

PROVA DI TAGLIO DIRETTO DI GRANDI DIMENSIONI

Nel corso del 2020 il Laboratorio Geotecnico del Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento ha acquistato una nuova apparecchiatura per l'esecuzione di prove di taglio diretto di grandi dimensioni, al fine di indagare la resistenza al taglio di terreni con granulometria fino a 22,4 mm di diametro.

La nuova apparecchiatura è stata messa in marcia a seguito dell'acquisizione di un apposito sistema di sollevamento dedicato, necessario per la movimentazione dei suoi componenti, e dopo le dovute verifiche metrologiche e di sicurezza, diventando così operativa dall'ottobre del 2020.

Da allora non ha mai smesso di funzionare, vista la notevole richiesta di indagine per questo tipo di sperimentazione.

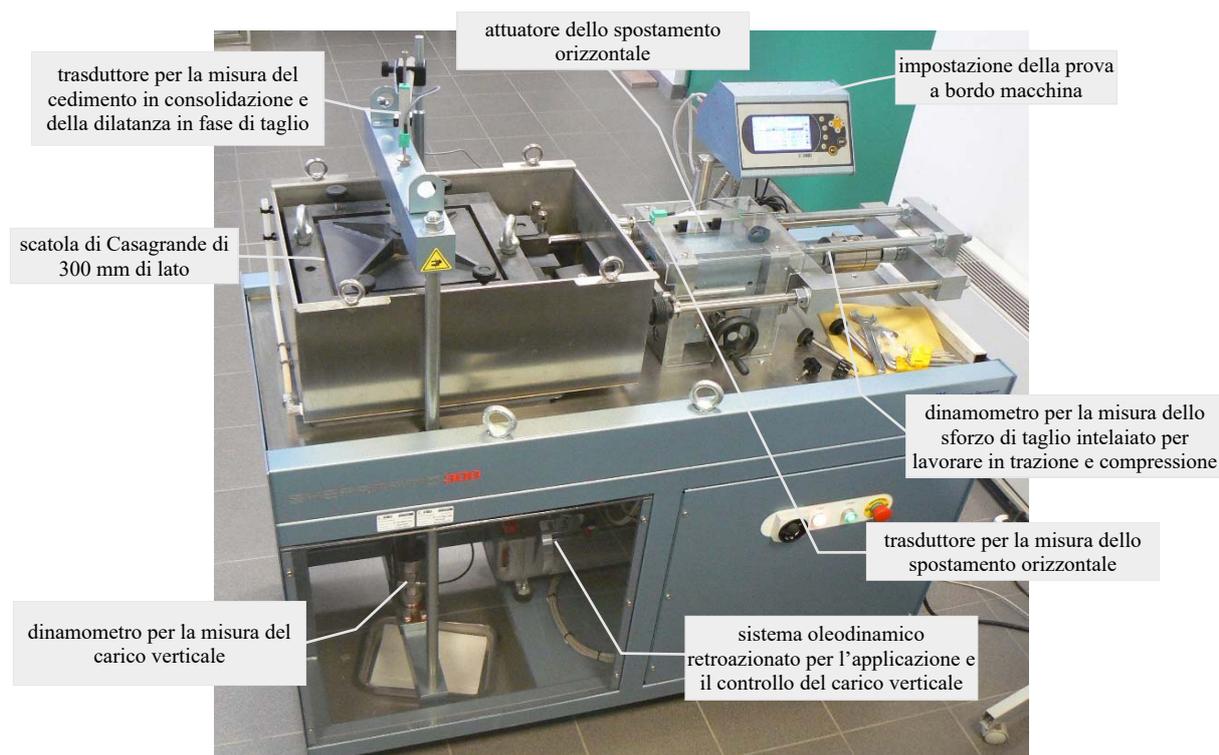


Figura 1: panoramica della nuova macchina di taglio di grandi dimensioni

Perché una nuova macchina di taglio di grandi dimensioni?

