EPS come materiale isolante in strutture di fondazione degli edifici

Importanti esperienze nel settore dell'isolamento delle strutture di fondazione per edifici sono state effettuate nei paesi nordici come Svezia e Finlandia.
I motivi sono intuitivi: temperature considerevolmente basse ed elevata presenza di umidità nel terreno. Il centro ricerche Finlandese che si interessa degli edifici e dei materiali da costruzione ha condotto una ricerca per identificare o parametri più significativi da considerare per adattare un isolamento alle fondazioni.
Vengono quindi riportate in sintesi gli studi, le analisi e le considerazioni in merito a quanto sopra riportato.

Introduzione

Il polistirene espanso (EPS) viene ampiamente utilizzato come materiale isolante nelle strutture di fondazione degli edifici. In questa ricerca l'isolamento antigelo è stato considerato come lo strato isolante quasi orizzontale che viene solitamente fissato 0,2 - 0,5 m sotto la superficie del terreno intorno alla struttura di fondazione di un edificio riscaldato. Per proteggere la struttura di fondazione dal gelo, la resistenza termica dello strato isolante deve essere adeguata in tutte le condizioni possibili per l'intera vita dell'edificio. Il livello di umidità del materiale influenza notevolmente le prestazioni termiche dello strato isolante. Il comportamento dell'isolamento antigelo in EPS nei confronti dell'umidità viene influenzato da un certo numero fattori differenti e non si conoscono esattamente le condizioni limite e il processo di trasferimento dell'umidità nel materiale. Non sono ancora disponibili dei metodi che permettono di prevedere in modo affidabile il comportamento a lungo termine dell'isolamento antigelo in EPS nei confronti dell'umidità. Quando si prova l'effetto dell'umidità sulle proprietà del materiale in EPS, è consigliabile usare i campioni di prova che possiedono un contenuto di umidità simile a quello del materiale isolante sul campo. Quanto contenuto di umidità dovrebbe essere ottenuto con un processo di bagnatura dalla durata relativamente breve che corrisponde alle condizioni fisiche di umidità verificate nella pratica. Si potrebbero anche utilizzare queste prove di bagnatura per paragonare le prestazioni di diversi prodotti isolanti antigelo in EPS nei confronti dell'umidità.
I metodi tradizionali utilizzati per gli esperimenti di bagnatura sono l'immersione in acqua e le prove di assorbimento diffusivo del vapore acqueo. Entrambe queste prove forniscono contenuti di umidità più elevati dell'EPS rispetto a quanto viene normalmente rilevato nelle ricerche in sito. Un livello di umidità sovrastimato indica una determinazione troppo bassa della resistenza termica e della durata dello strato isolante antigelo.
Le condizioni operative dell'isolamento antigelo sono significativmente diverse da quelle di altri stati isolanti dell'involucro edilizio. I metodi di prova dovrebbero basarsi sui carichi di umidità reali di ogni applicazione. Gli obiettivi di questa ricerca consistono nel caratterizzare le condizioni limite tipo per gli isolamenti antigelo, nel confermare il contenuto di umidità a lungo termine dell'isolamento antigelo in EPS in condizioni locali tipo e nello studio, sia utilizzando esperimenti di laboratorio che la simulazione numerica, del processo di trasporto dell'umidità nel materiale. Un obiettivo è rappresentato dallo studio di prove di bagnatura utilizzabili per produrre contenuti di umidità rappresentativi nei campioni di prova in EPS.

Isolamento antigelo in EPS nelle strutture di fondazione

Contenuto di umidità a lungo termine nell'isolamento antigelo in EPS
Gli studi in situ mostrano che il contenuto di umidità dell'isolamento antigelo in EPS nelle strutture di fondazione degli edifici avrà normalmente dei valori di contenuto di umidità che vanno dallo 0,5 al 2,5% Vol. (nove siti, età 5 - 11 anni).
Nella tabella 1 sono illustrati i risultati degli studi in situ e l'assorbimento di umidità nel corso delle prove di immersione della durata di 28 giorni per gli stessi gruppi di materiale.
In un caso il contenuto di umidità raggiunge 5,0% Vol. È molto probabile che in questo caso le condizioni di umidità non corrispondano a quelle indicate per l'isolamento antigelo: la zona circostante prosciugata con un livello di acqua freatica inferiore al livello di isolamento e l'isolamento protetto nei confronti dell'aumento capillare dell'acqua con uno strato di ghiaia e sabbia.
Questi valori mostrano che non esiste correlazione fra i risultati delle prove di immersione e il comportamento dell'umidità a lungo termine dell'isolamento antigelo in EPS. In due casi l'immersione prevedeva dei contenuti di umidità inferiori rispetto a quanto rilevato sul campo, in un caso i contenuti di umidità erano identici e in quattro casi i risultati dell'immersione erano circa tripli rispetto a quelli ottenuti dagli studi in situ.

Tabella 1.
Contenuto di umidità nell'isolamento antigelo in EPS da nove siti. Vengono anche forniti i contenuti di umidità dopo prove di immersione della durata di 28 giorni per gli stessi gruppi di materiale.

Età	Densità asciutta kg/m3	Contenuto di umidità sul campo %Vol	Contenuto di umidità dopo 28 giorni di immersione in acqua % Vol	Rapporto fra sito e risultati delle prove d'immersione
5	15	1,8	5,2	2,9
7	14,5	5	3,1	0,6 min
8	13,4	0,5	4,3	8,6 max
8	13,7	1,7	5,1	3
8	14,1	1,7	5,1	3
8	24	2,1	2,1	1
9	16,6	2,5	3,8	1,5
11	10,7	2,4	1,9	0,8
11	11,4	1,3	3,9	3
Media	**14,8**	**2,1**	**3,8**	**1,8**

Un altro studio in situ riguardante l'isolamento stradale in EPS in quattro diversi terrapieni con un isolamento prosciugato, nuovamente riempito e periodicamente sommerso trae le seguenti conclusioni:

- i blocchi in EPS che giacciono permanentemente sott'acqua possono avere 9% Vol di ripresa di umidità in nove anni
- l'EPS periodicamente sommerso può registrare un contenuto di umidità che va da 1 a 4% Vol.
- in tutte le costruzioni prosciugate il contenuto idrico dell'EPS si è rivelato inferiore all'1% Vol.
- una distanza di 20 cm (strato di ghiaia) dal livello di acqua freatica ha rivelato un contenuto di umidità dell'1%

Secondo questi risultati il contenuto di umidità a lungo termine dell'isolamento antigelo in EPS va da 0,5 a 2,5% Vol quando la struttura è adeguatamente prosciugata.

Conduttività termica dell'EPS bagnato

La figura 1 presenta la correlazione fra l'aumento della conduttività termica e il contenuto di umidità di EPS determinato dalle rilevazioni che utilizzano due diverse temperature medie: +10 e -5 °C /6/. Le densità nominali dei tre diversi prodotti in EPS N, R, J, erano rispettivamente di 15,20 e 33 Kg/m^3. La temperatura media di - 5°C meglio corrisponde alle condizioni operative di un isolamento antigelo. L'aumento della conduttività termica è stato quasi lineare con i contenuti di umidità maggiori di 1 ..2% Vol. È stato rilevato un aumento di 0,01 W/Km (<30% del valore del materiale asciutto) con valori di contenuto di umidità di 2-3% Vol. Secondo i rilevamenti l'aumento della conduttività termica era quasi insignificante: al di sotto del livello di umidità 1% Vol.

Esperimenti tradizionali di bagnatura

I metodi tradizionali che vengono utilizzati per gli esperimenti di bagnatura sono le prove di immersione in acqua e le prove di assorbimento diffusivo di vapore acqueo. Entrambe queste prove forniscono dei contenuti elevati di umidità per l'EPS rispetto a quelli rilevati nella maggior parte delle applicazioni per l'isolamento antigelo degli edifici. La totale immersione in acqua non corrisponde alle condizioni operative degli isolamenti antigelo. Nella tabella 1 vengono presentati alcuni risultati che non hanno mostrato alcuna correlazione fra i risultati degli studi in si-

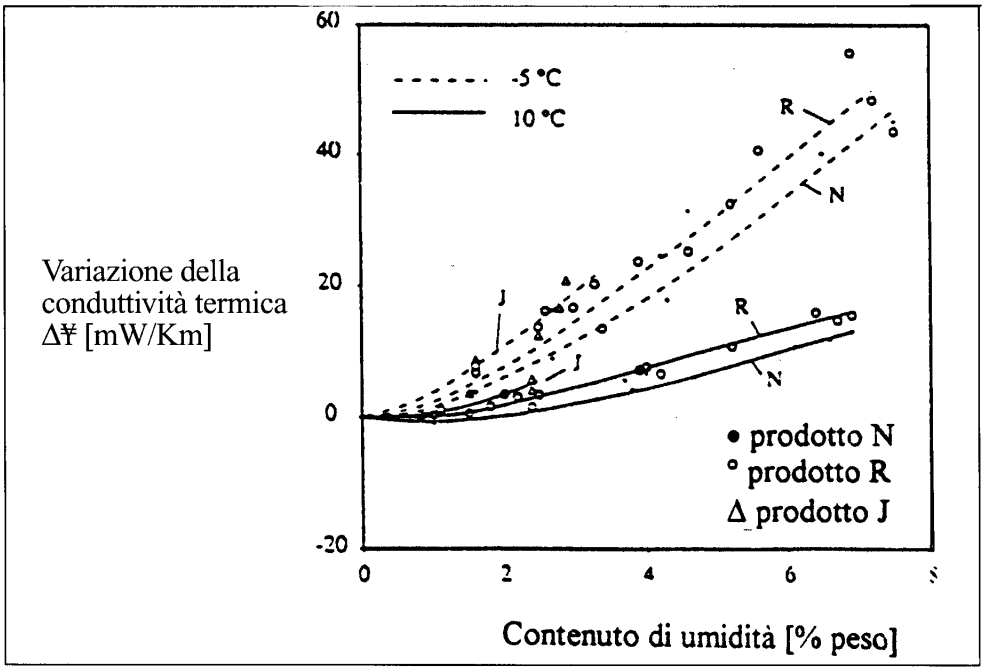


Fig. 1 Correlazione rilevata tra l'aumento della conduttività termica e il contenuto di umidità dell'EPS. Nei rilevamenti sono stati utilizzate due temperature medie (+ 10 e - 5 °C) e tre prodotti in EPS (N: 15 kg/m3, R: 20 kg/m3 e J: 33 kg/m3).

tu. L'isolamento antigelo può essere periodicamente a contatto con l'acqua, ma non è studiato per esservi immerso. Si dovrebbe sempre ricorrere a un sistema di drenaggio che mantenga l'acqua (freatica) a un certo livello sotto lo strato isolante, benchè contatti periodici con l'acqua (pioggia e neve sciolta, ecc.) siano comunque possibili.

Carichi di umidità e processo di trasporto dell'umidità

Le condizioni limite per l'isolamento antigelo in EPS variano nel corso dell'anno. Il carico di umidità dipende dalla temperatura e dai gradienti di pressione del vapore parziale, dalla distanza dal livello di acqua freatica, dal contenuto di umidità e dalle proprietà del suolo a contatto con l'isolamento. Quando si determina il comportamento del materiale nei confronti dell'umidità sarebbe necessario conoscere le condizioni limite, le proprietà del materiale e il processo di trasporto dell'umidità. Parte del flusso di umidità nello strato isolante è causato dalla diffusione. È probabile che l'assorbimento netto annuale di umidità dovuto puramente alla diffusione non sia molto elevato, poichè la temperatura e i gradienti di pressione del vapore sull'isolamento sono relativamente esigui e le loro direzioni variano nel corso dell'anno.

L'assorbimento dell'umidità nel materiale isolante avviene tramite il contatto con un suolo saturato in modo capillare. Parte di questa umidità può provenire dall'alto (pioggia e neve disciolta). Il livello dell'acqua freatica può essere periodicamente elevato, ma l'isolamento non dovrebbe essere immerso nell'acqua sotto la pressione idraulica per un lungo periodo di tempo. Il terreno intorno all'isolamento dovrebbe essere formato da granuli e sabbia che possiede una capillarità molto ridotta e quindi non dovrebbe essere in grado di alimentare in modo significativo l'isolamento stesso con umidità proveniente dall'acqua di falda. L'invecchiamento può modificare il trasferimento di energia e le proprietà di accumulo del materiale.

Le proprietà del materiale determinate per il nuovo isolamento non valgono necessariamente per l'intera vita della costruzione, il che influenza anche il processo di bagnatura.

Conduttività idraulica

La conduttività idraulica è stata rilevata utilizzando una provetta (150 mm di diametro) per esercitare una pressione idraulica costante. I campioni di prova in EPS, inizialmente asciutti, sono stati fissati al fondo della provetta, all'interno della quale è stato mantenuto un livello di acqua costante per tutta la durata delle prove.

In queste prove sono state utilizzati due diversi livelli di pressione. I rilevamenti sono stati eseguiti nel modo seguente:

1) È stata mantenuta una pressione idraulica di 45 mm sul campione di prova e tutta l'acqua che scorreva attraverso il campione di EPS è stata pesata nel corso dei primi 3 minuti. Tali condizioni sono state mantenute e dopo 10 minuti è stato ripetuto un altro rilevamento della durata di 3 minuti.

2) In seguito il livello dell'acqua è stato aumentato in modo che l'altezza dell'acqua sopra il campione in EPS raggiungesse i 190 mm. Dopo un rilevamento della durata di 3 minuti è stato lasciato un intervallo di 10 minuti con la stessa pressione idraulica ed è stato poi eseguito un altro rilevamento al termine, sempre della durata di 3 minuti.

I flussi di umidità rilevati attraverso i campioni di prova sono presentati nella tabella 6.

Il flusso d'acqua rilevato attraverso il campione ha subito una variazione durante la prova. Con il prodotto S e A questo flusso della massa d'acqua normalmente diminuiva dal primo valore rilevato durante la prova. Con il campione R1 la conduttività idraulica determinata è aumentata nella prima fase da un valore molto basso fino a circa 17 volte il livello più elevato. l'esigua portata registrata durante il primo rilevamento è stata causata principalmente dall'accumulo di acqua nel campione durante i primi minuti. Le conduttività idrauliche determinate nella seconda fase corrispondono meglio alle reali proprietà del materiale in condizioni stabili.

Accumulo e distribuzione di umidità provocati dal contatto con l'acqua

L'obiettivo di questi esperimenti consisteva nel dimostrare come l'umidità si accumuli nell'EPS

Tabella 6. Flusso di umidità rilevato attraverso i prodotti in EPS con una pressione idraulica costante. Lo spessore del campione in EPS era di 50 mm per ogni prova.

