

ANALISI SPERIMENTALE DELL'EFFETTO DELLA VELOCITÀ SULLA RESISTENZA A TAGLIO

Luigi Mongiovì

Università degli Studi di Trento

luigi.mongiovi@ing.unitn.it

Anna Pasquato

Università degli Studi di Trento

pasquanna86@libero.it

Sommario

Obiettivo dello studio è la valutazione della componente viscosa della resistenza a taglio residua dei terreni. L'attività sperimentale è stata svolta mediante prove di taglio diretto per le quali è stato sviluppato un procedimento per la determinazione della relazione tra resistenza a taglio e velocità, nel campo delle basse velocità. Sono state realizzate le necessarie modifiche alle attrezzature disponibili e particolare attenzione è stata prestata all'accuratezza degli strumenti di misura e alla loro taratura. Le prove sono state eseguite su provini ricostituiti in laboratorio e dall'interpretazione dei risultati è stata ottenuta la relazione tra la forza di taglio e la velocità lungo il piano di taglio nell'intervallo di velocità $0.1 \div 10000$ mm/anno.

1. Introduzione

La resistenza a taglio dei terreni è somma della componente statica, relativa ad una velocità nulla sul piano di taglio, e della componente viscosa, che aumenta al crescere della velocità.

Nelle frane molto lente, che si muovono con velocità intorno a 10 mm/anno, la componente viscosa della resistenza viene mobilitata per assicurarne l'equilibrio. Nell'analisi di queste frane, pertanto, è importante valutare l'aliquota di resistenza dipendente dalla velocità.

La sperimentazione in laboratorio a velocità minori di 10 mm/anno è di difficile esecuzione e richiede tempi molto lunghi. Per questo motivo è stato sviluppato un nuovo procedimento di prova mediante il quale è stato possibile determinare abbastanza rapidamente la relazione tra la resistenza a taglio e la velocità, fino a velocità intorno a 0.1 mm/anno.

2. Apparecchiature e strumentazione

La sperimentazione è stata effettuata adoperando due macchine di taglio diretto convenzionali modello ELE 26-2112.

Particolare attenzione è stata dedicata alla taratura degli strumenti di misura delle macchine, 1 e 2, controllandone l'accuratezza anche nelle effettive condizioni di prova. Nella Tab I sono riportati i risultati della taratura dei trasduttori induttivi impiegati per la misura degli spostamenti.

I trasduttori per la misura degli spostamenti orizzontali sono stati tarati anche in intervalli di 0.5 mm allo scopo di valutare la loro accuratezza nel caso di spostamenti contenuti in intervalli di questa ampiezza.

| misura | intervallo | passo | macchina | deviazione standard |
|-------------------------|--|----------|----------|---------------------|
| spostamento verticale | 0 ÷ 10 mm | 0.5 mm | 1 | 0.007 mm |
| | | | 2 | 0.015 mm |
| spostamento orizzontale | 0 ÷ 10 mm | 0.4 mm | 1 | 0.005 mm |
| | | | 2 | 0.007 mm |
| | 2 ÷ 2.5 mm 4 ÷ 4.5 mm 6 ÷ 6.5 mm 8 ÷ 8.5 mm | 0.005 mm | 1 | 0.002 ÷ 0.002 mm |
| | | | | 0.003 ÷ 0.002 mm |
| | | | | 0.003 ÷ 0.003 mm |
| | | | | 0.003 ÷ 0.003 mm |
| | | | 2 | 0.004 ÷ 0.002 mm |
| | | | | 0.003 ÷ 0.003 mm |
| | | | | 0.003 ÷ 0.003 mm |
| | | | | 0.002 ÷ 0.003 mm |

Tab. I – Taratura dei trasduttori di spostamento.

I risultati della taratura dei trasduttori resistivi impiegati per la misura delle forze di taglio sono riportati nella Tab. II.

Le tarature sono state eseguite posizionando i trasduttori sia sotto una pressa sia direttamente nella loro sede nelle macchine di taglio e, nella seconda configurazione, è stata eseguita anche una taratura locale.

| taratura | intervallo | passo | macchina | deviazione standard |
|-----------------|-------------|-------|----------|---------------------|
| sotto la pressa | 0 ÷ 1000 N | 100 N | 1 | 0.52 N |
| | | | 2 | 0.58 N |
| nella macchina | 0 ÷ 500 N | 100 N | 1 | 2.46 N |
| | | | 2 | 2.75 N |
| | 260 ÷ 285 N | 5 N | 1 | 0.15 N |
| | | | 2 | 0.21 N |

Tab. II – Taratura dei trasduttori di forza.

