

## RISPOSTA MECCANICA DI SABBIE FIBRO-RINFORZATE STUDIATA CON TOMOGRAFIA AI RAGGI X

Michela Arciero, Erminio Salvatore, Giuseppe Modoni  
*Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale*

[michela.arciero@studentmail.unicas.it](mailto:michela.arciero@studentmail.unicas.it), [e.salvatore@unicas.it](mailto:e.salvatore@unicas.it), [modoni@unicas.it](mailto:modoni@unicas.it)

Alessandro Tengattini, Gioacchino Viggiani  
*Université Grenoble Alpes, 3SR Laboratoire, Grenoble*  
[alessandro.tengattini@3sr-grenoble.fr](mailto:alessandro.tengattini@3sr-grenoble.fr), [cino.viggiani@3sr-grenoble.fr](mailto:cino.viggiani@3sr-grenoble.fr)

### Sommario

Nella nota si riportano i risultati di uno studio micromeccanico volto a comprendere i meccanismi che regolano la risposta di sabbie rinforzate con fibre (FRS). La campagna sperimentale ha compreso prove di taglio diretto su campioni di sabbia addizionati con fibre di differente lunghezza, concentrazione ed orientazione. Per ciascuna configurazione si sono eseguite prove parallele su due campioni confezionati e sottoposti a condizioni di prova identiche, interrompendo una prova in corrispondenza del picco della tensione di taglio, l'altra allo stato tensionale residuo. Si è quindi congelata la struttura dei terreni iniettandovi una sospensione di nanosilice colloidale, e si sono trasportati i campioni in un'apparecchiatura tomografica ai raggi-X, per mezzo della quale è stato possibile ricostruire le immagini tridimensionali dei provini, distinguere le differenti fasi e quantificarne il campo di porosità. Il confronto dei diversi campioni ha mostrato che l'orientazione delle fibre rispetto alle bande di localizzazione della deformazione gioca un ruolo fondamentale sulla risposta meccanica delle sabbie fibrorinforzate e che, se opportunamente disposte, le fibre sono in grado di migliorare significativamente la resistenza del materiale e estendere le bande di deformazione ad un volume di terreno maggiore.

### 1 Introduzione

Il rinforzo di sabbie tramite l'inserimento diffuso di fibre è stato oggetto in passato di numerosi studi, perlopiù focalizzati sull'influenza dei parametri di confezionamento del materiale (*i.e.* materiale, diametro, lunghezza e concentrazione delle fibre) sulla risposta macroscopica dell'elemento di volume. Le prove di laboratorio di solito condotte riguardano la risposta meccanica a differenti sollecitazioni da parte di campioni diversamente assortiti, e l'interpretazione avviene solitamente su base fenomenologica (es. Michalowski and Cermak, 2002; Consoli et al., 2007; Diambra, 2010; Lirer et al., 2011). L'affermarsi della tecnologia tomografica ai raggi-X e l'evoluzione degli algoritmi di analisi delle immagini permettono oggi di indagare i materiali alla scala delle particelle, e di analizzare in maniera quantitativa i meccanismi che regolano la loro risposta meccanica (es. Diambra and Ibraim, 2015; Soriano et al., 2017).

Il presente studio coniuga questi due approcci, quello fenomenologico tradizionale alla scala dell'elemento di volume con quello alla microscala condotto mediante la tecnica tomografica, per individuare come i principali fattori interagiscono tra loro per determinare la risposta meccanica delle sabbie fibro-rinforzate. Particolare importanza assume in questo studio la correlazione tra la posizione delle fibre e le zone in cui si concentrano le deformazioni nei campioni di terreno sottoposti a prove di taglio.

