

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTA' DI INGEGNERIA**

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale

Tesi di laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**CARATTERIZZAZIONE DELL'ATTRITO DI
INTERFACCIA TRA GEOSINTETICI: METODI DI
INDAGINE DI LABORATORIO E RISULTATI
PRATICI.**

Relatore: Ch.mo Prof. Paolo Carrubba

Correlatore: Ing. Paolo Pavanello

Laureando: Rocco Ferroli

Anno Accademico 2014/2015

INDICE

INDICE	3
INTRODUZIONE.....	7
1. CENNI TEORICI SULL'ATTRITO	11
1.1. ATTRITO STATICO.....	11
1.2. ATTRITO DINAMICO RADENTE.....	12
1.3. L'ATTRITO A LIVELLO MICROSCOPICO	14
1.4. DISPOSITIVI PER LA DETERMINAZIONE DELL'ANGOLO DI ATTRITO TRA GEOSINTETICI.....	15
2. LA SCATOLA DI TAGLIO DIRETTO.....	17
2.1. IL DISPOSITIVO	18
2.2. IL PROCEDIMENTO OPERATIVO.....	21
2.3. RISULTATI DELLA PROVA	22
2.4. TEST DI TAGLIO A GRANDI SPOSTAMENTI.....	25
3. APPARECCHIO ANULARE DI TAGLIO DIRETTO.....	27
4. APPARECCHIO CILINDRICO DI TAGLIO DIRETTO	31
5. IL PIANO INCLINATO	35
5.1. INTRODUZIONE.....	35
5.1.1. Procedimento operativo	36
5.1.2. Tipici risultati.....	37
5.1.3. Determinazione delle caratteristiche di attrito	38
5.2. LA PROCEDURA STANDARD.....	41
5.3. STUDIO DELLA FASE DINAMICA DI SCORRIMENTO	46
5.3.1. Tipi di comportamento	48
5.3.2. Interpretazione dinamica.....	51
5.3.3. Definizione dei parametri di test	53
5.3.4. Condizioni di scorrimento immediato e di scorrimento graduale.....	55
5.3.4.1. Scorrimento immediato	55
5.3.4.2. Scorrimento graduale.....	56
5.3.5. Adattamento del dispositivo di sperimentazione.....	56
5.3.6. Determinazione della fase di moto uniformemente accelerato	57
5.3.7. Conclusioni.....	61
5.4. LA "FORCE PROCEDURE"	61
5.4.1. I limiti della "Standard Displacement Procedure"	62
5.4.2. La nuova "Force Procedure"	63
5.4.2.1. Il dispositivo.....	63
5.4.2.2. La procedura	64

5.4.2.3. Risultati della nuova procedura	67
5.4.2.3.1. Analisi nel caso di scorrimento immediato	67
5.4.2.3.2. Analisi nel caso di scorrimento graduale.....	69
5.4.2.3.3. Scelta del parametro per definire l'attrito	71
5.5. <i>VARIANTE DELLA FORCE PROCEDURE</i>	72
6. LA TAVOLA VIBRANTE	77
6.1. <i>PROCEDIMENTO OPERATIVO</i>	78
6.2. <i>TIPICI RISULTATI</i>	81
6.3. <i>SIMULAZIONE DI UN TERREMOTO</i>	85
6.4. <i>DETERMINAZIONE DELL'ACCELERAZIONE CRITICA</i>	87
6.5. <i>TEST CON LA TAVOLA VIBRANTE UTILIZZANDO UNA CENTRIFUGA GEOTECNICA</i>	89
6.6. <i>I GEOSINTETICI COME ISOLAMENTO DI BASE</i>	90
7. OSSERVAZIONE DEI RISULTATI DI ATTRITO TRA INTERFACCE DI GEOSINTETICI IN CAMPO STATICO.....	91
7.1. <i>DISTINZIONE TRA CAMPO STATICO E CAMPO DINAMICO</i>	92
7.2. <i>INFLUENZA DEL CARICO NORMALE SUI VALORI DI ATTRITO</i>	94
7.3. <i>INFLUENZA DELLA PRESENZA DI ACQUA SUI VALORI DI ATTRITO</i>	98
7.3.1. Test con il piano inclinato	98
7.3.1.1. Test di tipo H1	101
7.3.1.2. Test di tipo H2	102
7.3.2. Test con la scatola di taglio diretto.....	105
7.3.2.1. Confronto con ulteriori studi	109
7.5. <i>ALTERAZIONE DELL'ATTRITO IN SEGUITO A SCORRIMENTI SUCCESSIVI</i>	110
7.5.1. Risultati dell'analisi di G. Stoltz & N. Vidal.....	110
7.5.2. Risultati dell'analisi di Reyes Ramirez & Gourc	116
7.6. <i>INFLUENZA DELLA TEMPERATURA</i>	122
7.6.1. Apparecchio di Taglio a doppia interfaccia (metterlo in un capitolo nella parte delle apparecchiature)	123
7.6.2. Camera a temperatura costante.....	125
7.6.3. Risultati	126
7.7. <i>CONFRONTO DEI RISULTATI DEI TEST SULLE INTERFACCE GEOMEMBRANA LISCIA – GEOTESSUTO E GEOMEMBRANA RUVIDA – GEOTESSUTO</i>	131
7.7.1. Risultati ottenuti con il Piano Inclinato.....	131
7.7.2. Risultati ottenuti con l'Apparecchio Anulare di Taglio Diretto.....	133
7.8. <i>CAUSE DELLA PERDITA DI RESISTENZA AL TAGLIO DOPO IL RAGGIUNGIMENTO DI UN VALORE DI PICCO</i>	133
7.9. <i>OSSERVAZIONI SULLA "FORCE PROCEDURE"</i>	138
7.9.1. Influenza dello spostamento u_{lim} della scatola superiore	138
7.9.2 Confronto tra la "Force Procedure" e la "Standard Displacement Procedure"	141

7.10. UN NUOVO MODELLO COSTITUTIVO PER LE INTERFACCE GEOMEMBRANA RUVIDA – GEOTESSUTO	142
8. CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI CON LE VARIE APPARECCHIATURE	149
8.1. PIANO INCLINATO – SCATOLA DI TAGLIO DIRETTO	149
8.2. APPARECCHIO ANULARE DI TAGLIO DIRETTO – SCATOLA DI TAGLIO DIRETTO	158
8.3. APPARECCHIO CILINDRICO DI TAGLIO DIRETTO – SCATOLA DI TAGLIO DIRETTO	160
8.3.1. Geomembrana HDPE liscia / geotessuto non tessuto	161
8.3.2. Geomembrana HDPE liscia / Geomembrana HDPE liscia	162
9. SPERIMENTAZIONE CON IL DISPOSITO DELL'UNIVERSITA' DI PADOVA	165
9.1. DESCRIZIONE DELL'APPARECCHIATURA	165
9.1.1. Caratteristiche del Piano Inclinato	166
9.1.2. Caratteristiche della Tavola Vibrante	169
9.2. PROCEDURE UTILIZZATE	170
9.3. MATERIALI TESTATI	173
9.3.1. GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD	173
9.3.2. GCD – GMB bugnata	176
9.4. PROGRAMMA DELLE PROVE	178
9.4.1. Prove Statiche	178
9.4.1. Prove Dinamiche	178
10. RISULTATI DELLE PROVE STATICHE	179
10.1. INTERFACCIA GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD	179
10.1.1. Determinazione dell'angolo di primo distacco (ϕ_0)	179
10.1.2. Procedura Standard (ϕ_{50})	180
10.1.3. Metodo della Forza (ϕ_{lim})	181
10.1.4. Test con carico incrementato	185
10.1.5. Osservazione dei risultati	189
10.1.5.1. Recupero di attrito dell'interfaccia tra un test e l'altro	189
10.1.5.2. Comportamento viscoso dell'interfaccia	192
10.1.5.3. Adesione tra GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD	195
10.2. INTERFACCIA GCD – GMB bugnata	196
10.2.1. Determinazione dell'angolo di primo distacco (ϕ_0)	196
10.2.2. Metodo della Forza (ϕ_{lim})	198
10.2.3. Test con carico incrementato	201
10.2.4. Osservazione dei risultati	202
11. RISULTATI DELLE PROVE DINAMICHE	205
11.1. INTERFACCIA GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD	205
11.1.1. Prove di Scorrimento	205
11.1.2. Prove con Sinusoide	210
11.1.3. Prove con Sisma	215
11.1.4. Prove con carico incrementato	219

11.2. <i>INTERFACCIA GCD – GMB bugnata</i>	220
11.2.1. Prove di Scorrimento	220
11.1.2. Prove con Sinusoide.....	221
11.2.3. Prove con Sisma	225
12. CONCLUSIONI	229
12.1. <i>PROVE STATICHE</i>	229
12.2. <i>PROVE DINAMICHE</i>	234
BIBLIOGRAFIA	237

INTRODUZIONE

La definizione dell'interfaccia di resistenza a taglio è un prerequisito fondamentale per la progettazione di qualsiasi struttura in cui sia presente l'accostamento terreno-geosintetico oppure geosintetico-geosintetico. L'utilizzo di sistemi di rivestimento con geosintetici (GLS) è sempre più diffuso nelle strutture di ingegneria idraulica o nelle discariche di rifiuti (Fig. 1, 2, 3). Questi sistemi possono comprendere varie tipologie di geosintetici di differente natura sui quali uno strato di terreno di copertura fornisce la protezione del sistema di geosintetici. Tra i geosintetici usati nei sistemi di rivestimento, generalmente si trova un geotessile posizionato tra il terreno di copertura e una geomembrana che assicura la ritenuta dell'acqua della struttura. Da un lato, il geotessile protegge la geomembrana durante la posa del terreno di copertura e garantisce il funzionamento della struttura, così che lo sforzo inferiore è trasmesso ad esso, dall'altro, esso contribuisce a rendere il terreno di copertura stabile. Altri geosintetici sono spesso necessari (geocompositi drenanti, geostuoie, georeti).

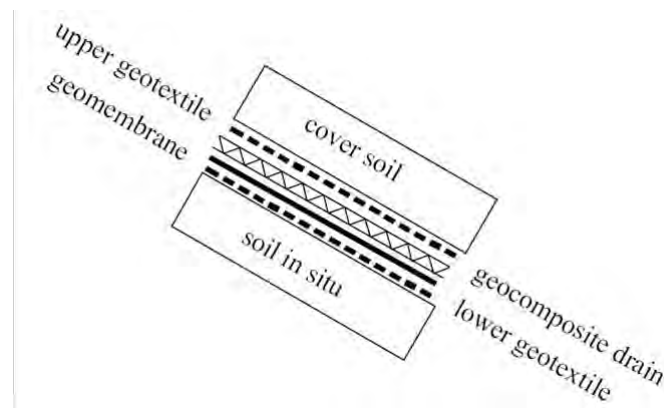


Fig. 1. Esempio di sistema di rivestimento con geosintetici (GLS). (L. Briançon et al._2002)

I sistemi di rivestimento utilizzati sul fondo e sulla copertura delle discariche di rifiuti sono progettati tenendo conto delle differenti funzioni e dell'efficienza dei materiali usati. Nei sistemi di copertura, per esempio, le varie componenti sono usate per adempiere ad uno o più scopi, come la ritenuta dell'acqua (geomembrana e strato di argilla compatta),

drenaggio (geospacer), filtrazione (geotessile) a protezione (terreno di copertura). Quando questi sistemi sono costruiti sui lati inclinati delle discariche possono facilmente diventare instabili in quanto i pendii delle discariche sono spesso ripidi e molte interfacce presentano valori di attrito abbastanza bassi da indurre potenziali superfici di scivolamento.

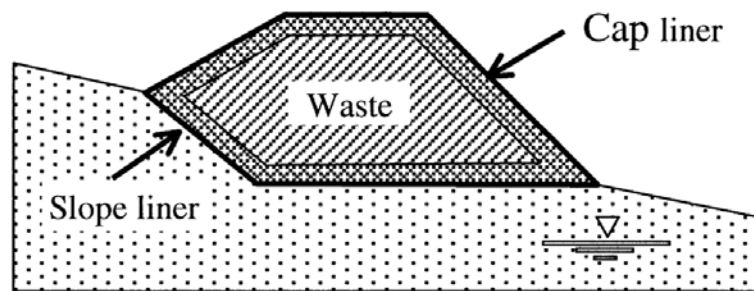


Fig. 2. Sistema di ritenuta di una discarica di rifiuti. (S. Lalarakotoson et al._1999)

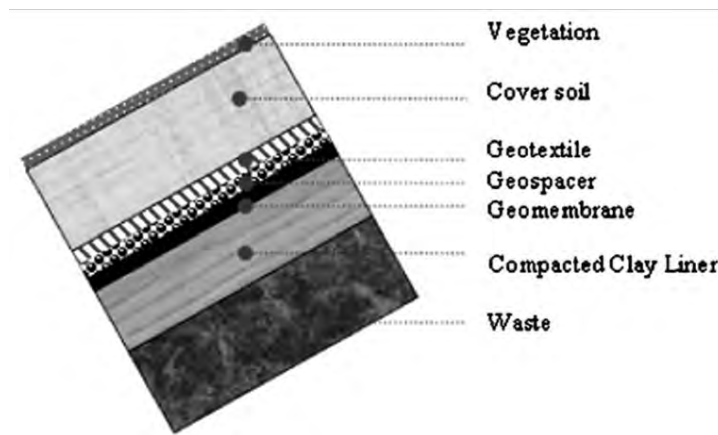


Fig. 3. Tipico profilo della copertura di una discarica. (H. N. Pitanga et al._2009)

In passato si sono verificati molti casi di rottura di sistemi di copertura e conseguentemente è aumentato lo studio della stabilità di questi sistemi compositi. La conoscenza del valore di attrito delle varie interfacce presenti nei sistemi in questione risulta essere la variabile di interesse.

La tesi redatta è strutturata in una prima parte in cui sono presentate le varie apparecchiature sviluppate per lo studio dell'attrito di interfaccia tra geosintetici e le diverse procedure utilizzabili, esposte a livello teorico (da Cap. 2 a Cap. 6). Nei Cap. 7 e 8, invece, sono esposti i risultati bibliografici ottenuti con i diversi dispositivi e le diverse procedure disponibili, focalizzandosi sull'attrito statico, esponendo quali sono i vari fattori che influenzano la sua definizione. Infine, nei Cap. da 9 a 12 sono riportati i risultati ottenuti durante la ricerca condotta con il dispositivo sperimentale dell'Università di Padova (ICEA), riguardante l'analisi dell'attrito di due tipologie di interfacce di geosintetici (GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD e GCD – GMB bugnata) in ambito statico (Piano Inclinato) e in ambito dinamico (Piano Inclinato su Tavola Vibrante).

1. CENNI TEORICI SULL'ATTRITO

L'attrito è una forza che si esercita tra due corpi posti a contatto e che, in generale, si oppone al loro moto reciproco. La forza di attrito che si manifesta tra superfici in quiete tra loro è detta di attrito statico, mentre tra superfici in moto relativo si parla di attrito dinamico. La forza di attrito che agisce tra due corpi in contatto, posti l'uno sopra l'altro, dipende principalmente dalla natura delle superfici a contatto e dal peso del corpo superiore.

1.1. ATTRITO STATICO

Si consideri un blocco appoggiato su un piano orizzontale e al quale è agganciata l'estremità fissa di un dinamometro. Se si tira l'altra estremità del dinamometro applicando una forza crescente, si nota che il corpo inizierà a muoversi soltanto quando la forza applicata avrà raggiunto e superato un certo valore F_a . L'intensità della forza F_a misura la forza di attrito statico che il piano d'appoggio esercita sul corpo. In altri termini: la forza di attrito statico che una superficie esercita su un corpo che si trova appoggiato su di essa è la minima forza che bisogna applicare al corpo perché esso si metta in moto.

Se sul primo blocco se ne appoggia un'altro uguale, in modo da raddoppiare il peso del corpo su cui agisce l'attrito, si trova che la forza di attrito statico raddoppia. In modo analogo, aggiungendo un terzo blocco, F_a risulterà il triplo e così via. Si può quindi affermare che la forza di attrito statico che si esercita tra un piano di appoggio e un corpo posto su di esso è proporzionale al peso del corpo stesso.

Di seguito viene riportata relazione che lega la forza di attrito statico F_a e il peso del corpo F_p :

$$F_a = \mu_s \cdot F_p \quad (1.1)$$

Il parametro adimensionale μ_s è chiamato *coefficiente di attrito statico*. Il valore del coefficiente di attrito è legato alla natura delle superfici di contatto dei due corpi e, in particolare, al loro grado di scabrezza.

Nel caso generale, la forza di attrito dipende dalla forza premente P che il corpo applica al piano su cui appoggia. Tale forza risulta perpendicolare alle superfici di contatto tra piano e corpo ma non sempre coincide con il peso del corpo F_p . In particolare, se il piano d'appoggio non è orizzontale ma inclinato, la forza premente P è più piccola di F_p , in quanto rappresenta la sua componente F_y rispetto a un'asse y perpendicolare al piano (Fig. 1.1).

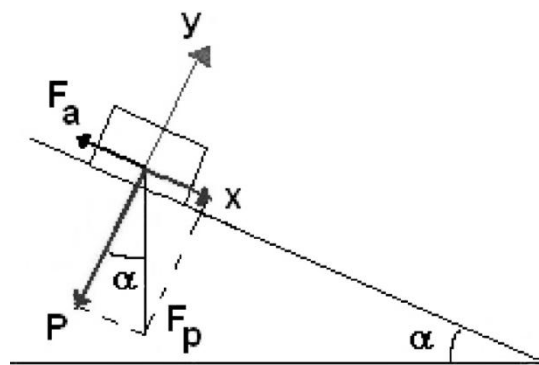


Fig. 1.1. Forze agenti nel caso di un corpo appoggiato su un piano inclinato.

Indicando con α l'angolo tra F_p e P (che coincide con l'angolo d'inclinazione del piano), sarà $P = F_y = F_p \cos\alpha$. Pertanto, l'intensità della forza di attrito statico che il piano esercita sul blocco si calcola con l'espressione:

$$F_a = \mu_s \cdot P = \mu_s \cdot F_p \cdot \cos\alpha \quad (1.2)$$

1.2. ATTRITO DINAMICO RADENTE

Per mettere in moto un corpo su una superficie piana (moto di scorrimento) bisogna applicare una forza che contrasti la forza di attrito statico con cui la superficie si oppone al moto del corpo. L'espressione di tale forza è:

$$F_a = \mu_s \cdot P$$

dove P rappresenta la forza premente, coincidente con la reazione vincolare R_v , del piano. Nel caso di superficie piana orizzontale, $P = F_p$.

Quando un corpo appoggiato sul piano è in moto, il valore della forza di attrito diminuisce leggermente rispetto al valore F_a , come è evidenziato in Fig. 1.2.

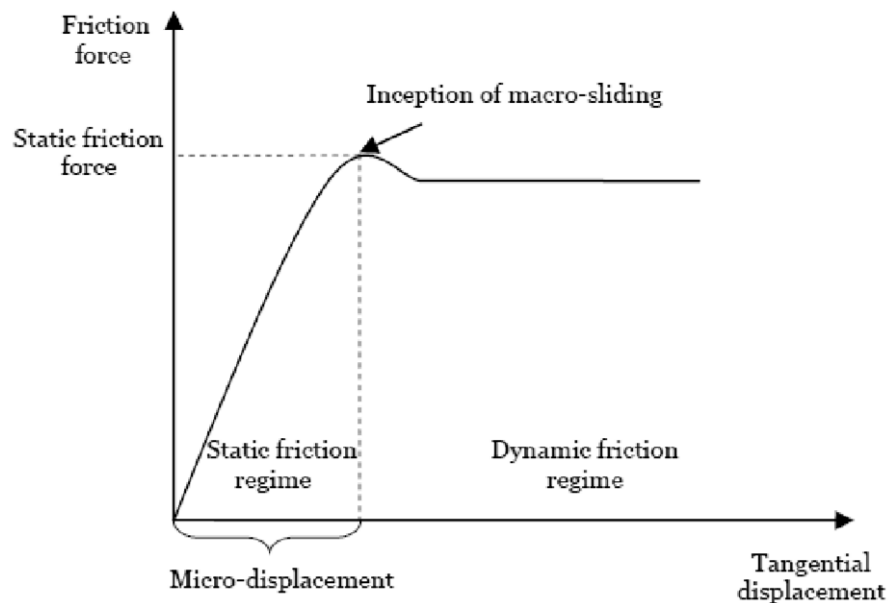


Fig. 1.2. Forza di attrito in condizioni statiche e dinamiche. (E. Deladi)

Affinché il corpo possa cominciare a muoversi è necessario che la forza motrice F raggiunga il valore della forza di attrito statico F_a . Per mantenere il corpo in moto con velocità costante è invece sufficiente applicare una forza F_d , con un'intensità inferiore a quella di F_a . In questo caso la forza frenante che il piano esercita sul corpo ha un'intensità pari a F_d ed è chiamata forza di attrito dinamico. Se il moto si verifica su un piano orizzontale, anche la forza di attrito dinamico, come quella di attrito statico, risulta proporzionale al peso del corpo. L'analisi dei dati sperimentali mostra, infatti, che:

$$F_d = \mu_d \cdot F_p \tag{1.3}$$

dove μ_d rappresenta il *coefficiente di attrito dinamico* il cui valore è leggermente inferiore a quello di μ_s .

1.3. L'ATTRITO A LIVELLO MICROSCOPICO

L'attrito a livello microscopico è dovuto ai legami (delle vere e proprie saldature) che si instaurano tra i corpi a contatto (Fig. 1.3). Per vincere tali legami è necessaria una forza che stiri e rompa tali legami (questo spiega la minima forza necessaria a iniziare il moto) i quali però si riformano continuamente ad ogni contatto con le asperità (questo spiega l'attrito dinamico).

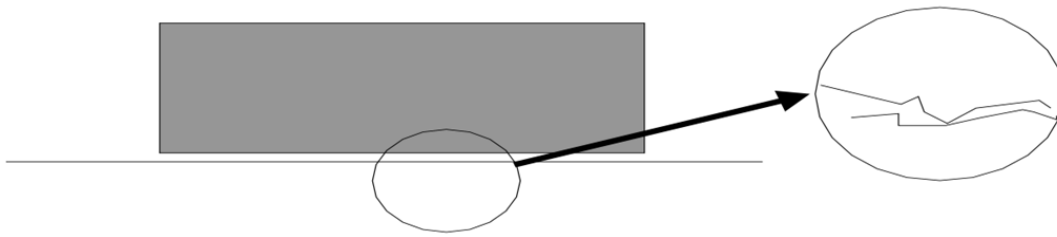


Fig. 1.3. Schematizzazione della superficie di contatto di due corpi.

Ne deduciamo che l'attrito è proporzionale alla effettiva superficie di contatto. E poiché l'effettiva superficie di contatto dipende dalle forze normali alla superficie (più comprimiamo i due corpi a contatto tanto maggiore sarà la superficie di contatto microscopica) allora la forza di attrito F risulta direttamente proporzionale alla componente normale delle forze agenti. Questo vale per i materiali rigidi come l'acciaio, mentre nel caso dei geosintetici si ha un comportamento particolare. Infatti, le asperità presenti nelle interfacce di materiali polimerici, come sono i geosintetici, si deformano all'aumentare della pressione normale, diminuendo così l'effetto di incastro che è il responsabile dell'attrito. Per esempio, il coefficiente di attrito tra due materiali polimerici che scorrono tra di loro o contro un metallo o su un materiale ceramico diminuisce all'aumentare del valore della sollecitazione normale.

Coulomb definì una legge riguardante l'attrito cinematico che afferma: “ l'attrito cinematico è indipendente dalla velocità di scorrimento ”. Anche questa legge è valida solo per i materiali rigidi. Infatti, ad alte velocità di scorrimento i materiali polimerici diventano più rigidi, quindi l'area di contatto decresce determinando una riduzione del coefficiente di attrito dinamico. In Fig.1.4 è illustrata la dipendenza del coefficiente di attrito dinamico dal valore della velocità di scorrimento nel caso di materiali polimerici.

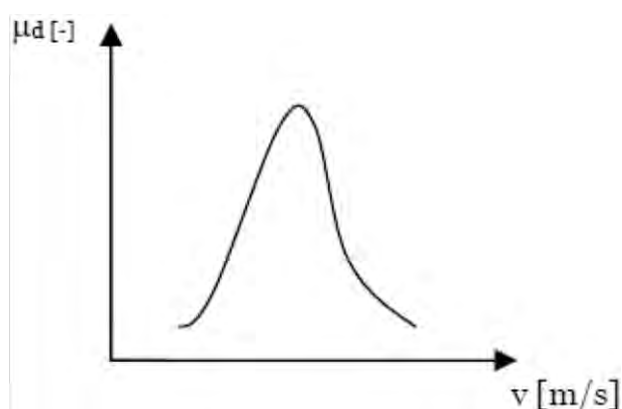


Fig. 1.4. Relazione tra il coefficiente di attrito dinamico e la velocità di scorrimento per materiali polimerici. (E. Deladi)

Pertanto, le classiche leggi di attrito dei materiali rigidi non si possono considerare valide per i materiali polimerici (geosintetici) o altri materiali caratterizzati da particolari proprietà viscoelastiche.

1.4. DISPOSITIVI PER LA DETERMINAZIONE DELL'ANGOLO DI ATTRITO TRA GEOSINTETICI

Nella progettazione di strutture geotecniche o idrauliche con l'impiego di geosintetici, ai fini di garantire la loro funzionalità, è di fondamentale importanza essere a conoscenza delle caratteristiche di interfaccia tra i vari geosintetici utilizzati e tra i geosintetici e il terreno presente. Negli anni si sono sviluppati diversi dispositivi e procedure con lo scopo di riuscire a fornire uno studio il più esatto possibile delle caratteristiche di attrito d'interfaccia.

Il primo dispositivo utilizzato è stato la *Scatola di Taglio Diretto*, già utilizzata per valutare le caratteristiche di resistenza di un terreno soggetto a sforzo di taglio. La scatola di taglio diretto, a causa di come è progettata, richiede l'applicazione di alte sollecitazioni normali ($25 \text{ kPa} \leq \sigma \leq 200 \text{ kPa}$) e le dimensioni dei campioni da testare sono ridotte (generalmente $\leq 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$); risulta così essere piuttosto inadatta per il caso dei sistemi di rivestimento degli impianti di stoccaggio dei rifiuti che sono soggetti a bassi valori di tensione normale ($< 10 \text{ kPa}$). In quest'ultimo caso è risultato essere più appropriato l'utilizzo del *Piano Inclinato*, un nuovo dispositivo sviluppato per testare l'attrito d'interfaccia. Il piano inclinato è stato ed è ancora il dispositivo maggiormente impiegato in questo ambito di studio. Esso ha subito moltissime modifiche da parte degli studiosi che hanno cercato negli anni di sviluppare un dispositivo che riuscisse a simulare al meglio le condizioni presenti in campo e che tenesse in considerazione correttamente i parametri che influiscono sull'attrito di interfaccia dei geosintetici.

Per quanto riguarda l'ambito sismico (molto importante per l'integrità dei sistemi di rivestimento delle discariche di rifiuti) è stato sviluppato un dispositivo capace di riprodurre le registrazioni di eventi sismici realmente accaduti: la *Tavola Vibrante*.

Nei capitoli seguenti sono esposti i vari dispositivi e le varie procedure che si possono utilizzare per determinare le caratteristiche di interfaccia tra geosintetici.

2. LA SCATOLA DI TAGLIO DIRETTO

Uno dei primi studi sperimentali sul comportamento di attrito tra geosintetici è stato condotto da Martin et al. (1984) con un dispositivo di taglio diretto modificato. Da allora si è utilizzato il test di taglio diretto per testare le interfacce di geosintetici.

La scatola di taglio diretto tradizionale (Fig. 2.1), utilizzata per determinare la resistenza a taglio dei terreni, è stata modificata in modo da permettere lo svolgimento dello stesso tipo di prova nei casi particolari di interfaccia geosintetico-terreno oppure geosintetico-geosintetico. Si è così adattato un dispositivo tipico dello studio del comportamento dei terreni allo studio dei sistemi di rivestimento con geosintetici, sempre più in uso nel campo dell'ingegneria civile.

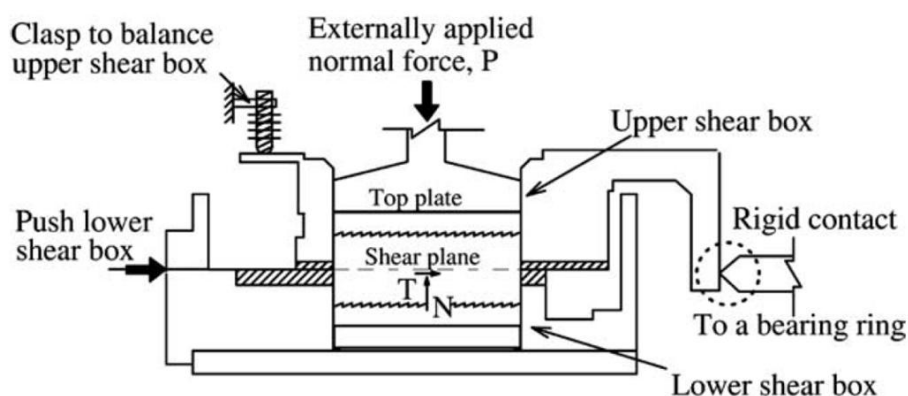


Fig. 2.1. Schema del dispositivo convenzionale di taglio diretto per lo studio del comportamento a taglio dei terreni. (S. H. Liu et al., 2005)

Nel caso dello studio del comportamento a taglio del terreno vengono utilizzate delle scatole capaci di contenere campioni di terreno aventi dimensioni da 60 mm^2 a 100 mm^2 . Nell'ambito dei sistemi di rivestimento con geosintetici sorge la necessità di disporre di scatole capaci di contenere campioni di geosintetici di grandi dimensioni. A questo scopo sono state realizzate delle *Scatole di Taglio Diretto di Grandi Dimensioni*, concettualmente simili alla "classica scatola di taglio diretto". La normativa ASTM D-

5321 (1998) richiede che i test di taglio diretto con i geosintetici vengano svolti con campioni aventi le dimensioni minime di 300 mm per 300 mm. Comunemente una scatola di taglio viene identificata di grandi dimensioni quando è in grado di analizzare campioni rettangolari di geosintetici delle dimensioni minime indicate dalla ASTM D 5321 (1998).

2.1. IL DISPOSITIVO

Come è stato detto, una *Scatola di Taglio Diretto di Grandi Dimensioni* può essere utilizzata per testare il comportamento delle interfacce tipiche dei sistemi di rivestimento con geosintetici. Pertanto si possono distinguere due casi di studio principali:

- studio delle caratteristiche di attrito delle interfacce geosintetico – terreno (Fig. 2.2);
- studio delle caratteristiche di attrito delle interfacce geosintetico – geosintetico (Fig. 2.3).

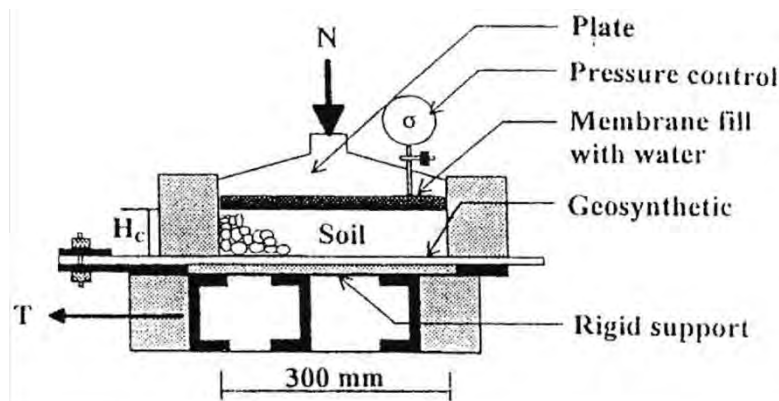


Fig. 2.2. Scatola di taglio diretto di grandi dimensioni per lo studio delle interfacce geosintetico – terreno.
(Gourc & Lalarakotoson (IRIGIM); Müller Rochholz & Bronstein (tBU)_1996)

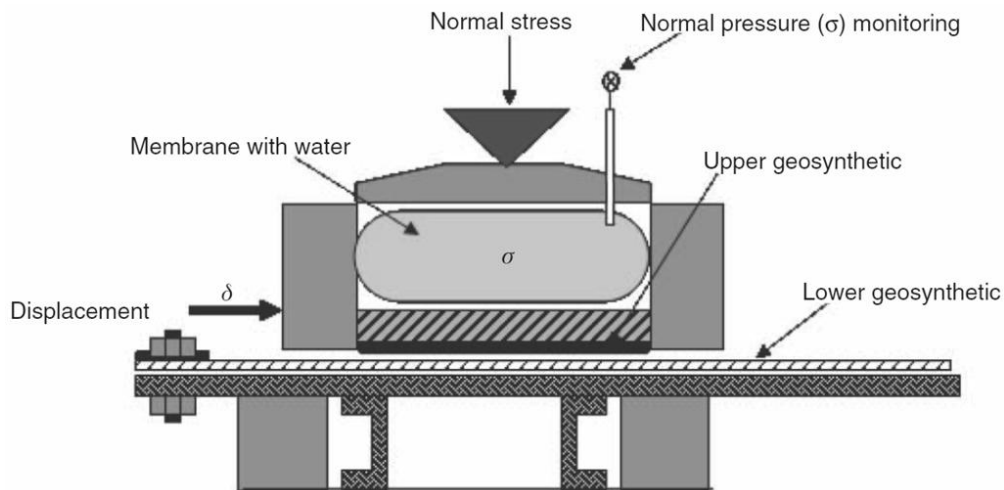


Fig. 2.3. Scatola di taglio diretto di grandi dimensioni per lo studio delle interfacce geosintetico – geosintetico. (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

In entrambi i casi il classico dispositivo di taglio diretto è stato adattato per soddisfare l'esigenza di avere una distribuzione uniforme della sollecitazione normale grazie ad una sacca d'acqua posta sotto un piatto di compressione. I campioni di geosintetici vengono fissati su di un supporto rigido per evitare spostamenti relativi e grinze dei geosintetici: i geotessuti e le geomembrane possono essere incollate su di una piastra di compensato, di PVC o di metallo. In genere la sollecitazione di taglio viene fornita alla metà scatola inferiore.

Nel caso dell'analisi di interfacce geotessuto – terreno, nell'eventualità di dovere testare un campione di geogriglia bisogna prestare un particolare accorgimento. Le geogriglie, infatti, sono caratterizzate da larghe aperture e il contatto diretto tra il supporto e il terreno può influenzare i risultati di misurazione dell'attrito. Infatti, le particelle di terreno possono danneggiare la piastra di supporto della geogriglia alterando di conseguenza il valore dell'angolo di attrito dell'interfaccia in esame. Per ovviare a questo probabile disturbo si deve quindi utilizzare come supporto della geogriglia una piastra in acciaio.

Di seguito è elencata l'attrezzatura principale necessaria per lo svolgimento di un test di taglio per la determinazione della resistenza a taglio di un'interfaccia di un geosintetico (Fig. 2.4, 2.5):

- una scatola di taglio di grandi dimensioni: minimo 300 mm²;

- una struttura di carico verticale;
- una motore per fornire la sollecitazione di taglio orizzontale;
- un sensore per il controllo dello spostamento orizzontale;
- una cella di carico per il controllo del carico orizzontale.

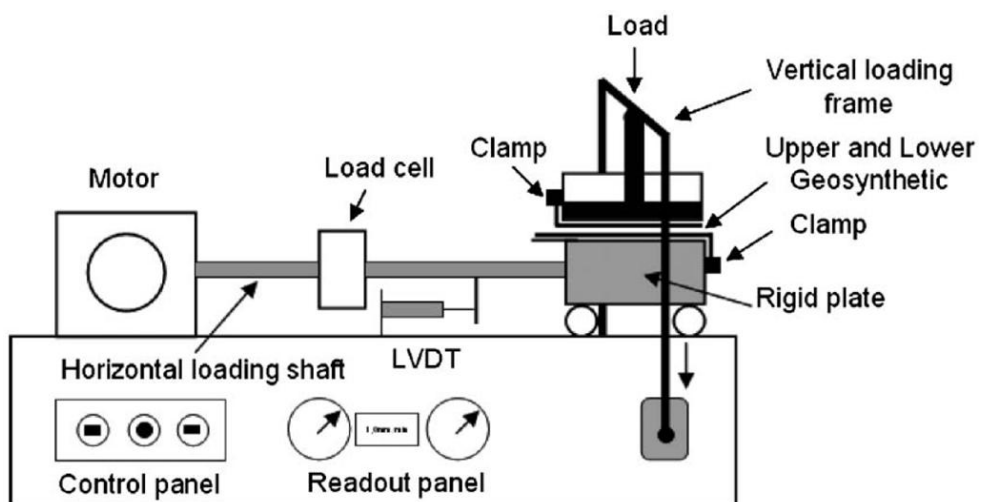


Fig. 2.4. Schema dell'attrezzatura necessaria per lo svolgimento di un test con una scatola di taglio di grandi dimensioni. (Seo et al., 2007)

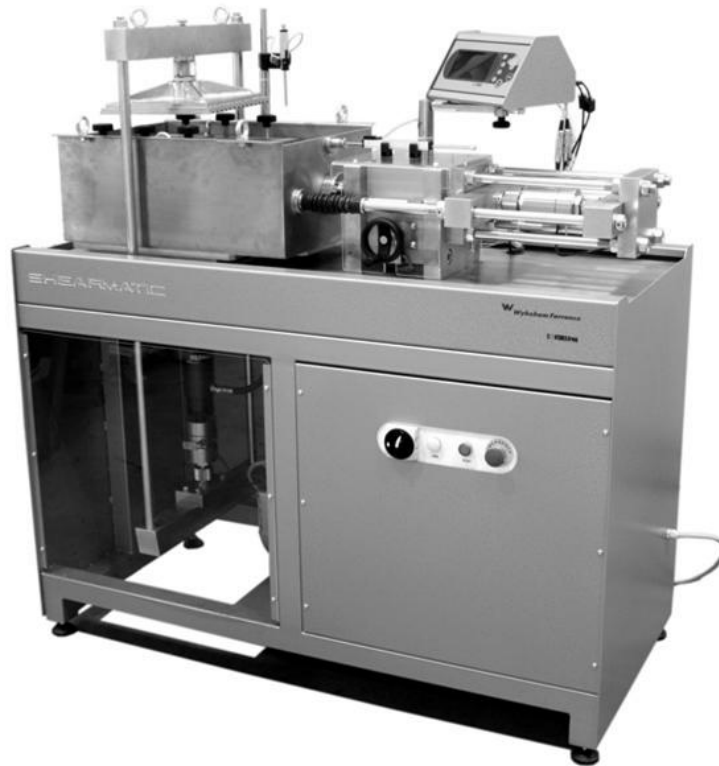


Fig. 2.5. Dispositivo di taglio diretto di grandi dimensioni per lo studio delle interfacce di geosintetici.
(Wykeham Farrance Engineering Limited).

2.2. IL PROCEDIMENTO OPERATIVO

La prova di taglio diretto con una scatola di grandi dimensioni (300 mm x 300 mm) viene svolta con un massimo valore di corsa (50÷100 mm) e senza alcuna perdita nell'area del piano di taglio. I campioni di geosintetico vengono tagliati in forme rettangolari per essere testati e vengono fissati sulle estremità della scatola superiore e della scatola inferiore. Poi la scatola superiore viene sistemata sopra la scatola inferiore così i due campioni di geosintetici risultano uno accanto all'altro. Il test di ogni interfaccia viene solitamente svolto con diversi valori di sollecitazione normale. La sollecitazione di taglio viene fornita tramite un'asta di carico che spinge la scatola inferiore. Lo spostamento della scatola inferiore viene controllato con un preciso sistema motorizzato di controllo, con lo spostamento orizzontale monitorato da un trasduttore di spostamento induttivo (LVDT). I test vengono svolti con una velocità di taglio costante (p. es. 1 mm/min). Il carico orizzontale richiesto per mantenere la velocità di taglio scelta viene misurata da una cella di carico e visualizzato in un trasduttore di lettura digitale.

