



**RILEVATI ALLEGGERITI IN POLISTIRENE
ESPANSO SINTERIZZATO PER COSTRUZIONI
STRADALI SU SUOLI DIFFICILI**

Antonio Montepara

Dipartimento di Ingegneria Civile - Università degli Studi di Parma
Parco Area delle Scienze 181/A, 43100 Parma
Tel: +39.0521.905904 - Fax: +39.0521.905924
E-mail: antonio.montepara@unipr.it

Felice Giuliani

Dipartimento di Ingegneria Civile - Università degli Studi di Parma
Parco Area delle Scienze 181/A, 43100 Parma
Tel: +39.0521.905905 - Fax: +39.0521.905924
E-mail: felice.giuliani@unipr.it

RILEVATI ALLEGGERITI IN POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO PER COSTRUZIONI STRADALI SU SUOLI DIFFICILI

ANTONIO MONTEPARA - Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Parma
FELICE GIULIANI – Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Parma

SOMMARIO

Gli Autori presentano i risultati di una analisi sperimentale sulla idoneità del polistirene espanso sinterizzato (EPS) a costituire il corpo di un rilevato stradale. Le proprietà di leggerezza e di facilità di movimentazione dell'EPS, infatti, lo rendono un materiale da costruzione particolarmente idoneo su terreni a bassa portanza e laddove sia richiesta una agevole e rapida posa in opera.

L'uso dei rilevati alleggeriti in polistirene risulta essere una soluzione particolarmente idonea per il rapido ripristino della viabilità ordinaria a seguito di eventi calamitosi, per le costruzioni in aree soggette a movimenti franosi o per la realizzazione di una viabilità di emergenza.

Le problematiche affrontate nello studio riguardano le caratteristiche prestazionali del polistirene espanso e la scelta degli strumenti matematici più adatti a descrivere la dipendenza dal tempo del comportamento meccanico. Lo studio dello stato tensionale generato dal carico veicolare e dal peso della sovrastruttura nel corpo di un rilevato alleggerito è stato affrontato mediante una analisi 3D-FEM.

1. INTRODUZIONE

L'individuazione del tracciato stradale ideale, sulla base delle esigenze tecnico-economiche, trova quale condizione di notevole difficoltà la costruzione del corpo stradale su suoli fortemente compressibili o su aree instabili soggette a movimenti profondi. In questi casi, la realizzazione di rilevati stradali tradizionali, con il proprio peso, si pone quale potenziale elemento di innesco di importanti cedimenti o di nuovi indesiderati movimenti franosi.

La soluzione di rilevato alleggerito costituito da blocchi in polistirene espanso sinterizzato, del tutto innovativa in Italia e proposta dagli Autori in via sperimentale [1], consente il progetto di strutture estremamente leggere, versatili e di rapida posa in opera. I rilevati, che si compongono quale sovrapposizione di blocchi prismatici tipicamente delle dimensioni di 2.0 m x 1.0 m x 0.5 m, si prestano in modo molto efficace per la costruzione di piste di servizio o di viabilità temporanea durante la gestione della rete viaria in situazioni di emergenza, sia per la facilità di movimentazione e di posa dei blocchi sia per la possibilità che quest'ultimi possano essere disassemblati e rimpiegati in altri siti e per altri usi.

2. CARATTERISTICHE CHIMICHE, FISICHE E MECCANICHE DELL'EPS

L'EPS nasce come derivato del petrolio, già noto e diffuso nell'ambito delle costruzioni civili, quale materiale isolante termico ed acustico, nonché quale elemento di alleggerimento dei solai o supporto per la realizzazione di elementi architettonici di ornamento.

Nel campo delle costruzioni stradali, ampiamente sperimentato in diversi siti del Nord Europa, degli Stati Uniti e del Giappone, l'EPS consente la realizzazione di rilevati a densità decrescente in funzione dell'altezza di posa, ovvero del peso che si scarica sul terreno di fondazione, in quanto le caratteristiche fisiche che si possono conferire al blocco di polistirene espanso in fase di produzione sono tali da consentire la progettazione del prodotto finito con valori della massa volumica variabile tipicamente tra 20 e 40 Kg/m³.