### 2 I materiali impiegati nella sperimentazione

Le prove della presente sperimentazione sono state eseguite su Hostun Sand H31, una sabbia silicea estratta nel dipartimento della Drome, nel sud della Francia per scopi industriali. La curva di

distribuzione granulometrica e l'immagine SEM, rispettivamente riportate in Figura 1.a e Figura 1.b, mostrano un diametro medio dei grani  $D_{50}=0.32\text{mm}$ , un coefficiente di uniformità  $C_u=1.62$  ed una forma sub-angolare delle particelle. Il peso specifico dei grani è pari a  $G_s=2.65$  (Saada & Bianchini, 1989) ed i valori di indice dei vuoti massimo e minimo sono rispettivamente  $e_{\max}=1.04$  ed  $e_{\min}=0.65$  (Wiebicke, 2020). Le fibre utilizzate per rinforzare la sabbia sono realizzate in polipropilene additivato con fluorocarbonio, hanno un diametro pari a  $0.12\text{mm}$ , peso specifico  $G_s=1.52$ , resistenza a rottura pari a  $900\text{MPa}$  e modulo di Young pari  $2.0\text{GPa}$ . Commercializzate come lenze da pesca della lunghezza di  $50\text{m}$ , sono state tagliate alla lunghezza desiderata (Figura 1.c). La particolare tipologia di fibre è stata scelta poiché caratterizzata da una densità intermedia tra quella dell'aria e quella dei grani, e ciò permette di ottimizzare il contrasto tra le fasi nelle scansioni ai raggi-X (Soriano et al., 2017).

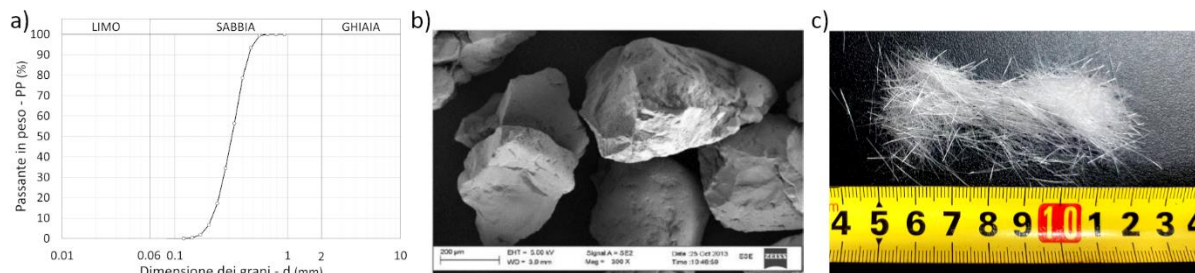


Fig 1. Materiali utilizzati nella sperimentazione. a) curva granulometrica della sabbia di Hostun H31 (Khaddour et al., 2018), b) immagine SEM della sabbia di Hostun H31 (Andò, 2013), c) fotografia delle fibre in polipropilene.

### 3 Analisi alla scala dell'elemento di volume

Lo studio alla macroscale è stato eseguito mediante prove di taglio diretto condotte su campioni confezionati con due differenti stati di addensamento iniziale e diversa lunghezza e concentrazione delle fibre (Tab. 1). I campioni ( $60\times60\times30\text{mm}$ ) con uno stato di addensamento sciolto ( $D_r\approx0.82$ ) sono stati confezionati direttamente all'interno della scatola di taglio per compattazione asciutta. La sabbia, preventivamente miscelata con la percentuale desiderata di fibre, è stata compattata in 3 strati successivi dello spessore di  $11\text{mm}$  mediante 3 colpi di un maglio del peso di  $1\text{kg}$  lasciato cadere da un'altezza pari a  $0.5\text{m}$ . I campioni densi ( $D_r\approx1.12$ ) sono stati invece preparati per vibrazione di un unico strato sottoposto ad un carico verticale uniformemente distribuito derivante dall'applicazione di un peso di  $3.0\text{kg}$  e ad un'azione oscillatoria di ampiezza  $5\text{mm}$  e frequenza  $50\text{Hz}$  per una durata di  $1'30''$ . Entrambe le citate procedure di preparazione producono un'orientazione delle fibre prevalentemente sub orizzontale (Soriano et al., 2017). Allo scopo di indagare l'influenza dell'orientazione delle fibre sulla risposta meccanica del materiale è stata messa a punto una procedura di preparazione per cui all'interno di un formacampione in plexiglass ( $130\times60\times130\text{mm}$ ) sono stati depositati strati alternati di  $10\text{mm}$  di sabbia e di fibre disposte orizzontalmente. Ogni singolo strato è stato vibrato con la medesima procedura esposta in precedenza. Una volta saturato e congelato l'intero campione, per mezzo di tagli a  $\pm45^\circ$ , sono stati ricavati quattro provini per la prova di taglio diretto con fibre orientate a  $45^\circ$  rispetto al piano di taglio orizzontale (Fig 3a,b). Tutte le prove di taglio sono state condotte con una velocità della scatola pari a  $0.05\text{mm/min}$ .

