

## **CARATTERIZZAZIONE DI NUOVE MISCELE GRANULARI AI FINI DELL'ISOLAMENTO SISMICO DEGLI EDIFICI**

Stefano Stacul  
*Università di Pisa*  
*stefano.stacul@ing.unipi.it*

Nunziante Squeglia  
*Università di Pisa*  
*squeglia@ing.unipi.it*

### **Sommario**

L'importante emergenza ambientale che stiamo vivendo ha portato la comunità dei ricercatori di ingegneria civile ad escogitare modi per riutilizzare materiali di scarto in modo innovativo. Negli ultimi due decenni vari gruppi di ricerca hanno sviluppato degli studi sull'utilizzo di gomma riciclata proveniente da pneumatici ai fini dell'isolamento sismico degli edifici. Il presente contributo presenta alcuni risultati sperimentali relativi alla caratterizzazione statica e dinamica di nuove miscele granulari da impiegarsi come sistema di isolamento sismico di tipo geotecnico. Le miscele studiate sono composte da sabbia del Ticino e da polvere di PTFE. Le prove di laboratorio sono state condotte sia sui singoli materiali sia sulle miscele binarie sabbia-PTFE, considerando diverse percentuali in peso delle due componenti. Le prove di colonna risonante, necessarie alla caratterizzazione di tali miscele in campo dinamico, sono state eseguite applicando diversi valori della pressione di confinamento. Le attività sperimentali condotte hanno permesso di valutare l'impatto della presenza della polvere di PTFE, al variare della percentuale in peso e dello stato tensionale, sulla risposta dinamica della sabbia del Ticino in termini di modulo di taglio  $G$  e rapporto di smorzamento  $D$  rispetto alle deformazioni di taglio. Sono attualmente in corso ulteriori prove di laboratorio e studi numerici avanzati, basati sui risultati sperimentali, per la valutazione dell'efficacia di tali miscele ai fini dell'isolamento sismico di edifici nuovi ed esistenti.

### **1. Introduzione**

Un sistema di isolamento sismico di tipo geotecnico rappresenta una tecnica potenzialmente utile a mitigare gli effetti di un sisma essenzialmente su edifici di nuova costruzione. Tale tecnica consiste nell'interporre tra la struttura e il sottosuolo uno strato di materiale atto a ridurre le accelerazioni che il sottosuolo stesso imporrebbe alla sovrastruttura (Fig. 1). L'efficacia di tale sistema, come possibile soluzione per ridurre le azioni sismiche sulle strutture, è stata studiata negli ultimi dieci anni da diversi Autori in riferimento ad applicazione su edifici e ponti (Brunet et al., 2016; Carpani, 2017; Dhanya et al., 2020; Nakhaei et al., 2012; Patil et al., 2016; Pitilakis et al., 2015; Senetakis and Anastasiadis, 2015; Senetakis et al., 2012; Tsang, 2008, 2009, Tsang and Pitilakis, 2019, Tsiavos et al., 2019; Xiong and Li, 2013). Questa tecnica è stata inizialmente ideata per applicazioni in paesi in via di sviluppo esposti al rischio sismico, in quanto i materiali ritenuti adatti sono principalmente quelli di scarto, come la gomma proveniente dal riciclo di pneumatici.



Fig 1. Isolamento sismico di tipo geotecnico

Questo ambito di applicazione garantisce la possibilità di applicare la tecnica a edifici di nuova costruzione, puntando a costi inferiori rispetto a quelli legati ad interventi di isolamento sismico mediante apparecchi/dispositivi isolatori. Le ricerche presenti in letteratura si sono quindi concentrate sulla caratterizzazione meccanica di materiali ritenuti idonei, tipicamente miscele binarie sabbia-gomma.

Di questi materiali si sfrutta essenzialmente la migliore capacità di dissipare energia riducendo di conseguenza l'eccitazione sismica sulla sovrastruttura. I principali difetti di questo approccio riguardano l'applicabilità pratica della tecnica ai soli edifici di nuova costruzione e la necessità di ricorrere, di solito, a spessori importanti dello strato di isolamento.

