

**STUDIO COMPARATIVO SULLA STANDARDIZZAZIONE  
INTERNAZIONALE DELLE PROCEDURE DI LABORATORIO PER  
IL CONFEZIONAMENTO DI MISCELE TERRENO CEMENTO**

Massimo Grisolia  
*Sapienza, Università di Roma*  
*massimo.grisolia@uniroma1.it*

Masaki Kitazume  
*Port and Airport Research Institute*  
*kitazume@pari.go.jp*

Enrico Leder  
*Sapienza Università di Roma*  
*enrico.leder@uniroma1.it*

Ignazio Paolo Marzano  
*Sapienza Università di Roma*  
*paolo.marzano@uniroma1.it*

**Sommario**

Il presente lavoro si inserisce in una ricerca internazionale verso la standardizzazione delle procedure di controllo della qualità di un intervento di Deep Mixing. In particolare è stato studiato l'effetto di diverse tecniche di confezionamento per la preparazione di provini di miscele terreno-cemento da sottoporre a prove preliminari di laboratorio. Sono state testate dieci miscele a diversa consistenza impiegando cinque tecniche di compattazione, denominate Compattazione Dinamica, Compattazione Statica, Tapping, Rodding e Nessuna Compattazione. Il terreno impiegato è l'argilla "Kawasaki clay". I risultati mostrano l'influenza delle diverse procedure usate sulla resistenza a compressione non confinata e sul peso di volume dei provini stabilizzati. L'applicabilità di ciascun metodo impiegato è fortemente influenzata dalla consistenza iniziale della miscela, funzione del tipo di terreno e dei contenuti d'acqua e di cemento.

**Introduzione**

Il presente lavoro rientra in un programma di ricerca internazionale "WG 14" coordinato dal Prof. Kitazume (Port and Airport Research Institute, Japan), mirante alla standardizzazione delle procedure di controllo e assicurazione di qualità sui terreni stabilizzati mediante Deep Mixing. In particolare lo studio mira ad inquadrare l'influenza delle tecniche di confezionamento di miscele terreno-cemento nella preparazione di provini da sottoporre a prove preliminari di laboratorio (Kitazume, 2010). A tal fine sono state testate dieci miscele a diversa consistenza, impiegando come terreno l'argilla "Kawasaki Clay", e applicando cinque tecniche di confezionamento dei provini, denominate Compattazione Dinamica, Compattazione Statica, Tapping, Rodding e Nessuna Compattazione. Le miscele ottenute sono state suddivise in tre gruppi, in base alla consistenza iniziale. Sui provini ottenuti sono state condotte prove di compressione ad espansione laterale libera (ELL).

## Programma e prove di Laboratorio

In laboratorio sono stati confezionati circa 200 provini, sui quali sono state condotte prove di compressione ELL. Per ciascun caso di prova sono stati prodotti e testati tre provini.

### Materiali e condizioni di prova

Le dieci miscele studiate sono state realizzate miscelando l'argilla "Kawasaki clay" (proprietà riportate in Tabella 1) con diversi contenuti d'acqua iniziali,  $w_n(\%)$  insieme con cemento tipo Portland in polvere, addizionato asciutto con tre contenuti di cemento,  $a_c(\%)$  (rapporto del peso del cemento secco rispetto al peso del terreno asciutto) (Tabella 2). La consistenza iniziale di ciascuna miscela è stata valutata mediante lo scissometro tascabile, misurando quindi la resistenza al taglio in condizioni non drenate,  $c_u$  (kPa). I valori di resistenza iniziale ottenuti per le miscele fresche sono in un ampio range, da 3 ÷ 29kPa. Si riporta in Tabella 2 anche il rapporto cemento su acqua della miscela,  $C/Mw$  (%) (rapporto del peso del cemento secco rispetto al peso dell'acqua totale della miscela).