Dopo aver applicato il carico normale, la forza di taglio viene aumentata fino al verificarsi dello scorrimento all'interfaccia. Il test viene svolto raggiungendo un massimo valore di scorrimento (50÷100 mm). Durante la prova di taglio diretto vengono misurati i seguenti parametri:

- la forza normale;
- la forza di taglio;
- lo spostamento orizzontale (in alcuni casi anche lo spostamento verticale dovuto alla consolidazione del terreno presente).

Vari studi hanno dimostrato che la velocità di scorrimento non ha influenza (o meglio ha influenza trascurabile) sulla resistenza a taglio. Triplet & Fox (2001) conclusero che non c'è alcun legame consistente tra la velocità di spostamento e la resistenza al taglio misurata di una interfaccia composta da una geomembrana rugosa (T-GM) e un tappeto in geosintetico e argilla (GCL). Stark et al. (1996) trovarono che la resistenza a taglio di una interfaccia T-GM – geotessuto non tessuto è indipendente dalla velocità di scorrimento. Pertanto, nello svolgimento dei test di taglio, la scelta di un appropriato valore della velocità di taglio non è di fondamentale importanza. Tuttavia la normativa ASTM D-5321 raccomanda un valore della velocità di taglio compreso tra 1 mm/min e 5 mm/min.

2.3. RISULTATI DELLA PROVA

I risultati tipici che si ottengono da una prova di taglio diretto nell'ambito di analisi di una interfaccia di geosintetici vengono solitamente rappresentati con due grafici:

- un grafico che riporta i valori della tensione di taglio all'interfaccia in funzione dello spostamento (Fig. 2.6);
- un grafico che riporta i valori della tensione di taglio all'interfaccia in funzione del valore di tensione normale applicata; a seconda che si riportino i valori di tensione di taglio di picco o i valori residui si rappresenta rispettivamente il comportamento di resistenza all'interfaccia di picco o quello residuo (Fig. 2.7).

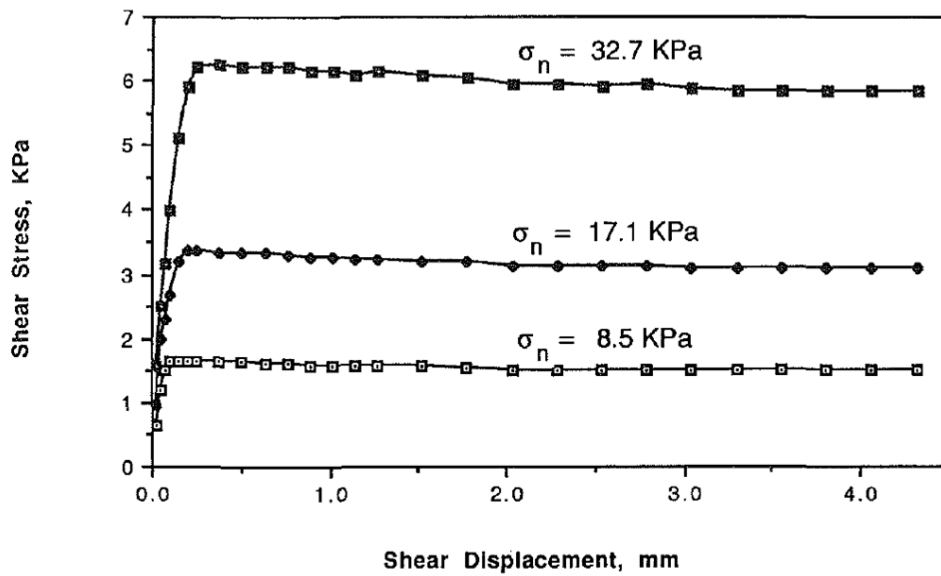


Fig. 2.6. Risultati tipici di una prova di taglio diretto condotta su una interfaccia geomembrana – geotessuto. (Yegian & Lahlaf_1992)

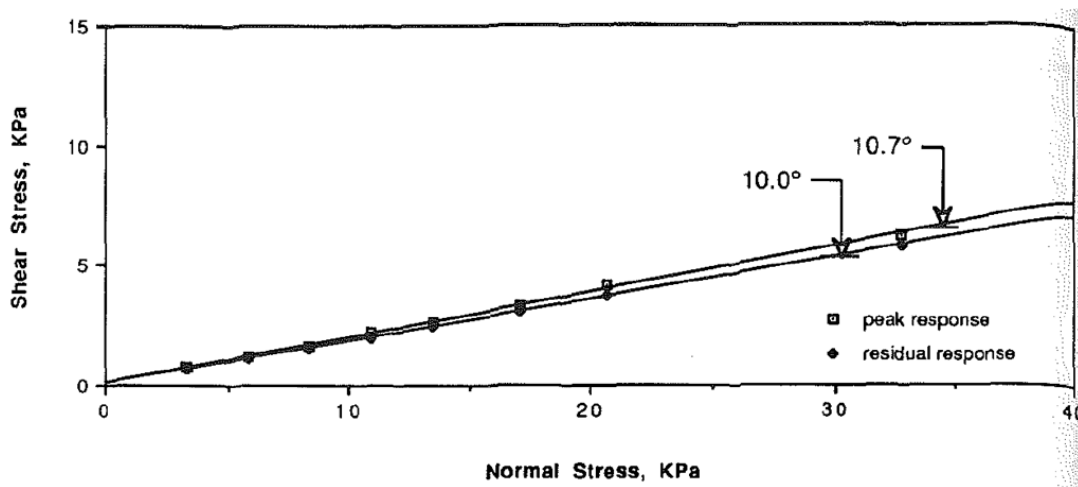


Fig. 2.7. Risultati tipici di una prova di taglio diretto condotta su una interfaccia geomembrana – geotessuto: angoli di attrito statico di picco e residuo. (Yegian & Lahlaf_1992)

Con la prova di taglio diretto il valore dell'angolo di attrito viene calcolato secondo il criterio di resistenza di *Mohr-Coulomb*. Gli involucri di rottura (intesa come inizio dello scorrimento) vengono assunti approssimativamente lineari e definiti dalla seguente espressione:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan\phi \quad (2.1)$$

dove c e ϕ sono rispettivamente l'adesione intercetta (kPa) e l'angolo di attrito dell'interfaccia determinati con la regressione lineare.

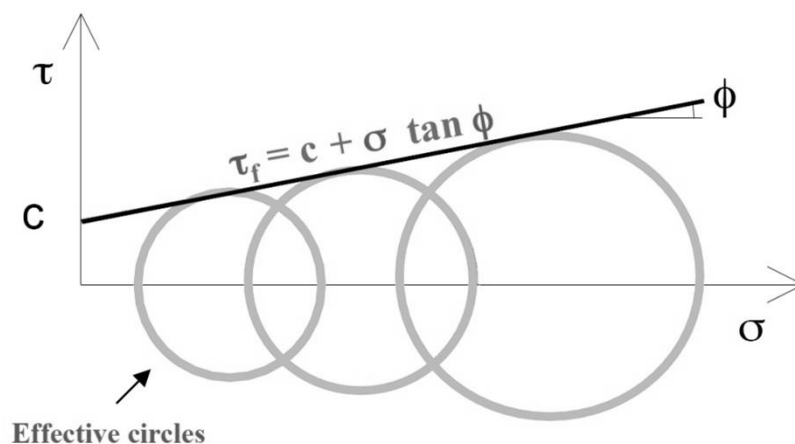


Fig. 2.8. Criterio di resistenza di Mohr-Coulomb.

Di seguito (Fig. 2.9) sono riportati i risultati tipici di una prova di taglio diretto svolti con un dispositivo di grandi dimensioni per una interfaccia composta da una geomembrana rugosa e un geotessuto non tessuto. Come si può notare in Fig. 2.9a i risultati mostrano un comportamento del tipo “strain-softening”: il valore di picco della resistenza a taglio viene solitamente raggiunto per uno spostamento di scorrimento di pochi millimetri (4÷8 mm) mentre il valore residuo di resistenza viene raggiunto in corrispondenza dello spostamento massimo con la quale viene svolta la prova (nel caso in considerazione approssimativamente a 50 mm). Ad alti valori di tensione normale i valori di resistenza al taglio di picco e quelli residui risultano ben distinti, mentre per bassi valori di tensione normale ci sono quasi solo valori di picco. In Fig. 2.9b, invece, si può vedere che l'involuppo di rottura ha una forma non lineare nell'intervallo di tensioni normali testate (25÷450 kPa). Approssimativamente il 60% dei test svolti hanno rivelato un involucro di rottura non lineare e il 40% un involucro di rottura lineare.

Non sempre l'involuppo di rottura ottenuto dall'analisi di una interfaccia di geosintetici risulta lineare. Tuttavia lo si approssima con un andamento lineare, così da poter

applicare il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb (Eq. 2.1) per il calcolo dell'angolo di attrito di interfaccia.

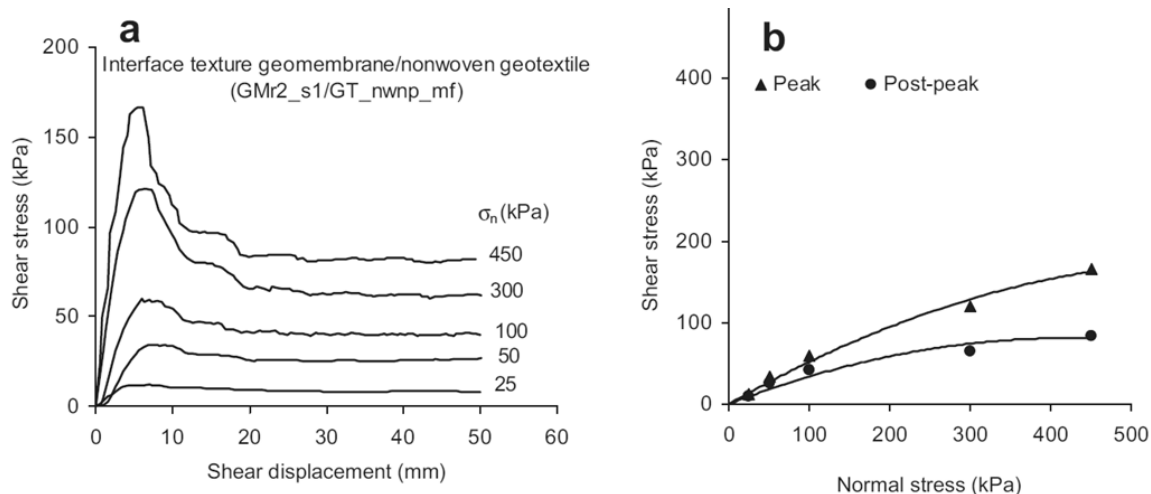


Fig. 2.9. (a) Risultati tipici di un test di taglio diretto di una interfaccia geomembrana rugosa – geotessuto non tessuto. (b) Involuppo di rottura dell'interfaccia geomembrana rugosa – geotessuto non tessuto. (B.M. Baca et al._2011)

2.4. TEST DI TAGLIO A GRANDI SPOSTAMENTI

La resistenza al taglio di una interfaccia di geosintetici a grandi spostamenti è importante a causa della perdita di resistenza a taglio all'aumentare dello spostamento che è comune a molti geosintetici. Nella pratica, grandi spostamenti di geosintetici possono essere dovuti ai geosintetici stessi, ad attività costruttive, a scorrimenti a lungo termine dei geosintetici oppure a sollecitazioni sismiche. In genere, un progettista non dovrebbe fare affidamento sul valore della resistenza di picco quando utilizza carichi di contrafforte al piede di un pendio, quando i geosintetici sono in tensione per sorreggere un pendio, quando deve valutare la stabilità a lungo termine di un pendio e quando si prevedono deformazioni dovute causate da terremoti. Di conseguenza, i parametri di resistenza al taglio a grandi deformazioni risultano essere importanti, ma non si possono in genere ricavare con i test svolti con l'usuale scatola di taglio diretto (0.3 m x 0.3 m).

Per ovviare a questa lacuna, sono stati sviluppati vari metodi capaci di ottenere grandi spostamenti. Un metodo consiste nel ripetere il test con la scatola di taglio per più volte.

Un altro metodo per incrementare lo spostamento con la scatola di taglio diretto si basa sull'inversione dello spostamento dovuto al taglio: concluso il test, si ripete la prova in verso opposto, ritornando al punto di partenza. Ogni ulteriore reset della prova o inversione della sollecitazione di taglio possono raddoppiare lo spostamento disponibile con una scatola di taglio diretto di grandi dimensioni. Entrambi i metodi sono stati utilizzati con successo per aumentare lo spostamento disponibile con il dispositivo di taglio diretto ma gli spostamenti totali ottenuti sono spesso notevolmente inferiori rispetto agli spostamenti che si verificano in campo e sono ancora inferiori di un ordine di grandezza rispetto agli spostamenti richiesti per la valutazione della resistenza al taglio a grandi spostamenti (resistenza al taglio residua). Inoltre, la ripetizione di un test più volte e l'inversione della direzione di svolgimento della prova possono introdurre variabili significative, condizioni al contorno e incoerenze nei risultati dei test se le condizioni e le procedure non vengono svolte accuratamente.

Con lo scopo di valutare la resistenza al taglio a grandi spostamenti (resistenza al taglio residua) sono stati sviluppati due nuovi dispositivi di taglio capaci di condurre test a spostamenti infiniti, senza presentare le problematiche che si riscontrano con la classica scatola di taglio diretto nel tentativo di ottenere risultati a grandi spostamenti:

- *Apparecchio Anulare di Taglio Diretto* (Cap. 3).
- *Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto* (Cap. 4).

3. APPARECCHIO ANULARE DI TAGLIO DIRETTO

Uno studio approfondito delle interfacce geomembrana (HDPE) – geotessuto (o geocomposito drenante) è stato condotto da Stark et al. (1996) svolgendo una serie di test con un Apparecchio Anulare di Taglio Diretto.

L'Apparecchio Anulare di Taglio Diretto è caratterizzato dai seguenti *aspetti positivi*:

- ✓ consente uno spostamento dovuto al taglio continuo e illimitato che si verifica lungo una sola direzione;
- ✓ consente lo sviluppo di condizioni di resistenza di interfaccia residue o minime;
- ✓ presenza della stessa interfaccia da tagliare durante tutto il test;
- ✓ presenza di una sezione trasversale di area costante durante il taglio;
- ✓ richiede una supervisione di laboratorio minima;
- ✓ richiede delle tecniche di acquisizione dei dati di facile utilizzo;
- ✓ nessuna presenza di attrito dovuto al macchinario in tutto il campo di tensioni normali;
- ✓ nessun carico di taglio eccentrico;
- ✓ un basso costo del macchinario.

Gli *aspetti negativi* sono invece:

- ✓ dimensioni dei campioni ridotte;
- ✓ variazione della direzione di taglio rispetto alla direzione di costruzione dei geosintetici;
- ✓ una lunga preparazione del campione da testare.

Un dispositivo anulare di taglio di tipo Bromhead è stato utilizzato per misurare la resistenza al taglio di varie interfacce geomembrana – geotessuto. L'apparecchio anulare di taglio Bromhead è basato su un progetto presentato da Bromhead (1979). Il campione

anulare di geosintetico ha un diametro interno di 70 mm e un diametro esterno di 100 mm. Il campione è confinato radialmente da un contenitore fondo 5 mm.

Per lo svolgimento dei test su interfacce di geosintetici Stark et al. (1996) hanno prodotto e utilizzato un contenitore del campione allargato, capace di contenere un campione anulare con un diametro interno di 40 mm e un diametro esterno di 100 mm. Il campione allargato è anche confinato radialmente da un contenitore fondo 10 mm.

Durante il taglio la piastra di carico superiore è in contatto con il contenitore del campione rotante. La sollecitazione normale è applicata alla piastra di carico e su di essa (o un geocomposito drenante) viene solitamente assicurato un geotessuto. Il contenitore del campione viene usato per assicurare una geomembrana. Nei test delle interfacce geosintetico – geosintetico il fondo zigrinato in pietra porosa all'interno del contenitore del campione viene sostituito con una corona circolare di plastica per assicurare la geomembrana. Delle corone circolari di plastica vengono usate per facilitare il fissaggio dei geosintetici con un adesivo. Anche la pietra porosa zigrinata attaccata alla piastra di carico viene sostituita con una corona circolare di plastica per i test delle interfacce geosintetico – geosintetico. Le corone circolari di plastica sono fissate alla piastra di carico e al fondo del contenitore del campione usando quattro viti. Pertanto, i test di taglio con apparecchio anulare vengono svolti con l'interfaccia tra due substrati rigidi.

Con l'Apparecchio Anulare di Taglio Diretto è possibile svolgere test sia in condizioni asciutte che in condizioni bagnate. Per lo svolgimento di una prova in condizioni bagnate è sufficiente aggiungere acqua all'interno del contenitore del campione. Lo spostamento verticale lo sforzo di taglio vengono misurati durante la prova. Vengono calcolati i valori medi di spostamento in base al numero di gradi percorsi dal contenitore del campione e al valore medio del raggio del campione (70 mm), oppure moltiplicando la velocità di spostamento a taglio per il tempo trascorso. La forza di taglio viene misurata con due anelli dinamometrici o con delle celle di carico attaccate alla piastra di carico stazionaria. Il contenitore del campione ruota davanti alla piastra di carico stazionaria con una velocità di taglio costante (Fig. 3.2).

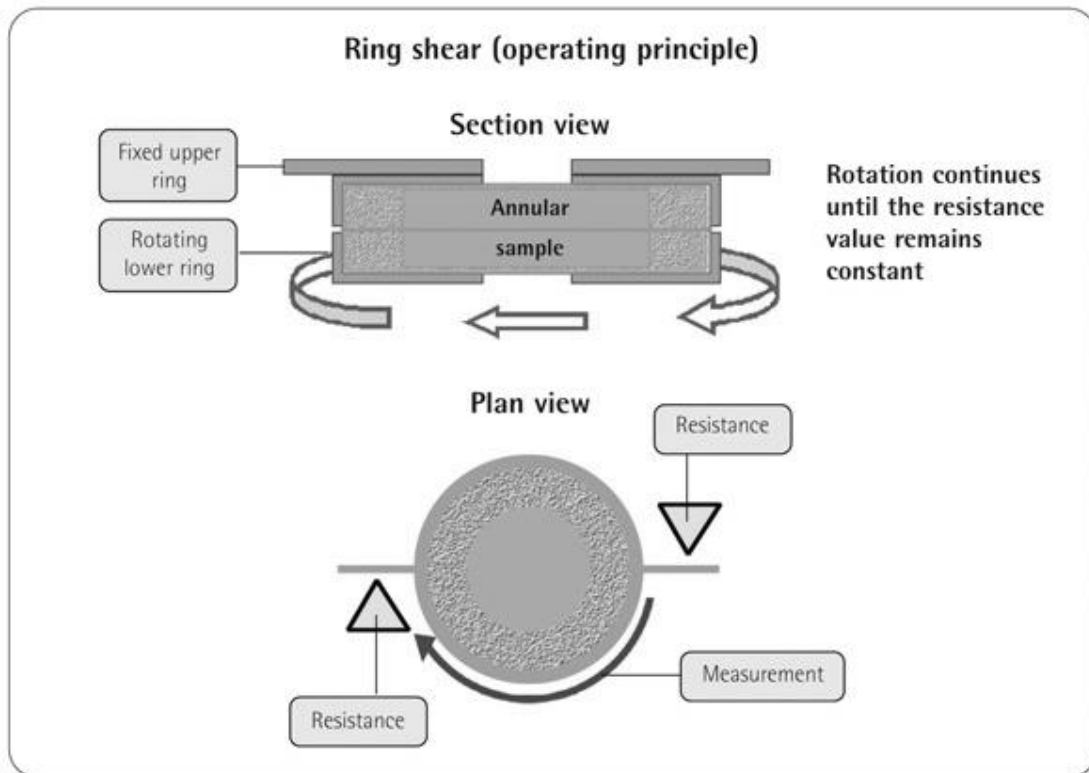


Fig. 3.2. Dispositivo anulare di taglio di tipo Bromhead: schema di funzionamento. (Wykeham Farrance Engineering Limited)

Stark et al. nel loro studio delle interfacce geomembrana – geotessuto hanno svolto una serie di test con varie velocità di taglio comprese in un intervallo tra 0.029 mm/min e 36.7 mm/min. In tal modo hanno dimostrato che la velocità di scorrimento non ha una influenza sulla resistenza a taglio. Infatti come si può vedere in Fig. 3.3, dove sono rappresentati i valori di resistenza al taglio di picco e residui di cinque test svolti in questo intervallo di velocità di taglio e sotto una sollecitazione normale di 96 kPa, i valori di picco e quelli residui variano leggermente al variare della velocità di taglio. Come è già stato detto nel capitolo della scatola di taglio diretto, anche altri studi condotti (p. es. Tripllet & Fox (2001)) hanno evidenziato l'influenza trascurabile della velocità di taglio nella determinazione della resistenza al taglio delle interfacce di geosintetici.

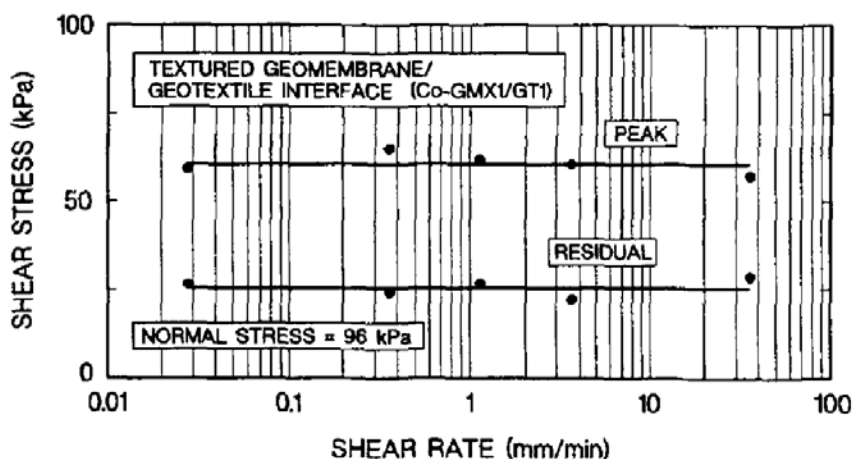


Fig. 3.3. Tipico effetto della velocità di taglio su una interfaccia geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto. (Stark et al._1996)

I geosintetici vengono fissati a delle corone circolari di plastica utilizzando uno strato sottile di malta epossidica. La malta epossidica viene lasciata indurire per 24 ore, sottoposta a una sollecitazione normale di circa 25 kPa. È da notare che la sollecitazione normale durante l'indurimento non può superare la tensione normale con la quale viene svolta la prova. La sollecitazione normale favorisce l'incollaggio dei geosintetici e minimizza gli spostamenti verticali dovuti alla malta epossidica durante lo svolgimento delle prove. I geosintetici e il contenitore del campione vengono contrassegnati per garantire che i geosintetici non scorrano durante il taglio. Se necessario, la superficie della geomembrana viene pulita con una salvietta di carta per ridurre l'effetto delle impronte digitali e del sudore sulla resistenza a taglio (Yegian & Lahlaf_1992).

All'inizio di un test il campione viene caricato con il carico normale desiderato e prima di fornire la sollecitazione di taglio si deve aspettare qualche minuto. I risultati dei test svolti da Stark e Williamson su una tipica interfaccia geomembrana rugosa – geotessuto con una velocità di taglio di 0.37 mm/min mostrano che il valore di resistenza al taglio di picco viene solitamente mobilitato dopo 10÷20 min (4÷8 mm) mentre il valore di resistenza residua dopo 35÷50 h (800÷1150 mm).

4. APPARECCHIO CILINDRICO DI TAGLIO DIRETTO

L'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto è stato sviluppato da A. L. Moss & L. R. Anderson (2000) per determinare la resistenza al taglio di una interfaccia di geosintetici a grandi spostamenti. Una schematizzazione del dispositivo è presentata in Fig. 4.1.

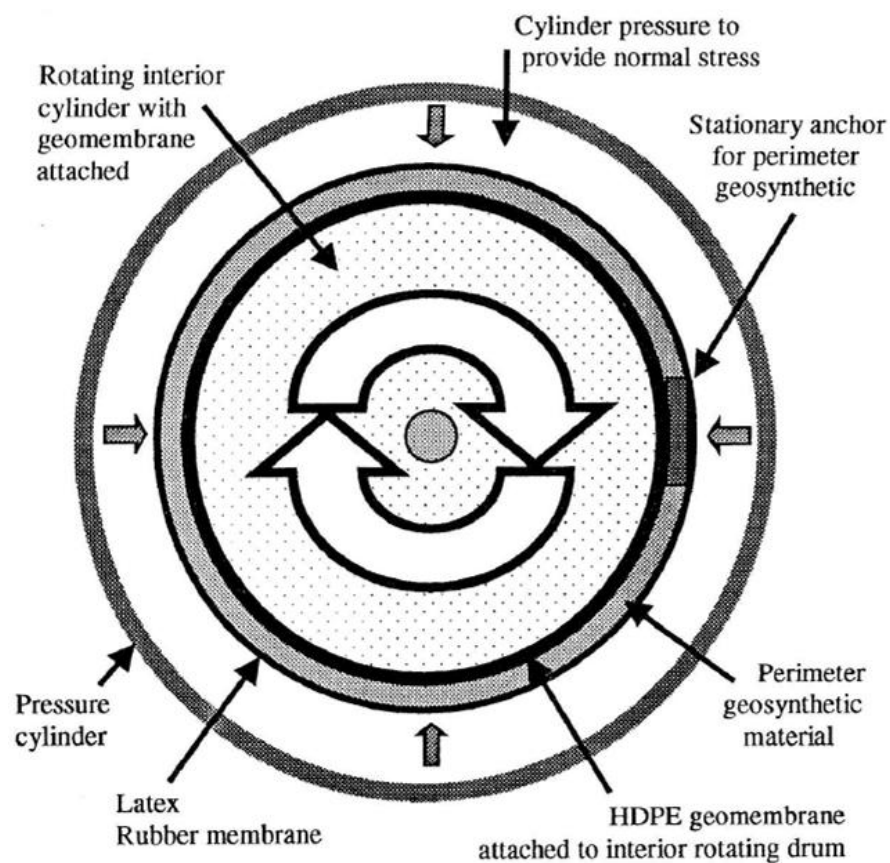


Fig. 4.1. Schema di funzionamento di un Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto. (Moss & Anderson_2000)

L'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto utilizza un campione di dimensioni 0.3 m x 0.33 m avvolto attorno ad un cilindro di diametro pari a 10.1 cm invece di disporlo su una

lastra piana come nel caso della scatola di taglio diretto. Uno dei due geosintetici dell'interfaccia da testare, solitamente una geomembrana, viene attaccato sul cilindro rotante interno e l'altro geosintetico dell'interfaccia viene attaccato su una barra di ancoraggio sostenuta dalla base non rotante e dal tappo della macchina. Le interfacce di geosintetici da testare vengono racchiuse all'interno di una sottile membrana in gomma di lattice. La sollecitazione normale viene applicata direttamente sui materiali dell'interfaccia mediante la membrana in gomma di lattice racchiudendo l'apparecchiatura cilindrica all'interno di una camera a pressione cilindrica e pressurizzandola. Lo svolgimento di una prova viene compiuto facendo ruotare il cilindro interno con la geomembrana attaccata su di esso contro il secondo geosintetico della interfaccia tenuto fermo dalla barra di ancoraggio. Durante la prova viene misurata la coppia necessaria a far ruotare il cilindro interno contro il geosintetico stazionario e la rotazione angolare del cilindro rispetto alla barra di ancoraggio. Lo spostamento dovuto al taglio viene calcolato in base all'angolo di rotazione del cilindro (in gradi) e al raggio del cilindro. Un regolatore di velocità e un sistema di trasmissione ad ingranaggi forniscono un ampio intervallo di velocità di taglio mentre un sistema di acquisizione dati automatizzato provvede al monitoraggio della forza normale (pressione della camera), del momento torcente e dello spostamento relativo. La sollecitazione normale viene determinata dal momento torcente necessario per far ruotare il cilindro interno sull'interfaccia di geosintetico in base alla sollecitazione normale fornita dal cilindro pressurizzato. L'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto fornisce una interfaccia di geosintetici continua che può essere testata continuamente a qualsiasi valore di spostamento desiderato senza dover ricorrere ad azzerare i test o ad invertire la direzione di svolgimento della prova necessari con la Scatola di Taglio Diretto (0.3 m x 0.3 m). L'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto segue la stessa normativa ASTM D-5321 (1998) seguita come protocollo per lo svolgimento dei test con la Scatola di Taglio Diretto. Per quanto riguarda il valore della velocità di taglio da utilizzare la ASTM D-5321 raccomanda un valore compreso tra 1 mm/min e 5 mm/min. La differenza principale nell'applicare la normativa ASTM nel caso dell'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto consiste nell'utilizzo di una interfaccia su una superficie curva (cilindrica) continua invece di una lastra piana. Lo svolgimento dei test con il nuovo dispositivo fornisce risultati per valori di spostamento continui e illimitati nella direzione del macchinario, ben al di là dei valori di spostamento limite (7.5÷10 cm) ottenibili con la scatola di taglio diretto. Moss & Anderson hanno condotto dei test con il dispositivo cilindrico su

specifiche interfacce per valori di spostamento in eccesso fino a 6 m. Testare le interfacce di geosintetici nella direzione del macchinario risulta vantaggioso in quanto l'installazione dei geosintetici sui pendii in genere comporta una installazione con la direzione del macchinario lungo il pendio.

Per quanto riguarda gli svantaggi, un Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto include una lunga preparazione del campione da testare e la nascita di un problema legato alla rigidità delle geomembrane a bassi valori di sollecitazione normale nel caso che una geomembrana (HDPE) venga testata come materiale di interfaccia esterno. Infatti, se si svolge un test con una interfaccia geomembrana – geomembrana la geomembrana esterna, che è avvolta attorno al fusto e ancorata lungo il bordo, utilizza un po' dello sforzo normale applicato sul perimetro esterno del campione cilindrico di geosintetici per vincere la rigidità della geomembrana stessa. Di conseguenza la sollecitazione normale realmente applicata sulla interfaccia risulta essere inferiore alla sollecitazione normale applicata all'esterno del campione (mediante la membrana in gomma di lattice). Pertanto, questo problema implica una sottostima del valore di resistenza al taglio residuo, tanto più marcata quanto più basso è il valore della sollecitazione normale. Il problema è invece irrilevante per alti valori di sollecitazione normale, per le geomembrane flessibili o per fogli di geomembrana (HDPE) sottili. Un modo per evitare che si presenti questo problema consiste nel fissare il campione in HDPE sulla base del cilindro interno dell'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto e saldarlo ermeticamente in modo da formare una superficie continua di HDPE sul supporto rigido in alluminio del fusto. È importante far notare che il problema appena esposto di solito non si riscontra nei comuni test di taglio poiché nelle applicazioni pratiche normalmente non si incontrano interfacce geomembrana – geomembrana.

5. IL PIANO INCLINATO

5.1. INTRODUZIONE

Il piano inclinato è utilizzato per determinare l'attrito tra le interfacce terreno-geosintetico o geosintetico-geosintetico, specialmente nel caso di bassa sollecitazione normale.

Il dispositivo per testare le interfacce, illustrato in Fig.5.1, è principalmente composto da:

- Un sistema di inclinazione a vite motorizzato.
- Una scatola a geometria rettangolare, supportata da un sistema di rotaie fissate sul piano.
- Dei sensori collegati ad un registratore di dati controllato da un computer, che forniscono la misura dell'angolo di inclinazione (β) e lo spostamento della scatola (u).
- In aggiunta, un sensore di forza montato sulla punta del piano di inclinazione usato per valutare l'attrito residuo (questo dispositivo non è incluso nella procedura standard).

- 1- Test box (1 x 0.7 x 0.3 m³)
- 2- Portion of inclined wall
- 3- Soil
- 4- Geosynthetic sheet
- 5- Rigid plane support
- 6- Box displacement sensor
- 7- Plane inclination sensor
- 8- Geosynthetic anchoring
- 9- Data logging
- 10 - Force gauge

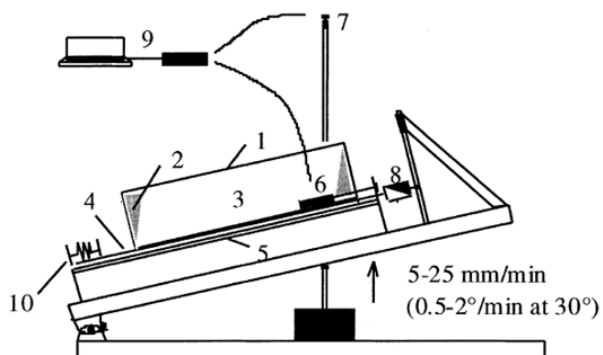


Fig. 5.1. Schema dell'apparecchio di base per la caratterizzazione dell'attrito. (S. Lalarakotoson et al., 1999)

Un sensore posto sulla punta di una vite di inclinazione fornisce lo spostamento verticale lungo l'asse della vite, dal quale si ricava l'angolo di inclinazione del piano.

Una scatola ortogonale viene usata quando l'angolo di slittamento (β_p) (massimo valore di β prima dello slittamento totale) rimane sotto i 30° . Per angoli maggiori, invece, viene utilizzata una scatola con le pareti anteriore e posteriore inclinate a 30° rispetto alla perpendicolare al piano inclinato in modo da limitare la non uniformità della tensione di taglio lungo l'interfaccia testata.

L'apparato è composto da un piano (o una scatola) basculante sul quale è posta una scatola. Quest'ultima è attrezzata con un sistema di ruote e può muoversi lungo delle rotaie presenti in entrambi i lati del piano inclinato. La scatola superiore può essere riempita con terreno e le sue considerevoli dimensioni (indicativamente 1.0m x 0.7m x 0.3m) permettono di testare campioni di geosintetici di notevoli dimensioni. I geosintetici vengono disposti tra il piano e la scatola. A seconda dell'interfaccia da testare essi possono essere attaccati sulla scatola o fissati al piano.

5.1.1. Procedimento operativo

Il campione di geosintetico, legato ad un supporto di compensato o di altro materiale, viene inserito tra il piano di base e la scatola superiore ed ancorato in sommità con delle fascette di metallo. Lo spazio tra la scatola e il piano del geotessile all'inizio del test è stabilito in modo da evitare qualsiasi contatto diretto tra la scatola e il campione di geosintetico. La Normativa Europea raccomanda una distanza compresa tra 0.5 mm e 1.5 mm tra la scatola e il campione di geosintetico per prevenire eventuali perdite di suolo durante la prova.

Nel caso dell'analisi di interfacce terreno-geosintetico, il terreno viene inserito nella scatola con una pala. Lo stato sciolto ($D_r = 0.2$) si ottiene semplicemente versando il terreno. Lo stato sciolto denso, invece, ($D_r = 0.85$) si ottiene compattando manualmente il terreno a strati di 5cm alla volta usando un pestello.

Un test convenzionale consiste in un'inclinazione graduale del piano ad una velocità angolare media compresa tra 3.0 °/min e 0.5°/min. Il test si considera concluso quando la scatola raggiunge un certo valore di scorrimento (u), ad esempio 12cm. I risultati tipici di una prova possono essere riassunti in un diagramma rappresentante la variazione dello spostamento u in funzione dell'inclinazione β (Fig.5.2).

In questo paragrafo e in quello precedente è stato descritto l'assetto generale di un piano inclinato, con lo scopo di illustrare il funzionamento del dispositivo comunemente utilizzato per testare le interfacce dei sistemi di rivestimento sotto bassi valori di carico normale. La sperimentazione con il piano inclinato ha portato alla definizione di una procedura standard (EN ISO 12957-2 2005) raccomandata dalla Normativa Europea per la caratterizzazione del comportamento dell'attrito d'interfaccia, che prevede l'utilizzo di un dispositivo con particolari caratteristiche tecniche. Tuttavia molti studi fino ad ora condotti hanno portato alla realizzazione di vari "piani inclinati", differenti l'uno dall'altro per le proprie peculiarità tecniche, in grado di cogliere i vari fattori influenti. Si è quindi in presenza di un dispositivo non universalmente accettato, le cui caratteristiche tecniche sono ancora in fase di sperimentazione.

5.1.2. Tipici risultati

I test di scorrimento su di un piano inclinato forniscono informazioni sul comportamento all'interfaccia fino alla mobilitazione del massimo valore d'attrito durante il generico scorrimento.

Nel caso dell'analisi di interfacce terreno-geosintetico le due densità adottate per il terreno forniscono due tipologie di comportamento, indipendentemente dal geosintetico testato: un comportamento a scatti osservato durante i test con la sabbia sciolta, e uno scorrimento continuo durante i test con la sabbia densa. Nella figura 5.2 sono rappresentati i risultati delle prove svolte da Lalarakotoson et al. (1999) sulle interfacce con sabbia sciolta ($D_r = 0.2$) e con sabbia compatta ($D_r = 0.85$) nei casi di geomembrana liscia (Gm TFR) e geotessuto non tessuto (Gt TGX). Per lo svolgimento di queste prove è stata adottata una inclinazione graduale del piano ad una velocità angolare media di 0.5°/min.

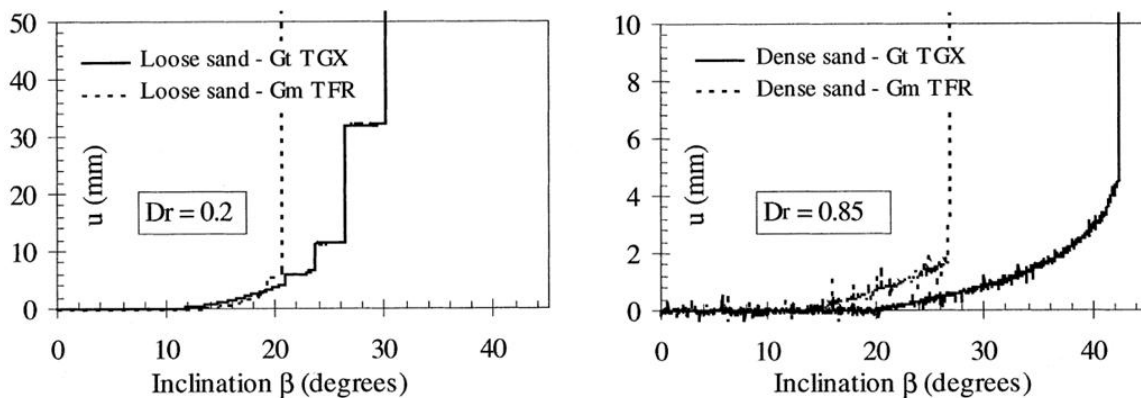


Fig. 5.2. Tipici risultati ottenuti con le due densità di sabbia caratteristiche. (S. Lalarakotoson et al._1999)

Per le due densità di terreno considerate, le tipologie di comportamento ottenute con il piano inclinato differiscono da quelle osservate solitamente con la scatola di taglio diretto a causa dei differenti cinematismi dei due test: con la scatola di taglio diretto la scatola si muove ad una velocità costante, mentre con il piano inclinato è l'inclinazione del piano e, di conseguenza, la forza motrice ad essere controllata. Il test con il piano inclinato ha il vantaggio di mettere in luce il comportamento a scatti, che non si riesce a vedere con la scatola di taglio diretto con una velocità di spostamento costante. Risulta quindi essere più idoneo l'utilizzo di un piano inclinato come dispositivo per testare l'attrito d'interfaccia dei sistemi di rivestimento.

5.1.3. Determinazione delle caratteristiche di attrito

Il piano inclinato viene utilizzato per studiare il comportamento di scorrimento all'interfaccia. Le principali informazioni cercate con un test d'interfaccia sono:

- Il massimo angolo di attrito (θ_{gp}): il massimo valore di resistenza d'attrito ottenuto per un dato valore di tensione normale σ (equivalente al valore di picco).
- La rigidità di attrito (k_s): ottenuta per lo stesso valore σ , fornisce informazioni sulla mobilitazione del massimo attrito con lo spostamento.

- L'angolo di attrito residuo (ϕ_{gr}): valore dell'attrito a scorrimento avvenuto, sempre con la stessa σ .

Il massimo angolo di attrito (ϕ_{gp}):

L'angolo di attrito ϕ_{gp} si deduce dall'angolo di inclinazione β_p raggiunto il quale si ha scorrimento totale. Si tiene in considerazione l'influenza dell'attrito del sistema di guida della scatola e del peso della scatola. L'equilibrio del sistema alla soglia di scorrimento totale è dato dalla seguente equazione (fig.5.3):

$$(P_B + P_S)\sin\beta_p = F_{interfaccia} + F_R \quad (5.1)$$

Il peso della scatola, il peso del terreno, la forza di attrito assorbita all'interfaccia testata e l'attrito del sistema di guida sono rispettivamente indicati con P_B , P_S , $F_{interfaccia}$ e F_R .