Questo contributo presenta alcuni risultati sperimentali su nuovi materiali che promettono di essere adatti all'implementazione della tecnica dell'isolamento sismico di tipo geotecnico su edifici non solo di nuova costruzione ma anche edifici esistenti. Quest'ultimo aspetto, naturalmente, ne allargherebbe di molto il campo di applicabilità, soprattutto in una nazione come l'Italia che ha gran parte del patrimonio immobiliare costruito nell'immediato dopoguerra. I materiali considerati in questa sperimentazione sono di facile reperibilità e basso costo: a) sono state testate miscele binarie di sabbia e polvere di PTFE (riciclato); b) e sono in corso di svolgimento delle sperimentazioni su miscele di bentonite e PTFE, delle quali si vuole sfruttare la resistenza al taglio particolarmente bassa. Lo sfruttamento di quest'ultima caratteristica cambia il meccanismo che si intende utilizzare. Infatti, in questo caso, la riduzione dell'accelerazione sulla sovrastruttura non sarebbe più solo dovuta alla capacità del materiale di deformarsi dissipando energia ma anche alla "incapacità" di quest'ultimo di trasmettere sforzi di taglio e quindi di imporre accelerazioni alla sovrastruttura. Nell'ottica di applicare la tecnica agli edifici esistenti, oltre allo studio dei materiali è di fondamentale importanza anche la procedura di implementazione di un eventuale intervento di retrofitting. Il presente contributo mostrerà i risultati delle attività di laboratorio svolte relative alle miscele composte da sabbia e polvere di PTFE, trascurando le problematiche inerenti gli interventi di retrofitting. Sulle miscele testate, sono state eseguite prove edometriche, prove triassiali e prove di colonna risonante. Tutti i test sono stati eseguiti sia sui singoli materiali, sia su miscele sabbia-PTFE, considerando diverse percentuali in peso delle due componenti, (PTFE: dal 5% al 35% in peso di miscela). L'obiettivo è quello di valutare quanto la polvere di PTFE, sia in grado di alterare le caratteristiche meccaniche della sabbia in termini di compressibilità, coefficiente di consolidazione secondaria  $C_{ae}$ , modulo edometrico  $M$ , angolo di resistenza al taglio ed in termini di risposta in condizioni dinamiche ( $G-\gamma$ ,  $D-\gamma$ ).

## 2. Materiali e prove per la caratterizzazione statica e dinamica

I materiali impiegati in queste attività sperimentali sono la sabbia del Ticino e polvere di PTFE ottenuta dalla rigenerazione di scarti di materiale vergine e rigenerato (come tubi e tondi di piccole dimensioni e trucioli di scarto da tornitura). Sono state utilizzate tre diverse tipologie di polvere di

PTFE, denominate T-100, P-100 e IT-1105-F, caratterizzate da diversa granulometria e da diverso grado di purezza. Ai fini del presente contributo ci limiteremo a presentare i risultati ottenuti con la polvere di PTFE denominata T-100. In Fig. 2 si riportano le curve granulometriche della sabbia del Ticino e del T-100, mentre in Tabella 1 si riportano alcune delle proprietà di tali materiali.

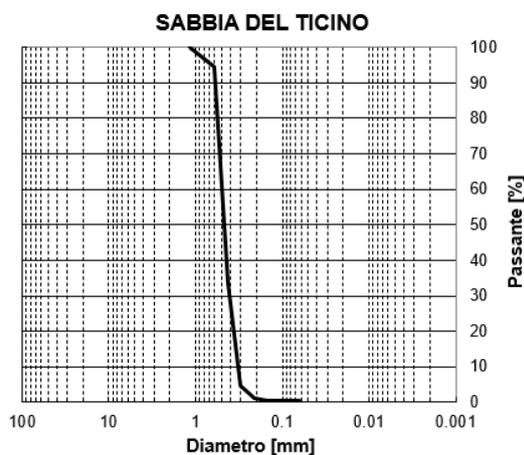


Fig 2a. Curva granulometrica della Sabbia del Ticino

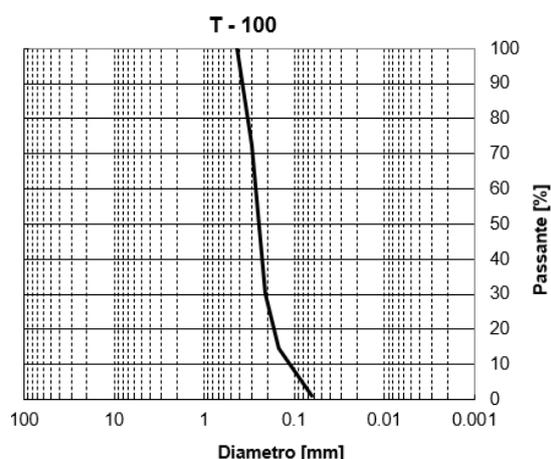


Fig 2b. Curva granulometrica del T-100

Tab 1. Proprietà dei materiali impiegati

	$e_{max}$ [-]	$e_{min}$ [-]	$G_s$ [-]	$D_{10}$ [mm]	$D_{50}$ [mm]	$D_{60}$ [mm]	$C_u$ [-]	$C_c$ [-]
<b>Sabbia del Ticino</b>	1.004	0.668	2.694	0.32	0.48	0.495	1.55	1.06
<b>T-100</b>	-	-	2.139	0.12	0.26	0.28	1.06	0.55