Tabella 1. Proprietà dell'argilla "Kawasaki Clay"

Peso specifico, $G_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,676	
Contenuto naturale d'acqua, $w_n$ (%)	57,0	
Limite liquido, $w_L$ (%)	48,6	
Limite plastico, $w_P$ (%)	23,0	
Indice plastico, $I_P$ (%)	25,6	
Contenuto sabbia (%), 75µm - 2mm	14,0	
Contenuto limo (%), 5µm - 75µm	42,0	
Contenuto argilla (%), < 5µm	44,0	

### Procedure di confezionamento dei provini

L'argilla stabilizzata era disposta in tre strati all'interno dello stampo cilindrico (50mm di diametro e 100mm di altezza) per tutte le tecniche impiegate. Le cinque procedure adottate sono di seguito descritte:

- Compattazione Dinamica, *D.C.*: Ha previsto la compattazione di ciascuno strato mediante una massa battente di 1,5kg utilizzando un apposito apparato. L'altezza di caduta è stata di 10cm, il numero di battute è stato scelto pari a 5.
- Compattazione Statica, *S.C.25* e *S.C.50*: Consistente in una compressione statica impressa da un cilindro metallico applicato per un tempo di 10 secondi (Sono state applicate due diverse pressioni: 25 and 50 kPa).
- Tapping, *TA.50* e *TA.100*: In seguito alla disposizione di ciascuno strato, lo stampo veniva battuto contro il piano di lavoro per 50 volte (valore standard). Il numero di battute è stato aumentato a 100 volte in alcuni casi (Tapping 100, solo per i gruppi B e C).
- Rodding, *RO.*: questa metodologia ha previsto il confezionamento del provino in tre strati usando un'asta cilindrica di metallo (8mm di diametro) per la compattazione. Ogni strato è stato infatti compattato con trenta movimenti verticali punzonanti, e spingendo in basso il materiale eventualmente rimasto attaccato all'asta.
- Nessuna Compattazione, *N.C.*: semplicemente è consistita nel riempire lo stampo versando la miscela (se a comportamento liquido) o tramite l'utilizzo di una spatola in caso di più elevata consistenza.

Tabella 2. Caratteristiche delle miscele testate

Miscela	Contenuto cemento, $a_c$ (%)	Contenuto acqua, $w_n$ (%)	Resistenza a taglio, $c_u$ (kPa)	Cemento/acqua totale, C/Mw (%)	Tecniche di confezionamento* aggiuntive
<i>m1</i>	5	72	3,01	7,10	S.C.50
<i>m2</i>	5	66	5,79	7,69	-
<i>m3</i>	5	60	7,46	8,63	-
<i>m4</i>	20	66	8,80	31,30	S.C.50
<i>m5</i>	20	60	13,15	36,18	S.C.50, TA.100
<i>m6</i>	30	60	15,49	53,36	S.C.50
<i>m7</i>	20	54	18,84	38,79	S.C.50
<i>m8</i>	30	54	21,75	57,21	S.C.50
<i>m9</i>	20	49	24,76	42,43	S.C.50
<i>m10</i>	30	49	28,54	63,92	S.C.50, TA.100

\*Tecniche usate per tutte le miscele: D.C., S.C.25, TA.50, RO., N.C..



Figura 1. Tecniche di compattazione, da sinistra verso destra: D.C., S.C.25, S.C.50, TA.50/TA.100, RO., N.C..

La fase di preparazione dei materiali ha previsto l'aggiustamento del contenuto d'acqua dell'argilla, l'omogeneizzazione del terreno nel miscelatore e la successiva aggiunta di cemento Portland secco. Il materiale è stato poi miscelato per il tempo standard di 10 minuti. La resistenza a taglio non drenata (misurata con scissometro) e il contenuto d'acqua della miscela sono stati determinati prima di iniziare la fase di confezionamento dei provini. In seguito il terreno stabilizzato è stato introdotto negli stampi e compattato secondo le diverse tecniche descritte in precedenza. I provini ottenuti sono stati inseriti all'interno di cassette di maturazione e mantenuti in condizioni di temperatura 20°C e umidità relativa 95%. In seguito al tempo di maturazione fissato pari a 28 giorni il generico provino è stato estratto dallo stampo, misurato con calibro, pesato con bilancia di precisione e successivamente sottoposto a prova di compressione ELL alla velocità di compressione pari a 1,0mm/min.

### Risultati ed analisi

Sono riportati in Figura 2 i valori ottenuti in termini di resistenza e peso di volume (indice della densità del provino) per i provini testati, a 28 giorni di maturazione. È possibile constatare un andamento non lineare delle proprietà analizzate con la consistenza, dipendente dal contenuto d'acqua e di cemento. I valori di resistenza relativi alle miscele *m1*, *m2* ed *m3*, caratterizzate da un basso contenuto di cemento, risultano nettamente inferiori rispetto agli altri.