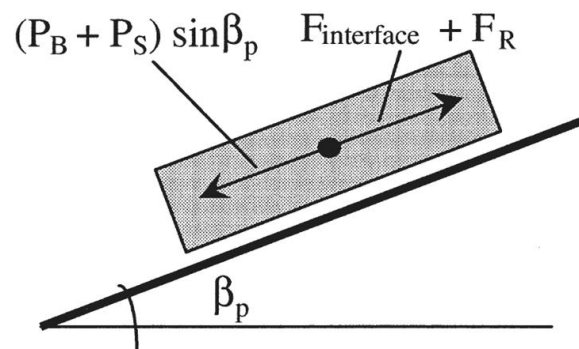


Fig. 5.3. Definizione del massimo angolo di attrito ϕ_{gp} con lo scorrimento. (S. Lalarakotoson et al._1999)

Il valore di attrito offerto dal sistema di guida su rotaie F_R si ottiene dalla calibrazione del dispositivo svolgendo una serie di test con la scatola superiore vuota e con diversi valori di sovraccarico. Si ottiene come risultato un valore costante di F_R , il che sta ad indicare l'indipendenza di F_R dal carico normale. L'attrito tra le pareti lisce della scatola e il terreno viene trascurato. In questa circostanza si può assumere che la componente verticale del peso del terreno, $P_S \cos\beta$, sia trasferita interamente alla base del piano e che la tensione media normale sul geosintetico sia: $\sigma = P_S \cos \beta/S$ con S l'area dell'interfaccia

tra terreno e geosintetico. All'equilibrio limite quindi si ha: $F_{interfaccia} = P_S \cos \beta \tan \Phi_{gp}$ che combinata con l'Eq. 5.1 può essere scritta come:

$$\tan(\Phi_{gp}) = \left(1 + \frac{P_B}{P_S}\right) \tan \beta_p - \frac{F_R}{P_S \cos \beta_p} \quad (5.2)$$

La rigidezza di attrito (k_s):

La rigidezza di attrito k_s è definita da $k_s = \tau_p/u_p$, dove τ_p è il massimo sforzo di taglio definito da $\tau_p = \sigma \tan \Phi_{gp}$ e u_p è il corrispondente spostamento ottenuto per $\beta = \beta_p$. σ è la pressione normale sul piano di scorrimento, definita da $\sigma = \sigma_0 \cos \beta$ con σ_0 : pressione normale iniziale per $\beta=0$ (piano nella posizione orizzontale).

L'angolo di attrito residuo (Φ_{gr}):

Per determinare l'angolo di attrito residuo si lascia che la scatola scorra sul piano inclinato finchè non si scontra con un ammortizzatore idraulico dotato di un sensore di compressione e posizionato sul fondo del piano. L'angolo Φ_{gr} è così determinato alla fine dell'equilibrio statico tramite la misurazione della forza di spinta, dopo la scomparsa degli effetti di impatto sulle misurazioni (Fig. 5.4): $\tan \Phi_{gr} = \tau_{res}/\sigma$ con τ_{res} che è la tensione di taglio residua. L'equilibrio del sistema può essere usato come prima per ottenere la seguente equazione, dove F_B rappresenta la spinta finale:

$$\tan(\Phi_{gr}) = \left(1 + \frac{P_B}{P_S}\right) \tan \beta_p - \frac{F_R + F_B}{P_S \cos \beta_p} \quad (5.3)$$

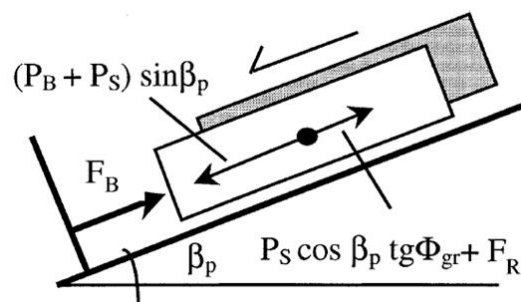


Fig. 5.4. Definizione dell'angolo di attrito residuo Φ_{gr} dopo lo scorrimento. (S. Lalarakotoson et al., 1999)

5.2. LA PROCEDURA STANDARD

La normativa EN ISO 12957-2 (2005) descrive un metodo per la determinazione dell'angolo di attrito tra interfacce di geosintetici in contatto con terreno a bassi valori di tensione normale utilizzando un piano inclinato. Seguendo questa procedura detta "Standard Displacement Procedure", l'angolo di attrito dell'interfaccia in esame viene determinato utilizzando un criterio di scorrimento tra i geosintetici testati.

La normativa dice che l'angolo d'attrito \varnothing_{stan} dell'interfaccia geosintetico-geosintetico si determina misurando l'angolo di inclinazione, β_{50} , del piano con il quale la scatola superiore con il geosintetico attaccato scorre con uno spostamento di $u = 50$ mm. L'angolo di attrito è poi calcolato considerando il seguente equilibrio statico (Fig. 5.5):

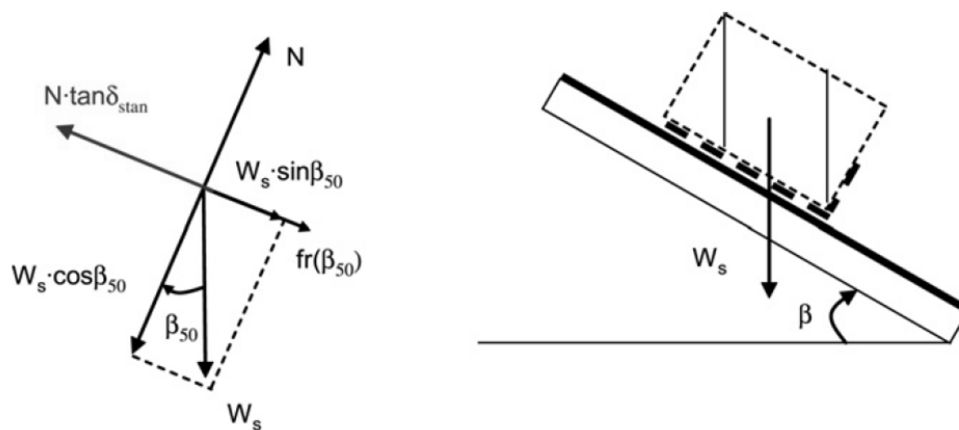


Fig. 5.5. Equilibrio delle forze agenti sul dispositivo per i test con la "Standard Displacement Procedure".

(L. Briançon et al._2011)

$$W_s \cdot \sin \beta_{50} + F_r(\beta_{50}) - N \cdot \tan \varnothing_{stan} = 0 \quad (5.4a)$$

$$W_s \cdot \cos \beta_{50} = N \quad (5.4b)$$

Dove, N è la forza di reazione che bilancia la componente normale del peso del terreno, W_s , nella scatola superiore con le rotelle; la componente del peso della scatola vuota, W_b , è indipendente bilanciata dalla reazione del telaio metallico. Una calibrazione viene dapprima eseguita con la scatola vuota per calcolare la corrispondente forza d'attrito tangenziale, F_b , come segue:

$$W_b \cdot \sin\beta - F_b = F_r(\beta) \quad (5.5)$$

dove $F_r(\beta)$ è la forza necessaria per trattenere la scatola superiore vuota.

Il valore dell'angolo di attrito d'interfaccia standard, ϕ_{stan} , si ottiene combinando le Eq. (5.4a) e (5.5b), con il seguente risultato:

$$\tan\phi_{stan} = \tan\phi_{50}^{stat} = \frac{W_s \cdot \sin\beta_{50} + F_r(\beta_{50})}{W_s \cdot \cos\beta_{50}} \quad (5.6)$$

L'angolo di attrito ϕ_{stan} è quindi scritto considerando un'analisi statica, tenendo in conto il peso del terreno W_s contenuto nella scatola superiore, l'inclinazione del piano β_{50} e la forza $F_r(\beta_{50})$ necessaria per trattenere la scatola superiore vuota per uno scorrimento della scatola di 50 mm.

La Normativa Europea EN ISO 12957-2 (2005) descrive due diverse apparecchiature di piano inclinato. Nelle Fig. 5.6 e 5.7 è rappresentata l'apparecchiatura con la base rigida. Mentre in Fig. 5.8 è illustrata l'apparecchiatura in cui il geosintetico è supportato da una scatola inferiore riempita di terra al posto della base rigida.

figura 1 **Prova su piano inclinato**

Legenda

- 1 Perno
- 2 Base rigida
- 3 Provino
- 4 Scatola di terreno supportato da rotelle
- 5 Cunei all'interno della scatola per garantire il corretto allineamento o la forza normale (cunei 1 a 2)
- 6 Struttura di carico per un carico normale
- 7 Misuratore di spostamento e interruttore di fine corsa
- 8 Dispositivo di sollevamento
- 9 Dispositivo di misura dell'inclinazione
- 10 Carico

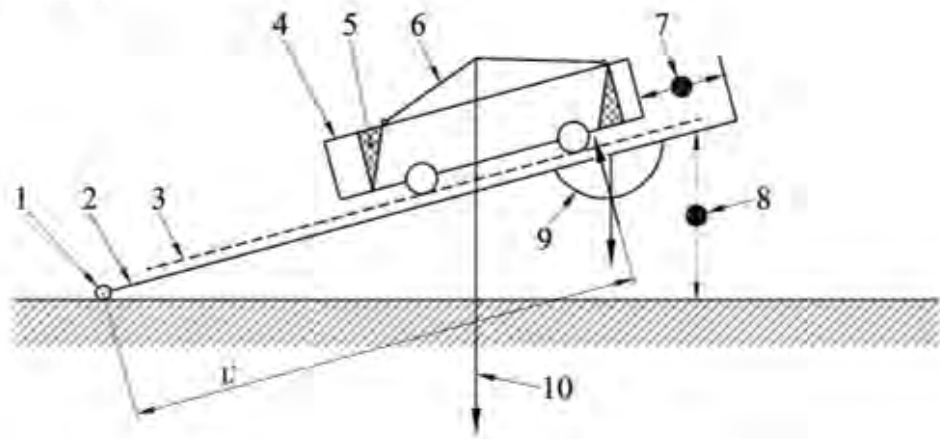


Fig. 5.6. Schema del dispositivo con base rigida descritto dalla Normativa Europea. (EN ISO 12957-2_2005)

Sezione trasversale di una apparecchiatura di prova tipica

Legenda

- 1 Carico
 - 2 Struttura di carico per un carico normale
 - 3 Gruppo di distribuzione del carico normale
 - 4 Terreno
 - 5 Carico
 - 6 Base inclinabile inferiore rigida
 - 7 Provino
 - 8 Rotelle regolabili o fisse
 - 9 Guide di scorrimento
- Dimensioni in millimetri

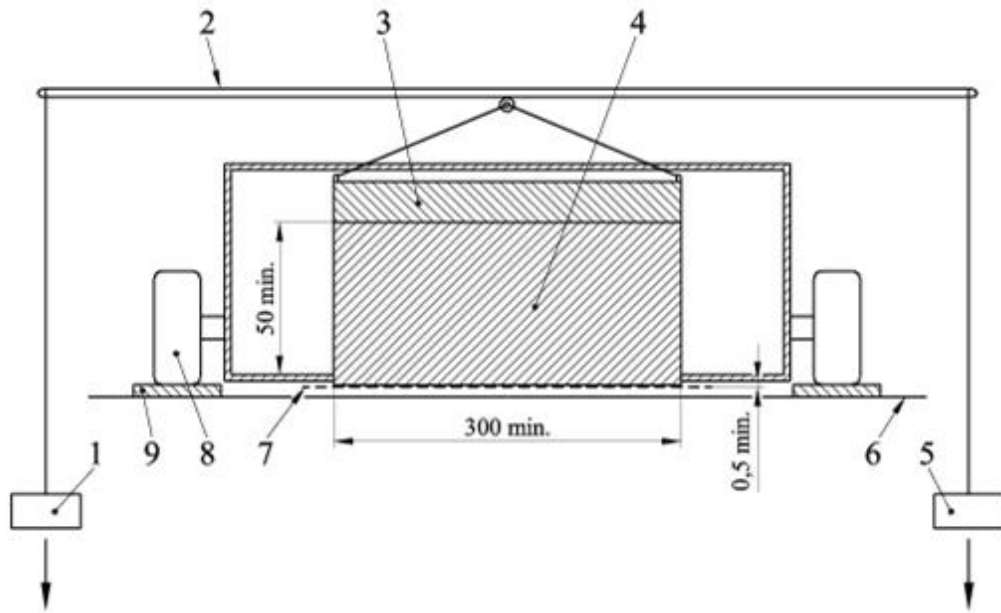


Fig. 5.7. Schema della sezione dispositivo con base rigida descritto dalla Normativa Europea. (EN ISO 12957-2_2005)

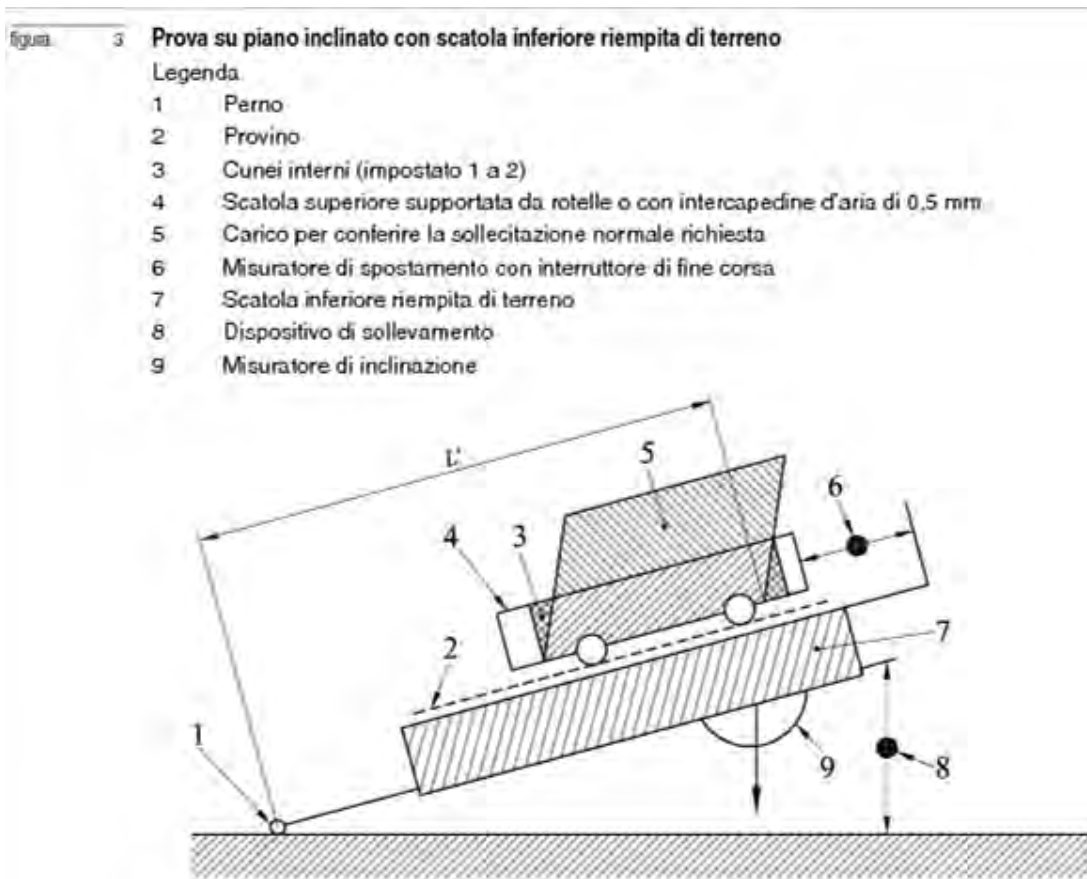


Fig. 5.8. Schema del dispositivo con scatola inferiore riempita di terreno descritto dalla Normativa Europea.
(EN ISO 12957-2_2005)

Durante lo svolgimento di una prova la forza normale all'interfaccia, $W \cdot \cos\beta$, deve essere uniformemente applicata in modo da ottenere una distribuzione regolare della tensione normale sull'intera superficie del campione. La scatola superiore (riempita di terreno) deve garantire che, quando l'apparecchiatura si inclina, la linea di azione della forza normale passi attraverso il centro di gravità della scatola superiore, per esempio utilizzando cunei o pareti inclinabili. La EN ISO 12957-2 specifica che la forza normale applicata deve essere tale che la tensione normale iniziale (per $\beta = 0$) sia uguale a 5.0 ± 0.1 kPa. Il piano deve essere equipaggiato con un meccanismo per inclinare il piano lentamente e ad una velocità costante di circa $d\beta/dt = 3.0 \pm 0.5^\circ/\text{min}$. Il geosintetico inferiore deve essere fissato al piano inclinato con un apparecchio per limitare qualsiasi scorrimento relativo tra il geosintetico e il piano. Riguardo le dimensioni del dispositivo la normativa impone delle dimensioni minime sia per la scatola superiore (lunghezza $l_u = 0.3$ m, larghezza $b_u = 0.3$ m) che per l'eventuale scatola inferiore ($l_l = 0.4$ m, $b_l = 0.325$

m). La scatola superiore può essere dotata di rotelle che poggiano su guide di scorrimento poste al di fuori del provino di geosintetico. In questo caso l'interno della scatola superiore deve essere rivestito con acciaio liscio o con una superficie a basso attrito per ridurre l'attrito tra terreno e lati della scatola. Nel caso in cui la scatola superiore non sia dotata di rotelle, devono essere utilizzate delle zeppe per garantire uno spazio tra il geosintetico e la scatola; le zeppe sono da rimuovere prima di inclinare l'apparecchiatura. Quando si utilizzano le zeppe, l'attrito tra terra e scatola superiore deve essere sufficiente per evitare che la scatola superiore si assesti sul provino durante la prova. Lo spazio tra la base della scatola superiore e il geosintetico deve essere regolabile o fatto in modo che la scatola superiore non poggi sul provino. Lo spazio deve essere tra 0.5 mm e 1.5 mm per ridurre al minimo la perdita di terreno durante la prova. Lo spostamento della scatola superiore deve essere misurato durante la prova con una precisione di ± 0.05 mm. Le letture dello spostamento devono essere effettuate ad intervalli non maggiori di 30 s.

5.3. STUDIO DELLA FASE DINAMICA DI SCORRIMENTO

Il parametro che solitamente si deduce da un test svolto con un piano inclinato è l'angolo di attrito \emptyset . Quest'angolo, come abbiamo visto nel capitolo precedente, viene calcolato conformemente alla normativa EN ISO 12957-2 per uno scorrimento convenzionale pari a 50 mm. Tuttavia da un test con un piano inclinato si possono ricavare molte più informazioni. È quindi consigliato studiare l'intera fase dinamica, in particolare la fase durante la quale la scatola superiore è impegnata in un moto di scorrimento uniformemente accelerato. Vengono così definiti due nuovi parametri, chiamati angolo di attrito statico e angolo di attrito dinamico.

Gourc e Reyes Ramirez (2004) hanno apportato delle modifiche al piano inclinato standard (Fig. 5.9) per studiare le possibili interfacce dei sistemi di rivestimento sotto condizioni cinematiche. Le dimensioni della scatola superiore e di quella inferiore (il piano) sono state modificate per incrementare la lunghezza dello spostamento di scorrimento nella direzione della pendenza. L'interfaccia geosintetico-geosintetico è stata semplificata: la scatola superiore riempita di terreno è stata sostituita da una piastra mobile (Fig. 5.10 e 5.11). Essa è composta da un geosintetico incollato ad una piastra di legno ($l_u = 0.18$ m, $b_u = 0.7$ m), da una piastra di metallo fissata a delle guide laterali e tre

differenti carichi costituiti da tavole di metallo. La lunghezza della piastra di legno, l_u , è stata accorciata per consentire l'osservazione di scorrimenti fino a grandi spostamenti. Teoricamente, la configurazione delle guide laterali e il contatto con rulli consentono una trasmissione del carico normale sull'interfaccia col geosintetico e garantiscono uno spostamento ideale in relazione alla pendenza; il sistema di guida può inoltre essere assunto senza attrito ($F_r(\beta) = 0$). Le dimensioni della scatola inferiore (il piano inclinato) sono di 1.3 m in lunghezza (l_l) e 0.8 m in larghezza (b_l), e i geosintetici possono essere attaccati ad essa con prese di ancoraggio o con adesivo. La velocità di inclinazione del piano $d\beta/dt$ può essere controllata e variata tra 0.5 e $4.0^\circ/\text{min}$.

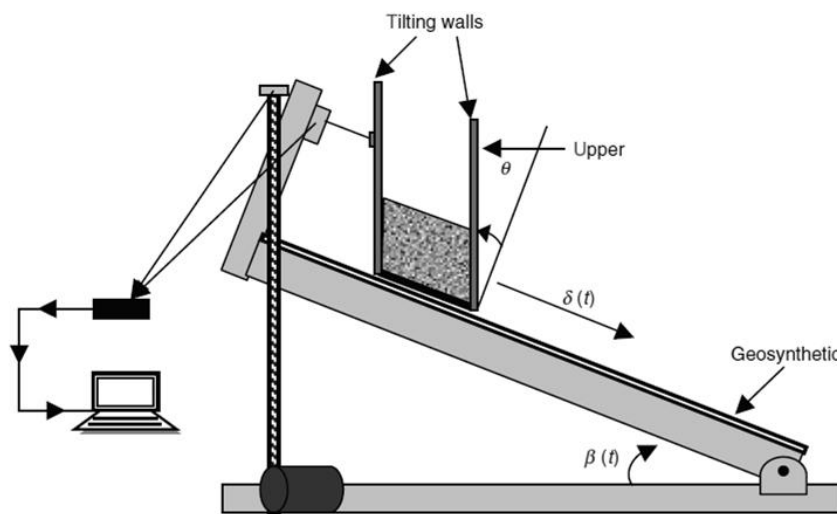


Fig. 5.9. Condizioni generali del test con il piano inclinato. (Gourc & Reyes Ramírez_2004)

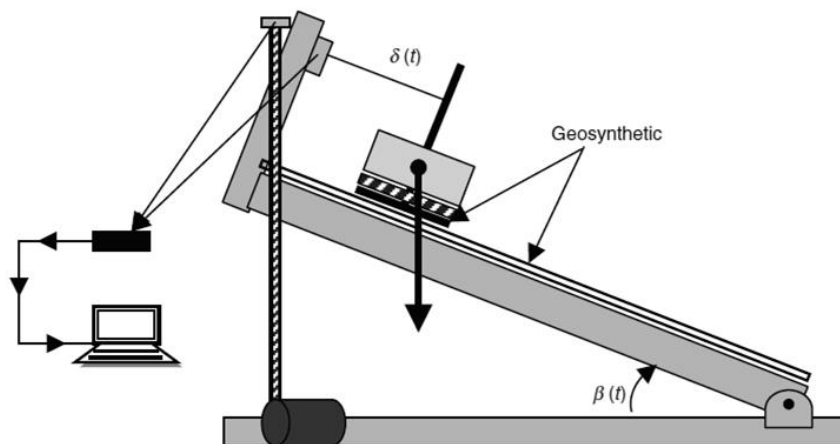


Fig. 5.10. Adattamento del piano inclinato per lo svolgimento dei test con interfacce geosintetico-geosintetico. (Gourc & Reyes Ramírez_2004)

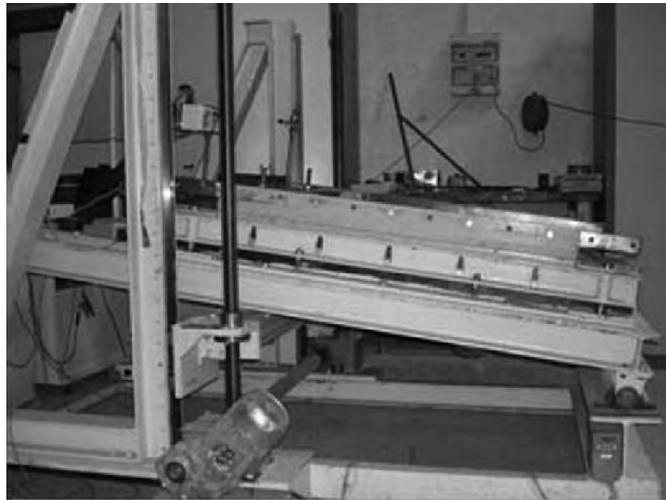


Fig. 5.11. Piano inclinato modificato utilizzato per osservare le condizioni dinamiche. (L. Briançon et al._2011)

5.3.1. Tipi di comportamento

Dai risultati ottenuti con questo “setup modificato”, utilizzato per analizzare la fase dinamica di scorrimento, si può dividere il comportamento della scatola in tre fasi (Fig. 5.12):

- Fase 1 (*fase statica*): la scatola superiore è praticamente immobile ($u = 0$) sul piano inclinato fino al raggiungimento dell'angolo critico $\beta = \beta_0$.
- Fase 2 (*fase di transizione*): per un incremento dell'angolo di inclinazione ($\beta > \beta_0$), la scatola superiore si muove gradualmente verso il basso.
- Fase 3 (*fase di scorrimento non stabilizzato*): con $\beta = \beta_s$ la scatola superiore subisce uno scorrimento non stabilizzato ad una velocità crescente (accelerazione costante γ_c), anche se l'inclinazione del piano è mantenuta costante.

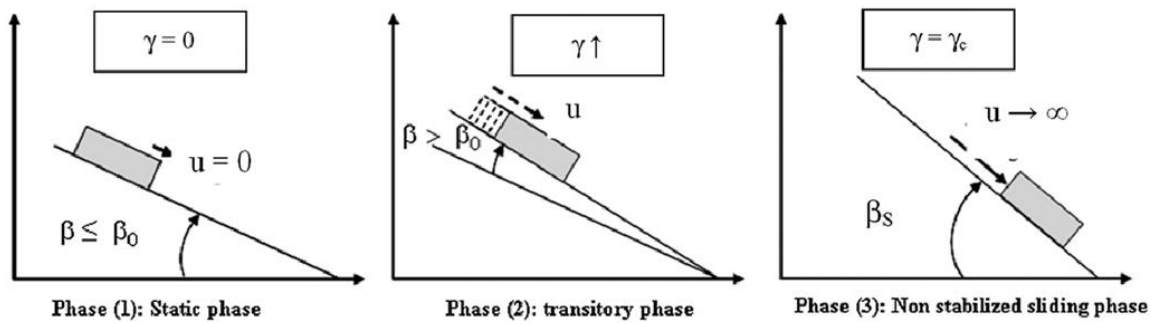


Fig. 5.12. Fasi differenti del processo di scorrimento della scatola superiore. (L. Briançon et al._2011)

Qui β_0 è definito come l'angolo di inclinazione al limite statico di equilibrio e β_s è l'angolo di inclinazione per lo scorrimento non stabilizzato.

La Fase 2 può essere di vari tipi (Fig. 5.13):

- ✓ *scorrimento immediato*: brusco spostamento della scatola superiore durante lo scorrimento non stabilizzato con una quasi inesistente Fase 2 ($\beta_0 = \beta_s$);
- ✓ *scorrimento a scatti*: spostamento u che aumenta in funzione dell'angolo β con un andamento "a scalini";
- ✓ *scorrimento graduale*: spostamento u che aumenta progressivamente con l'angolo β .

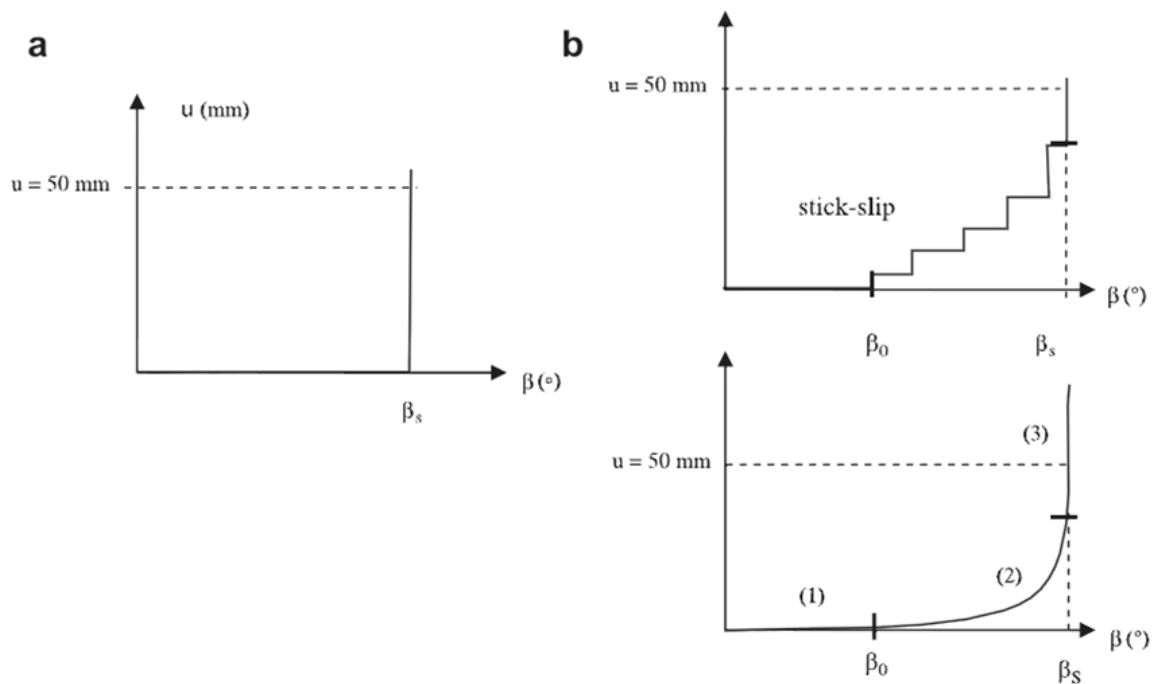


Fig. 5.13. Differenti meccanismi di scorrimento: (a) scorrimento improvviso; (b) scorrimento graduale. (L. Briançon et al._2011)

Lo scorrimento non stabilizzato (Fase 3) si verifica molto spesso per valori di spostamento inferiori al valore convenzionalmente considerato dalla normativa ($u = 50$ mm) quando si misura l'angolo di attrito ($\theta_{50}^{\text{stat}}$) (Fig. 5.13b). Quindi spesso il criterio standard risulta poco adatto.

Dal valore di inclinazione $\beta = \beta_s$ la velocità di scorrimento della scatola superiore diventa significativa, e l'analisi meccanica deve essere definitivamente condotta utilizzando un approccio dinamico (tenendo in considerazione l'accelerazione γ_c della scatola) e non usando un approccio statico come proposto dalla normativa.

Una fase "statica" (Fase 1) sarà così distinta da una fase "dinamica" (Fase 3), con la Fase 2 che agisce come fase transitoria ($\beta_0 < \beta < \beta_s$), durante la quale l'interpretazione statica è solamente un'approssimazione.

Viene trovato un angolo d'attrito dinamico (θ_c^{din}), che caratterizza l'attrito d'interfaccia in una parte della Fase 3. Per alcune interfacce l'attrito dinamico può essere completamente differente dall'attrito statico, a causa dell'influenza della velocità di

spostamento (variazione delle condizioni di contatto) e del danneggiamento (connesso allo scorrimento).

5.3.2. Interpretazione dinamica

In Fig. 5.14 sono presentate le varie forze agenti sulla scatola superiore, insieme alle loro componenti normali e tangenziali all'interfaccia:

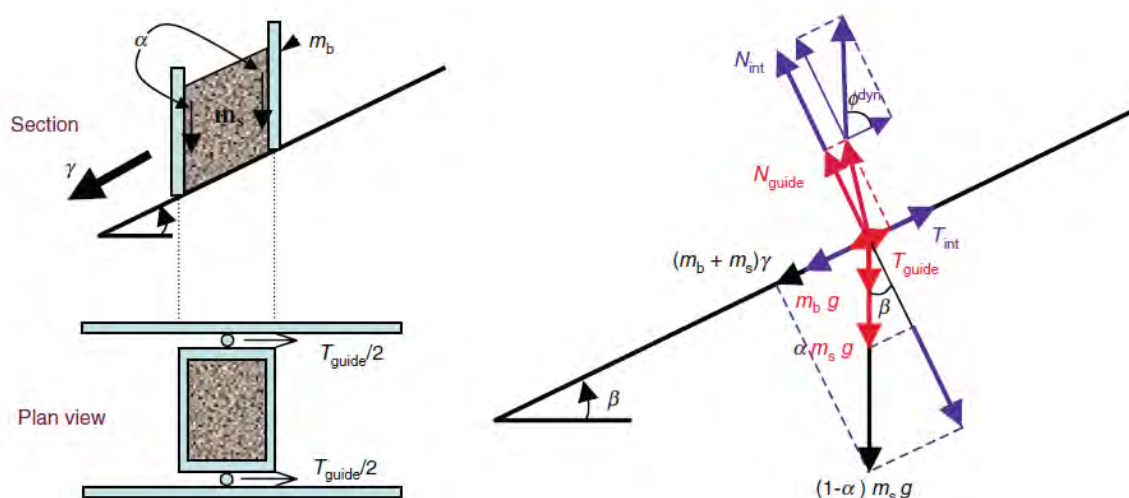


Fig. 5.14. Forze agenti sulla scatola superiore (spostamento con accelerazione γ). (Gourc & Reyes Ramírez_2004)

Le forze in gioco sono le seguenti:

- $m_b \cdot g$ = peso della scatola superiore;
- $m_s \cdot g$ = peso del terreno nella scatola superiore;
- $N_{interfaccia}$, $T_{interfaccia}$ = reazioni dell'interfaccia di geosintetico;
- N_{guide} , T_{guide} = reazioni del sistema di guide;

Durante la Fase 3 la scatola superiore si muove con accelerazione γ . Questa accelerazione è parallela al piano inclinato:

$$(m_b + m_s)\gamma = (m_b + m_s)g + (N_{interfaccia} + T_{interfaccia}) + (N_{guide} + T_{guide}) \quad (5.7)$$

Le guide della scatola assorbono non solo la componente normale del peso della scatola, ma anche una parte (α) della componente normale del peso del terreno contenuto nella scatola, tramite l'attrito lungo le pareti della scatola:

$$N_{guide} = (m_b \cdot g \cos\beta) + \alpha(m_s \cdot g \cos\beta) \quad (5.8)$$

con $0 \leq \alpha \leq 1$.

La calibrazione dell'attrito delle guide, con masse metalliche al posto del terreno, permette di determinare la relazione:

$$T_{guide} = f(N_{guide}) \quad (5.9)$$

che corrisponde all'attrito parassita del sistema di guida. Questa relazione, nel presente caso, deve ovviamente essere ricavata sotto condizioni cinematiche.

La proiezione normale al piano inclinato dell'equazione vettoriale dinamica fornisce:

$$N_{interfaccia} = (1-\alpha)m_s \cdot g \cos\beta \quad (5.10)$$

La proiezione tangenziale al piano inclinato dell'equazione dinamica (5.7) risulta:

$$(m_b + m_s)\gamma = (m_b + m_s)g \cdot \sin\beta - T_{guide} - T_{interfaccia} \quad (5.11)$$

La relazione di Coulomb applicata al comportamento di interfaccia comporta (nel caso di non adesione):

$$T_{interfaccia} = N_{interfaccia} \cdot \tan\phi^{din} \quad (5.12)$$

La combinazione delle Eq. 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 fornisce il valore dell'angolo di attrito dinamico ϕ_u^{din} , per qualsiasi valore di spostamento u , basandosi sulla valutazione dell'accelerazione γ :

$$\tan\phi_u^{din} = \frac{(m_b + m_s)g \cdot \sin\beta - T_{guide}^{din} - (m_b + m_s)\gamma}{(1-\alpha)m_s \cdot g \cos\beta} \quad (5.13)$$

L'Eq. 5.13 applicata al caso "statico" ($u = 0$), che è strettamente accurato per la fine della Fase 1 ($\beta = \beta_0, u = 0$), si scrive come di seguito:

$$\tan\phi^{stat} = \frac{(m_b + m_s)g \cdot \sin\beta_0 - T_{guide}^{stat}}{(1-\alpha)m_s \cdot g \cos\beta_0} \quad (5.14)$$

5.3.3. Definizione dei parametri di test

Di seguito si tiene conto dei seguenti punti:

- L'attrito del sistema di guide è indipendente dalle condizioni di moto:

$$T_{guide}^{stat} = T_{guide}^{din} = T_{guide}$$

- Si considera trascurabile l'attrito lungo le pareti della scatola:

$$\alpha = 0$$

quindi si può considerare che le guide assorbono solo la componente normale del peso della scatola e non più anche una parte (α) della componente normale del peso del terreno contenuto nella scatola.

Fase 1:

L'Eq. 5.14 è applicabile alla Fase 1 (fase statica, $u = 0$). L'equilibrio statico limite si raggiunge quando $\beta = \beta_0$. Considerando i due punti sopra citati, il valore dell'angolo d'attrito statico viene considerato come un valore caratteristico dell'attrito d'interfaccia:

$$\tan\phi_0^{stat} = \frac{(m_b+m_s)g \cdot \sin\beta_0 - T_{guide}}{m_s \cdot g \cos\beta_0} \quad (5.15)$$

Fase 3:

L'Eq. 5.13 è applicabile alla Fase 3 (fase di scorrimento non stabilizzato) con $\gamma > 0$ e $\beta = \beta_s$. Secondo questa equazione l'angolo di attrito dinamico varia con l'accelerazione. Verrà dimostrato, dai risultati di alcuni test, che un moto uniformemente accelerato (accelerazione costante $\gamma = \gamma_c$) viene raggiunto per $\beta = \beta_s$, dopo un periodo intermedio necessario per passare da $\gamma = 0$ a $\gamma = \gamma_c$. Una seconda caratteristica d'interfaccia, l'angolo di attrito dinamico, si ottiene facendo riferimento al moto uniformemente accelerato (γ_c):

$$\tan\phi_c^{din} = \frac{(m_b+m_s)g \cdot \sin\beta_s - T_{guide} - (m_b+m_s)\gamma_c}{m_s \cdot g \cos\beta_s} \quad (5.16)$$

Fase 2:

Questa fase (Fig. 5.13b) esiste solo per alcune specifiche condizioni di attrito di interfaccia. Da un lato, l'equilibrio statico non è più applicabile, e dall'altro lato, il moto è lento con una variazione dell'accelerazione irregolare. Pertanto l'applicazione delle Eq. 5.13 e 5.14 non sono più realistiche.

OSSERVAZIONE:

Vale la pena notare che, seguendo le indicazioni fornite dalla normativa EN ISO 12957-2, l'angolo di attrito è convenzionalmente determinato per un'inclinazione β_{50} corrispondente ad uno spostamento di scorrimento $u = 50$ mm, con l'assunzione di un equilibrio statico:

$$\tan\phi_{50}^{stat} = \frac{(m_b + m_s)g \cdot \sin\beta_{50} - T_{guide}}{m_s \cdot g \cos\beta_{50}} \quad (5.17)$$

Invece ϕ_{50}^{stat} in genere non si adatta a condizioni statiche (lo scorrimento non stabilizzato (Fase 3) si verifica molto spesso per valori di spostamento inferiori al valore convenzionalmente considerato dalla normativa ($u = 50$ mm) quando si misura l'angolo di attrito ϕ_{50}^{stat} (Fig. 5.13b)), quindi l'applicazione dell'Eq. 5.14 non è teoricamente giustificata. Inoltre, siccome $\beta_{50} > \beta_0$, il valore di ϕ_{50}^{stat} sovrastima il valore di ϕ_0^{stat} , che corrisponde al vero inizio del moto di scorrimento:

$$\tan\phi_{50}^{stat} > \tan\phi_0^{stat} \quad (5.18)$$

Anche il valore di inclinazione limite corrispondente allo scorrimento non stabilizzato $\beta = \beta_s$ non va più bene per valutare l'attrito, poiché $\beta_s \geq \beta_{50}$:

$$\tan\phi_s^{stat} = \frac{(m_b + m_s)g \cdot \sin\beta_s - T_{guide}}{m_s \cdot g \cos\beta_s} \quad (5.19)$$

$$\tan\phi_s^{stat} > \tan\phi_0^{stat} \quad (5.20)$$

Di conseguenza, la valutazione della stabilità dei sistemi di copertura compositi utilizzando il valore di ϕ_{50}^{stat} o ϕ_s^{stat} non è una procedura prudente nel caso di scorrimento graduale (Fig. 5.13b).