Confrontando le curve di taratura nell'intervallo 600 ÷ 800 N, si è osservata una riduzione, dalla misura indiretta a quella diretta, del 10 e dell'8 %. Tali differenze non sono affatto trascurabili e possono essere attribuite alle diverse condizioni di vincolo dei trasduttori.



Fig. 1 – Vecchia e nuova posizione dei trasduttori di spostamento orizzontale.

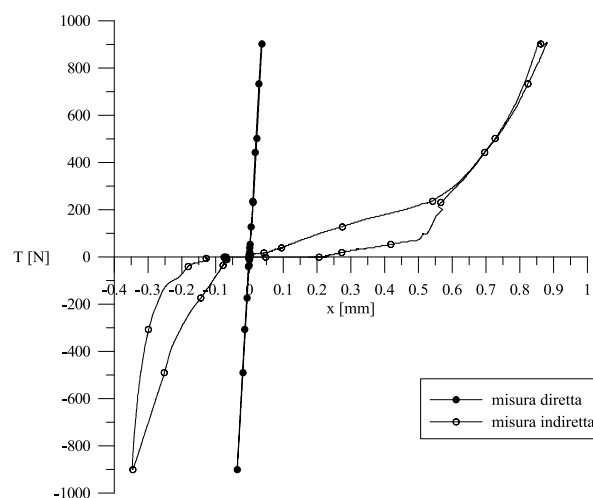


Fig. 2 – Effetto della posizione dei trasduttori nella taratura dell'apparecchiatura.

L'apparecchiatura è stata tarata fissando mediante bulloni la parte inferiore della scatola di taglio al contenitore e la parte superiore della scatola alla parte inferiore. Le misure degli spostamenti orizzontali sono risultate affette da una elevata non linearità, isteresi e non ripetibilità e, per questo motivo, è stato necessario spostare il trasduttore per effettuare una misura diretta dello spostamento relativo tra le due parti della scatola (Fig.1).

Nella Fig.2 si riportano i risultati di una taratura eseguita impiegando simultaneamente entrambi i sistemi di misura. Con riferimento al sistema di misura convenzionale si osserva che per un intervallo della forza di taglio ± 900 N gli spostamenti misurati hanno un andamento molto irregolare e variano considerevolmente tra circa -0.35 e $+0.85$ mm. Le misure effettuate con il nuovo sistema sono invece caratterizzate da spostamenti compresi nell'intervallo ± 0.035 mm e presentano un andamento quasi lineare con deviazione standard 0.001 mm.

3. Terreno

La sperimentazione è stata condotta sulla bentonite calcica AG/1W. Le proprietà indici, determinate da precedenti sperimentatori, sono il contenuto d'acqua al limite di liquidità $w_L = 1.254$ e al limite di plasticità $w_P = 0.493$, l'indice di plasticità $I_P = 0.761$ e la densità spspecifica $G_s = 2.55$.

I provini di bentonite sono stati preparati in laboratorio ad un contenuto d'acqua iniziale $w_1 = 1.594$ e $w_2 = 1.464$ e consolidati nella scatola di taglio incrementando a passi il carico verticale fino a 1000 kPa. Alla fine della consolidazione i contenuti d'acqua sono stati $w_1 = 0.439$ e $w_2 = 0.427$.

I provini consolidati sono stati estratti dalla scatola ed è stata ridotta la loro altezza a 7 mm; sono stati quindi rimessi nella scatola ponendo la base del provino 2 mm al di sotto del piano di taglio.

4. Prova di arresto

Le prove sono state eseguite contemporaneamente e in modo identico su entrambe le apparecchiature 1 e 2 per verificare la correttezza dei risultati. I provini sono stati sottoposti a cicli di taglio fino al raggiungimento della resistenza residua alla velocità di 0.0035 mm/min (Fig. 3).

In condizioni di resistenza residua è stato arrestato il motore delle macchine per valutare la conseguente riduzione di resistenza.

