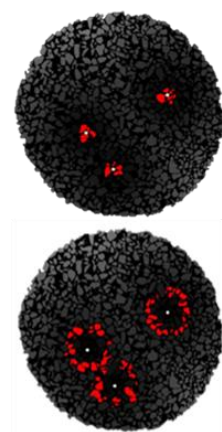
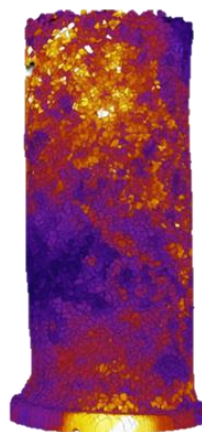
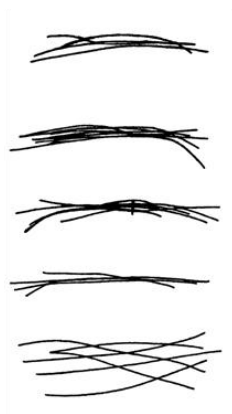
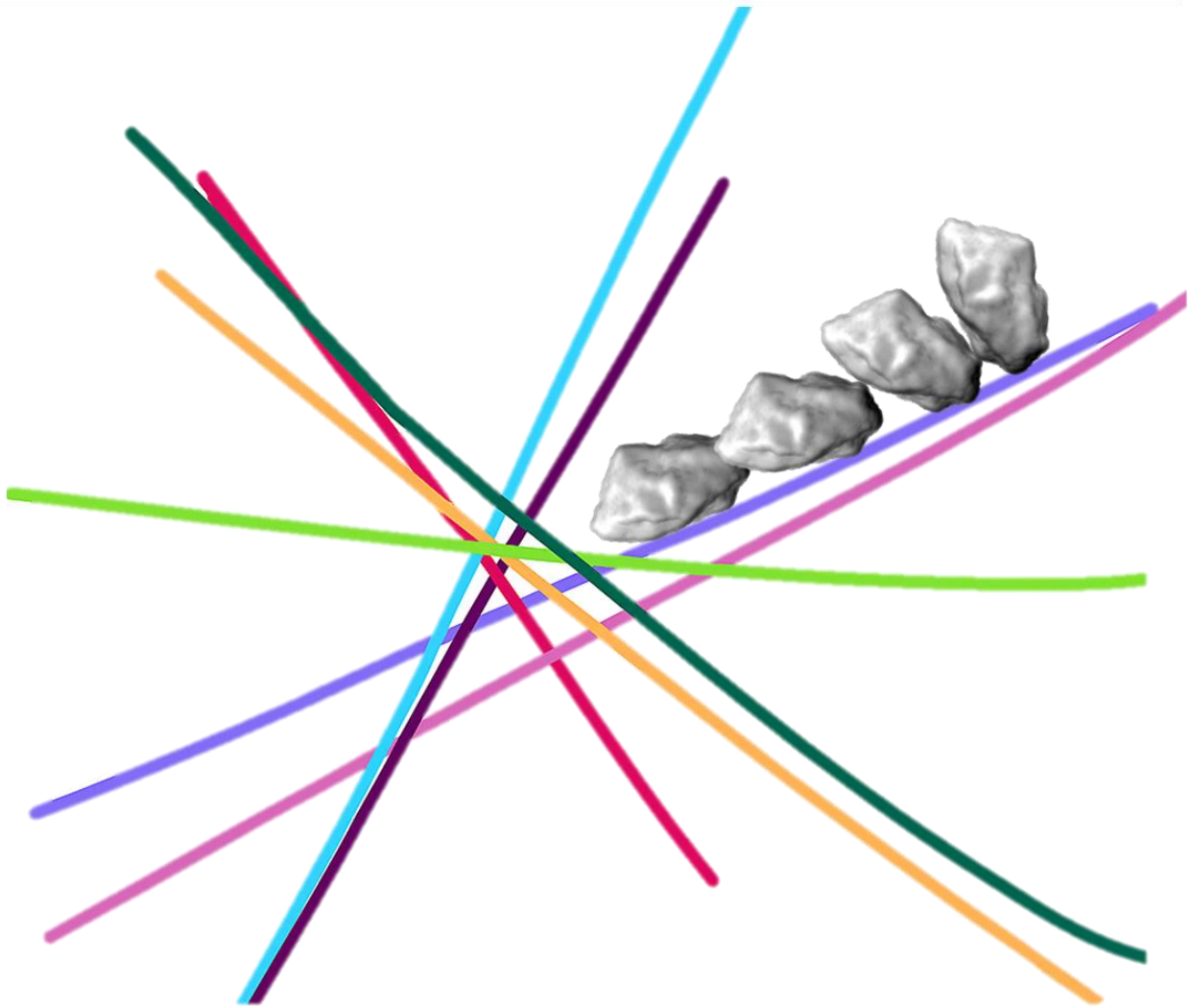