5.3.4. Condizioni di scorrimento immediato e di scorrimento graduale

5.3.4.1. Scorrimento immediato: (Fig. 5.13a)

Per $\beta = \beta_0 = \beta_s$, c'è una brusca transizione dalla fase statica alla fase di scorrimento non stabilizzato a $u = 0$ (Fig. 5.15).

Per questo valore di β , l'applicazione delle Eq. 5.13 e 5.14 simultaneamente è valida. Dalla combinazione di queste due equazioni si ottiene la seguente formulazione dell'accelerazione:

$$\gamma = \frac{m_s}{m_b + m_s} g \cos \beta_0 (\tan \phi_0^{stat} - \tan \phi_u^{din}) \quad (5.21)$$

Quindi l'inizializzazione del moto ($\gamma > 0$) richiede che:

$$\tan \phi_0^{stat} > \tan \phi_u^{din} \quad (5.22)$$

Pertanto lo scorrimento immediato è il risultato di una diminuzione del valore dell'angolo di attrito d'interfaccia con lo scorrimento della scatola superiore.

Per $\beta = \beta_s$, l'accelerazione aumenta all'aumentare dello scorrimento fino a $\gamma = \gamma_c$, il valore costante corrispondente al valore minimo di ϕ_u^{din} (Fig. 5.15):

$$\tan \phi_u^{din} > \tan \phi_c^{din} \quad (5.23)$$

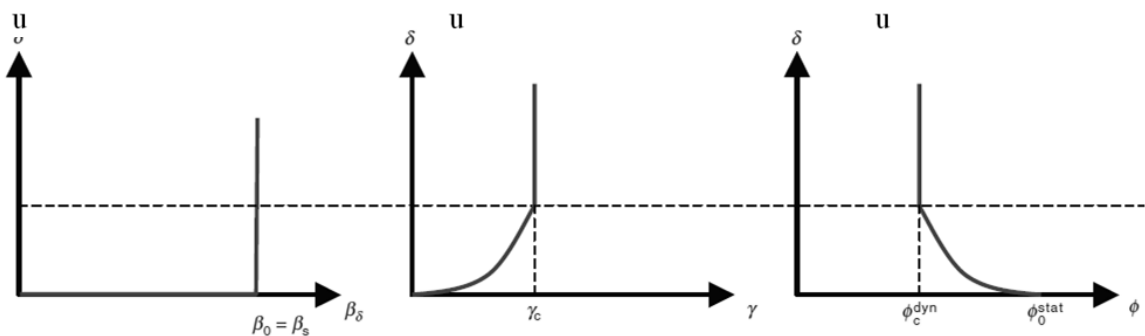


Fig. 5.15. Condizioni meccaniche corrispondenti al moto di scorrimento immediato. (Gourc & Reyes Ramírez_2004)

Infine, combinando le Eq. 5.22 e 5.23, lo scorrimento immediato si osserva per:

$$\tan\phi_0^{stat} > \tan\phi_c^{din} \quad (5.24)$$

5.3.4.2. Scorrimento graduale: (Fig. 5.13b)

Contrariamente a quanto detto per lo scorrimento immediato, nel caso di scorrimento graduale si verifica un incremento graduale dell'angolo di attrito con lo spostamento u e lo scorrimento della scatola superiore richiede un incremento di inclinazione β da β_0 a β_s per raggiungere la fase di scorrimento non stabilizzato (Fig. 5.12).

$$\tan\phi_0^{stat} < \tan\phi_u^{din} < \tan\phi_c^{din} \quad (5.25)$$

5.3.5. Adattamento del dispositivo di sperimentazione

Di solito, il piano inclinato standard non è usato direttamente per i test dinamici. Infatti, la lunghezza di spostamento disponibile per la scatola superiore dei dispositivi standard lungo il piano è insufficiente per analizzare la fase dinamica di scorrimento. La scatola è stata quindi modificata in modo da permettere uno spostamento maggiore di 500 mm. Come è già stato detto all'inizio del capitolo 4, la lunghezza della scatola nella direzione della pendenza è stata accorciata a $l_u = 180$ mm, mentre la larghezza, misurata trasversalmente, è stata mantenuta pari a $b_u = 700$ mm.

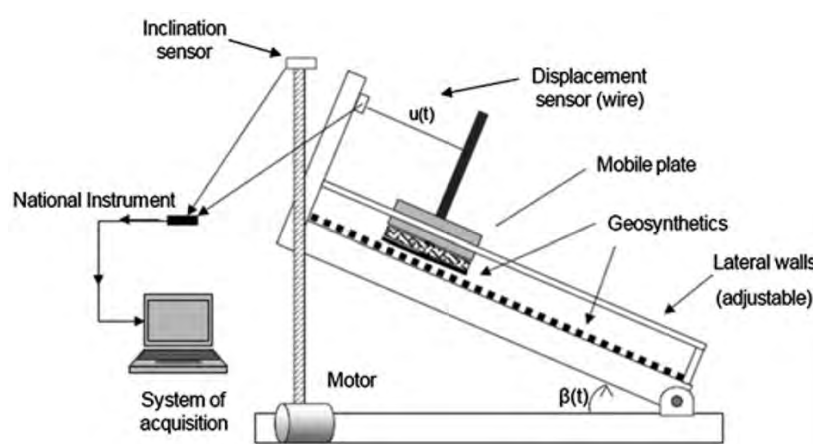


Fig. 5.16. Piano inclinato modificato utilizzato per osservare le condizioni dinamiche. (L. Briançon et al., 2011)

Per i test sulle interfacce geosintetico-geosintetico, la scatola superiore è stata sostituita da una piastra di sovraccarico ($l_u = 180$, $b_u = 700$ mm), sotto la quale viene fissato il geosintetico superiore (Fig. 5.10 e 5.16). In quest'ultimo caso, sia l'assenza della scatola sia l'uso di un sistema di guida con cuscinetti a rulli permette di fare le seguenti assunzioni:

$$\alpha = 0 ; m_b = 0 ; N_{\text{guide}} = T_{\text{guide}} = 0$$

Di conseguenza, l'Eq. 5.15 (Fase 1) risulta equivalente a:

$$\tan\phi_0^{\text{stat}} = \tan\beta_0 \quad (5.26)$$

mentre l'Eq. 5.16 (Fase 3) diventa:

$$\tan\phi_c^{\text{din}} = \tan\beta_s - \frac{1}{\cos\beta_s} \cdot \frac{\gamma_c}{g} \quad (5.27)$$

5.3.6. Determinazione della fase di moto uniformemente accelerato

Di seguito, con lo scopo di illustrare come si determina la fase di moto uniformemente accelerato, vengono riportati i risultati di un'analisi statico-dinamica di un'interfaccia sabbia – geomembrana liscia in HDPE, svolta da Gourc e Reyes Ramirez (2004) con il piano inclinato.

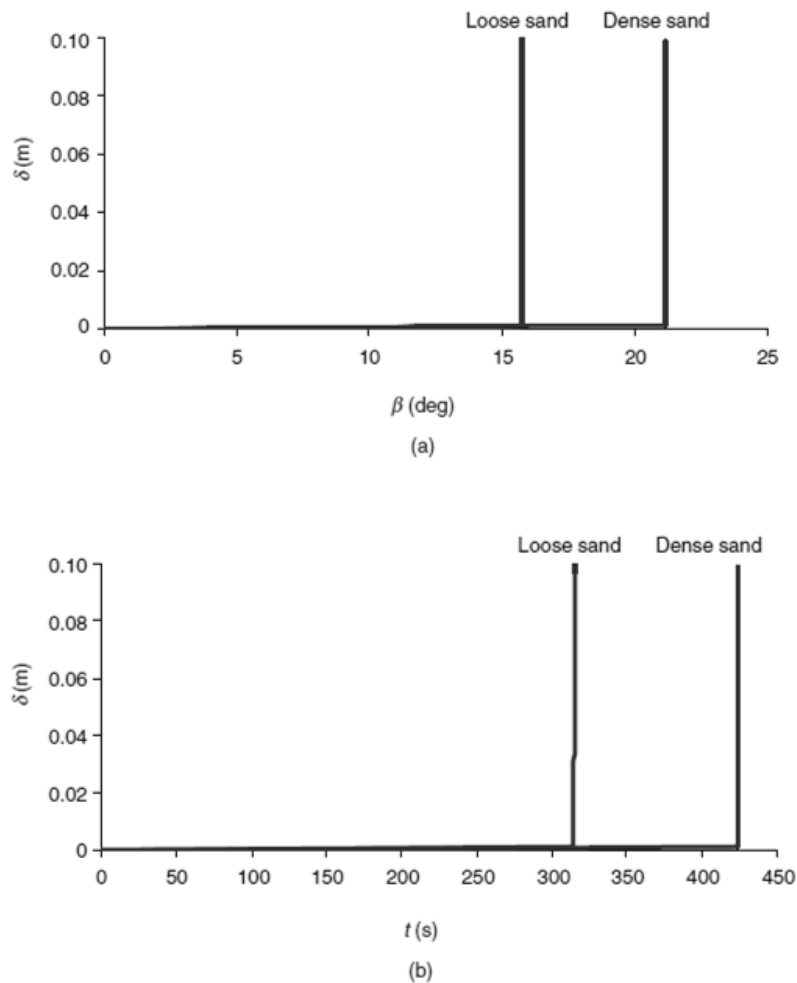


Figure 5.17. Test con il piano inclinato di interfacce sabbia.geosintetico per due densità di sabbia, sciolta ($Dr=20\%$) e densa ($Dr=85\%$): (a) spostamento δ in funzione dell'angolo β ; (b) spostamento in funzione del tempo t . (Gourc & Reyes Ramírez_2004)

Attrito statico:

Dalla Fig. 5.17 si nota che il comportamento dell'interfaccia esaminata è di “scorrimento immediato” con il valore di inclinazione $\beta = \beta_0 = \beta_s$ durante la fase di scorrimento non stabilizzato.

L'angolo di attrito statico si calcola con l'Eq. 5.15:

$$\tan\phi_0^{\text{stat}} = \frac{(m_b+m_s)g \cdot \sin\beta_0 - T_{\text{guide}}}{m_s \cdot g \cos\beta_0}$$

Attrito dinamico:

Per l'intera fase di scorrimento, $\beta = \beta_s$ e $\gamma > 0$, lo spostamento viene registrato in funzione del tempo. In Fig. 5.18 sono riportati i diagrammi dello spostamento e della velocità di spostamento in funzione del tempo. Questi diagrammi corrispondono alla Fig. 5.17b con differente scala di lunghezza.

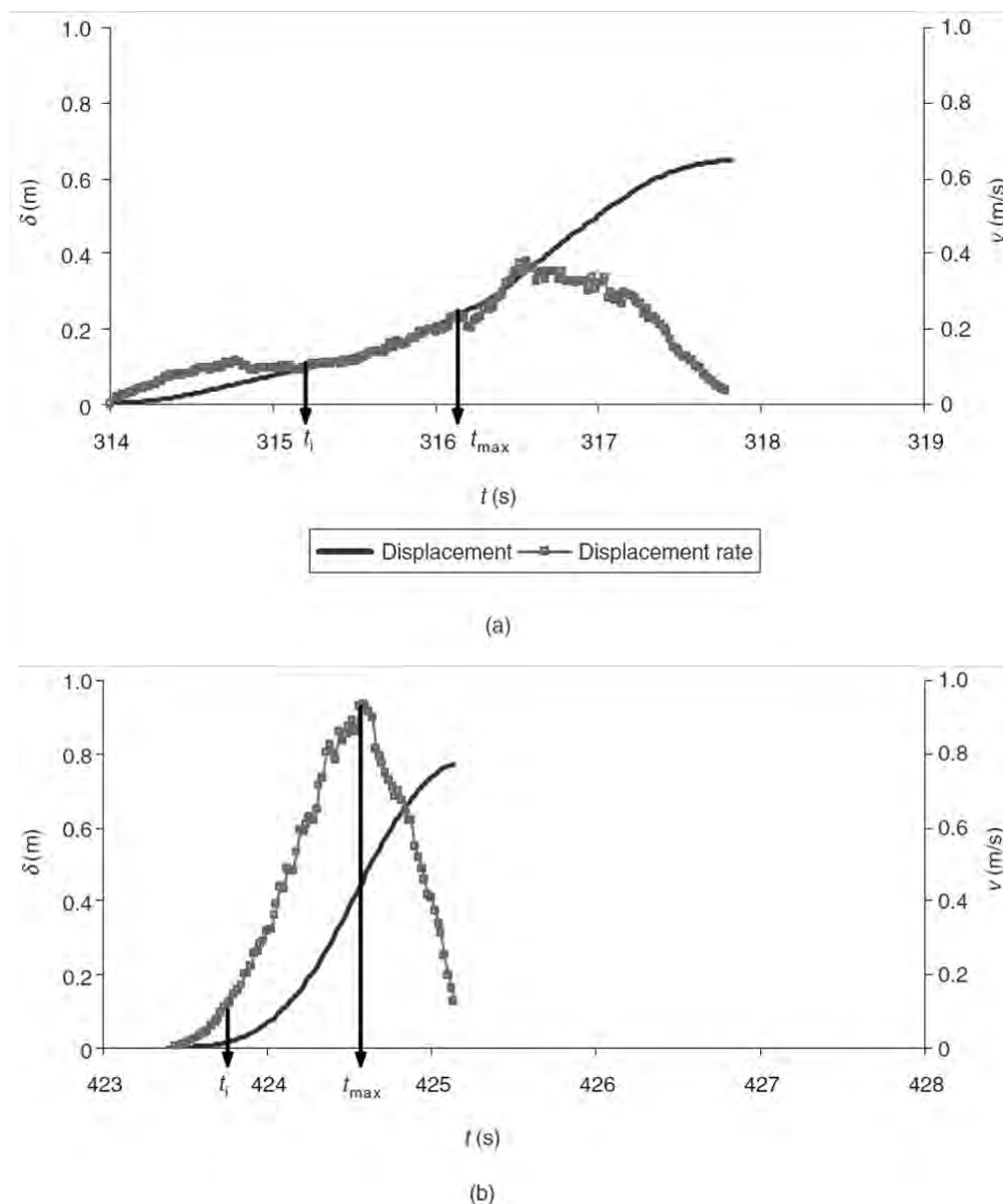


Figure 5.18. Test con il piano inclinato di interface sabbia-geosintetico per due densità di sabbia, sciolta ($Dr=20\%$) e densa ($Dr=85\%$): determinazione della fase di moto uniformemente accelerato dai diagrammi di spostamento $\delta(t)$ e di velocità di spostamento $v(t)$ per (a) sabbia sciolta e (b) sabbia densa. (Gourc & Reyes Ramirez_2004)

Un'osservazione delle curve di velocità di spostamento mostra sempre un periodo quasi lineare della velocità in funzione del tempo, che comincia al tempo t_i e dura fino a t_{max} . Questo periodo di moto uniformemente accelerato è preceduto da:

- un periodo intermedio, dall'inizio del test ($t = 0$) corrispondentemente al piano in posizione orizzontale ($\beta = 0$) fino all'istante t_i , $u = u_i$;
- un periodo disturbato, che si verifica oltre il tempo t_{max} , $u = u_{max}$, dovuto indubbiamente al difetto di guida della scatola della scatola superiore alla base del piano inclinato, in cui la scatola è in grado di deviare dalla sua traiettoria rettilinea.

Per riuscire a calcolare il valore dell'angolo di attrito dinamico (θ^{din}) con l'Eq. 5.16 c'è la necessita di cercare il valore di accelerazione (γ_c) corrispondente alla fase di moto uniformemente accelerato ($t_i - t_{max}$).

Nel caso di moto uniformemente accelerato della scatola (accelerazione costante $\gamma = \gamma_c$) dall'istante $t = t_i$ si ha che lo spostamento della scatola è dato da:

$$u = \frac{1}{2}\gamma(t - t_i)^2 + v_i(t - t_i) + u_i$$

Mentre la velocità è:

$$v = \gamma_c(t - t_i) + v_i$$

dove v_i è la velocità di spostamento all'istante t_i .

L'accelerazione γ_c può essere determinata con la seguente procedura:

1. si determinano i tempi t_i e t_{max} dell'incremento lineare della velocità di spostamento con il tempo;
2. si determinano le velocità corrispondenti $v_i(t_i)$ e $v_{max}(t_{max})$;
3. si calcola l'accelerazione, con la seguente formula:

$$\gamma_c = \frac{v_{max} - v_i}{t_{max} - t_i}$$

È inoltre possibile ottenere γ_c dai diagrammi dello spostamento e della velocità di spostamento in funzione del tempo. Considerando direttamente la curva di spostamento tra t_i e t_{max} :

$$\gamma_c = 2 \frac{(u_{max}-u_i)-v_i(t_{max}-t_i)}{(t_{max}-t_i)^2}$$

L'angolo di attrito dinamico si calcola con l'Eq. 5.16:

$$\tan\phi_c^{din} = \frac{(m_b+m_s)g \cdot \sin\beta_s - T_{guide} - (m_b+m_s)\gamma_c}{m_s \cdot g \cos\beta_s}$$

5.3.7. Conclusioni

Come dimostrato sopra, gli angoli convenzionali ϕ_{50}^{stat} e ϕ_s^{stat} non sono teoricamente giustificati, e sono sistematicamente maggiori di ϕ_0^{stat} e in genere più grandi di ϕ_c^{din} . Di conseguenza, l'utilizzo di questi angoli convenzionali per la valutazione della stabilità dei sistemi di rivestimento dei pendii con geosintetici non è prudente. Due nuovi parametri, ϕ_0^{stat} e ϕ_c^{din} , vengono proposti in pertinenza alle applicazioni pratiche.

Riassumendo, da un'analisi svolta con il piano inclinato si possono ottenere i seguenti parametri:

- ϕ_0^{stat} : angolo di attrito statico o iniziale (definito arbitrariamente per un piccolo valore di spostamento, per esempio $u = 1$ mm);
- ϕ_c^{din} : angolo di attrito dinamico per $\gamma = \gamma_c$;
- ϕ_{50}^{stat} : angolo di attrito standard (pseudo-statico: condizioni statiche non osservate).

5.4. LA “FORCE PROCEDURE”

Con la procedura detta “Standard Displacement Procedure”, descritta dalla normativa EN ISO 12957-2, l'angolo di attrito d'interfaccia si determina utilizzando un criterio di spostamento tra i geosintetici testati. In questo capitolo viene proposta una nuova procedura, detta “Force Procedure”, che consiste nella misurazione della forza necessaria per mantenere la scatola superiore nella parte superiore del piano oltre un valore limite di

spostamento. Con la “Force procedure”, l’attrito viene determinato dalla curva dell’attrito mobilitato in funzione dell’angolo di inclinazione del piano.

5.4.1. I limiti della “Standard Displacement Procedure”

La procedura standard è stata precedentemente descritta nel capitolo 5.2. Per molte interfacce che presentano un comportamento di scorrimento graduale, la procedura standard sembra essere poco adatta, in particolare quando la Fase 2 è molto lunga, cioè la Fase 3 si verifica per valori di spostamento di scorrimento superiori al valore standard $u = 50$ mm (vedi paragrafo 5.3.1.). Anche nel caso di scorrimento immediato, il metodo standard non è adatto per fornire un valore adeguato dell’angolo di attrito ϕ_{50}^{stat} (Eq. 5.6) corrispondente a $u = 50$ mm, in quanto la normativa raccomanda una analisi statica per condizioni che sono in realtà dinamiche.

Un’accurata relazione deve considerare le condizioni dinamiche, cioè l’accelerazione costante γ_c durante la Fase 3; così, le relazioni standard 5.4a e 5.4b devono essere sostituite dalle seguenti equazioni:

$$W_s \cdot \sin\beta_{50} - N \cdot \tan\phi_{50} = W_s \cdot \frac{\gamma_c}{g} \quad (5.28a)$$

$$W_s \cdot \cos\beta_{50} = N \quad (5.28b)$$

Il valore dell’angolo di attrito ϕ_{50} al posto di ϕ_{stan} è similmente ottenuto combinando le Eq. 5.28a e 5.28b, che forniscono:

$$\tan\phi_{50} = \frac{W_s \cdot \left(\sin\beta_{50} - \frac{\gamma_c}{g} \right)}{W_s \cdot \cos\beta_{50}} = \frac{\sin\beta_{50} - \frac{\gamma_c}{g}}{\cos\beta_{50}} \quad (5.29)$$

È opportuno notare che un confronto tra l’Eq. 5.6 e l’Eq. 5.29 mostra che:

$$\phi_{50} < \phi_{\text{stan}}$$

dunque, la “Standard Displacement Procedure” sovrastima sistematicamente l’angolo di attrito.

5.4.2. La nuova “Force Procedure”

Come è stato discusso nel paragrafo 5.4.1, la “Standard Displacement Procedure” è insoddisfacente per la determinazione dell’angolo di attrito; d’altro canto, l’approccio dinamico che tiene in considerazione l’accelerazione non è facile, in quanto monitorare l’accelerazione durante i test di attrito è complicato. Pertanto, è stata sviluppata una nuova procedura. Briançon et al. (2002) aveva proposto una variante alla procedura standard per determinare l’angolo di attrito d’interfaccia con il piano inclinato mediante la misurazione della forza richiesta per trattenere la scatola superiore oltre un valore limite di spostamento di scorrimento u_{lim} . Questo metodo è chiamato “Force Procedure” per distinguerlo dal precedente metodo, che è chiamato “Displacement Procedure” perché sono monitorati solo gli spostamenti. Quando l’accelerazione non viene tenuta in considerazione si parla di “Standard Displacement Procedure”.

Dal 2002 sono stati svolti una serie di esperimenti su diverse interfacce utilizzando sia la “Standard Displacement Procedure” che la “Force Procedure”. Questi esperimenti hanno consentito di apportare una serie di modifiche alla “Force Procedure” che hanno permesso di migliorare la fattibilità e la ripetibilità dei test. Di seguito viene presentata la nuova procedura aggiornata agli ultimi sviluppi.

5.4.2.1. Il dispositivo

Il dispositivo, rappresentato in Fig. 5.19, ha una interfaccia di attrito tra le due scatole di 1 m^2 ($b_u = 1\text{m}$, $l_u = 1\text{m}$, $b_l = 1.2\text{m}$, $l_l = 2\text{m}$), la quale permette di testare campioni di geosintetico di grandi dimensioni. Lo spazio tra le due scatole può essere regolato, consentendo così di studiare sistemi di rivestimento in geosintetico di vario spessore e composti da uno a quattro geosintetici. Un verricello motorizzato regola l’inclinazione del piano ad una velocità di sollevamento $d\beta/dt = 0.5 \div 3.5^\circ/\text{min}$.

Con questo dispositivo, oltre alla nuova procedura, si può svolgere la procedura standard EN ISO 12957-2 e altre procedure sono state sviluppate sia per condizioni asciutte che per condizioni bagnate (Briançon et al., 2002).

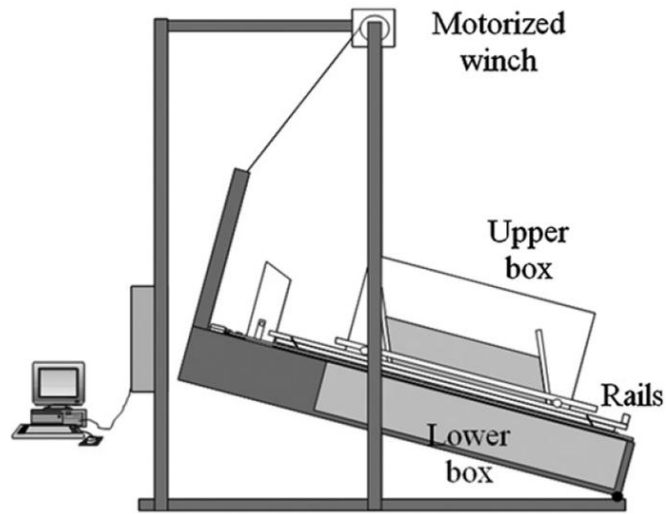


Fig. 5.19. Piano inclinato utilizzato per la nuova procedura. (L. Briançon et al._2011)

5.4.2.2. La procedura

La scatola superiore è collegata al telaio del piano inclinato mediante un cavo libero (Fig. 5.20). Un sensore è collegato tra il telaio e il cavo. Al raggiungimento del valore predeterminato, u_{lim} , di spostamento della scatola superiore corrispondente ad una inclinazione $\beta = \beta_{lim}$, il cavo risulta teso, e la forza $F(\beta)$ richiesta per trattenere la scatola superiore riempita con il terreno viene misurata.

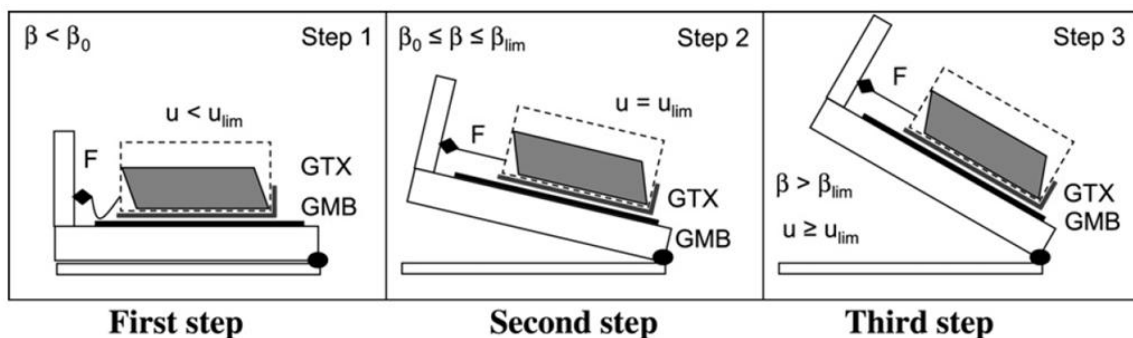


Fig. 5.20. Schemi degli step della “Force Procedure”. (L. Briançon et al._2011)

Il test è suddiviso in tre step:

- *Step 1*: corrispondente alla condizione statica della scatola superiore rispetto al piano inferiore durante il processo di inclinazione ($\beta < \beta_0$).
- *Step 2*: corrispondente alla condizione transitoria; la scatola superiore scorre, gradualmente o improvvisamente, fino alla distensione del cavo in corrispondenza dello spostamento u_{lim} ($\beta_0 \leq \beta \leq \beta_{lim}$).
- *Step 3*: corrispondente alla condizione di cavo teso dopo lo scorrimento; qui, la variazione di F è monitorata durante il processo continuo di inclinazione ($\beta > \beta_{lim}$). Se l'allungamento del cavo sotto la forza di tensione F viene trascurata, la scatola superiore può essere considerata in una condizione statica rispetto alla scatola inferiore.

Step 1 e Step 3:

L'equilibrio del sistema (Fig. 5.21) per le interfacce studiate durante lo Step 1 (in cui sono controllate le condizioni statiche) e durante lo Step 3 (in cui sono controllate le condizioni pseudo-statiche) fornisce le seguenti equazioni:

$$W_s \cdot \sin\beta + F_r(\beta) - N \cdot \tan\phi - F(\beta) = 0 \quad (5.30a)$$

$$W_s \cdot \cos\beta = N \quad (5.30b)$$

che combinate permettono di calcolare l'angolo di attrito valido per entrambi gli Step 1 e Step 2:

$$\tan\phi = \frac{W_s \cdot \sin\beta + F_r(\beta) - F(\beta)}{W_s \cdot \cos\beta} \quad (5.31)$$

dove F_r è la forza necessaria per trattenere la scatola vuota in relazione all'angolo di inclinazione del piano, W_s è il peso del terreno contenuto nella scatola superiore e $F(\beta)$ è la forza aggiuntiva necessaria per trattenere la scatola superiore riempita con il terreno.

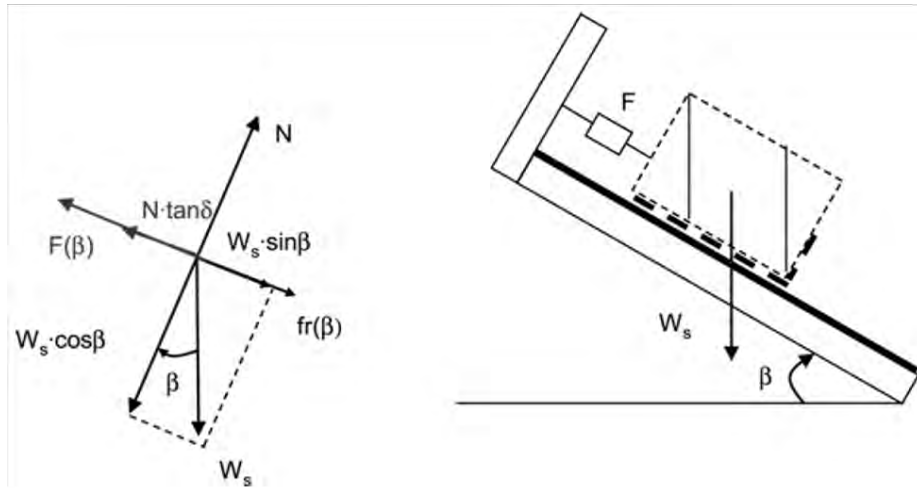


Fig. 5.21. Equilibrio delle forze agenti sulla scatola superiore per i test con la “Force Procedure”. (L. Briançon et al._2011)

Step 2:

Durante il transitorio Step 2, durante il quale la scatola superiore scorre, l’analisi del sistema analizzato per testare le varie interfacce fornisce le seguenti condizioni di equilibrio:

$$W_s \cdot \sin\beta + F_r(\beta) - N \cdot \tan\phi - F(\beta) = W_s \cdot \frac{\gamma}{g} \quad (5.32a)$$

$$W_s \cdot \cos\beta = N \quad (5.32b)$$

che combinate permettono di calcolare l’angolo di attrito:

$$\tan\phi = \frac{W_s \cdot \left(\sin\beta - \frac{\gamma}{g}\right) + F_r(\beta) - F(\beta)}{W_s \cdot \cos\beta} \quad (5.33)$$

Siccome l’accelerazione γ della scatola superiore non viene misurata, non è possibile determinare il valore dell’angolo di attrito ϕ anche se la forza di tensione del cavo viene monitorata continuamente durante il test.

5.4.2.3. Risultati della nuova procedura

Come notato sopra, non è possibile calcolare l'angolo variabile di attrito \emptyset durante lo Step 2, poiché l'accelerazione γ non viene monitorata. Per una maggiore comodità, l'angolo di attrito viene presentato come il valore di λ , che è tracciato lungo l'intero test di attrito, come segue:

$$\tan\lambda = \frac{W_s \cdot \sin\beta + F_r(\beta) - F(\beta)}{W_s \cdot \cos\beta} \quad (5.34)$$

Questo angolo è l'unico parametro che è possibile valutare durante l'intero test.

In particolare si ha:

$$\checkmark \text{ Durante lo Step 1 e lo Step 3: } \quad \tan\lambda = \tan\emptyset \quad (5.35)$$

$$\checkmark \text{ Durante lo Step 2: } \quad \tan\lambda = \tan\emptyset + \frac{\gamma}{(g \cdot \cos\beta)} \quad (5.36)$$

Di seguito vengono presentati due esempi di test, svolti su due interfacce tra geosintetici differenti, con lo scopo di illustrare il procedimento di analisi che si svolge con la nuova "Force Procedure". Dalla misura della forza $F(\beta)$ e dello spostamento u della scatola superiore (Fig. 5.22a), tramite l'Eq. 5.34, si calcola il parametro λ in funzione dell'inclinazione del piano β (Fig. 5.22b).

5.4.2.3.1. Analisi nel caso di scorrimento immediato

Viene presentato un esempio di scorrimento immediato per una interfaccia tra una geomembrana in polietilene ad alta densità (GMB_{HDPE}) e un geotessuto rinforzato in tessuto non tessuto, ago perforato, $GTX_{nwn(R)}$. In questo esempio la lunghezza del cavo è stata regolata per ottenere $u_{lim} = 100$ mm.

Step 1:

Utilizzando l'Eq. 5.34 e 5.35 con $F(\beta) = 0$, si può calcolare l'angolo di attrito variabile \emptyset durante tutto lo Step 1. In questa fase si ha $\beta < \beta_0$ e la mobilitazione dell'attrito è

parziale. Siccome le forze trainanti ($W_s \cdot \sin\beta + F_r(\beta)$) sono minori delle forze resistenti ($W_s \cdot \cos\beta \cdot \tan\emptyset$), il valore di λ aumenta fino ad un picco in corrispondenza dell'inizio dell'incremento della forza $F(\beta)$. È possibile definire un primo angolo \emptyset_0 corrispondente all'inizio dello scorrimento per $\beta = \beta_0$, come di seguito:

$$\tan\emptyset_0 = \frac{W_s \cdot \sin\beta_0 + F_r(\beta_0)}{W_s \cdot \cos\beta_0} \quad (5.37)$$

Nel caso di scorrimento immediato, la fine dello Step 1 corrisponde anche al massimo valore λ_{picco} . La forza $F(\beta)$ aumenta improvvisamente (Step 2) quando comincia lo scorrimento, in corrispondenza della fine dello Step 1.

Nel caso di scorrimento immediato si hanno le seguenti condizioni:

- $\emptyset_0 = \lambda_0 = \lambda_{\text{picco}}$
- $\beta_0 = \beta_{\text{picco}} = \beta_{\text{lim}}$

Step 2:

Lo Step 2, nel caso di scorrimento immediato, non viene usato nell'analisi. Il valore di λ valutato con l'Eq. 5.34 non è uguale al valore di λ calcolato con l'Eq. 5.36, che tiene in considerazione le condizioni dinamiche.

Step 3:

Alla fine della fase di scorrimento (Step 2), quando $\beta = \beta_{\text{lim}}$ in corrispondenza dello spostamento u_{lim} , comincia lo Step 3; le forze trainanti sono maggiori delle forze resistenti, quindi c'è una piena mobilitazione dell'attrito in corrispondenza di uno spostamento u_{lim} . La forza $F(\beta)$ del cavo aumenta per equilibrare la differenza tra la forza trainante e la forza resistente, e si osserva uno spostamento aggiuntivo ($u > u_{\text{lim}}$) in corrispondenza dell'allungamento del cavo: l'angolo λ in funzione di β raggiunge un valore costante. È opportuno notare che dopo lo Step 2 c'è una stabilizzazione dell'attrito mobilitato. Siccome l'Eq. 5.34 e 5.35 sono ancora valide durante lo Step 3, si può determinare un secondo parametro di "plateau" ($\emptyset_{\text{lim}} = \lambda_{\text{lim}}$ per $\beta > \beta_{\text{lim}}$) dopo la stabilizzazione del sistema. Qui, \emptyset_{lim} corrisponde alla fase pseudo-statica (Step 3) oltre il valore di spostamento u_{lim} della scatola superiore:

$$\tan\emptyset_{\text{lim}} = \frac{W_s \cdot \sin\beta + F_r(\beta) - F(\beta)}{W_s \cdot \cos\beta} \quad \text{per } \beta > \beta_{\text{lim}} \quad (5.38)$$

5.4.2.3.2. Analisi nel caso di scorrimento graduale

In Fig. 5.22 è presentato un esempio di scorrimento graduale per una interfaccia tra una geomembrana in polipropilene GMB_{pp} e un geotessuto rinforzato in tessuto non tessuto, ago perforato, $GTX_{nwn(R)}$. In questo esempio la lunghezza del cavo è stata regolata per ottenere $u_{lim} = 60$ mm. Come nell'esempio precedente di scorrimento immediato, lo Step 2 è definito per $\beta_0 \leq \beta \leq \beta_{lim}$. Tuttavia, a differenza del caso di scorrimento immediato, la forza $F(\beta)$ aumenta gradualmente durante lo Step 2 dall'inizio dello scorrimento per $\beta = \beta_0$.

Step 1:

L'angolo β_0 è più difficile da definire nel caso di scorrimento graduale rispetto al caso di scorrimento immediato; può essere scelto in corrispondenza di uno spostamento $u = 1-2$ mm. L'angolo di attrito θ_0 si calcola con l'Eq. 5.37.

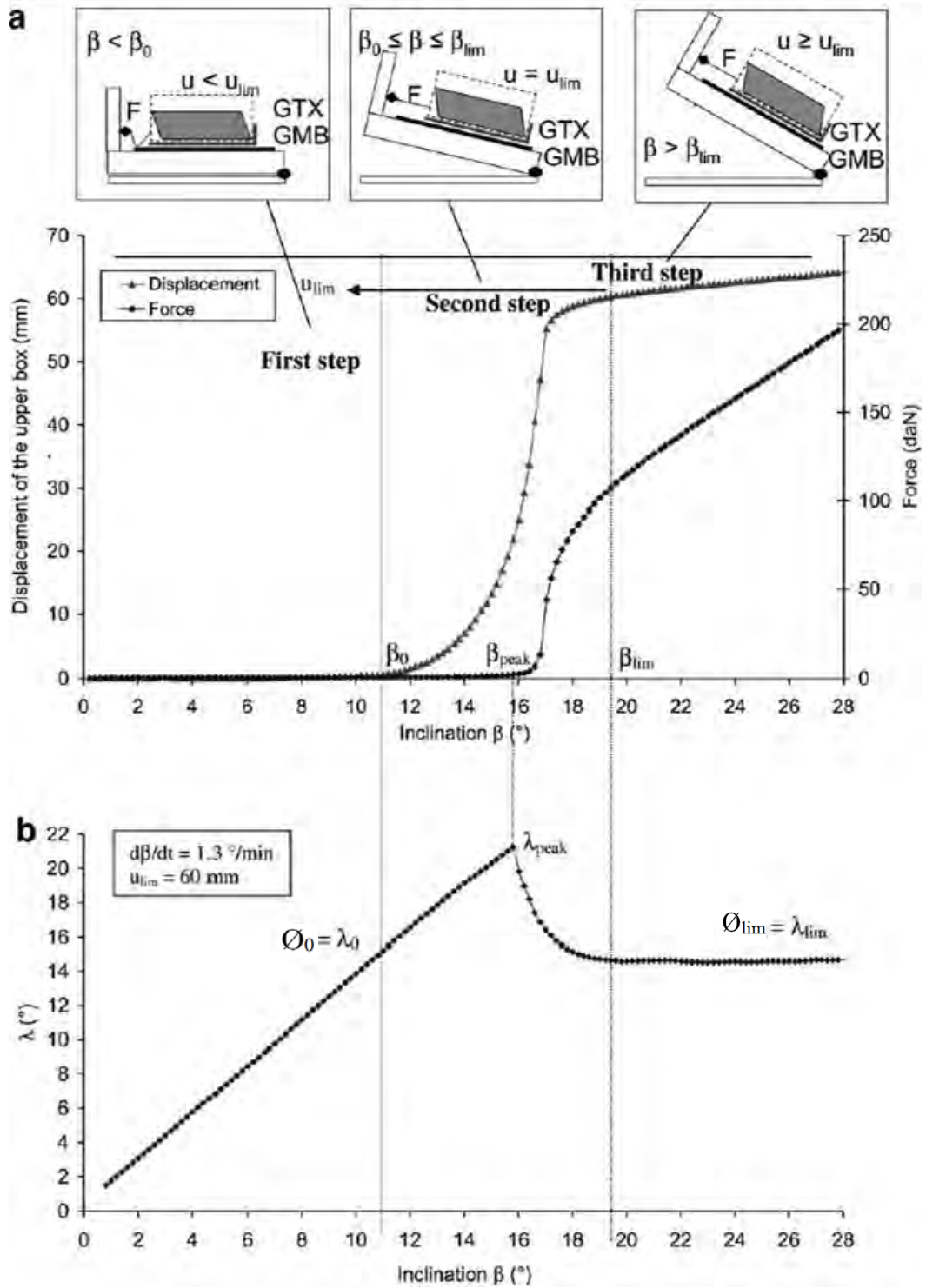


Fig. 5.22: (a) Misurazione durante il test con la “Force Procedure” nel caso di scorrimento graduale. (b) Analisi grafica della “Force Procedure” nel caso di scorrimento graduale. (L. Briançon et al., 2011)

Step 2:

Siccome lo spostamento della scatola superiore è lento, il cavo non è immediatamente sotto tensione, e la forza comincia ad aumentare una volta raggiunto il valore di inclinazione β_0 ; il cavo risulta poi teso quando viene raggiunta l'inclinazione β_{peak} che corrisponde a λ_{peak} (Fig. 5.22). A differenza dello scorrimento immediato, qui si ha $\beta_0 < \beta_{\text{peak}} < \beta_{\text{lim}}$.

