

COMPORTAMENTO NON DRENATO DEI LIVELLI SABBIOSO-LIMOSI PRESENTI NELLE ALLUVIONI DEL FIUME TEVERE A ROMA (ITALIA)

UNDRAINED BEHAVIOUR OF THE SANDY-SILTY LEVELS OF THE TIBER RIVER ALLUVIAL DEPOSITS IN ROME (ITALY)

FRANCESCA BOZZANO^(*), ALBERTO BRETSCHEIDER^(*), ANNA CHIARA GIACOMI^(*), LUCA LENTI^(***), SALVATORE MARTINO^(*), GABRIELE SCARASCIA MUGNOZZA^(*), LUIGI STEDILE^(**) & JEAN-LOUIS TACITA^(***)

^(*) Sapienza Università di Roma - Dipartimento di Scienze della Terra - Rome, Italy

^(**) Sapienza Università di Roma - Centro di Ricerca CERI "Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischii Geologici" - Valmontone, Italy

^(***) Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR-Paris)

14-20 Boulevard Newton Cité Descartes, Champs sur Marne F-77447, Marne la Vallée Cedex 2, France

^(****) Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR-Nantes)

Route de Bouaye CS4 44344, Bouguenais Cedex, France

RIASSUNTO

Il presente studio riporta i risultati di una caratterizzazione fisico-meccanica di laboratorio in condizione non drenate delle sabbie facenti parte dei depositi alluvionali recenti del Fiume Tevere, in corrispondenza del centro storico di Roma (livello D *Auct.*). Tale studio è propedeutico ad un'analisi dei possibili effetti di deformazione sismoindotta permanente e/o di liquefacibilità a seguito dei più severi scenari di scuotimento sismico attesi. Le prove sono state eseguite su un misto granulare ricostituito in laboratorio, considerato rappresentativo dei depositi in oggetto. Questa scelta è stata motivata da un lato dalla difficoltà di campionamento mediante tecniche standard di sondaggio garantendo un basso grado di disturbo e dall'altro dalla necessità di disporre di circa 50 kg di materiale per l'esecuzione di tutte le prove di laboratorio. In particolare, sono state effettuate prove meccaniche in condizioni statiche non drenate presso il laboratorio di Geologia Applicata del Dipartimento di Scienze della Terra-CERI della Sapienza Università di Roma e prove dinamiche alla colonna risonante presso il Laboratoire de Mécanique des Sols - Département Géotechnique, Eau et Risque (IFSTTAR-Paris). La rappresentatività del misto granulare è stata valutata in base: i) alla composizione mineralogica ed ai valori di peso per unità di volume del solido (γ_s), ii) alla comparazione granulometrica con una curva di riferimento (*target*) riferita ai depositi in sito, iii) alla classificazione Unified Soil Classification System (USCS). L'optimum Proctor del misto granulare è stato ottenuto ad una saturazione pari al 90%, con un contenuto d'acqua (w) del 17.6%, cui corrisponde un addensamento (γ_d) di 16.70 kN/m³. La resistenza non drenata, determinata mediante prove triassiali non consolidate non drenate (TxUUI), è risultata compresa tra 20 e 60 kPa per valori di indice dei vuoti (e) variabili tra 0.7 e 0.5 mentre i valori dell'indice dei vuoti critico (e_{cr}) sono risultati compresi tra 0.55 e 0.65 e corrispondono solo in parte ai valori dell'indice dei vuoti ottenibili per i depositi in sito ($0.6 < e_0 < 0.8$). Dalle prove di colonna risonante è stata ottenuta una soglia lineare di deformazione al taglio (γ_l) pari a 0.00005 ed una soglia volumica di deformazione al taglio (γ_v) pari a 0.0003. Le curve di decadimento ottenute risultano di buona attendibilità se comparate con curve di letteratura riferite a materiali di analogo addensamento e composizione granulometrica.

ABSTRACT

This paper reports the findings from a laboratory study aimed at the physical and mechanical characterisation under undrained conditions of sands belonging to recent Tiber river alluvia (level D *Auct.*) located in historical centre of Rome. The study was conducted in preparation for subsequent analysis of possible seismically-induced permanent deformation and/or liquefaction under the worst expected seismic shaking scenarios. Tests were carried out on a laboratory-reconstituted granular mix, which was considered to be representative of the above deposits. This choice was justified by: i) the difficulty of collecting fairly undisturbed samples with standard boring techniques, and ii) the need for gathering about 50 kg of material for all the planned tests. The tests consisted of: undrained static mechanical tests and dynamic resonant-column tests. They were conducted at the Laboratorio di Geologia Applicata - Dipartimento di Scienze della Terra-CERI, Sapienza University of Rome - and at the Laboratoire de Mécanique des Sols - Département Géotechnique, Eau et Risque (IFSTTAR-Paris) respectively. The representativeness of the granular mix was assessed on the basis of the: i) mineralogical composition and the weight per unit of volume of the solid (γ_s), ii) comparison of its grain size with a target curve of the in-situ deposits, and iii) Unified Soil Classification System (USCS). The Proctor optimum of the granular mix was attained at a saturation of 90%, with a water content (w) of 17.6%, corresponding to a density (γ_d) of 16.70 kN/m³. Undrained strength - determined via unconsolidated undrained triaxial tests (TxUUI) - was in the range of 20 to 60 kPa for void ratio (e) values of 0.7 to 0.5, whereas the critical void ratio (e_{cr}) values were comprised between 0.55 and 0.65, corresponding only in part to the ones obtainable for the in-situ deposits ($0.6 < e_0 < 0.8$). Resonant-column tests yielded a linear shear deformation threshold (γ_l) of 0.00005 and a volume shear deformation threshold (γ_v) of 0.0003. The resulting decay curves were fairly reliable in comparison with the ones available in the literature for materials of similar density and grain size.

TERMINI CHIAVE: alluvioni sabbioso-limose, prove triassiali non consolidate non drenate, prove in colonna risonante, proprietà dinamiche, Roma

KEY WORDS: sandy-silty alluvia, unconsolidated undrained triaxial tests, resonant-column tests, dynamic properties, Rome

INTRODUZIONE

Il centro storico della città di Roma è in parte edificato nel settore di piana alluvionale colmata dai depositi del Fiume Tevere e per la restante parte su rilievi collinari in cui affiorano i depositi dei vicini distretti vulcanici dei Colli Albani e Sabatini (FUNICIELLO & GIORDANO, 2008; BOZZANO *et alii*, 2000, RASPA *et alii*, 2008).

Roma è stata di recente interessata dal risentimento della sequenza sismica aquilana del 2009 (CASERTA *et alii*, 2009) registrando alcuni danni, la cui maggiore concentrazione è stata in corrispondenza dei depositi alluvionali (BOZZANO *et alii*, 2011). Ben più ampia è, tuttavia, la documentazione di forti risentimenti e di danni registrati nell'ultimo millennio nel centro storico di Roma in corrispondenza della piana alluvionale del Tevere e dei suoi affluenti (AMBROSINI *et alii*, 1986; FUNICIELLO & ROVELLI, 1998; DONATI *et alii*, 1999). Per questo, nell'ultimo ventennio, le caratteristiche amplificative dei depositi alluvionali del Fiume Tevere nell'area del centro storico di Roma sono stati posti in evidenza in alcuni studi dedicati (SALVI *et alii*, 1991; ROVELLI *et alii*, 1995; BOZZANO *et alii*, 2008; CASERTA *et alii*, 2012).

Recentemente alcuni studi sono stati focalizzati sull'analisi dei possibili effetti di non linearità connessi alle più severe azioni sismiche nell'area urbana di Roma (BONILLA *et alii*, 2010). Tali studi hanno posto in luce l'importanza dell'eterogeneità composizionale del corpo alluvionale tiberino e, in particolare, della giustapposizione stratigrafica tra depositi argilloso-limosi a maggiore deformabilità e depositi sabbiosi e sabbioso-limosi più rigidi (BOZZANO *et alii*, 2012).

La recente sequenza sismica che ha interessato l'Emilia, a partire dal mainshock del 20 maggio 2012 (M_w 5.9), ha nuovamente rimarcato la rilevanza di effetti di liquefazione che possono interessare depositi alluvionali recenti in aree urbane (ROMEO, 2012 in questo volume); tale eventualità, del resto, è già ricorsa in passato in Italia a seguito di forti sismi, quali il Terremoto delle Calabrie del 1783, il terremoto del Molise del 1805, il terremoto in Calabria del 1905, il terremoto di Reggio e Messina del 1908, il terremoto di Avezzano del 1915, come censito nella nuova versione del Catalogo nazionale degli Effetti Deformativi indotti da forti Terremoti (CEDIT – FORTUNATO *et alii*, 2012 in questo volume). In base al catalogo CEDIT, la liquefazione rappresenta il 15% circa del totale degli effetti sismoindotti che sono stati censiti nel territorio nazionale nel corso dell'ultimo millennio (MARTINO *et alii*, 2012).

In tale ambito, da circa un biennio il CERi collabora con l'IFSTTAR di Parigi-Nantes nell'ambito del progetto Seismic Engineering Research Infrastructures for European Synergies (SERIES) dal titolo: "Experimental and Numerical Investigations of Nonlinearity in soils using Advanced Laboratory-Scaled models (ENINALS)", facente parte del "European Commission, 7th Framework Programme (FP7)". Il progetto ha come finalità lo studio degli effetti di deformazione permanente indotti su colonne di terreno stratificate con particolare attenzione alle alternanze di sabbie sciolte e argille debolmente con-

INTRODUCTION

Historical centre of Rome rests in part on the alluvial plain, filled by sediments from the Tiber river, and in part on hills, where deposits from the Colli Albani and Colli Sabatini volcanic districts are exposed (FUNICIELLO & GIORDANO, 2008; BOZZANO *et alii*, 2000, RASPA *et alii*, 2008).

The L'Aquila seismic sequence of 2009 (CASERTA *et alii*, 2009) caused some damage to historical centre of Rome, especially in the area of the alluvial deposits (BOZZANO *et alii*, 2011). However, much more extensive records from the last millennium point to strong earthquake-induced damage in the alluvial plain of the Tiber and of its tributaries (AMBROSINI *et alii*, 1986; FUNICIELLO & ROVELLI, 1998; DONATI *et alii*, 1999). This is why, in the past two decades, some dedicated studies (SALVI *et alii*, 1991; ROVELLI *et alii*, 1995; BOZZANO *et alii*, 2008; CASERTA *et alii*, 2012) placed emphasis on the amplification effects of the Tiber alluvial deposits in Rome's historical centre.

Recently, some studies were focused on the possible non-linearity effects associated with the worst seismic actions in Rome's urban area (BONILLA *et alii*, 2010). These studies highlighted the compositional heterogeneity of the Tiber alluvial fill and, namely, the stratigraphic juxtaposition of more deformable clayey-silty deposits and of stiffer sandy and sandy-silty deposits (BOZZANO *et alii*, 2012).

The recent seismic sequence of Emilia, starting with the main shock of 20 May 2012 (M_w 5.9), stressed, once again, the importance of liquefaction effects in recent alluvial deposits located in urban areas (ROMEO, 2012 in this volume). In Italy, these effects were observed upon strong earthquakes, such as the ones of: Calabria in 1783, Molise in 1805, Calabria in 1905, Reggio Calabria and Messina in 1908, Avezzano in 1915, as reported in the new version of the national catalogue of deformation effects induced by strong earthquakes (CEDIT – FORTUNATO *et alii*, 2012 in this volume). The CEDIT catalogue indicates that liquefaction accounts for roughly 15% of total seismically-induced effects recorded in Italy in the last millennium (MARTINO *et alii*, 2012).