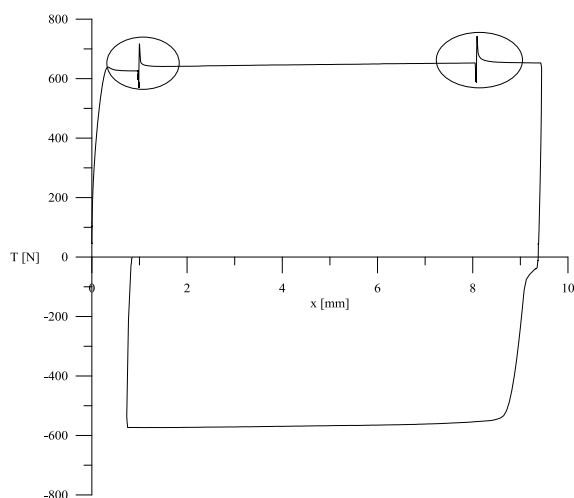


Fig. 3 – Ciclo di taglio diretto.

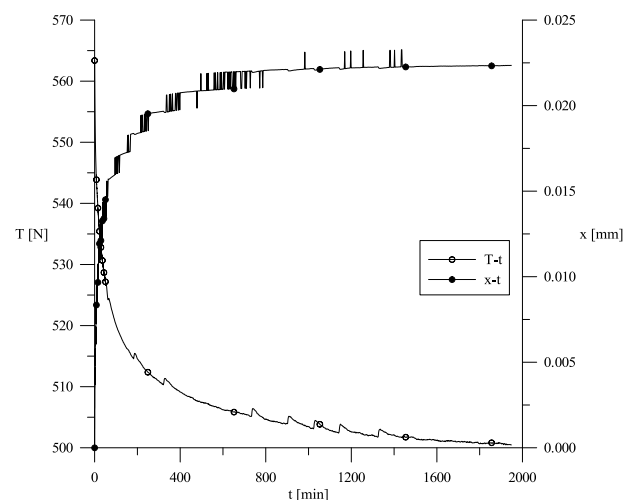


Fig. 4 – Prova di arresto.

Durante la prova di arresto è stata effettuata la misura delle forze di taglio T e degli spostamenti orizzontali x e nella Fig. 4 si riporta l'andamento tipico delle misure in funzione del tempo t .

Si osserva una riduzione della forza di taglio e un corrispondente aumento degli spostamenti malgrado l'arresto delle macchine. Questo incremento degli spostamenti orizzontali è stato attribuito alle deformazioni dell'apparecchiatura conseguenti alla riduzione della forza orizzontale applicata. Tale circostanza ha permesso di mettere in relazione la riduzione della forza di taglio con la riduzione della velocità, ricavata dalle misure nel tempo dello spostamento.

Allo scopo di interpretare tale fenomeno è stato sviluppato un modello reologico (Fig. 5) costituito da un modello visco-plastico, che rappresenta il terreno in condizioni di resistenza residua, posto in serie a due modelli elastici rappresentativi della rigidità della macchina e del sistema di misura.

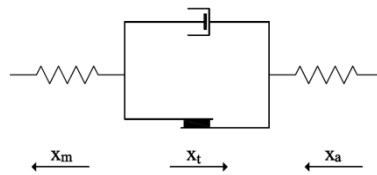


Fig. 5 – Modello reologico della prova di arresto.

La relazione tra la forza di taglio T e lo spostamento del terreno x_t lungo il piano di taglio è:

$$T = T_{st.} + \eta \cdot dx_t / dt$$

dove con $T_{st.}$ è indicata la componente statica della forza di taglio, η è la viscosità e t il tempo.

Le relazioni tra la forza di taglio T e gli spostamenti x_a dell'apparecchiatura e x_m del sistema di misura sono:

$$T = k_a \cdot (x_a + x_{a,0}) \qquad T = k_m \cdot (x_m + x_{m,0})$$

dove con k_a e k_m si indicano le rigidità e con $x_{a,0}$ e $x_{m,0}$ gli spostamenti iniziali, rispettivamente dell'apparecchiatura e del sistema di misura.

Durante l'arresto si ha:

$$\ddot{x}_t + \ddot{x}_m + \ddot{x}_a = 0$$

Ipotizzando comportamenti visco-plastico e elastico lineari e integrando si ottiene:

$$T = T_{st.} + \eta \cdot (dx/dt)_0 \cdot e^{-k/\eta \cdot t}$$

$$x_t = x_{t,0} + \eta/k \cdot (dx_t/dt)_0 \cdot (1 - e^{-k/\eta \cdot t})$$

dove $x_{t,0}$ è lo spostamento iniziale del terreno, $(dx_t/dt)_0$ è la velocità iniziale e $1/k = 1/k_a + 1/k_m$.