La risposta meccanica della sabbia naturale è stata studiata mediante due serie di prove di taglio diretto condotte su provini sciolti e densi. I risultati di tali prove, proposti in Fig 2.a in termini di tensione tangenziale, spostamento orizzontale e spostamento verticale, mostrano le attese variazioni di dilatanza, resistenza di picco e resistenza residua con tensione verticale applicata e densità dei campioni.

Allo scopo di massimizzare l'effetto delle fibre dovuto alla dilatanza, i campioni fibro-rinforzati sono stati confezionati con lo stato di addensamento più elevato facendo variare concentrazione delle fibre  $\chi_f=0.25\text{-}0.50\%$  e loro lunghezza  $L_f=10\text{-}30\text{mm}$ . Tali valori sono stati scelti in accordo con indicazioni di letteratura riguardanti il rapporto tra lunghezza della fibra, diametro medio dei grani e dimensioni del campione (Diambra et al., 2010; Lirer et al., 2011; Soriano et al., 2017).

Tab 1. Campagna sperimentale condotta per lo studio alla scala dell'elemento di volume.

	ID	$e_0$	$\chi_f$ (%)	$L_f$ (mm)	$L_f/D_{50}$	$D_{\text{campione}}/L_f$	$\sigma_n$ (kPa)	$\tau_{pk}$ (kPa)	$\tau_{ult}$ (kPa)
01	TD-H-L-50	0.72	0.00	/	/	/	55.64	43.86	40.00
02	TD-H-L-100	0.72		/	/	/	104.69	82.17	64.70
03	TD-H-L-200	0.72		/	/	/	224.53	159.53	129.11
04	TD-H-D-25	0.63	0.00	/	/	/	31.59	27.75	20.00
05	TD-H-L-50	0.54		/	/	/	55.64	45.64	30.00
06	TD-H-D-100	0.60		/	/	/	104.70	95.58	66.00
07	TD-H-D-200	0.60	0.25	/	/	/	224.53	191.00	119.40
08	TD-H-D-50-F0_25-1cm	0.54		10	31	3	55.64	59.06	38.56
09	TD-H-D-100-F0_25-1cm	0.54		10	31	3	104.69	93.28	62.06
10	TD-H-D-200-F0_25-1cm	0.54	0.50	10	31	3	224.53	174.36	136.00
11	TD-H-D-25-F0_5-1cm	0.54		10	31	3	55.64	31.17	21.17
12	TD-H-D-50-F0_5-1cm	0.54		10	31	3	55.64	43.19	25.00
13	TD-H-D-100-F0_5-1cm	0.54	0.50	10	31	3	104.69	94.31	68.36
14	TD-H-D-100-F0_5-1cm	0.54		10	31	3	104.69	95.58	69.53
15	TD-H-D-200-F0_5-1cm	0.54		10	31	3	224.53	194.61	131.17
16	TD-H-D-25-F0_50-3cm	0.63	0.50	30	93	1	31.60	32.39	25.00
17	TD-H-D-50-F0_50-3cm	0.63		30	93	1	56.60	51.69	37.72
18	TD-H-D-100-F0_5-3cm	0.63		30	93	1	106.60	90.08	72.00
19	TD-H-D-25-F0_50-3cm-45°	0.80	0.50	30	93	1	31.60	51.72	29.00
20	TD-H-D-25-F0_50-3cm-45°-u	0.87					31.60	58.14	41.00
21	TD-H-D-25-F0_50-3cm-45°-pk	0.91					31.60	51.78	/
23	TD-H-D-25-F0_50-3cm-ult	0.63	0.50	30	93	1	27.22	31.60	42.00
24	TD-H-D-25-F0_50-3cm-pk	0.63					31.60	33.03	/
25	TD-H-D-25-F0_50-3cm-postpk	0.63					31.60	32.92	/
26	TD-H-D-25-45-postpk	0.74	0.00	/	/	/	32.20	28.91	/
27	TD-H-D-25-45-ult	0.67					32.20	28.33	20.60
28	TD-H-D-25-45-ini	0.67					/	/	/