L'apparecchiatura tradizionale per prove di taglio diretto sui terreni, dotazione standard di tutti i laboratori geotecnici e prevista dai requisiti ministeriali, è adatta per granulometrie fino a 0,850 millimetri o 1 millimetro di diametro, avendo una scatola di taglio (chiamata "scatola di Casagrande") per provini prismatici di dimensioni 60x60x20 mm.

Nel caso di campioni aventi granulometrie maggiori è perciò necessario selezionare la parte fina del terreno tramite vagliatura con setaccio idoneo e procedere con la prova di taglio diretto, ricostituendo i provini solo con la porzione così separata, specificando sul certificato di prova, accanto ai risultati, le modalità di selezione dei provini.

Tali prove non sono però rappresentative delle effettive caratteristiche al taglio dei terreni a granulometria grossolana, perché le misure non tengono conto del contributo alla resistenza al taglio dato dalla parte di terreno scartata; la loro validità è pertanto intesa solo come valore di riferimento più conservativo.



Figura 2: macchine per prove di taglio tradizionali con scatole di Casagrande di 60 mm di lato.

Solo nel caso in cui le caratteristiche meccaniche sono governate dalla matrice fina, che nella letteratura scientifica di riferimento è indicato essere tipico dei materiali con una percentuale di fino (ossia minore di 63 micron) maggiore al 40% del totale, tali prove possono essere ritenute rappresentative dell'effettivo modello di rottura del terreno analizzato.

La maggior parte degli studi geotecnici dei suoli trentini si focalizza su terreni con percentuale di fino minore del 40%, e pertanto la necessità di dover scartare la loro porzione grossolana non consente di rappresentare correttamente il loro modello di rottura.

L'alternativa alla prova di taglio diretto tradizionale potrebbe essere la prova triassiale su grande diametro, ma essa prevede allestimenti molto più laboriosi di una prova di taglio diretto e specialmente si riferisce a terreni saturi: la saturazione di terreni a grana grossa in cella triassiale non solo comporta tempi tecnici esecutivi molto lunghi, ma porta a rappresentare un modello di rottura che non rispecchia correttamente il reale comportamento dei terreni parzialmente saturi che formano i pendii, le scarpate e le opere in terra che si vogliono indagare.

La nuova macchina di taglio di grandi dimensioni, consentendo la selezione di terreni con granulometria fino a 22,4 mm, estende le possibilità sperimentali a quasi tutti i terreni oggetto di indagine.

Così, dopo aver percepito le esigenze dei fruitori strategici del laboratorio geotecnico, attraverso i processi di orientamento alle parti interessate ben radicati grazie ad un Sistema Qualità maturo, il laboratorio geotecnico ha deciso di acquistare la macchina di taglio di grandi dimensioni per un investimento di poco più di 50.000 euro, confidando in un rientro dei costi entro 8 anni, così come accaduto per altre felici esperienze di investimento fatte in passato, come ad esempio la prova di colonna risonante e taglio torsionale ciclico. Questo senza mettere in conto i benefici economici derivanti da una progettazione basata su parametri più rappresentativi.

In marcia!

La messa in marcia della macchina di taglio di grandi dimensioni ha comportato una piccola riorganizzazione della dislocazione del laboratorio per rendere agevoli e sicure le manovre. Sono seguite le necessarie verifiche metrologiche e alcune prove preliminari per la verifica del corretto controllo del sistema retroazionato per l'applicazione del carico verticale e del movimento orizzontale.



Figura 3: assemblaggio della prova con sistema di sollevamento dedicato.



Figura 4: allestimento di un sistema di controllo dello sforzo orizzontale per una verifica metrologica direttamente in macchina.

Le prime prove

I campioni da sottoporre a prova devono essere forniti in quantità sufficiente per la realizzazione del provino e generalmente sono necessari circa 25 kg di terreno, una quantità elevata che impone operazioni di prelievo impegnative. La realizzazione dei provini avviene direttamente nella scatola di Casagrande disponendo il materiale a strati costipati per ottenere il grado di addensamento al quale la prova viene riferita, con il contenuto in acqua naturale o di progetto.