Effect of Fibre Orientation on the Mechanical Response of Reinforced Sand: A Multiscale Study Using X-ray Tomography



PhD Thesis

Michela ARCIERO



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI CASSINO E DEL
LAZIO MERIDIONALE



Effect of Fibre Orientation on the Mechanical Response of Reinforced Sand: A Multiscale Study Using X-ray Tomography

PhD Student
Michela ARCIERO

Co-joint PhD

Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale - UNICAS

PhD Course in Methods, Models and Technologies for Engineering, 38th cycle

Université Grenoble Alpes - UGA

École doctorale : I-MEP2 - Ingénierie - Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés, Production - Spécialité : 2MGE : Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie

Tutors:

Gioacchino VIGGIANI

Professeur des Universités, UGA

Giuseppe MODONI

Full Professor, UNICAS

Alessandro TENGATTINI

Maître de conférences, UGA

Erminio SALVATORE

Associated Professor, UNICAS

Thesis publicly defended on 28.10.2025.

Jury composed of:

Stephen HALL, Full Professor, Lund University, Rapporteur

Claudia VITONE, Full Professor, Politecnico di Bari, Rapporteur

Erdin IBRAIM, Full Professor, University of Bristol, Examineur

Stefania LIRER, Full Professor, University of Rome Guglielmo Marconi, Examineur

Gaël COMBE, Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes, Examineur

Gioacchino VIGGIANI, Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes, Directeur de thèse

Giuseppe MODONI, Full Professor, University of Cassino, Co-directeur de thèse

Alessandro TENGATTINI, Maître de conférences, Université Grenoble Alpes, Co-encadrant

Erminio SALVATORE, Associate Professor, University of Cassino, Co-encadrant

ABSTRACT IN ENGLISH

The diffuse inclusion of fibres to infer tensile resistance to construction materials has proved its effectiveness in a variety of civil engineering applications. Extending the same principle to natural soils seems a logical promise, thinking of the potential benefit that could stem from fibre reinforcement on the mechanical performance of geotechnical systems, from slope reinforcement to foundations. However, the full potential of this technique remains underexploited, mostly due to an incomplete understanding of the interactions between fibres and soil. The present study aims to explore with a comprehensive experimental campaign the basic mechanisms that rule the interaction between fibres and sand. While traditional studies follow a phenomenological approach, comparing the global mechanical responses of samples with and without fibre reinforcement and drawing rules to incorporate observation into modelling, *the crucial role of grain-scale mechanisms on the evolution of soil deformation is herein pointed out.*

Bearing this goal in mind, laboratory tests at different scales have been combined to investigate the mechanisms of fibre reinforcement from different perspectives. Firstly, the effects of fibre reinforcement have been investigated with several triaxial tests on large samples to observe the change of mechanical response induced by fibres of different length and orientation. The observed results highlight the paramount role of strain localisation that naturally occurs on sand upon shearing. Then, to better explore the role of fibres on this mechanism, a second experimental campaign has been performed with direct shear tests, *i.e.*, forcing strain localisation along preferential directions. The analysis has then moved on the microscale, performing X-ray tomography on the samples subjected to direct shear and on miniature triaxial tests, to detect how fibres influence strain localisation, porosity evolution, and shear band formation. Results demonstrate that well-oriented fibres not only enhance strength and ductility but also modify the progressive development of deformation patterns, improving load distribution and delaying failure.