e: indice dei vuoti di preparazione del campione,  $\chi_f$ : concentrazione di fibre,  $L_f$ : lunghezza delle fibre,  $D_{50}$ : diametro dei grani corrispondente al 50% del passante in peso,  $D_{\text{campione}}$ : dimensione minima del campione,  $\sigma_n$ : tensione verticale applicata durante la prova di taglio diretto,  $\tau_{pk}$ : tensione tangenziale di picco registrata durante la prova di taglio,  $\tau_{ult}$ : tensione tangenziale ultima registrata durante la prova di taglio diretto.

I risultati delle prove riportati in Fig 2b e Fig 2c mostrano come l'aggiunzione di fibre con lunghezza  $L_f=10\text{mm}$ , indipendentemente dalla concentrazione, non apporti una significativa variazione alla risposta meccanica del materiale naturale. Di contro, a basse tensioni normali ( $\sigma_n=25\text{-}50\text{kPa}$ ) l'aggiunta di fibre della lunghezza  $L_f=30\text{mm}$  e concentrazione  $\chi_f=0.50\%$  produce rispetto ai campioni naturali un aumento sia della resistenza di picco che di quella residua rispettivamente del 15 e 25% accompagnata a valori ultimi dello spostamento verticale più elevati. Tale modifica della risposta meccanica del materiale svanisce con una tensione normale più elevata.

In Fig 3c si confrontano i risultati delle prove eseguite su campioni densi, alla tensione normale di 25kPa, della sabbia naturale (linea nera continua), sabbia addizionata con una concentrazione di fibre  $\chi_f=0.50\%$ , lunghezza  $L_f=30\text{mm}$  e orientazione casuale (linea rossa tratto-punto) e della sabbia addizionata con le medesime modalità, ma con fibre orientate a 45° rispetto al piano di scorrimento orizzontale (linea viola tratteggiata).

I risultati del campione con fibre orientate a 45° mostrano un importante incremento della dilatanza del materiale e dello spostamento verticale a termine della prova ( $d_h=6\text{mm}$ ) che comunque non attinge la condizione stazionaria. Inoltre, in termini di resistenza si ottiene un rilevante incremento sia della tensione tangenziale di picco che di quella residua, rispettivamente del 100 e 105% rispetto alla sabbia naturale.