Figura 5: realizzazione del provino con costipamento tramite pestello direttamente all'interno della scatola di Casagrande (nello specifico, miscela misto cementata del progetto di bonifica della porzione non impermeabilizzata del I lotto della discarica "Maza" in Comune di Arco).

Le prime esperienze hanno riguardato principalmente lo studio di terreni per la progettazione o la sistemazione di opere viarie della provincia (SP90 ad Avio, consolidamento ponte sul Rio Nambrone, variante SS50 del Passo Rolle) o per altri progetti (Realizzazione del Liceo Artistico Vittoria a Trento, Sistemazione del rio Sporeggio a Maso Milano, sistemazione idraulica presso Tenna, bonifica discarica Maza di Arco.).

Raffronto tra risultati di prova

Come chiarito, il principale obiettivo di questo nuovo allestimento di prova è colmare una lacuna sperimentale riguardante i terreni clastosostenuti, che geologi e progettisti sono spesso costretti ad indagare con metodi indiretti o poco rappresentativi. Nel soddisfare questa richiesta, il laboratorio, durante la conduzione della sua attività, in diversi casi ha sottosto i campioni anche alla prova di taglio tradizionale per valutare quantitativamente le differenze dei risultati ottenuti alla luce della selezione granulometrica del terreno indagato (vedi fig. 6).