In this regard, CERi has been cooperating with IFSTTAR of Paris-Nantes for about two years within the framework of the following project: "Experimental and Numerical Investigations of Non-linearity in soils using Advanced Laboratory-Scaled models (ENINALS)" - Seismic Engineering Research Infrastructures for European Synergies (SERIES) - European Commission, 7th Framework Programme (FP7). The project is intended to investigate the effects of permanent deformation induced on stratified soil columns, with special regard to alternating loose sands and weakly consolidated clays. Current experimental work includes the preparation of samples for dynamic tests with the geotechnical centrifuge of the Nantes-IFSTTAR laboratory.

In view of future numerical comparisons of analogical modelling results with non-linearity effects in the site under review, tests were

solidate. Le sperimentazioni in corso prevedono la preparazione di campioni da sottoporre a prove dinamiche alla centrifuga geotecnica del laboratorio IFSTTAR di Nantes.

Per una futura comparazione numerica dei risultati ottenuti dalle modellazioni analogiche con gli effetti di non linearità riferibili al sito di studio, è stata condotta una sperimentazione di laboratorio, presso i laboratori di Geologia Applicata del Dipartimento di Scienze della Terra-CERI della Sapienza Università di Roma, finalizzata alla caratterizzazione fisico-meccanica, in condizioni statiche non drenate e dinamiche presso i laboratori dell'IFSTTAR di Parigi, dei depositi sabbiosi presenti nel sottosuolo urbano della città di Roma.

Data la scarsa affidabilità delle operazioni di campionamento di tali depositi mediante sondaggi geognostici, dovutamente alla completa mancanza di coesione degli stessi ed alla loro posizione sotto falda, e data la necessità di disporre di ingenti quantitativi di materiale (circa 50 kg) per portare a compimento l'intero progetto di prove di laboratorio, la caratterizzazione fisico-meccanica è stata effettuata su di un misto granulare appositamente ricostituito in laboratorio (VAID & NEGUSSEY, 1988; DYVIK & HØEK, 1999). Tale misto è stato ricostituito a partire da un materiale di cava di adeguata composizione mineralogica e granulometrica, campionato in prossimità del sito di Ponte Galeria, a circa 15 km di distanza dal centro storico di Roma.

DEPOSITI SABBIOSI NEL CORPO ALLUVIONALE DEL FIUME TEVERE A ROMA

I depositi alluvionali recenti di riempimento della valle del Fiume Tevere nel settore del centro storico di Roma (Fig. 1) mostrano una notevole eterogeneità sia verticale che laterale, con geometrie dei depositi molto complesse. La complessità di tali rapporti stratigrafici e delle relative caratteristiche geotecniche è stata trattata in letteratura da diversi Autori (BELLOTTI *et alii*, 1994, 1995; MILLI, 1997; BOZZANO *et alii*, 2000; RASPA *et alii*, 2008). In questo lavoro si è seguita la suddivisione in unità litotecniche proposta BOZZANO *et alii* (2000 e 2008), in accordo con CORAZZA *et alii* (1999) e GIACOMI (2011). I sedimenti sono raggruppati, dal basso verso l'alto, in 6 unità litotecniche, riconoscibili sia in sezioni geologico-tecniche trasversali alla valle del Fiume Tevere che in zonazioni geologico-tecniche su piani quotati ottenute a partire dal piano campagna fino al substrato geologico (Figg. 2, 3):

Litotipo G: ghiaie in matrice sabbioso-ghiaiosa;

Litotipo D: alternanza di sabbie siltose, silt sabbioso, con livelli argillosi siltosi;

Litotipo C: argille e argille siltose grigie contenenti resti carboniosi e torba che conferiscono un color bruno nero contenenti livelli sabbiosi con ghiaia;

Litotipo B: sabbie e sabbie siltose, a sua volta suddivisibile in 2 sottogruppi:

B1: sabbia fine con frammenti di vegetali;

B2: alternanza di sabbie e argille limose.

Litotipo A: depositi limosi-sabbiosi, con frammenti di mattoni e alluvioni storiche, suddivisibile in 2 sottogruppi:

conducted at the laboratories of Geologia Applicata - Dipartimento di Scienze della Terra-CERI, Sapienza University of Rome - and at the Paris-IFSTTAR laboratory. The aim of the tests was the physico-mechanical characterisation of the sandy deposits of Rome's urban subsoil under undrained static and dynamic conditions.

For the above characterisation, use was made of a special laboratory-reconstituted granular mix (VAID & NEGUSSEY, 1988; DYVIK & HØEK, 1999). This choice was justified by: i) the poor reliability of samples collected from the deposits via geognostic boreholes, owing to their lack of cohesion and to their position below the water table, and ii) the need for obtaining large amounts of material (about 50 kg) to complete the planned set of laboratory tests. The mix was reconstituted from a quarry material of adequate mineralogical composition and grain size, taken near the Ponte Galeria site, about 15 km away from Rome's historical centre.

SANDY DEPOSITS OF THE TIBER RIVER ALLUVIA IN ROME

The recent alluvial deposits filling the Tiber valley, in Rome's historical centre (Fig. 1), are extremely heterogeneous, both vertically and laterally, and have very complex geometries. Various Authors (BELLOTTI *et alii*, 1994, 1995; MILLI, 1997; BOZZANO *et alii*, 2000; RASPA *et alii*, 2008) addressed the complexity of their stratigraphic relations and geotechnical characteristics. In this study, reference was made to the subdivision into lithotechnical units proposed by BOZZANO *et alii* (2000 e 2008), in agreement with CORAZZA *et alii* (1999) and GIACOMI (2011). The sediments were grouped, from bottom to top, into 6 lithotechnical units. These units may be identified both in engineering-geological sections transverse to the Tiber valley and in engineering-geological zoning maps at different elevations, from ground level to the geological bedrock (Figs. 2, 3):

Lithotype G: gravels in a sandy-gravelly groundmass;

Lithotype D: alternating silty sands, sandy silt and silty clayey levels;

Lithotype C: grey clays and silty clays containing carbonaceous remains and peat, imparting a brown-black colour and containing sandy levels with clay;

Lithotype B: sands and silty sands, which may be broken down into 2 subgroups:

B1: fine sand with plant fragments;

B2: alternating sands and silty clays;

Lithotype A: silty-sandy deposits, with fragments of bricks and historical alluvia, which may be broken down into 2 subgroups:

A1: sandy silt;

A2: clays and clayey silt with organic and pyroclastic material;

Lithotype R: man-made filling material with a large abundance of brick, tile or ceramic fragments and tuff blocks in a sandy-silty matrix.

In the above classification, lithotypes R and A are historical alluvia, while the remaining ones represent the main alluvial fill.

The study was focused on level D, made up of silty sands and sandy

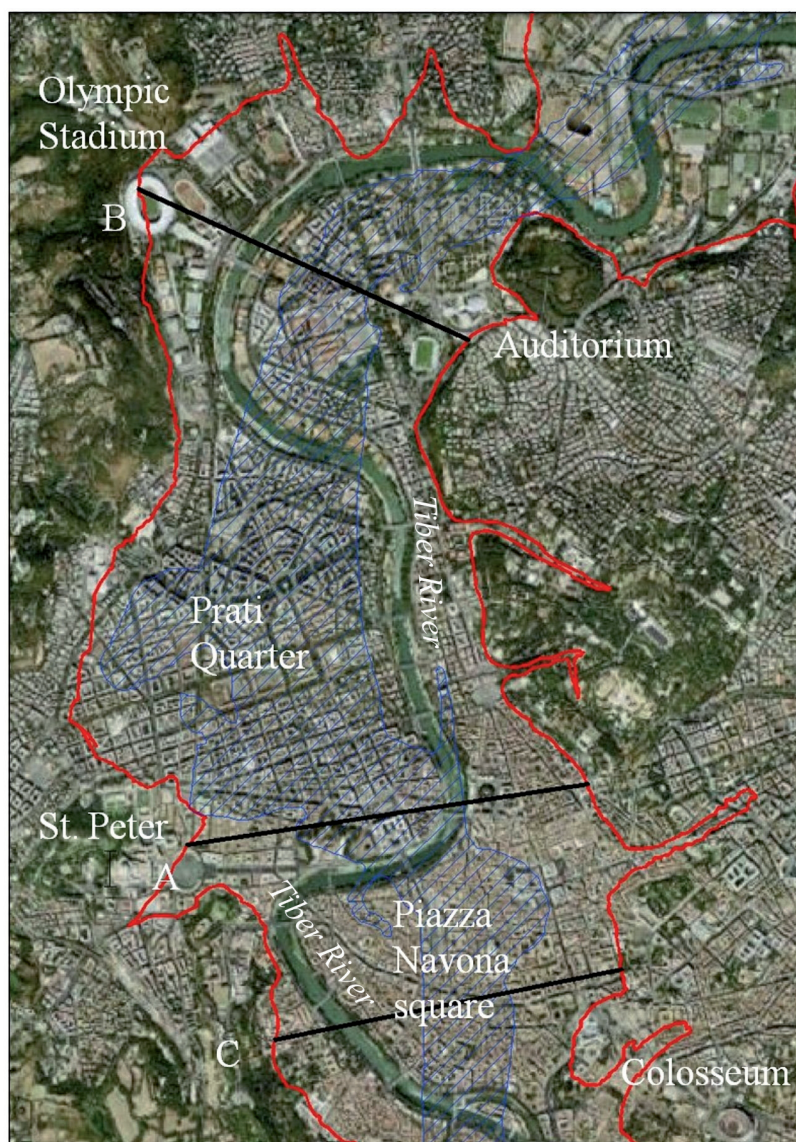
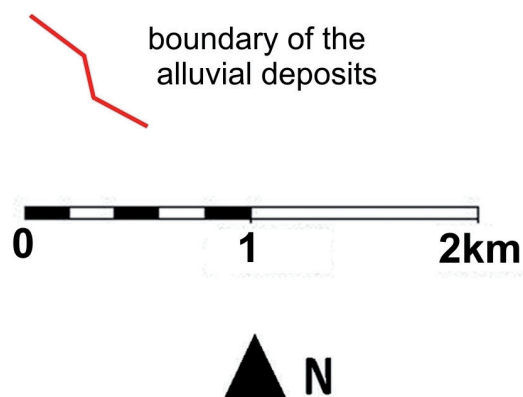
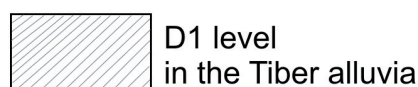


Fig. 1 - Immagine satellitare (Google Earth) del centro storico di Roma con la delimitazione delle alluvioni del Fiume Tevere e del settore in cui sono presenti i depositi sabbioso-limosi ascrivibili al livello D1. Le lettere identificano le tracce delle sezioni di Fig. 2
 - Satellite (Google Earth) image of Rome's historical centre, highlighting the Tiber alluvia and the sandy-silty deposits of level D1. Letters identify the tracks of the sections of Fig. 2

A1: limo sabbioso;

A2: argille e limo argilloso con materiale organico e piroclastico.

Litotipo R: riporti di natura antropica caratterizzato da una grande abbondanza di frammenti di laterizio o ceramica e blocchi di tufo in una matrice sabbioso-siltosa.

In tale schematizzazione i litotipi R ed A costituiscono le alluvioni storiche, i rimanenti litotipi costituiscono il corpo alluvionale principale.

Questo studio analizza in particolare il livello D, costituito da sabbie limose e limi sabbiosi, con una componente fine ad alta plasticità e bassi valori di attività mineralogica ($IA=0.59$). La composizione mi-

silts, fine-grained and highly plastic and with low mineralogical activity ($IA=0.59$). Their mineralogical composition has dominantly non-clayey components, with calcite/quartz+feldspar ratios of 1 to 3 (Bozzano *et alii*, 2000); organic matter is generally below 1%. This deposit supposedly originates from a meandering stream with wide swamps.