The analysis has then proceeded at a more detailed scale pointing out the interaction between fibres and surrounding grains. To this aim, specific tests have been performed on samples with a limited number of fibres placed along prescribed directions and loading them with tensile forces. The processing of tomographic images enables a very precise identification of fibres and grains position in the different loading phases and to link the kinematics of both systems.

Combining macroscopic behaviour and microscale interactions, this study provides essential insights to optimize Fibre-Reinforced Sand (FRS) applications, enabling more efficient and reliable reinforcement strategies in geotechnical engineering.

RESUME EN FRANÇAIS

L'inclusion diffuse de fibres afin de conférer une résistance en traction aux matériaux de construction a démontré son efficacité dans de nombreuses applications du génie civil. L'extension de ce principe aux sols naturels apparaît comme une perspective logique, compte tenu des bénéfices potentiels que le renforcement par fibres pourrait apporter aux performances mécaniques des systèmes géotechniques, depuis la stabilisation de pentes jusqu'aux fondations. Toutefois, le plein potentiel de cette technique reste sous-exploité, principalement en raison d'une compréhension incomplète des interactions entre fibres et sol. La présente étude vise à explorer, au travers d'une campagne expérimentale approfondie, les mécanismes fondamentaux régissant l'interaction entre fibres et sols granulaires. Alors que les études traditionnelles adoptent une approche phénoménologique, en comparant la réponse mécanique globale d'échantillons avec et sans renfort fibreux et en intégrant ces observations dans des modèles, il est ici mis en évidence le rôle déterminant des mécanismes à l'échelle des grains dans l'évolution de la déformation des sols.

En gardant cet objectif à l'esprit, des essais de laboratoire à différentes échelles ont été combinés afin d'étudier les mécanismes de renforcement par fibres sous différents angles. Tout d'abord, les effets du renforcement par fibres ont été examinés à l'aide de plusieurs essais triaxiaux sur de grands échantillons, afin d'observer la modification de la réponse mécanique induite par des fibres de différentes longueurs et orientations. Les résultats obtenus mettent en évidence le rôle primordial de la localisation de déformation, phénomène qui se produit naturellement dans le sable lors du cisaillement. Ensuite, pour mieux analyser l'influence des fibres sur ce mécanisme, une deuxième campagne expérimentale a été menée à l'aide d'essais de cisaillement direct, c'est-à-dire en imposant la localisation de la déformation le long de directions préférentielles. L'analyse a ensuite été approfondie à l'échelle microscopique grâce à la tomographie aux rayons X réalisée sur les échantillons soumis au cisaillement direct et sur des essais triaxiaux miniatures, afin de détecter comment les fibres influencent la localisation de la déformation, l'évolution de la porosité et la formation des bandes de cisaillement. Les résultats montrent que des fibres bien orientées non seulement augmentent la résistance et la ductilité, mais modifient également le développement progressif des modes de déformation, améliorant la répartition des charges et retardant la rupture.

L'analyse a ensuite été approfondie à l'échelle microscopique par la mise en œuvre de tomographies aux rayons X sur des échantillons soumis aux essais de cisaillement direct et sur

des échantillons testés en triaxial miniature, afin de caractériser l'influence des fibres sur la localisation des déformations, l'évolution de la porosité et la formation des bandes de cisaillement. Les résultats démontrent que des fibres correctement orientées non seulement améliorent la résistance et la ductilité, mais modifient également la cinématique progressive des modes de déformation, optimisant ainsi la distribution des charges et retardant l'initiation de la rupture.

Enfin, l'analyse a été menée à une échelle plus fine pour mettre en évidence l'interaction entre les fibres et les grains environnants. À cette fin, des essais spécifiques ont été réalisés sur des échantillons comportant un nombre limité de fibres disposées selon des directions prescrites et soumises à des efforts de traction. Le traitement des images tomographiques a permis d'identifier avec une grande précision la position des fibres et des grains aux différentes phases de chargement et de relier la cinématique des deux systèmes.

