

## PARAMETRI DI RESISTENZA AL TAGLIO DI TERRE COESIVE COMPATTATE: ANALISI DEI TERRENI ARGILLOSO-SABBIOSI DE I “LISCIANI DI PANTALLA” (TODI - ITALIA CENTRALE)

### STRENGTH PARAMETERS OF COMPACTED COHESIVE SOILS: ANALYSIS OF SANDY-CLAYEY SOILS OF THE “LISCIANI DI PANTALLA” (TODI – CENTRAL ITALY)

LUCIO DI MATTEO<sup>(\*)</sup>, SIMONE BRUNELLI<sup>(\*)</sup> & ENRICA CAPPONI<sup>(\*\*)</sup>

<sup>(\*)</sup> University of Perugia - Earth Science Department – Perugia, Italy - dimatteo@unipg.it

<sup>(\*\*)</sup> Istituto Sperimentale per l'Edilizia – S. Sisto – Perugia, Italy – infopg@istedil.it

#### RIASSUNTO

Nel presente lavoro è stato investigato sperimentalmente il comportamento meccanico di miscele costituite da sabbia (SW) e limo con argilla (CL), in relazione alla densità secca di compattazione. I materiali analizzati provengono da i “Lisciani di Pantalla”, località umbra situata tra Perugia e Todi (Italia Centrale). Dai risultati delle prove di taglio diretto (Consolidate Drenate) è stato verificato che le miscele analizzate presentano un massimo di coesione per una densità secca minore di quella massima ottenibile mediante le prove Proctor standard. L'angolo di attrito interno, perlomeno per il campo di umidità indagato (lato secco della curva Proctor), presenta un massimo alle condizioni ottimali di compattazione. Per miscele ad elevato contenuto di frazione fine (CL = 60%), una piccola riduzione della densità secca produce un aumento superiore al 50% della coesione ed una riduzione di circa il 40% dell'angolo di attrito interno. Alle condizioni ottimali di compattazione l'angolo di attrito interno diminuisce all'aumentare del contenuto di limo con argilla, passando da 43° a 32°. La coesione, alle stesse condizioni, assume dei valori compresi tra 16 e 24 kPa, risultando minore per un contenuto di CL del 60% rispetto a quello del 35%, delineando un massimo tra questi due contenuti percentuali. I risultati ottenuti, oltre ad ampliare le conoscenze fisico-meccaniche dei terreni argilloso-sabbiosi dell'Italia centrale, possono essere di qualche utilità nelle applicazioni di ingegneria stradale o nelle costruzioni di strutture in terre compattate.

**TERMINI CHIAVE:** miscele sabbia-argilla, densità secca, parametri di taglio, plasticità

#### INTRODUZIONE

La costruzione delle strutture in terra, quali i rilevati stradali, richiede un'accurata analisi dei parametri fisico-meccanici dei materiali da utilizzare in sito. Le caratteristiche fisiche ottimali, optimum di contenuto d'acqua (OMC) e massima densità secca (MDD), vengono definite in laboratorio mediante prove di compattazione. Dal punto di vista progettuale/esecutivo, le terre vengono addensate in sito al 95% della MDD derivata dalla prova Proctor standard o al 90% della MDD derivata dalla prova Proctor modificata. La scelta del materiale e delle densità secche di progetto (DD) sono fondamentali

#### ABSTRACT

An experimental investigation was made on the mechanical behavior of mixtures constituted by sand (SW) and clayey silt (CL), in relation to dry density. The materials analyzed are from “Lisciani di Pantalla,” a locality in Umbria situated between Perugia and Todi (Central Italy). The results of the consolidated drained direct shear tests showed that the mixtures analyzed have maximum cohesion for a dry density values less than maximum dry density. The angle of internal friction, at least for the dry side of the Proctor curve, has a maximum at the maximum dry density. For mixtures with a high fine fraction content (CL = 60%), a small reduction in dry density produces a more than 50% increase in cohesion and about a 40% reduction in the angle of internal friction. At the optimum condition of compaction the angle of internal friction decreases with the increase in the clayey silt content, going from 43° to 32°. Under the same conditions, cohesion takes on values between 16 and 24 kPa, being lower for a CL content of 60% than one of 35%, showing a maximum between these two content percentages. The results obtained not only increase knowledge of the physical-mechanical properties of clayey-sandy soils in central Italy, but may also be somehow useful in road engineering applications.

**KEY WORDS:** clay-sand mixture, dry density, shear strength parameters, plasticity

#### INTRODUCTION

Construction of earth structures such as road embankments requires an accurate analysis of the physical and mechanical parameters of compacted soils. The optimum physical properties are defined in laboratory by means of compaction tests obtaining maximum dry density (MDD) and optimum moisture content (OMC). According to the traditional approach, design dry density (DD) is typically defined by 95% of MDD based on standard Proctor compaction (ASTM D-698 or AASHTO T-90) or 90% of MDD based on modified Proctor compaction (ASTM D-1557 or AASHTO T-180).