Prodotto /campione	Periodo 1: 0-3 min 2:13 - 16 min	Altezza dell'acqua mm	Conduttività idraulica x 10^{-6} kg/ (s m Pa)	Conduttività idraulica x 10^{-6} m/s
A1	1	45	0,35	3,5
A1	2	45	0,25	2,5
A1	1	190	0,69	6,9
A1	2	190	0,39	3,9
A2	1	45	0,94	9,4
A2	2	45	2	20
A2	1	190	2	20
A2	2	190	1,1	11
S1	1	45	63	630
S1	2	45	23	230
S1	1	190	21	210
R1	1	45	0,1	1
R1	2	45	1,8	18
R1	1	190	3,8	38
R1	2	190	3,8	38
R2	1	45	0	0
R2	2	45	0	0
R2	1	190	2,4	24
R2	2	190	1,9	19

se il campione di prova da una superficie è a contatto con il materiale saturato in modo capillare, senza un contributo da parte della pressione idraulica o della differenza della temperatura al trasferimento di umidità.
La preparazione della prova per questi esperimenti viene illustrata nella figura 2. In questo esperimento i campioni in EPS (prodotto R) sono stati messi a contatto con l'acqua dalle superfici superiori o inferiori utilizzando uno strato di cellulosa tra i campioni di prova stessi. Questo strato è stato saturato in modo capillare e alimentato con acqua a ciclo continuo durante i 36 giorni di durata della prova. Non vi è stata (quasi) alcuna pressione idraulica sui campioni di prova che abbia a contatto con l'acqua sulla superficie superiore. Le parti laterali dei campioni di prova sono state coperte con un rivestimento impermeabile al vapore. Le prove con il campione superiore corrispondono a quelle capillari tradizionali.

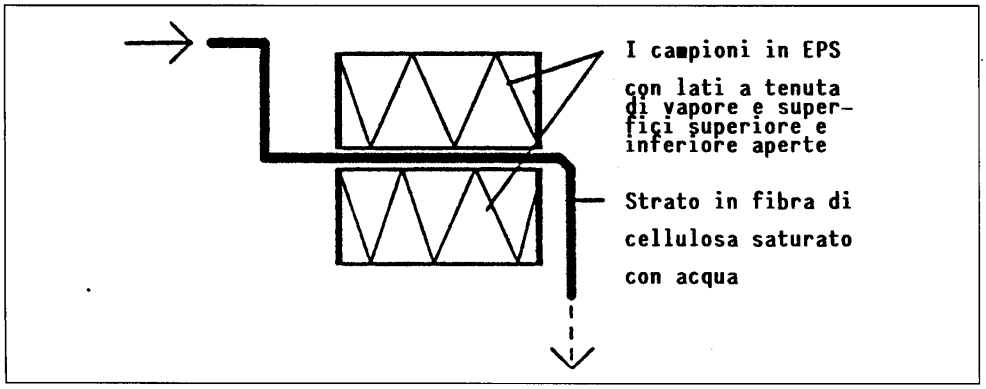


Fig. 2. Preparazione della prova per gli esperimenti di assorbimento dell'umidità con il prodotto R in

La massa totale di umidità nelle tre parti del campione di prova venne determinata dalla pesatura e distribuzione dell'umidità utilizzando un metodo basato sulla attenuazione della radiazione gamma. Nella figura 3 è illustrato l'assorbimento di umidità (kg/m^2) nei sei campioni di prova, mentre nella fig. 4 sono illustrate le curve di capillarità media.
Le tradizionali curve di capillarità sono lineari.
In questo caso la forma delle curve di capillarità si riferisce al trasferimento di umidità instabile che non abbia causato l'effetto capillare del materiale.
La figura 5 illustra la distribuzione di umidità dei campioni di prova (contenuto di umidità locale medio rilevato kg/m^3 a intervalli di 5 mm) al termine del periodo di 36 giorni. Lo stesso grafico contiene le coppie di campioni di prova con le stesse condizioni di contatto con l'acqua. Nei campioni di prova 1-3 il flusso di umidità era diretto verso il basso e nei campioni 4-6 verso l'alto.
L'accumulo di umidità nell'EPS si è rivelato relativamente lento in entrambi i casi. Quando la superficie superiore è entrata a contatto con l'acqua, l'accumulo totale di umidità si è rivelato solitamente elevato, 50 -110 % più elevato al termine, rispetto al momento in cui il contatto con l'acqua si verificava sulla superficie inferiore.
Le differenze fra i risultati si riferiscono al trasporto di umidità liquida causato dall'attrazione gravitazionale.
Quando il flusso di umidità era diretto verso il basso la distribuzione di umidità era più stabile rispetto a quando era diretto verso l'alto. Il flusso di umidità verso il basso ha provocato anche una variazione locale dei contenuti di umidità massima a 25-35 mm dalla superficie

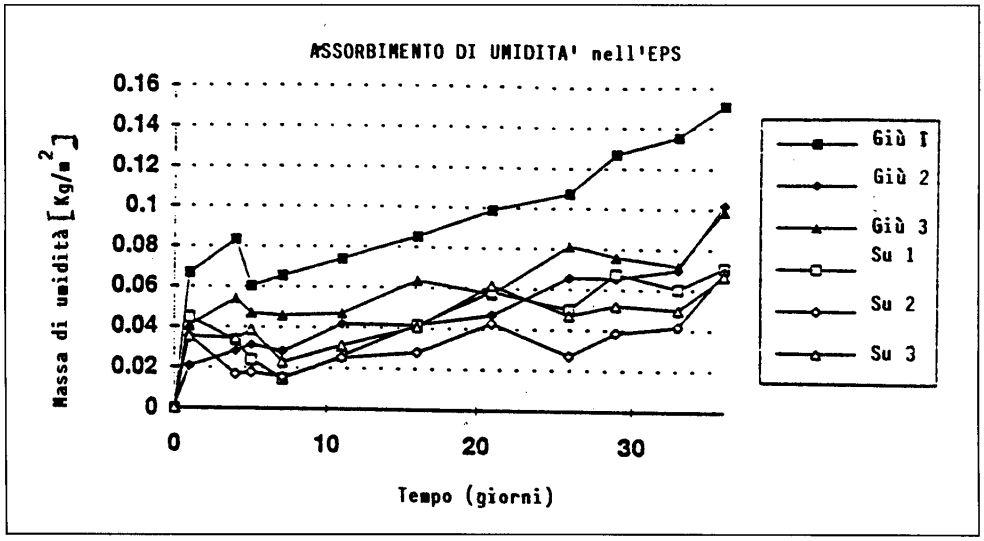


Fig.3 Assorbimento di umidità nei campioni di prova in EPS (prodotto R) che sono a contatto con l'acqua proveniente dall'alto (trasporto di umidità verso il basso) o dal basso (trasporto di umidità verso l'alto).

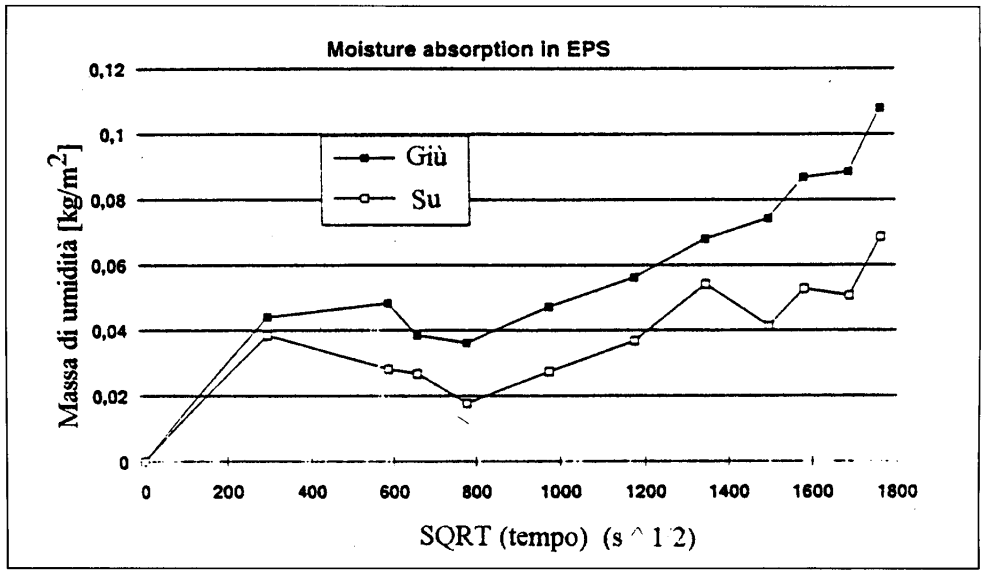


Fig.4 Curve capillari medie dei campioni di prova in EPS (prodotto R)

bagnata. Il flusso di umidità verso l'alto ha provocato anche localmente i contenuti di umidità in un range da 0 a 7 kg su m³. Una spiegazione per il diverso tipo di distribuzione di umidità può consisitere nel fatto che il flusso di umidità diretto verso il basso può avere luogo principalmente attraverso la diffusione del vapore e che le proprietà di adsorbimento e assorbimento igroscopico (dimensione dei pori aperti) a livello locale influenzano i valori di contenuto di umidità locale.

Confronto fra il trasporto di umidità capillare e quello diffusivo

Questo esperimento è stato analizzato numericamente utilizzando l'aspetto capillare e quello diffusivo delle proprietà note del materiale per l'EPS. La prima premessa riguardava il semplice flusso diffusivo di umidità con pressioni di vapore parziali come potenziali guida.

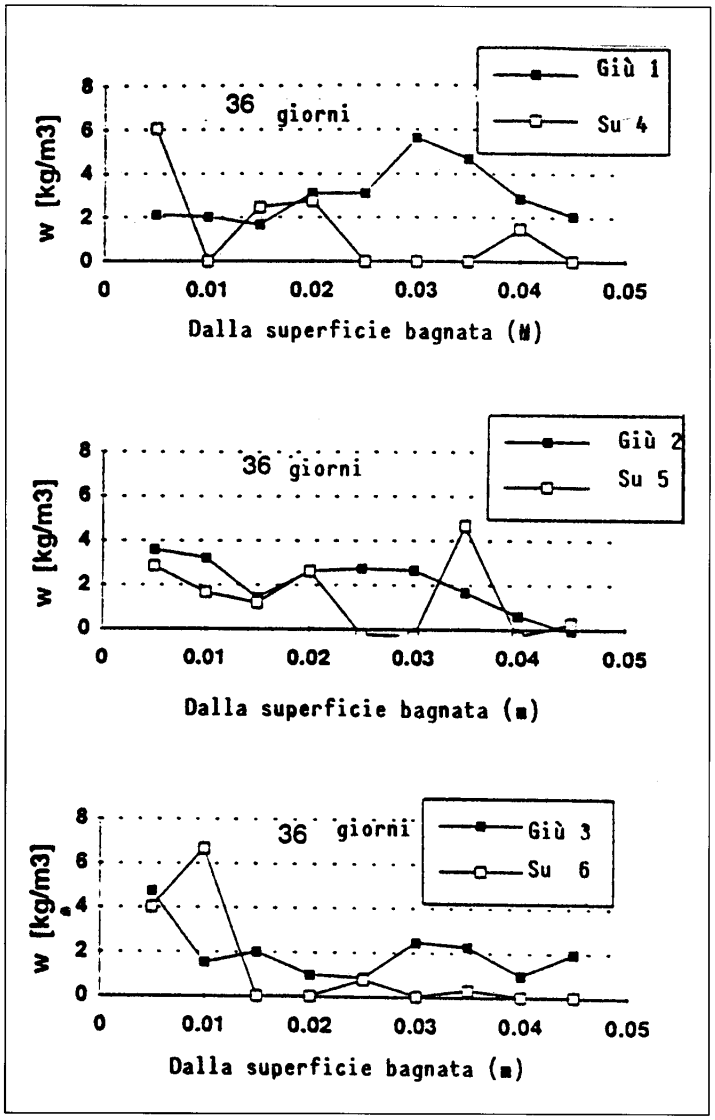
Considerano le condizioni limite 100% / 33% RH alla temperatura di 21°C il flusso di umidità attraverso il campione di prova da 50 mm era di 2 x 10^{-7} kg (s m^2). L'evaporazione dalla superficie supera questo valore già quando la differenza di pressione del vapore fra la superficie asciutta e l'aria della stanza è di circa 20 Pa. È ovvio che in queste condizioni non sia stato rilevato alcun accumulo di umidità significativo. Esattamente lo stesso flusso di umidità può essere risolto utilizzando il contenuto di umidità come potenziale guida e le diffusività (m^2 /s) di umidità precedentemente rilevate per rappresentare il flusso totale di umidità presente nel materiale (aspetto capillare).

Per la condizione limite della superficie bagnata è stato considerato il contenuto di umidità di 1 kg / kg. La diffusività di umidità media per il prodotto R in EPS è di circa $5 \cdot 10^{-10}$ m^2 / s quando il contenuto di umidità è di 0,25 kg / kg (5 kg / m^3)

Che nelle simulazioni numeriche questo flusso di umidità sia considerato flusso liquido "capillare" o "diffusione di vapore" non comporta alcuna differenza significativa, perchè entrambe queste proprietà di trasporto contengono tutte le fasi del flusso di umidità determinato in condizioni paragonabili a quelle di questo esperimento.

Questo esperimento mostra la bassa capillarità dell'EPS. A contatto con l'acqua una parte dell'umidità verrà trasportata nell'EPS, ma il flusso di umidità in condizioni di temperatura costante e senza pressione idraulica è molto basso. Nonostante il trasporto di umidità ridotto individuato nelle condizioni presentate, l'EPS non può essere considerato una interruzione capillare.

Fig.5 Distribuzione dell'umidità nei campioni di prova (prodotto R) dopo 36 giorni dal contatto con l'acqua sulla superficie inferiore (flusso di umidità verso l'alto) o superiore (flusso di umidità verso il basso).



Prove di immersione in acqua

Prove tradizionali di immersione in acqua

La tabella 7 mostra i contenuti di umidità determinati (% Vol) dei campioni di prova in EPS (5 campioni / prodotto). In queste prove i campioni (50 x 50 x 50 mm^3) sono stati collocati a 50 mm sotto la superficie dell'acqua. I risultati sono stati illustrati anche nella figura 6.