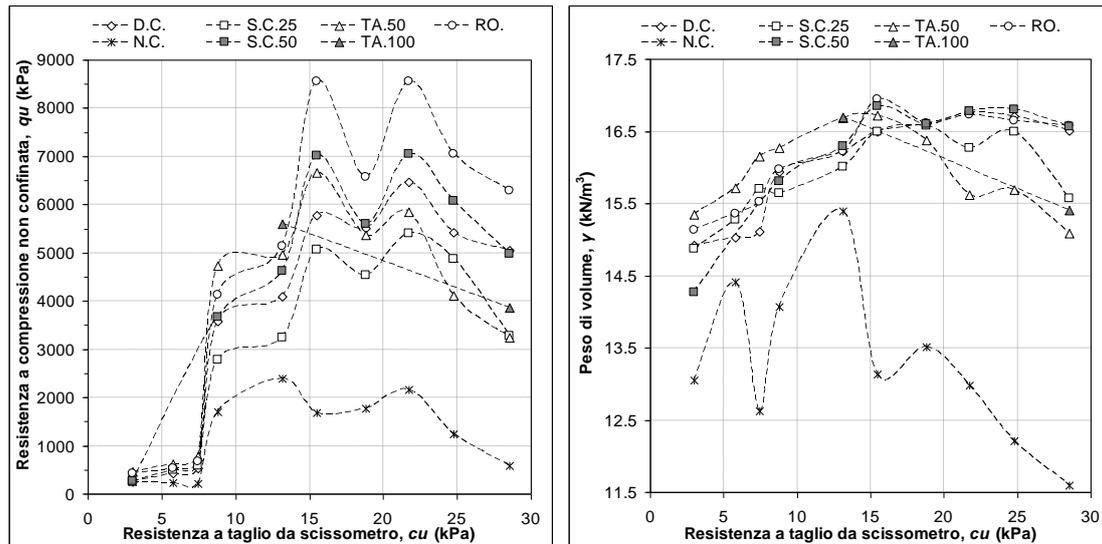


Figura 2. Resistenza a compressione non confinata,  $q_u$  e peso di volume,  $\gamma$  a 28 giorni di maturazione vs Resistenza a taglio da scissometro,  $c_u$  per le diverse tecniche di compattazione impiegate.

Nei paragrafi successivi sono analizzati i valori di resistenza  $q_u$  e peso di volume normalizzati e gli errori relativi sulla resistenza e peso di volume, ai fini di una valutazione della rappresentatività dei risultati ottenuti dalle prove di laboratorio.

#### Resistenza a compressione $q_u$ e peso di volume normalizzati

Al fine di permettere un più agevole confronto tra i risultati ottenuti per le diverse miscele, i valori di resistenza  $q_u$  e il peso di volume dei provini sono stati normalizzati rispetto a quelli ottenuti con il metodo *TA.50*, considerato come la tecnica di riferimento (Figura 3).

È stato quindi ritenuto maggiormente applicabile un metodo di confezionamento che, a partire dalla medesima miscela e quindi consistenza, garantisca le migliori proprietà dei provini in termini di valori massimi di resistenza e peso di volume. Rispetto alle miscele più soffici, il metodo *TA.50* è risultato essere il migliore in termini di resistenza e densità, seguito dalla tecnica *RO*. Nel caso di miscele più consistenti, le procedure *RO* ed *S.C.50* sono risultate prevalere sulle altre. La tecnica *N.C.* ha sempre fornito i risultati più bassi, pertanto è stata considerata non applicabile nel range di consistenze studiato. Le differenze riscontrate per i valori di resistenza sono risultate maggiori rispetto a quelle valutate per i valori di peso di volume. Possono inoltre essere fatte alcune osservazioni sull'influenza dei parametri operativi nel caso delle tecniche Compattazione Statica e Tapping: nel caso delle miscele meno consistenti, si hanno risultati comparabili per le tecniche *S.C.25* ed *S.C.50*, mentre migliori risultati sono ottenuti per la procedura *S.C.50* a più alte consistenze, indice del positivo effetto dovuto all'aumento dell'energia di compattazione. Simili considerazioni sono ottenute dal confronto delle tecniche *TA.50* e *TA.100*, possibile solo nei due casi testati delle miscele *m5* ed *m10*.