in quanto il grado di addensamento influenza la struttura dei materiali compattati e quindi i parametri meccanici delle terre, coesione ( $c$ ) ed angolo di attrito interno ( $\phi$ ). È noto come i parametri geotecnici, sia di materiali indisturbati che ricostruiti in laboratorio, sono strettamente legati alla struttura e quindi all'orientazione/contatti delle particelle di terreno. Vari studi in letteratura hanno indagato, mediante osservazioni quantitative al microscopio elettronico, la variazione di alcuni parametri micro-morfologici al variare del grado di compattazione e quindi del grado di addensamento (MITCHELL, 1956; SEED & CHAN, 1959; BREWER, 1976; MITCHELL, 1993; CETIN *et alii*, 2007). COCKA *et alii* (2004) hanno evidenziato come per terre altamente plastiche, appartenenti alla classe CH della classificazione USCS e compattate alla MDD, l'angolo di attrito interno, non è affetto dall'incremento del contenuto d'acqua, mentre la coesione subisce una riduzione del 70% passando da un OMC del 24% ad un contenuto d'acqua (MC) del 30%. AL SHAYEA (2001) ha focalizzato l'attenzione sull'influenza delle caratteristiche microstrutturali, della mineralogia e del MC di miscele sabbia-argilla smectitica (argille del Golfo d'Arabia), mediante l'utilizzo di prove triassiali consolidate drenate (TT CD). LUCZAK-WILAMOWSKA (2002) ha indagato le caratteristiche geotecniche delle miscele sabbia-argilla smectitiche (argille polacche) utilizzate come barriere di tenuta nei riporti di terreno delle discariche. I parametri meccanici, delle miscele sabbia-argilla ( $c$  e  $\phi$ ), sono stati ricavati mediante prove di taglio diretto non consolidate con velocità di taglio di 0.1 mm/min, analizzando esclusivamente provini compattati a condizioni prossime a quelle ottimali. Lo studio ha messo in evidenza come al diminuire della percentuale di argilla, l'angolo di attrito interno tende ad aumentare mentre la coesione mostra un andamento che può essere approssimato da una funzione quadratica.

Nel presente lavoro vengono illustrati i primi risultati degli studi condotti su miscele costituite da sabbia e da limi con argille a bassa plasticità, molto diffusi nei depositi fluvio-lacustri del bacino Tiberino. In particolare vengono analizzati i parametri meccanici, al variare della densità secca di compattazione e quindi dell'indice dei vuoti, di miscele a diversa percentuale di terre a granulometria minore di 75  $\mu\text{m}$ . A partire dallo studio effettuato da CANDIO *et alii* (1992), sulla caratterizzazione delle diverse unità argillose dell'Umbria dal punto di vista mineralogico e geotecnico, è stato scelto il sito de i “Lisciani di Pantalla” (Todi - PG), caratterizzato da argille con basse percentuali di minerali attivi (Fig. 1). I parametri meccanici sono stati ricavati mediante prove di taglio diretto consolidate drenate (ST CD). La tabella 1 riporta il significato dei simboli utilizzati nel testo.

## PROPRIETÀ DEI MATERIALI

Per questo studio è stata utilizzata una miscela di sabbia e limo-argilloso ricostruita in laboratorio. Entrambi i materiali appartengono a depositi continentali fluvio-lacustri pleistocenici della “riva umbra” del Fiume Tevere (CONTI & GIROTTI, 1977; CATTUTO *et alii*, 1988; CENCETTI, 1990; AMBROSETTI *et alii*, 1993; BASILICI, 1991; BASILICI, 2000). I campioni in esame appartengono all'Unità di S. Maria di

The mechanical parameters of compacted soil, such as cohesion ( $c$ ) and angle of internal friction, are strictly dependent on soil types and design dry density. It has long been suggested that engineering parameters of both undisturbed and remoulded or compacted cohesive clay soils derive ultimately from dry density and in the way in which the particles interact under load. A study of soil structure is basic to an understanding of the engineering behaviour of such soils. Several works studied quantitatively under both optical and electron microscopes observations various micro-morphological parameters as function of dry density of compacted soils (MITCHELL, 1956; SEED & CHAN, 1959; BREWER, 1976; MITCHELL, 1993; CETIN *et alii*, 2007). COCKA *et alii* (2004) showed how for highly plastic soils, belonging to the CH class according to the USCS classification and compacted to OMC, the angle of internal friction is not affected by the increase in the moisture content, whereas cohesion is reduced by 70% going from a OMC of 24% to a MC of 30%. AL SHAYEA (2001) focused attention on the influence of the microfabric characteristics, the mineralogy and the MC of smectitic sandy-clayey mixtures (clays of the Arabian Gulf) through the use of consolidated drained triaxial tests (TT CD). LUCZAK-WILAMOWSKA (2002) studied the shear strength parameters of smectitic sandy-clayey mixtures (Polish clays) used as mineral sealing barriers for landfills. The mechanical parameters of sandy-clayey mixtures ( $c$  and  $\phi$ ) were obtained by means of unconsolidated direct shear tests with a sliding velocity of 0.1 mm/min, analyzing exclusively compacted specimens in close to optimum conditions. In particular, the angle of internal friction increases with the decreasing of the percentage of clay, while cohesion shows a curve that can be approximated to a quadratic function.

This work illustrates the first results of the studies conducted on mixtures made up of sand and of silts with low plasticity clays, very common in fluvial-lacustrine deposits in the Tiber basin. In particular, the mechanical parameters of mixtures with different percentages of soils having a particle size less than 75  $\mu\text{m}$  are analyzed with the varying of dry density and void index. Starting from the study done by CANDIO *et alii* (1992) on the mineralogical and geotechnical characterization of the different clay units in Umbria, the “Lisciani di Pantalla” (Todi - PG) site was chosen, characterized by clays with low percentages of active minerals (Fig. 1). The mechanical parameters were obtained by means of consolidated drained direct shear tests (ST CD). Table 1 gives the meaning of the symbols used in the text.