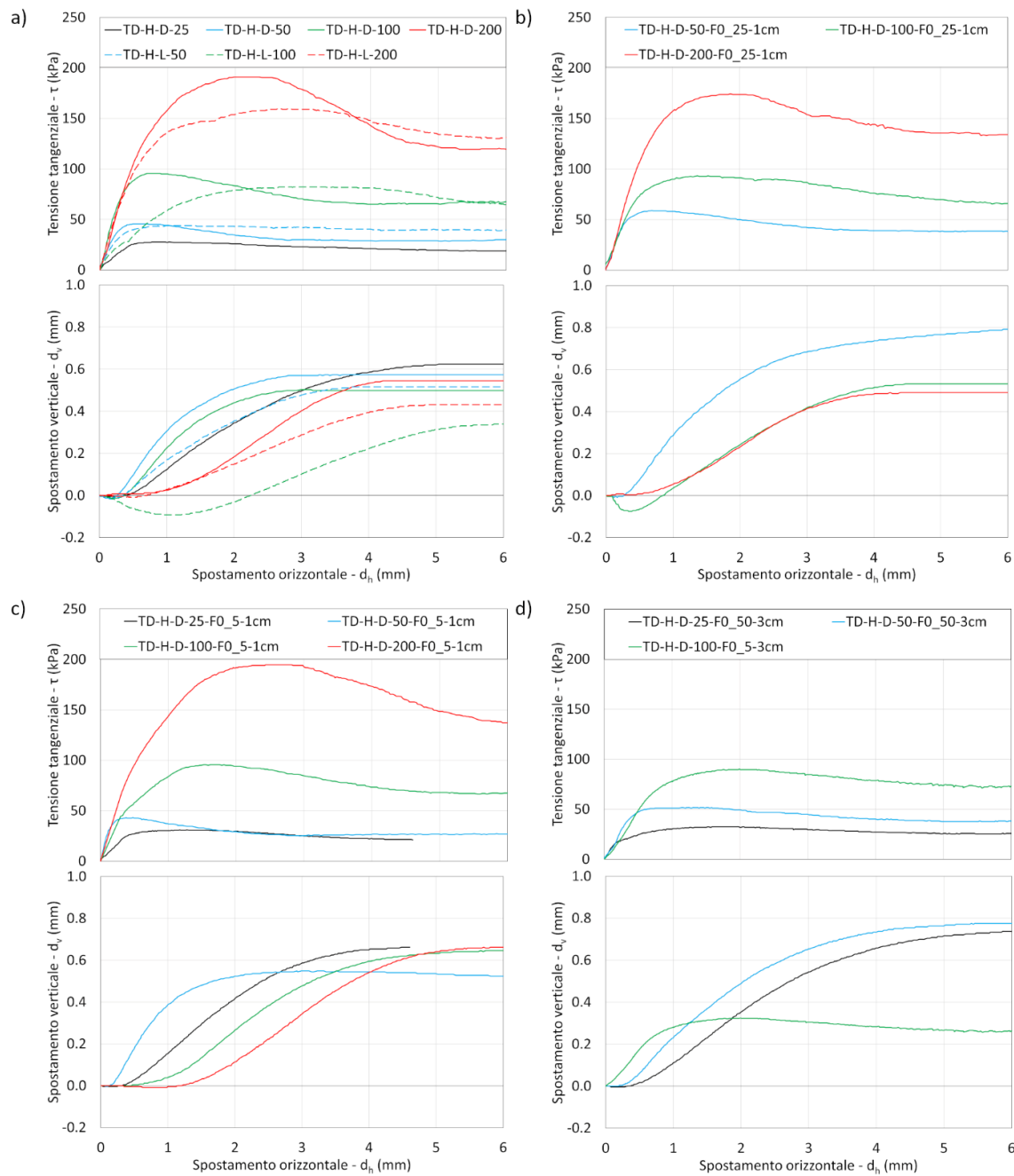


Fig 2. Risultati delle prove di taglio diretto eseguite sui campioni di sola sabbia e su confezionati con fibre disposte in maniera casuale. a) campioni di sola sabbia densi e sciolti, b) campioni di sabbia densi addizionata con fibre di lunghezza  $L_f=1\text{cm}$  una concentrazione  $\chi_f=0.25\%$ , c) campioni di sabbia addizionata con fibre di lunghezza  $L_f=1\text{cm}$  una concentrazione  $\chi_f=0.50\%$ , d) campioni di sabbia addizionata con fibre di lunghezza  $L_f=3\text{cm}$  una concentrazione  $\chi_f=0.50\%$ .