Le temperature massime sopportabili dall'EPS dipendono, come per tutti i materiali termoplastici, dalla durata e dall'intensità dello stress termico [2], tuttavia nel campo delle temperature di impiego in ambito stradale, non è possibile che si verifichi alcuna transizioni di fase e, soprattutto, l'uso di opportuni additivi permette di conferire al materiale la proprietà di auto estinguere la propria combustione.

L'EPS è un materiale che può essere considerato sostanzialmente omogeneo ed isotropo. Sottoposto a compressione, mostra un legame costitutivo di tipo elasto-plastico-incrudente, con un comportamento elastico-lineare riscontrabile fino a circa il 2.5% di deformazione [3].

La resistenza a compressione è funzione della densità del materiale. Alcuni risultati sperimentali ottenuti su provini cubici di EPS di 150 mm di lato, ad una temperatura costante di 20°C ed imponendo una velocità di avanzamento dei piatti della pressa di 4 mm/minuto fino al raggiungimento di una deformazione pari al 10% sono riportati in Tabella 1. Prove di carico di lunga durata hanno messo in maggiore evidenza il ruolo della densità dell'EPS, determinante per limitare l'accumulo di deformazione viscosa del materiale.

Densità	[Kg/m ³]	15	20	30	34	38	41	43
s_v (e =1%)	[N/mm ²]	0.04	0.05	0.10	0.13	0.13	0.16	0.16
s_v (e =10%)	[N/mm ²]	--	--	0.21	0.26	0.29	0.33	0.33

Tabella 1 – Resistenza a compressione di cubi di polistirene espanso sinterizzato.

Il coefficiente di Poisson misurato sperimentalmente risulta molto piccolo ($\nu = 0.02$) e rimane sostanzialmente costante al variare della densità del prodotto. Tale caratteristica permette di considerare l'EPS un materiale particolarmente indicato nella costruzione dei rilevati stradali con pendenze delle scarpate elevate e, soprattutto, nella realizzazione di rilevati a ridosso delle opere di sostegno e delle spalle da ponte, in quanto la trasmissione orizzontale degli sforzi su queste opere risulta estremamente contenuta rispetto alla spinta esercitata da un qualsiasi altro materiale da costruzione tradizionale.

3. STRUMENTI DI PREVISIONE DEI FENOMENI VISCOSI

Nell'ipotesi di impiego del polistirene come materiale da costruzione per rilevati stradali permanenti, è indispensabile tenere in conto il rigido controllo dello stato tenso-deformativo, mirato essenzialmente alla limitazione dei fenomeni di creep.

Un approccio empirico, certamente valido, basato sulla limitazione delle tensioni di esercizio strettamente confinate all'interno del campo di elasticità lineare permette di limitare le deformazioni viscosse prodotte nell'arco della vita utile pluriennale della struttura stradale; con questa tecnica, è parere degli Autori di prevedere in opera una tensione di esercizio pari al 50% della resistenza a compressione dei blocchi di EPS, rilevata all'1% di deformazione.

Margini più ampi di impiego possono essere previsti per rilevati stradali temporanei, in genere allestiti per la realizzazione di piste per deviazioni provvisorie del tracciato stradale o per la realizzazione di viabilità di emergenza.

In alternativa, un approccio teorico alla previsione dei fenomeni di creep permette di ottimizzare il progetto del rilevato e di sfruttare le risorse offerte dal polistirene espanso alle diverse densità di produzione. La copiosa produzione scientifica inerente alla dipendenza dal tempo delle caratteristiche meccaniche dei materiali polimerici quali geomembrane o geogriglie permette di ritenere acquisiti molti degli aspetti di pratico interesse sulla stabilità di questi materiali sottoposti a carichi permanenti assiali o planari. Nonostante la maggior parte dei più noti modelli di creep proposti per questi materiali [4] siano estendibili tout court all'EPS, studi più specifici [5] hanno evidenziato che, partendo dall'approccio classico di Findley, si può studiare l'evoluzione delle deformazioni anche all'interno di strutture tridimensionali compresse, quali i blocchi di polistirene espanso costituenti un rilevato stradale permanente. In questo campo, Horvath [5], al fine di valutare la deformazione \mathbf{e} , quale somma del contributo elastico e plastico, indotta dalla tensione applicata \mathbf{s} nel tempo t , propone l'utilizzo dell'equazione cosiddetta "completa" di Findley:

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}'_{0F} \cdot \sinh(\mathbf{s}/\mathbf{s}_{eF}) + m'_F \cdot \sinh(\mathbf{s}/\mathbf{s}_{mF}) \cdot t^{nF}$$

dove $(\mathbf{e}'_{0F}, \mathbf{s}_{eF}, m'_F, \mathbf{s}_{mF}, nF)$ è il vettore dei parametri del modello, funzione dei materiali impiegati e di fattori ambientali.

Un'altra espressione adatta a descrivere l'evoluzione della deformazione del polistirene espanso è quella elaborata dal Laboratoire Central Ponts et Chaussées (LCPC) [6]; il modello proposto è espresso da una equazione in forma di legge di potenza i cui parametri sono stati dedotti sperimentalmente su blocchi di EPS di diversa densità:

$$\mathbf{e} = (\mathbf{s}/E_{ii}) + 0.00209(\mathbf{s}/\mathbf{s}_y)^{2.47} \cdot t^{\{-0.9 \text{Log}[1-(\mathbf{s}/\mathbf{s}_y)]\}}$$

posto

$$\mathbf{s}_y = 6.41\mathbf{r} - 35.2$$

$$E_{ii} = 479\mathbf{r} - 2875$$

dove

\mathbf{s}_y = tensione di snervamento dell'EPS in kPa;

E_{ii} = modulo di Young tangente in kPa;

\mathbf{r} = densità del blocco di EPS in kg/m³.

4. ANALISI FEM DELLO STATO TENSO-DEFORMATIVO

Un rilevato stradale in EPS viene realizzato mediante la sovrapposizione di blocchi, confezionati secondo la geometria più adatta alle esigenze progettuali e/o alla facilità di movimentazione in area di cantiere. La disposizione reciproca dei piani, viene progettata in funzione della dimensione massima del blocco cercando opportunamente lo sfalsamento dei giunti tra gli stessi, con una orditura dello strato ortogonale a quella dello strato immediatamente inferiore (Figura 1). Le superfici dei blocchi presentano un valore del coefficiente di attrito elevato, che Myhrel [7] ha valutato pari a 0.7, adottato ai fini del calcolo anche dalla normativa norvegese che, nel campo dell'EPS per le costruzioni stradali, attualmente appare la più completa.

In opera, i blocchi di EPS, posti su più strati (Figure 2-3 [8]), vengono collegati interponendo tra questi appositi tasselli dentati in materiale metallico, commercialmente noti come “gripper”, che permettono la trasmissione delle tensioni fra i blocchi e favoriscono il fissaggio degli stessi durante le operazioni di cantiere, soprattutto in presenza di forte vento.

Un rilevato in EPS richiede generalmente la realizzazione di una sovrastruttura stradale di tipo rigido, dove ad uno strato superficiale in conglomerato bituminoso tradizionale deve seguire una lastra in calcestruzzo quale elemento di ripartizione dei carichi veicolari e come fondazione delle barriere di sicurezza o di altri elementi verticali della piattaforma stradale.

In condizioni di piena emergenza la sovrastruttura è realizzabile con la sovrapposizione di lastre di acciaio, del tipo comunemente impiegato nei lavori di manutenzione stradale connessa al ripristino della rete idrica/fognaria in ambito urbano.

Al fine di verificare sia l'efficacia dell'EPS quale elemento di alleggerimento del rilevato stradale sia l'idoneità a sostenere le sollecitazioni indotte dal traffico, è stata effettuata una analisi comparativa di diciannove soluzioni progettuali di un corpo stradale poggiante su un terreno compressibile, costituito da EPS 30 ($\rho = 30 \text{ kg/m}^3$) o da terreno tipo UNI-CNR A3, al variare della tipologia di sovrastruttura adottata (pavimentazione flessibile e rigida), del tipo di analisi (2D, 3D) ed al variare delle ipotesi sul legame costitutivo del materiale (schema in Figura 4).