## MATERIALS PROPERTIES

A mixture of sand and clayey silt synthesized in the laboratory was used for this study. Both the materials are from Pleistocene continental fluvial-lacustrine deposits of the Tiber River (CONTI & GIROTTI, 1977; CATTUTO *et alii*, 1988; CENCETTI, 1990; AMBROSETTI *et alii*, 1993; BASILICI, 1991; BASILICI, 2000). The samples analyzed belong to the S. Maria di Ciciliano Unit (USMC), defined by

STRENGTH PARAMETERS OF COMPACTED COHESIVE SOILS: ANALYSIS OF SANDY-CLAYEY SOILS OF THE "LISCIANI DI PANTALLA"  
(TODI – CENTRAL ITALY)



Fig. 1 - Localizzazione della zona di campionamento (N 42° 52,96502'; E 12° 25,000595')  
- Sampling site location (N 42° 52,96502'; E 12° 25,000595')

Ciciliano (USMC), definita da BASILICI (1991). L'USMC è stata deposta in un sistema di tipo alluvionale caratterizzato da una larga piana di inondazione e da fiumi prevalentemente meandriformi a sedimentazione sabbiosa. L'USMC è costituita da alternanze di corpi sabbiosi tabulari, raramente ghiaiosi e da depositi argilloso-siltosi; i primi dovuti a depositi di canale, i secondi a piane di inondazione. I materiali argilloso-siltosi studiati sono grigio-azzurri, le sabbie presentano una colorazione giallo-beige. La figura 2 riporta le curve granulometriche di questi materiali, classificabili come limi con argille debolmente sabbiosi e sabbie con limo.

I limi con argille debolmente sabbiosi (curva 1 di Fig. 2) sono stati caratterizzati dal punto di vista mineralogico mediante diffrazione a raggi X (XRD), seguendo le procedure standard per la diagnosi dei minerali argillosi: l'analisi semiquantitativa dei risultati così ottenuti è riportata in figura 3a. Il materiale è rappresentativo, dal punto di vista mineralogico, dei depositi argillosi fluvio-lacustri del bacino tiberino, caratterizzati da una notevole variabilità della composizione mineralogica ma con smectiti che non superano generalmente il 15% del totale (cfr. CANDIO *et alii*, 1992). Nel materiale in questione non è presente la vermiculite, spesso presente nei depositi argillosi del bacino tiberino, anche se con percentuale e distribuzione areale molto più bassi di quelli "umbri" del bacino della Chiana, in cui vengono raggiunti valori anche superiori al 50% (Fig.

<b>MC</b>	Moisture content (%)
<b>DD</b>	Design dry density (g/cm <sup>3</sup> )
<b>OMC</b>	Optimum Moisture Content (%)
<b>MDD</b>	Maximum dry density (g/cm <sup>3</sup> )
<b>ST CD</b>	Consolidated Drained Direct Shear Test
<b>TT CD</b>	Consolidated Drained Triaxial Test
<b>LL</b>	Liquid Limit (%)
<b>LP</b>	Plasticity Limit (%)
<b>IP</b>	Plasticity Index (%)
<b>CF</b>	Clay Fraction (%)
<b>CL</b>	Silty clay with low plasticity
<b>SW</b>	Well graded sand with no plasticity
<b>G<sub>s</sub></b>	Specific gravity
<b>c</b>	Cohesion (kPa)
<b>φ</b>	Angle of internal friction (°)
<b>σ<sub>n</sub></b>	Normal stress (kPa)
<b>τ<sub>max</sub></b>	Shearing stress (kPa)

Tab. 1 - Significato dei simboli  
- Meaning of symbols

BASILICI (1991). The USMC was deposited in an alluvial system characterized by a wide floodplain and prevalently meandering rivers with sandy sedimentation. The USMC is composed of alternations of sandy organized in tabular bodies rarely gravelly, and of clayey-silty deposits; the former due to channel deposits and the latter to floodplains. The clayey-silty materials studied are grey-blue, and the sands are yellow beige. Figure 2 shows the particle size distribution curves of these materials, which can be classified as very clayey silts and very silty sands.

The very clayey silts (curve 1, Fig. 2) are characterized by means of X-ray diffraction (XRD), following the standard procedures for the diagnosis of clayey minerals: the semi-quantitative analysis of the results thus obtained is given in Figure 3a. The material analyzed represents very well the clayey fluvial-lacustrine deposits of the Tiber basin, characterized by considerable variability in the mineralogical composition, but with smectites that generally do not exceed 15% of the total constituents (cf. CANDIO *et alii*, 1992). Soils here analyzed have no vermiculite, which is often present in the clayey deposits of the Tiber basin, although in a much lower percentage and area distribution than in the "Umbrian" deposits of the Chiana basin, in which values up to and over 50% are reached (Fig. 3a). Figure 3b shows a SEM photo of a sample of clayey silt in which a K-feldspar (identified by EDS analysis) can be made out in the center of the photo next to a phyllosilicate having the typical layered shape. In order to obtain a more complete characterization of the material, an analysis was also done of the sulfates content (UNI 8520/11 standard), present in a quantity of approximately 0.035%.