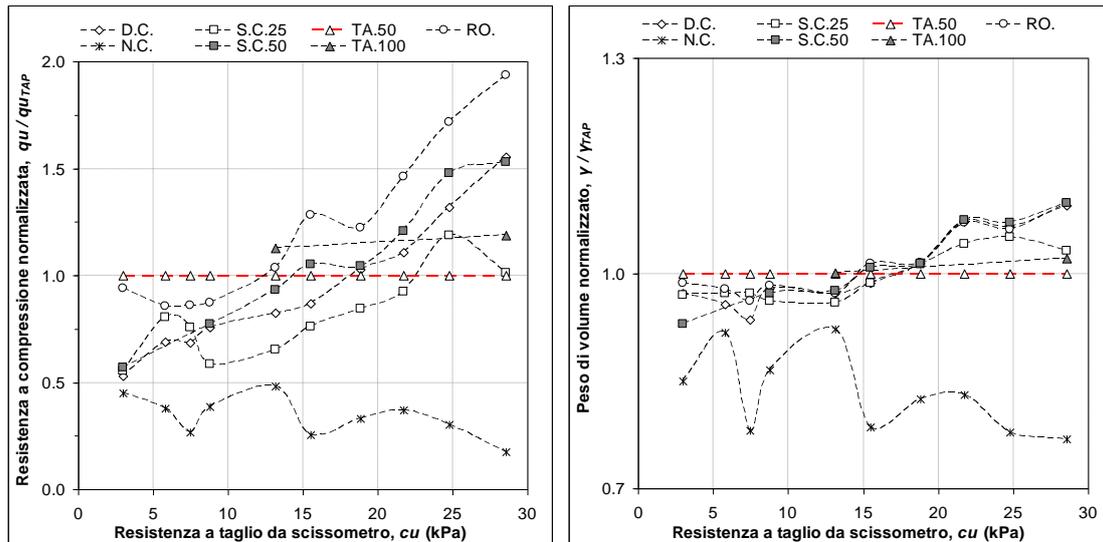


Figura 3. Resistenza a compressione non confinata,  $q_u$  e peso di volume,  $\gamma$  normalizzati a 28 giorni di maturazione vs Resistenza a taglio da scissometro,  $c_u$  per le diverse tecniche di compattazione impiegate.

#### Errori relativi sulla resistenza a compressione $q_u$ e peso di volume

È stato considerato come parametro indicativo dell'applicabilità di una procedura di confezionamento la ripetibilità dei risultati ottenibili tramite ciascuna tecnica. A tal fine, si è ipotizzato di utilizzare gli errori relativi sulla resistenza  $q_u$  e peso di volume,  $E_{q_u}$  ed  $E_\gamma$  (definiti come la differenza tra il valore massimo e minimo divisa per il valore medio). I risultati ottenuti sono graficati in Figura 4.

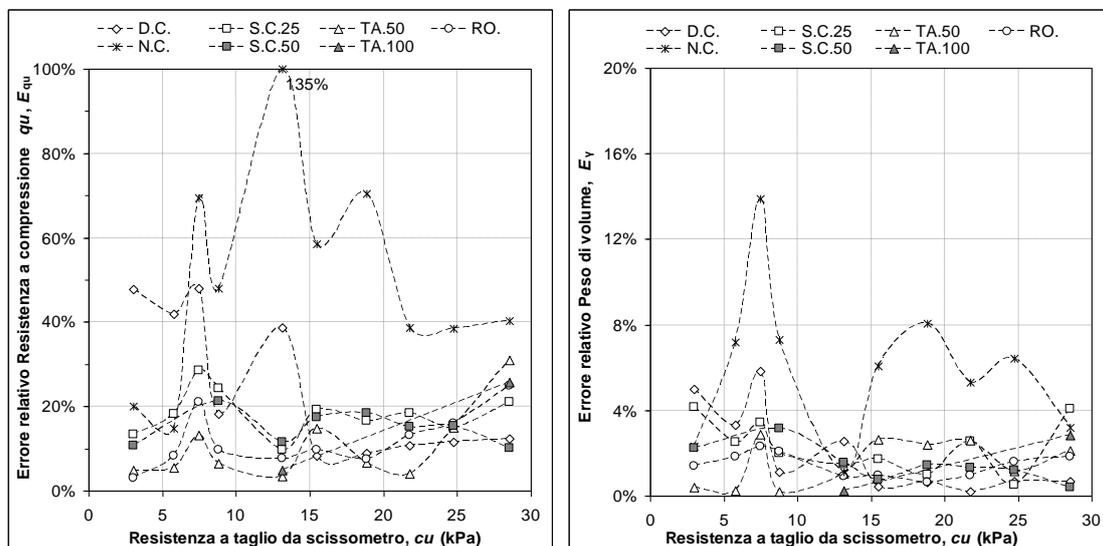


Figura 4. Errori relativi sulla resistenza a compressione  $q_u$  e peso di volume  $E_{q_u}$  ed  $E_\gamma$  a 28 giorni di maturazione vs Resistenza a taglio da scissometro,  $c_u$  per le diverse tecniche di compattazione impiegate.