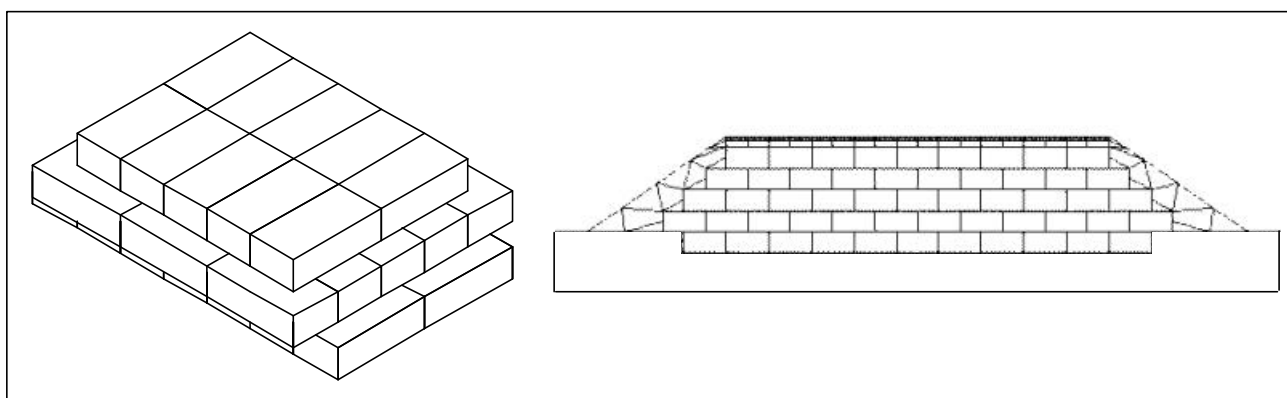


Figura 1 – Disposizione dei blocchi di EPS in un rilevato stradale.

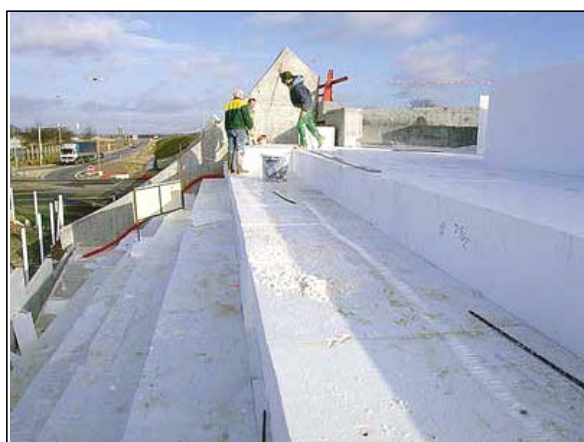


Figura 2 – Montaggio dei blocchi.



Figura 3 – Rivestimento in terra delle scarpate.

Una visione globale dello stato di sforzo e di deformazione all'interno del rilevato stradale e del terreno di fondazione è maggiormente evidenziato ricostruendo la struttura in EPS, comprensiva di tutti gli strati di materiale impiegato, attraverso il programma di analisi agli elementi finiti ABAQUS/Standard [9].

Nell'analisi, la sovrastruttura, di spessore complessivo di 0.35 metri, viene sollecitata staticamente e dinamicamente da un asse di carico di 10 kN, considerando una pressione di gonfiaggio delle ruote di 850 kPa. Lo schema proposto in Figura 5 permette la conversione dell'impronta del pneumatico in una superficie rettangolare compatibile con gli elementi brick del tipo C3D27R dei quali è composta la mesh tridimensionale; Huang [10] infatti assimila l'area di impronta del pneumatico alla somma di due superfici semicircolari di raggio 0.3L e di una rettangolare di lato maggiore L.

I valori massimi di sforzo e deformazione orizzontali e verticali non eccedono, per qualsiasi caso affrontato, le soglie sperimentali della regione elastica lineare del materiale. Come atteso, l'uso di una sovrastruttura rigida contribuisce in modo determinante alla salvaguardia dei pan di EPS dall'influenza dei carichi trasmessi dal traffico veicolare, la quale tende a farsi carico della quasi totalità di tali sollecitazioni.