Step 3:

Come nel precedente caso di scorrimento immediato, è possibile determinare un secondo parametro caratteristico di “plateau”, \emptyset_{lim} , dopo la stabilizzazione del sistema per una inclinazione β_{lim} (Fig. 5.22b); $\emptyset_{\text{lim}} = \lambda_{\text{lim}}$ si calcola con l'Eq. 5.38.

Riassumendo: con la “Force Procedure” è possibile determinare due angoli di attrito differenti:

- \emptyset_0 : corrispondente all'inizio dello scorrimento;
- \emptyset_{lim} : corrispondente al valore di “plateau”.

5.4.2.3.3. Scelta del parametro per definire l'attrito

A parte il caso di scorrimento immediato, è difficile determinare il valore dell'angolo di attrito \emptyset_0 corrispondente all'inizio dello scorrimento e l'inclinazione del piano β_0 , in particolar modo quando lo scorrimento graduale è molto lento. Inoltre, questo angolo dipende dalla velocità di inclinazione, quindi non è veramente un parametro intrinseco dell'interfaccia. Infine, β_0 non può essere considerato come una pendenza limite, in quanto esso corrisponde solamente all'inizio dello scorrimento e ad uno spostamento nullo. Si propone quindi di considerare solamente l'angolo \emptyset_{lim} , che è l'unico parametro intrinseco comune alle differenti tipologie di scorrimento che si possono verificare.

I risultati ottenuti con la “Force Procedure” possono essere così riassunti:

- ✓ Nel caso di scorrimento immediato, si definisce un angolo di attrito iniziale \varnothing_0 e per uno spostamento relativo u_{lim} un angolo di attrito $\varnothing_{lim} \leq \varnothing_0$. Questo angolo \varnothing_{lim} , in questo caso, può essere definito come il valore residuo di attrito.
- ✓ Nel caso di scorrimento graduale, il valore dell'angolo \varnothing_0 è difficile da valutare ma si avvicina chiaramente al valore dell'angolo di attrito per grandi spostamenti \varnothing_{lim} .

5.5. VARIANTE DELLA FORCE PROCEDURE

Stoltz G. et al. (2012) hanno sviluppato una procedura che mira alla determinazione dell'angolo di attrito residuo delle interfacce tra geosintetici. Questa procedura consiste di fatto in una modifica della "Force Procedure". Pertanto, il dispositivo utilizzato per la caratterizzazione dell'attrito è sempre il piano inclinato, ma con alcune modifiche che permettono di misurare l'attrito sotto condizioni di moto di scorrimento uniforme.

La "Variante della Force Procedure" in questione consiste nella misurazione, grazie ad una molla, della forza F necessaria per trattenere la scatola superiore che può scorrere sul piano inclinato. La forza F è collegata con lo spostamento lungo il piano u tramite una molla dalla seguente relazione:

$$F = k \cdot u \quad (5.39)$$

dove k [$N \cdot m^{-1}$] è il coefficiente elastico della molla, che deve essere scelto in modo da consentire uno spostamento tangenziale almeno pari a 20 mm alla fine del test e di mantenere l'accelerazione durante il test al di sotto di un valore trascurabile.

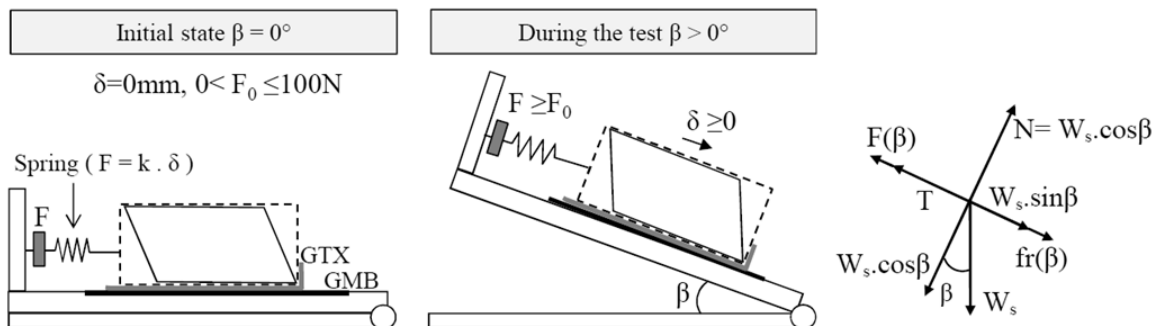


Fig. 5.23. Variante della Force Procedure: schema con il piano inclinato. (Stoltz & Vidal_2013)

All'inizio, la molla utilizzata per trattenere la scatola superiore è leggermente serrata con una forza inferiore a 100 N (Fig. 5.23). Questa forza iniziale permette di evitare un moto di scorrimento accelerato della scatola superiore. In seguito, viene aumentata l'inclinazione β del piano. Una volta raggiunta l'inclinazione β_0 , che dipende dall'interfaccia studiata, la scatola superiore comincia a scorrere. Il test continua aumentando l'inclinazione del piano. La deformazione elastica della molla induce un moto di scorrimento uniforme della scatola superiore e la misurazione della forza F permette di determinare la forza di attrito T nell'interfaccia utilizzando l'equazione 5.40, ricavata dall'equilibrio delle forze in gioco sul sistema in considerazione (Fig. 5.23):

$$T = W_s \cdot \sin\beta + F_r(\beta) - F(\beta) \quad (5.40)$$

dove $F(\beta)$ è la forza risultante necessaria per trattenere la scatola superiore.

Le caratteristiche di attrito delle interfacce testate si possono ricavare dalla curva $(\beta, T/N)$ (Fig. 5.24). Se questa curva presenta un picco, che corrisponde al massimo valore di attrito, e un "plateau", che corrisponde al valore di attrito residuo, si possono determinare due angoli di attrito ϕ_{peak} e ϕ_{res} utilizzando rispettivamente le equazioni 5.41 e 5.42. Se la curva $(\beta, T/N)$ non presenta alcun picco, si può determinare solo l'angolo di attrito residuo ϕ_{res} .

$$\tan\phi_{peak} = \left(\frac{T}{N}\right)_{peak} = \frac{T_{peak}}{(W_s \cdot \cos\beta_{peak})} \quad (5.41)$$

$$\tan\phi_{res} = \left(\frac{T}{N}\right)_{res} \quad (5.42)$$

L'equazione 5.40 è valida se sono verificate le seguenti condizioni:

- ✓ la scatola superiore è ferma (condizione statica che si verifica prima dell'inizio dello scorrimento);
- ✓ la scatola superiore è sottoposta ad un moto di scorrimento uniforme (condizione che si verifica nell'ultima parte del test);
- ✓ la scatola superiore si muove con una accelerazione trascurabile γ (condizione che deve essere verificata all'inizio dello scorrimento).

L'equazione che nasce dall'equilibrio delle forze agenti sul sistema in questione includendo la forza dinamica sorta dall'accelerazione γ è riportata di seguito:

$$W_s \cdot \sin\beta + F_r(\beta) - T - F(\beta) = W_s \cdot \frac{\gamma}{g} \quad (5.43)$$

L'Eq. 5.43 si semplifica nell'Eq. 5.40 se:

$$\sin\beta \gg \frac{\gamma}{g} \quad (5.44)$$

L'Eq. 5.44 deve essere verificata durante tutto il test per poter determinare la forza di attrito T utilizzando l'Eq. 5.40. Se queste condizioni non sono verificate, si deve cambiare la molla per avere il valore adeguato della costante k .

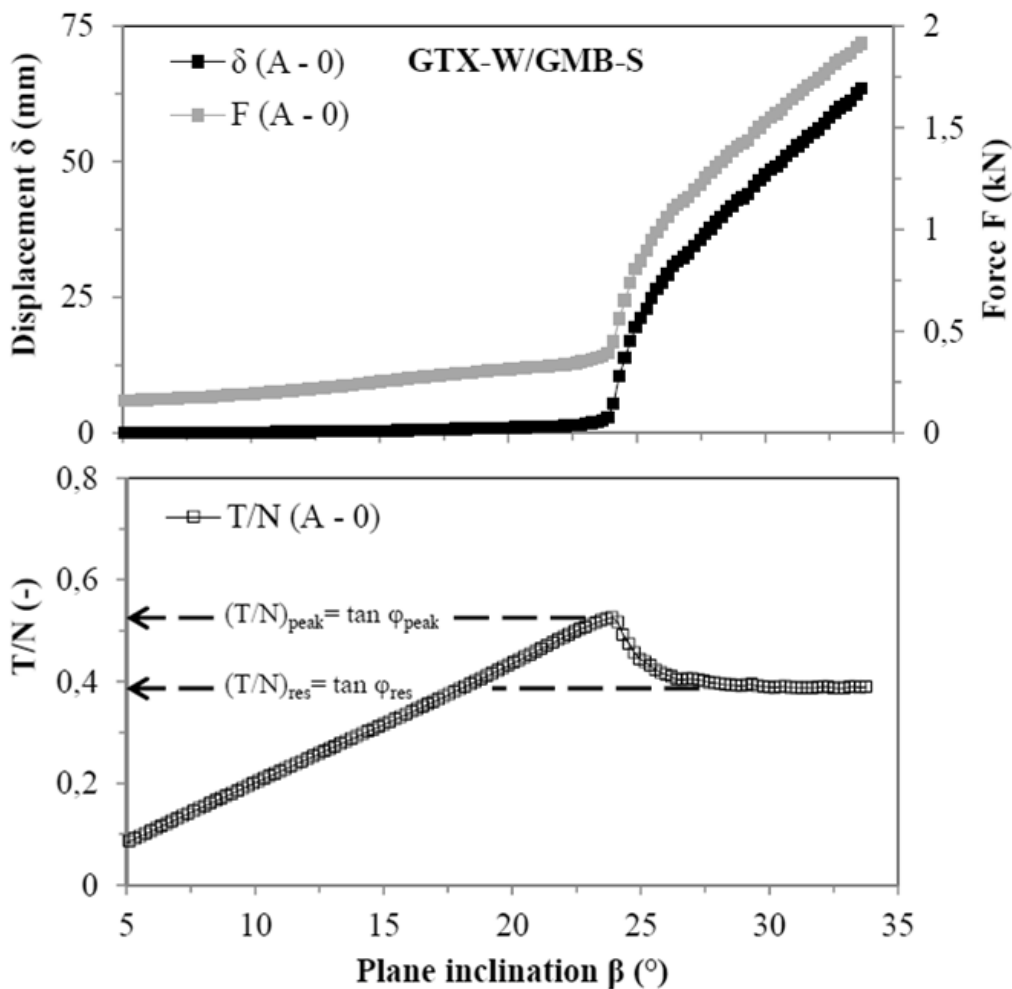


Fig. 5.24. Risultati tipici ottenuti con la Variante della Force Procedure, con il piano inclinato. (Stoltz & Vidal_2013)

Per determinare l'angolo di attrito è stato scelto il parametro (T/N) in quanto, quando viene raggiunta la massima forza di taglio, la forza di attrito T varia a seconda della variazione della forza normale N .

6. LA TAVOLA VIBRANTE

La tavola vibrante è un dispositivo sviluppato con lo scopo primario di studiare il comportamento dei sistemi di rivestimento con geosintetici in presenza di un evento sismico. Questo dispositivo infatti permette di determinare le caratteristiche di attrito delle interfacce tra geosintetici sotto condizioni di carico dinamico.

In Fig. 6.1 è rappresentato lo schema del dispositivo con le sue componenti principali:

- una tavola mobile;
- un attuatore di vibrazione collegato alla tavola mobile;
- un blocco libero di muoversi sopra la tavola mobile;
- degli accelerometri per misurare i valori di accelerazione della tavola e del blocco;
- un trasduttore di spostamento induttivo (LVDT) per misurare gli spostamenti relativi tra la tavola e il blocco.

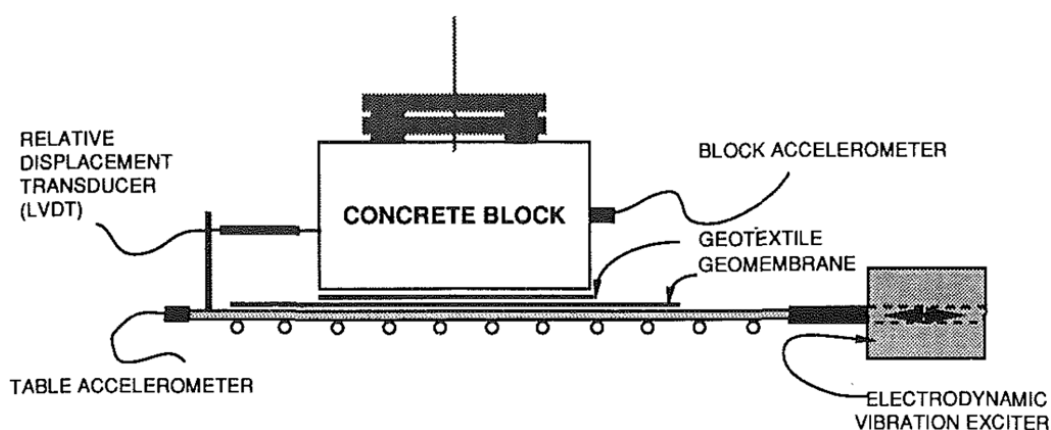


Fig. 6.1. Schema di un a tavola vibrante. (Yegian & Lahlaf_1992)

La tavola vibrante è composta da una attuatore di vibrazione collegato ad una tavola rigida montata sopra ad un sistema di cuscini portanti senza attrito. La tavola può muoversi lungo due rotaie guida in acciaio inossidabile. L'ampiezza e la frequenza di movimento della tavola sono controllati da un generatore di segnale. Il blocco di cemento,

con i pesi attaccati ad esso, poggia su di uno dei due campioni di geosintetico considerati, che a sua volta poggia sull'altro campione di geosintetico fissato sulla tavola vibrante. L'accelerazione della tavola e quella del blocco vengono misurate simultaneamente con degli accelerometri piezoelettrici, disposti uno sulla tavola ed uno sul blocco superiore. Inoltre, con un trasduttore di spostamento induttivo (LVDT) si registra lo spostamento del blocco rispetto alla tavola mobile. Nel caso si voglia analizzare il caso di interfaccia sommersa dall'acqua, si può collocare il blocco superiore e il sistema di geosintetici all'interno di una vasca.

La tavola vibrante viene sollecitata con moti armonici di varia ampiezza e frequenza. I test tipici vengono svolti con accelerazioni di intensità variabile tra 0.1 g e 1.0 g, e con frequenze di 1, 2, 5 e 10 Hz. Allo stesso modo, la tavola vibrante può anche venire sollecitata con moti transitori (sismi) per simulare le forze dinamiche e lo scorrimento indotto da un terremoto.

6.1. PROCEDIMENTO OPERATIVO

Di seguito viene presentata la formulazione che lega l'accelerazione del blocco misurata con lo sforzo di taglio trasmesso attraverso il sistema di geosintetici. La Fig. 6.2 presenta schematicamente le forze in gioco nel dispositivo di test utilizzato. Siccome il blocco di cemento ha una base molto rugosa, la resistenza di attrito tra il blocco ed il geosintetico superiore è molto alta. Questo comporta che tra il blocco ed il geosintetico superiore non si verifichi alcun scorrimento (ogni tentativo di far scorrere i due elementi comporterebbe infatti una lacerazione del geosintetico). Pertanto l'unico scorrimento possibile avviene tra i due geosintetici.

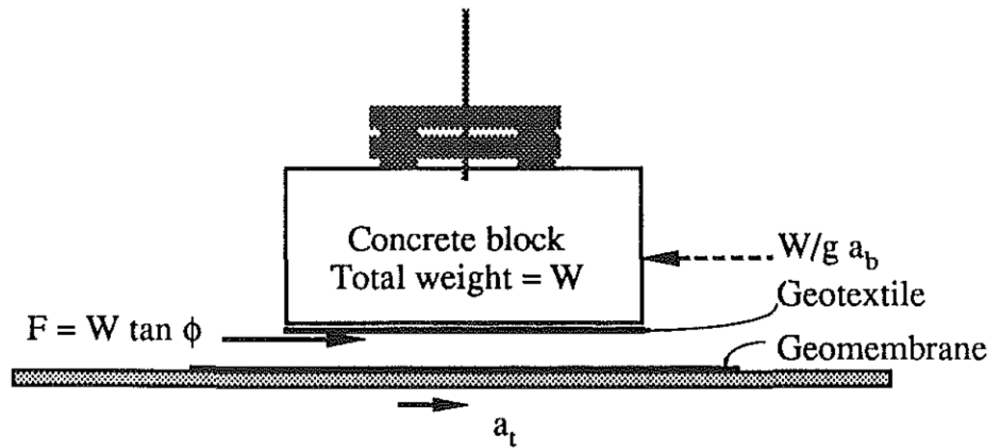


Fig. 6.2. Rappresentazione delle forze in gioco in un test con la tavola vibrante. (Yegian & Lahlaf_1992)

Quando la tavola viene accelerata con una accelerazione a_t essa trasmette una forza di attrito F al blocco superiore. Questa forza di attrito non può superare la resistenza al taglio dell'interfaccia tra i geosintetici. Assumendo come meccanismo di rottura il criterio di Mohr-Coulomb, il valore della forza F può essere così scritto:

$$F = W \cdot \tan\phi \quad (6.1)$$

dove W è il peso del blocco più i pesi aggiuntivi e ϕ è l'angolo di attrito della interfaccia.

Questa forza di taglio limite induce una accelerazione limite del blocco a_b , denominata *accelerazione critica*, e ottenuta con la seguente relazione:

$$W \cdot \tan\phi = \frac{W}{g} a_b \quad (6.2)$$

da cui

$$a_b = \tan\phi \cdot g \quad (6.3)$$

Questo comporta che partendo dalla posizione di riposo, non appena l'accelerazione della tavola aumenta, il blocco e la tavola si muovono assieme per tutto il periodo durante il quale l'accelerazione della tavola (a_t) è inferiore al valore di *accelerazione critica* fornito dall'Eq. 6.3. Quando l'accelerazione della tavola supera il valore di *accelerazione critica* si verifica uno scorrimento relativo tra il blocco e la tavola.

La misurazione dell'accelerazione del blocco trasmessa attraverso l'interfaccia fornisce le caratteristiche di attrito dell'interfaccia tra i geosintetici, come fornito dall'Eq. 6.4:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{a_b}{g} \right) \quad (6.4)$$

L'analisi dell'interfaccia si divide in due fasi: una statica ed una dinamica.

Fase statica:

Durante questa fase la tavola e il blocco si muovono assieme con la stessa accelerazione ($a_t = a_b$). Si parla quindi di attrito statico. Il massimo valore di attrito raggiungibile in questa fase si ha in corrispondenza della *accelerazione critica*:

$$\phi_{\text{stat}} = \tan^{-1} \left(\frac{a_b}{g} \right) ; (a_t = a_b = \text{accelerazione critica}) \quad (6.5)$$

Fase dinamica:

Durante questa fase si verifica uno scorrimento relativo tra la tavola e il blocco (o meglio tra i due geosintetici), in quanto l'accelerazione della tavola ha superato il valore di accelerazione critica. Dunque in questa fase si parla di attrito dinamico:

$$\phi_{\text{din}} = \tan^{-1} \left(\frac{a_b}{g} \right) ; (a_t > \text{accelerazione critica}) \quad (6.6)$$

In questa fase sia l'accelerazione della tavola a_t che l'accelerazione del blocco a_b risultano superiori al valore di *accelerazione critica* (accelerazione limite trasmessa attraverso l'interfaccia) raggiunto al termine della fase statica. A causa dello scorrimento relativo, l'accelerazione della tavola risulta sempre maggiore di quella del blocco. Tuttavia, come vedremo in seguito (Fig. 6.5), l'accelerazione del blocco aumenta leggermente all'aumentare dell'accelerazione della tavola e quindi anche l'angolo di attrito (secondo l'Eq. 6.6) aumenta leggermente.

Riassumendo, in presenza di sollecitazioni dinamiche, c'è una forza di taglio limite e quindi un'accelerazione limite che può essere trasmessa da un geosintetico all'altro. Oltre questo livello, inizia a verificarsi uno scorrimento relativo lungo l'interfaccia dei due sintetici. Perciò, l'interesse della risposta dinamica di una struttura geotecnica deve essere principalmente associato allo spostamento permanente che può accumularsi lungo l'interfaccia dei geosintetici.

6.2. TIPICI RISULTATI

Di seguito vengono esposti alcuni esempi di test svolti, con lo scopo di illustrare come si distingue la fase statica da quella dinamica:

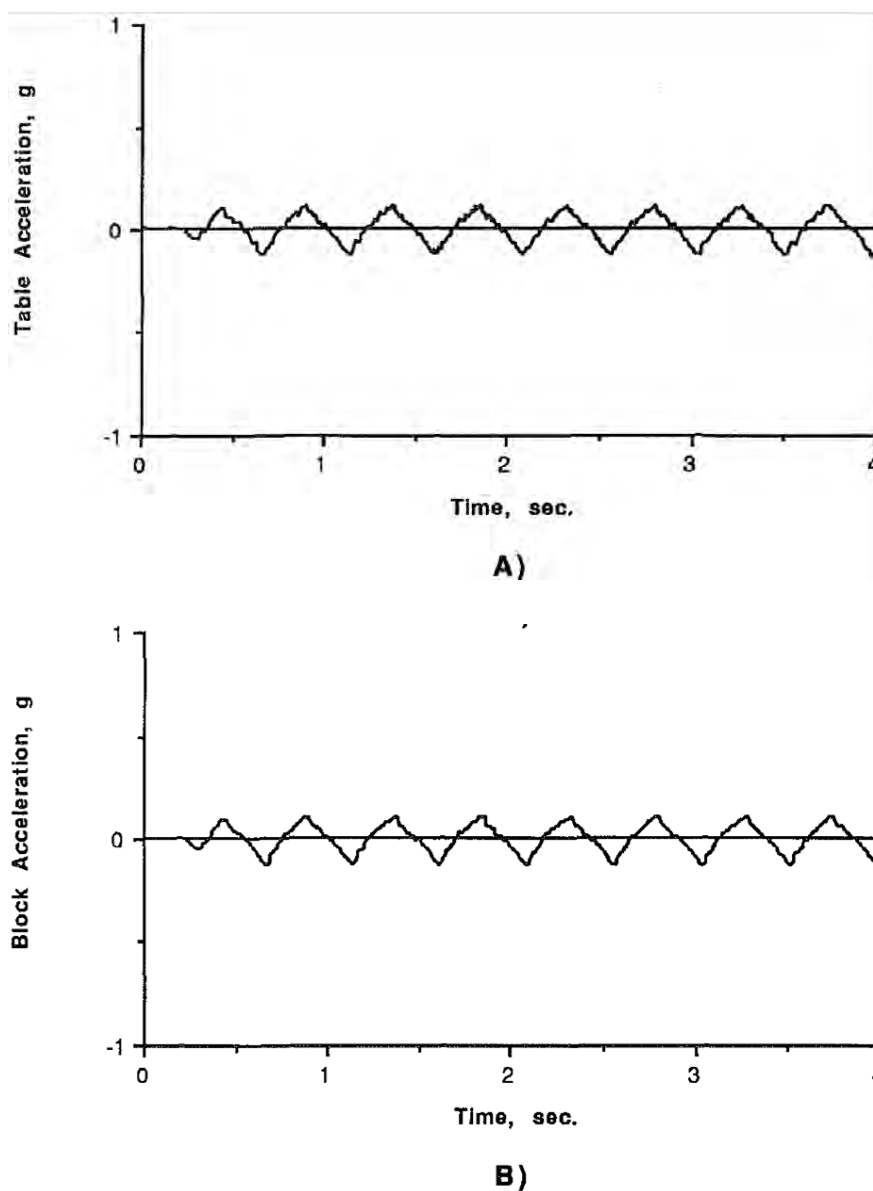
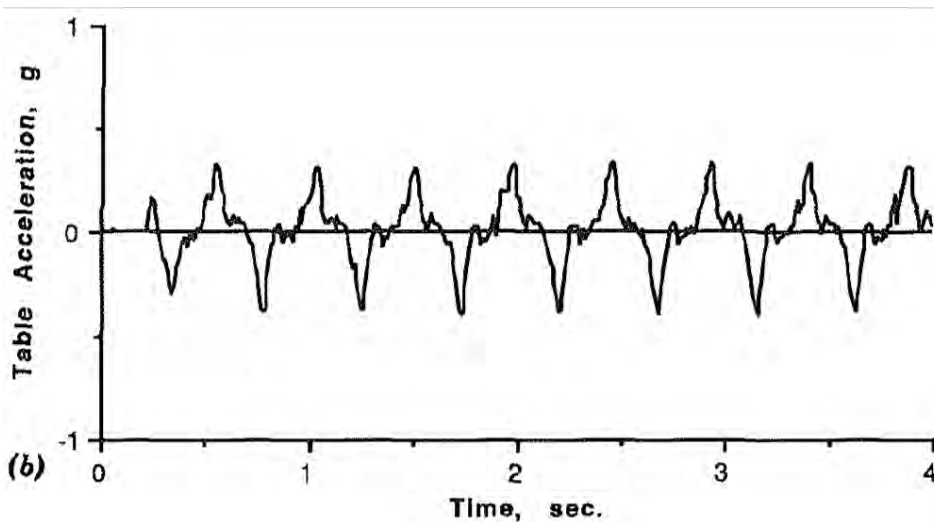
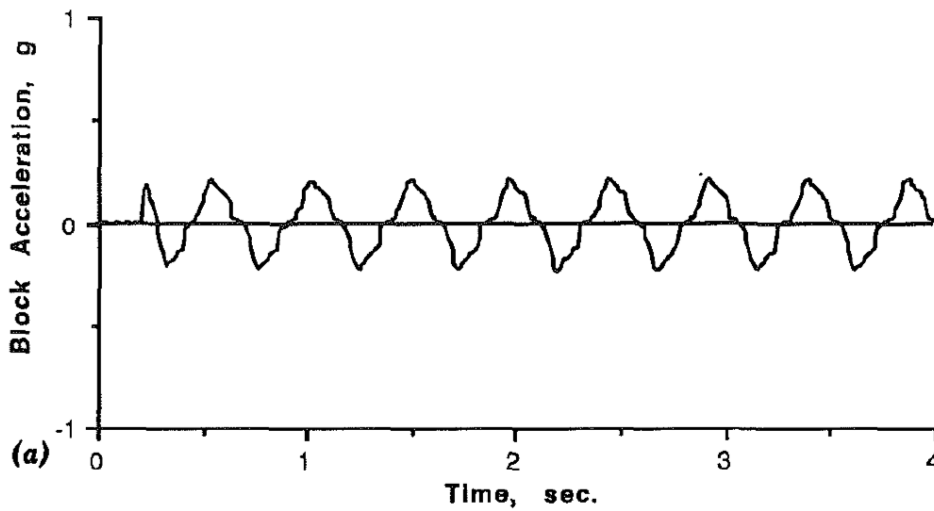


Fig. 6.3. Risultati di un test con la tavola vibrante per una interfaccia Geomembrana-Geotessuto: (a) accelerazione della tavola con valore di picco pari a 0.13 g; (b) accelerazione del blocco con valore di picco pari a 0.13 g. (Yegian & Lahlaf_1992)

In Fig. 6.3 sono riportati i risultati di un test svolto per una interfaccia geomembrana-geotessuto con una accelerazione di picco della tavola pari a circa 0.13 g. Si nota che durante questo test l'accelerazione del blocco è quasi identica a quella della tavola e pertanto non si è registrato alcuno scorrimento relativo tra i due geosintetici. Questo indica che per una accelerazione della tavola di 0.13 g c'è un completo trasferimento della sollecitazione di taglio sulla interfaccia dalla geomembrana (a contatto con la tavola) al geosintetico (a contatto con il blocco).



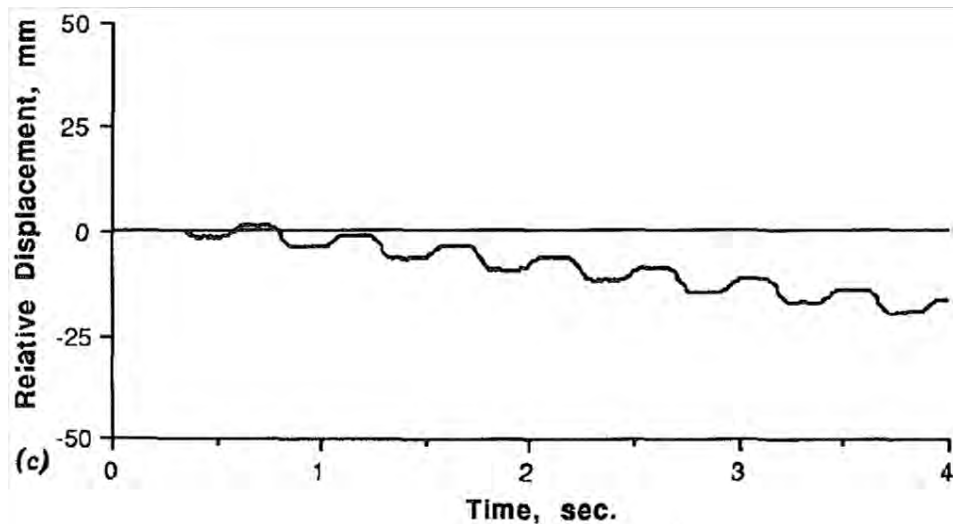


Fig. 6.4. Risultati di un test con la tavola vibrante per una interfaccia Geomembrana-Geotessuto: (a) accelerazione della tavola con valore di picco pari a 0.40 g; (b) accelerazione del blocco con valore di picco pari a 0.23 g; (c) spostamento relativo. (Yegian & Lahlaf_1992)

In Fig. 6.4 sono riportati i risultati di un altro test svolto sotto le stesse condizioni del test visto in Fig. 6.3, ad eccezione del valore di accelerazione di picco della tavola, che questa volta è maggiore. Nel caso in esame l'accelerazione di picco della tavola è pari a 0.4 g mentre l'accelerazione di picco del blocco è 0.23 g. Siccome l'accelerazione del blocco è inferiore all'accelerazione della tavola, lungo l'interfaccia geomembrana-geotessuto è stato registrato uno spostamento relativo (Fig. 6.4c). Si osserva che la lieve accumulazione di spostamento, illustrata in Fig. 6.4c, è dovuta all'incapacità della sperimentazione di riprodurre un impulso perfettamente simmetrico.

Come si può vedere in Fig. 6.4b, gli impulsi di accelerazione della tavola non sono perfettamente identici e simmetrici rispetto all'asse di accelerazione nulla. Pertanto, il valore di accelerazione di picco della tavola si calcola mediando i valori di picco di più impulsi (in questo caso 5 impulsi) nella direzione di maggiore accelerazione. Questa procedura viene seguita anche per la stima dell'accelerazioni di picco del blocco, che avviene nella direzione in cui si verifica la più alta accelerazione della tavola.

Test simili sono stati svolti per valori di accelerazione di picco della tavola crescenti. Di seguito viene considerato, come esempio, il caso di una serie di test svolti per valori di accelerazione della tavola che variano da 0.12 g a 0.4 g. In Fig. 6.5 è riportato il grafico

dell'accelerazione di picco della tavola rispetto all'accelerazione di picco del blocco. Da questo grafico si possono ricavare importanti informazioni.

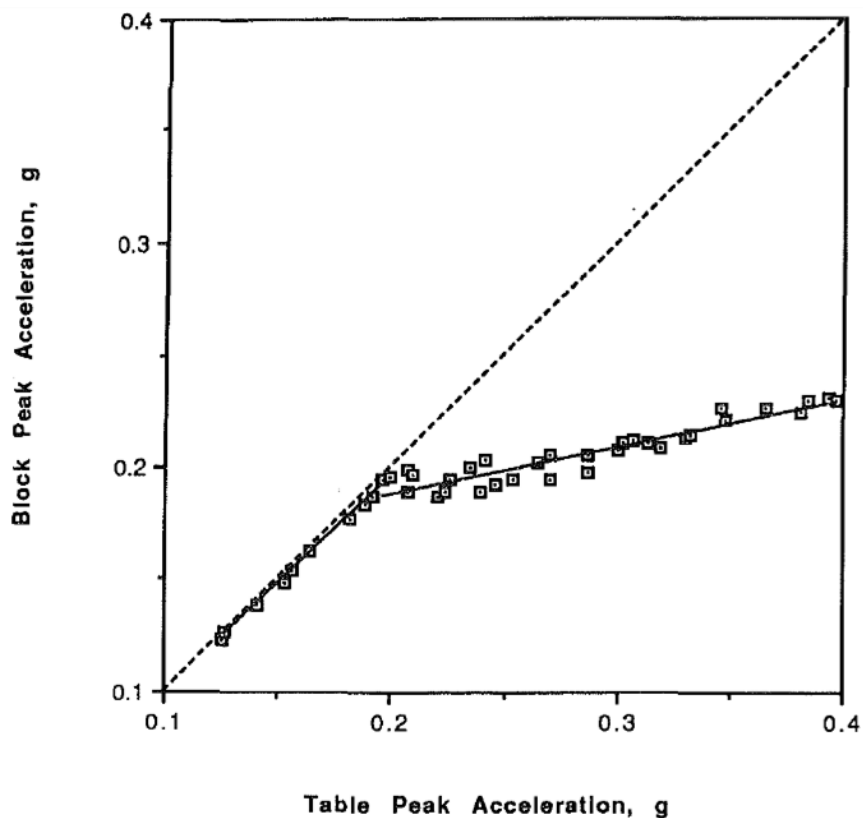


Fig. 6.5. Risultati di un test con la tavola vibrante per una interfaccia geomembrana-geotessuto: condizioni asciutte, sollecitazione normale = 8.5 kPa, frequenza di eccitazione = 2 Hz. (Yegian & Lahlaf_1992)

Le linee continue presenti in Fig. 6.5 rappresentano gli scarti minimi quadrati dei dati. Il segmento iniziale, avente una pendenza di circa 45° , conferma che inizialmente il blocco scorre con la tavola fino ad un valore limite di accelerazione della tavola di circa 0.20 g. Questa corrisponde ad una accelerazione del blocco $a_b = 0.20$ g (accelerazione critica) oppure ad un angolo di attrito $\phi_{stat} = 11.3^\circ$ calcolato secondo l'Eq. 9.5. Immediatamente dopo l'inizio dello scorrimento l'accelerazione del blocco scende leggermente. La ragione di questa riduzione va attribuita alla resistenza a taglio residua del sistema geomembrana-geotessuto, che è leggermente inferiore alla resistenza a taglio di picco. L'accelerazione residua del blocco associata alla resistenza residua è circa 0.19 g. Questa corrisponde ad un angolo di attrito $\phi = \tan^{-1}(0.19) = 10.7^\circ$.

Il secondo segmento della linea di regressione in Fig. 6.5 rappresenta il comportamento del blocco per valori di accelerazione della tavola maggiori di 0.20 g. In questo caso il blocco scorre rispetto alla tavola; pertanto, la sua accelerazione è minore di quella della tavola. Tuttavia, l'accelerazione di picco del blocco aumenta leggermente all'aumentare dell'accelerazione di picco della tavola. Questo comporta un aumento dell'angolo di attrito residuo da 10.7° a 13.5° nell'intervallo di variazione dell'accelerazione della tavola 0.2 g – 0.4 g.

Se si confrontano gli angoli di attrito di interfaccia misurati all'inizio dello scorrimento con la tavola vibrante e quelli ottenuti con i test statici (come la prova di taglio), si nota che c'è una leggerissima differenza di valori. Pertanto, i test svolti con la tavola vibrante possono fornire adeguati valori sia degli angoli di attrito dinamico che degli angoli di attrito statico di picco e residui.

6.3. SIMULAZIONE DI UN TERREMOTO

Come abbiamo già detto la tavola vibrante può essere utilizzata per studiare il comportamento delle interfacce di geosintetici sottoposte ad una sollecitazione sismica. La Fig. 6.6 riporta i risultati ottenuti con un test svolto con la tavola vibrante utilizzando una registrazione del terremoto Northridge del 1994 (registrazione della Los Angeles University Hospital Grounds), ridimensionata a 0.9 g per comandare la tavola vibrante.

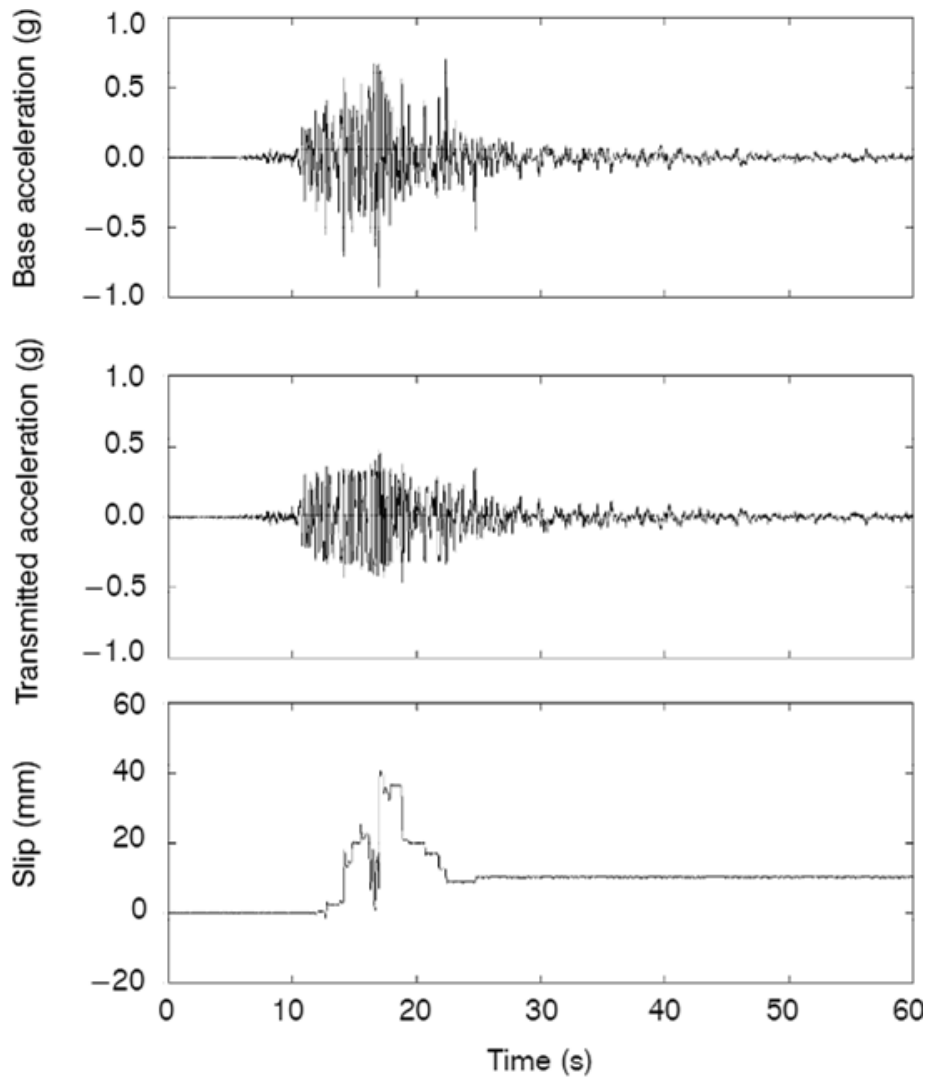


Fig. 6.6. Risultati di un test con la tavola vibrante per una interfaccia geomembrana liscia HDPE – geotessuto non tessuto sotto sollecitazione sismica (terremoto di Northridge, registrazione della Los Angeles University Hospital Grounds scalata a 0.9 g). (Yegian & Kadakal_1998)

Si nota di nuovo che l'interfaccia geomembrana HDPE liscia - geotessuto non tessuto trasmette un valore limite di accelerazione. Il valore di picco dell'accelerazione del blocco è circa 0.3 g, che è di molto inferiore all'accelerazione di picco della tavola (0.9 g). La Fig. 6.6 mostra anche lo scorrimento misurato lungo l'interfaccia testata con la sollecitazione sismica. Si nota che il massimo scorrimento (da picco a picco) indotto lungo l'interfaccia è maggiore dello scorrimento permanente misurato alla fine della sollecitazione. Questa osservazione risulta di fondamentale importanza per la progettazione dei sistemi di rivestimento delle discariche con geosintetici. Infatti, per

garantire l'integrità di un sistema di copertura e del sistema di raccolta del percolato, si dovrebbe calcolare sia il massimo valore di spostamento che quello permanente.