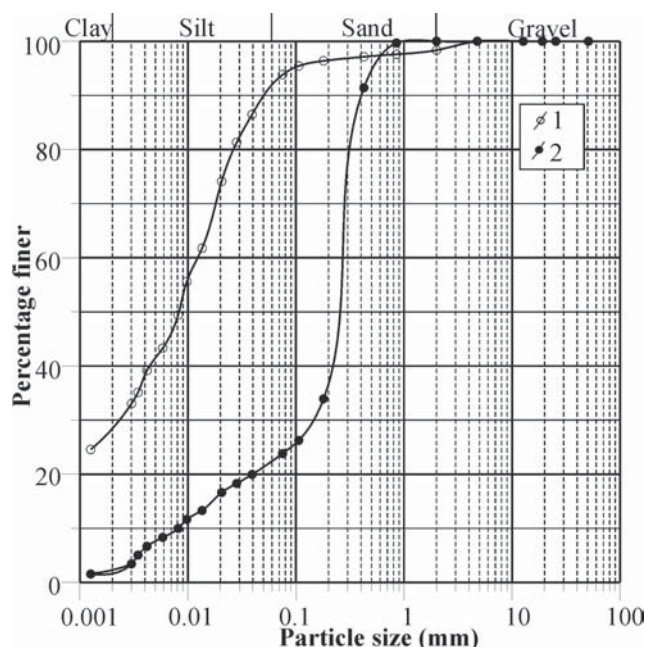


Fig. 2 - Curve granulometriche dei materiali analizzati nel presente lavoro (1. limo con argilla debolmente sabbiosa; 2. sabbia con limo)  
- Particle size distribution curves of soils analysed in present work (1. very clayey silt; 2. very silty sand)

3a). La figura 3b riporta una foto effettuata al SEM su un campione di limo con argille in cui è distinguibile, al centro della foto, un K-feldspato (identificato tramite analisi EDS) adiacente ad un fillosilicato avente la tipica forma lamellare. Per una più completa caratterizzazione del materiale è stata eseguita anche l'analisi sul contenuto in solfati (norma UNI 8520/11), presenti nel materiale in quantità di circa lo 0.035%.

## SPERIMENTAZIONE

Come accennato nella introduzione lo scopo di questo lavoro è quello di studiare l'andamento dei parametri meccanici di miscele costituite da sabbia e da limo con argilla ricostruite in laboratorio, al variare della densità secca. Prima di tutto le distribuzioni granulometriche dei terreni di figura 2 sono state modificate in modo da ottenere, mediante setacciatura ed in accordo con la classificazione USCS, una sabbia ben gradata a plasticità nulla (SW), rientrante nella classe A3 della classificazione CNR UNI 10006, ed un limo con argilla a bassa plasticità (CL). Successivamente CL e SW sono stati miscelati in percentuali del 15%, 35% e 60% seguendo la procedura ASTM D 4318: le percentuali indicano la quantità in peso di CL riferita al peso totale. Le caratteristiche fisiche di queste miscele sono riportate in tabella 2.

Ogni singola miscela è stata compattata a diversi contenuti d'acqua seguendo la procedura AASHTO T99 (prova Proctor standard,  $E = 593 \text{ kJ/m}^3$ ). La figura 4 riporta le tre curve Proctor, tutte caratteriz-

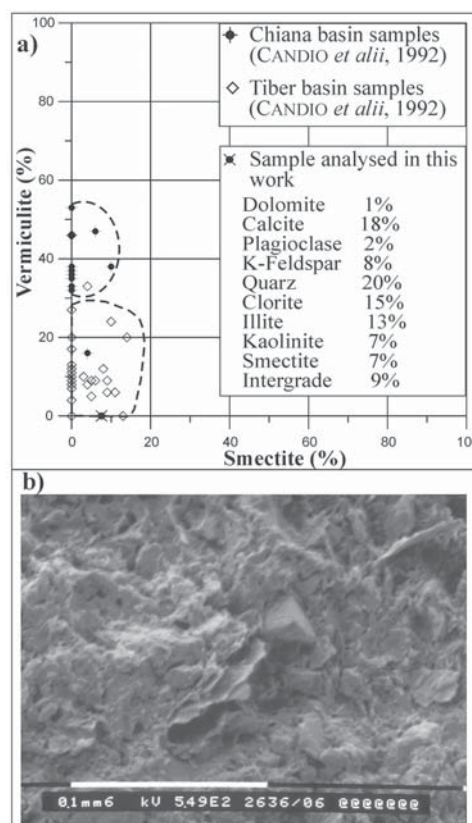


Fig. 3 - a) Diagramma binario Smectite/Vermiculite dei campioni del bacino Tiberino e della Chiana "umbra" (dati ripresi da Candio et alii, 1992) e composizione mineralogica del campione naturale di limo con argilla debolmente sabbioso utilizzato nel presente lavoro; b) Immagine al SEM rappresentativa del materiale studiato  
- a) Smectite/Vermiculite diagram of Tiber and Chiana clayey sediments (data collected by Candio et alii, 1992) and mineralogical composition of very clayey silt soil used in this work; b) Representative SEM image of natural soil

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION

The purpose of this work is to study the trend of the mechanical parameters of mixtures of sand and of clayey silt synthesized in the laboratory, with the varying of dry density. The first step was to modify the grain size distributions of the soils in Figure 2 so as to obtain, by means of sieving and in accordance with the USCS classification, a well-graded sand with no plasticity (SW), falling within class A3 of the CNR UNI 10006 classification, and a clayey silt with low plasticity (CL). CL and SW were then mixed, in percentages of 15%, 35% and 60%, following the ASTM D 4318 procedure: the percentages indicate the quantity by weight of CL out of the total weight. The physical properties of these mixtures are given in Table 2. Each separate mixture was compacted in a cylindrical mould to a different MC following the AASHTO T99 procedure (standard Proctor test,  $E = 593 \text{ kJ/m}^3$ ). Figure 4 shows the three Proctor curves, all of them characterized by a very small moisture field, typical of low-activity soils (cf. for example SPOSITO, 1984;