As the deposit proved to have an extremely heterogeneous grain size, it was divided into two subtypes, D1 and D2 (Fig. 4). In particular, based on borehole stratigraphies reported in previous papers (Bozzano *et alii*, 2000; 2008; Giacomini, 2011), code D1 was assigned to deposits with a sandy-silty grain size, i.e. the Tiber sedi-

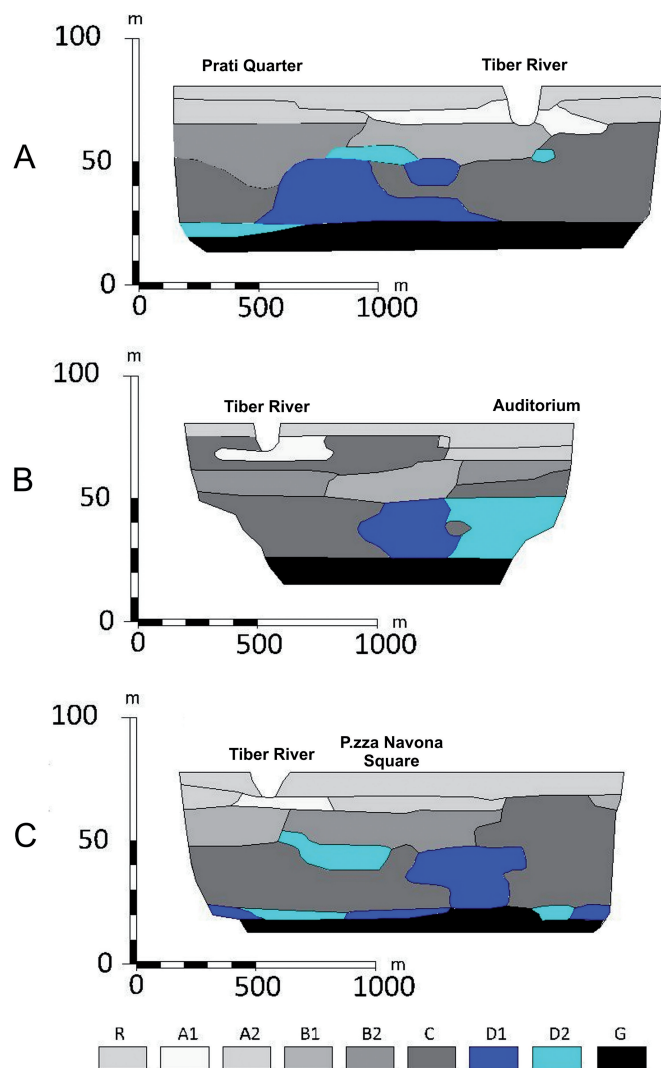


Fig. 2 - Sezioni geologico-tecniche attraverso il corpo alluvionale del Fiume Tevere presso il centro storico di Roma (vedi Fig.1 per le tracce)
- Engineering-geological sections across the Tiber alluvial fill in the Rome's historical center (see Fig.1 for the tracks)

neralogica consiste principalmente in minerali non argillosi, con rapporti di calcite/quarzo+feldspato variabile tra 1 a 3 (BOZZANO *et alii*, 2000); in generale, tuttavia, il contenuto organico è inferiore all'1%. Tale deposito è attribuibile ad un corso d'acqua di tipo meandriforme con vaste aree paludose.

Il deposito mostra una spiccata eterogeneità granulometrica, per questo motivo in questo lavoro si propone la suddivisione in due sottotipi, denominati D1 e D2 (Fig. 4). In particolare, a partire dalle analisi delle stratigrafie di sondaggio già analizzate in lavori precedenti (BOZZANO *et alii*, 2000; 2008; GIACOMI, 2011) è stata assegnata la denominazione D1 ai depositi granulometricamente classificabili come sabbioso-limosi, che rappresentano la sedimentazione del Fiume

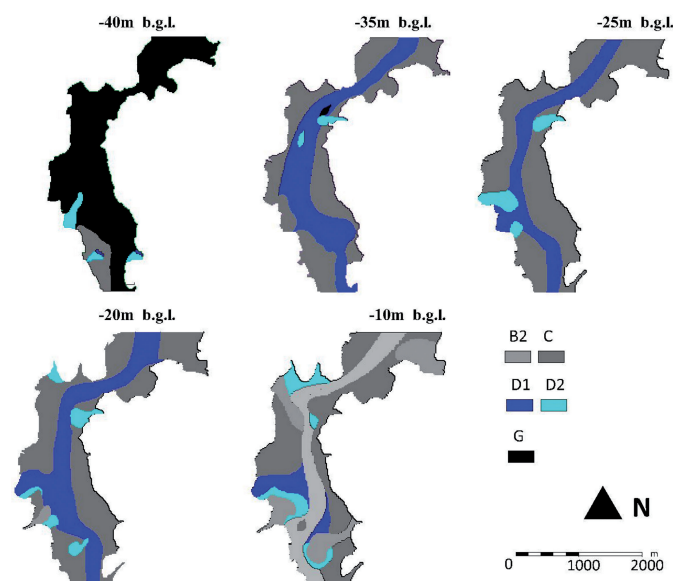


Fig. 3 - Zonazione delle unità litotecniche dei depositi alluvionali del Fiume Tevere in corrispondenza del centro storico di Roma a diverse profondità dal piano campagna (modificata da BOZZANO *et alii*, 2008)
- Zoning of lithotechnical units in the Tiber alluvia of Rome's historical center at different depths from ground level (modified from BOZZANO *et alii*, 2008)

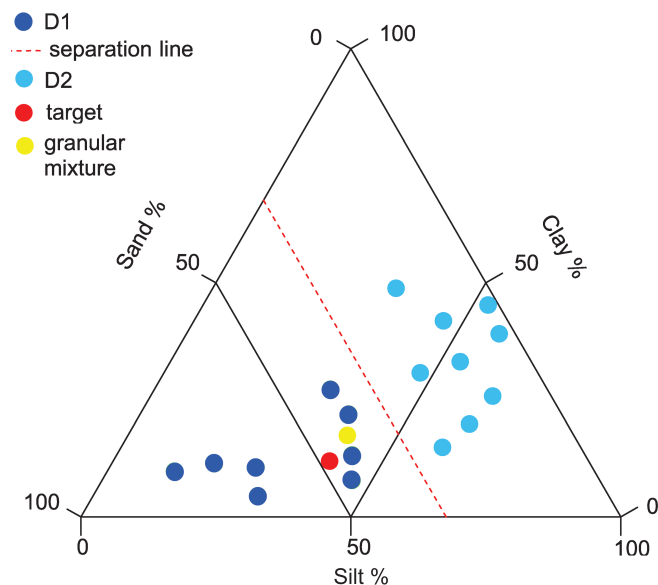


Fig. 4 - Diagramma triangolare che illustra la differenziazione granulometrica proposta in questo lavoro del litotipo D nei due sottogruppi D1 e D2. In rosso è riportata la composizione granulometrica del *target* utilizzato quale riferimento per la ricostituzione del misto granulare ed in giallo l'effettiva composizione ottenuta per il misto granulare
- Triangular diagram showing the observed grain size difference of lithotype D in the two subgroups D1 and D2. Red colour: grain size composition of the target curve used as a benchmark for reconstituting the granular mix; yellow colour: actual composition obtained for the granular mix

me Tevere (Figg. 1, 3), e la denominazione D2 ai depositi di granulometria prevalentemente limoso-argillosa, ascrivibili agli affluenti del corso d'acqua principale.

CAMPIONAMENTO E RICOSTITUZIONE DEL MISTO GRANULARE RAPPRESENTATIVO

Al fine di analizzare il comportamento meccanico del litotipo D1 in condizioni non drenate, e date le problematiche relative ad un suo campionamento a basso grado di disturbo mediante tecniche di sondaggio geognostico, si è optato per la ricostituzione di un misto granulare equivalente. A partire da 8 curve granulometriche relative a campioni di qualità Q2 prelevati nel livello D1 disponibili da rapporti tecnici di indagini geognostiche pregresse, è stata definita una curva granulometrica di riferimento (*target*) per la ricostruzione del misto granulare. La curva di *target* è stata costruita considerando 16 valori di diametro equivalente delle particelle e calcolando la media aritmetica dei passanti delle 8 curve dei campioni originali (Fig. 5).

Il materiale per la ricostituzione del misto granulare è stato campionato presso la General Cave s.r.l. (Fig. 6), ed è ascrivibile all'Unità di Ponte Galeria (CONATO *et alii*, 1980; BELLOTTI *et alii*, 1994; MARRA & ROSA, 1995; MILLI, 1997; MARRA *et alii*, 1998). Questa unità include i depositi alluvionali pleistocenici del paleo-Tevere, sedimenti questi che, in linea generale, presentano analogie con quelli analizzati in questo lavoro sia relative all'ambiente di deposizione sia all'area di alimentazione del corso d'acqua responsabile della loro deposizione. Tali analogie supportano l'ipotesi di una similitudine compositiva

ments (Figs. 1, 3), and code D2 was attributed to deposits with a prevalently silty-clayey grain size, deriving from the tributaries of the main stream.

SAMPLING AND RECONSTITUTION OF THE REPRESENTATIVE GRANULAR MIX

To analyse the undrained mechanical behaviour of lithotype D1, use was made of granular mix; this choice was made owing to the difficulty of obtaining fairly undisturbed samples through geognostic boreholes. A benchmark grain size curve (target curve) for reconstruction of the granular mix was obtained from 8 grain size curves of samples (quality Q2) collected from level D1. The latter curves were taken from technical reports of prior geognostic studies. The target curve was built by considering 16 values of equivalent diameter of the particles and by calculating the arithmetic average of the grain size classes of the 8 curves of the original samples (Fig. 5).

The material for reconstituting the granular mix was taken from the site of General Cave s.r.l. (Fig. 6). It may be ascribed to the Unità di Ponte Galeria unit (CONATO *et alii*, 1980; BELLOTTI *et alii*, 1994; MARRA & ROSA, 1995; MILLI, 1997; MARRA *et alii*, 1998). This unit accommodates the Pleistocene sediments of the palaeo-Tiber, which are similar to those analysed in this study in terms of both depositional environment and recharge area of the stream inducing their deposition. These similarities validate the assumption that the composition of the above sediments is similar to the one of the deposits investigated in this study. Consequently, considering also the results of the compari-