6.4. DETERMINAZIONE DELL'ACCELERAZIONE CRITICA

La Fig. 6.7 mostra i risultati di un tipico test svolto con la tavola vibrante per una interfaccia composta da una geomembrana liscia in polietilene ad alta densità e un geotessuto non tessuto. I risultati mostrano che sotto un'accelerazione della tavola di 0.6 g, l'accelerazione critica (massima accelerazione trasmessa attraverso l'interfaccia) è circa 0.3 g. Negli intervalli di accelerazione di blocco costante (settori di "plateau" della curva in Fig. 6.7), durante i quali ha luogo uno scorrimento relativo tra i due geosintetici, si osserva un moto a scatti.

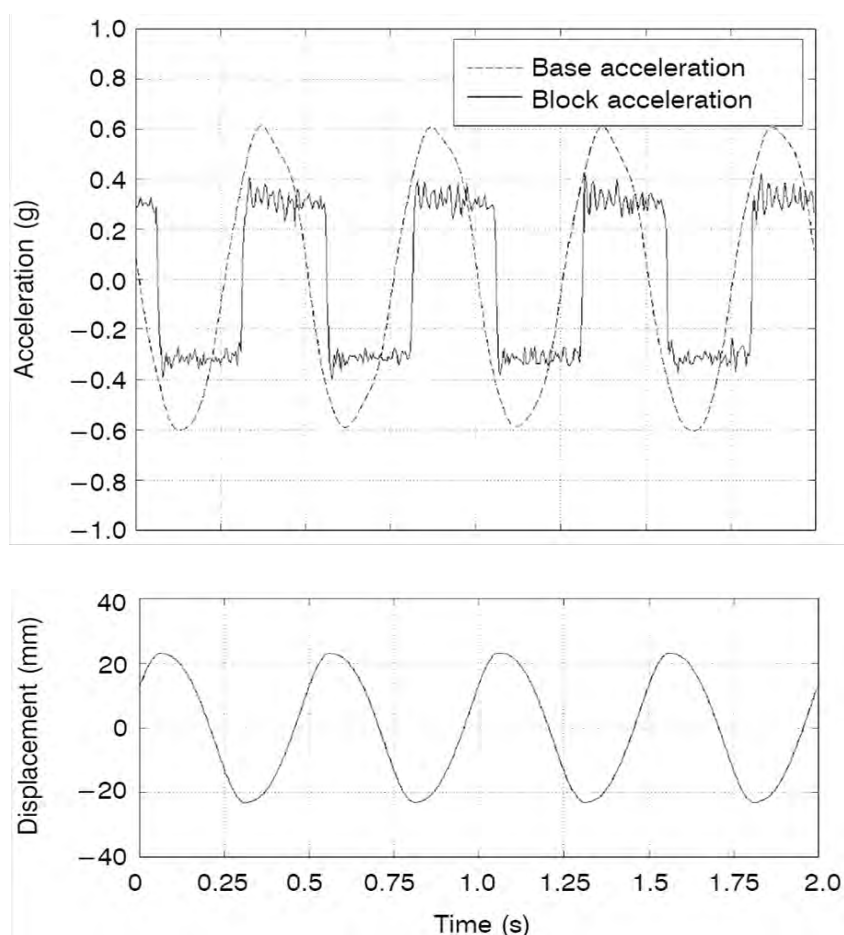


Fig. 6.7. Risultati di un test con la tavola vibrante con moto a scatti sotto una sollecitazione della tavola di base di 2 Hz di frequenza e 0.6 g di accelerazione per una interfaccia geomembrana HDPE liscia - geotessuto non tessuto. (Yegian & Kadakal_1998)

La stima dell'accelerazione critica risulta difficile a causa della significativa variazione dell'accelerazione del blocco durante l'intervallo di scorrimento. Sono state studiate varie procedure per determinare il metodo più adatto per stimare l'accelerazione critica. Una di queste consiste nella filtrazione dei dati a piccoli intervalli attraverso un filtro Butterworth impiegato ad una frequenza di taglio di 5 e 10 Hz. Il Butterworth è un filtro che permette di ottenere una risposta di frequenza il più possibile piatta. Infatti questa procedura elimina la componente a scatti: i dati di accelerazione vengono distorti eliminando le armoniche ad alta frequenza presenti negli intervalli registrati. Come si vede in Fig. 6.8, i dati filtrati a 5 e 10 Hz forniscono una sovrastima del valore di accelerazione di picco del blocco. In alternativa, si può utilizzare un metodo statistico con il quale si calcola l'accelerazione media e la deviazione standard per ogni zona di plateau della registrazione dell'accelerazione del blocco. Poi, si calcola la media di tutti i valori medi di tutti gli impulsi come il valore di massima accelerazione trasmessa al blocco (Fig. 6.8).

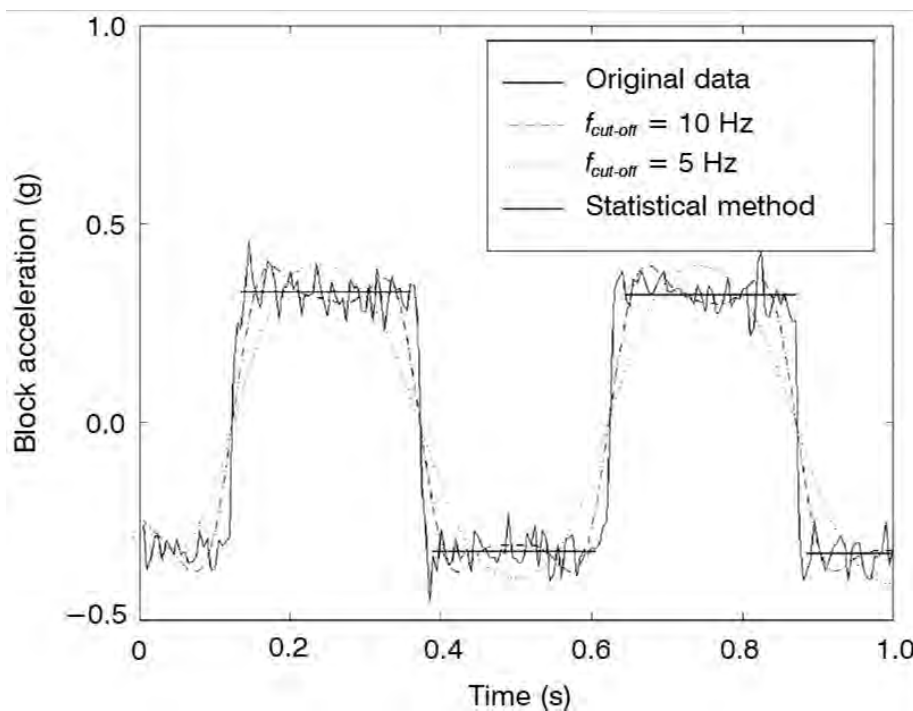


Fig. 6.8. Effetto della filtrazione di una tipica registrazione di accelerazione con moto a scatti e il metodo statistico di stima delle accelerazioni di picco del blocco per una interfaccia geomembrana HDPE liscia - geotessuto non tessuto. (Yegian & Kadakal_1998)

6.5. TEST CON LA TAVOLA VIBRANTE UTILIZZANDO UNA CENTRIFUGA GEOTECNICA

Negli studi geotecnici si può utilizzare una centrifuga per svolgere delle prove su modelli di strutture che sono soggette ad alti valori di sollecitazione normale. Per esempio, un sistema di rivestimento di fondo di una discarica con geosintetici può essere soggetto a valori di sforzo normale compresi tra 100 kPa e 800 kPa, quando è coperto da una altezza di rifiuto tra gli 8 m e i 60 m. Per studiare il comportamento dell'interfaccia dei geosintetici in considerazione si è dunque costretti a ricorrere all'utilizzo di una centrifuga geotecnica, in modo da produrre alti valori di sollecitazione normale.

Consideriamo il caso di una tavola vibrante posta su una piattaforma di una centrifuga geotecnica 100 g-ton. Il blocco in cemento, che produce una sollecitazione normale di 2.1 kPa ad 1 g (5 Hz), quando viene sottoposto ad una accelerazione centrifuga di 50 g produce una sollecitazione normale di 105 kPa. Per gli esperimenti condotti utilizzando una centrifuga geotecnica è importante garantire la corretta scala dei diversi parametri. Per una corretta modellazione è necessario sottoporre il modello ad una frequenza di sollecitazione che è proporzionale al livello di accelerazione centrifuga. Pertanto i test vengono svolti a 20 g, 30 g e 40 g utilizzando una frequenza di 100, 150, e 200 Hz. I risultati dei test svolti per una interfaccia geomembrana-geotessuto a differenti valori di accelerazione centrifuga, compreso il caso ad 1 g (5 Hz), sono riportati in Fig. 6.9.

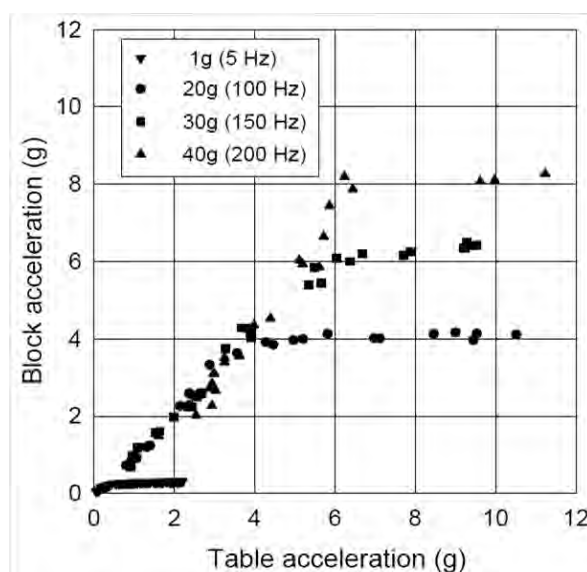


Fig. 6.9. Accelerazioni del blocco e della tavola registrate durante i test con una tavola vibrante utilizzando una centrifuga geotecnica: interfaccia geomembrana liscia – geotessuto. (De & Zimmie_1998)

Si può vedere che gli andamenti dei risultati per i differenti valori di accelerazione hanno tutti la stessa forma. I risultati del test a 1 g mostrano un punto di rottura in corrispondenza di una accelerazione della tavola di circa 0.22 g, che corrisponde ad un angolo di attrito di 12°. Per i test svolti a 20 g, la rottura si verifica a circa 4 g. Le accelerazioni misurate sulla tavola e sul blocco devono essere scalate con la stessa proporzione del livello di accelerazione centrifuga. Pertanto, l'accelerazione di 4 g misurata utilizzando un'accelerazione centrifuga di 20 g risulta equivalente a 0.20 g, che corrisponde ad un angolo di attrito di circa 11°.

6.6. I GEOSINTETICI COME ISOLAMENTO DI BASE

I risultati dei test svolti con la tavola vibrante su interfacce di geosintetici hanno mostrato che c'è un valore limite di sforzo di taglio che può essere trasmesso da un geosintetico all'altro. Così, qualsiasi struttura o deposito posto sopra un sistema di geosintetici può subire al massimo un valore limite di accelerazione (*accelerazione critica*), oltre il quale si verificano degli spostamenti lungo l'interfaccia di geosintetici. Quindi, una interfaccia geomembrana-geotessuto o una geomembrana-geomembrana possono agire come isolamento di base durante un terremoto. Un tale sistema è capace di limitare, nel piano dei geosintetici, il trasferimento di energia alla struttura o alla massa di terreno posta sopra il geotessuto o su un secondo strato di geomembrana. Il trasferimento di energia può essere smorzato attraverso le perdite per attrito dal momento che i geosintetici scorrono uno sopra l'altro.

Lo scopo di un sistema di isolamento sismico di una struttura è riuscire ad ottenere una discontinuità tra il terreno e la struttura in modo di limitare i valori delle forze e dell'accelerazione trasmesse dal terreno alla struttura.

7. OSSERVAZIONE DEI RISULTATI DI ATTRITO TRA INTERFACCE DI GEOSINTETICI IN CAMPO STATICO

L'attrito statico è sempre presente quando due corpi sono in contatto tra di loro. Se due corpi vengono sottoposti ad una sollecitazione esterna che genera una componente di taglio sulla loro interfaccia di contatto, all'inizio si è in presenza di un regime di micro-scorrimento (spostamento trascurabile) all'interfaccia dei due corpi. La forza di attrito statico raggiunge il suo valore massimo nell'istante in cui si verifica l'inizio del moto di scorrimento vero e proprio, cioè quando comincia ad aumentare la velocità di scorrimento relativo. Con il verificarsi del moto di scorrimento il valore della forza di attrito diminuisce leggermente rispetto al suo valore di picco. Infatti dopo un certo valore di spostamento il valore della forza di attrito tende a stabilizzarsi su un valore costante e si è in presenza del cosiddetto "attrito residuo".

I parametri responsabili dell'attrito statico sono parecchi, infatti, il coefficiente di attrito statico non è un valore costante ma dipende dai materiali in contatto. La pressione ha una certa influenza sull'attrito statico. Per bassi valori di pressione normale il coefficiente di attrito è costante mentre comincia a cambiare quando si applica un alto valore di pressione normale. La ruvidezza è un altro parametro fondamentale nell'analisi dell'attrito statico, cioè la presenza di asperità sulla superficie che aumentano il legame tra i corpi a contatto. La ruvidezza dipende dall'indice di plasticità del materiale che dipende a sua volta dalle proprietà del materiale stesso. Una superficie liscia è caratterizzata da un basso indice di plasticità e il contatto tra le superfici di materiali polimerici, come i geosintetici, è quasi elastico. Un altro parametro che può influenzare le proprietà del materiale e quindi il comportamento di resistenza al taglio all'interfaccia è rappresentato dalla temperatura. I fattori appena citati sono solo alcuni dei parametri che influiscono sul comportamento di attrito tra due corpi a contatto.

Per quanto riguarda l'ambito specifico dei sistemi di rivestimento in geosintetico, i fattori che hanno maggior influenza sul comportamento di attrito nelle interfacce di geosintetici possono essere così riassunti:

- ruvidezza dei materiali;
- estensione della superficie di contatto;
- valore del carico normale;
- temperatura;
- umidità;
- orientamento del campione;
- danneggiamento della superficie di contatto;
- spessore e massa del campione;
- arco di tempo in cui le superfici rimangono a contatto.

7.1. DISTINZIONE TRA CAMPO STATICO E CAMPO DINAMICO

Come è stato detto nel Cap. 1, la forza di attrito che si manifesta tra superfici in quiete tra loro è detta di attrito statico, mentre tra superfici in moto relativo si parla di attrito dinamico. Questa è la distinzione esatta che distingue i due fenomeni sotto un aspetto prettamente fisico.

Nella pratica comune ci si trova spesso costretti a fare una distinzione più dettagliata del valore di attrito, considerando più valori specifici. Per quanto riguarda la progettazione di strutture di rivestimento in geosintetico, è di fondamentale importanza considerare il valore di “attrito residuo”, cioè il valore di attrito in seguito a grandi spostamenti. Se questo angolo di attrito sia da considerarsi statico o dinamico dipende dai vari punti di vista. Dal punto di vista dell'aspetto fisico l'attrito residuo è a tutti gli effetti un angolo di attrito dinamico in quanto si è in presenza di un moto relativo di interfaccia. Da un punto di vista pratico, invece, lo si può considerare statico poiché si verifica per valori di velocità di scorrimento ridotti. Si possono dunque fare due distinzioni diverse considerando due aspetti discriminanti diversi:

- l'entità dello spostamento: per piccoli valori di scorrimento trascurabili (micro-scorrimento) l'attrito è statico, mentre per valori di spostamento rilevanti l'attrito è dinamico (Fig. 7.1);
- l'entità della velocità di scorrimento: per valori di velocità di scorrimento trascurabili si ha attrito statico, mentre per valori di velocità di scorrimento di una certa entità si ha attrito dinamico.

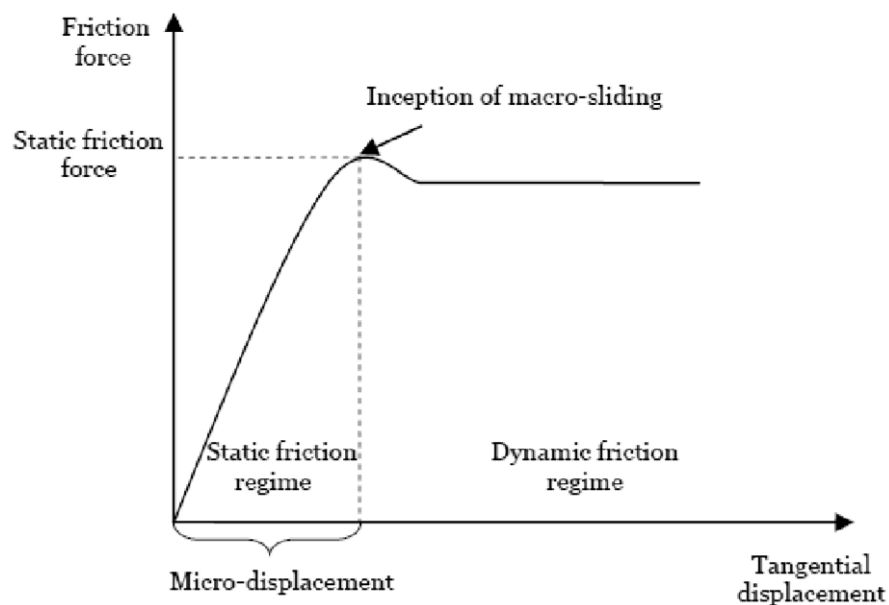


Fig. 7.1. Distinzione tra condizioni statiche e dinamiche basata sull'entità dello spostamento. (E. Deladi)

Con la distinzione basata sull'entità dello spostamento (Fig. 7.1) si va a considerare il valore di attrito residuo come un valore di attrito dinamico. Nella pratica comune, invece, per quanto riguarda le applicazioni pratiche, l'attrito residuo viene considerato ancora all'interno dell'attrito statico. Pertanto risulta più conveniente adottare la distinzione basata sull'entità della velocità di scorrimento, che considera l'attrito residuo come un valore statico o meglio convenzionalmente statico.

Sulla distinzione tra attrito statico e attrito dinamico è tuttora in corso un dibattito, poiché come abbiamo visto non esiste una netta distinzione definita da un singolo fattore. Per riuscire a descrivere il comportamento di attrito delle interfacce di geosintetici nei sistemi di rivestimento su pendii nell'intervallo che va dalla posa dei geosintetici alla

stabilizzazione del pendio, si può convenzionalmente considerare l'attrito residuo all'interno dell'ambito statico.

7.2. INFLUENZA DEL CARICO NORMALE SUI VALORI DI ATTRITO

Wasti & Özdüzgün (2001) hanno studiato il comportamento a taglio di varie interfacce geomembrana – geotessuto utilizzando come dispositivi il piano inclinato e la scatola di taglio diretto. Hanno svolto una serie di test con la scatola di taglio diretto di dimensioni standard (60 mm x 60 mm) per consentire il confronto dei risultati ottenuti con i test con il piano inclinato (60 mm x 60 mm). Inoltre, hanno condotto vari test con la scatola di taglio diretto di grandi dimensioni (300 mm x 300 mm) per confrontare i risultati con quelli ottenuti con la scatola di taglio diretto di dimensioni standard e con quelli ottenuti con il piano inclinato (300 mm x 300 mm). Le prove con il piano inclinato sono state svolte con un intervallo di carico normale di 5÷50 kPa. Nelle prove con la scatola di taglio diretto il carico normale applicato è di 25÷300 kPa e 110÷400 kPa rispettivamente con la scatola di piccole dimensioni e quella di grandi dimensioni. Le interfacce di geosintetici che Wasti & Özdüzgün hanno analizzato con lo scopo di ottenere un confronto tra i risultati delle varie prove svolte con i diversi dispositivi sono le seguenti:

- S-GM(A)/GT(A): interfaccia composta da una geomembrana liscia in HDPE e da un geotessuto in poliestere;
- R-GM(A)/GT(A): interfaccia composta da una geomembrana ruvida in HDPE e da un geotessuto in poliestere;

Il campo dei valori di sollecitazione normale che è possibile impiegare con il piano inclinato, con la scatola di taglio diretto standard e con quella di grandi dimensioni non sono gli stessi e i valori si sovrappongono solo parzialmente. I parametri di resistenza al taglio di interfaccia c e ϕ (rispettivamente l'adesione intercetta e l'angolo di attrito), che sono determinati secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, si ottengono dalla retta di regressione lineare dei punti individuati da τ e σ , cioè la resistenza al taglio e la tensione normale agente sull'interfaccia a rottura. Tuttavia, è stato osservato che gli involucri di rottura non sono sempre rappresentabili da una linea retta. Infatti, in molti casi l'involucro di rottura ha una forma curvilinea, in particolare per bassi valori di sollecitazione normale

e per le geomembrane ruvide, suggerendo una dipendenza della resistenza al taglio di interfaccia dal livello di sollecitazione normale. Questa caratteristica è stata osservata largamente osservata nei terreni, nei materiali ghiaiosi e in quelli rocciosi. È accettabile utilizzare un involuppo di rottura lineare per analizzare la stabilità di strutture che contengono interfacce di geosintetici. Tuttavia, i valori di c e ϕ devono essere selezionati per l'appropriato campo di sollecitazioni normali poiché la resistenza di interfaccia mostra una dipendenza dal valore di sollecitazione normale.

Gli effetti del livello di sollecitazione normale sui risultati di resistenza al taglio delle interfacce analizzate con i diversi dispositivi sono illustrati in Fig. 7.2. In questa figura il grafico di δ_f ($= \phi_f$) in funzione di σ_a mostra i risultati ottenuti indipendentemente da ciascuna prova svolta con il piano inclinato o con la scatola di taglio diretto considerando l'incremento del valore di sollecitazione normale σ_a . Nelle prove con il piano inclinato δ_f (uguale a $\tan^{-1}(\tau/\sigma)$) è l'angolo di inclinazione con il quale si verifica l'inizio dello scorrimento e σ_a è la tensione normale agente sulla interfaccia all'inizio della prova, quando il piano è nella posizione orizzontale. Nel caso delle prove con la scatola di taglio diretto, δ_f si calcola dal valore di carico normale applicato e dal valore di resistenza al taglio di picco misurata, utilizzando la relazione $\delta_f = \tan^{-1}(\tau/\sigma)$ dove $\sigma = \sigma_a$. In altre parole, la relazione tra δ_f e σ_a presente in Fig. 7.2 fornisce la variazione dell'angolo di inclinazione critico per l'interfaccia considerata, valutato con la scatola di taglio diretto e con il piano inclinato come funzione del carico normale applicato nello svolgimento dei test.

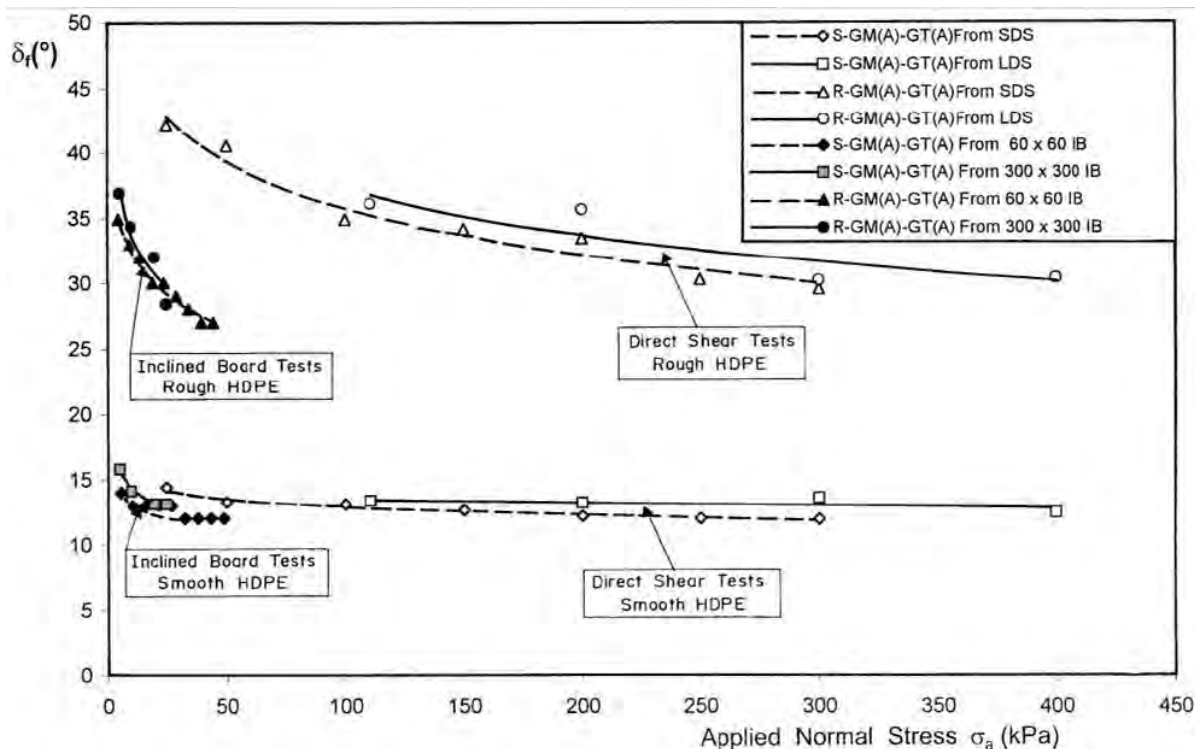


Fig. 7.2. Effetto del livello di sollecitazione normale sui risultati dei test: interfacce geomembrana – geotessuto. (Wasti & Özdüzgün_2001)

La Fig. 7.2 mostra che l'effetto del valore di tensione normale su δ_f è molto più pronunciato per le interfacce con geomembrane ruvide. Per l'interfaccia R-GM(A)/GT(A) δ_f scende di circa 12° e 17° gradi a seconda che σ_a aumenti da 25 kPa a 300 kPa e da 110 kPa a 400 kPa rispettivamente nei test con la scatola di taglio diretto standard e in quelli con la scatola di taglio diretto di grandi dimensioni. Si può inoltre vedere che la diminuzione di δ_f è più significativa nel campo di sollecitazioni normali più basse, cioè fino a circa 100 kPa. Nel caso delle prove con il piano inclinato per l'interfaccia R-GM(A)-GT(A) la caduta di δ_f è di circa 10° all'aumentare di σ_a da 5.5 kPa a 50 kPa. La variazione di δ_f è minore nel caso di interfacce con geomembrane lisce in HDPE in entrambi i tipi di test, con una caduta massima di 2÷3°.

Un confronto dei valori di δ_f ottenuti dai test svolti con il piano inclinato e con la scatola di taglio diretto per l'intervallo di sovrapposizione di bassi valori di sollecitazione normale compreso tra 25 kPa e 50 kPa è inoltre illustrato in Fig. 7.2. Per le interfacce geomembrana ruvida – geotessuto i valori di δ_f ottenuti con la scatola di taglio diretto sono maggiori di circa 13° rispetto a quelli ottenuti con il piano inclinato. Nel caso,

invece, delle interfacce con geomembrane lisce la differenza di δ_f è soltanto di pochi gradi.

L'influenza del livello di sollecitazione normale sul comportamento di attrito per interfacce di geosintetici è stato considerata anche da Seo et al. (2007) nel loro studio focalizzato sull'influenza dell'umidità sulla resistenza al taglio tra geomembrane e geotessuti. Seo et al. hanno svolto una serie di test utilizzando un dispositivo di taglio diretto di grandi dimensioni capace di misurare la resistenza al taglio di picco e quella residua ad 80 mm. Per simulare le condizioni bagnate nello svolgimento delle prove i geosintetici sono stati sommersi per la durata di un giorno.

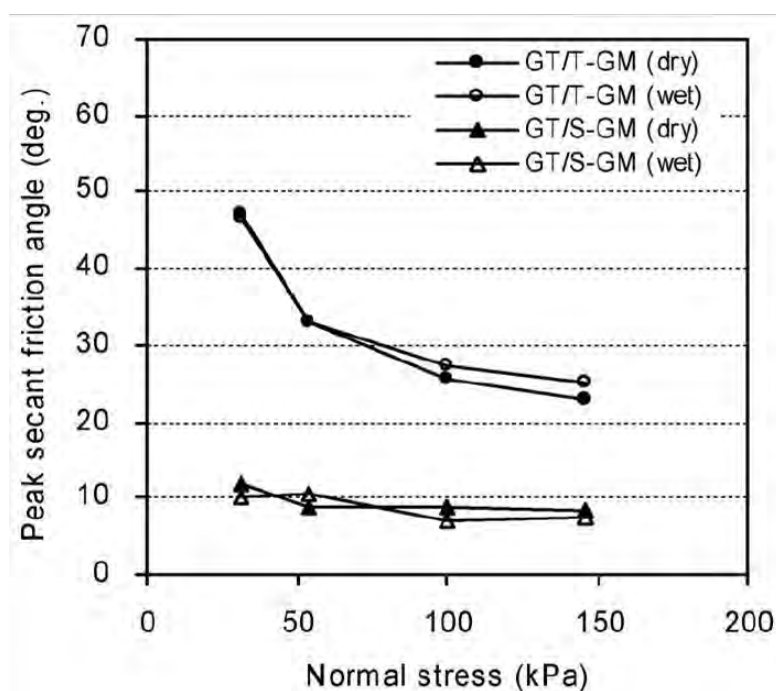


Fig. 7.3. Effetto del livello di sollecitazione normale sulla resistenza al taglio di interfacce geomembrana – geotessuto. (Seo et al._2007)

In Fig. 7.3 sono riportati i risultati dei test svolti da Seo et al. per le interfacce geomembrana liscia – geotessuto non tessuto (GT/S-GM) e le interfacce geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto (GT/T-GM) sotto condizioni asciutte e bagnate. Il termine “peak secant friction angle” utilizzato da Seo et al. per identificare l’effetto della sollecitazione normale sull’attrito di interfaccia coincide con il valore di δ_f utilizzato da

Wasti & Özdüzgün (2001) ($\delta_{\text{secante}} \equiv \delta_f = \tan^{-1}(\tau/\sigma)$). Dal grafico si vede che l'angolo di attrito diminuisce all'aumentare del valore di sollecitazione normale e che questo effetto risulta più marcato per le interfacce contenenti geomembrane ruvide, così confermando i risultati ottenuti da Wasti & Özdüzgün (2001). L'angolo di attrito "peak secant friction angle" si riduce in presenza di acqua su qualsiasi interfaccia, eccetto per le interfacce geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto (GT/T-GM).

La relazione tra $\delta_f \equiv \delta_{\text{secante}}$ e la sollecitazione normale dimostra che l'angolo di attrito diminuisce all'aumentare del valore di sollecitazione normale applicato su una interfaccia di geosintetici. Questo implica che, per una sicura progettazione, si dovrebbe determinare la resistenza al taglio utilizzando il massimo valore di sollecitazione normale applicato nelle discariche.

7.3. INFLUENZA DELLA PRESENZA DI ACQUA SUI VALORI DI ATTRITO

I sistemi di rivestimento con geosintetici (GLS) sono ampiamente utilizzati nelle strutture idrauliche come dighe, canali, bacini, o nelle discariche di rifiuti. Queste strutture sono particolarmente soggette alla presenza di acqua. Nel caso specifico delle discariche di rifiuti le interfacce di geosintetici sono facilmente esposte alla pioggia, al percolato e alla possibile presenza di falde d'acqua sotto i rivestimenti. Quindi, per avere una caratterizzazione più precisa dell'attrito delle varie interfacce, si deve prendere in considerazione l'effetto dell'acqua sul meccanismo di resistenza al taglio. Le strutture che comprendono sistemi di geosintetici sono frequentemente soggette ad infiltrazione nel terreno e ad abbassamenti rapidi del livello dell'acqua.

7.3.1. Test con il piano inclinato

Briançon et al. (2002) hanno realizzato un piano inclinato con delle specifiche tecniche che permettono di svolgere i test sotto condizioni bagnate. Si tratta sempre del solito piano inclinato descritto nei capitoli precedenti, con in più delle caratteristiche specifiche riguardanti la ritenuta dell'acqua. Sono infatti state installate delle pareti stagne (Fig. 7.4 e 7.5). Le due scatole possono essere riempite con terreno e le loro dimensioni ($l_1 = 2.0$ m,

$b_l = 1.2 \text{ m}$, $h_l = 0.3 \text{ m}$ per la scatola inferiore; $l_u = 1.0 \text{ m}$, $b_u = 1.0 \text{ m}$, $h_u = 0.5 \text{ m}$ per la scatola superiore) permettono di condurre test con campioni di grandi dimensioni.

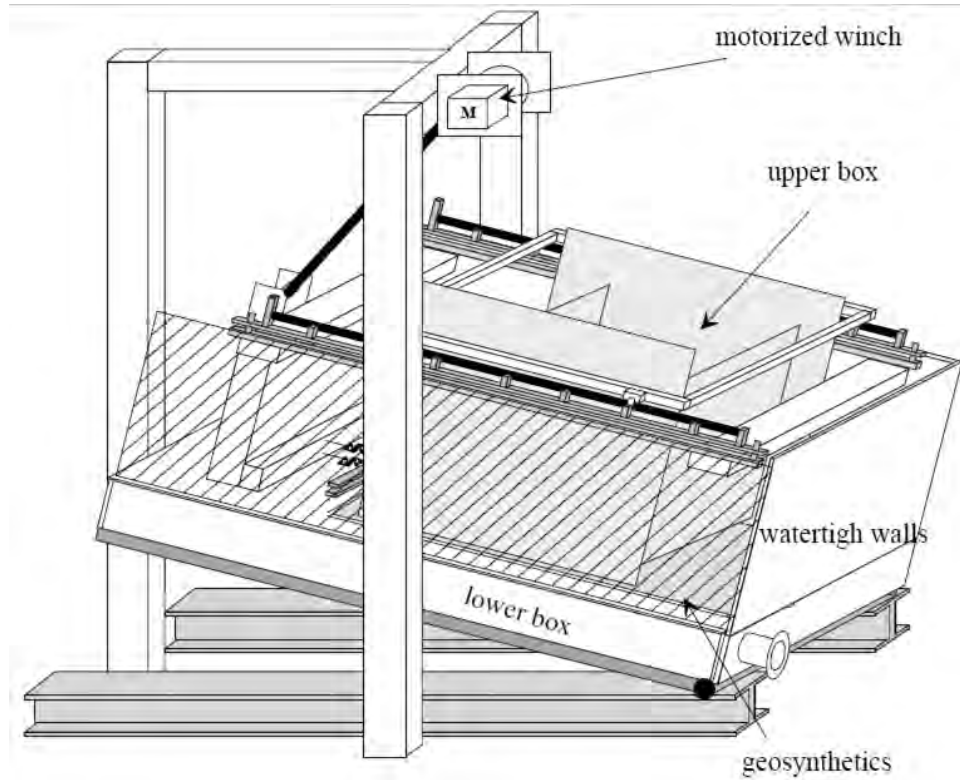


Fig. 7.4. Schema del piano inclinato per lo svolgimento di test sotto condizioni bagnate. (L. Briançon et al._2002)



Fig. 7.5. Foto del piano inclinato per lo svolgimento di test sotto condizioni bagnate. (L. Briançon et al._2002)

Briançon et al. hanno sviluppato nuove procedure per simulare le più comuni condizioni idrauliche alle quali i sistemi di geosintetici possono essere esposti. Per esempio, i sistemi di copertura delle discariche possono essere soggetti a piogge che portano alla saturazione totale o parziale dei materiali di protezione. Mentre i bacini e gli arginamenti sono soggetti a riempimento e svuotamento o ad una rapida diminuzione del livello dell'acqua dovuto al passaggio di una chiatta lungo un canale. I test sviluppati permettono di definire l'attrito sotto le seguenti condizioni bagnate (Fig. 7.6):

- H1: filtrazione nelle interfacce dei geosintetici;
- H2: filtrazione nel terreno di copertura, con una altezza piezometrica costante e_{sat} ;
- H3: simulazione di riempimento;
- H4: abbassamento immediato del livello dell'acqua.

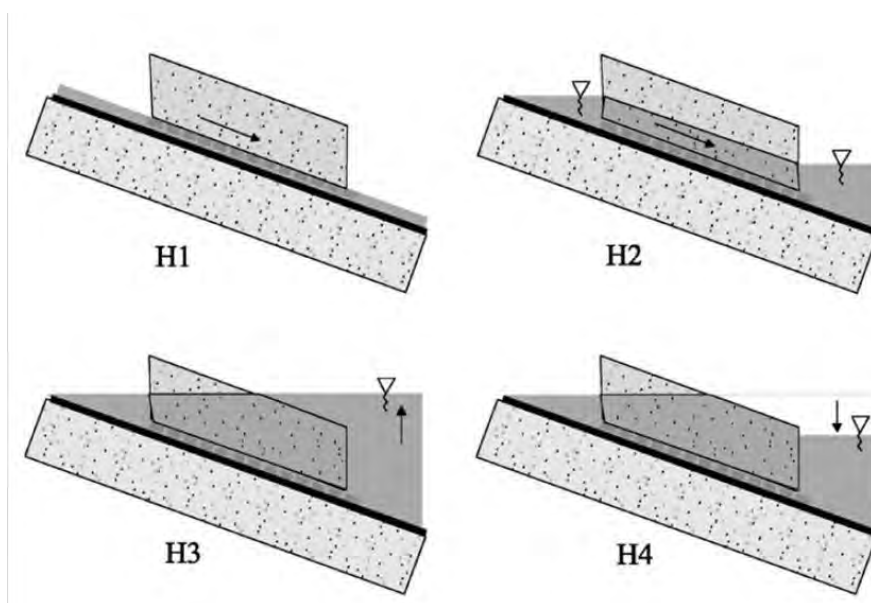


Fig. 7.6. Le differenti condizioni idrauliche applicate nei test. (L. Briançon et al._2002)

Per effettuare questi test, al piano inclinato sono state apportate le seguenti modifiche:

- installazione di un serbatoio che fornisce il deflusso a monte della scatola superiore;

- installazione di pareti a tenuta stagna sulla scatola inferiore e attorno alla scatola superiore, garantendo così l'impermeabilità di entrambe le scatole.

Per analizzare l'attrito delle interfacce sotto le diverse condizioni idrauliche sopra esposte Briançon et al. hanno utilizzato la "Force Procedure". Di seguito vengono esposte le procedure dei test svolti sotto le condizioni H1 e H2, da cui prendono nome i test.

7.3.1.1. Test di tipo H1

Questo test viene utilizzato per controllare l'influenza dell'acqua sull'angolo di attrito, tramite la realizzazione di una filtrazione senza pressione d'acqua nelle interfacce tra i geosintetici che compongono i sistemi di rivestimento. Siccome durante l'analisi si utilizza la "Force Procedure", viene misurata la forza $F(\beta)$ necessaria per trattenere la scatola superiore. Il test si svolge in tre fasi:

1. lieve sollevamento del piano ($< 3^\circ$);
2. creazione di una filtrazione sull'interfaccia dei geosintetici, senza generare pressione d'acqua;
3. sollevamento del piano in modo da determinare l'angolo di attrito dell'interfaccia in questione.

Dai risultati ottenuti con le varie interfacce analizzate con questo tipo di test, si evince che la presenza di una filtrazione nelle interfacce dei geosintetici porta ad una diminuzione del valore dell'angolo di attrito misurato. Supposto che la filtrazione non generi una pressione d'acqua nell'interfaccia esaminata (filtrazione con piccolo flusso), si può misurare l'angolo di attrito con filtrazione nell'interfaccia \emptyset_H e calcolare la differenza tra di esso e lo stesso angolo ma in condizioni asciutte \emptyset : $\Delta\emptyset = \emptyset - \emptyset_H$. Questo fattore varia da un'interfaccia all'altra e mostra la sensibilità che ha una interfaccia a ridurre il proprio attrito in presenza di una filtrazione (senza pressione d'acqua). Alcune interfacce non sono particolarmente sensibili alla presenza d'acqua: per esempio $\Delta\emptyset = 1.5^\circ$ per l'interfaccia tra un geotessuto di rinforzo e una geomembrana liscia in polipropilene (GTX_R/GMB_{PP}) oppure $\Delta\emptyset = 1.3^\circ$ per l'interfaccia tra un geotessuto di protezione e una geomembrana liscia in polietilene ad alta densità (GTX_P/GMB_{HDPE}). Mentre altre interfacce sono più sensibili: ad esempio $\Delta\emptyset = 5^\circ$ per l'interfaccia tra un geotessuto di

rinforzo e una geomembrana liscia in bitume elastomerico (GTX_R/GMB_{B(S)}) o $\Delta\theta = 4.3^\circ$ per l'interfaccia tra un geotessuto di protezione e una geomembrana liscia in polipropilene (GTX_P/GMB_{PP}).