Distribuzione dell'umidità sul pannello in EPS

La distribuzione dell'umidità dopo 28 giorni di immersione in acqua è stata determinata utilizzando dei pannelli da 250 x 250 mm^2 di prodotto R. In queste prove i campioni sono stati collocati a 50 mm sotto il livello dell'acqua. I risultati sono illustrati nelle tabelle 8 e 9 e nella figura 6.

I risultati mostrano chiaramente l'effetto della pressione idraulica sulla distribuzione dell'umidità nel pannello in EPS.

La maggiore pressione provoca un contenuto di umidità più elevato a livello locale, mentre i valori più bassi sono stati rilevati a 10-20 mm dalla superficie superiore. Il contenuto di umidità complessivo era leggermente inferiore rispetto ai campioni di prova da 50 x 50 x 50 m^3 utilizza-

ti nelle tradizionali prove di immersione in acqua.

Effetto della profondità di immersione in acqua

La prova di immersione in acqua è stata realizzata per i prodotti in EPS R, S e A in due fasi. Nella prima fase i campioni sono stati tenuti a 350 mm sotto il livello dell'acqua per 28 giorni e nella seconda fase i campioni sono stati collocati a 50 mm di profondità per 5 giorni.
Le variazioni di contenuto di umidità media di ogni prodotto in EPS (4 campioni / prodotto) sono illustrate nella fig. 7. Dopo la prima fase i prodotti presentavano un contenuto di umidità più elevato (il prodotto R di circa il 116%, il prodotto S di circa il 33% e il prodotto A di circa il 6%) rispetto a quanto rilevato durante l'immersione in acqua a 50 mm di profondità (capitolo 5.5.1). I risultati mostrano che, a seconda del prodotto il contenuto di umidità dell'EPS può dipendere fortemente dalla pressione idraulica durante l'immersione. Il prodotto S è stato l'unico ad essersi asciugato (del 28% circa) durante un periodo di cinque giorni ad una pressione idraulica inferiore.

Tabella 7
Contenuto di umidità dei campioni in EPS durante le prove di immersione a 50 mm sotto il livello dell'acqua.

Prodotto	Densità kg/m³	7 giorni % Vol	14 giorni % Vol	21 giorni % Vol	28 giorni % Vol	Parte interna (strati di-3 mm)
R	17,9	3,2	3,6	3,7	4,3	3
S	18	5,1	4,7	4,7	5,1	3,8
A	19,8		5		5,1	
B	17,5		6,7		6,2	

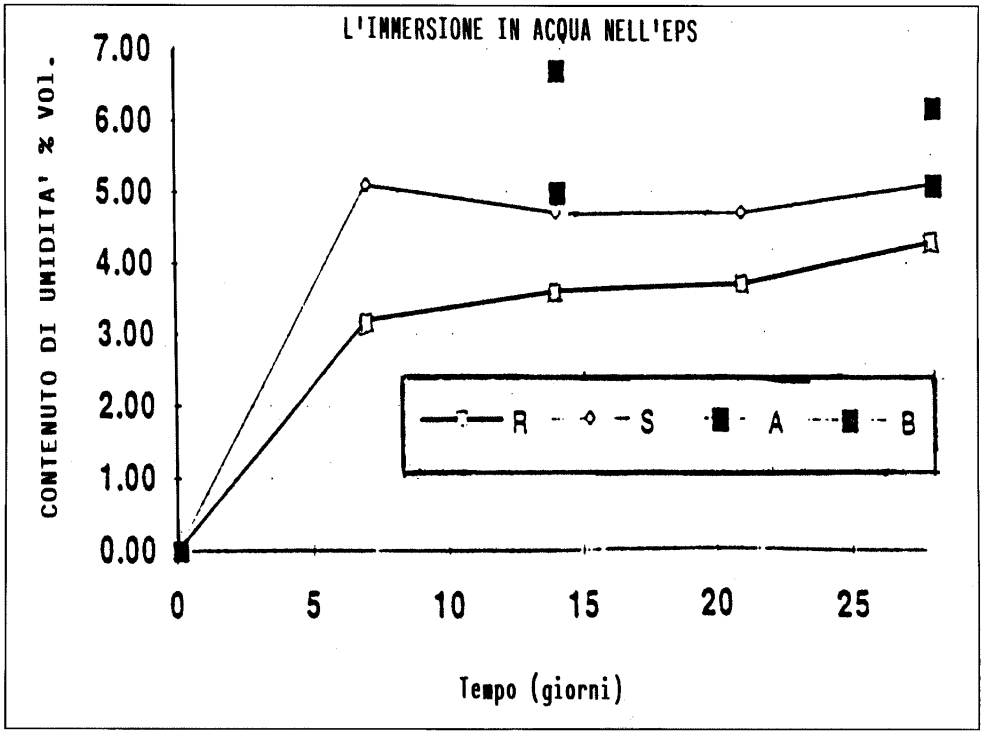


Fig. 6 Immersione in acqua nei prodotti in EPS durante la prova di immersione della durata di 28 giorni, a 50 mm sotto il livello dell'acqua.

Tabella 8
Contenuti di umidità medi dei pannelli di prova in EPS (prodotto R) durante l'immersione in acqua.

Prodotto	Densità kg/m³	14 giorni % Vol	28 giorni % Vol
R1	19,2	3	3,6
R2	19,7	3,1	4,3
R3	19,2	3,3	4
R4	20	3,9	5,1

Tabella 9
Distribuzione dell'umidità in pannelli di prova in EPS con uno spessore di 50 mm (prodotto R) dopo 28 giorni di immersione in acqua, collocati a 50 mm sotto il livello dell'acqua.

Strati (10 mm) dalla parte superiore al fondo	R1 % Vol	R2 % Vol	R3 % Vol	R4 % Vol
1	3,2	3,7	3,6	4
2	2	2,9	2,8	3,6
3	2,3	3,8	3	4,2
4	3,8	4,3	3,6	4,8
5	4,9	4,9	4,5	5,6
Media	3,2	3,9	3,5	4,4

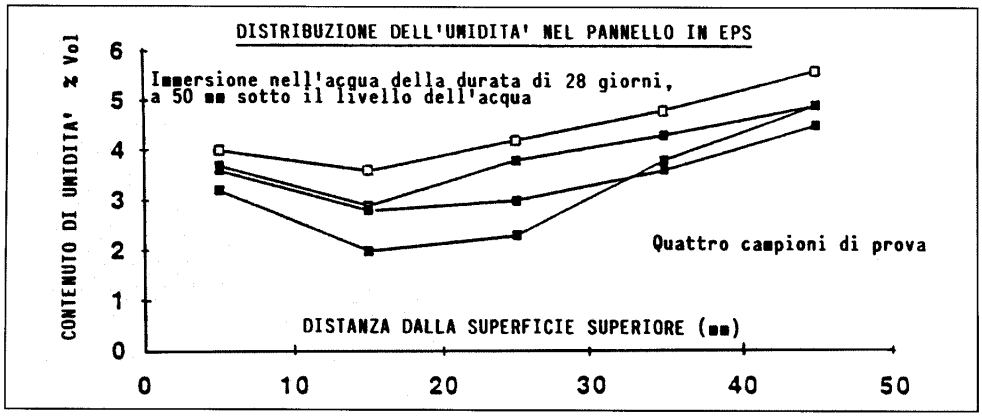


Fig.6 Distribuzione dell'umidità nei pannelli in EPS (prodotto R) dopo 28 giorni di immersione in acqua.

Effetto delle variazioni di pressione atmosferica

L'immersione umida (nel prodotto R) è stata rilevata utilizzando un aumento o diminuzione (+/- 500 mm di altezza dell'acqua) di variazione graduale per una pressione atmosferica con variazione normale. I +/- 500 mm di pressione dell'acqua sono stati selezionati per presentare le tradizionali ampiezze di altezza possibili nelle variazioni di pressione atmosferica.

Lo scopo era quello di studiare gli effetti della variazione di pressione atmosferica sull'accumulo di umidità durante la prova di immersione in acqua. I risultati sono illustrati nella figura 8.

I risultati mostrano che nella pressione normale il contenuto di umidità alla fine della prova era di circa 4,3 % Vol, mentre in condizioni di variazione di pressione adiacente era di 5,4 e di 5,8 % Vol. Il livello di pressione dinamica più elevato (+ 500 mm wp/normale) ha provocato un accumulo di umidità leggermente superiore nell'EPS rispetto alle condizioni di pressione dinamica inferiori (- 500 mmwp/normale).

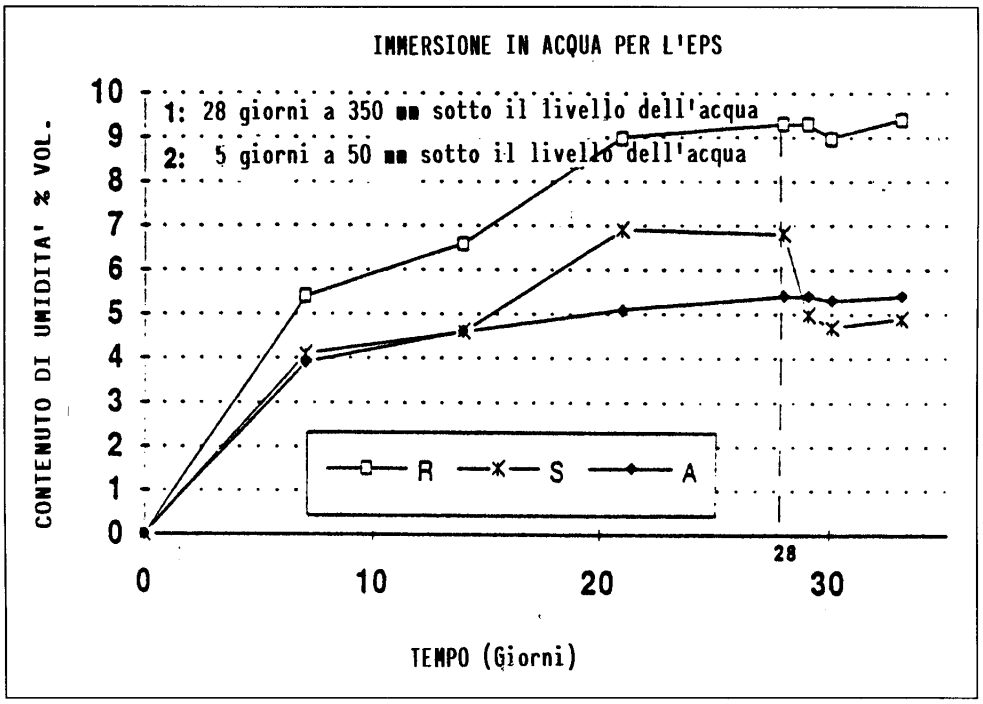


Fig.7 Contenuto di umidità dei campioni in EPS durante la prova di immersione in acqua della durata di 28 giorni a una profondità

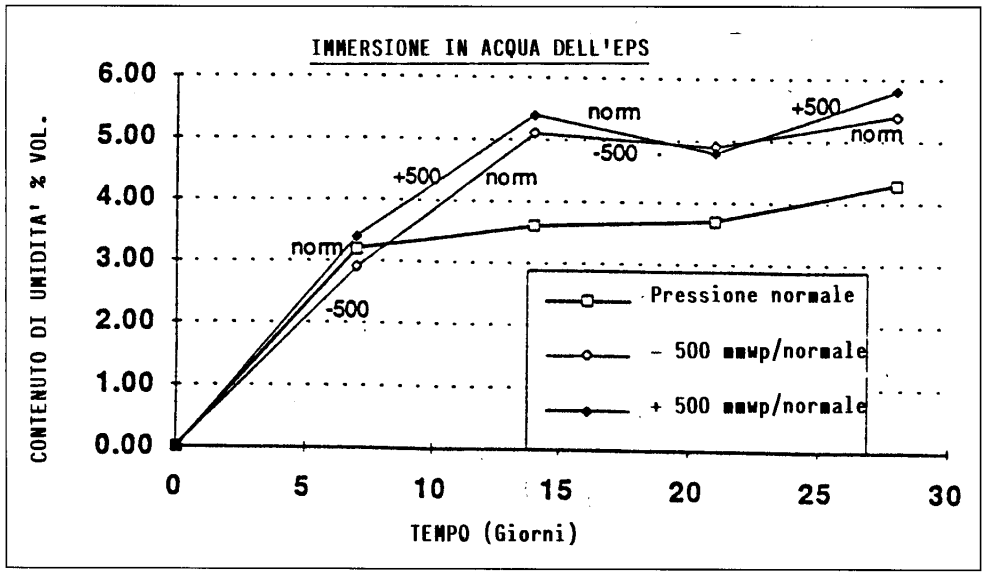


Fig. 8 Prove di immersione in acqua (prodotto R) con una pressione atmosferica a variazione normale e in casi che prevedono periodi settimanali di pressione + 500 mmwp/ normale o - 500 mmwp/ normale.

Proposta di Norma Cen perdita di calore attraverso il terreno

Metodo di calcolo

CEN/TC 89 pr EN 1190
Prestazioni Termiche Degli Edifici
Perdita di calore attraverso il terreno

Scopo
Questa norma fornisce metodi di calcolo dei coefficienti di perdita di calore e dei tassi di perdita di calore, per elementi costruttivi in contatto con il terreno.
Viene applicata su elementi costruttivi, o parti di essi, sotto un piano orizzontale di fondazione.
- Per pavimentazioni a soletta o sospese,a livello della superficie interna del pavimento.
- Per basamenti, a livello della superficie di terreno esterna.

Questa comprende il calcolo in stato stazionario della perdita di calore (tasso medio annuale della perdita di calore), e della parte dovuta alle variazioni periodiche annuali, ottenute su base mensile; la norma non si applica a periodi più brevi.

Definizioni e simboli

a) Definizioni
Per gli scopi di questa norma le definizioni in ISO 7345 si applicano, insieme alle seguenti:

b) Pavimento a soletta:
Costruzione di pavimentazione direttamente sulla superficie su tutta l'area.

c) Pavimento sospeso:
Costruzione di pavimento nella quale lo stesso è separato dal terreno, con un vuoto d'aria tra il pavimento ed il terreno.

d) Basamento:
Spazio accessibile, in parte o interamente sotto il livello della superficie esterna del terreno.

e) Spessore equivalente (di una resistenza termica):
Spessore di terreno che ha la stessa resistenza termica.

f) Coefficiente di accoppiamento termico in stato stazionario:
Flusso di calore stato stazionario per differenza tra esterno ed interno.

g) Coefficiente di accoppiamento termico interno periodico:
Ampiezza di flusso di calore periodico in funzione della variazione della temperatura interna.

h) Coefficiente di accoppiamento termico periodico esterno:
Ampiezza del flusso di calore periodico in funzione della temperatura esterna.

i) Dimensione caratteristica del pavimento:
Area di pavimentazione divisa da metà del perimetro del pavimento.

l) Differenza di fase:
Periodo di tempo tra il MAX ed il MIN di una temperatura ciclica ed il conseguente MAX o MIN tasso di flusso di calore.