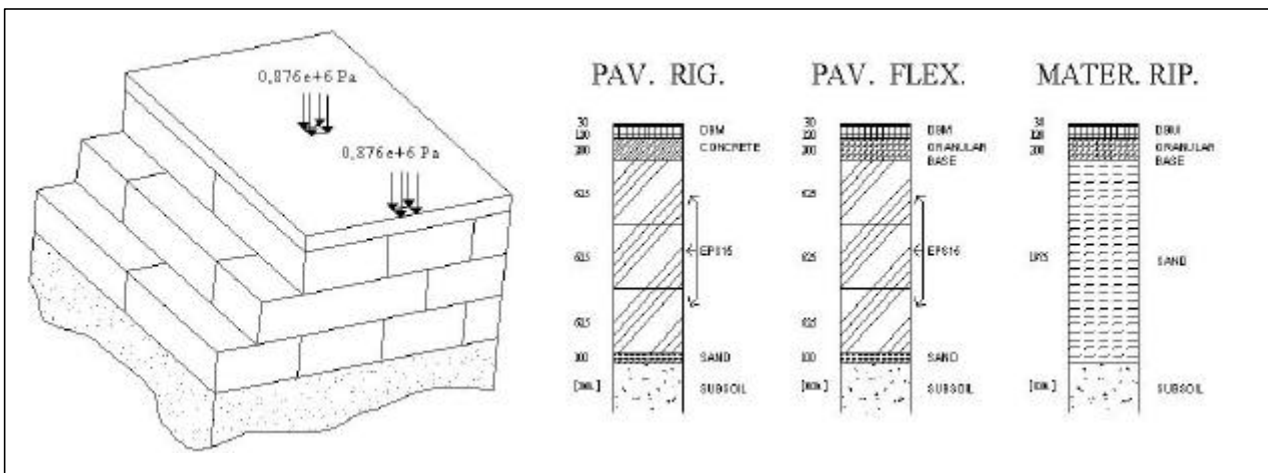


Figura 4 – Schema del rilevato in EPS e tipologie di sovrastruttura studiate.

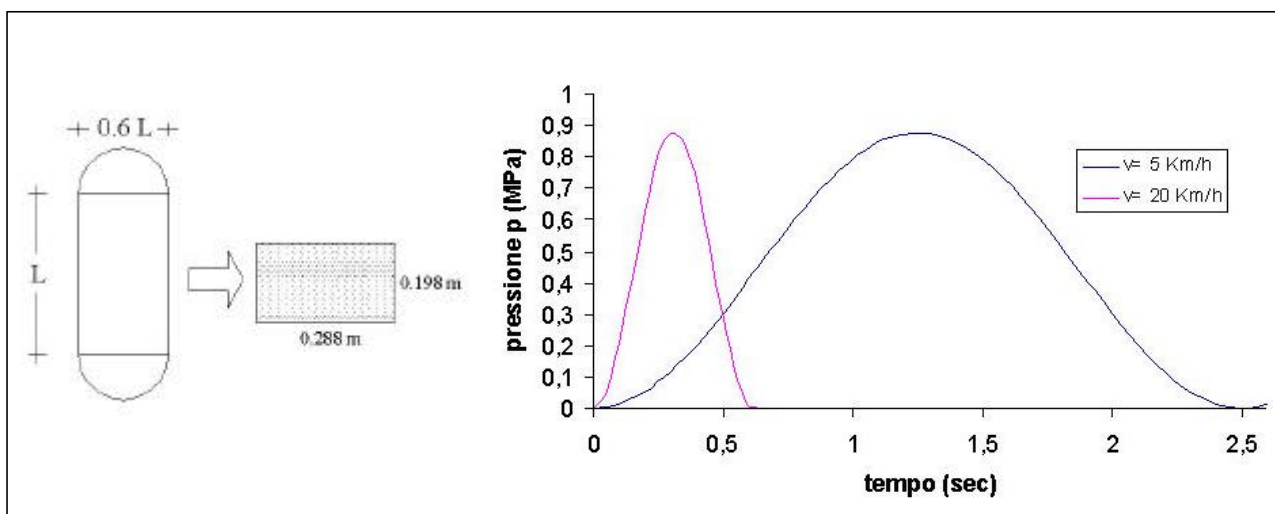


Figura 5 – Area di contatto e cicli di carico adottati nell'analisi numerica.