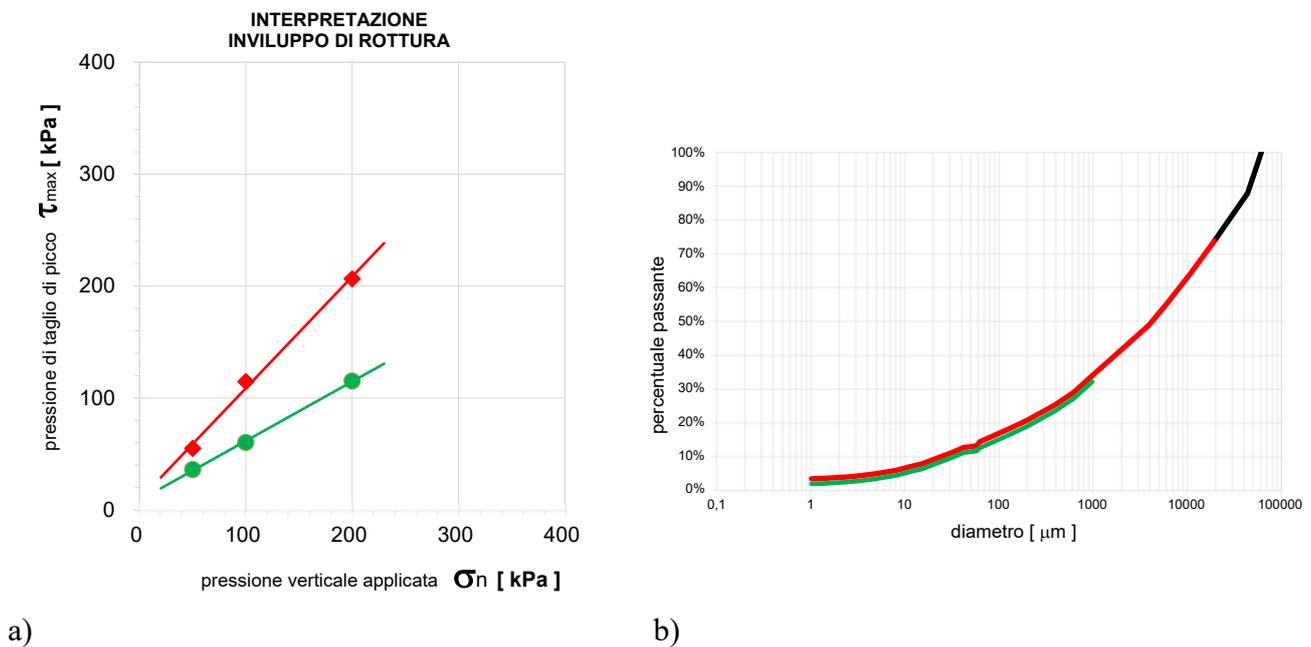


Figura 6: a) confronto tra la prova di taglio tradizionale (in verde), eseguita selezionando la frazione passante a 1 mm, con la nuova prova di taglio di grandi dimensioni (in rosso), condotta sullo stesso campione ma con il passante a 22,4 mm. Gli angoli d'attrito risultanti sono 27,9° e 44,9°. b) curva granulometrica del terreno su cui sono state condotte le due prove per confronto: in rosso è evidenziata la parte di curva rappresentata nella prova di taglio di grandi dimensioni, in verde la frazione selezionata per la prova di taglio tradizionale (ghiaia con sabbia limosa – sistemazione idraulica Rio Fognatura a Tenna).

I fattori che influenzano, in misura quantitativamente diversa, l'angolo di resistenza al taglio di picco dei terreni sono: densità, forma e rugosità dei grani, dimensione media dei grani, distribuzione granulometrica. Il peso di

questi fattori sulla resistenza al taglio dei terreni incoerenti è stato considerato in diverse formule di correlazione da più autori; la più nota è la seguente:

$$\phi' = 36^\circ + \Delta\phi'_1 + \Delta\phi'_2 + \Delta\phi'_3 + \Delta\phi'_4$$

Densità	$\Delta\phi'_1$	sciolta media densa	-6° 0° +6°
Forma e rugosità dei grani	$\Delta\phi'_2$	spigoli vivi media arrotondati molto arrotondati	+1° 0° -3° -5°
Dimensione dei grani	$\Delta\phi'_3$	sabbia ghiaia fine ghiaia grossa	0° +1° +2°
Distribuzione granulometrica	$\Delta\phi'_4$	uniforme media distesa	-3° 0° +3°

(conosciuta come “formula di Chen”, Secondo Congresso Internazionale di Meccanica delle Terre e di Ingegneria delle Fondazioni – Rotterdam – 21-30 giugno 1948 – Società Internazionale per la Meccanica dei Terreni e l’Ingegneria Geotecnica ISSMGE).

Ad esempio, nel caso rappresentato in figura 6 (sistemazione idraulica del Rio Fognatura a Tenna), il contributo di questi fattori ha portato ad una differenza significativa tra le due diverse prove e si ritiene che l’influenza della forma e della rugosità dei grani $\Delta\phi'_2$ della parte più grossolana ha indubbiamente ampliato la già ovvia differenza di scala (vedi fig. 7).

In un paio di occasioni, sono state condotte anche delle prove triassiali su grande diametro selezionando dallo stesso campione la stessa frazione granulometrica, per confrontarle con le prova di taglio di grandi dimensioni.