È stata ritenuta maggiormente applicabile la procedura per la quale si fossero riscontrati gli errori minori a parità di consistenza della miscela. Alcuni valori di  $E_{q_u}$  determinati per le procedure D.C. ed S.C.25 per le miscele a più bassa consistenza sono risultati superiori al 20%, indice della non applicabilità di tali tecniche per questo tipo di miscele. I valori di  $E_{q_u}$  ottenuti per la procedura N.C., sono risultati minori nel caso delle miscele  $m1$  ed  $m2$ , aventi un comportamento semi-liquido. Per le diverse miscele e procedure utilizzate negli altri casi,

$E_{qu}$  è risultato inferiore al 20%. I valori ottenuti per l' $E_{\gamma}$  sono generalmente molto bassi, se paragonati a quelli ottenuti per l' $E_{qu}$ , pur mantenendo andamenti simili. È stato quindi deciso di trascurare i valori ottenuti per l' $E_{\gamma}$  e di considerare come applicabili le tecniche che riportassero un  $E_{qu}$  inferiore al 10%. Sono risultate maggiormente applicabili le tecniche di TA.50 e RO. per quasi tutte le consistenze indagate. Ad elevate consistenze (miscele m9 ed m10) nessuna tecnica ha riportato un  $E_{qu}$  inferiore al 10%, pertanto in tali casi potrebbe essere suggerito l'impiego di maggiore energia di compattazione, variando i parametri operativi delle tecniche di confezionamento (ad esempio tramite un aumento della pressione statica o dinamica applicata).

### **Conclusioni**

Il programma di laboratorio svolto ha consentito di ottenere alcune utili indicazioni sulla influenza delle tecniche di confezionamento sulla rappresentatività delle prove preliminari di laboratorio così come condotte in un trattamento di Deep Mixing.

In particolare, nel caso di miscele meno consistenti, i provini realizzati tramite il metodo Tapping hanno garantito un minore errore sui risultati, indice positivo di una ripetibilità di tale tecnica, e sono stati caratterizzati da valori massimi di resistenza e peso di volume massimi. Viceversa per le miscele maggiormente consistenti sono stati riscontrati i migliori risultati di miscelazione con la tecnica Rodding, ed in misura minore con la Compattazione Dinamica e Compattazione Statica (50kPa), caratterizzate da una maggiore energia di compattazione.

I risultati ottenuti costituiranno una base suscettibile di integrazione con i dati ricavati dalle diverse organizzazioni partecipanti al programma di ricerca internazionale e riferiti ad altri terreni tipici.

### **Ringraziamenti**

Lo studio presentato è frutto della collaborazione tra la Sapienza, Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA) e il Port and Airport Research Institute (PARI), Yokosuka, Giappone. Gli autori desiderano ringraziare per i preziosi consigli e l'aiuto fornito nell'esecuzione delle prove i componenti del Soil Stabilization Group del PARI.

### **Bibliografia**

- Kitazume M. (2010). DRAFT Proposal for Activity 2: Comparison of Different Laboratory Mix Test Procedures.
- Kitazume M., Terashi M. (2009). Current Practice and Future Perspective of QA/QC for Deep-Mixed Ground. *International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization*, Okinawa.
- Kitazume M., Nishimura S., Terashi M., Ohishi K. (2009). International Collaborative Study Task 1 Investigation into Practice of Laboratory Mix Tests as Means of QC/QA for Deep Mixing Method. *International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization*, Okinawa.
- Kasama K., Zen K., Iwataki K. (2006). Undrained shear strength of cement-treated soils. *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society.
- JGS (2000). Practice for Making and Curing Stabilized Soil Specimens Without Compaction. *Japanese Geotechnical Society Standard*. Volume 5, Capitolo 7.