Proprietà termiche

1) Proprietà termiche del terreno
Vengono specificate in regolamentazioni nazionali. In altri casi:
a) se noti, si usino i valori del luogo, proporzionali alla profondità ed all'ampiezza dell'edificio;
b) altrimenti, se è specificato e noto il tipo di suolo, si usino i valori in TAV. 1;
c) altrimenti, si usi $\gamma = 2{,}0$ W (m.K) e pc = $2{,}0 \times 10^6$ J/(m³K)

Tavola 1 - Proprietà termiche terreno

Categoria	Descrizione	Conducibilità termica γ (W/(m.K))	Capacità termica pc (J/(m³K))
1	argilla	1,5	$3{,}0 \times 10^6$
2	sabbia o ghiaia	2,0	$2{,}0 \times 10^6$
3	roccia omogenea	3,5	$2{,}0 \times 10^6$

2) Proprietà termiche dei materiali da costruzione

Per la resistenza termica di qualsiasi prodotto edile si utilizza il valore di progetto come in prEN ISO 10456.
La resistenza termica di prodotti usati sotto il livello suolo dovrebbe riflettere le condizioni d'umidità dell'applicazione.
Se viene citata la conduttività termica, si elabora il valore della resistenza termica come lo spessore diviso della conduttività termica.

3) Resistenze superficiali
Si utilizzano i seguenti valori:
- flusso calore interno, verticale: Rsi = 0,17 m²K/W
- flusso calore interno, orizzontale: Rsi = 0,13 m²K/W
- flusso calore interno, verso l'alto: Rsi = 0,10 m²K/W
- tutti i casi, esterni: Rse = 0,04 m²K/W

Temperatura interna e dati climatici

a) Temperatura interna
Per calcolare la quantità di perdita di calore la normativa richiede la temperatura interna an-

Nota: la capacità termica di materiali edili usati in costruzioni di pavimenti è piccola in confronto a quella del suolo, ed è trascurata.

nuale media.

b) Dati climatici
Per calcolare la quantità di perdita di calore, la normativa richiede la temperatura dell'aria esterna media annuale.

Trasmittanza termica e tasso perdita di calore

a) Trasmittanza termica
La trasmittanza termica per pavimenti e basamenti è legata alla componente in stato stazionario della perdita di calore. Metodi di calcolo vengono dati per i vari tipi di pavimentazioni e basamenti.

b) Effetto di acqua nel terreno
L'acqua nel terreno ha effetto trascurabile sulla perdita di calore a meno che sia a piccola profondità ed abbia un elevato tasso di flusso.
Quando si conoscono le profondità della superficie d'acqua sotto il livello della terra ed il tasso del flusso d'acqua, il coefficiente termico dello stato stazionario - LS può essere moltiplicato da un fattore Gw.

Nota 1: Solo un piccolo errore risulta usando dimensioni esterne (misurate lungo la faccia esterna delle pareti attorno all'edificio) per la determinazione di P ed A.

Parametri usati nei calcoli

Le formule in questa normativa danno il flusso totale di calore nel pavimento, e sono legate all'area riscaldata del pavimento, le cui dimensioni sono misurate lungo la faccia interna delle pareti attorno all'edificio, comprendendo lo spessore di tutte le pareti interne o partizioni.
Lo spessore della parete esterna attorno all'edificio è compresa, come un parametro nella formula.

a) Spessore equivalente
Il concetto di "spessore equivalente" viene introdotto per semplificare l'espressione dei coefficienti termici. Una resistenza termica è rappresentata dal suo spessore equivalente, che è lo spessore del terreno che ha la stessa resistenza termica.

Pavimentazione a soletta: non isolate o isolate completamente

I pavimenti a soletta comprendono qualsiasi pavimento che consiste in una soletta in contatto con il terreno sopra l'intera area, sia o meno, sostenuto dal terreno sopra l'intera area, e situato al livello della superficie esterna del terreno (fig. 1).
Questa soletta può essere:
- non isolata, oppure
- completamente isolata (sopra, sotto e all'interno della soletta) sull'intera area.

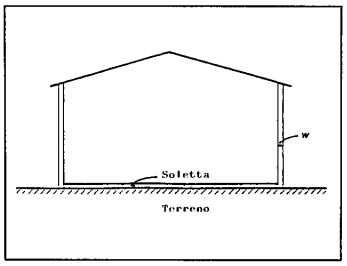
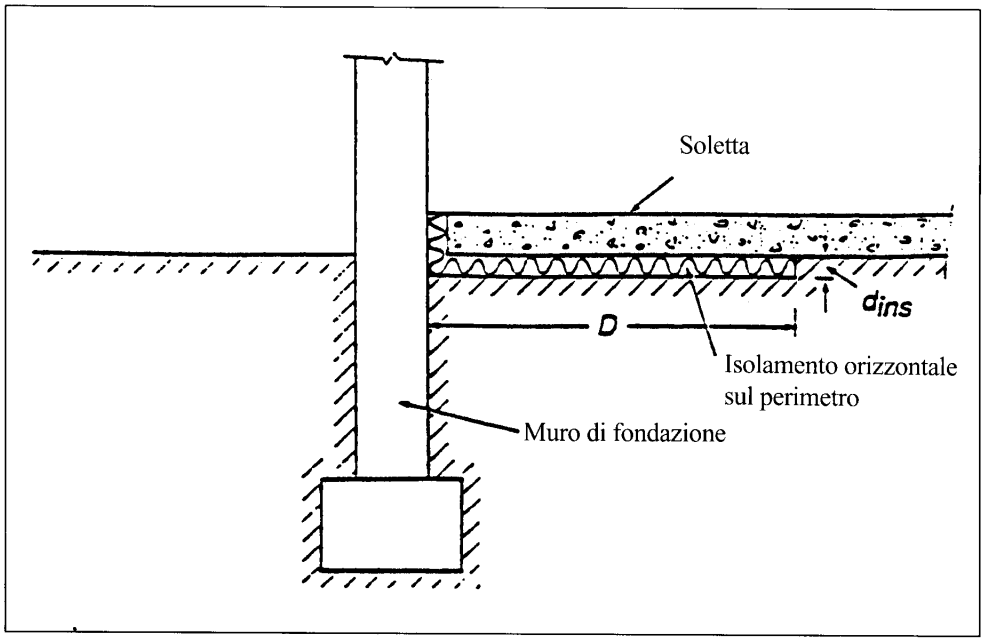


Fig. 1 Diagramma schematico di pavimentazione a soletta

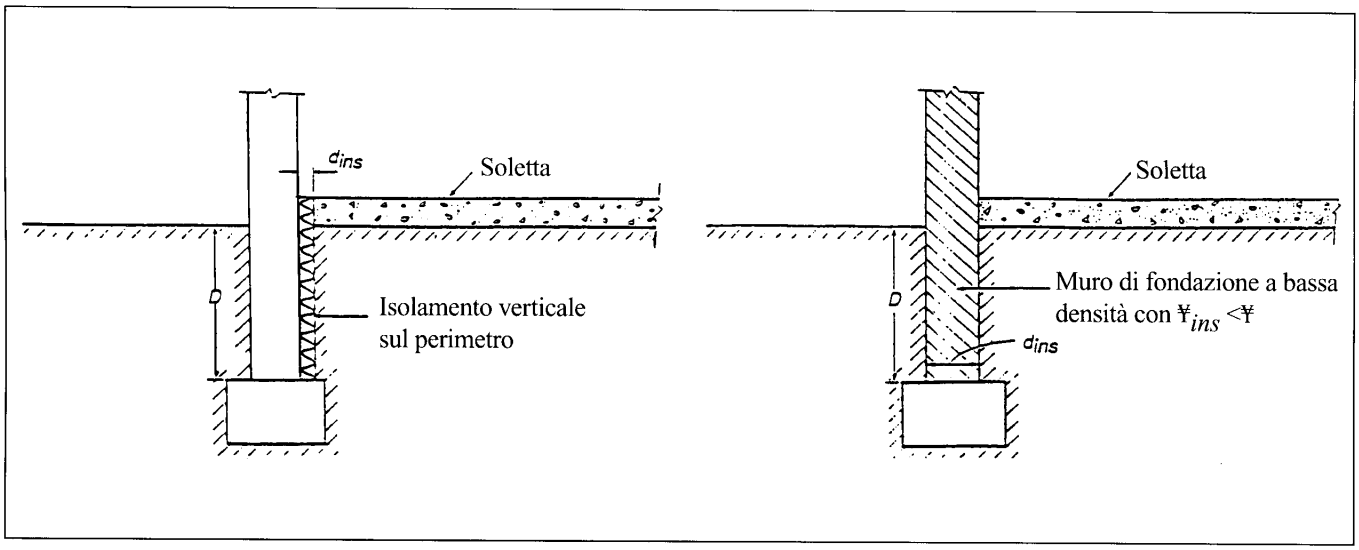
Pavimentazione a soletta con perimetro isolato

Una soletta può avere l'isolamento sul perimetro, posto orizzontalmente o verticalmente attorno al perimetro del pavimento.
Le formule date in questa clausola sono applicabili quando l'ampiezza o la profondità dell'isolamento sul bordo, D, è piccolo confrontato con l'ampiezza dell'edificio, ed il ponte termico al perimetro del pavimento è sufficientemente esiguo da essere trascurato.

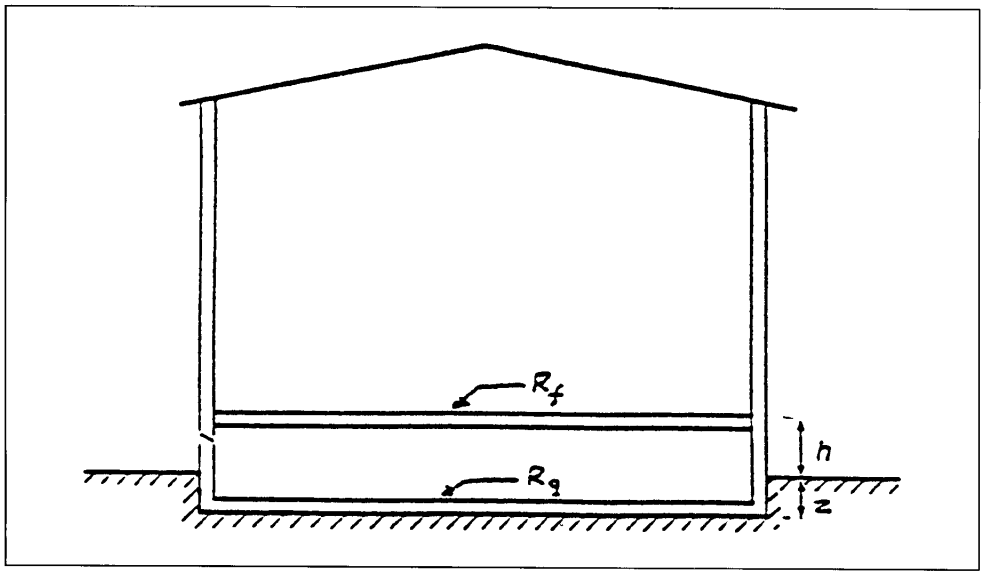
a) Isolamento orizzontale sul perimetro



b) Isolamento verticale sul perimetro



Pavimento sospeso



Un pavimento sospeso è qualsiasi tipo di pavimento tenuto lontano dal terreno, per esempio con travi o blocchi. Questa clausola considera pavimenti sospesi nei quali lo spazio sottopavimento è naturalmente ventilato con aria dell'ambiente esterno.

Basamenti riscaldati

Le procedure fornite si applicano agli edifici nei quali parte dello spazio abitabile è sotto livello terra (Fig. 6).

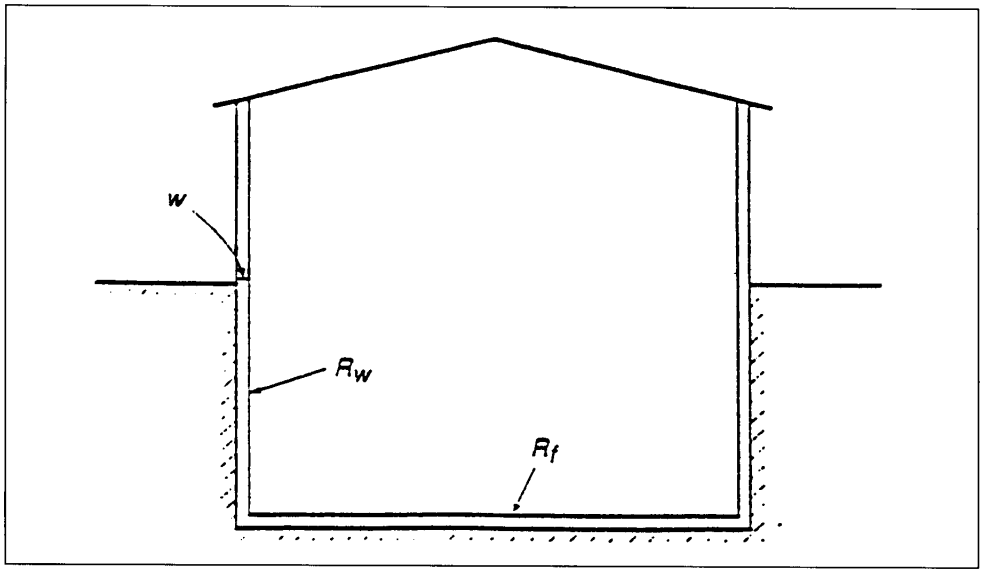


Fig. 6 - Diagramma schematico

Rosario Ceravolo*, Marco Masoero**

La valutazione dell'impatto ambientale da vibrazioni ferroviarie

Ricerca svolta nell'ambito del Progetto Finalizzato Trasporti 2 del CNR, contratto 91.02492.PF74 e 93.01854.PF74.