#### 4 Analisi alla scala dei grani

Allo scopo di indagare mediante la tomografia ai raggi-X i meccanismi responsabili dei risultati ottenuti alla scala dell'elemento di volume, sono state eseguite particolari prove di taglio confezionando per tre specifiche composizioni, quattro campioni gemelli ognuno dei quali è stato testato sino a diversi valori dello spostamento orizzontale (Fig 4a).

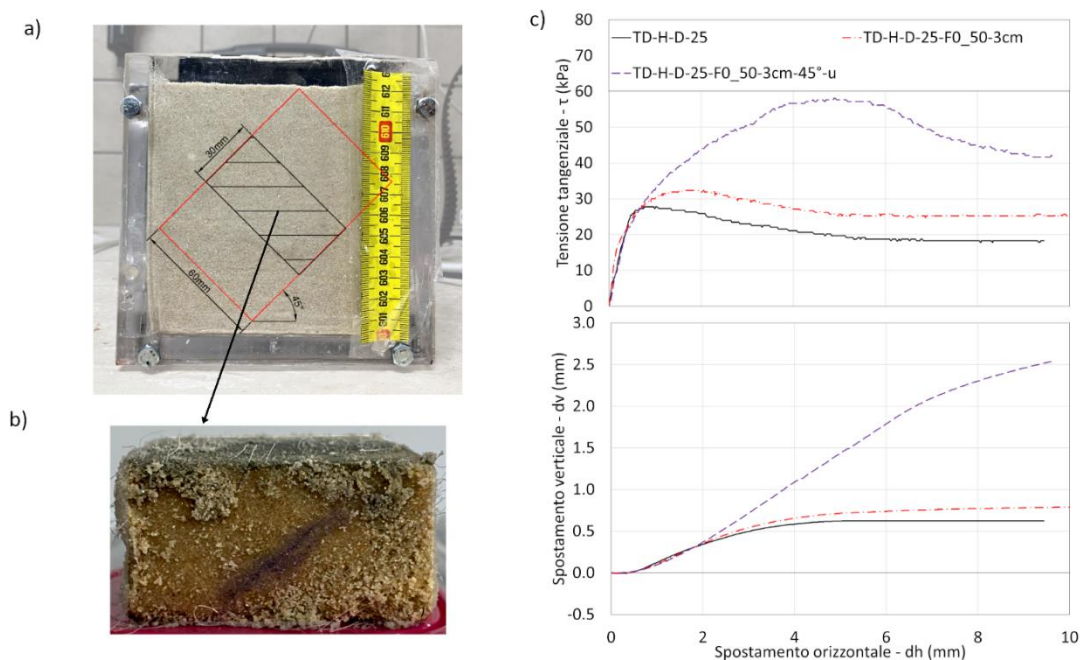


Fig 3. a) formacampione per il congelamento con indicazione delle sagome dei campioni, b) campione congelato, c) effetto dell'orientazione delle fibre sui risultati delle prove di taglio diretto. Campione di sola sabbia (linea continua in nero), campione addizionato con fibre della lunghezza di 3cm, concentrazione di fibre  $\chi_f=0.50\%$  ed orientazione casuale (linea tratto-punto in rosso) e campione addizionato con fibre della lunghezza di 3cm, concentrazione di fibre  $\chi_f=0.50\%$  orientate a  $45^\circ$  rispetto alla superficie di taglio (linea tratteggiata in viola).

Al termine di ciascuna prova la struttura dei campioni è stata “congelata” mediante iniezione di nanosilice colloidale (Fig 4b) ed i provini sono stati trasportati e scansiti presso il *Laboratoire 3SR* di Grenoble. Le prove sono state eseguite su campioni di sabbia naturale, sabbia addizionata con concentrazione di fibre  $\chi_f=0.50\%$ , lunghezza  $L_f=30\text{mm}$  e orientazione casuale e di sabbia addizionata con le medesime modalità, ma con fibre orientate a  $45^\circ$  rispetto al piano di scorrimento orizzontale.