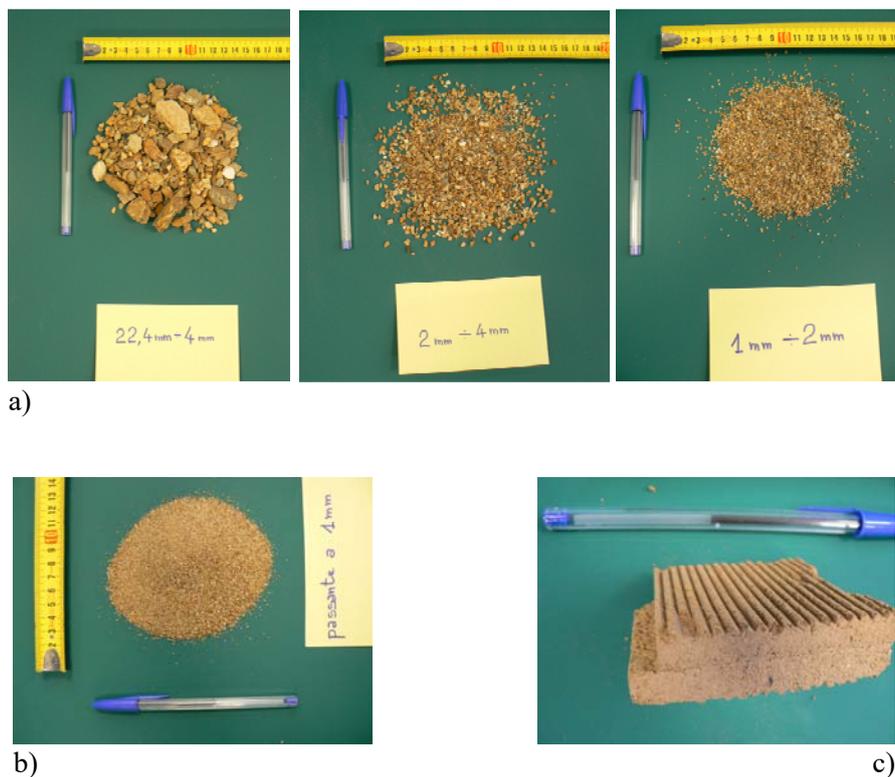


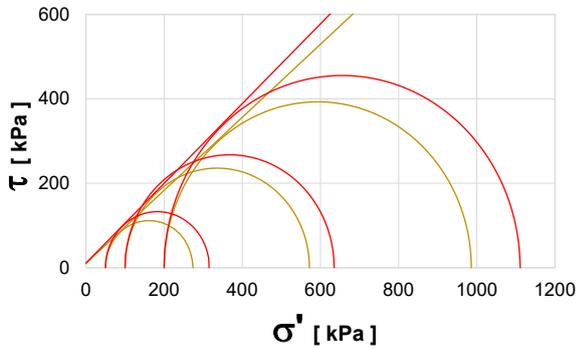
Figura 7: a) fotografie delle classi granulometriche maggiori di 1 mm, non considerate nella prova di taglio tradizionale. È evidente la frazione ghiaiosa a spigoli vivi. b) immagine della frazione passante a 1 mm, utilizzata per la prova di taglio tradizionale. Nella prova di taglio di grandi dimensioni sono considerate sia le frazioni rappresentate in a) che quella rappresentata in b). c) provino della prova di taglio tradizionale dopo la prova e dopo essiccazione, confezionato con la frazione passante a 1 mm. Risulta ben individuata la superficie di taglio.

Le prove di taglio di grandi dimensioni, confrontate con le prove tradizionali e, ove eseguite, con le prove triassiali di grande diametro, sono riepilogate nella tabella 1 e in figura 8.

Tabella 1

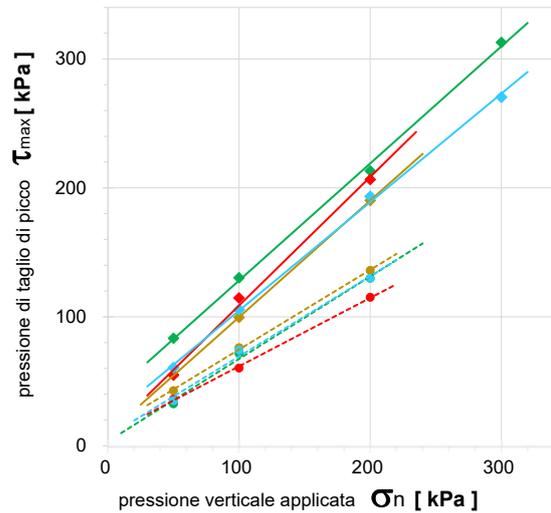
Campione	% minore di 63 μm		prove condotte su passante a 22,4 mm (figura c)					condotta su passante a 1 mm (figura d)			Classificazione granulometrica	Limiti di Atterberg sulla parte fine	
			TRIASSIALE diametro 70 mm (figura a)			TAGLIO lato 300 mm (fig. b linea continua)		TAGLIO lato 60 mm (fig. b in tratteggio)					
			% rappresentata	φ' gradi	c' kPa	% rappresentata	φ' gradi	c' kPa	% rappresentata	φ' gradi			c' kPa
Carisolo	12,3	clastosostenuto	-	-	-	72	40,1	20,8	31,7	31,9	7,1	ghiaia con sabbia debolmente limosa	-
Maza	6,9	clastosostenuto	100	41,0	10,0	100	42,1	9,3	37,5	31,7	12,8	ghiaia con sabbia debolmente limosa	-
SS50 Rolle	13,4	clastosostenuto	-	-	-	91	42,2	37,4	29,4	32,6	3,4	ghiaia sabbiosa debolmente limosa	limo di bassa plasticità IP = 7
Tenna	13	clastosostenuto	77	43,5	11,0	77	44,9	9,1	32,7	27,9	8,7	ghiaia con sabbia limosa	limo di bassa plasticità IP = 9