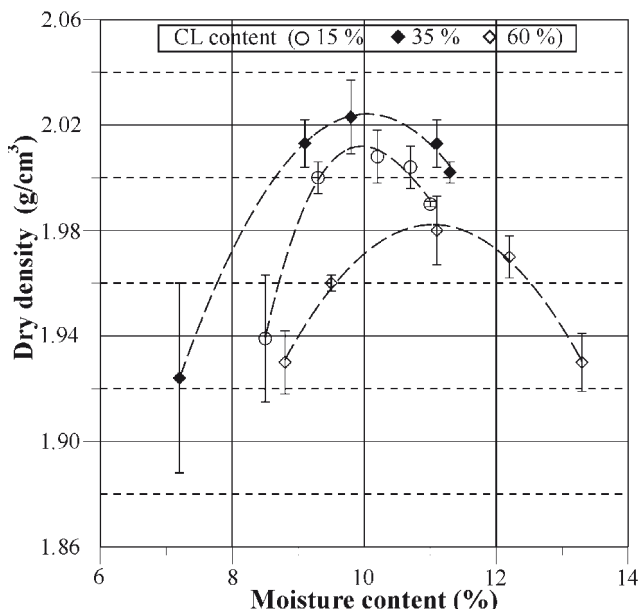


Fig. 4 - Curve di compattazione delle miscele a diverso contenuto percentuale di CL con relative barre di errore di  $\pm$  S.D.  
- *Compaction curve of the synthetic mixtures for various CL content with relative error bars of  $\pm$  S.D.*

zate da un campo di umidità molto piccolo, tipico di terreni a bassa attività (cfr. solo per esempio SPOSITO, 1984; SCHMITZ *et alii*, 2004). La figura 5 mostra l'andamento dell'indice dei vuoti al variare della densità secca: la similarità delle pendenze delle rette ( $m = -0.71$ ) è da ricollegare alla similarità dei valori di gravità specifica delle tre miscele indagate (Tab. 2).

Da ogni fustella Proctor delle diverse miscele percentuali di figura 4, sono stati ricavati tre provini di dimensioni pari a 60x60 mm, necessari per le ST CD, evitando le superfici di discontinuità tra i tre strati compattati. Prima di inserire la scatola di taglio contenente il provino nella macchina di taglio, questa è stata avvolta con del nylon per preservarne l'umidità.

Il taglio è stato effettuato ad una velocità di 0.009 mm/min, valore dedotto da una prova edometrica effettuata sul materiale con il 60% di CL mediante la procedura proposta da BISHOP & HENKEL (1962) e LADD (1971). La prova di taglio è stata condotta con carichi normali (sn) di 100, 200 e 300 kPa seguendo la procedura ASTM D 3080.

CL contents (%)	Gs	CF (%)	LL (%)	LP (%)	PI (%)
15	2.734	4	n.d.	n.d.	n.d.
35	2.757	9	24	18	6
60	2.724	16	27	17	10

Tab. 2 - Caratteristiche fisiche delle miscele CL-SW ricostruite in laboratorio per vari contenuti di CL  
- *Physical properties of the synthetic CL-SW mixtures for various CL content*

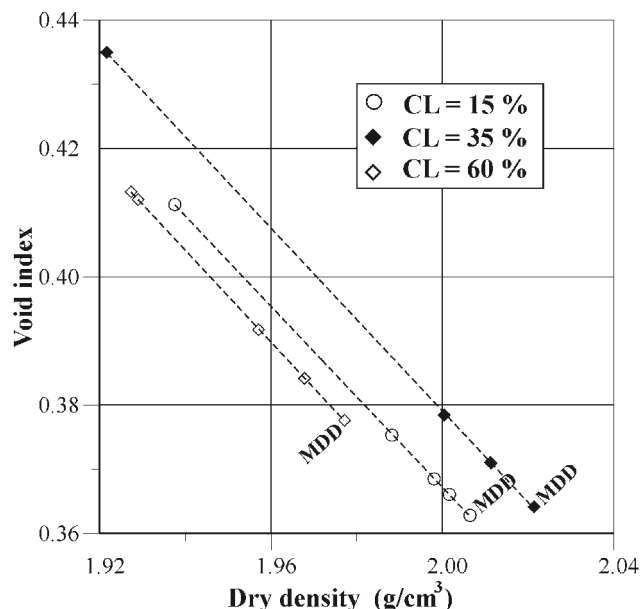


Fig. 5 - Relazione tra indice dei vuoti e densità secca per le tre miscele indagate  
- *Void index vs dry density of soils analysed in present work*

SCHMITZ *et alii*, 2004). Figure 5 shows the relationship between void index and dry density for each soil mixture in database: slope similarities of regression lines ( $m = -0.71$ ) are strictly related to the similarities on specific gravity of soils (Tab. 2).

Three 60x60 mm specimens were obtained from each Proctor cylindrical mould of the different percentage mixtures in Figure 4, avoiding the surfaces of discontinuity between the compacted layers. Before the shear box (with the specimen) was installed into the direct shear apparatus, it was wrapped with nylon stretch film to preserve its moisture.

The shear was made at a sliding velocity of 0.009 mm/min, a value derived from an oedometric test done on the material with 60% CL using the procedure proposed by BISHOP & HENKEL (1962) and LADD (1971). The shear test was done with normal stresses of 100, 200 and 300 kPa following the ASTM D 3080 procedure.