La sovrastruttura flessibile, pur sollecitando il sottofondo in polistirene con tensioni teoricamente compatibili con la resistenza del materiale, deve essere considerata una soluzione da promuovere per tratti stradali a scarso traffico pesante o per rilevati non permanenti, quali quelli a servizio di piste provvisorie alternative al tracciato di progetto.

Gli studi sullo stato tenso-deformativo di rilevati in EPS sottoposti a traffico veicolare, attraverso analisi tridimensionale agli elementi finiti con il codice ABAQUS, hanno permesso di ritenere sostanzialmente equivalenti i modelli di calcolo che schematizzano il rilevato stradale come corpo continuo o come corpo costituito da singoli blocchi sovrapposti aderenti fra loro (Figura 7).

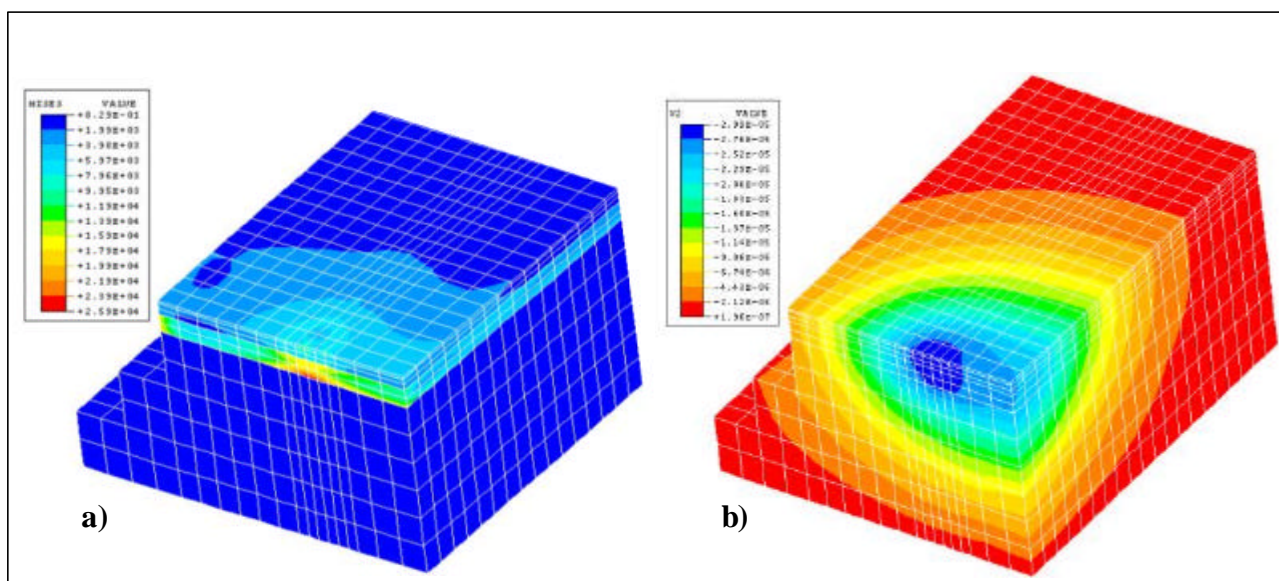
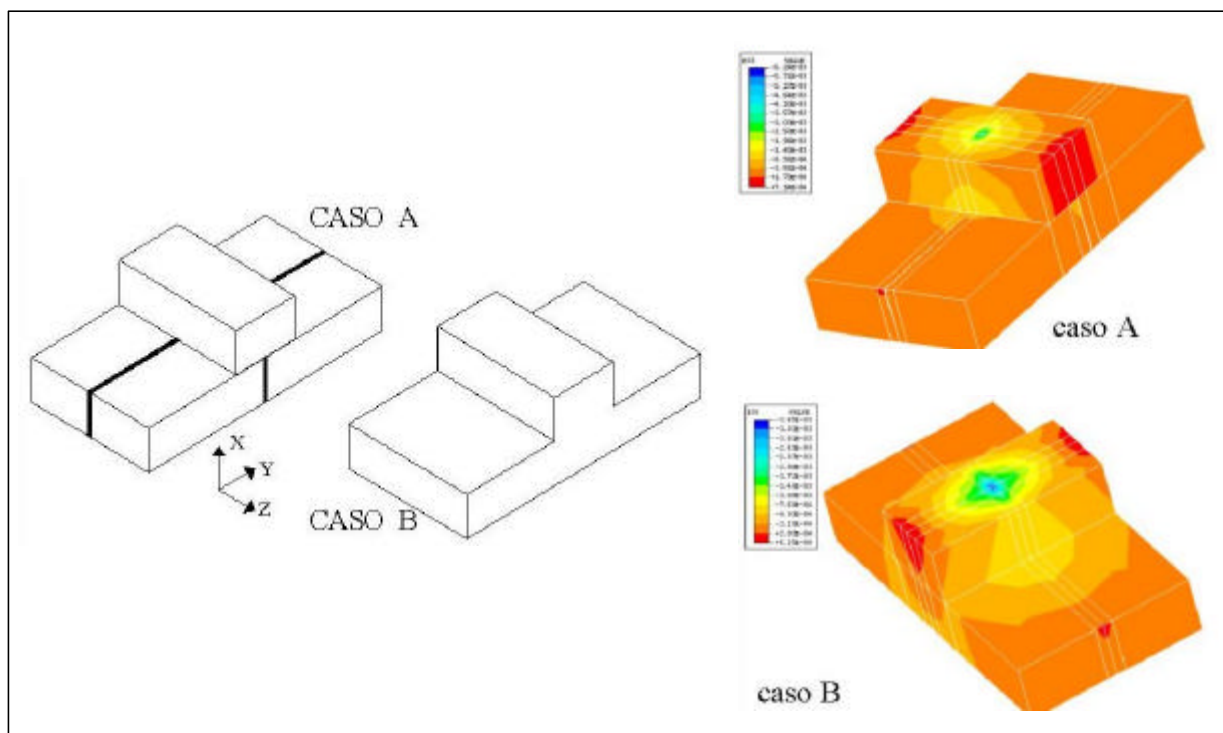