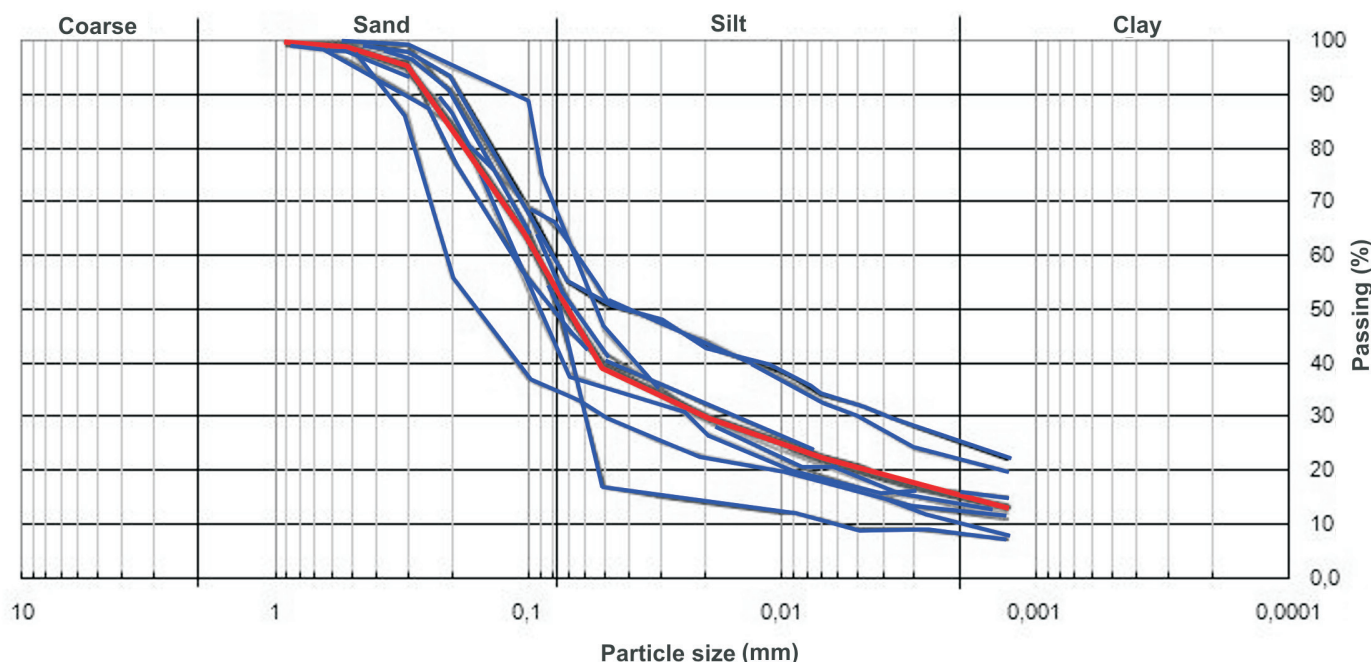


Fig. 5 - Curva granulometrica del misto ricostituito (in rosso) e curve granulometriche (in blu) dei campioni del livello D1 recuperate dalle documentazioni tecniche disponibili
- Grain size curve of the reconstituted mix (red) and grain size curves (blue) of samples of level D1 retrieved from available technical reports

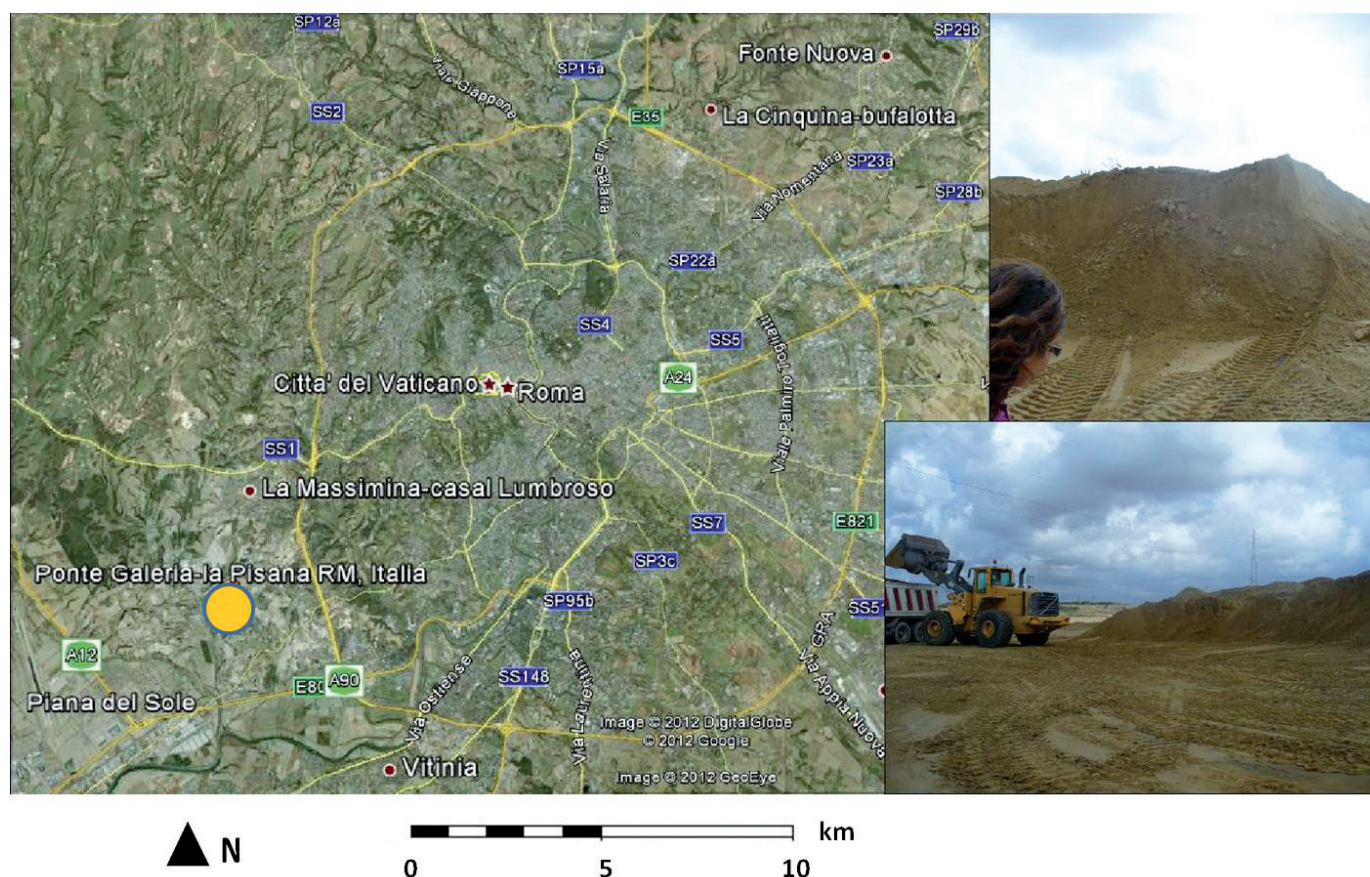


Fig. 6 - Localizzazione dell'area di campionamento dagli affioramenti di sabbie di Ponte Galeria presso le cave della General Cave s.r.l. (cerchio giallo) e riprese fotografiche del sito di campionamento
 - Location (yellow circle) and photos of the sampling site in the Ponte Galeria sand outcrops – quarries owned by General Cave s.r.l.

di tali materiali con quelli oggetto di questo studio tali da giustificarne, a fronte anche della comparazione di alcuni parametri fisici esposta nel successivo paragrafo, l'utilizzo ai fini dell'esecuzione delle prove ad hoc esposte in questo lavoro.

In totale, sono stati prelevati 3 campioni di cava, rappresentativi di differenti classi granulometriche: campione 1, ghiaia e sabbia grossolana; campione 2, sabbia fine; campione 3, limo ed argilla. Il campione 1 è stato prelevato direttamente dalle pareti della cava, i restanti due campioni provengono, invece, da accumuli di materiale precedentemente vagliato per l'estrazione della frazione sabbiosa utilizzata come inerte. La porzione ghiaioso-sabbiosa (campioni 1 e 2) è stata lavata, vagliata, separata per fusi granulometrici, trattata con una soluzione di perossido d'idrogeno (a 25 vol.) per eliminare l'eventuale componente organica ed asciugata in forno. Della porzione limoso-argillosa (campione 3) è stato utilizzato il passante al setaccio ASTM No. 200 (ASTM D1140-00(2006) - Method A) data la buona corrispondenza con la parte terminale della curva di target (Fig. 5). A partire dal materiale così preparato è stato ricostituito il misto granulare proporzionando le percentuali in peso delle diverse classi granulometriche in accordo con la curva di *target*.

son of some physical parameters described in the following paragraph, their use for the tests planned in this study was justified.

Three quarry samples, representing different grain size classes, were collected: sample 1, coarse gravel and sand; sample 2, fine sand; sample 3, silt and clay. Sample 1 was taken directly from the quarry walls, whereas the two other samples came from material previously sieved for extraction of the sandy fraction to be used as an aggregate. The gravelly-sandy portion (samples 1 and 2) was rinsed, separated on the basis of its grain size distribution and treated with a hydrogen peroxide solution (25 vol.) to remove any organic matter and oven dried. The material selected from the silty-clayey portion (sample 3) was the one passing through sieve ASTM No. 200 (ASTM D1140-00(2006) - Method A), given its good fit with the terminal part of the target curve (Fig. 5). The granular mix was reconstituted from the material so prepared, by proportioning the percentages in weight of the different grain size classes in accordance with the target curve.

CARATTERIZZAZIONE FISICO-MECCANICA IN CONDIZIONI STATICHE NON DRENATE DEL MISTO GRANULARE RAPPRESENTATIVO

La rappresentatività del misto granulare ricostituito è stata verificata mediante analisi comparative rispetto alle proprietà riferibili al materiale naturale sulla base della documentazione tecnica disponibile¹.

Il misto granulare è stato ricostituito presso il Laboratorio di Geologia Applicata del Dipartimento di Scienze della Terra della Sapienza Università di Roma con procedura umida, per garantirne una omogeneizzazione ottimale, proporzionando in peso le diverse classi granulometriche in accordo con la curva di target; a seguire il materiale omogeneizzato è stato disgregato a secco e confezionato per l'utilizzo in laboratorio (Fig. 7).

L'analisi granulometrica effettuata sul misto granulare ottenuto è stata condotta seguendo lo standard ASTM D422-63(2007) ed ha verificato una corrispondenza molto buona con la curva di *target* (Fig. 4).

Inoltre, sulla base del γ_s (ASTM D854-83) e dei limiti di consistenza (ASTM D4318-10), il misto granulare ($w_{LL}=38.3\%$; $w_{LP}=19.0\%$; $IP=19.3\%$) è stato classificato come un'argilla sabbiosa a bassa plasticità (sandy clay, CL), secondo la classificazione USCS (ASTM D2487-10). Il misto granulare ricostituito presenta, pertanto, un termine classificativo sufficientemente rappresentativo dei campioni riferibili al livello D1 delle alluvioni tiberine e si può considerare rappresentativo del prototipo naturale anche in termini di plasticità.

La sperimentazione di laboratorio ha, inoltre, riguardato lo studio dello stato di addensamento del misto ricostituito; a tal fine, partendo dai dati disponibili sul prototipo naturale di $e=0.7$, $\gamma_n=19.20$ kN/m³ (BOZZANO *et alii*, 2000), è stata utilizzata la compattazione standard (data dalla ASTM D698-07e1) per: i) individuare il livello di optimum Proctor del misto granulare e ii) ricavare il contenuto di acqua necessario ad ottenere un γ_d corrispondente a quello del materiale naturale in sito. L'optimum del misto granulare (Fig. 8) è stato raggiunto per una saturazione pari al 90% e per un valore di w pari a 17.6%, cui corrisponde un addensamento massimo (γ_{dmax}) pari a 16.70 kN/m³.

Il valore di γ_d del materiale naturale in sito è stato determinato a partire dai dati disponibili in letteratura (BOZZANO *et alii*, 2000), dai quali risulta un e_0 mediamente pari a 0.7 ed un peso per unità di volume naturale (γ_n) mediamente pari a 19.20 kN/m³. Si determina, pertanto, un valore di γ_d pari a 15.16 kN/m³. Se, invece, si considera il γ_s determinato in laboratorio, e pari a 26.50 kN/m³ si ottiene, per lo stesso e_0 medio di 0.7, un valore di γ_d pari a 15.59 kN/m³. La media aritmetica tra i due valori così ottenuti ha fornito il valore di γ_d pari a 15.37 kN/m³ qui considerato quale valore di riferimento

PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISATION OF THE REPRESENTATIVE GRANULAR MIX UNDER STATIC UNDRAINED CONDITIONS

The representativeness of the reconstituted granular mix was assessed by comparing its properties with those of the natural material based on available technical documents¹.