Introduzione

Il trasporto su rotaia unanimemente considerato come una risposta efficace dal punto di vista ambientale alla domanda di movimentazione di merci e persone. Fra le possibili cause di impatto ambientale sul territorio attraversato da una ferrovia, il rumore e le vibrazioni costituiscono senza dubbio le componenti di maggiore criticità. Per questo motivo, il problema della valutazione delle emissioni acustico-vibratorie nel trasporto ferroviario e dei relativi effetti su persone e cose è stato oggetto di crescente interesse in sede di ricerca e di sviluppo legislativo-normativo.
La generazione del rumore e delle vibrazioni imputabile ad una medesima causa primaria rappresentata, per il trasporto alle attuali velocità di esercizio (non superiori a 300 km/h), dall'interazione meccanica tra ruota e rotaia. Peraltro l'aspetto acustico e quello vibratorio presentano caratteristiche, modalità di propagazione ed effetti sostanzialmente diversi. L'impatto del rumore riguarda prevalentemente la propagazione per via aerea di onde elastiche caratterizzate da frequenze relativamente alte (1000-4000 Hz), con effetti avvertibili a distanza pari ad alcune centinaia di metri o anche di un km in casi particolarmente critici quali le vallate. Quando si parla di vibrazioni ci si riferisce tipicamente alla propagazione per via solida di onde elastiche che si trasmettono dalla rotaia all'armamento fino al terreno e i cui effetti (talvolta anche di tipo acustico, come ad esempio nel caso dell'eccitazione vibratoria di componenti edilizi leggeri quali i vetri) si risentono tipicamente sino a distanze dell'ordine di 100÷ 200 m.
In questa sede si esaminano esclusivamente i problemi legati alle vibrazioni, con particolare riferimento a dati, modelli matematici e riferimenti normativi di agevole utilizzo nello sviluppo degli studi di impatto ambientale.

Cause ed effetti delle vibrazioni ferroviarie

Le vibrazioni ferroviarie sono imputabili principalmente a imperfezioni di rotolamento all'interfaccia ruota-rotaia che, rispetto al modello di rotolamento teorico, si manifestano in termini di fluttuazioni aggiuntive di sforzi trasmessi al binario e al suolo, dando luogo ad onde meccaniche che si propagano nel terreno adiacente alla ferrovia. È da precisare che, anche nel caso ideale di assenza di imperfezioni, il rotolamento reale si discosta comunque da quello teorico in ragione della deformabilità di tutti gli elementi in gioco, dando origine ugualmente a sollecitazioni sia pur di minore intensità. Le componenti vibratorie generate a livello di armamento ferroviario subiscono al momento della trasmissione al suolo un primo filtro di accoppiamento armamento-terreno, quindi si propagano seguendo approssimativamente le leggi della dinamica dei mezzi continui. Le vibrazioni sono in grado di risalire, previo ulteriore filtro, ai piani superiori degli edifici attraverso le fondazioni e vengono percepite direttamente sul corpo o indirettamente attraverso il rumore aereo emesso dalle strutture e dagli oggetti.
Da un punto di vista sociologico le reazioni degli abitanti ai disturbi delle ferrovie, in particolare metropolitane, sono state oggetto di inchieste pubbliche in Gran Breagna, Giappone, Danimarca

** Dottorando in Ingegneria Strutturale, Dipartimento di Ingegneria Str-utturale , Politecnico di Torino.*

*** Ordinario di Termodinamica Applicata, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino.*

N.d.R. L'elenco delle simbologie usate e a fine testo.

ed altri paesi ancora. Tali inchieste hanno permesso di stabilire un indice di suscettibilità dei cittadini ai disturbi relativi ai trasporti su rotaia.
È molto interessante al riguardo uno studio effettuato dalle ferrovie inglesi circa le reazioni di persone che vivono a varie distanze dalle linee ferroviarie [1]. I risultati dimostrano che la percentuale di soggetti disturbati scende rapidamente quando la distanza aumenta da 25 a 150 metri, mentre oltre i 200 metri in pratica non vi sono più effetti di disturbo. Risulta inoltre che la velocità di transito -gioca un ruolo notevole, in quanto passando da 30 a 150 km/h la percentuale delle persone per le quali le vibrazioni costituiscono un problema aumenta del 20-25%. Viceversa il numero di treni ha scarsa influenza: manca quindi una correlazione tra disturbo e frequenza degli eventi. Ulteriori problematiche possono assumere rilievo in relazione alla possibile interferenza delle vibrazioni con attività produttive di elevata precisione o al disturbo su sistemi di misura.
Per ciò che concerne invece il possibile danno ai manufatti, l'aspetto più interessante degli studi effettuati al riguardo è che l'accelerazione relativa alla soglia di rischio di danno alle strutture più sensibili notevolmente superiore a quella relativa alla soglia di disturbo alle persone. Questo naturalmente implica che, in condizioni normali, ove si salvaguardi l'impatto sulle persone risulterebbe inutile ogni ulteriore verifica strutturale sui manufatti.

Impostazione del problema

Una vibrazione meccanica è un fenomeno ondulatorio, generalmente a bassa frequenza, trasmesso attraverso un mezzo solido. L'analisi del fenomeno può essere fatta nel dominio del tempo (in termini di spostamenti, velocità o accelerazioni) o alternativamente nel dominio della frequenza, mediante analisi di FOURIER dei segnali. Qualora si tratti con problemi approssimativamente lineari (ipotesi ricorrente), gli spettri in frequenza dei segnali vibratori diventano uno strumento potente per caratterizzare la vibrazione e prevedere la risposta dei sistemi che ne vengono interessati. Spesso, in relazione alla valutazione degli effetti delle vibrazioni, risulta conveniente lavorare in termini di livelli vibratori, intesi come logaritmi del rapporto tra la generica grandezza vibratoria, presa come valore efficace RMS, e una opportuna grandezza di riferimento. Si indicherà dunque con L_a il livello di accelerazione in dB, così definito

$$L_a = 20 \cdot \log \left(\frac{a_{RMS}}{a_o} \right)$$

essendo a_o il valore di riferimento, pari a 10^{-6} m/s^2. Si indicherà inoltre con L_v il livello di velocit in dB, cos definito

$$L_v = 20 \cdot \log \left(\frac{v_{RMS}}{v_o} \right)$$

essendo v_o il valore di riferimento, pari a 10^{-8} m/s.
Le vibrazioni trasmesse dai convogli sono composte da una moltitudine di componenti elementari ognuna caratterizzata da distinte proprietà di ampiezza, frequenza e angolo di fase. Le frequenze dominanti delle vibrazioni trasmesse si situano normalmente nella gamma 2 Hz<f < 150 Hz. Le caratteristiche spettrali dei segnali dipendono evidentemente dal filtraggo operato dai diversi mezzi che tendono a trasferire l'energia vibratoria in prossimità delle proprie frequenze naturali; infatti le vibrazioni elementari con frequenza superiore a 150 Hz vengono filtrate durante loro trasmissione nel suolo e d'altro canto i manufatti non reagiscono generalmente a frequenze di eccitazione inferiori a 2 Hz.
La valutazione dell'impatto provocato dal fenomeno vibratorio presuppone l'identificazione

delle caratteristiche spettrali della vibrazione in corrispondenza del sito interessato dall'impatto (ciò che è possibile dalla conoscenza dello spettro eccitatore e delle frequenze proprie caratteristiche dei mezzi intermediari), inoltre richiesta la conoscenza di un livello di intensità vibratoria (in termini di spostamenti, velocità o accelerazioni) ad una distanza di riferimento dalla linea. Su quest'ultimo aspetto in letteratura si rilevano forti difficoltà di comparazione dei dati, che spesso risultano eterogenei rispetto alla posizione dei punti di misura e ai sistemi di acquisizione. Nei paragrafi seguenti si cercherà di chiarire i meccanismi della generazione e l'influenza dei diversi fattori nella caratterizzazione del fenomeno vibratoio. In una prima fase lo studio sarà incentrato sulla determinazione di un livello iniziale di riferimento, cioè si separerà, a scapito di rigore, il problema dell'emissione e quello della propagazione. Questa semplificazione equivale a modellare il sistema armamento-terreno come una semplice struttura, caratterizzata da un modulo di ammettenza meccanica in funzione della frequenza eccitatrice e da una massa, cosiddetta efficace, che tenga conto in maniera sintetica delle forze d'inerzia relative a tutto il dominio di propagazione delle vibrazioni.

Caratterizzazione delle azioni alla sorgente

Le azioni alla sorgente sono dovute a una molteplicità di fattori i cui effetti non sono distinguibili in maniera precisa. Molto utile risulta una classificazione alla luce del discostamento operato dai suddetti fattori rispetto al caso teorico di ruota rigida che rotola senza attrito su una guida rettilinea e anch'essa rigida. Il riferimento al caso teorico, scevro da vibrazioni, permette di individuare tre insiemi di fattori di disturbo che agiscono a differenti livelli:

- fattori connessi alla irregolarità di marcia del treno (scostamento dal moto rettilineo uniforme);
- fattori connessi ad irregolarità e difetti dei materiali;
- fattori connessi alla deformabilità o imperfetta rigidezza di tutti gli elementi strutturali che interagiscono durante il moto (sospensioni, asse, binario, terreno, ecc.).

I fattori connessi all'irregolarità di marcia non destano molto interesse, possedendo livelli energetici generalmente bassi. Inoltre le frequenze caratteristiche sono molto basse (< 10 Hz) e quindi l'attenuazione di queste componenti vibratorie realizzabile soltanto con la regolarizzazione del movimento stesso del convoglio.

I fattori legati alle irregolarità e ai difetti dei materiali, localizzati in particolare sulle superfici di rotolamento e quindi sull'interfaccia ruota-binario, possono essere di natura diversa:

- rugorosità del binario o delle ruote: anche in assenza di difetti evidenti le superfici di rotolamento non sono mai perfettamente lisce;
- difetti delle ruote: eccentricità, sfaccettature, ecc.;
- difetti dei binari: presenza di giunti, marezzature, apparecchio imperfetto del binario.

Infine i fattori connessi alla deformabilità degli elementi in gioco provocano eccitazioni anche in mancanza di difetti delle superfici di rotolamento. L'effetto più importante al riguardo dovuto alla presenza delle traversine ferroviarie che causa l'emissione di vibrazioni periodiche. Questi aspetti possono assumere rilievo con l'aumentare dei carichi sugli assi (in particolare nel caso di treni merci), mentre appaiono irrilevanti nelle ferrovie urbane dove appunto i carichi sugli assi sono sensibilmente inferiori .

In realtà le classificazioni operate, che appaiono molto interessanti in relazione a una possibile ottimizzazione delle tecnologie ferroviarie, in sede di studio d'impatto hanno limitata importanza, anche in considerazione della relativa standardizzazione del materiale rotabile. Sulla base di quanto detto, ai fini della previsione di impatto ambientale risulta generalmente preferibile misurare direttamente in situ l'azione della sorgente.

Caratteristiche spettrali dell'eccitazione

Si cercherà ora di illustrare come reagiscono gli organi del convoglio e l'armamento ferroviario

all'eccitazione prodotta dai menzionati fattori. La fig.1 illustra il modello che rappresenta il problema dinamico in esame, dove per semplicità sono state rappresentate le eccitazioni più rilevanti, cioè quelle causate dalle imperfezioni all'interfaccia ruota/rotaia (δ_2) e quella dovuta alla deformabilità della via sulle traversine (δ_1).
La *Deutsche Bundesbahn* ha constatato che le frequenze proprie di flessione dell'asse caricato si situano nella gamma tra 45 e 90 Hz. Si nota inoltre che anche le frequenze di risonanza della via con ballast (sistema armamento-terreno) si collocano nella stessa gamma delle precedenti.
La flessione verticale dell'asse caricato e la deformabilità della via ferrata (in particolare la maggiore rigidezza del tratto di binario vicino alla traversina) sono molto influenti sulla generazione delle vibrazioni. È possibile ridurre gli effetti soltanto modificando la concezione dell'asse, o meglio riducendo la sua massa non sospesa. Visto che i vari elementi interessati dalla vibrazione tendono a trasferire l'energia vibrazionale sulle proprie frequenze, per quanto detto ci si deve aspettare uno spettro ricco nella gamma 45-90 Hz.
Uno studio accurato del fenomeno può essere compiuto soltanto integrando il modello teorico con una serie di misure sperimentali, necessarie per l'acquisizione dei parametri principali. La RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) ha sviluppato al riguardo una metodologia sperimentale atta a caratterizzare il comportamento dinamico dei diversi elementi in gioco [2].
La fig. 2 presenta la funzione di trasferimento tra l'eccitazione dovuta a imperfezioni ruota/rotaia (δ_2) e lo sforzo trasmesso al suolo, relativa al sistema meccanico costituito dall'accoppia-

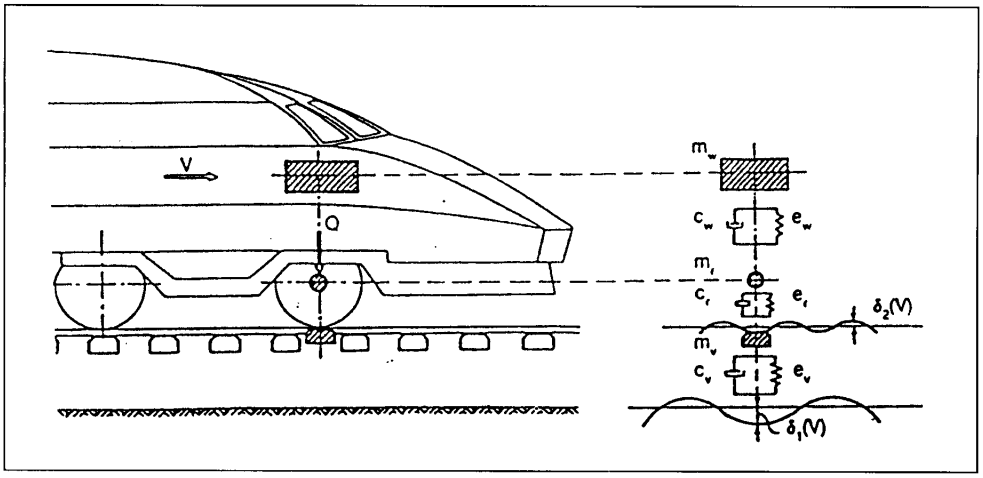


Fig. 1 Modello dinamico rappresentativo dell'interazione dei diversi organi del convoglio [12]

mento dell'asse portante di un metro MF 77 con una via su ballast in curva. Il primo picco dovuto alla risonanza di un quarto della massa del carrello sulla rigidezza della sospensione primaria della rotabile, mentre il secondo, intorno ai 50 Hz, correlabile con la risonanza di sospensione della massa dell'asse sulla rigidezza della via. Più precisamente la massa efficace della via e quella dell'asse oscillano sulla rigidezza di appoggio della via. L'estensione del tratto di via ferrata interessato dall'oscillazione dipende dalla sua stessa rigidezza. Infine il terzo picco è legato all'apparizione della prima risonanza di flessione elastica dell'asse, situata intorno ai 65 Hz.
I risultati confermano le ipotesi e le osservazioni fatte in partenza sullo spettro della vibrazione ferroviaria.