PROVE TRIASSIALI

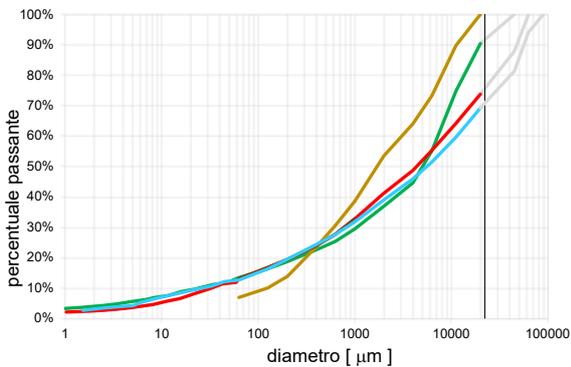


a)

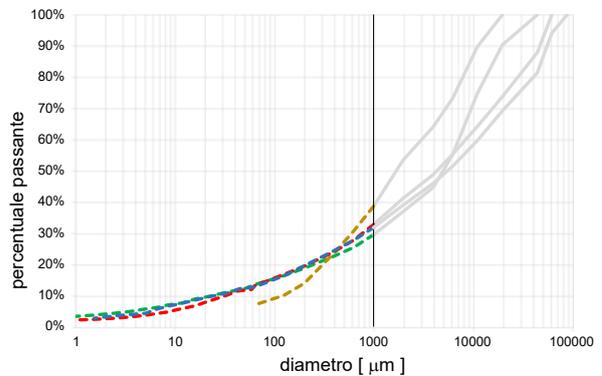
PROVE DI TAGLIO DIRETTO



b)



c)



d)

Figura 8: a) involucri di rottura delle prove triassiali consolidate isotropicamente e drenate, condotte su provini di diametro 70 mm realizzati con la stessa frazione granulometrica impiegata per le prove di taglio a grandi dimensioni. b) confronto tra gli involucri di rottura risultanti dalle prove di taglio a grandi dimensioni (in linea continua) e dalle prove di taglio tradizionali (in tratteggio). c) frazione delle curve granulometriche selezionate per le prove triassiali e per le prove di taglio di grandi dimensioni (tutto il passante a 22,4 mm). d) frazione delle curve granulometriche selezionate per le prove di taglio tradizionali (tutto il passante a 1 mm).

Prime conclusioni

Il confronto indica che per i terreni indagati clasto-sostenuti dalla granulometria simile tra loro ci sono mediamente più di 10° di differenza tra gli angoli d'attrito misurati. La differenza diventa maggiormente marcata per il contributo dovuto alla spigolosità e alla scabrezza delle superfici dei grani grossi, come nel caso del campione di Tenna (vedi figure 6 e 7).

Il confronto tra prova di taglio di grandi dimensioni e prova triassiale fornisce invece una convalida dei dati ottenuti nonostante le differenze teoriche di metodo e tenuto conto che quest'ultima si riferisce ad una situazione di saturazione imposta completa.