Oltre ai singoli materiali sono state testate cinque miscele aventi percentuali di T-100 pari al 5%, 10%, 15%, 25% e 35%. La caratterizzazione meccanica è stata effettuata mediante prove edometriche e triassiali. Le prove con l'edometro sono state condotte con procedura IL (ogni carico è stato mantenuto per 48 ore) su provini cilindrici di diametro pari a 50 mm e di altezza pari a 20 mm, le prove triassiali sono state eseguite su provini cilindrici di diametro pari a 38 mm e di altezza pari a 76 mm circa, preparati a partire dal materiale secco. I provini sono stati formati per strati, ciascuno di spessore pari a 4 mm circa, mediante l'ausilio di un pestello metallico per compattare gli strati stessi. Le operazioni con il pestello sono state eseguite manualmente in modo tale da applicare la stessa energia di compattazione, al fine di garantire, a parità di miscela, la ripetibilità delle prove e all'incirca lo stesso indice dei vuoti iniziale. Al variare della miscela, l'energia di compattazione impiegata e le procedure eseguite in fase di preparazione dei provini sono state le medesime. Dalle prove edometriche, al variare della miscela, sono stati valutati il modulo edometrico  $M$  ed il coefficiente di consolidazione secondaria  $C_{\alpha\epsilon}$ . In Tabella 2 sono riportati i valori di  $M$  e  $C_{\alpha\epsilon}$  in riferimento ad una tensione verticale di 50 kPa. Nella Tabella 2 e nel seguito con le sigle S##T\*\* si intende una miscela composta in peso al ##% da sabbia del Ticino ed al \*\*% da polvere di PTFE di tipo T-100.

Tab 2. Modulo edometrico e coeff. di consolidazione secondaria dei materiali e delle miscele ( $\sigma'_v = 50$  kPa)

	Sabbia*	S95T5	S90T10	S85T15	S75T25	S65T35	T-100
<b>M [MPa]</b>	26	9.4	9.7	10.2	10.7	10.3	4.57
<b><math>C_{\alpha\epsilon}</math> [%]</b>	0.01	0.023	0.03	0.044	0.054	0.073	0.20

\* da Malerba (1991)

Le prove triassiali sono state eseguite applicando ai tre provini di ciascuna miscela delle pressioni di cella pari a 25, 50 e 100 kPa. In Figura 3 si riportano i valori dell'angolo di resistenza al taglio di

picco, dello spostamento verticale in corrispondenza del quale viene raggiunta la resistenza di picco e i valori di densità raggiunti a parità di energia di compattazione.

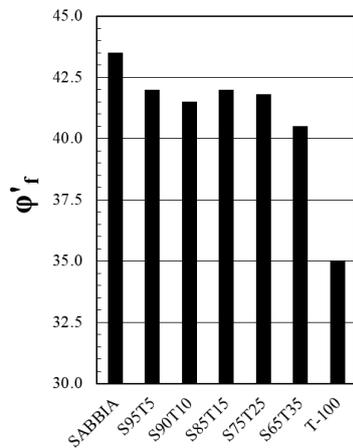


Fig 3a. Resistenza di picco

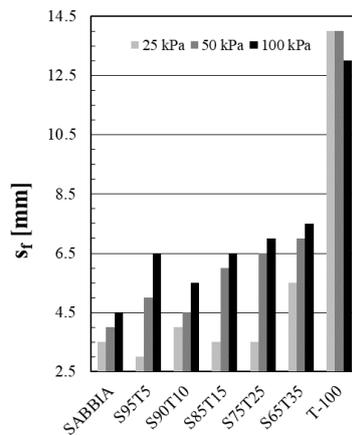


Fig 3b. Spostamento verticale in corrispondenza del picco

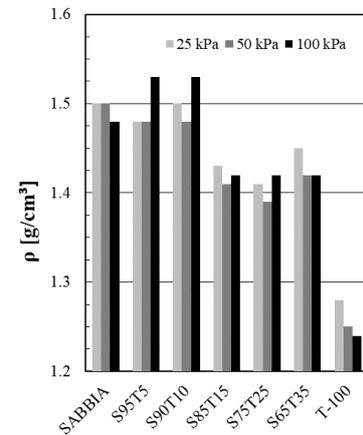


Fig 3c. Densità dei provini

La caratterizzazione dinamica dei materiali e delle miscele è stata effettuata mediante prove di colonna risonante. Le prove sono state eseguite su provini cilindrici, di diametro pari a 50 mm e di altezza pari a circa 90 mm. In Fig. 4 si illustrano le fasi di preparazione dei provini. Le pressioni di cella a cui sono stati sottoposti i provini equivalgono a 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa.