## ANALISI DEI RISULTATI

Le miscele a diverso contenuto percentuale di CL sono state inizialmente sottoposte a prove di taglio diretto, prendendo in esame solo provini con densità secche prossime alle MDD, determinando la coesione e l'angolo di attrito interno in accordo con il criterio di rottura di Mohr-Coulomb (Fig. 6). Analizzando i risultati si osserva come l'angolo di attrito interno diminuisce all'aumentare del contenuto di CL, passando da 43° a 32°. La coesione tende invece a delineare un massimo tra i contenuti di CL del 60% e del 35%. Un andamento analogo della coesione alle condizioni ottimali (Proctor standard) è stato osservato anche da LUCZAK-WILAMOWSKA (2002), su terre a composizione mineralogica molto diversa da quelle analizzate nel presente studio (sabbie ed argille smectitiche ad alta plasticità). In particolare la coesione, ottenuta mediante prove di taglio diretto in condizioni non consolidate e con velocità di taglio elevate, aumenta fino ad un determinato contenuto percentuale in peso di argilla (circa il 60% in peso del totale) per poi diminuire fino ad assumere, per campioni totalmente argillosi, valori prossimi a quelli ricavati per miscele con contenuto di argilla del 20%.

I parametri di resistenza al taglio sono stati indagati anche su miscele a densità secche ricadenti nel lato secco della curva di compattazione, in cui le terre, come noto in letteratura, a parità di energia di compattazione, presentano una struttura altamente "aggregata" con fabric altamente "randomizzato" rispetto al lato umido della stessa, dove l'arrangiamento delle particelle risulta molto più orientato (DIAMOND, 1970; LAMBE & WHITMAN, 1979; HOLTZ & KOVACS, 1981, TOLL, 2000; CETIN *et alii*, 2007).

La figura 7 illustra l'andamento dell'angolo di attrito interno e della coesione al variare della densità secca per le tre miscele a diverso contenuto di CL. Come si può osservare dal grafico la coesione ha un andamento a campana con massimo localizzato per valori di densità secca inferiori alla MDD. L'angolo di attrito interno mostra un andamento opposto a quello della coesione, raggiungendo un minimo per densità secche minori della MDD ed un valore massimo, perlomeno il lato secco della curva Proctor, e per ogni miscela, nelle condizioni prossime alla MDD, corrispondente all'indice di vuoti più basso (cfr. Fig. 5). La bassa clay fraction e la presenza di argille scarsamente attive (Tab. 2), danno origine ad una struttura aggregata di particelle a comportamento tendenzialmente sabbioso, giustificando l'aumento dell'angolo di attrito interno all'aumentare della densità secca anche per le miscele a maggior contenuto di CL (HORN & DERE, 1962; PROCTER & BARTON, 1974).

## CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato investigato sperimentalmente il comportamento meccanico di miscele sabbia-argilla compattate, a mineralogia nota e con elevata diffusione nel territorio umbro del bacino fluvio-lacustro pleistocenico tiberino, in relazione alla densità secca. Gli esperimenti sono stati condotti su miscele caratterizzate da PI bassi con campo di umidità Proctor molto piccolo, pari a circa il 4%. Diverse prove di taglio diretto hanno permesso di ricostruire l'andamento dei parametri meccanici, coesione ed angolo di

## DATA ANALYSIS AND RESULTS

The mixtures with different CL content percentages were initially given direct shear tests for dry density values close to MDD, determining the cohesion and the angle of internal friction in accordance with the Mohr-Coulomb failure criterion (Fig. 6). The angle of internal friction decreases with the increasing of the CL content, going from 43° to 32°. The cohesion, which takes on values between 16 and 24 kPa, being lesser for a CL content of 60% compared to that of 35%, thus showing a maximum between these two content percentages. A similar trend of cohesion to the optimum moisture content was also observed by LUCZAK-WILAMOWSKA (2002) using direct shear tests in unconsolidated conditions and with high sliding velocities. For these materials (compacted smectitic clays and sands), the cohesion increases up to a certain percent content of clay by weight (about 60% of the total in weight), beyond which it decreases until reaching, for entirely clay samples, values similar to those obtained for mixtures with a clay content of 20%.

The shear strength parameters were also investigated for mixtures having dry density falling within the dry side of the optimum, in which the soils, as is known in the literature, have a highly "aggregate" structure with a random fabric than the wet side of the optimum, where compaction produces a more oriented arrangement of particles (DIAMOND, 1970; LAMBE, 1958A,B; LAMBE & WHITMAN, 1979; HOLTZ & KOVACS, 1981, TOLL, 2000; CETIN *et alii*, 2007).

Figure 7 shows the trend of the cohesion and of the angle of internal friction with the varying of dry density for the three different CL content mixtures. As can be seen by the graph, the cohesion shows a local maximum for dry density values less than MDD. The maximum cohesion value tends to move toward the higher dry density with the increasing of the CL percentage in the mixture. The angle of internal friction shows a trend opposite that of cohesion, reaching a minimum for moisture contents less than MDD and a maximum value, at least for the dry side of the Proctor curve, in conditions close to MDD where is reached the minimum void index (cfr. Fig. 5).

The low CF and the presence of low-activity clays (Tab. 2) give rise to an aggregate structure of particles with "granular" behavior, justifying the increase in the angle of internal friction with the increasing of dry density also for mixtures with a higher CL content (HORN & DERE, 1962; PROCTER & BARTON, 1974).