Stima dell'intensità alla sorgente

Le misurazioni dei livelli vibratori alla sorgente, per essere utilizzate in modelli di propagazione, devono essere effettuate a sufficiente distanza dall'asse della linea ferroviaria, in modo che la superficie d'onda nel punto di acquisizione sia approssimativamente piana. Ciò si verifica a distanza tanto minore quanto più semplici sono le condizioni geometriche al contorno (in genere

dai 7 ai 15 metri dall'asse del binario). Allo scopo di fissare gli ordini di grandezza, è utile riportare una serie di risultati ottenuti durante varie campagne di misura eseguite su alcune reti ferroviarie, avvertendo che purtroppo i dati disponibili mancano di qualsiasi omogeneità rispetto alle grandezze misurate e alle modalità di acquisizione. Le ferrovie tedesche in venti campagne di misura hanno ottenuto le medie dei valori di cresta della velocità vibratoria normalizzati a 20 m dalla linea. I risultati, riportati nella tabella 1, sono riferiti al campo di frequenze 10÷60 Hz, ove generalmente si collocano le vibrazioni di maggiore ampiezza. I dati vengono distinti secondo le tre componenti spaziali: x è l'asse orientato secondo la direzione di propagazione, y secondo la direzione ortogonale all'asse di propagazione e infine secondo la direzione della ver-

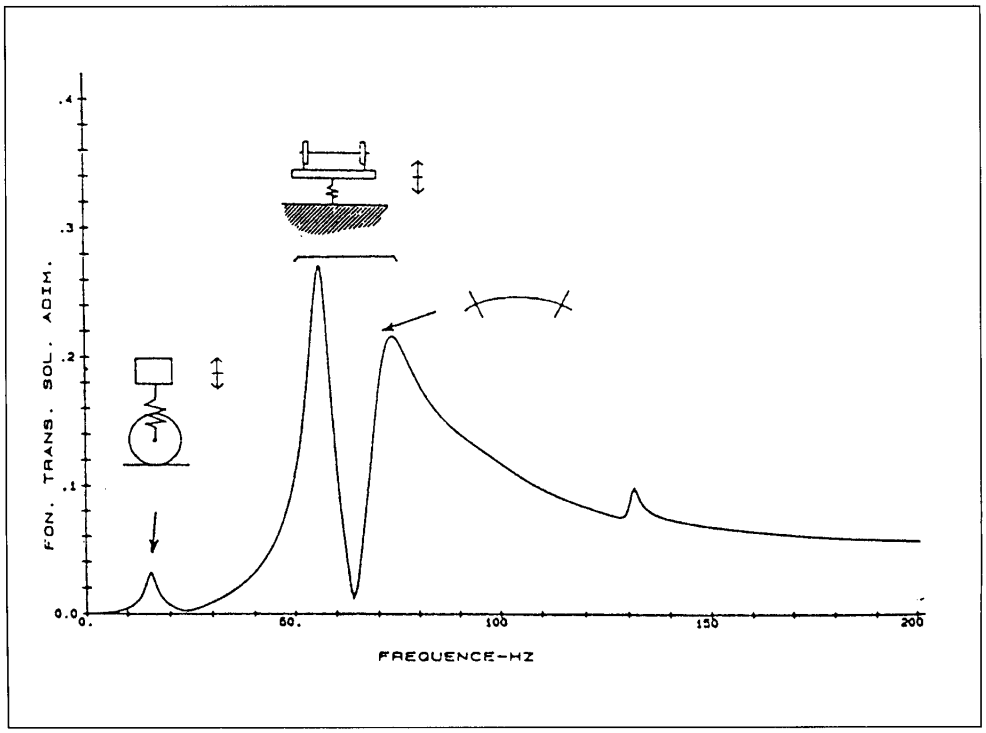


Fig. 2 Modulo della funzione di trasferimento tra lo spettro di rugosità e lo spettro di sforzo totale trasmesso al suolo ($K_1 = \infty$; m_1 = 60 Kg/m; EJ = 6,4·10⁶ N·m²; m² = 120 kg/m; K° = 6,4·10⁷ N/m²; asse portante MF 77; scorrimento trasversale medio: 0,03 per raggio di curva 75m) [2].

ticale. Molte informazioni provengono da misurazioni effettuate su linee metropolitane, ove il problema delle vibrazioni riveste notevole importanza.
Ad esempio in tabella 2 sono riportati i risultati di prove effettuate nel tunnel dell'aeroporto di Francoforte (nella banda 16÷100 Hz, velocità del convoglio 60 km/h). Nella seconda colonna appaiono i risultati ottenuti con sistema antivibrante a vasche flottanti di tipo Eisenmann. Altri dati, questa volta in termini di accelerazione, possono essere estrapolati dalla legge di attenuazione empirica fornita dall'Istituto Sperimentale delle Ferrovie dello Stato.
Essa deriva da una serie di misurazioni, eseguite per conto delle FS su convogli della linea ferroviaria italiana, ed esprime il valore di aRMS in funzione della distanza x dall'asse del binario nella forma seguente

$$a_{RMS} = 120 \cdot \exp(-x/23.08)\ [mm/s^2] \qquad (1)$$

Qualora non si potesse disporre di misurazioni specifiche per il caso in esame o si desiderassero valutazioni di larga massima, in alternativa alla legge di attenuazione delle FS, la determinazione del livello vibratorio di base $La(x_0)$ può far riferimento a misurazioni reperibili in letteratura per treni passeggeri, fatte a distanza dall'asse ferroviario variabile tra i 15 e i 30 m.

Tabella 1
Valori di velocità vibratoria in dB e mm/s secondo i tre assi (Deutsche Bundesbahn)

(dB)			(mm/s)		
x	y	z	x	y	z
80,0	80,8	79,0	0,50	0,5 5	0,45

Tabella 2
Valori di velocità vibratoria rilevante nel tunnel dell'aeroporto di Francoforte

Punti di acquisizione	Velocità (mm/s)	Velocità (mm/s) con sistema antivibrante
Rotaia	1,99	3,75
Parete Tunnel	0,02	$2{,}8.10^{-3}$

Si deve comunque sottolineare che i rilievi sperimentali indicano livelli nettamente più bassi nel caso di binari saldati e apprezzabili differenze a seconda del tipo di sottostruttura (ballast, piattaforme in c.a.p., ecc.) e di tipologia d'opera ferroviaria (viadotto, tunnel, rilevato. ecc.). Inoltre grossa influenza hanno in generale sulle vibrazioni e sul rumore trasmesso pervia solida la presenza di difetti su cerchioni e rotaie, il carico assiale e la velocità di transito.
In particolare da diversi rilievi sperimentali risulta che la presenza di sfaccettature sui cerchioni e di marezzatura sulle rotaie provoca incrementi sul livello L_a di 10 ÷ 20 dB, mentre per ruote e rotaie con normali microdifetti, ma senza giunti e corrugamenti, si trovano incrementi di 3 ÷ 10 dB. Il raddoppiamento del carico assiale comporta aumenti di 2-4 dB indipendentemente dalla velocità di transito.
Un raddoppiamento di quest'ultima nell'intervallo 24 ÷ 113 km/h induce aumenti di 4 ÷ 6 dB dei livelli vibrazionali misurati sulle pareti delle gallerie e al suolo. Risultati analoghi sono stati trovati da Ungar e Bender nel campo di velocità 20 ÷ 120 km/h [3].

La propagazione delle vibrazioni ferroviarie

La modellazione del comportamento dinamico del terreno al passaggio dei convogli rappresenta un problema di estrema complessità, da un lato per la difficoltà insita nella scelta di parametri rappresentativi del terreno inteso come continuo granulare multifase, dall'altro per la conoscenza molto sommaria delle caratteristiche spettrali dell'eccitazione ferroviaria.
Analizzando il terreno come un continuo elastico omogeneo, è noto dalla meccanica dei mezzi continui che le sollecitazioni dinamiche determinano in generale onde di compressione e onde di taglio. Qualora la propagazione avvenga in terreni approssimativamente isotropi ed omogenei e in particolare nell'ipotesi di continuo pressochè illimitato (es. tunnel molto profondo) è relativamente semplice impostare una modellazione matematica basata su questo tipo di onde.
Ove siano presenti particolari condizioni al contorno (superficie libera, mezzo con estensione limitata ecc.) il fenomeno vibratorio si complica. in tal caso vengono generati altri due tipi di onde, cosiddette di superficie, che si formano all'interfaccia tra due mezzi non omogenei quindi anche sulle superfici libere: le onde di Rayleigh e di Love. Fra i due tipi di onde superficiali in questa sede assumono rilevanza soltanto le onde di Rayleigh, che sono confinate in uno spessore pari alla lunghezza d'onda e si smorzano molto lentamente, essendo conseguentemente le più avvertite sulle lunghe distanze.

Le onde di taglio e di Rayleigh hanno velocità di 30 ÷ 300 m/s nel terreno e fino a 1000 m/s nella roccia. Le onde di compressione hanno una velocità di 2,5 ÷ volte superiori alle precedenti. Dalle esperienze si riscontra che le onde di tipo Rayleigh rappresentano una cospicua parte del fenomeno vibratorio indotto dal transito di un treno. Ad esempio nel caso di sorgente puntiforme su un semispazio (es. un locomotore isolato) il 67% dell'energia vibrazionale emessa posseduta dalle onde di Rayleigh, il 26% dalle onde di taglio e il 7% da quelle di compressione [4].
Il campo di frequenza interessato dalle vibrazioni nel suolo va da pochi hertz (1 ÷ 2 Hz) a circa un centinaio (100 ÷ 150 Hz) e le componenti spettrali più intense si collocano nell'intervallo 10 ÷ 60 Hz.
Ad esempio le misure di vibrazioni svolte sulla linea sperimentale tedesca ad alta velocità vicino a Rheda-Oelde (Westphalia) hanno mostrato valori massimi di livello compresi tra 50÷80 Hz con livelli in dB inferiori di circa 26 dB rispetto al livello presente in corrispondenza della linea. Svariate indagini in campo su treni in transito a varie velocità mostrano che la frequenza di vibrazione dominante rimane comunque collocata nell'intorno dei 50 Hz.
In generale il livello di accelerazione vibrazionale alla distanza x è uguale al livello di vibrazione alla distanza di riferimento x_o diminuito della somma delle attenuazioni nel terreno A_i che si verificano tra x_o e x

$$L_a(x) = L_a(x_o) - \Sigma_i A_i \qquad (2)$$

I termini da tenere in conto per la riduzione del livello di vibrazione al sito riguardano:
- l'attenuazione dovuta alla divergenza geometrica che dipende dalla forma della sorgente e dal tipo di onda;
- l'attenuazione dovuta all'assorbimento del terreno;
- l'attenuazione dovuta alla presenza di discontinuità nel terreno (presenza di strati con caratteristiche smorzanti, presenza di faglie o microfessurazioni, ecc.);
- l'attenuazione dovuta all'assorbimento dell'aria.

L'*attenuazione geometrica* si esprime come [5]

$$A_g = 20 \cdot \log_{10} [x / (x - x_o)]^n \qquad (3)$$

dove:
x = distanza dall'asse del binario
x_o = distanza di riferimento
n = coefficiente di attenuazione geometrica.

Poiché il termine n dipende dal tipo di onda, la sua scelta deve essere fatta in relazione alle specifiche condizioni al contorno. È stato ampiamente dimostrato che buona parte dell'energia vibratoria emessa da linee ferroviarie in superficie rappresentata da onde di Rayleigh [5], anche se in un'analisi rigorosa sarebbe necessario tener conto separatamente del contributo dei diversi tipi di onde (Rayleigh, taglio, compressione). Nel caso di sorgente puntiforme verticale su un semispazio il fattore n assume valore 0,5 per onde di superficie, mentre per onde di volume vale 2 in prossimità della superficie e 1 in profondità [6]. Nel caso di sorgente lineare n assume valore nullo per onde di superficie e valore 1,5 per onde di compressione. Per ricettori non troppo distanti dalla linea ferroviaria il treno si può considerare come una sorgente lineare indefinita.
Recenti ricerche hanno dimostrato che, nel caso di strutture sopraelevate e gallerie, a differenza delle ferrovie in superficie, le onde Rayleich dominano solo sulle Grandi distanze e per ricettori posti in superficie. Inoltre nel caso specifico di ricettore posto in vicinanza di una galleria, è ragionevole impostare uno studio basato sulle sole onde di compressione e assumere il termine n di attenuazione geometrica pari a 0,5 [3].

L'*attenuazione dovuta all'assorbimento del terreno* si esprime nella forma [5]

$$A_t = \log_{10}\left(e^{\frac{\omega\eta}{2C}(x-x_0)}\right) = 4.34 \cdot \frac{\omega\eta}{C} \cdot (x-x0) \qquad (4)$$

dove:
x = distanza dall'asse del binario
ω = pulsazione in rad/s
η = coeff. di assorbimento del terreno
C = velocità di propagazione dell'onda nel terreno

Questa espressione deriva dall'assunzione che il terreno abbia un comportamento di tipo viscoelastico. In essa si nota che, nell'ipotesi di η indipendente dalla frequenza, il livello di vibrazione decade più velocemente alle alte frequenze. Ciò spiega in parte il fatto che le vibrazioni del suolo siano confinate prevalentemente sulle basse frequenze. Inoltre dall'equazione si osserva che il decadimento è più accentuato per velocit d'onda più basse.