Una volta ottenute le immagini 3D dei campioni (taglia del voxel pari a  $20\mu\text{m}$ ), mediante il codice SPAM (Stamati et al., 2020) sono stati calcolati i campi di porosità (passo di calcolo pari a  $10\text{px}$  e volume di calcolo pari a  $40 \times 40 \times 40\text{px}$ ) mostrati in Fig 4c. Le mappe mostrano che i campioni confezionati con le fibre producono un campo di porosità iniziale più eterogeneo dovuto alla struttura più aperta che si configura all'interfaccia tra fibra e grani. Le immagini relative alla condizione di picco ed alla condizione ultima evidenziano inoltre che mentre per il campione di sabbia naturale la variazione di porosità più significativa si localizza in corrispondenza della superficie orizzontale di taglio imposta dall'apparecchiatura, i campioni fibrorinforzati mostrano una deformazione volumetrica ben più diffusa con valori più elevati all'interfaccia tra grani e fibre. Tale effetto di diffusione risulta notevolmente più marcato per il campione con fibre orientate a  $45^\circ$  rispetto alla superficie di scorrimento orizzontale.

## 5 Conclusioni

La campagna sperimentale mostrata nel presente contributo si pone l'obiettivo di indagare i meccanismi alla scala dei grani che regolano la risposta meccanica delle sabbie fibro-rinforzate. Le prove di taglio diretto hanno mostrato che la risposta di questi materiali può essere migliorata massimizzando il numero di fibre che entrano in trazione con l'evoluzione della banda di scorrimento. Il materiale confezionato con lo  $0.50\%$  di fibre di lunghezza pari a  $30\text{mm}$  ed orientazione a  $45^\circ$  rispetto alla superficie di taglio ha mostrato valori della resistenza di picco ed ultima praticamente raddoppiati rispetto a quelli della sabbia naturale. Lo svanire di questo effetto benefico per tensioni normali più elevate suggerisce che la dilatanza della matrice sabbiosa gioca un ruolo fondamentale nell'attivare il meccanismo di resistenza connesso alle fibre.

Sviluppi futuri della ricerca si concentreranno sull'analisi dei risultati relativi a prove triassiali su



campioni fibro-rinforzati già eseguite all'interno del tomografo ai raggi-X. Particolare impegno verrà dedicato allo studio dei meccanismi di interazione tra fibre e grani per mezzo di tecniche digitali di correlazione delle immagini operanti sia nel framework del continuo che del discreto.