## CONCLUSIONS

In this work an experimental investigation was made of the mechanical behavior of sand-clay mixtures, having known mineralogy and very common in the Umbrian territory of the Pleistocene fluvial-lacustrine Tiber River basin, in relation to the dry density. The experiments were conducted on mixtures with a low PI having a very small compaction moisture field (about 4%). Several direct shear tests were conducted on soil compacted at dry density reaching on the dry side of compaction curve, estimating both cohesion and angle of inter-

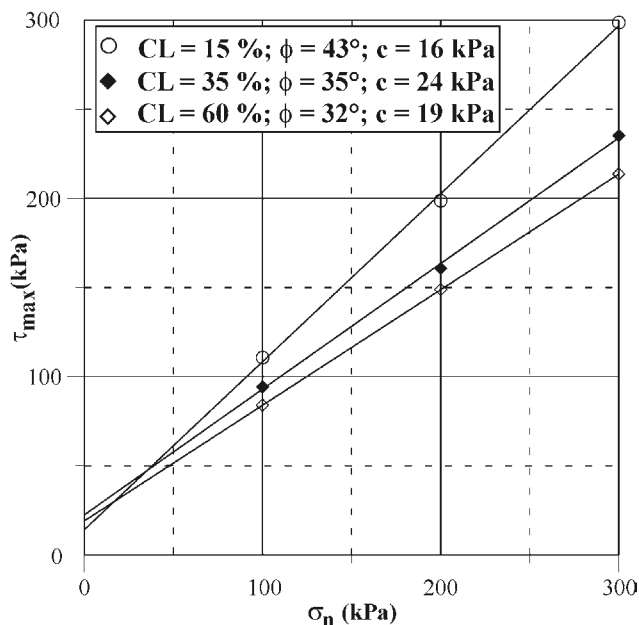


Fig. 6 - Relazione tra sforzo normale ( $\sigma_n$ ) e resistenza al taglio di picco ( $\tau_{max}$ ) per le miscele a diverso contenuto di CL, compattate alla MDD  
- Normal stress ( $\sigma_n$ ) vs shear stress ( $\tau_{max}$ ) of the soil mixtures at the MDD

attrito interno, nel lato secco della curva Proctor standard. Entrambi i parametri risentono delle variazioni di densità secca/indice dei vuoti e del contenuto percentuale di CL nelle miscele. Per composti ad elevato contenuto di frazione fine (CL = 60%), una piccola riduzione di densità secca produce un aumento superiore al 50% della coesione ed una riduzione di circa il 40% dell'angolo di attrito interno. Gli andamenti delle curve di angolo di attrito interno al variare della densità secca indicano che le miscele qui analizzate hanno un comportamento meccanico assimilabile a quello di terreni sabbiosi, con valori massimi raggiunti in prossimità dei massimi di densità secca.

Questo lavoro è da considerarsi un punto di partenza di ulteriori studi da estendere ad altri depositi argillosi, di ambienti sedimentari differenti e soprattutto a diversa composizione mineralogica. I risultati ottenuti, oltre ad ampliare le conoscenze fisico-meccaniche dei terreni argilloso-sabbiosi dell'Italia centrale, possono essere di qualche utilità nelle applicazioni di ingegneria stradale o nelle costruzioni di strutture in terre compattate.

#### RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Prof. Massimo Setti dell'Università di Pavia per le analisi mineralogiche e la Dr. Sabrina Nazzareni dell'Università di Perugia per l'interpretazione delle analisi SEM/EDS.

Il lavoro è stato parzialmente finanziato dall'ISTEDIL.

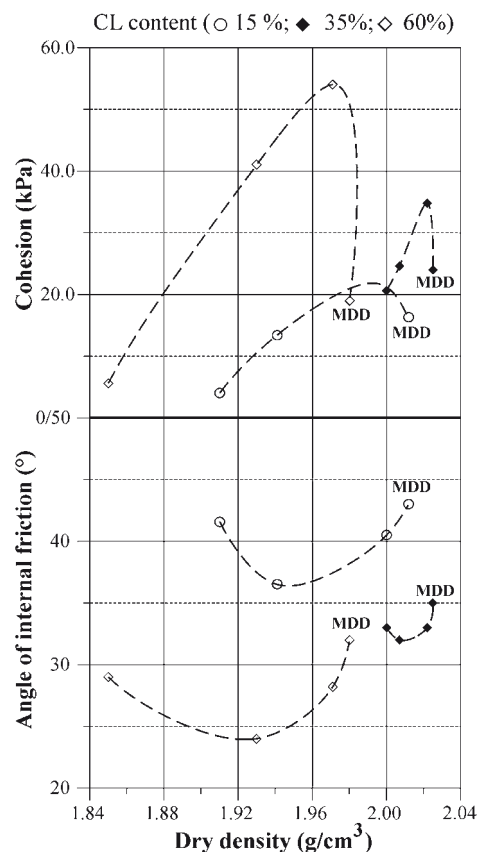


Fig. 7 - Andamento dei parametri meccanici al variare della densità secca.  
- Effect of dry density on shear strength parameters

nal friction. For mixtures with a high fine fraction content (CL = 60%), a small reduction in dry density produces a more than 50% increase in cohesion and about a 40% reduction in the angle of internal friction. The internal friction angle curve trends with the varying of dry density indicate that the mechanical behavior of the mixtures analyzed are assimilable to those of granular soils having low percentage of clay fraction, with maximum values obtained closed to MDD.

This work is to be considered a starting point for further studies to be extended to other clayey deposits, in different sedimentary environments and especially having different mineralogical compositions. The results obtained not only increase knowledge of the physical-mechanical properties of clayey-sandy soils in central Italy, but may also be useful in road engineering applications.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank Prof. Massimo Setti of University of Pavia for mineralogical analysis and Dr. Sabrina Nazzareni of University of Perugia for the SEM/EDS analysis.