7.3.1.2. Test di tipo H2

Questo test, che utilizza la “Force Procedure” come procedimento di analisi, viene utilizzato per controllare l'influenza dell'acqua sul valore dell'angolo di attrito, tramite la realizzazione di una filtrazione nel terreno di copertura, con una altezza piezometrica costante e_{sat} . Svolgere un test con filtrazione nel terreno di copertura richiede varie fasi:

1. sollevamento del piano in condizioni asciutte;
2. realizzazione di una filtrazione nel geotessuto;
3. realizzazione di una filtrazione nel terreno di copertura con una altezza piezometrica costante e_{sat} e mantenimento di un livello d'acqua $h_w = e_{sat}/\cos\beta$ a monte e a valle della scatola superiore.

L'aumento del peso del terreno dovuto alla sua saturazione è insufficiente per spiegare la riduzione della forza di resistenza che è quindi principalmente dovuta allo sviluppo di una pressione d'acqua sulla interfaccia del geosintetico. Sulla base dell'equilibrio delle forze agenti sulla scatola superiore contenente il terreno e il geotessuto collegato ad essa (Fig. 7.7), si può calcolare la forza necessaria per trattenere la scatola superiore durante le varie fasi del test e la si può confrontare con quella misurata durante il test. Per calcolare questa forza si considera:

- l'aumento del peso del terreno dovuto all'acqua: in questo caso si annota la forza come $F(\beta)1$;
- l'aumento del peso del terreno dovuto all'acqua e alla pressione dell'acqua sull'interfaccia del geosintetico generata dalla filtrazione: in questo caso si annota la forza come $F(\beta)2$.

L'equilibrio delle forze agenti sulla scatola superiore (Fig. 7.7) si scrive come di seguito:

$$W_s \cdot \sin\beta + r(\beta) - F_s - F(\beta) = 0 \quad (7.1a)$$

$$N_s = W_s \cdot \cos\beta - U_N \quad (7.1b)$$

dove $F_R(\beta)$ è la forza necessaria per trattenere la scatola superiore vuota, $F(\beta)$ è la forza necessaria per trattenere la scatola superiore riempita con il terreno e U_N è la risultante della pressione dell'acqua agente sull'interfaccia dei geosintetici:

$$U_N = u_N \cdot L = \gamma_w e_{sat} \cos\beta \cdot L$$

Combinando le relazioni (7.1a) e (7.1b) con $F_s = N_s \tan\phi$ si ottiene:

$$F(\beta) = W_s \cdot \sin\beta + F_r(\beta) - (W_s \cdot \cos\beta - U_N) \cdot \tan\phi \quad (7.2)$$

Per:

- $e_{sat} > 0$ (filtrazione nel terreno)
- $W_s = (\gamma (e - e_{sat}) + \gamma_{sat} e_{sat}) L$
- $U_N = 0$

si ottiene:

$$F(\beta)1 = [\gamma_{sat} e_{sat} + \gamma(e - e_{sat})]L \cdot \sin\beta + F_r(\beta) - [\gamma_{sat} L e_{sat} + \gamma(e - e_{sat})L] \cos\beta \cdot \tan\phi$$

Per: (7.3)

- $e_{sat} > 0$ (filtrazione nel terreno)
- $W_s = (\gamma (e - e_{sat}) + \gamma_{sat} e_{sat}) L$
- $U_N = \gamma_w L e_{sat} \cos\beta$

si ottiene:

$$F(\beta)2 = [\gamma_{sat} e_{sat} + \gamma(e - e_{sat})]L \cdot \sin\beta + F_r(\beta) - [(\gamma_{sat} - \gamma_w) L e_{sat} + \gamma(e - e_{sat})L] \cos\beta \cdot \tan\phi \quad (7.4)$$

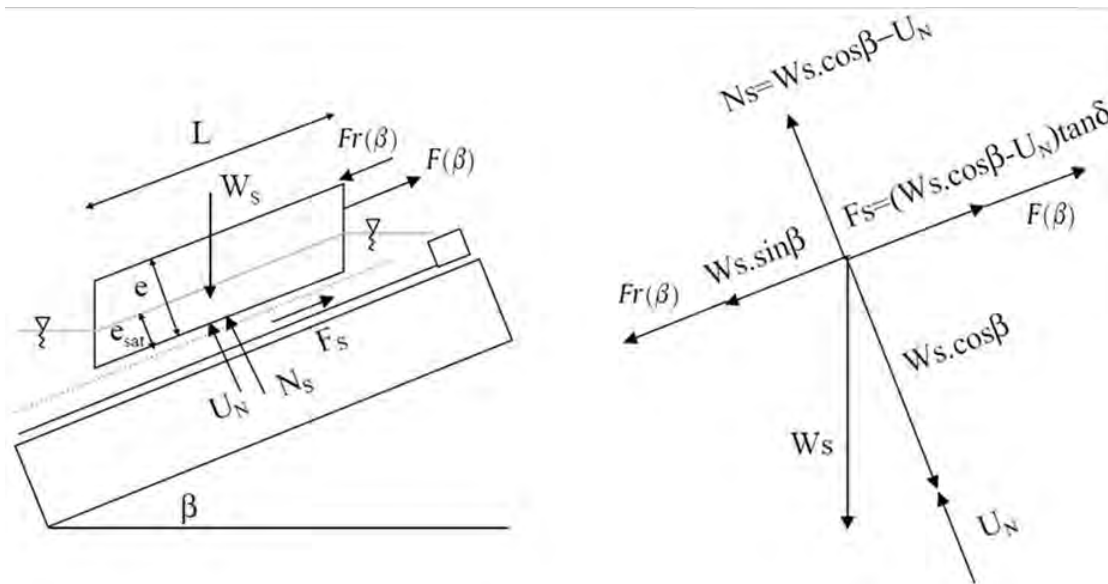


Fig. 7.7. Equilibrio delle forze agenti sulla scatola superiore. (L. Briançon et al._2002)

L'analisi svolta con questo test si divide in due fasi:

- determinazione dell'angolo di attrito in condizioni asciutte \emptyset e dell'angolo di attrito in condizioni bagnate \emptyset_H (filtrazione tra i geosintetici senza pressione d'acqua nell'interfaccia) sulla base della forza misurata $F(\beta)_{\text{misurata}}$;
- calcolo delle forze $F(\beta)1$ e $F(\beta)2$ (Eq. 7.3 e 7.4) utilizzando l'angolo di attrito \emptyset_H per ciascuna altezza di saturazione e_{sat} e confrontandole con la forza misurata $F(\beta)_{\text{misurata}}$, al fine di determinare se la filtrazione nel terreno genera una pressione d'acqua nell'interfaccia tra i geosintetici.

Per quantificare l'influenza della filtrazione nel terreno del sistema di rivestimento con geosintetici, si può esprimere l'incremento η_w della forza motrice generato dalla filtrazione, eliminando la forza motrice dovuta al peso della scatola:

$$\eta_w = \frac{(F(\beta)_{\text{mis}}^{e_{\text{sat}}} - F_r(\beta)) - (F(\beta)_{\text{mis}}^{\text{dry}} - F_r(\beta))}{F(\beta)_{\text{mis}}^{\text{dry}} - F_r(\beta)} \times 100 \quad (7.5)$$

Dai test delle varie interfacce tipiche dei sistemi di rivestimento con geosintetici, svolti con il piano inclinato, è risultato che la filtrazione di acqua nel terreno porta ad un incremento del 50% della forza motrice per $e_{\text{sat}} = 1/3e$ e dell'83% per $e_{\text{sat}} = 2/3e$. Se si confrontano questi risultati con quelli ottenuti dall'analisi di stabilità di un pendio, svolta

con il metodo dell'equilibrio limite considerando le ipotesi di pendio infinito, si vede che i valori ottenuti con il piano inclinato risultano inferiori (anche di 10÷15 punti percentuali) rispetto a quelli ottenuti con l'equilibrio limite. Infatti, il piano inclinato evidenzia il fatto che la filtrazione nel terreno comporta una diminuzione della forza di resistenza ma la sottostima. Questa differenza può essere dovuta al fatto che è difficile ottenere una filtrazione che sia perfettamente parallela alla pendenza lungo l'intera lunghezza della scatola superiore nel piano inclinato.

Si è visto che l'acqua ha diversi effetti sulla stabilità dei sistemi di rivestimento realizzati con i geosintetici:

- un effetto diretto sull'angolo di attrito: una diminuzione che dipende dall'interfaccia testata;
- un effetto sul peso del terreno di copertura;
- un effetto sulle forze di attrito: una diminuzione dovuta alla pressione dell'acqua nella interfaccia.

L'influenza della filtrazione nel terreno di copertura dei sistemi di rivestimento realizzati con geosintetici è confermata da vari studi e deve essere tenuta in considerazione nel calcolo delle dimensioni di tali sistemi. Questa influenza è così grande che spesso risulta necessario considerare un adeguato sistema di drenaggio per ridurre la pressione dell'acqua nelle interfacce tra i geosintetici.

7.3.2. Test con la scatola di taglio diretto

Seo et al. (2007) hanno condotto uno studio focalizzato a determinare l'influenza dell'umidità sulla resistenza al taglio tra geomembrane e geotessuti. Hanno svolto una serie di test utilizzando un dispositivo di taglio diretto di grandi dimensioni (300 mm x 300 mm) capace di misurare la resistenza al taglio di picco e quella residua per uno spostamento di 80 mm. Per simulare le condizioni bagnate i geosintetici sono stati sommersi per la durata di un giorno prima di cominciare con lo svolgimento delle prove. I test di attrito sono stati condotti per cinque differenti valori di sollecitazione normale compresi in un intervallo tra 6 kPa e 154 kPa. Di seguito sono riportati i risultati dei test svolti da Seo et al. per le interfacce geomembrana liscia – geotessuto non tessuto (GT/S-

GM) e le interfacce geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto (GT/T-GM) sotto condizioni asciutte e bagnate.

In Fig. 7.8 sono presentate le tipiche relazioni sforzo di taglio – spostamento per le interfacce analizzate con un carico normale di 100 kPa. Si osserva un comportamento non lineare, soprattutto per le interfacce GT/T-GM. La resistenza al taglio di picco delle interfacce con la geomembrana liscia (GT/S-GM) diminuisce se in condizioni bagnate, mentre nel caso delle interfacce con la geomembrana ruvida (GT/T-GM) in condizioni bagnate si ha un incremento di resistenza al taglio per un valore di sollecitazione al taglio di 100 kPa. Tuttavia, queste variazioni causate dalla presenza di acqua nelle interfacce esaminate non sono identiche per tutti i valori di sollecitazione normale testati.

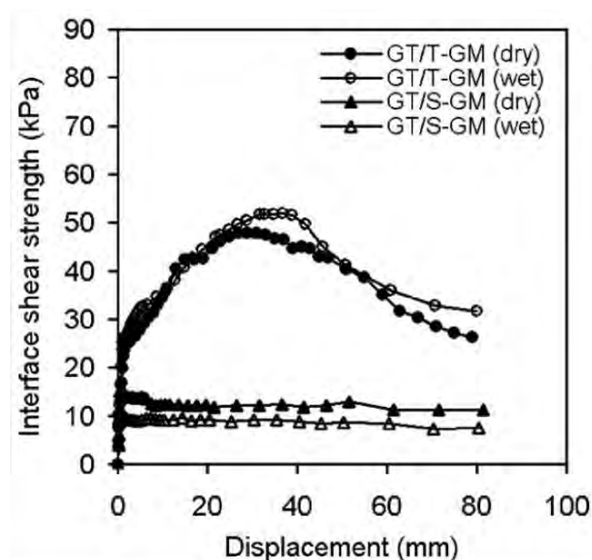


Fig. 7.8. Relazione tra sollecitazione di taglio e spostamento per interfacce geotessuto – geomembrana con un carico normale di 100 kPa. (Seo et al. 2007)

Il grafico della resistenza al taglio di interfaccia in funzione del valore di sollecitazione normale è riportato in Fig. 7.9. Gli involucri di rottura, assunti approssimativamente lineari, sono stati definiti utilizzando il criterio di rottura di Mohr-Coulomb (Cap. 2.3). Per le interfacce GT/S-GM l'angolo di attrito di picco e quello residuo diminuiscono di circa 1° in caso si bagni l'interfaccia. Invece, nel caso di interfacce GT/T-GM bagnate, l'adesione intercetta diminuisce al contrario dell'angolo di attrito che aumenta. In Fig. 7.9

si può vedere che la resistenza al taglio delle interfacce GT/T-GM in condizioni bagnate supera la resistenza in condizioni asciutte a partire da un certo valore di sollecitazione normale (qui circa 50 kPa). Questo indica che l'acqua nelle interfacce GT/T-GM può funzionare da anti-lubrificante per alti valori di sollecitazione normale (≥ 50 kPa). Una possibile alternativa consiste nel fatto che l'acqua assorbita dalle fibre di geotessuto può rendere le fibre più flessibili e più capaci di afferrare la superficie della geomembrana ruvida all'aumentare della sollecitazione normale.

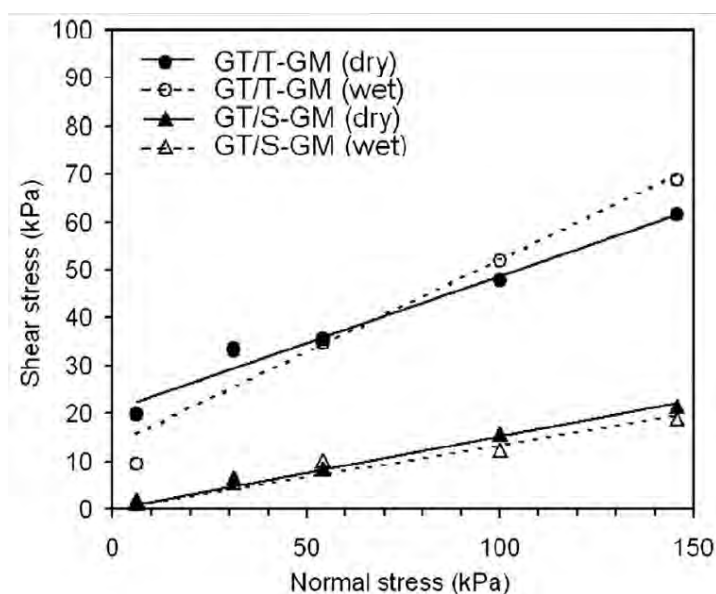


Fig. 7.9. Involuppi di rottura per la resistenza al taglio di picco. (Seo et al., 2007)

La riduzione di resistenza post-picco (Fig. 7.8) è predominante nelle interfacce di molti sistemi di contenimento di rifiuti composti da materiali geosintetici. In modo da identificare l'entità della riduzione di resistenza al taglio si può considerare per ogni interfaccia il "rapporto di resistenza", cioè il rapporto tra la resistenza residua e quella di picco. È noto che la riduzione di resistenza all'aumentare dello spostamento è dovuta alla lucidatura dei geosintetici, alla rottura dei geosintetici e all'orientamento delle particelle di terreno per le interfacce geotessuto – terreno. In Fig. 7.10 è rappresentato l'andamento del rapporto di resistenza in funzione del valore di sollecitazione normale. Inoltre in tabella 7.1 sono riportati i valori medi dei rapporti di resistenza.

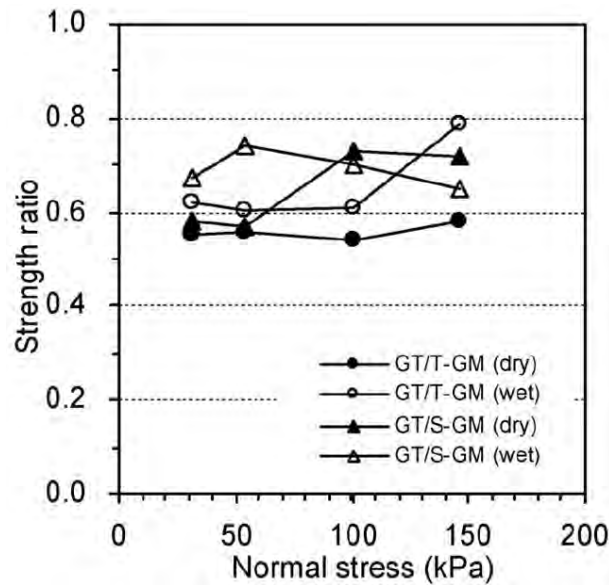


Fig. 7.10. Rapporti di resistenza: residual strength / peak strength. (Seo et al._2007)

Interface	State of interface	Strength ratio (residual/peak)
GT/S-GM	Dry	0.65
	Wet	0.69
GT/T-GM	Dry	0.56
	Wet	0.65

Tab. 7.1. Valori medi dei rapporti di resistenza. (Seo et al._2007)

Anche se le interfacce GT/T-GM mostrano una maggiore riduzione di resistenza rispetto alle interfacce GT/S-GM, non è stata trovata alcuna chiara relazione tra il valore di sollecitazione normale e la riduzione di resistenza al taglio e non è stato notato alcun effetto consistente dell'umidità sulla riduzione di resistenza. Per le interfacce GT/T-GM la riduzione di resistenza per uno spostamento di 80 mm risulta inoltre piuttosto mitigata dalla presenza di acqua nell'interfaccia.

L'analisi dell'influenza del livello di sollecitazione normale sul comportamento di attrito per le interfacce di geosintetici studiate da Seo et al. (2007), già trattata nel Cap.

7.2, ha mostrato come l'angolo di attrito "peak secant friction angle" si riduce in presenza di acqua su qualsiasi interfaccia, eccetto per le interfacce geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto (GT/T-GM) (Fig. 7.3).

7.3.2.1. Confronto con ulteriori studi

Yegian & Lahlaf (1992) hanno condotto test statici e dinamici (20.3 cm x 30.5 cm) per valutare la resistenza al taglio di interfaccia tra geotessuti e geomembrane lisce (GT/S-GM) in condizioni asciutte e in condizioni bagnate. Gli angoli di attrito determinati in condizioni bagnate sono risultati consistentemente inferiori di circa $1\div 2^\circ$ rispetto ai risultati ottenuti in condizioni asciutte, coerentemente con i risultati ottenuti da Seo et al. (2007). Il coefficiente di attrito dinamico di picco in condizioni bagnate è risultato leggermente inferiore di 0.6° rispetto a quello in condizioni asciutte.

Ellithy & Gabr (2001) hanno esaminato l'effetto della presenza di acqua sulla resistenza al taglio di interfaccia per le interfacce geotessuto – geomembrana ruvida (GT/T-GM). Essi hanno svolto una serie di test di taglio diretto per un intervallo di carico normale compreso tra 25 kPa e 500 kPa e hanno trovato che in condizioni bagnate l'adesione intercetta diminuisce mentre l'angolo di attrito aumenta. Questa variazione coincide molto bene con i risultati ottenuti da Seo et al. (2007). Ellithy & Gabr hanno affermato che sia l'adesione intercetta che l'angolo di attrito sono affetti dalla presenza di acqua nell'interfaccia e che la resistenza al taglio di interfaccia aumenta di circa il 73% se si bagna l'interfaccia soggetta ad un carico normale di 250 kPa. Tuttavia, la resistenza al taglio di interfaccia potrebbe diminuire per bassi valori di sollecitazione normale a causa della riduzione dell'adesione intercetta. Ellithy & Gabr hanno ipotizzato che la presenza di acqua nell'interfaccia tra geosintetici comporta un cambio di comportamento da lubrificante ad anti-lubrificante all'aumentare della sollecitazione normale. Comunque, sono richiesti ulteriori test per spiegare il meccanismo di questo effetto in maggior dettaglio.

Briançon et al. (2002), come già visto nel Cap. 7.3.1, hanno effettuato una serie di test con il piano inclinato, noto per essere più appropriato nei casi di bassi valori di

sollecitazione normale, per analizzare l'influenza dell'acqua sui sistemi di rivestimento in materiali geosintetici.

Anche Girard et al. (1990) hanno svolto delle prove con il piano inclinato (1.0 m x 1.0 m) per misurare l'angolo di attrito di interfaccia tra geomembrane in PVC e geotessuti non tessuti. Essi hanno osservato che la presenza di acqua riduce l'angolo di attrito di 2.5° nel caso di interfacce con geomembrane lisce e di 5.0° nel caso di interfacce con geomembrane ruvide. La riduzione dell'angolo di attrito nel caso di interfacce con geomembrane ruvide è coerente con i risultati ottenuti da Seo et al. (2007) per bassi valori di sollecitazione normale.

7.5. ALTERAZIONE DELL'ATTRITO IN SEGUITO A SCORRIMENTI SUCCESSIVI

In questo capitolo, con lo scopo di mostrare come le caratteristiche di attrito di una interfaccia di geosintetici non risultino costanti in seguito a scorrimenti successivi, vengono presentati i risultati degli studi condotti da G. Stoltz & N. Vidal (2013) e da Reyes Ramirez & Gourc (2003).

7.5.1. Risultati dell'analisi di G. Stoltz & N. Vidal

Per vedere come le caratteristiche di attrito di una interfaccia varino con l'accumularsi di scorrimenti relativi tra i geosintetici G. Stoltz & N. Vidal (2013) hanno focalizzato la loro analisi su due diverse interfacce di geosintetici: GTX-W/GMB-S e GTP/GMB-S. Lo studio del comportamento di attrito di queste interfacce è stato condotto da Stolz e Vidal con un piano inclinato, seguendo la "Variante della Force Procedure" descritta nel capitolo 5.5. Entrambe le interfacce studiate sono caratterizzate dalla presenza di una geomembrana in polietilene ad alta densità, con spuntoni spessi 1 mm sulla faccia superiore. Il geotessuto GTX-W viene comunemente utilizzato nelle applicazioni di rinforzo del terreno, mentre il geocomposito GTP viene utilizzato per la filtrazione e il drenaggio ed è composto da un geotessuto non tessuto termosaldato legato con delle cuciture ad una struttura tridimensionale permeabile fatta di mono filamenti polimerici. I

test sono stati svolti fissando la geomembrana sul piano inclinato e sovrapponendogli il geotessuto (o il geocomposito) fissato sulla scatola superiore.

Un'ulteriore strumento di indagine che è stato utilizzato per analizzare il comportamento di attrito in seguito a scorrimenti successivi consiste nell'utilizzo di un microscopio elettronico per osservare la struttura della superficie della geomembrana.

Per ogni interfaccia sono stati testati due campioni vergini, annotati con i simboli A e B. per ciascuno dei due campioni si è svolto un test con il campione di geosintetico vergine (test A-1 e B-1). In seguito a questi primi test il piano inclinato è stato riposto nella sua posizione iniziale e quindi sono stati svolti i test A-2 e B-2. Analogamente sono stati svolti i test A-3 e B-3. Al termine di questi ultimi test è stato tolto il terreno contenuto nella scatola superiore e la scatola superiore è stata riportata nella sua posizione iniziale. Dopo il terreno è stato rimesso nella scatola ed è stata condotta una nuova sequenza di test (A'-4, A'-5, A'-6 e B'-4, B'-5, B'-6), in modo analogo alla precedente (Tab. 7.2). La simbologia "primo" (A') sta ad indicare che l'interfaccia è stata scaricata una volta (tensione normale $\sigma = 0$), la simbologia "secondo" (A'') indica che l'interfaccia è stata scaricata due volte e così via in successione crescente. La successione dei test svolti è riassunta nella tabella 7.2 riportata di seguito:

CAMPIONI TESTATI	
A	B
A-1	B-1
A-2	B-2
A-3	B-3
A'-4	B'-4
A'-5	B'-5
A'-6	B'-6
A''-7	B''-7
A''-8	B''-8
A''-9	B''-9
A'''-10	B'''-10
A'''-11	B'''-11
A'''-12	B'''-12

Tab. 7.2. Ordine di svolgimento dei test per lo studio dell'alterazione dell'attrito in seguito a scorrimenti successivi.

In Fig.7.11 sono riportati i risultati di una successione di test svolti con l'interfaccia GTX-W/GMB-S (campione B).

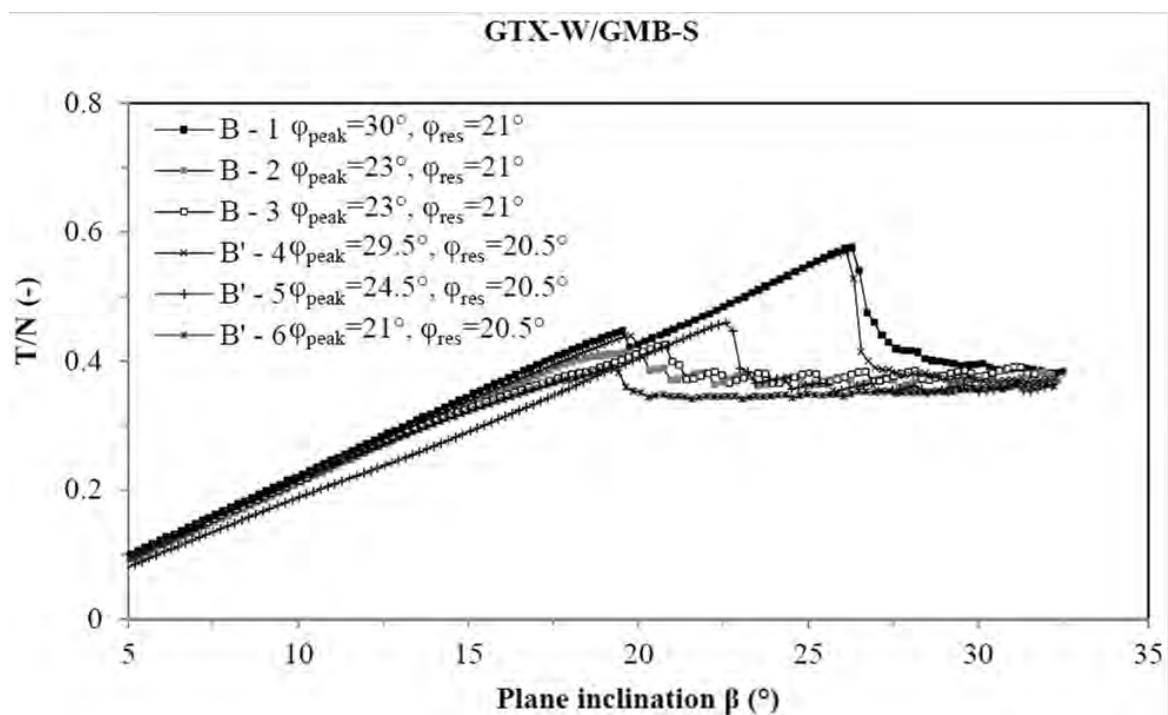


Fig. 7.11. Risultati dei test di attrito svolti in successione sull'interfaccia GTX-W/GMB-S. (Stoltz & Vidal_2013)

Si nota come il primo test B-1 con il campione vergine presenta un valore dell'angolo di attrito φ_{peak} maggiore rispetto ai valori trovati con i seguenti test B-2 e B-3. Dopo lo scarico del campione B, il test B-4 mostra che il valore di φ_{peak} è vicino al valore trovato con il test B-1. Questo sta ad indicare che il campione B non si è alterato durante i successivi test B-1, B-2 e B-3. I test seguenti B-5 e B-6 mostrano che φ_{peak} è diminuito della stessa quantità dei test B-2 e B-3. Questo dimostra che l'angolo φ_{peak} non è un valore intrinseco e dipende dalla storia dello scorrimento dell'interfaccia. Per quanto riguarda l'angolo φ_{res} , il suo valore è lo stesso per qualunque test svolto, il che conferma che l'interfaccia B non è alterata dalla successione dei test e quindi in seguito a scorrimenti successivi. L'osservazione della struttura della superficie della geomembrana

con l'aiuto di un microscopio elettronico non ha rivelato alcuna alterazione. Questo spiega il motivo per cui l'angolo di attrito residuo resta costante anche in seguito a ripetuti scorrimenti.

In Fig. 7.12, invece, sono riportati i risultati dei test svolti con l'interfaccia GTP/GMB-S (campione A). Il grafico mostra come la successione dei test svolti ha portato ad un incremento di entrambi gli angoli ϕ_{peak} e ϕ_{res} .

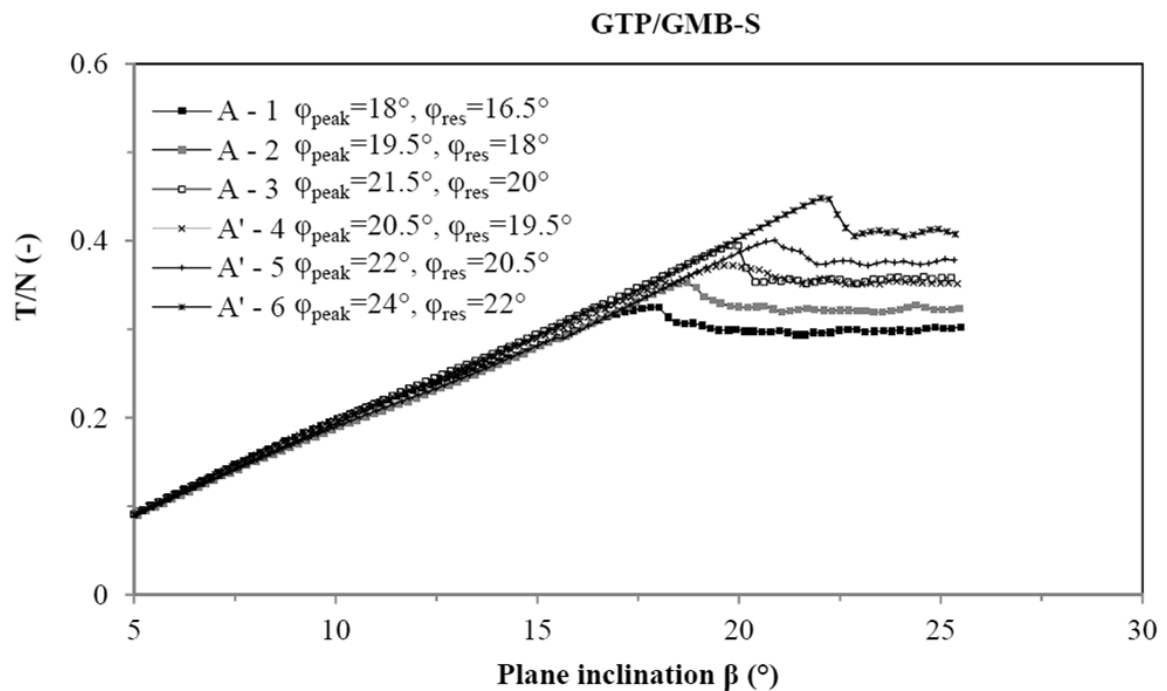


Fig. 7.12. Risultati dei test di attrito svolti in successione sull'interfaccia GTP/GMB-S. (Stoltz & Vidal_2013)

Per analizzare meglio l'evoluzione dell'angolo di attrito di picco e dell'angolo di attrito residuo in funzione del numero di scorrimenti che i campioni hanno subito, questi due valori sono stati riportati in Fig. 7.13 e 7.14. Riguardo all'interfaccia GTX-W/GMB-S, la Fig. 7.13a mostra che l'angolo ϕ_{peak} diminuisce con il succedersi degli scorrimenti fino ad un valore vicino a ϕ_{res} . Tuttavia, ϕ_{peak} aumenta di nuovo quando i campioni vengono scaricati. La Fig. 7.13b mostra che l'angolo ϕ_{res} rimane costante indipendentemente dal numero degli scorrimenti, il che mostra come le caratteristiche di attrito residuo di questa interfaccia non dipendono dalla storia dello scorrimento.

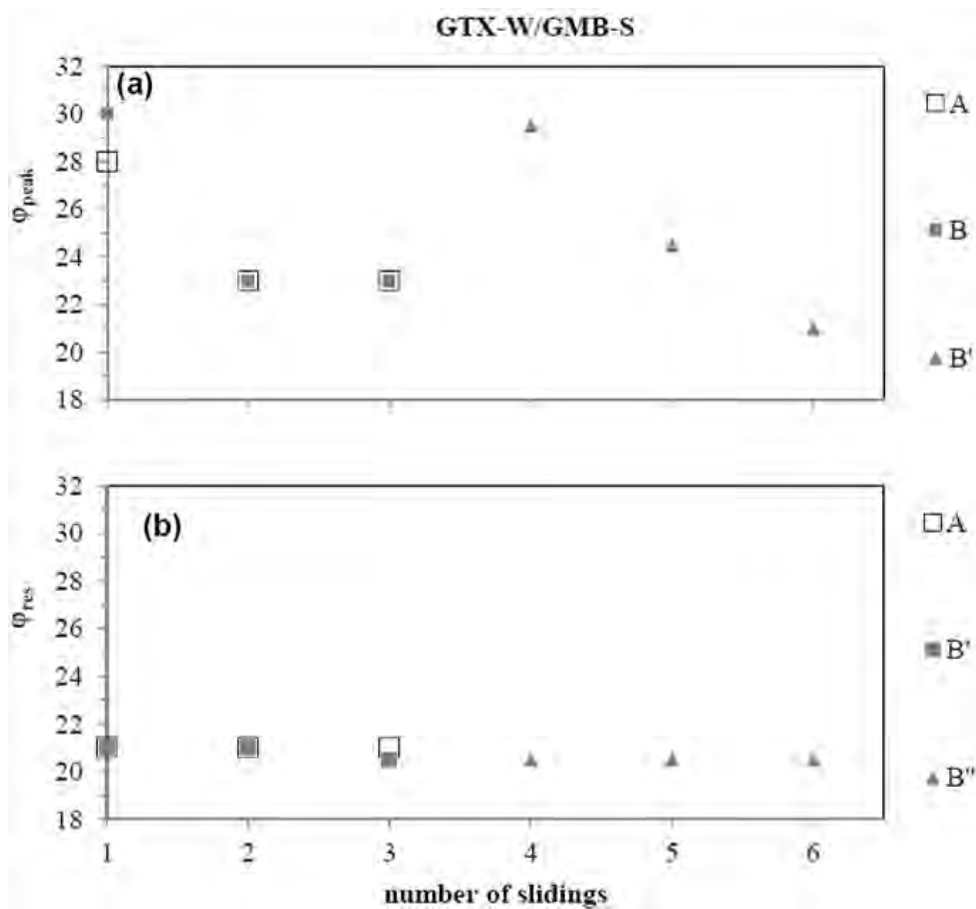


Fig. 7.13. Angoli di attrito di picco **(a)** e angoli di attrito residuo **(b)** ottenuti dai test svolti in successione sull'interfaccia GTX-W/GMB-S. (Stoltz & Vidal_2013)

Riguardo all'interfaccia GTP/GMB-S, le Fig. 7.14a e 7.14b mostrano che gli angoli di attrito ϕ_{peak} e ϕ_{res} aumentano in seguito a scorrimenti successivi. Quando i campioni vengono scaricati, ϕ_{peak} e ϕ_{res} diminuiscono ma non recuperano il loro valore iniziale misurato con il primo test. Dopo il sesto test, ϕ_{peak} e ϕ_{res} hanno raggiunto un valore massimo che non aumenta più con i successivi test. In conclusione, si è visto che i due angoli ϕ_{peak} e ϕ_{res} aumentano del 25% quando l'interfaccia è soggetta a scorrimenti successivi. Per comprendere meglio la ragione di questa alterazione delle caratteristiche di attrito, sono stati osservati gli spuntoni della geomembrana con un telescopio elettronico prima e dopo lo svolgimento dei test (Fig. 7.15). L'osservazione degli spuntoni ha mostrato una notevole alterazione dovuta allo scorrimento, che spiega l'incremento delle proprietà di attrito.

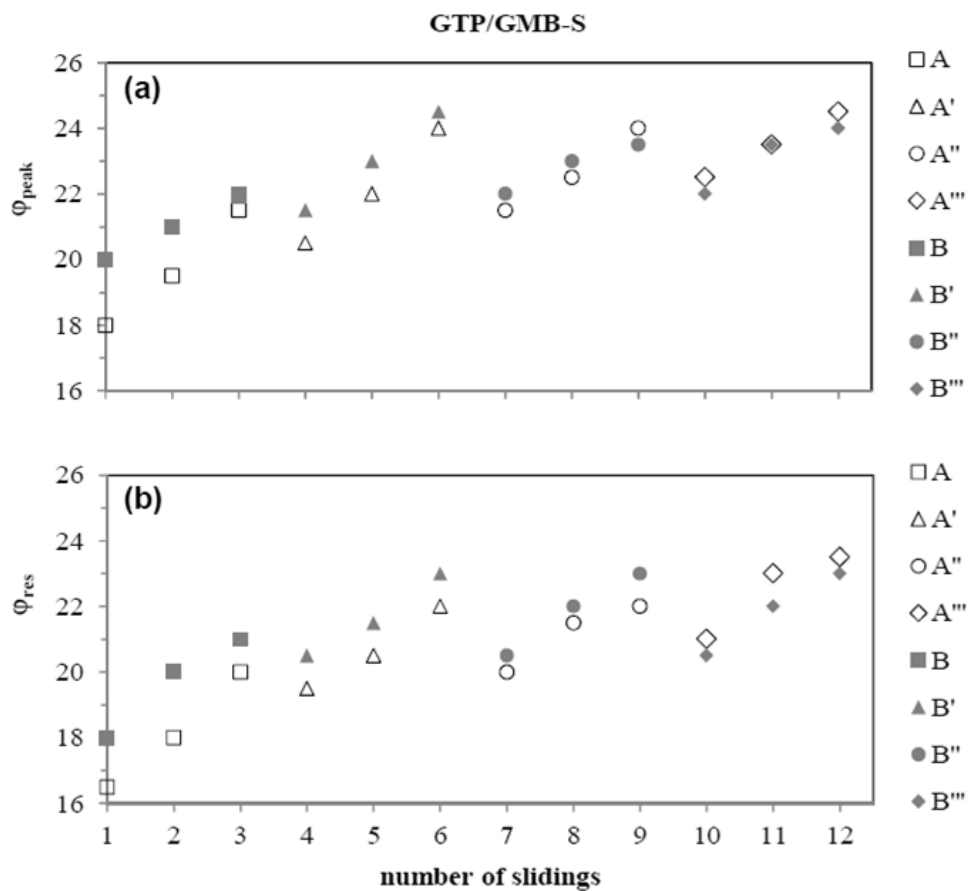


Fig. 7.14. Angoli di attrito di picco **(a)** e angoli di attrito residuo **(b)** ottenuti dai test svolti in successione sull'interfaccia GTP/GMB-S. (Stoltz & Vidal_2013)

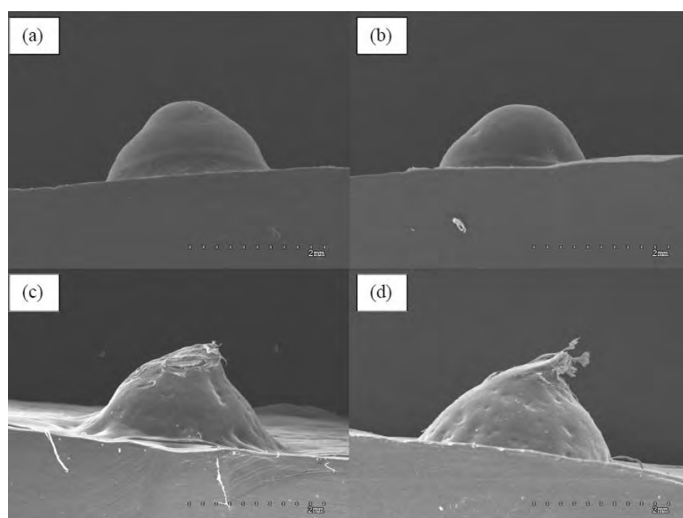


Fig. 7.15. Immagini al telescopio elettronico degli spuntori del campione di geomembrana vergine **(a)** e **(b)** e degli spuntori alterati **(c)** e **(d)** dopo il test A'''-6 sull'interfaccia GTP/GMB-S. (Stoltz & Vidal_2013)

Dall'osservazione dei risultati dei test svolti da Stoltz & N. Vidal si è visto che le proprietà di attrito dell' interfaccia GTX-W/GMB-S non si alterano in seguito a scorrimenti successivi, mentre quelle dell'interfaccia GTP/GMB-S aumentano con il succedersi degli scorrimenti.