Fig 4. Preparazione dei provini di colonna risonante

In Fig. 5 vengono illustrati i risultati delle prove di colonna risonante eseguite sui materiali e sulle miscele a parità di pressione di cella applicata (50 kPa), in termini di  $G/G_0 - \gamma$ ,  $G - \gamma$  e  $D - \gamma$ .

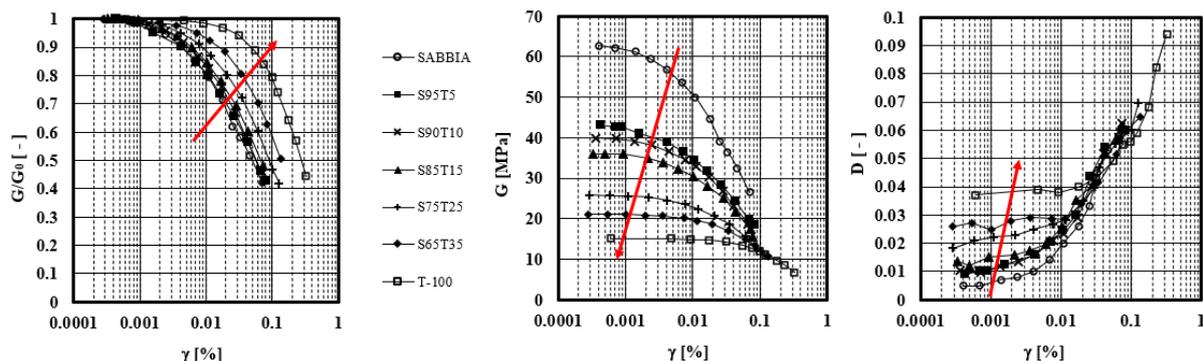


Fig 5. Risultati delle prove di colonna risonante sui materiali e le miscele a parità di pressione di cella (50 kPa)

In Fig. 6 invece si mostrano gli stessi risultati, relativamente alla miscela S65T35 al variare della pressione di cella.

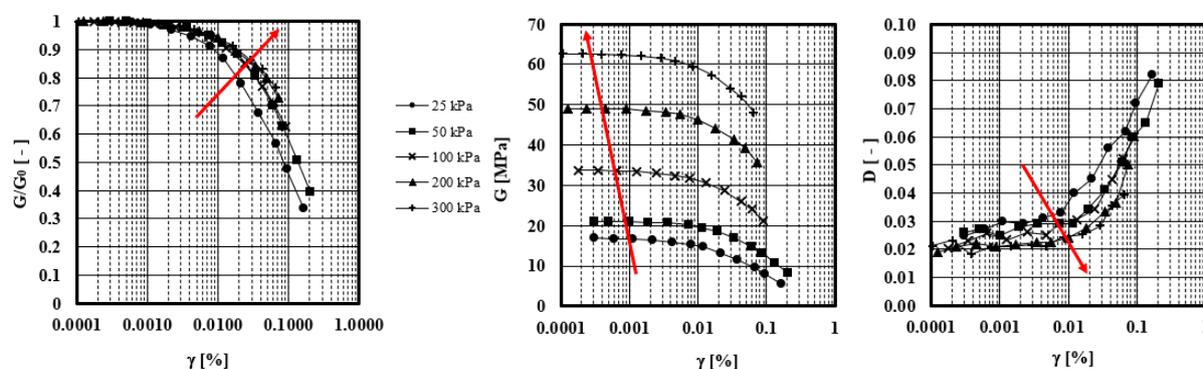


Fig 6. Risultati delle prove di colonna risonante sulla miscela S65T35 all'aumentare della pressione di cella

### 3. Risultati e considerazioni conclusive

Dai risultati delle prove di compressione edometrica si è osservato che l'introduzione della polvere di PTFE porta ad un aumento della compressibilità della miscela. Tuttavia, variando la percentuale di T-100 dal 5% al 35% la variazione del modulo  $M$  sembra modesta. Anche, il coefficiente di consolidazione secondaria  $C_{\alpha\epsilon}$  tende ad aumentare all'aumentare della percentuale di T-100 all'interno della miscela (Tab. 2).