Figura 6 – Mesh 3D per lo studio di un rilevato stradale in EPS con sovrastruttura rigida.
a) analisi delle tensioni; b) analisi delle deformazioni.

Infatti gli schemi che considerano il rilevato in EPS composto da blocchi (Caso A) o come manufatto omogeneo privo di discontinuità fisiche (Caso B) risultano ai fini pratici equivalenti; in particolare il caso B risulta complessivamente più cautelativo (tensioni σ_{XX} , σ_{YY} , σ_{ZZ} nel caso B mediamente superiori di circa il 20% rispetto al caso A) per lo studio dello stato tensionale e deformativo atteso per questo tipo di strutture, pur in considerazione della difficoltà di impostare l'analisi di una soluzione FEM che rappresenti nel modo più significativo le discontinuità [11] e le condizioni al contorno fra le superfici dei blocchi.

5. CONCLUSIONI

Una valida alternativa progettuale nel campo delle costruzioni stradali su suoli difficili ovvero fortemente compressibili e/o soggetti a movimenti franosi lenti, è offerta dall'impiego del polistirene espanso sinterizzato per le sue note proprietà di estrema leggerezza. Le caratteristiche meccaniche di questo materiale consentono la formazione di rilevati stradali provvisori particolarmente adatti al ripristino delle carreggiate o alla realizzazione di ampliamenti di emergenza, sfruttando le potenzialità connesse al completo riutilizzo dell'EPS, in quanto materiale autoestinguente ed interamente riciclabile.