Da un punto di vista operativo, si possono fare alcune ipotesi semplificative:

a) essendo la frequenza dominante della vibrazione ferroviaria nell'intorno dei 50 Hz, il termine ω può essere assunto pari a 2πc-50 rad/s;

b) il fattore di assorbimento η si può considerare con buona approssimazione funzione del solo mezzo di propagazione e non del tipo di onda;
c) per onde di compressione la velocità C ha la seguente espressione analitica

$$C\upsilon = C_l \cdot \sqrt{\frac{(1-\upsilon)}{(1+\upsilon)(1+2\upsilon)}} \qquad (5)$$

essendo $C_l = \sqrt{E/\rho}$ la velocità longitudinale dell'onda di volume nell'ipotesi di modulo di Poisson υ nullo.
Analizzando le formule precedenti si trova che la velocità dell'onda di compressione presenta una forte variabilità rispetto al coefficiente di Poisson e visto che la valutazione di quest'ultimo parametro per i diversi tipi di terreno presenta un alto grado di incertezza, si preferisce utilizzare nei calcoli la velocità longitudinale, indipendente dal parametro υ, accettando l'errore che ne deriva.
I parametri relativi alle onde di taglio e superficiali tipo Rayleigh si ricavano con approssimazione dividendo per un fattore variabile tra 2,5 e 4 i valori citati in tabella 3, relativi a onde di compressione.
Nella tabella 3 sono presentati dei valori indicativi dei parametri in questione per alcuni tipi di terreno.

Tabella 3
Parametri meccanici per le principali categorie geolitologiche

Tipo di terreno	C [m/s]	n	p [g/cm³]
Roccia	3.500	0,01	2,65
Sabbia, ghiaia, ciottoli	600	0,1	1,6
Limi, argille	1.500	0,5(*)	1,7

(*) Vista la notevole incertezza è consigliabile assumere un valore più conservativo: η = 0,1-0,2.

L'attenuazione per presenza di discontinutà nel terreno considera le perdite di energia vibrazionale dovute ai cambiamenti delle proprietà del terreno lungo il percorso di propagazione. Se si assume che le onde di compressione si trasferiscano dal solido 1 al solido 2 e che si propaghino su un piano normale a quello di separazione, l'attenuazione conseguente potrà esprimersi nella forma

$$A_d = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2} \right) \right] \qquad (6)$$

L'equazione è valida a condizione che lo spessore dei due strati risulti di molte volte superiore alla lunghezza d'onda incidente [3]. La suddetta formulazione può essere utile soltanto quando si conoscano approfonditamente le caratteristiche geolitoligiche dei mezzi e qualora il fenomeno vibratorio sia governato dalle onde di volume (es. ricettore situato a livello suolo direttamente al di sopra di una tratta in galleria).
In sede di stima di impatto ambientale normalmente hanno interesse solo le attenuazioni geometriche e quelle causate dall'assorbimento del terreno. Una trattazione più rigorosa basata su questi due tipi di attenuazione che tenga conto anche della geometria della sorgente (lunghezza del treno) può far riferimento ai lavori di Volberg [7].

La propagazione all'interno degli edifici

Le modalità di propagazione delle vibrazioni nelle strutture edilizie e la risposta di pareti e solai dipendono evidentemente dalle caratteristiche costruttive dell'edificio. Al fine delle valutazioni utile separare due aspetti distinti della propagazione nei manufatti:

- l'interazione suolo-fondazioni;
- la propagazione nel corpo dell'edificio.

Il primo aspetto legato al fatto che la mancanza di solidarietà all'interfaccia terreno-struttura dà luogo a fenomeni dissipativi, configurandosi come un fenomeno favorevole. L'entità della dissipazione funzione della tipologia delle fondazioni (fondazioni a platea, fondazioni su plinti isolati, su pali, ecc.). Nel caso di fondazioni a platea la grande area di contatto con il terreno non determina alcuna perdita di accoppiamento alle basse frequenze e fino alla frequenza di risonanza della fondazione. Per le altre tipologie di fondazioni si può far riferimento ad alcune curve empiriche che consentono la stima dei livelli di vibrazione della fondazione in funzione dei livelli di vibrazione del terreno (figg. 3 e 4) [8].
Da un punto di vista operativo una valutazione precisa della dissipazione all'interfaccia terreno-fondazioni appare impraticabile. Inoltre i dati a disposizione in sede di valutazione d'impatto ambientale fanno riferimento a classificazioni molto vaghe e che, anche a causa della notevole varietà nelle tecniche costruttive, non possono portare a valutazioni quantitative.
Ad ogni modo si trova che nel campo delle frequenze di interesse gli smorzamenti vanno da 3 dB a 15 dB.
In questa sede cautelativamente vengono consigliati smorzamenti nulli per platee di fondazione, di 3 ÷ 5 dB per fondazioni in c.a. o che in generale assicurino un discreto immorsamento nel terreno; potrebbero essere assegnati invece smorzamenti di 5 ÷ 8 dB nel caso di fondazioni in muratura o che comunque non abbiano capacità di immorsamento nel terreno.
Il secondo aspetto, cioè la propagazione delle onde elastiche nella struttura in elevazione, assume primaria importanza dal momento che gli orizzontamenti e le pareti degli edifici sono soggetti a significative amplificazioni delle vibrazioni rispetto a quelle trasmesse dalle fondazioni. In molti casi la risonanza delle strutture orizzontali può causare una amplificazione delle vibrazioni nel campo di frequenze comprese tra 10 ÷ 30 Hz.
I problemi maggiori si verificano quando la frequenza di risonanza dei solai coincide con la

frequenza di picco dello spettro di vibrazione del terreno. In fig. 5 e 6 [8] vengono evidenziati rispettivamente il possibile campo di amplificazione delle vibrazioni dovuto alla risonanza dei solai e il campo di attenuazione delle vibrazioni trasmesse tra due solai successivi.
Nella tabella 4 i risultati delle già citate campagne di misura effettuate dalle Ferrovie Tedesche (tabella 1) sono ampliati con le medie dei valori di cresta della velocità vibratoria misurati sulle fondazioni e sul pavimento. I dati sono sempre espressi in dB e in mm/ s per le tre componenti spaziali x, y, z.
Risultati analoghi sono stati ottenuti nel corso di misure eseguite dalle Ferrovie Svizzere: generalmente si ha un'attenuazione nelle componenti orizzontali x e y (f = 0÷80 Hz) tra suolo e piano terra degli edifici, ma si verifica un'amplificazione della componente verticale z tra suolo e piano terra e suolo-primo piano.
In termini di accelerazioni, mediamente l'amplificazione del livello di vibrazione sul pavimento di 5 dB (per solai con frequenza propria di circa 19 Hz) ma può arrivare anche a 20 dB nel caso del pavimento del piano terra (solai con frequenza propria di circa 39 Hz).
Negli edifici multipiano un valore di attenuazione delle vibrazioni da piano a piano approssimativamente pari a 3 dB. I risultati di misure sperimentali svolti da IsHii e TACHIBANA in un edificio a 10 piani fuori terra con struttura in calcestruzzo armato e acciaio mostrano un'attenuazio-

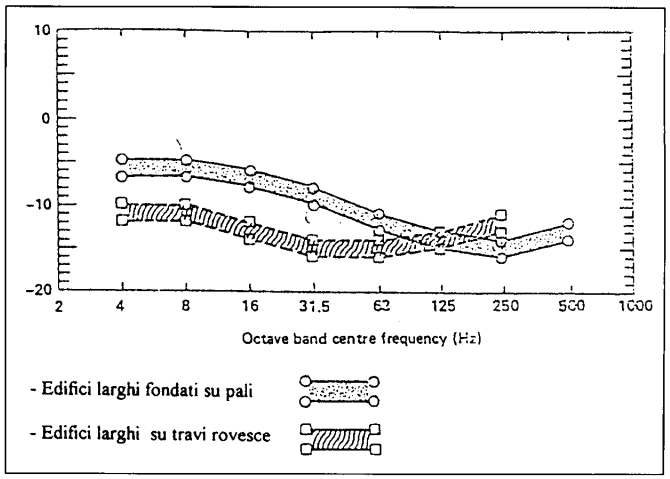


Fig. 3 - Perdita di accoppiamento sulle fondazioni in funzione della frequenza espressa in banda di ottave [8].

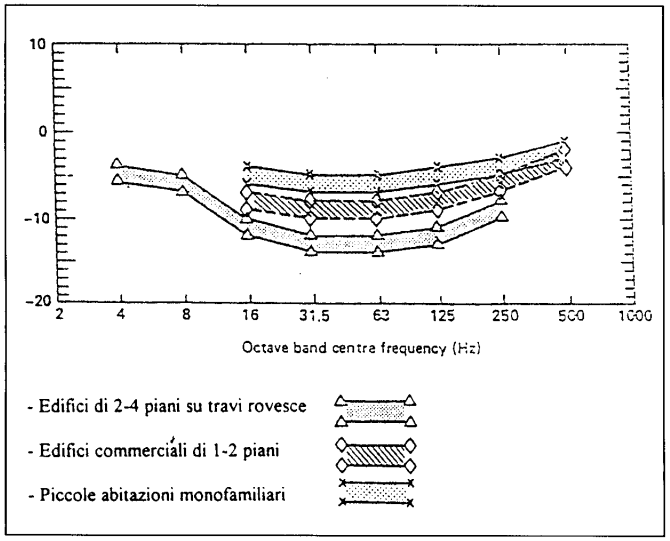


Fig. 4 - Perdite di accoppiamento per alcune tipologie di fondazioni in funzione della frequenza espressa in banda di ottave [8].

ne interpiano di circa 1 dB alle basse frequenze in corrispondenza dei piani alti e maggiori di 3 dB ai primi piani [9].
La norma DIN 4150 [10] riferisce che nel caso di vibrazioni orizzontali le frequenze proprie dei vari piani di un edificio seguono all'incirca la legge f = 10/ n, essendo n il numero di piano; per la componente verticale si hanno circa f = 10 Hz per pavimenti poco rigidi e f = 30 Hz per pavimenti molto rigidi.

Tabella 4
Livello di velocità e velocità vibratoria secondo i tre assi in diversi punti di misura (Deutsche Bundesbahn).

Punto di misura	Livello di velocità (dB)			Velocità vibratoria (mm/s)		
	x	y	z	x	y	z
al suolo	80.0	80.8	79.0	0.50	0.55	0.45
su fondazione	69.7	69.5	72.0	0.15	0.15	0.20
su pavimento	74.0	75.6	83.2	0.25	0.30	0.72

In sede di stima di impatto ambientale è consigliabile tener conto soltanto del termine di amplificazione dovuta ai solai. Premesso che una valutazione precisa dovrebbe essere fatta caso per caso mediante un calcolo dinamico, si può comunque affermare che in generale l'amplificazione aumenta notevolmente con la rigidezza dei solai.
Infatti la frequenza propria di un solaio aumenta circa linearmente all'aumentare dello spessore, del rapporto rigidezza-peso e del grado d'incastro, diminuisce con legge quadratica inversa all'aumentare della luce.
A titolo indicativo le frequenze proprie degli orizzontamenti più diffusi si situano i 10 e i 20 Hz, quindi al di sotto delle frequenze tipiche della vibrazione ferroviarie.
La vibrazione degli elementi strutturali di un edificio può inoltre determinare effetti di tipo acustico, qualora le frequenze caratteristiche del fenomeno interessino il campo di udibilità dell'orecchio umano. Il livello di pressione sonora interno ad un edificio sollecitato da vibrazioni trasmesse dal sottosuolo può essere in prima approssimazione stimato con la formula

$$L_p = L_a - 20 \cdot \log_{10} f + 37$$

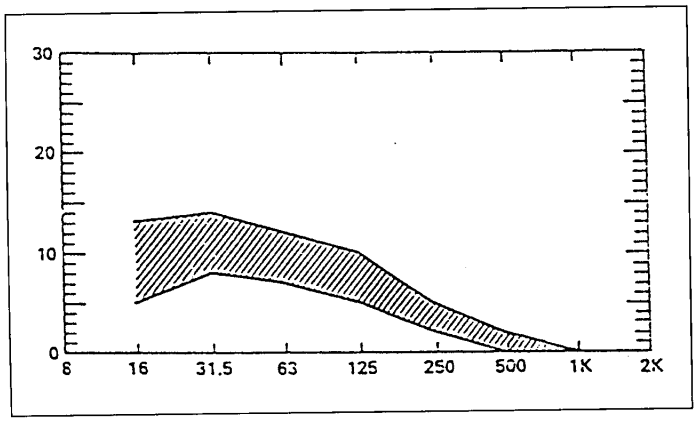


Fig. 5 - Campo di amplificazione delle vibrazioni dovuto alla risonanza dei solai [8]. Ascisse in Hz, ordinate in dB.

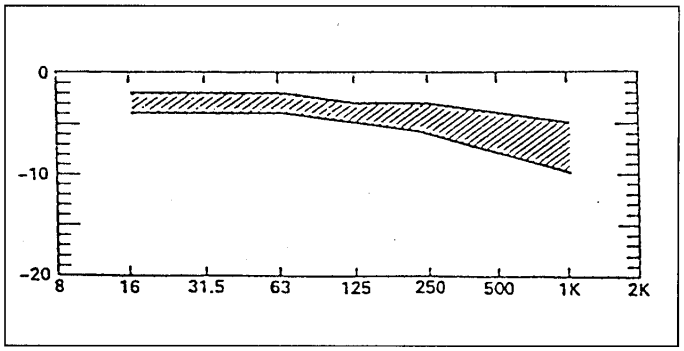


Fig. 6 - Campo di attenuazione delle vibrazioni trasmesse tra due solai successivi [8]. Ascisse in Hz, ordinate in dB,

in cui L_a il livello di accelerazione efficace del pavimento espresso con riferimento a 10^{-6} g ed f è la frequenza in Hz. L'equazione è derivata da una serie di misure sperimentali di rumore e di vibrazioni svolte a Toronto [11].