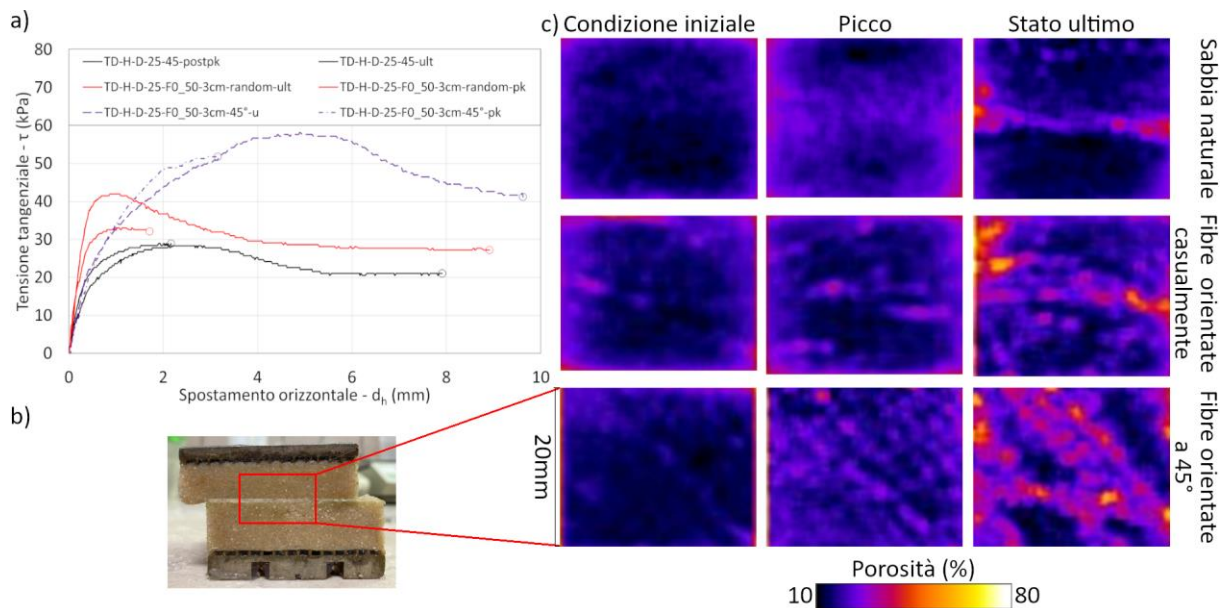


Fig 4. a) risultati delle prove in termini di curve tensione tangenziale spostamento orizzontale, b) campione al termine della prova iniettato con nanosilice colloidale, c) campi di porosità dei campioni.

I campi di porosità calcolati sui campioni post-mortem hanno evidenziato che quando opportunamente orientate le fibre sono in grado di diffondere la deformazione su di un volume significativamente maggiore.

## 6 Bibliografia

- Andò, E., 2013. Experimental investigation of micro-structural changes in deforming granular media using x-ray tomography. PhD thesis. Université de Grenoble: s.n.
- Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M., & Russell, A. R. (2010). Fibre reinforced sands: experiments and modelling. *Geotextiles and geomembranes*, 28(3), 238-250.
- Fredlund D.G., Rahardjo H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Wiley and Sons Inc., New York.
- Khaddour, G., Riedel, I., Andò, E., Charrier, P., Bésuelle, P., Desrues, J., ... & Salager, S. (2018). Grain-scale characterization of water retention behaviour of sand using X-ray CT. *Acta Geotechnica*, 13(3), 497-512.
- Lancellotta R. (2007). "Lower bound approach for seismic passive earth resistance", *Géotechnique*, 57, 319-321.
- Lirer, Stefania, Alessandro Flora, and Nilo Cesar Consoli. "On the strength of fibre-reinforced soils." *Soils and foundations* 51.4 (2011): 601-609.
- Saada, A. S. & Bianchini, G., 1989. *Constitutive equations for granular non-cohesive soils*. Cleveland, Ohio, Balkema.
- Soriano, I., Ibraim, E., Ando, E., Diambra, A., Laurencin, T., Moro, P., & Viggiani, G. (2017). 3D fibre architecture of fibre-reinforced sand. *Granular Matter*, 19(4), 1-14.
- Stamati, O., Andò, E., Roubin, E., Cailletaud, R., Wiebicke, M., Pinzon, G., ... & Birmpilis, G. (2020). Spam: software for practical analysis of materials. *Journal of Open Source Software*, 5(51), 2286.
- Trabucco international S.r.l., scheda tecnica XPS Fluorocarbon Saltwater, [https://www.trabucco.it/catalogo/p/52/xps\\_fluorocarbon\\_saltwater.htm](https://www.trabucco.it/catalogo/p/52/xps_fluorocarbon_saltwater.htm).
- Vaughan P.R. (1988). "Characterising the mechanical properties of in situ residual soils". *Proc. 2nd Int. Conf. on Geomechanics in tropical soils*, Singapore, 469-487.
- Wiebicke, M. (2020). *Experimental analysis of the evolution of fabric in granular soils upon monotonic loading and load reversals* (Doctoral dissertation, Technische Universität Dresden).