This paper was partially financed by ISTDIL.

**PARAMETRI DI RESISTENZA AL TAGLIO DI TERRE COESIVE COMPATTATE:  
ANALISI DEI TERRENI ARGILLOSO-SABBIOSI DE I “LISCIANI DI PANTALLA” (TODI - ITALIA CENTRALE)**

**OPERE CITATE/REFERENCES**

- AMBROSETTI P., BASILICI G., BARBATO L. C., CARBONI G., STEFANO G., ESU D., GLIOZZI E., PETRONIO, C., SARDELLA R. & SQUAZZINI E. (1993) - *Il Pleistocene inferiore sul ramo sudoccidentale del Bacino Tiberino (Umbria): aspetti litostratigrafici e biostratigrafici*. Il Quaternario, **8** (1): 19-36.
- AL-SHAYEA N.A. (2001) - *The combined effects of clay and moisture content on the behaviour of remolded unsaturated soils*. Engineering Geology, **62**: 319-342.
- BASILICI G. (2000) - *Flood plain lake deposits on an Early Pleistocene alluvial plain (Tiberino Basin, Central Italy)*. AAPG Memoir, **46**: 535-542.
- BASILICI G. (1991) - *Sedimentologia e stratigrafia dei depositi continentali del bacino intramontano di Todi, Plio-Pleistocene (Umbria)*. Annual Scientific Meeting of the Gruppo Informale di Sedimentologia of the CNR, Bologna.
- BISHOP A.W. & HENKEL D.J. (1962) - *The measurement of soil properties in the triaxial test*. Edward Arnold 2<sup>nd</sup> ed., London.
- BREWER R. (1976) - *Fabric and Mineral Analysis of Soils*. Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York.
- CANDIO S., DAMIANI A.V., FEDERICO A., SETTI M., VENIALI F. & VINTI G. (1992) - *Caratterizzazione geotecnica e mineralogica di unità argillose dell'Umbria*. Geologia Applicata e Idrogeologia, XXVII: 123-133, Bari.
- CATTUTO C. CENCETTI C. & GREGORI L. (1988) - *Lo studio dei corsi d'acqua minori dell'Italia appenninica come mezzo di indagine sulla tettonica del Plio-Pleistocene*. Atti del convegno: «I corsi d'acqua minore dell'Italia appenninica- Aspetti ecologici e gestionali». Aulla, 22-24 Giugno 1987; Boll. Mus. St. Nat. Lunigiana, 6/7: 7-10.
- CENCETTI C. (1990) - *Il Villafranchiano della «riva umbra» del fiume Tevere: elementi di geomorfologia e neotettonica*. Boll. Soc. Geol. It., **109** (12): 337-350.
- CETIN H., FENER M., SÖYLEMEZ M. & GÜNAYDIN B. (2007) - *Soil structure changes during compaction of a cohesive soil*. Engineering Geology, **92**: 38-48
- COCKA E., EROL O. & ARMANGIL F. (2004) - *Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay*. Geotechnical and Geological Engineering, **22**: 285-297, Kluwer Academic Publisher.
- CONTI M.A. & GIROTTI O. (1977) - *Il Villafranchiano nel Lago Tiberino: schema stratigrafico e tettonico*. Geologica Romana, **16**: 67-80.
- DIAMOND S. (1970) - *Pore size distribution in clays*. Clays and Clay Minerals, **18**: 7-23.
- HOLTZ R.D. & KOVACS W.D. (1981) - *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall, Eaglewood Cliffs.
- HORN H.M. & DEERE D.U. (1962) - *Frictional characterization of minerals*. Geotechnique, **12** (4): 319-335.
- KONG L.W. & TAN L.R. (2000) - *Study on shear strength and swelling-shrinkage characteristic of compacted expansive soil, Unsaturated Soils for Asia*. Rahardjo, Toll and Leong (eds.), Balkema, Rotterdam: 515-519.
- LADD C.C. (1971) - *Strength Parameters and Stress-Strain Behavior of Saturated Clays*. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, R71-23, SO 278.
- LAMBE T.W. & WHITMAN R.W. (1979) - *Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, New York, 553 pp.
- LUCZAK-WILAMOWSKA B. (2002) - *Neogene clays from Poland as mineral sealing barriers for landfills: experimental study*. Applied Clay Science, **21**: 33-43, Elsevier Science.
- MITCHELL J.K. (1993) - *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons, New York.
- MITCHELL J.K. (1956) - *The fabric of natural clays and its relation to engineering properties*. Proceedings of the Highway Research Board, **35**: 693-713.
- PROCTER D.C. & BARTON R.R. (1974) - *Measurements of the angle of interparticle friction*. Geotechnique, **24** (4): 581-604.
- SCHMITZ R.M., SCHROEDER C. & CHARLIER R. (2004) - *Chemo-mechanical interactions in clay: A correlation between clay mineralogy and Atterberg limits*. Applied Clay Science, **26** (1-4): 351-358.
- SEED H.B. & CHAN C.K. (1959) - *Structure and strength characteristics of compacted clays*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, **85** (5): 87-128.
- SPOSITO G. (1984) - *The Surface Chemistry of Soils*. Oxford University Press, New York, 234 pp.
- TOLL D. G. (2000) - *The influence of fabric on the shear behavior of unsaturated compacted soils*. Geotechnical Special Publication ASCE, **99**: 222-234.

*Received January 2007 - Accepted November 2007*