Effetti delle vibrazioni su persone, manufatti e attività produttive

Le vibrazioni e il rumore a bassa frequenza causati dal transito di convogli ferroviari possono determinare effetti sulle persone, sugli edifici e sulle attività economiche. Le misurazioni effettuate dalle ferrovie tedesche indicano che i reclami delle persone esposte si verificano per livelli della velocità vibratoria superiori a 85 dB corrispondenti a circa 0,9 mm/s.
Gli effetti sulle persone, classificati come "annoyance", dipendono dall'intensità e frequenza dell'evento disturbante e dal tipo di attivit svolta. L'"annoyance" deriva dalla combinazione di effetti che coinvolgono la percezione uditiva e la percezione tattile delle vibrazioni. Le normative di settore definiscono limiti ai livelli di accelerazione in funzione della categoria di edificio tali da contenere entro un campo di accettabilità gli effetti sulle comunità [12].
La continua tendenza in alcuni settori dell'industria e della ricerca a perfezionare e rendere più precisa la strumentazione ha determinato l'estendersi di situazioni di elevata sensibilità alle vibrazioni. Il funzionamento di microscopi ottici ed elettronici può ad esempio essere disturbato da livelli di vibrazioni inferiori alla soglia di percezione umana. In assenza di dati sulle caratteristiche di sensibilità della strumentazione e di test in campo volti al riconoscimento delle caratteristiche dinamiche del basamento, si può far riferimento alle curve limite di BOLT, BERANEK e NEWMAN [13].
In alcune situazioni, in presenza di caratteristiche di estrema suscettività strutturale o di elevati e prolungati livelli di sollecitazione dinamica, le vibrazioni possono causare danni agli edifici.
È comunque generalmente riconosciuto che i livelli di vibrazioni in grado di determinare danni alle strutture degli edifici sono più alti di quelli normalmente tollerati dalle persone.
Gli standard vibrometrici che in questi ultimi anni hanno avuto i maggiori riconoscimenti sono contenuti nella ISO 2631 [14] per quanto riguarda le vibrazioni di macchine e veicoli, e nell'integrazione ISO 2631/DAD1 [15] per quanto attiene la valutazione dell'esposizione umana alle vibrazioni degli edifici.
L'American National Standard Institution ha fornito degli standard (ANSI S3.29 [16]) che sono sostanzialmente in sintonia con quanto indicato dalla ISO 2631/DADI come pure le norme inglesi (BSI 6472 [17], tedesche (DIN 4150/2 [10]) e la norma italiana (UNI 9614 [18]).
Riguardo agli effetti di danneggiamento sugli edifici a causa delle vibrazioni, la norma italiana UNI fa riferimento essenzialmente alle norme ISO 4866 [19] e DIN 4150 [10].

Applicazioni

Il primo problema che di norma si deve affrontare consiste nella definizione di un livello vibratorio ammissibile al sito e in particolare nell'associare ad ognuna delle classi di sensibilità dei ricettori un valore limite di accelerazione (o velocità) efficace. La norma ISO 2631/DAD 1 fa riferimento al valore efficace dell'accelerazione nel campo di frequenze 1 ÷ 80 Hz e tiene conto del tipo di insediamento (sale operatorie, abitazioni, uffici, officine), del periodo del giorno e del tipo di vibrazione: continua e intermittente o di tipo impulsivo (1 ÷ 3 eventi al giorno). Il suddetto documento fornisce in particolare una serie di curve limite per la determinazione del valore di accelerazione efficace ammissibile nel caso in cui non sia definito uno specifico asse di ingresso delle vibrazioni nel corpo umano (fig. 7). Ricordando che le ampiezze massime delle vibrazioni ferroviarie sono situate generalmente nell'intorno dei 50 Hz, sulle curve della norma ISO si leggono i valori di accelerazioni efficaci ammissibili relativi alle diverse classi di sensibilità. Nell'ipotesi semplificativa di riferirsi a tre sole classi di sensibilità: alta, media e bassa (rispettivamente sale operatorie e lavorazioni critiche, abitazioni, officine e fabbriche), i valori ammissibili sono riportati nella tabella 5. Essi corrispondono evidentemente al caso più sfavorevole di vibrazione intermittente durante il periodo notturno.

Tabella 5: Valori di accelerazione e livello di accelerazione per le classi di sensibilità adottate

Classe di sensibilità	a_{RMS} (M/S^2)	L_a (dB)
Alta (curva 1)	0.034	90.6
Media (curva 1.41)	0.050	94.0
Bassa (cur-va 8)	0.279	108.9

Si passa quindi a definire la legge di attenuazione, che viene costruita in base alle specifiche condizioni al contorno e alle caratteristiche del mezzo di propagazione. Il livello di base, sulla scorta di quanto visto nei paragrafi precedenti, risente molto della velocità del convoglio e la sua valutazione richiede apposite misurazioni in situ. Qualora non si abbiano a disposizione misurazioni relative al caso specifico, è possibile fare riferimento a relazioni empiriche reperibili in letteratura o a misurazioni eseguite in situazioni analoghe. Si ricorda che per ricettori non troppo distanti si può considerare il treno come una sorgente lineare indefinita e si può impostare una trattazione basata su un solo tipo di onde: onde di Rayleigh per linee in superficie e onde di compressione per linee in galleria. A titolo di esempio, si supponga dover valutare in maniera semplificata (senza ricorso a misurazioni in situ) l'impatto provocato su un ospedale da una linea ferroviaria ordinaria in rilevato o raso in base alla norma ISO 263 I /DAD 1. Siano note le seguenti informazioni:

- tipologia d'opera: rilevato
- distanza minima ricettore: 100 m
- classe di sensibilità: alta
- classe g, eolitologica: terreno sabbioso-ghiaioso
- strutture in c.a., fondazione su pali, solai laterocementizi (spessore 28 cm, luci 5 m)

a) Livello ammissibile
L_a = 90,6 dB (tabella 5)

b) Livello iniziale.
Seguendo la (l), si trova a = 40,6 mm/s^2 $L_a(25m)$=92,2dB

c) Attenuazione geometrica
x = 100 m; x_0 = 25 m; n = 0 (cfr. 3)

$$Ag = 20\text{-}\log_{10} [x/(x+x\delta)]^n = 0 \text{ dB}$$

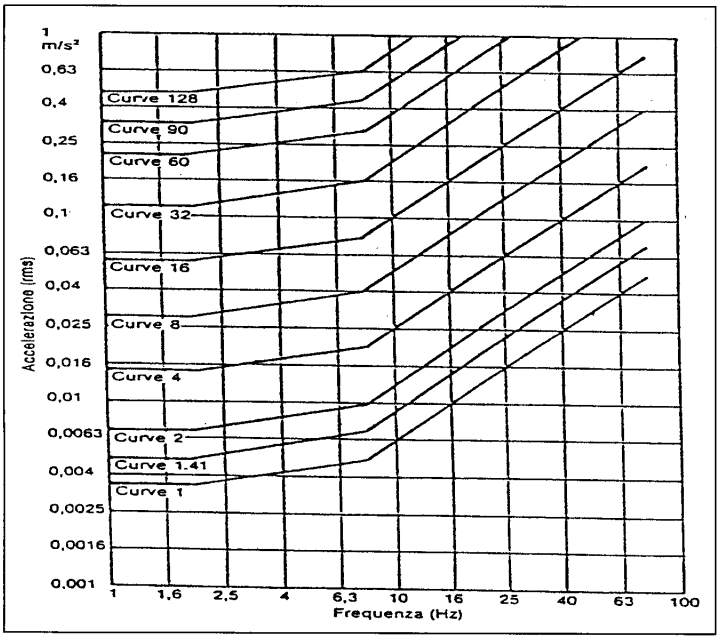


Fig. 7 - Curve limite di accelerazione efficace valide nel caso in cui non sia definito un asse di ingresso delle vibrazioni nel corpo umano (ISO 2631/DAD [15]).

d) Attenuazione per assorbimento del terreno
$x = 100$ m; $\omega = 2\pi \cdot 50$ rad/s; $\eta = 0{,}1$; $C = 600$ m/s

$$A_t = \log_{10}\left(e^{\frac{\omega\pi}{2C}(x-x_0)}\right) = 4.34 \cdot \frac{\omega\pi}{C} \cdot (x-x_0) = 17.0 \text{ dB}$$

e) Livello in fondazione
$L_a(x) = L_a(x_0) - \sum_i A_i = 75.14$ dB

f) Propagazione nelle strutture
Perdita di accoppiamento sulle fondazioni (cfr. 4, fig. 5): - 3 dB
Amplificazione solaio piano terra (cfr. 4, fig. 7): + 10 dB

g) Livello sul ricettore e verifica
$L_a = 82{,}1$ dB $< L_a = 90{,}6$ dB.

Conclusioni

La presente memoria, partendo da una succinta caratterizzazione della vibrazione di tipo ferroviario, mette in rassegna un certo numero di risultati teorici e sperimentali reperibili in letteratura. L'analisi del fenomeno vibratorio e dei suoi effetti sulla comunità viene quindi scomposta, con opportune semplificazioni, in una serie di problematiche elementari, risolubili autonomamente alla luce delle informazioni di natura fisica e normativa disponibili. Tutto ciò porta alla definizione di metodologie semplici e schematiche, tuttavia affidabili, che ben si addicono alle esigenze di uno studio di impatto ambientale.

Elenco delle simbologie usate

A_d Attenuazione del livello di accelerazione per discontinuità geolitologiche
A_g Attenuazione del livello di accelerazione per divergenza geometrica
A_i Attenuazione del livello di accelerazione dovuta al generico fattore
A_t Attenuazione del livello di accelerazione dovuta all'assorbimento del terreno
a_{RMS} Accelerazione vibratoria efficace
a_0 Accelerazione vibratoria di riferimento
C Velocità dell'onda
C_l Velocità longitudinale dell'onda
C_v Velocità dell'onda di volume
c_r Coefficiente di smorzamento del sistema asseruota
c_v Coefficiente di smorzamento del sistema armamento-terreno
c_w Coefficiente di smorzamento della sospensione
E Modulo di YOUNG
e_r Rigidezza del sistema asse-ruota
e_v Rigidezza del sistema armamento-terreno
e_w Rigidezza della sospensione
x Distanza del ricettore dall'asse del binario
L_a Livello di accelerazione vibrazionale
L_p Livello di pressione sonora
L_v Livello di velocità vibrazionale
m_r Massa del sistema asse-ruote
m_v Massa del sistema armamento-terreno
m_w Massa efficace del convoglio
n Coefficiente di attenuazione geometrica
v_{RMS} Velocità vibratoria efficace
v_0 Velocità di riferimento
ω Pulsazione
η Coefficiente di assorbimento del terreno
p Densità del mezzo
υ Coefficiente di POISSON

Bibliografia

[1] J.M. FIELDS, Railway Noise and Vibration Annoyance in Residential Areas, Journal of Sound and Vibration, 66(3), 445-448, 1979.

[2] E. TASSILY, N. VINCENT-NT, Prévision et Contrôle des Vibrations Transises au Sol par le Trains, Revue Générale des Chemins de Fer, 108 année, Dé cembre, 1989.

[3] E.E. UNGAR, E.K. BENDER, Vibration Produced in Buildings by Passageof Subway Trains: Parameter Estimation for Preliminary Design, Inter-Noise 75 Sendai, Japan, pp. 491-498, 1975.

[4] G.F. MILLER, H. PURSEY, The Field and Radiation Impedence of Mechanical Radiators on the Free Surface of a Semi-Infinite Isotropic Solid, Proc. R. Soc. London, vol. 223, pp. 521-54, 1954.

[5] J. MEKLE, S. KRAEMER, Diagnostic Methods in the Control of Railway Noise and Vibration, Jouma, of Sound and Vibration, 87, PP. 377-386, 1983.

[6] R.D. WOODS, Screening of Surface Waves in Soils, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, vol. 94, n. SM4, pp. 951-979, luglio 1968.

[7] G. VOLBERG, Propagation of Ground Vibrations near Railwav Tracks, Journal of Sound and Vibration, 87, n. 2, 1983.

[8] J.T. NELSON, H.J. SAURENMAN, State of the Art Review Prediction and Control of Groundborne Noise and Vibration from Rail Transit Trains, U.S. Department of Transportation Report UMTA-06-0049-83-4, 1983.

[9] K. ISHIL, A. TACHIBANA, Field Measurement of Structure-borne Sound in Buildings, Acoustical Society of America Reprint No. L 10, 1978.

[10] Erschutterungen im Bauwesen, DIN 4150, 1986.

[11] Toronto Traffic Commission, Yonge subway Northern Extension Noise and Vibration Study, Book 1, Report RD 115/3, 1976.

[12] P. NELSON,Transportation Noise Reference Book, Butterworths, 1987.

[13] H. H. BOLT, L.L. BERANEK, R.B. NEWMANN, Handbook of Acoustic Noise Control, WADC TR, pp. 52-204, dic. 1952.

[14] Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration, ISO Standard 2631, 1974.

[15] Guide for the Evaluation of Human Exposure to Vibration and Shock in Buildings: Addendum I: Acceptable Magnitudes of Vibration, Standard Addendum ISO-2631:DAD 1, 1980.

[16] Guide to the Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings, Draft Standard ANSI-53.29, 1983.

[17] Evaluation of Human Exposure toVibration in Buildings (1 Hz to 80 Hz), Bs 6472, 1984.

[18] Misura delle Vibrazionine negli Edifici e Criteri di Valutazione del Disturbo, UNI 9614, 1990.

[19] Mechanical Vibration and Shock - Measurement and Evaluation of Vibration Effects on Buildings - Guideli nes for the Use of Basic Standard Methos, ISO Standard 4866, 1986.

AIPE

Associazione Italiana Polistirolo Espanso

L'AIPE - Associazione Italiana Polistirolo Espanso - è una associazione senza fini di lucro costituita nel 1984 al fine di tutelare l'immagine del polistirene espanso sinterizzato (o EPS) di qualità e di svilupparne l'impiego.

Le aziende associate appartengono sia al settore della produzione delle lastre per isolamento termico AIPOR munite di Marchio UNI - IIP di conformità alla norma UNI 7819 che a quello della produzione di manufatti destinati all'edilizia e all'imballaggio.

Dal maggio 1994, a sottolineare l'impegno dell'associazione per una sempre maggiore rappresentatività sul mercato, è in vigore il nuovo statuto che apre l'adesione all'AIPE a tutti i produttori di semilavorati e manufatti in polistirene espanso, anche se non ancora dotati di marchi di qualità certificata.

Fanno pure parte dell'AIPE le aziende produttrici della materia prima, il polistirene espandibile, fra le quali figurano le più importanti industrie chimiche europee.

Un ultimo gruppo di soci è costituito dalle aziende fabbricanti di attrezzature per la lavorazione del polistirene espanso sinterizzato.

L'AIPE, con la collaborazione delle aziende associate, ha creato una rete che provvede alla raccolta e al riciclo di imballi e scarti di polistirene espanso. A livello internazionale l'AIPE rappresenta l'Italia in seno all'EUMEPS - European Manufacturers of Expanded Polystyrene -, associazione europea che raggruppa le associazioni nazionali dei produttori di EPS.

L'AIPE, che opera secondo il principio fondamentale della qualità dei prodotti, fornisce agli utilizzatori una informazione seria ed obiettiva sulle caratteristiche e prestazioni dei semilavorati e manufatti in polistirene espanso sinterizzato di qualità.

AIPE - ASSOCIAZIONE ITALIANA POLISTIROLO ESPANSO
Via Marcantonio Colonna, n° 43 - 20149 Milano
Telefono: 02/33002101 - Telefax: 02/39210531

Finito di stampare
nel mese di maggio 1997