Dai risultati delle prove triassiali si è osservato invece che il valore dell'angolo di resistenza al taglio di picco (Fig. 3a) non sembra essere particolarmente influenzato dall'inclusione della polvere di PTFE, almeno per percentuali fino al 35%. Tuttavia, all'aumentare della percentuale di T-100 la mobilitazione della resistenza massima avviene in corrispondenza di spostamenti via via maggiori (Fig. 3b). Questo è dovuto alla maggiore deformabilità complessiva della miscela.

Dai risultati delle prove di colonna risonante si è osservato che a parità di pressione di cella (Fig. 5) il modulo di taglio  $G$  alle piccole deformazioni diminuisce drasticamente all'aumentare della percentuale di T-100 all'interno della miscela. Infatti, nel caso della miscela S65T35 il modulo  $G$  raggiunge valori molto prossimi a quelli del solo T-100. Parallelemente, osservando le curve relative al modulo di taglio normalizzato  $G/G_0 - \gamma$ , si può notare come la soglia elastica tenda a spostarsi verso livelli di deformazione più elevati all'aumentare della percentuale di PTFE in miscela (maggiore plasticità del materiale). Anche il rapporto di smorzamento aumenta significativamente (soprattutto

alle piccole e medie deformazioni).

Osservando i risultati relativi alla miscela S65T35 al variare della pressione di cella (Fig. 6) si può notare, invece, il tipico aumento del valore del modulo  $G$  alle piccole deformazioni, e la diminuzione del rapporto di smorzamento all'aumentare della pressione di confinamento (tale diminuzione è più marcata per deformazioni di taglio medie e medio-grandi). Si osserva, inoltre che il materiale rimane in campo elastico (i.e., il rapporto  $G/G_0$  resta prossimo all'unità) fino a livelli di deformazione di taglio via via più grandi. Benché questo comportamento non sia così accentuato, è comunque ricorrente in tutte le miscele analizzate.

I risultati presentati rappresentano il tentativo di testare l'uso di materiali alternativi agli pneumatici riciclati. Le miscele di cui sono stati presentati i risultati nella presente nota appaiono sostanzialmente equivalenti alle miscele sabbia-gomma, pertanto, richiederebbero anch'esse alti spessori per garantire un'efficace protezione della struttura sovrastante. Sulla scorta delle esperienze presentate e come già accennato in precedenza, la sperimentazione sta continuando su altri materiali e miscele per verificare l'esistenza di materiali più performanti.

### Bibliografia

- Brunet S., de la Llera J. C., Kausel E. (2016). "Non-linear modeling of seismic isolation systems made of recycled tire-rubber", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85, 134–145.
- Carpani B. (2017). "Base isolation from a historical perspective". In Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake, Santiago, Chile, 9–13 January 2017.
- Dhanya J.S.; Boominathan A., Banerjee S. (2020). "Response of low-rise building with geotechnical seismic isolation system". *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 2020, 136, 106187.
- Malerba G. (1991). Caratteristiche di deformabilità di sabbie a differente mineralogia da prove edometriche spinte a elevate pressioni. Tesi di Laurea. Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Torino.
- Nakhaei A., Marandi S. M., Kermani S. S., Bagheripour M. H. (2012). "Dynamic properties of granular soils mixed with granulated rubber." *Soil dynamics and earthquake engineering*, 43, 124-132.
- Pitilakis K., Karapetrou S., Tsagdi K. (2015). "Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber-sand mixtures". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 237–252.
- Senetakis K., Anastasiadis A. (2015). "Effects of state of test sample, specimen geometry and sample preparation on dynamic properties of rubber–sand mixtures". *Geosynthetics International*, 22(4), 301-310.
- Senetakis K., Anastasiadis A., Pitilakis K. (2012). "Dynamic properties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 33(1), 38-53.
- Tsang H. H. (2008). "Seismic isolation by rubber–soil mixtures for developing countries". *Earthquake engineering & structural dynamics*, 37(2), 283-303.
- Tsang H. H. (2009). Geotechnical seismic isolation. *Earthquake engineering: New research*, 55-87.
- Tsang H. H., Pitilakis K. (2019). "Mechanism of geotechnical seismic isolation system: Analytical modelling". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 122(April), 171–184.
- Tsiavos A., Alexander N. A., Diambra A., Ibraim E., Vardanega P. J., Gonzalez-Buelga A., Sextos A. (2019). "A sand-rubber deformable granular layer as a low-cost seismic isolation strategy in developing countries: Experimental investigation". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105731.
- Xiong W., Li Y. (2013). "Seismic isolation using granulated tire–soil mixtures for less-developed regions: experimental validation". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(14), 2187-2193.