**Figura 7 – Mesh 3D per lo studio di un rilevato stradale in EPS.
Caso a) blocchi sovrapposti; Caso b) struttura continua.**

L'EPS, come tale, risulta più costoso dei tradizionali materiali da costruzione usati nel corpo stradale; tale elemento va comunque valutato nell'insieme degli oneri connessi ai processi costruttivi, prendendo in considerazione, per esempio, i tempi di realizzazione, la maggiore pendenza delle scarpate e la semplicità di esecuzione dell'opera. È indubbia ed evidente la convenienza dello spostamento dei manufatti e dello smontaggio degli stessi al termine di lavori provvisori o nella realizzazione di piste per viabilità provvisoria.

I requisiti meccanici e soprattutto la loro stabilità nel tempo sono funzione della densità dell'EPS; le sollecitazioni ammissibili per l'EPS posto all'interno del corpo stradale devono essere strettamente contenute nel campo di elasticità lineare del materiale al fine di preservare l'opera da fenomeni di deformazione viscosa che rappresentano il parametro progettuale più importante nel dimensionamento.

Lo studio dello stato tensionale all'interno di un rilevato in EPS, pur costituito da blocchi sovrapposti, può essere condotto, con gli strumenti dell'analisi agli elementi finiti o con altri approcci, schematizzando il rilevato come corpo continuo.

6. RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'Associazione Italiana Polistirolo Espanso (AIPE) per la fattiva collaborazione ed il supporto tecnico offerti nell'ambito della convenzione di studio AIPE-Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Parma.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Montepara, A., Giuliani, F. 2001. Rilevati alleggeriti in polistirene espanso sinterizzato. Requisiti meccanici e tecniche applicative dell'EPS nelle costruzioni stradali su terreni a bassa portanza. *Quarry & Construction*, XXXIX n. 11, Ed. PEI, Novembre 2001, Italia.
- [2] Dušcov, M. 1997. EPS as a light-weight sub-base material in pavement structures. Doctorate Thesis at TU, NUGI 841 Ed., Delft, Olanda.
- [3] Montepara, A., Giuliani, F. 2000. Design of road embankments lightened by Expanded Polystyrene (EPS) laying on low-bearing capacity grounds. Proceedings of the 10th REAAA Conference, Road Development for 21st Century, Tokyo, Giappone.
- [4] Chambers, R. 1984. Behavior of structural plastics. *Structural Plastics Design Manual*, ASCE Manual n. 63, New York, USA.
- [5] Horvarth, J. 1998. Mathematical modelling of the stress-strain-time behavior of geosynthetics using the Findley equation: general theory and application to EPS-block geofoam. *Manhattan College Research Report n. CE/GE-98-3*, Civil Engineering Department, New York, USA.
- [6] Magnan, J. P., Serratrice J. 1989. Propriétés mécaniques du polystyrène expansé pour ses applications en remblai routier. *Bulletin liaison Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 164, LCPC, Francia.
- [7] Myhrel, Ø. 1985. Plastic foam in road embankments. EPS-materials specifications. Norwegian Directorate of Roads, NRRL, Oslo, Norvegia.
- [8] <http://geofoam.syr.edu/>
- [9] ABAQUS/Standard Version 5.6. 1996. User's Manual. *Hibbitt, Karlson, Sorenson Inc.*, Pawtucket, USA.
- [10] Huang, Y. 1995. Pavement analysis and design, *Prentice-Hall Inc.*, London, UK.
- [11] Uddin, W., Zhang, D., Fernandez, F. 1994. Finite element simulation of pavement discontinuities and dynamic load response. *Transportation Research Record 1448*. USA.
- [12] Magnan, J. P., 1990. Utilisation de polystyrène expansé en remblai routier. *Guide technique LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, Francia.
- [13] Bodhinayake, B., Hadi, M. 2000. Analysis of flexible pavements by finite element modelling: a comparative study of numerical analysis with field data. *Proceedings of the 10th REAAA Conference, Road Development for 21st Century*, Tokyo, Giappone.
- [14] Toi, T., Yoshida, S. 1991. Numerical simulation of nonlinear behaviors of two-dimensional block structures. *Computers & Structures*, 41-4.