5. Analisi dei risultati

Le misure eseguite durante le prove di arresto sono state interpretate per ricavare la relazione tra la riduzione della forza di taglio e la velocità. A questo scopo è stata effettuata una regolarizzazione delle misure, che risultano alquanto instabili a causa della modesta variazione delle grandezze misurate. Si è, pertanto, sviluppato un procedimento di ottimizzazione con il metodo dei minimi quadrati interpolando a tratti i dati sperimentali con polinomi di secondo grado.

In questo modo la velocità è stata determinata e messa in relazione alla resistenza a taglio. Nelle Fig. 6 e Fig. 7 si riporta, per le due apparecchiature, l'andamento della forza di taglio T adimensionalizzata $(T - T_{st})/(T_0 - T_{st})$ in funzione della velocità v , avendo indicato con T_0 la forza di taglio di riferimento, relativa alla velocità di 1000 mm/anno.

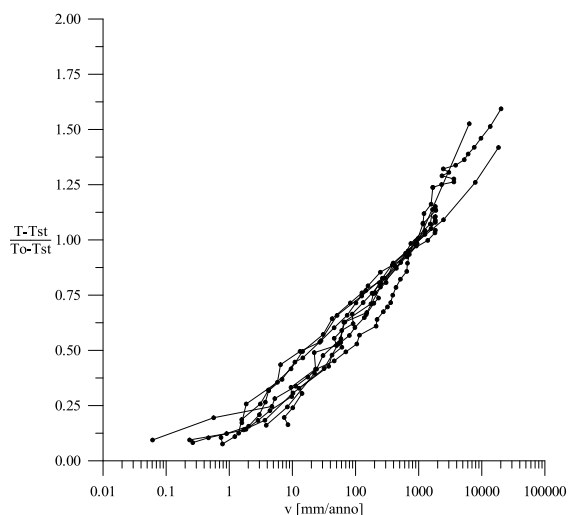


Fig. 6 - Forza di taglio T adimensionalizzata in funzione della velocità v (macchina 1).

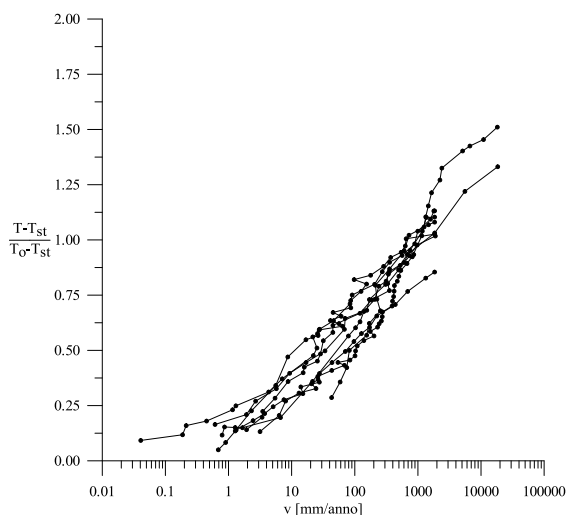


Fig. 7 - Forza di taglio T adimensionalizzata in funzione della velocità v (macchina 2).

Le numerose curve ottenute sono raggruppate in una fascia di larghezza limitata e tendono alla forza di taglio statica quando la velocità tende a zero. Il campo di velocità indagato è molto ampio essendo compreso tra circa 0.1 e 10000 mm/anno ($\sim 10^{-7} \div 10^{-2}$ mm/min). La viscosità del terreno cresce al diminuire della velocità.

6. Conclusioni

Impiegando apparecchiature di taglio diretto convenzionali è stato sviluppato un nuovo procedimento sperimentale mediante il quale è possibile ricavare la relazione tra la resistenza a taglio residua e la velocità lungo il piano di taglio, per velocità particolarmente basse fino a 0.1 mm/anno.

A causa delle piccole variazioni delle grandezze misurate è stato necessario realizzare opportune modifiche ai sistemi di misura e ai metodi di taratura degli strumenti e delle apparecchiature.

La relazione tra la forza di taglio e la velocità può essere impiegata per determinare il miglioramento delle condizioni di stabilità di un pendio in lento movimento necessario per provocarne l'arresto. La componente di resistenza a taglio attivata dal movimento, ricavata sperimentalmente, può essere infatti sostituita da un incremento della componente statica della resistenza o da una corrispondente diminuzione delle azioni instabilizzanti.