The granular mix was reconstituted at the Laboratorio di Geologia Applicata - Dipartimento di Scienze della Terra, Sapienza University of Rome - via a wet process, in order to optimise its homogeneity, by proportioning the various grain size classes in weight in accordance with the target curve; the material so homogenised was dry shattered, making it ready for laboratory use (Fig. 7).

The grain size analysis of the granular mix was carried out under the ASTM D422-63(2007) standard, yielding a good fit with the target curve (Fig. 4).

Moreover, based on γ_s (ASTM D854-83) and consistency limits (ASTM D4318-10), the granular mix ($w_{LL}=38.3\%$; $w_{LP}=19.0\%$; $IP=19.3\%$) was classified as a poorly plastic sandy clay (sandy clay, CL) under the USCS classification (ASTM D2487-10). Therefore, the

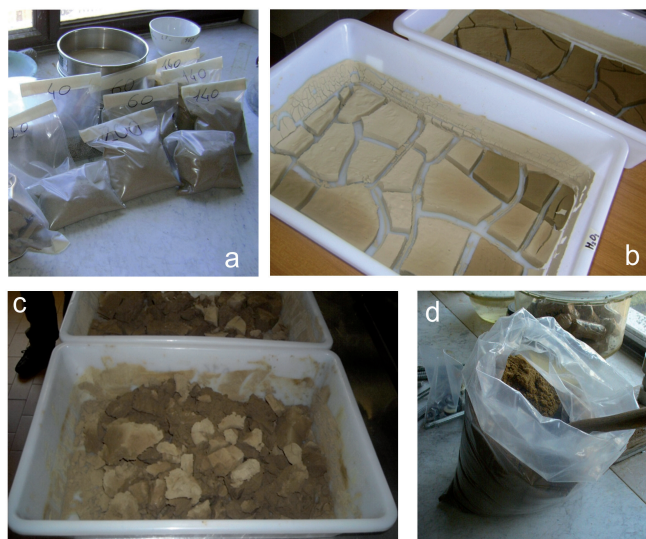


Fig. 7 - Fasi di ricostituzione del misto granulare in laboratorio: a) separazione delle classi granulometriche; b) mescolamento proporzionale delle classi granulometriche secondo la curva di *target* con procedura umida, per garantire una omogeneizzazione ottimale; c) disgregazione a secco del granulare; d) predisposizione delle confezioni di misto granulare per l'utilizzo di laboratorio

- Steps of laboratory reconstitution of the granular mix: a) separation according to its grain size distribution; b) mixing proportional to the grain size classes according to the target curve, with a wet process to ensure optimum homogeneity; c) dry shattering of the granular mix; d) packaging of the granular mix for laboratory use

¹ Dott. Geol. Stefano Tosti, 1995, 2 boreholes near Foro Italico; TECNOCONSOLIDAMENTI s.r.l., geognostic survey 1996-1997, 18 boreholes in the Colosseo - Piazza Venezia - Parlamento - Castel Sant'Angelo - Piazza Risorgimento - Stazione Ottaviano - Piazzale Clodio area; TECNOCONSOLIDAMENTI s.r.l., geognostic survey 1997, 4 boreholes at Piazza San Pantaleo; CS-CANTIERI STRADALI, geognostic survey 2001, 14 boreholes in the Foro Italico - quartiere Flaminio - Piazza Mazzini area; CO.BIT, geognostic survey 2002, 28 boreholes in the Piazza Venezia - Corso Vittorio Emanuele - Castel Sant'Angelo - San Pietro area; TECNOGEO, geognostic survey 2003, 7 boreholes in the Colosseo - via dei Fori Imperiali - Piazza Venezia area; GEOVIT, geognostic survey 2008, 2 boreholes in the Tor di Quinto area

per l'addensamento del misto granulare rappresentativo del deposito sabbioso naturale in sito. In base alla prova di compattazione effettuata, il w necessario ad ottenere un tale addensamento risulta attendibilmente compreso tra il 24.0% ed il 24.5% (Fig. 8).

Si è proceduto, infine, alla caratterizzazione meccanica del misto granulare mediante prove TxUII, con l'obiettivo di ricavare il valore di indice dei vuoti critico e_{cr} e valutare la possibilità di liquefacibilità del terreno sottoposto a carichi in condizioni non drenate. Tali condizioni possono ritenersi rappresentative dell'assetto stratigrafico riferibile al livello D1 all'interno delle alluvioni oloceniche del Fiume Tevere a Roma, poiché esso si trova compreso tra livelli a più marcata composizione limoso-argillosa che, pertanto, ne riducono le possibilità di drenaggio.

Per le prove TxUII (Fig. 9), il misto granulare è stato addensato a 3 diversi valori di indice dei vuoti (rispettivamente 0.51, 0.60 e 0.71); inoltre, per ciascun addensamento le prove TxUII sono state effettuate a 3 livelli di pressione di confinamento (σ_3) entro l'intervallo di valori di sito riferibile ai depositi sabbiosi del livello D1 (rispettivamente 210, 350 e 430 kPa) e corrispondenti a profondità comprese tra i 20 ed i 55 m dal piano campagna. I valori di resistenza non drenata (c_u) sono risultati compresi tra 20 e 60 kPa per indici dei vuoti variabili da 0.70 a 0.50; inoltre, considerando l'intero intervallo di variazione dei valori di sovrappressioni dell'acqua ottenuti a rottura dalle prove TxUII (Fig. 10), è stato possibile individuare un campo di variabilità dell'indice dei vuoti critico (e_{cr}) compreso tra 0.50 e 0.61 nell'intervallo di σ_3 considerato. Poiché tale campo corrisponde solo in parte ai valori dell'indice dei vuoti in sito ($0.60 < e_0 < 0.80$) riportati in BOZZANO *et alii* (2000), si registra un comportamento contraente in condizioni di sollecitazione non drenata da parte dei depositi sabbiosi ascrivibili al livello D1 in corrispondenza del centro storico di Roma; tuttavia, date le profondità alle quali tali depositi si ritrovano (comunque superiori ai 20 m) si può ritenere bassa la suscettibilità alla liquefazione degli stessi (KRAMER & SEED, 1988; KRAMER, 1996; MAYFIELD *et alii*, 2010). Inoltre, nella stima delle pressioni agenti in sito sono stati trascurati i carichi urbani, il cui effetto è quello di sottoporre i depositi in oggetto ad una pressione di confinamento ancora maggiore riducendo ulteriormente la loro liquefacibilità.

PROVE DINAMICHE IN COLONNA RISONANTE DEL MISTO GRANULARE RAPPRESENTATIVO

Il misto granulare rappresentativo dei depositi sabbiosi del livello D1 delle alluvioni del Fiume Tevere a Roma è stato sottoposto a prove dinamiche in Colonna Risonante (RC-test) presso il Laboratoire de Mécanique des Sols - Département Géotechnique, Eau et Risque (IFSTTAR-Paris) secondo lo standard ASTM D4015-07 (Fig. 11).

In particolare, la Colonna Risonante presente nel laboratorio di Parigi è un modello della GDS Instruments progettato per minimizzare l'effetto *damping* (smorzamento) dovuto all'apparecchiatura stessa. Il *damping* (D) è stato misurato interrompendo l'eccitazione

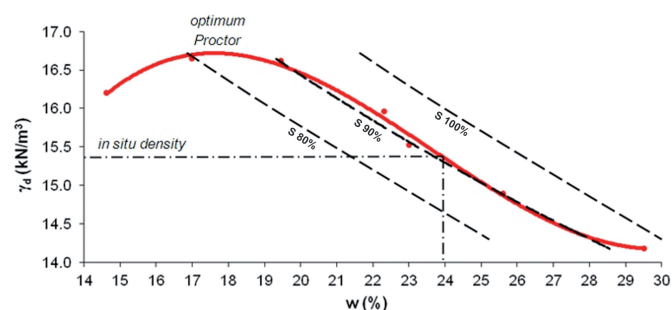


Fig. 8 - Risultati della prova di compattazione effettuata sul misto granulare ricostituito. Per un valore di contenuto di acqua w pari a circa il 24% si ottiene un grado di addensamento (γ_d) pari a quello in sito sul tratto umido della curva

- Results of compaction tests on the reconstituted granular mix. For a water content w of about 24%, the density (γ_d) is equal to the one obtained on site on the wet section of the curve

granular mix adequately represented the samples from level D1 of the Tiber alluvia and the natural prototype also in terms of plasticity.

Laboratory work also involved the density of the reconstituted mix. Based on the natural prototype parameters ($e=0.7$, $\gamma_n=19.20$ kN/m³, BOZZANO *et alii*, 2000), the ASTM D698-07e1 compaction method was used to: i) identify the Proctor optimum of the granular mix, and ii) determine the water content needed to obtain a γ_d value corresponding to the one of the in-situ natural material. The optimum of the granular mix (Fig. 8) was achieved at a saturation of 90% and a w value of 17.6%, corresponding to a maximum density ($\gamma_{d,max}$) of 16.70 kN/m³.

The γ_d of the in-situ natural material was retrieved from the relevant literature (BOZZANO *et alii*, 2000): average e_0 of 0.7 and average weight per unit of natural volume (γ_n) of 19.20 kN/m³. The resulting γ_d value was 15.16 kN/m³. Using the laboratory-determined γ_s value (26.50 kN/m³) for the same average e_0 of 0.7 gave a γ_d value of 15.59 kN/m³. The arithmetic average between the two values gave a γ_d of 15.37 kN/m³, which was used as a benchmark value for the density of the granular mix representing the in-situ natural sandy deposit. The compaction test showed that the w value needed to reach the above density was reliably comprised between 24.0% and 24.5% (Fig. 8).

Finally, the granular mix was mechanically characterised via TxUII tests, so as to derive the critical void ratio e_{cr} and assess the soil liquefaction potential under undrained loading conditions. The latter conditions may be regarded as representative of the stratigraphic setting of level D1 inside the Holocene alluvia of the Tiber river in Rome. Indeed, this level is interbedded between more markedly silty-clayey levels, which reduce its drainage capability.

For the TxUII tests (Fig. 9), the granular mix was densified to 3 different void ratio values (0.51, 0.60 and 0.71). Additionally, for each density, the TxUII tests were conducted at 3 confining pressures (σ_3) within the range of values of the in-situ sandy deposits of level D1 (210, 350 and 430 kPa), at depths of 20 to 55 m from ground level. Undrained shear strength (c_u) was 20 to 60 kPa for void ratio values of 0.70 to 0.50. Furthermore, taking into account

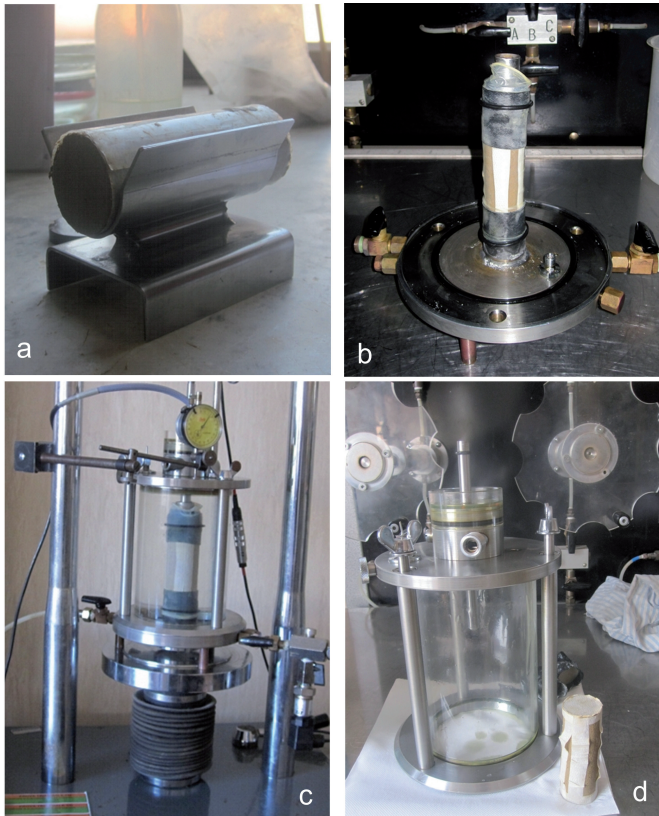


Fig. 9 - Fasi di esecuzione delle prove TxUII presso il laboratorio di Geologia Applicata della Sapienza Università di Roma: a). particolare di un provino confezionato con il misto granulare addensato in cella Proctor da 6" di diametro con l'ausilio di supporti formatori; b) allestimento dei provini in cella triassiale; c) esecuzione delle prove TxUII; d) particolare del recupero di un provino sottoposto a rottura non drenata TxUII

- Steps of the TxUII tests at the Laboratorio di Geologia Applicata - Dipartimento di Scienze della Terra, Sapienza University of Rome - : a) detail of a specimen prepared with the densified granular mix in a 6" Proctor cell by using shaping lathe; b) preparation of specimens in a triaxial cell; c) performance of TxUII tests; d) detail of recovery of a specimen after undrained rupture TxUII

e analizzando il decadimento nel tempo delle ampiezze massime legate alle oscillazioni libere del provino (*amplitude decay method*) (SIMONI & MADIAI, 2007).