En combinant les observations du comportement macroscopique et des interactions à l'échelle microscopique, cette étude apporte des éléments essentiels pour optimiser l'utilisation des matériaux renforcés par fibres dans les applications géotechniques, en vue de stratégies de renforcement plus efficaces et plus fiables.

ABSTRACT IN ITALIANO

L'impiego diffuso di fibre per conferire resistenza a trazione ai materiali da costruzione ha dimostrato grande efficacia in numerose applicazioni dell'ingegneria civile, basti pensare al calcestruzzo fibro-rinforzato.

Alla luce dei potenziali benefici che il rinforzo con fibre può apportare alle prestazioni meccaniche delle opere geotecniche - dal consolidamento dei versanti fino alle fondazioni - applicare lo stesso principio ai terreni naturali appare una prospettiva interessante.

I diversi studi condotti sui terreni fibro-rinforzati dimostrano la capacità delle fibre di migliorare la risposta meccanica del materiale. Ciò nonostante, il potenziale di questa tecnica risulta ancora ampiamente inesplorato, soprattutto a causa di una comprensione parziale delle interazioni tra fibre e terreno.

Questo studio si pone dunque l'obiettivo di indagare, attraverso un'ampia campagna sperimentale alla *multiscala*, i meccanismi fondamentali che governano l'interazione tra fibre e sabbia. Diversamente dagli approcci tradizionali, che si limitano a confrontare la risposta meccanica complessiva di campioni con e senza rinforzo per ricavarne regole di modellazione, il presente lavoro pone in primo piano il ruolo cruciale dei processi a scala granulare nell'evoluzione della deformazione del terreno.

Per raggiungere questo obiettivo, sono state condotte prove di laboratorio su più scale, così da analizzare i meccanismi di rinforzo da differenti prospettive. In una prima fase, gli effetti delle fibre sono stati studiati mediante numerose prove triassiali su campioni di grandi dimensioni, al fine di osservare le variazioni della risposta meccanica indotte da fibre di diversa lunghezza e orientazione. I risultati ottenuti hanno messo in evidenza l'importanza determinante della localizzazione delle deformazioni, fenomeno che si manifesta naturalmente nella sabbia sottoposta a taglio. Per approfondire ulteriormente questo aspetto, è stata realizzata una seconda campagna sperimentale basata su prove di taglio diretto, con le quali la localizzazione delle deformazioni è indotta lungo direzioni preferenziali. Successivamente, l'analisi è stata estesa alla scala microscopica mediante tomografia a raggi X, applicata sia a campioni sottoposti a taglio diretto sia a prove triassiali in miniatura, con l'obiettivo di comprendere come le fibre influenzino la localizzazione delle deformazioni, l'evoluzione della porosità e la formazione delle bande di taglio. I risultati hanno mostrato che fibre ben orientate non solo aumentano resistenza e duttilità, ma modificano anche lo sviluppo progressivo dei pattern di deformazione, migliorando la distribuzione dei carichi e ritardando l'innesco della rottura.

L'indagine è stata quindi estesa alla scala microscopica del singolo grano, per mettere in luce le interazioni tra fibre e particelle di sabbia e individuare una metrica capace di cogliere l'influenza delle inclusioni sulla loro cinematica. A tal fine, sono stati preparati campioni con un numero molto limitato di fibre, orientate lungo la direzione della tensione minima agente e sottoposti a prove di trazione. L'elaborazione delle immagini tomografiche ha permesso di individuare con estrema precisione la posizione delle fibre e dei grani nelle diverse fasi di carico, consentendo di correlare la cinematica dei due sistemi.

L'integrazione delle osservazioni macroscopiche con quelle a scala microscopica fornisce un quadro completo delle modalità di interazione fibra-grano. Questo lavoro contribuisce a una migliore comprensione del fenomeno di rinforzo e offre indicazioni fondamentali per ottimizzare le applicazioni delle sabbie rinforzate con fibre (Fibre-Reinforced Sand, FRS), aprendo la strada a strategie di rinforzo più efficienti e affidabili in ambito geotecnico.