Per il prossimo futuro, si prevede che lo studio possa comprendere anche terreni non clasto-sostenuti, per i quali si prevede una minore discrepanza tra i risultati e una dipendenza di questa dalla quantità relativa della parte fine e dalla sua plasticità.

Un'ulteriore opportunità sperimentale riguarda lo studio dei materiali geosintetici impiegati nella realizzazione di terre armate e rinforzate, secondo la norma tecnica UNI EN ISO 12957-1:2019 "Geosintetici - Determinazione delle caratteristiche di attrito - Parte 1: Prova di taglio diretto."

Essa descrive un metodo per determinare le caratteristiche di attrito di geotessili e prodotti affini in contatto con sabbia normalizzata, sotto una sollecitazione normale e con tasso di spostamento costante, con l'apparecchiatura di taglio diretto di grandi dimensioni, allestita con un supporto rigido nella parte inferiore della scatola di Casagrande (vedi fig. 9). Non è inoltre esclusa la possibilità di indagare i fenomeni di attrito all'interfaccia tra geosintetici e le terre di effettivo impiego nella realizzazione di opere in terra con lo stesso metodo proposto dalla norma.

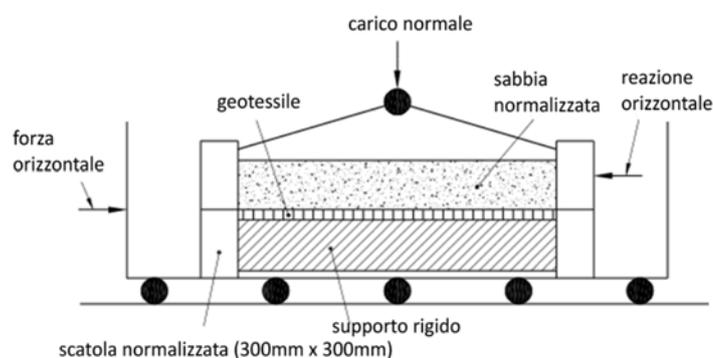


Figura 9: allestimento della macchina di taglio di grandi dimensioni per la determinazione dell'angolo d'attrito dei geosintetici secondo la norma UNI EN ISO 12957-1:2019

Appendice: elenco prove condotte con la macchina di taglio di grandi dimensioni

data messa in marcia: ottobre 2020

data prova	n. prova	Commessa	Opera	Sondaggio	Campione	Profondità m
05/10/2020	TDR2620	PR1520	Consolidamento ponte sul Rio Nambrone a Carisolo	S2	unico	0-0,50
26/10/2020	TDR3820	CO0420	S-841 - Sistemazione e messa in sicurezza della SP90 nell'abitato di Mama d'Avio	-	unico	da mucchio
15/12/2020	TDR0221	PR0121	Indagine geognostica realizz. Liceo Artistico "Vittoria" - approfond. angolo d'attrito su grossolano	S1	-	5,00-7,00
12/01/2021	TDR1121	PR0821	Rifacimento argini Rio Sporeggio a Maso Milano	S3	1	1,50-1,60
01/03/2021	TDR1521	CO0121	UF 5.2.1 Bonifica porzione non impermeabilizzata del I lotto della discarica "Maza" ad Arco	Fase -3	Campo prova	da cumulo
09/03/2021	TDR2021	CO0121	UF 5.2.1 Bonifica porzione non impermeabilizzata del I lotto della discarica "Maza" ad Arco	M2	4%-0% 0-20	da cumulo
21/04/2021	TDR2221	CO0121	UF 5.2.1 Bonifica porzione non impermeabilizzata del I lotto della discarica "Maza" ad Arco	M3	4%-0% 0-20 e 20-50	da cumulo
27/04/2021	TDR2521	PR1321	Sistemazione affluente destro del Rio Fognatura di Tenna	-	C2	3,9