In particolare, le prove di RC-test sono state finalizzate a:

- determinare il modulo tangenziale G_0 e il rapporto di *damping* D_0 a piccoli livelli di deformazione ($\gamma < 10^{-6}$);
- ricavare la legge di decadimento del modulo di taglio con l'ampiezza della deformazione di taglio $G=G(\gamma)$;
- determinare l'andamento del rapporto di *damping* con l'ampiezza della deformazione di taglio $D=D(\gamma)$;
- valutare le soglie di deformazione di taglio lineare (γ_l) e volumetrica (γ_v), attraverso la misura delle pressioni interstiziali.

Per ottenere i provini di misto granulare con caratteristiche di

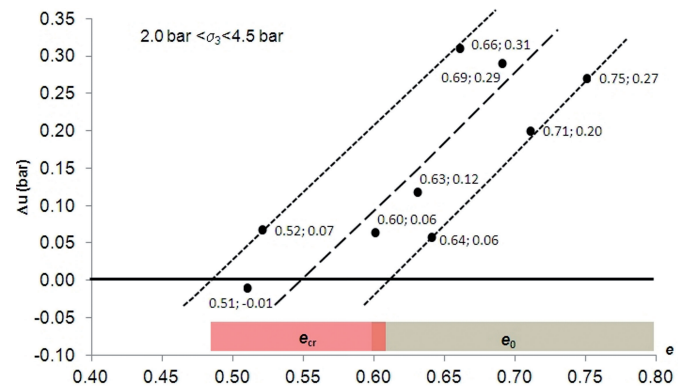


Fig. 10 - Valori sperimentali delle sovrappressioni dell'acqua (Δu) in funzione dell'indice dei vuoti (e) del misto granulare ottenuti dalle prove TxUII per la determinazione dell'indice dei vuoti critico (e_{cr}). E' anche evidenziato il campo di variazione dei valori di indice dei vuoti in sito (e_0) riportato da BOZZANO *et alii* (2000) per i depositi del livello D. Il trasduttore di pressione relativo impiegato nelle sperimentazioni ha un campo di misura di 10 bar con una risoluzione di $\pm 0.1\%$ f.s.

- Experimental values of water overpressures (Δu) vs. void ratio (e) of the granular mix obtained from the TxUII tests to determine the critical void ratio (e_{cr}). Note the range of values for the in-situ void ratio (e_0) reported by BOZZANO *et alii* (2000) for level D deposits. The relative pressure transducer used in the tests has a measuring range of 10 bar with a resolution of $\pm 0.1\%$ full scale

the full variability of water overpressures to rupture obtained in the TxUII (Fig. 10) tests, a critical void ratio (e_{cr}) range of 0.50 to 0.61 was identified in the σ_3 interval considered. As this range matched only in part the in-situ void ratio ($0.60 < e_0 < 0.80$) reported in Bozzano *et alii* (2000), the sandy deposits from level D1 of Rome's historical centre had a contractant behaviour under undrained stress. Nonetheless, given the depths of the deposits (exceeding 20 m), their liquefaction susceptibility was considered to be low (KRAMER & SEED, 1988; KRAMER, 1996; MAYFIELD *et alii*, 2010). Moreover, in estimating in-situ pressures, urban stresses (increasing the confining pressures of the investigated deposits and thus further reducing their liquefaction potential) were disregarded.

DYNAMIC RESONANT-COLUMN TESTS ON THE REPRESENTATIVE GRANULAR MIX

The granular mix representing the sandy deposits of level D1 of Tiber alluvia in Rome underwent dynamic resonant-column tests (RC-tests) under the ASTM D4015-07 standard at the Laboratoire de Mécanique des Sols - Département Géotechnique, Eau et Risque (IFSTTAR-Paris) (Fig. 11).

The resonant column used in Paris was specially designed by GDS Instruments to minimise the damping generated by the same column. The damping D was measured by interrupting the excitation and by analysing the decay of the maximum amplitudes associated with the free oscillations of the specimen vs. time (*amplitude decay method*) (SIMONI & MADIAI, 2007).

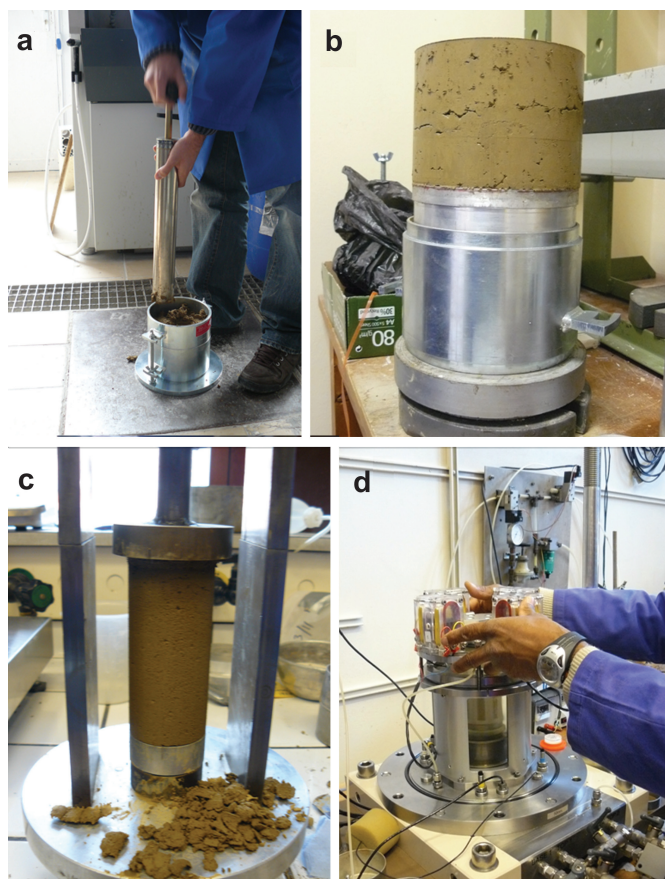


Fig. 11 - Fasi di preparazione dei provini per le prove di colonna risonante presso il laboratorio dell'IFSTTAR di Parigi. a) compattazione in cella Proctor da 6" di diametro per ottenere l'addensamento rappresentativo del deposito in sito (Fig. 7); b) estrusione dalla cella Proctor del misto granulare addensato; c) realizzazione del provino cilindrico per la RC-test sul tornio formatore; d) allestimento sperimentale della cella per la RC-test

- Steps of preparation of specimens for the resonant-column tests at the Paris-IFSTTAR laboratory: a) compaction in a 6" diameter Proctor cell to obtain a density representative of the in-situ deposit (Fig. 7); b) extrusion of the densified granular mix from the Proctor cell; c) preparation of the cylindrical specimen for the RC-test on the shaping lathe; d) experimental cell array for the RC-tests

addensamento rappresentativo del materiale naturale in sito, sono state riprodotte in laboratorio le condizioni di addensamento Proctor con w compreso tra 24.0% e 24.5%. Dal materiale così addensato sono stati ottenuti provini di diametro 50 mm e altezza 100 mm, che sono stati consolidati a due valori di pressione, rispettivamente pari a 216 e 329 kPa. In Fig. 12 sono riportate sia le curve di decadimento normalizzate, relative alla rigidità dinamica (G/G_0) ed al damping (D/D_0), che le curve di rigidità e damping in valore assoluto. Inoltre, tenendo conto dell'incremento delle pressioni interstiziali (Δu) in fase di prova, è stata stimata una soglia di deformazione

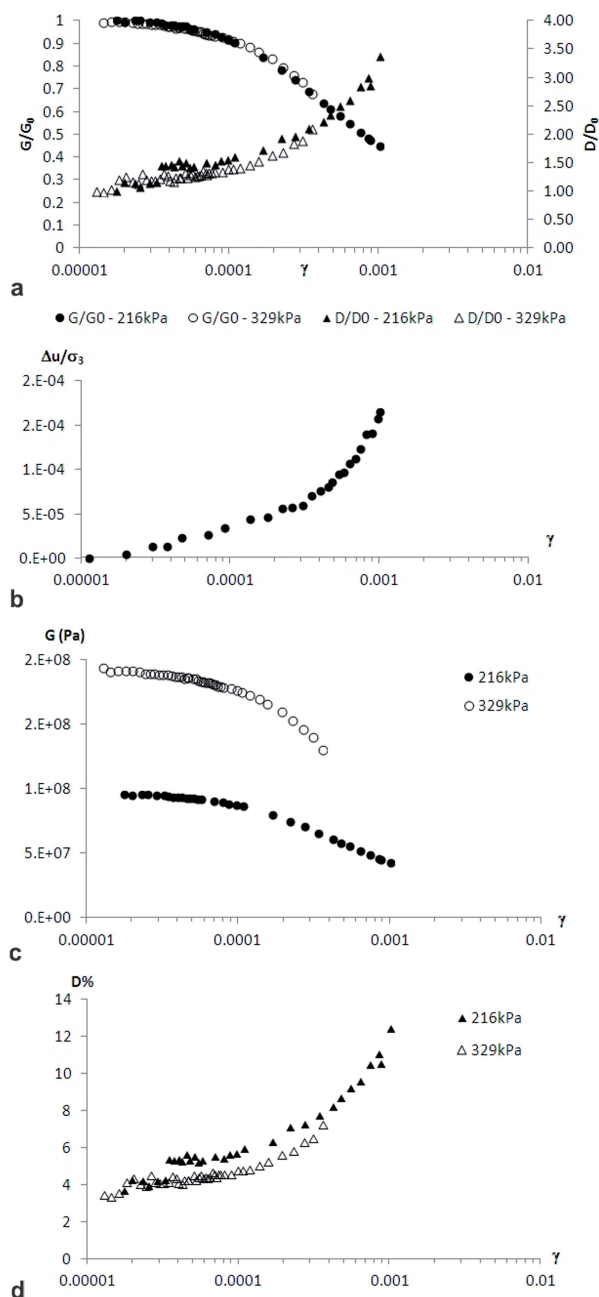


Fig. 12 - Risultati delle prove dinamiche alla colonna risonante ottenuti presso il laboratorio dell'IFSTTAR di Parigi sul misto granulare rappresentativo del livello D1 delle alluvioni del Fiume Tevere a Roma: a) curve normalizzate di decadimento del modulo di taglio e del damping; b) curva di variazione della pressione interstiziale (Δu) con la deformazione; c) curve di decadimento del modulo di taglio; d) curve di decadimento del damping

- Results of dynamic resonant-column tests on the granular mix representing level D1 of the Tiber alluvia in Rome, conducted at the Paris-IFSTTAR laboratory: a) normalised shear modulus and damping decay curves; pore pressure (Δu) curve vs. deformation; c) shear modulus decay curves; d) damping decay curves

lineare (γ_l) pari a 0.00005 ed una soglia di deformazione volumica (γ_v) pari a 0.0003 (Fig. 12).

Le curve ottenute attraverso la sperimentazione in laboratorio sono state confrontate con le curve di decadimento di SEED & IDRISS (1970), SUN *et alii* (1988), ZHANG *et alii* (2005), VUCETIC & DOBRY (1991) (Fig. 13); da tale confronto emerge una ottima attendibilità dei risultati ottenuti.

La curva di decadimento del misto granulare è stata, inoltre, confrontata con quella delle sabbie di Fontainebleau (DELFOSE-RIBAY *et alii*, 2004) che comunemente vengono utilizzate per la realizzazione dei depositi granulari sabbiosi nelle sperimentazioni analogiche alla centrifuga geotecnica del laboratorio IFSTTAR di Nantes (Fig. 13); il confronto rivela un'ottima corrispondenza tra la curva di decadimento normalizzata del misto granulare rappresentativo del livello D1 e quella delle sabbie di Fontainebleau. In base a ciò, il loro utilizzo nell'ambito della sperimentazione analogica

- In particular, the RC-tests were expected to give:
- the shear modulus G_0 and the damping ratio D_0 at low levels of deformation ($\gamma < 10^{-6}$);
 - the law of the shear modulus decay with the shear deformation amplitude $G=G(\gamma)$;
 - the pattern of the damping ratio with the shear deformation amplitude $D=D(\gamma)$;
 - the linear (γ_l) and volume (γ_v) deformation thresholds by measuring pore pressures.

To obtain granular mix specimens with density values representing the in-situ natural material, Proctor density conditions with w of 24.0% to 24.5% were lab simulated. From the densified material, specimens with a diameter of 50 mm and a height of 100 mm were obtained and consolidated at two pressure values, 216 and 329 kPa. Fig. 12 displays both normalised and absolute dynamic stiffness (G/G_0) and damping (D/D_0) decay curves. Moreover, considering the increase

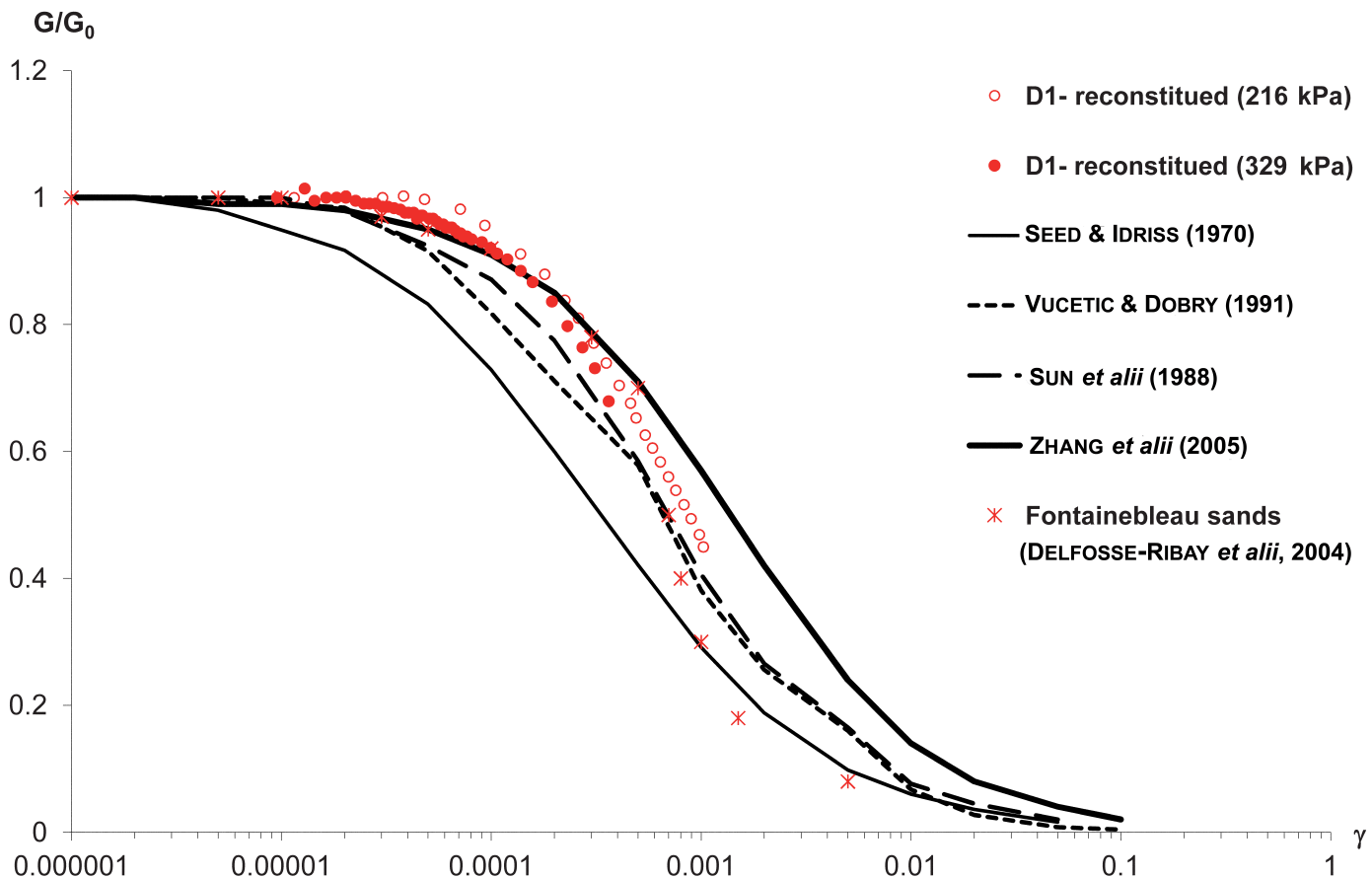


Fig. 13 - Comparazione della curva di decadimento del modulo di taglio ottenuta per il misto granulare rappresentativo del livello D1 delle alluvioni tiberine a Roma con curve di letteratura riferibili a terreni sabbioso-limosi e con la curva riferita alle sabbie di Fontainebleau, comunemente utilizzate per la realizzazione dei depositi granulari sabbiosi nelle sperimentazioni analogiche alla centrifuga geotecnica del laboratorio IFSTTAR di Nantes

- Shear modulus decay curve of the granular mix representing level D of the Tiber alluvia in Rome vs. literature curves of sandy-silty soils; the curve refers to the Fontainebleau sands, commonly used to obtain sandy granular deposits for analogical modelling based on the geotechnical centrifuge at the Nantes-IFSTTAR laboratory

alla centrifuga geotecnica può ritenersi rappresentativa del prototipo naturale considerato, ovvero delle sabbie limose presenti nelle alluvioni del Fiume Tevere nel centro storico di Roma.

CONCLUSIONI

La sperimentazione di laboratorio condotta sui misti granulari rappresentativi dei livelli sabbioso-limosi presenti nel corpo alluvionale del fiume Tevere a Roma, ha reso possibile la loro caratterizzazione in termini di proprietà meccaniche non drenate ai fini della valutazione di possibili effetti di deformazioni sismoindotte permanenti e di liquefazione. Nonostante la posizione stratigrafica, che vede tali depositi presenti anche nelle prime decine di metri di suolo e in diversi casi contenuti tra livelli limoso-argillosi a bassa permeabilità che limitano il drenaggio, i valori dell'indice dei vuoti critico qui determinati portano a ritenere improbabili fenomeni di liquefazione sismoindotta.

Nell'ambito del progetto SERIES-ENINALS, tuttora in corso e che vede la collaborazione del CERi e dell'IFSTTAR di Nantes-Parigi, sono previste analisi mediante modelli analogici alla centrifuga geotecnica e mediante modelli numerici, volte alla valutazione degli effetti sismoindotti in colonne multistrato rappresentative del sottosuolo del centro storico di Roma, sotto l'azione del massimo scuotimento sismico atteso. In tale contesto, la sperimentazione qui condotta, integra i dati sperimentali volti alla caratterizzazione dinamica delle diverse unità litotecniche individuate all'interno dei depositi alluvionali del Fiume Tevere a Roma che, fino ad oggi, è stata ottenuta a partire da campioni di sondaggio a basso grado di disturbo, prelevati dai soli livelli alluvionali a maggiore plasticità, ed in particolare dai livelli A e C del corpo alluvionale tiberino in valle principale (BOZZANO *et alii*, 2008) e dai livelli di argille inorganiche ad alta plasticità e di torbe nei depositi alluvionali della Valle di Grottaperfetta, presso il quartiere di Giustiniano Imperatore (CASERTA *et alii*, 2012). Le caratteristiche dinamiche qui fornite sono, pertanto, le prime ad essere specificatamente rivolte ai termini più sabbiosi del corpo alluvionale tiberino; in tal senso, esse potranno fornire un fondamentale contributo alla comparazione, attraverso simulazioni numeriche in reologia non lineare, dei modelli analogici di laboratorio realizzati alla centrifuga geotecnica dell'IFSTTAR di Nantes affinché tali sperimentazioni possano essere riportate al sito di studio e, una volta validati i loro risultati, questi possano essere generalizzati all'intero settore del centro storico di Roma.

in pore pressures (Δu) upon testing, the linear deformation threshold (γ_l) was set to 0.00005, while the volume deformation threshold (γ_v) was set to 0.0003 (Fig. 12).

The laboratory curves were compared with the decay curves by SEED & IDRISS (1970), SUN *et alii* (1988), ZHANG *et alii* (2005), VUCETIC & DOBRY (1991) (Fig. 13), showing an very high reliability of the results.

Additionally, the granular mix decay curve was compared with the one of the Fontainebleau sands (DELFOSSÉ-RIBAY *et alii*, 2004), which is commonly used for reconstituting granular sandy deposits undergoing analogical modelling with the geotechnical centrifuge at the Nantes-IFSTTAR laboratory (Fig. 13). The comparison revealed an optimum fit of the normalised decay curve for the granular mix representing level D1 with the one of the Fontainebleau sands. Consequently, the sands used in analogical modelling via the geotechnical centrifuge were considered to be representative of the investigated natural prototype, i.e. the silty sands contained in Rome's Tiber river alluvia.

CONCLUSIONS

Granular mixes representing the sandy-silty levels of Tiber river in Rome were laboratory tested. The testing made it possible to characterise them in terms of undrained mechanical properties, with a view to assessing possible seismically-induced effects of permanent deformation and liquefaction. In spite of their stratigraphic position (these deposits occur even in the upper tens of metres of soil and, in many instances, they are interposed between poorly permeable silty-clayey levels limiting drainage), their critical void ratio - determined in this study - suggests that seismically-induced liquefaction is unlikely.

The ongoing SERIES-ENINALS project of cooperation between CERi and IFSTTAR of Nantes-Paris involves studies of analogical modelling via the geotechnical centrifuge, as well as of numerical modelling, aimed at assessing seismically-induced effects in multi-layered columns representing the subsoil of historical centre of Rome under the worst expected seismic shaking. Consequently, the experimental work reported in this study integrates the data obtained from dynamic characterisation of the lithotechnical units identified inside Tiber river alluvia in Rome. This characterisation has so far been carried out on fairly undisturbed samples from holes drilled in the more plastic alluvial levels and, namely, levels A and C of the alluvial fill in the main Tiber river valley (BOZZANO *et alii*, 2008) and in levels of highly plastic inorganic clays and peat in the alluvia of the Valle di Grottaperfetta valley, in the Giustiniano Imperatore district (CASERTA *et alii*, 2012). Therefore, the dynamic characteristics described here are the first to be targeted at the more sandy terms of the Tiber alluvial fill. Hence, they may provide a key contribution to: i) comparing the analogical models developed with the geotechnical centrifuge at the Nantes-IFSTTAR laboratory - via numerical modelling of non-linear rheology, ii) transferring the results of the above experimental work to the investigated site, and iii) validating and applying results to overall historical centre of Rome.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori intendono ringraziare Maria Rosaria Manuel (Geo - Geotecnica e Geognostica s.r.l. di Arpino, Frosinone) e la General Cave s.r.l. per aver consentito le operazioni di campionamento necessarie a questo studio presso le cave di Ponte Galeria; Roberto Iannucci, Stefano Sterpa e Fabiola Tammaro per il supporto dato con le loro Tesi di Laurea Triennale alla esecuzione delle prove presso il Laboratorio di Geologia Applicata del Dipartimento di Scienze della Terra della Sapienza Università di Roma; Luigi Marino per il supporto ed il contributo tecnico presso il Laboratorio di Geologia Applicata del Dipartimento di Scienze della Terra della Sapienza Università di Roma, Alain Le Kouby e Philippe Reiffsteck per il supporto alle prove condotte presso il Laboratoire de Mécanique des Sols - Département Géotechnique, Eau et Risque (IFSTTAR-Paris).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank: Maria Rosaria Manuel (Geo - Geotecnica e Geognostica s.r.l., Arpino, Frosinone) and General Cave s.r.l. for permitting the collection of samples at the Ponte Galeria quarries; Roberto Iannucci, Stefano Sterpa and Fabiola Tammaro for their contribution (Bachelor's Degree Theses) to the tests conducted at the Applied Geology Laboratory - Dipartimento di Scienze della Terra, Sapienza University of Rome; Luigi Marino for his technical support and contribution at the Laboratorio di Geologia Applicata - Dipartimento di Scienze della Terra, Sapienza University of Rome; Alain Le Kouby and Philippe Reiffsteck for the support to the tests performed at the Laboratoire de Mécanique des Sols - Département Géotechnique, Eau et Risque (IFSTTAR-Paris).

OPERE CITATE / REFERENCES

- AMBROSINI S., CASTENETTO S., CEVOLAN F., DI LORETO E., FUNICIELLO R., LIPERI L. & MOLIN D. (1986) - *Risposta sismica dell'area urbana di Roma in occasione del terremoto del Fucino del 13 Gennaio 1915*. Memorie della Società Geologica Italiana, **35**: 445-452.
- ASTM D854-83 - *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. Volume 04.08.
- ASTM D1140-00(2006) - *Standard Test Methods for Amount of Material in Soils Finer than No. 200 (75- μ m) Sieve*. Volume 04.08.
- ASTM D422-63(2007) - *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. Volume 04.08.
- ASTM D698-07e1 - *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. Volume 04.08.
- ASTM D4015-07 - *Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Resonant-Column Method*. Volume 04.08.
- ASTM D2487-10 - *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Volume 04.08.
- ASTM D4318-10 - *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. Volume 04.08.
- BELLOTTI P., CHIOCCHINI U., CASTORINA F. & TOLOMEO L. (1994) - *Le unità clastiche plio-pleistoceniche tra Monte Mario (città di Roma) e la costa tirrenica presso Focene: alcune osservazioni sulla stratigrafia sequenziale*. Boll. Serv. Geol. It., **113**: 3-24.
- BELLOTTI P., MILLI S., TORTORA P. & VALERI P. (1995) - *Physical stratigraphy and sedimentology of the Late Pleistocene-Holocene Tiber Delta depositional sequence*. Sedimentology, **42**: 617-634.
- BONILLA F., BOZZANO F., GELIS C., GIACOMI A.C., LENTI L., MARTINO S. & SEMBLAT J.F. (2010) - *Multidisciplinary study of seismic amplification in the historical center of Rome, Italy*. Atti del 5th Int. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthq. Engin. and Soil Dynamics, May 24-29 2010, San Diego, California.
- BOZZANO F., ANDREUCCI A., GAETA M., SALUCCI R. & ROSA C. (2000) - *A geological model of the buried Tiber River valley beneath the historical center of Rome*. Bull. Eng. Geol. Env., **59**: 1-21.
- BOZZANO F., CASERTA A., GOVONI A., MARRA F. & MARTINO S. (2008) - *Static and dynamic characterization of alluvial deposits in the Tiber River Valley: new data for assessing potential ground motion in the city of Rome*. Journal of Geophysical Research, **113**: 1-21.
- BOZZANO F., FUNICIELLO R., GAETA M., MARRA F., ROSA C. & VALENTINI G. (1997) - *Recent alluvial deposits in Rome (Italy): morpho-stratigraphic, mineralogical and geomechanical characterisation*. Proc. Int. Symp. Engineering Geology and the Environment, Publ. 1, 1193-1198.
- BOZZANO F., GIACOMI A. C., LENTI L., MARTINI G., MARTINO S. & SANTISI D'AVILA M.P. (2012) - *Numerical modeling of nonlinear dynamic shear strains in heterogeneous soils by 1D-3C finite difference SWAP*. Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering, 24-28 September 2012, Lisboa, paper 0427.
- BOZZANO F., GIACOMI A.C., MARTINO S. & CORPO NAZIONALE VIGILI DEL FUOCO (2011) - *Scenario di danneggiamento indotto nella città di Roma dalla sequenza sismica aquilana del 2009*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **2(2011)**: 5-22.
- CASERTA A., MARTINO S., BOZZANO F., MARRA F. & GOVONI A. (2012) - *Dynamic properties of low velocity alluvial deposits influencing seismically-induced shear strains: the Grottaperfetta valley test-site (Rome, Italy)*. Bull. Earthquake Eng., **10**: 1133-1162.
- CASERTA A., ROVELLI A., MARRA F., GOVONI A. & DELLAMONICA G. (2009) - *Lo scuotimento registrato nella città di Roma durante i più forti terremoti della sequenza aquilana*. GNGTS 2009, Abstract, 2.1, 274-275.
- CONATO V., ESU D., MALATESTA A. & ZARLENGA F. (1980) - *New data on the Pliocene of Rome*. Quaternaria, **22**: 131-175.
- CORAZZA A., LANZINI M., ROSA C. & SALUCCI R. (1999) - *Caratteri stratigrafici, idrogeologici e geotecnici delle alluvioni tiberine nel settore del centro storico di Roma*. Il Quaternario, **12**: 131-176.
- DELFOSE-RIBAY E., DIERAN-MAIGRE I., CABRILLAC R. & GOUVENOT D. (2004) - *Shear modulus and damping ratio of grouted sand*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **24**: 461-471.
- DYVIK R. & HØEG K. (1999) - *Comparison of tests on undisturbed and reconstituted silt and silty sand*. In: *Physics and Mechanics of soil Liquefaction*. LADE & YA-

- MAMURO EDS., Balkema, Rotterdam, ISBN: 9058090388.
- DONATI S., FUNICIELLO R. & ROVELLI A. (1999) - *Seismic response in archaeological areas: the Case-History of Rome*. Jour. Appl. Geophys., **41**: 229-239.
- FORTUNATO C., MARTINO S., PRESTININZI A. & ROMEO R.W. (2012) - *Nuova versione del catalogo degli effetti deformativi indotti da forti terremoti in Italia (CEDIT)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **2**(2012).
- FUNICIELLO R. & GIORDANO G. (2008) - *Carta geologica del di Roma-Foglio 354 scala 1:50.000*. Dipartimento Scienze geologiche Università Roma 3, Ufficio di protezione civile e Dipartimento protezione del suolo-APAT.
- FUNICIELLO R. & ROVELLI A. (1998) - *Terremoti e monumenti a Roma*. Le Scienze.
- GIACOMI A.C. (2011) - *Implications of river system on recent Tiber River alluvium*. Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences, **24**: 110-112.
- KRAMER S.L. & SEED H.B. (1988) - *Initiation of Soil Liquefaction Under Static Loading Conditions*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, **114**(4): 412-430.
- KRAMER S.L. (1996) - *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 653 pp.
- MAYFIELD R.T., KRAMER S.L. & HUANG Y.M. (2010) - *Simplified approximation procedure for performance-based evaluation of liquefaction potential*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, **136**(1): 140-150.
- MARRA F. & ROSA C. (1995) - *Stratigrafia ed assetto geologico dell'area romana*. In: *La geologia di Roma: il Centro Storico* (FUNICIELLO R. ED.). Mem. Descr. Carta Geol. d'Italia, **50**: 48-118.
- MARRA F., ROSA C., DE RITA D. & FUNICIELLO R. (1998) - *Stratigraphic and tectonic features of the middle Pleistocene sedimentary and volcanic deposits in the area of Rome (Italy)*. Quaternary International, **47-48**: 51-63.
- MARTINO S., PRESTININZI A. & ROMEO R.W. (2012) - *An upgrade of the Italian catalogue of earthquake-induced ground failures CEDIT*. Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering, 24-28 September 2012, Lisboa, paper 2419.
- MILLI S. (1997) - *Depositional setting and high-frequency sequence stratigraphic of the middle upper Pleistocene to Holocene deposits of the Roman basin*. Geologica Romana, **33**: 99-136.
- RASPA G., MOSCATELLI M., STIGLIANO F., PATERA A., MARCONI F., FOLLE D., VALLONE R., MANCINI M., CAVINATO G. P., MILLI S., COIMBRA J.F. & COSTA L. (2008) - *Geotechnical characterization of the upper Pleistocene-Holocene alluvial deposits of Roma (Italy) by means of multivariate geostatistics: Cross-validation results*. Engineering Geology, 101: 251-268.
- ROMEO R.W. (2012) - *Emilia (Italy) M 5.9 earthquake on 20 May 2012: an unusual pattern of liquefaction*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **2**(2012): 75-84.
- ROVELLI A., MALAGNINI L., CASERTA A. & MARRA F. (1995) - *Using 1-D and 2-D modelling of ground motion for seismic zonation criteria: results for the city of Rome*. Annali di Geofisica, **38**(5-6): 591-605.
- SALVI S., BOSCHI E., DI BONA M., FUNICIELLO R., MALAGNINI L., MARRA F. & ROVELLI A. (1991) - *Subsurface geology and variations of seismic response in the city of Rome*. In the Proceedings of the 4th Int. Cong. on Seismic Zonation (Vol. II): 115-122, EERI, Stanford, California.
- SEED H. B. & IDRIS I.M. (1970) - *Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses*. EERC Report 70-10, University of California, Berkeley.
- SIMONI G. & MADIAI C. (2007) - *Sull'applicazione del metodo del decremento logaritmico per la determinazione del rapporto di smorzamento a partire da misure in colonna risonante*. Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2007 - IARG 2007 - Salerno, 4-6 Luglio 2007.
- SUN J.I., GOLESORKHI R. & SEED H.B. (1988) - *Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils*. Report No. UCB/EERC-88/15, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, California.
- VAID Y.P. & NEGUSSEY D. (1988) - *Preparation of reconstituted sand specimens*. In: *Advanced Triaxial testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977, DONAGHE R.T., CHANEY R.C. & SILVER M.L. EDS., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 405-417.
- VUCETIC M. & DOBRY R. (1991) - *Effect of soil plasticity on cyclic response*. Journal of Geotechnical Engineering, **117** (1): 89-117.
- ZHANG J., ANDRUS R.D. & JUANG C.H. (2005) - *Normalized shear modulus and material damping ratio relationships*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, **131**(4): 453-464.

Received May 2012 - Accepted October 2012