Nel caso di sistemi di geosintetici su pendii, l'alterazione delle caratteristiche di attrito può causare:

- una possibile rottura del sistema, nel caso di una diminuzione delle caratteristiche di attrito;
- un aumento dello sforzo di taglio nella geomembrana, nel caso di un incremento delle caratteristiche di attrito.

In sito, durante le operazioni di posa dei geosintetici e degli strati di terreno di copertura, possono verificarsi piccoli spostamenti che possono alterare le proprietà di attrito delle interfacce di geosintetici. Così, quando si studiano le proprietà di attrito dei geosintetici, risulta utile svolgere una successione di test con lo stesso campione per determinare le possibili alterazioni di queste proprietà.

7.5.2. Risultati dell'analisi di Reyes Ramirez & Gourc

Reyes Ramirez & Gourc (2003), nell'ambito del loro studio sull'utilizzo del Piano Inclinato per la misurazione dell'attrito di interfaccia tra geosintetici, hanno esaminato l'alterazione dell'attrito in seguito a scorrimenti successivi nel caso specifico di due interfacce di geosintetici:

- GMhdpe – GS: interfaccia composta da una geomembrana in polietilene ad alta densità e da una geogriglia sempre in polietilene ad alta densità;
- GMpp – GS: interfaccia composta da una geomembrana in polipropilene e da una geogriglia in polietilene ad alta densità.

Per analizzare questo aspetto Ramirez e Gourc hanno svolto una successione di cinque prove con il Piano Inclinato utilizzando per ogni prova lo stesso campione di geosintetici. Per ciascuna delle cinque prove svolte con lo stesso campione (IV), la piastra superiore è

stata posta all'inizio della prova in sommità al piano inclinato (posizione (a), Fig. 7.16), in condizioni di moto di scorrimento, ed è stata fermata in seguito ad uno scorrimento totale di 500 mm. Lo spostamento tangenziale registrato durante una prova (δ) è stato denotato per differenziarlo dallo spostamento tangenziale totale subito dal campione (Δ) durante tutta la serie di prove (con Δ_0 = spostamento accumulato all'inizio della prova e Δ_f = spostamento accumulato alla fine della prova).

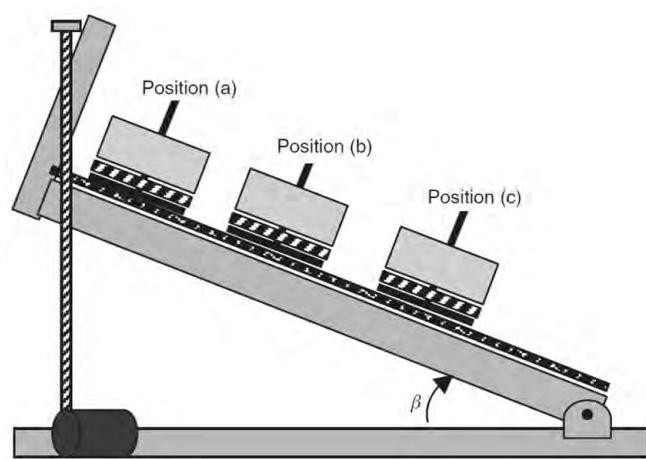


Fig. 7.16. Posizioni iniziali differenti della piastra superiore sul piano inclinato. (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

Con l'interfaccia GMhdpe – GS (Fig. 7.17) si può osservare un leggero incremento dell'angolo di attrito θ da un test all'altro e quindi in funzione dello spostamento accumulato Δ . Questo incremento risulta più significativo nelle prime tre prove, mentre diventa meno pronunciato nelle ultime due.

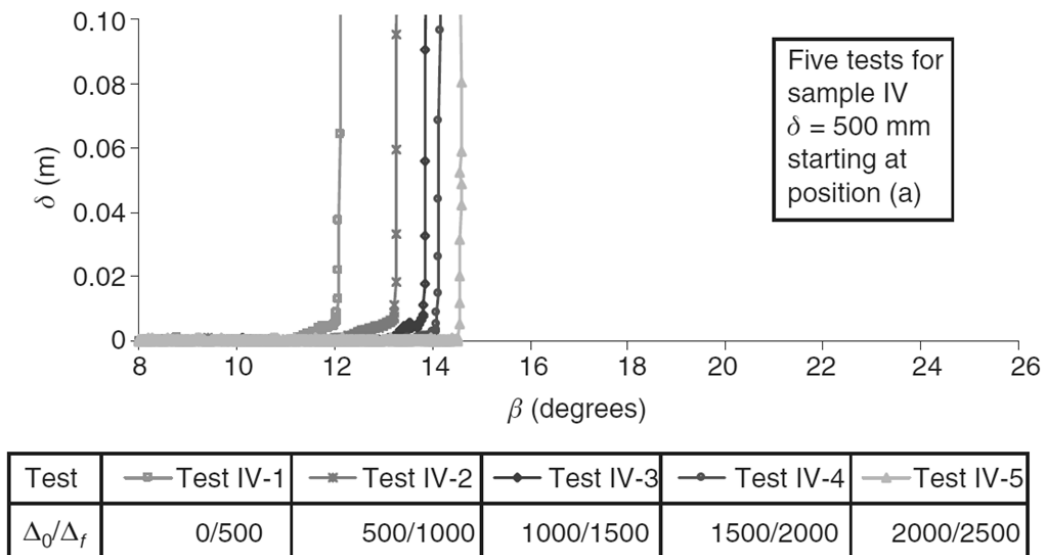


Fig. 7.17. Test di abrasione di una interfaccia GMhdpe – GS: cinque test successivi con il piano inclinato con lo stesso campione ($\delta = 500$ mm). (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

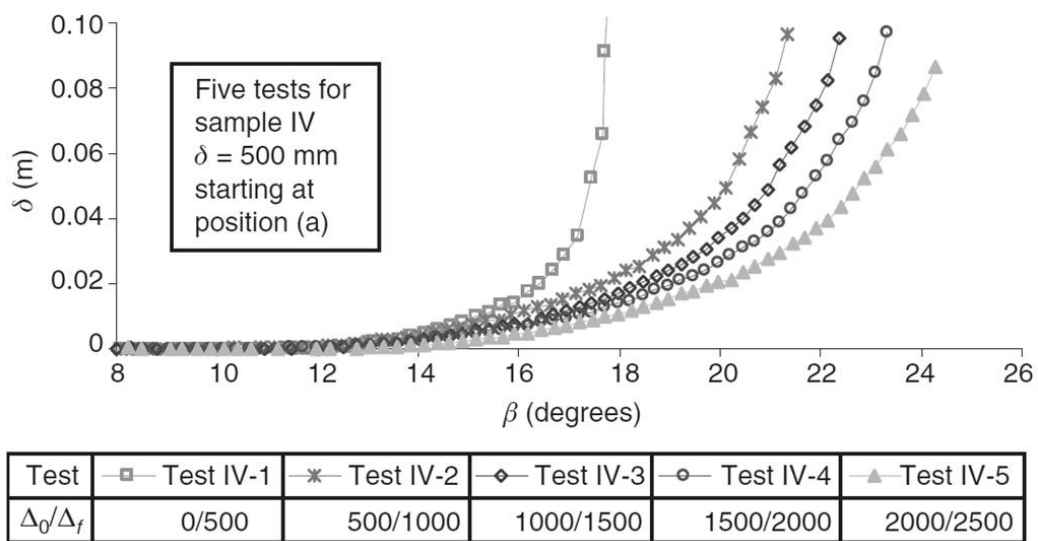


Fig. 7.18. Test di abrasione di una interfaccia GMpp – GS: cinque test successivi con il piano inclinato con lo stesso campione ($\delta = 500$ mm). (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

Con l'interfaccia GMpp – GS (Fig. 7.18), invece, lo spostamento tangenziale Δ accumulato esercita una notevole influenza sul comportamento di attrito: la geomembrana GMpp è dunque molto più soggetta ad abrasione, una scoperta pienamente compatibile con le osservazioni al microscopio delle superfici delle geomembrane prima e dopo gli spostamenti $\Delta = 0$ e $\Delta = 50$ mm (Fig. 7.19). L'inclinazione β corrispondente all'inizio

dello scorrimento per l'interfaccia GMpp – GS è praticamente la stessa in tutte le prove, nonostante che il rapporto $d\delta/d\beta$ non raggiunga mai l'infinito, anche per uno spostamento di 50 mm a partire dal secondo test. Pertanto, non è più possibile definire l'angolo di attrito ϕ sotto le condizioni dettate dalla normativa.

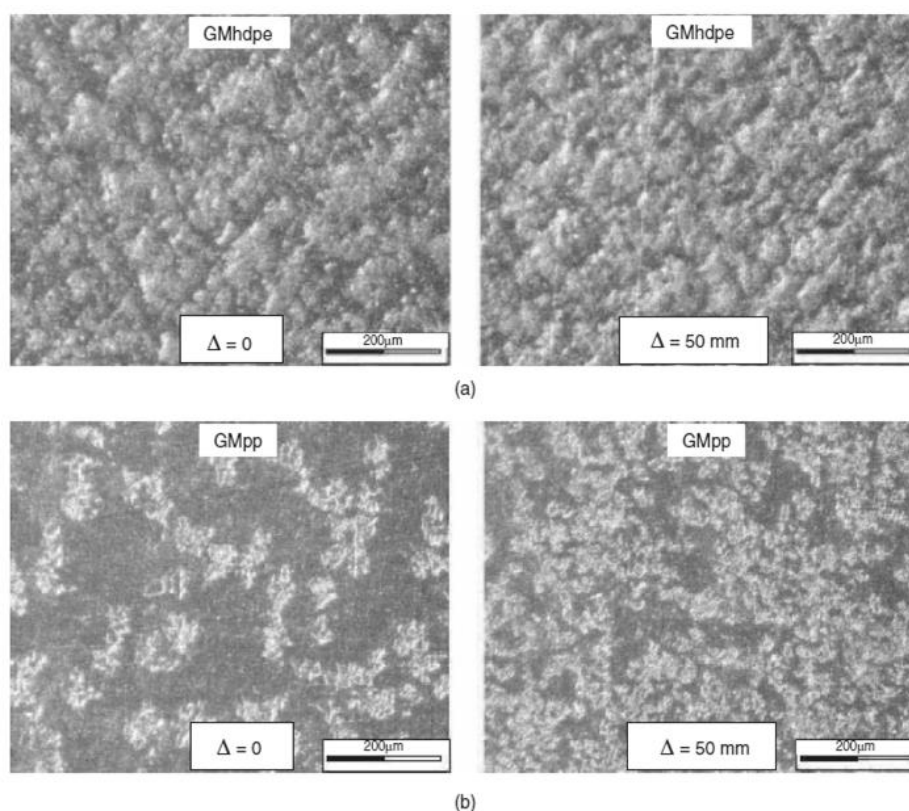


Fig. 7.19. Test di abrasione. Alterazione delle superfici delle geomembrane GMhdpe (a) e GMpp (b) in seguito ad uno scorrimento (Δ) lungo la superficie di una geogriglia. (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

La stessa procedura appena descritta è stata impiegata successivamente, seppur limitando lo scorrimento a 50 mm (che corrispondono al valore dell'angolo di attrito previsto dalla normativa) invece di 500 mm, a ciascuna prova. Riconoscendo che la posizione iniziale sul piano inclinato non esercita alcuna influenza sui risultati dei test, essi sono stati svolti partendo dalle successive posizioni a, b e c (Fig. 7.16); lo spostamento accumulato iniziale Δ_0 e quello finale Δ_f sono riportati in Fig. 7.20 e 7.21.

Se si confrontano i risultati ottenuti con i test di abrasione (Fig. 7.20 e 7.21) con quelli ottenuti con tre “standard test” (Fig. 7.22 e 7.23), svolti secondo le indicazioni della

Normativa Europea ($\delta = 50$ mm) su tre diversi campioni di interfacce GMhdpe – GS e GMpp – GS, si nota che la variazione dell'angolo di attrito θ in funzione dello scorrimento iniziale Δ_0 è dello stesso ordine di grandezza della variazione osservata durante lo svolgimento degli “standard test” a causa della eterogeneità dei campioni.

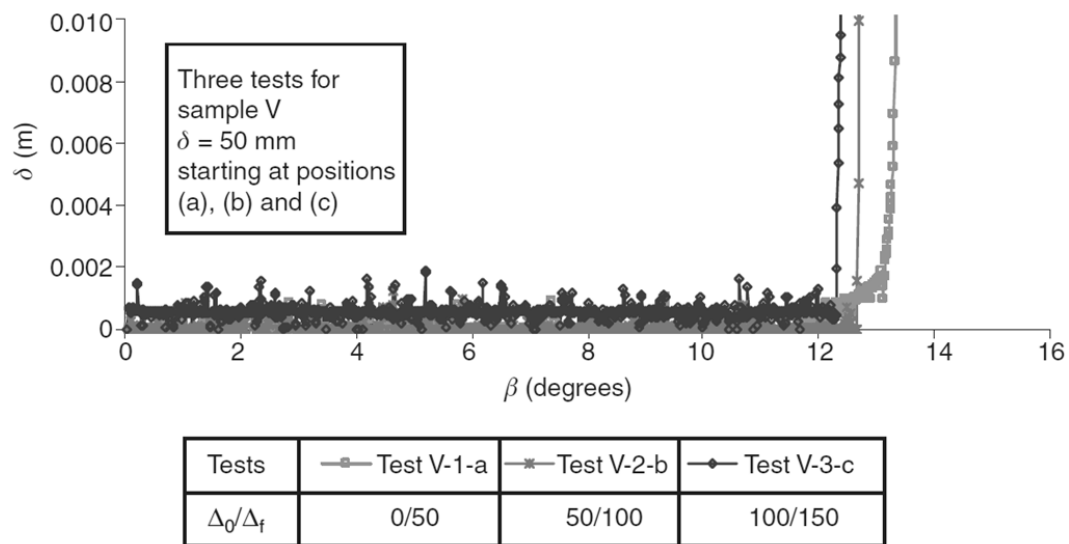


Fig. 7.20. Test di abrasione di una interfaccia GMhdpe – GS: tre test successivi con il piano inclinato con lo stesso campione ($\delta = 50$ mm). (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

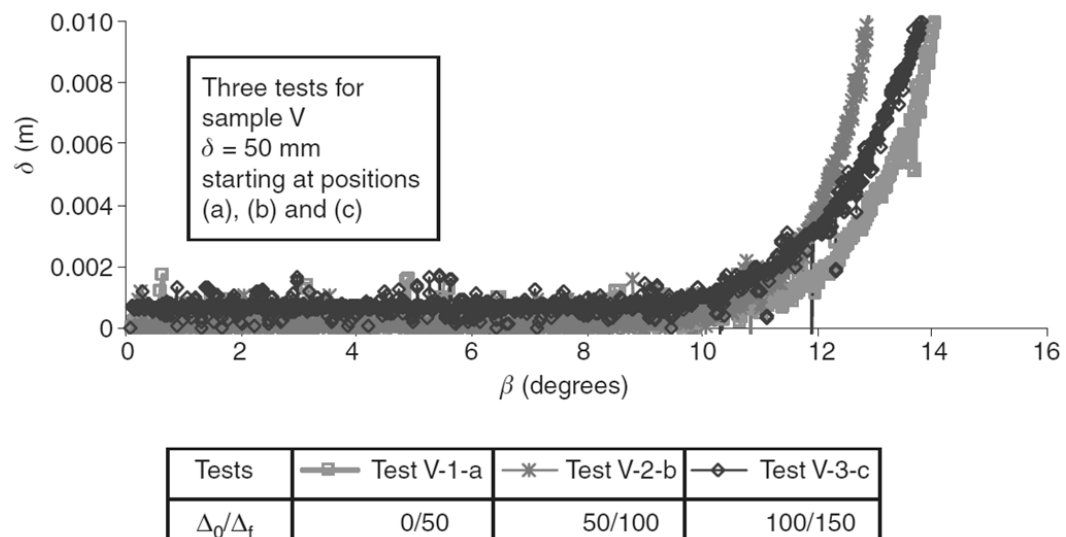


Fig. 7.21. Test di abrasione di una interfaccia GMpp – GS: tre test successivi con il piano inclinato con lo stesso campione ($\delta = 50$ mm). (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

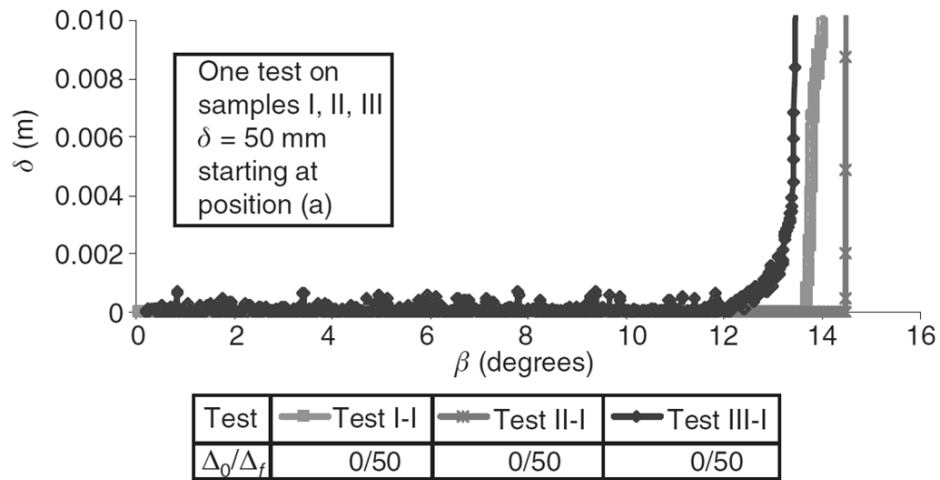


Fig. 7.22. Test con il piano inclinato per tre diversi campioni di interfacce GMhdpe – GS, svolti secondo le indicazioni della normativa ($\delta = 50$ mm). (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

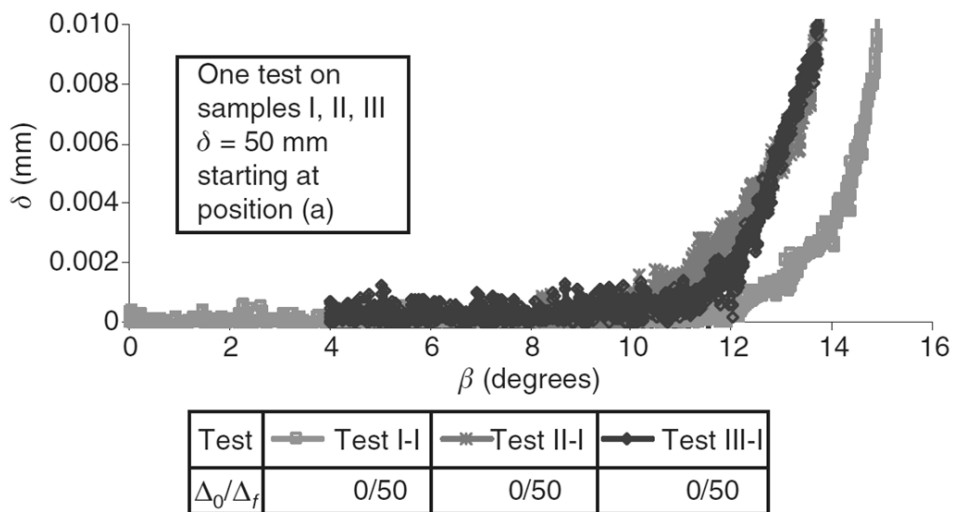


Fig. 7.23. Test con il piano inclinato per tre diversi campioni di interfacce GMpp – GS, svolti secondo le indicazioni della normativa ($\delta = 50$ mm). (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

Il confronto degli “standard test” (Fig. 7.22 e 7.23) con i test di abrasione per scorrimenti estesi (Fig. 7.21 e 7.22) mostra che un campione che è stato sottoposto ad uno scorrimento Δ_0 inferiore o uguale a 100 mm non mostra alcuna significativa variazione di comportamento in confronto alle prove standard e questo è vero per entrambe le interfacce GMhdpe – GS e GMpp – GS. D’altra parte, è stato dimostrato in precedenza

che uno scorrimento $\Delta_0 \geq 500$ mm influenza pesantemente il comportamento di attrito dell'interfaccia GMpp – GS.

Dunque, si dovrebbe considerare la possibilità di una variazione dell'angolo di attrito di interfaccia in seguito a scorrimenti successivi, dato che tale variazione potrebbe corrispondere alle attuali condizioni in sito: i geosintetici vengono spesso disposti su un pendio senza prima essere stesi, oppure la dilatazione termica può generare una deformazione della geomembrana con una sorta di ondulazione. In questi casi, la posa di uno strato di terreno di copertura sul pendio induce degli spostamenti relativi all'interfaccia geosintetico – geosintetico che superano facilmente i 500 mm per punti lontani dall'ancoraggio in sommità del pendio. La potenziale alterazione dell'angolo di attrito di interfaccia si traduce nella necessità di considerare gli effetti dell'abrasione.

7.6. INFLENZA DELLA TEMPERATURA

Le prove per determinare l'attrito delle interfacce tra geosintetici vengono normalmente svolte in laboratorio ad una temperatura di circa 20 °C. Tuttavia, in campo le temperature possono variare considerevolmente. Per esempio, la temperatura nello strato di copertura di una discarica situata nel centro dello Stato di Washington (USA) può variare, a seconda delle stagioni, da 1 a 33 °C. Ma temperature più alte possono presentarsi in altre zone come la California, dove si superano spesso i 40 °C. Le temperature nei sistemi di copertura può inoltre differire da quella in laboratorio a causa degli effetti di isolamento dei rifiuti o delle reazioni isoterme di degradazione dei rifiuti.

È noto che le proprietà dei polimeri sono sensibili alla temperatura. In genere, un incremento della temperatura comporta un incremento del coefficiente di attrito (Bely et al._1982; Daniels_1989), una diminuzione del modulo (Bundiman_1994); Lord et al._1995), e una riduzione nel tempo di rilassamento (Osswald & Menges_1995). Tuttavia, gli effetti della temperatura sulla resistenza di interfaccia dei geosintetici non è ben documentata.

Di seguito, con lo scopo di illustrare l'influenza della temperatura sulla resistenza al taglio delle interfacce tra geosintetici, sono illustrati i risultati delle prove svolte da M. V.

Akpinar & C. H. Benson (2005) e l'apparecchiatura da loro utilizzata. Nell'ambito del loro studio Akpinar & Benson hanno analizzato le due seguenti tipologie di interfacce:

- GMS – GT: interfaccia composta da una geomembrana liscia in HDPE e da un geotessuto non tessuto agugliato in polipropilene.
- GMT – GT: interfaccia composta da una geomembrana ruvida in HDPE e da un geotessuto non tessuto agugliato in polipropilene.

L'analisi è stata svolta utilizzando un apparecchio di taglio a doppia interfaccia (“DISD = double-interface shear device”) racchiuso in una camera a temperatura costante. Le prove sono state svolte alle temperature di 0, 10, 21 e 33 °C per entrambe le tipologie di interfacce utilizzando le velocità di spostamento di 0.9, 1.1, e 1.5 mm/min e delle sollecitazioni normali variabili tra 7.5 kPa e 49.5 kPa. Questo intervallo di valori di sollecitazioni normali è stato scelto da Akpinar & Benson con lo scopo di ricoprire i valori comunemente riscontrati nei sistemi di copertura, dove le fluttuazioni di temperatura dovrebbero essere le più grandi.

7.6.1. Apparecchio di Taglio a doppia interfaccia (metterlo in un capitolo nella parte delle apparecchiature)

La scelta di utilizzare un dispositivo di taglio a doppia interfaccia è stata spinta dalla necessità di minimizzare gli effetti di attrito del macchinario, che possono essere influenzati dalla temperatura. In Fig. 7.24 è riportato uno schema dell'apparecchio utilizzato. Tutti gli spostamenti nel dispositivo si verificano sull'interfaccia testata. Così, al dispositivo stesso non viene conferita alcuna resistenza al taglio.

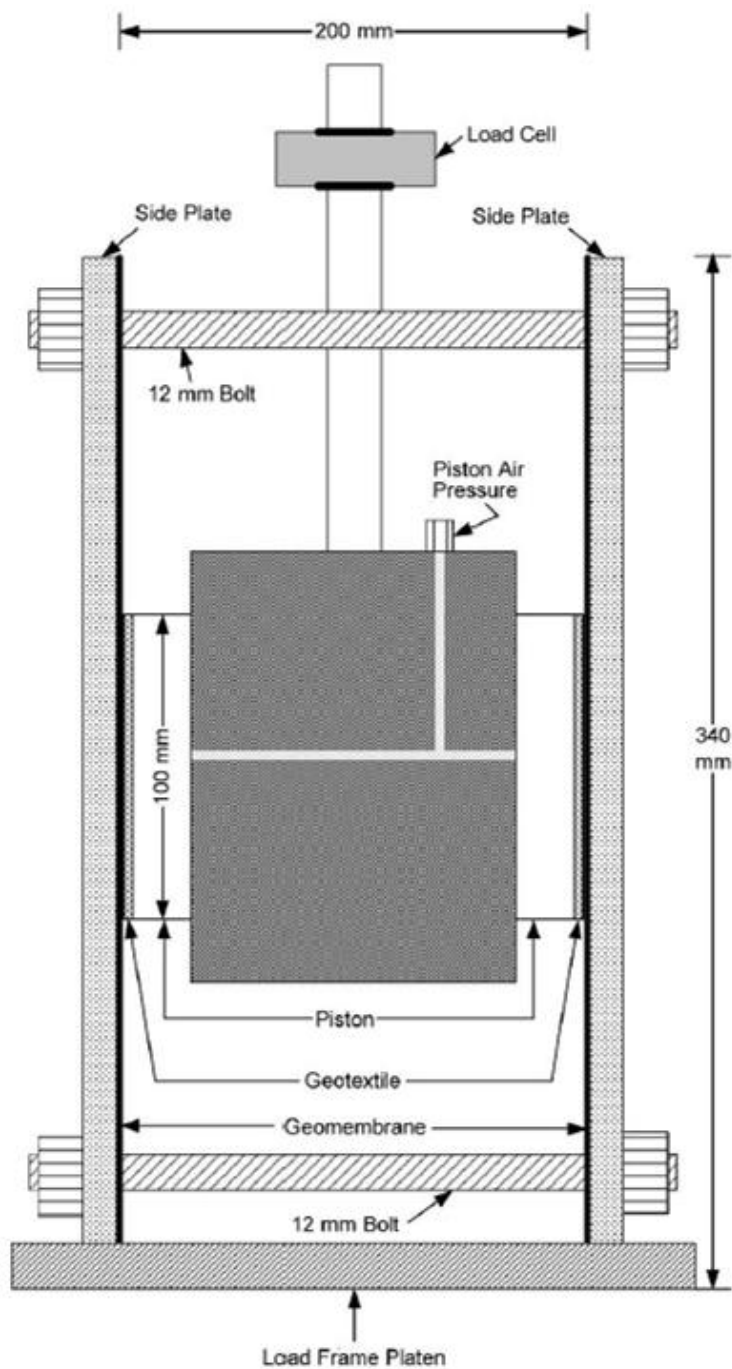


Fig. 7.24. Schema dell'Apparecchio di Taglio a doppia interfaccia. (Akpinar & Benson_2005)

Il dispositivo è composto da due pistoni interni (con una facciata quadrata 100 mm x 100 mm) e un telaio esterno composto da due lastre laterali rettangolari in alluminio di 25 mm di spessore fissate da due bulloni (Fig. 7.24). Vengono testate simultaneamente due identiche interfacce e la forza di taglio per l'interfaccia viene presa come metà della forza di taglio registrata dal dispositivo. Il geosintetico esterno (montato sulla piastra esterna) è

più lungo rispetto al geosintetico esterno (montato su una piastra di alluminio fissata sul pistone di carico) in modo che il taglio tra geosintetico e geosintetico si verifichi non appena si verifica lo spostamento. La forza normale è applicata alle interfacce tramite l'applicazione di aria compressa ai pistoni. I geosintetici sono tenuti fermi sulle piastre interna ed esterna con delle strisce di metallo e dei bulloni. In questo studio, come geosintetico interno è stato usato il geotessuto e come geosintetico esterno la geomembrana. I campioni di geotessuto hanno le stesse dimensioni delle facce dei pistoni interni (100 mm x 100 mm). I campioni di geomembrana sono lunghi 300 mm e larghi 180 mm, con la dimensione più lunga orientata nella direzione dell'apparecchio.

L'apparecchio di taglio a doppia interfaccia si inserisce in una pressa di carico standard utilizzata per le prove di taglio triassiale. Le piastre esterne poggiano sulla piastra di base della pressa e la parte interna è collegata alla barra trasversale sovrastante. La piastra di base è sollevata ad una velocità di spostamento costante per tagliare l'interfaccia. La velocità di taglio viene misurata con un trasduttore di spostamento induttivo (LVDT) e la forza di taglio viene misurata con una cella di carico. La forza di taglio viene corretta per tenere in considerazione il peso dell'apparato interno, incluso il pistone.

Una importante limitazione di questo apparecchio è che lo spostamento massimo raggiungibile è troppo piccolo per raggiungere il valore effettivo di resistenza residua. Lo spostamento massimo utilizzato in questo studio è di circa 25 mm.

7.6.2. Camera a temperatura costante

Affinché la temperatura che circonda l'apparecchio di taglio a doppia interfaccia risultasse costante durante le prove, Akpinar & Benson hanno realizzato una camera coibentata in acrilico trasparente. La camera (500 mm x 550 mm x 260 mm) racchiude completamente l'apparecchio di taglio a doppia interfaccia e si sposta con la piastra del telaio di carico durante lo svolgimento delle prove. L'intervallo di temperature raggiungibile all'interno della camera è compreso tra 0 °C e 35 °C. Tutti i sensori utilizzati per monitorare lo spostamento, il carico e la pressione sono montati all'esterno della camera affinché non subiscano alcuna influenza della temperatura.

Le temperature superiori alle condizioni ambientali vengono mantenute con delle lampade montate all'interno della camera, mentre le temperature più fredde vengono raggiunte grazie ad una circolazione di aria fredda. La precisione di regolazione della temperatura è di ± 0.1 °C. All'interno della camera quattro sono montati quattro ventilatori per garantire una distribuzione uniforme della temperatura. Dieci termocoppie distribuite nella camera e collegate ad un regolatore consentono il controllo della temperatura della camera. Prima dello svolgimento di qualsiasi prova, i campioni di geosintetico e la strumentazione di prova vengono lasciati all'interno della camera a temperatura di prova per 24 h.

I pistoni per l'applicazione del carico normale sono l'unica parte dell'apparecchio che può essere affetta dalla temperatura. Pertanto, è stato valutato l'effetto della temperatura sull'attrito dei pistoni mantenendo temperature costanti tra 0 °C e 50 °C, applicando diversi carichi con i pistoni e misurando la forza applicata utilizzando una cella di carico a temperatura di compensazione. Nessuna variazione della forza del pistone è stata registrata nell'intervallo di temperature utilizzato. Quindi, anche i pistoni possono essere considerati non influenzati dalla temperatura.

7.6.3. Risultati

I test sono stati svolti alle velocità di taglio di 0.9, 1.1 e 1.5 mm/min a ciascuna temperatura (0, 10, 21, 33 °C) per vedere se la sensibilità alla temperatura risente della velocità di taglio. In tutti i casi analizzati, la resistenza di interfaccia è risultata essere indipendente dalla velocità di taglio (risultato trovato anche da Stark et al._1996). I risultati tipici sono presentati in Fig. 7.25 per l'interfaccia geomembrana ruvida – geotessuto.

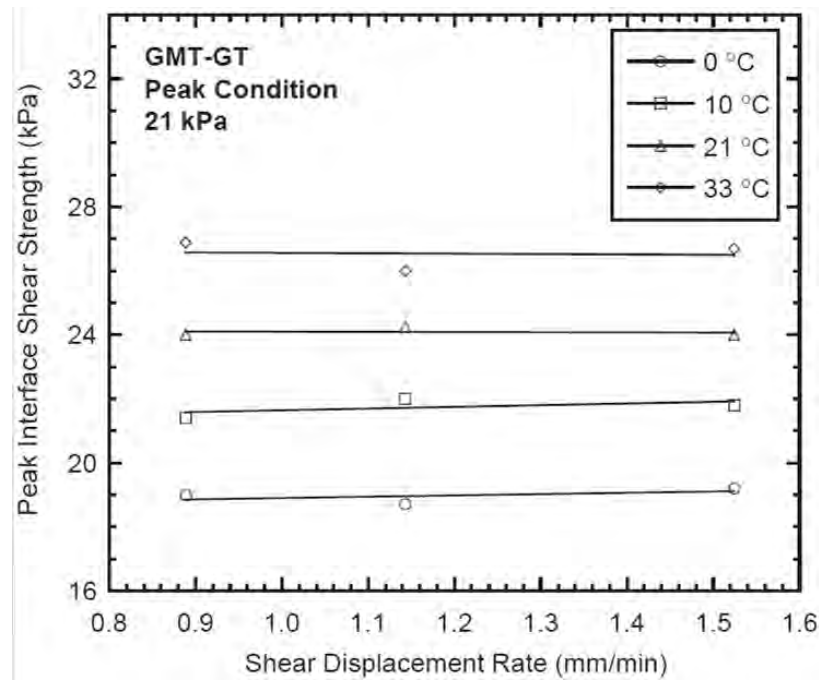


Fig. 7.25. Effetto della velocità di taglio sulla resistenza di picco dell'interfaccia GMT – GT con una sollecitazione normale di 21 kPa. (Akpinar & Benson_2005)

Come abbiamo già detto, lo spostamento massimo raggiungibile con questo macchinario (25 mm) è troppo piccolo per raggiungere il valore effettivo di resistenza residua. Infatti, la resistenza post-picco delle interfacce analizzate decresce continuamente fino al raggiungimento del massimo spostamento raggiungibile con il dispositivo in questione. Siccome al termine di una singola prova non è possibile ottenere un valore distinto di resistenza post-picco, per la presentazione dei risultati è stato considerato convenzionalmente come valore di resistenza post-picco il valore di resistenza di interfaccia corrispondente ad uno spostamento di 20 mm. Questo valore di resistenza convenzionalmente assunto non corrisponde al valore di resistenza di interfaccia residuo effettivo. Nel capitolo 2.4 è stato descritto come è possibile ottenere il valore di resistenza residuo con dispositivi di prova caratterizzati da una limitazione dello spostamento ottenibile.

Gli involucri di resistenza corrispondenti alle condizioni di picco e a quelle post-picco sono illustrati in Fig. 7.26 per le interfacce GMS – GT e GMT – GT. Mentre in Tab. 7.3 sono riportati i valori degli angoli di attrito. Nel caso dell'interfaccia GMS – GT l'angolo di attrito di picco varia tra 11.6° e 14.5° e l'angolo di attrito post-picco varia tra 9.8° e

12.0°, in funzione del valore della temperatura di prova. Nel caso invece dell'interfaccia GMT – GT l'angolo di attrito di picco varia tra 25.4° e 27.7° e l'angolo di attrito post-picco varia tra 24.8° e 27.4°.

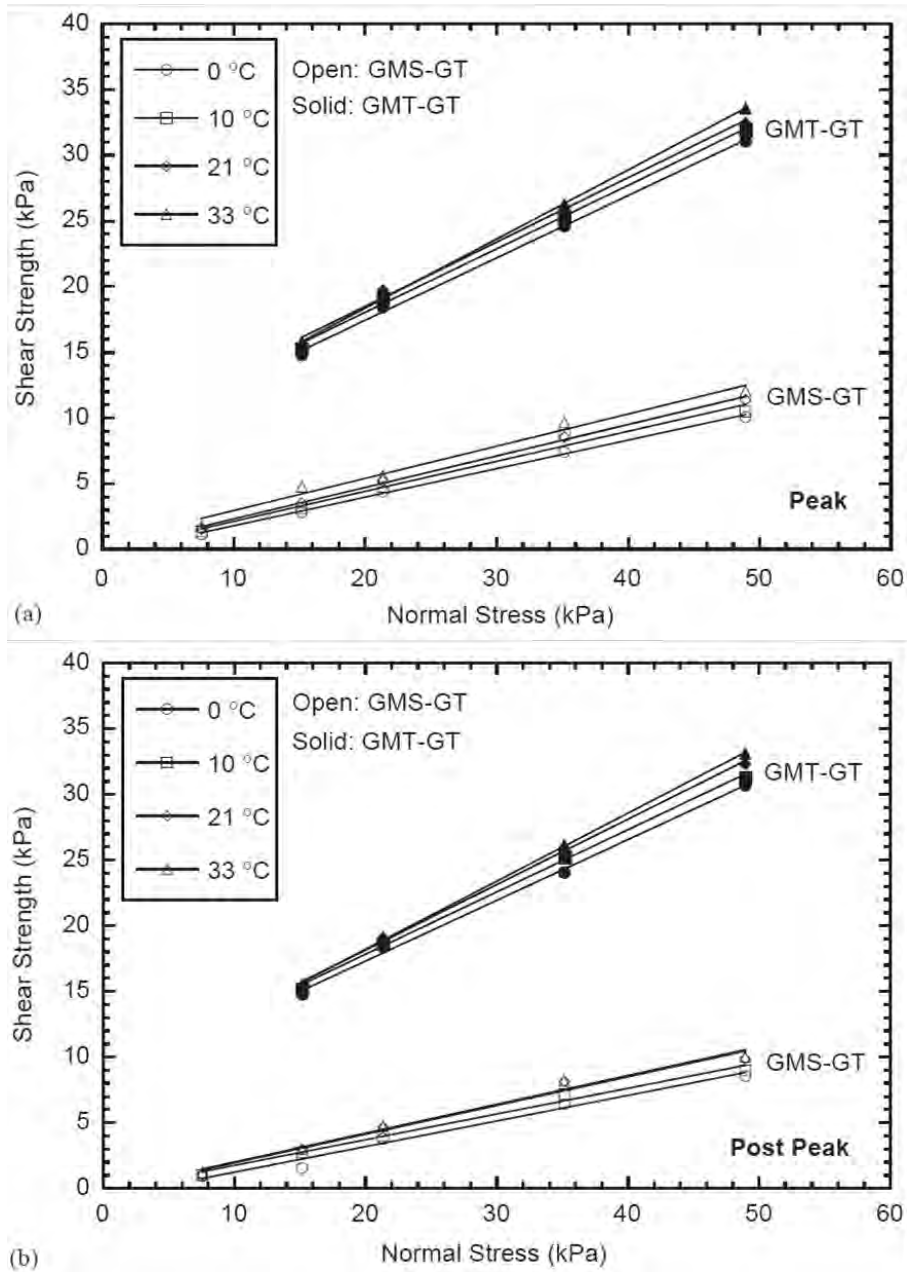


Fig. 7.26. Involuppi di resistenza a 0, 10, 21 e 33 °C per le interfacce GMT – GT e GMS – GT: (a) condizioni di picco; (b) condizioni post-picco. Velocità di taglio = 1.1 mm/min. (Akpınar & Benson_2005)

Friction angles for GMS–GT and GMT–GT interfaces at 0, 10, 21, and 33 °C

Temperature (°C)	Interface friction angle (degrees)			
	GMS–GT		GMT–GT	
	Peak	Post peak	Peak	Post peak
0	11.6 (0.998)	9.8 (0.998)	25.4 (0.998)	24.8 (0.998)
10	12.6 (0.982)	10.7 (0.998)	25.8 (0.008)	25.3 (0.998)
21	13.3 (0.997)	11.9 (0.996)	26.5 (0.996)	26.1 (0.998)
33	14.5 (0.982)	12.0 (1.000)	27.7 (1.000)	27.4 (1.000)

Coefficients of determination (R^2) shown in parentheses.

Tab. 7.3. Angoli di attrito delle interfacce GMS – GT e GMT – GT alle temperature di 0, 10, 20 e 33 °C.
(Akpınar & Benson_2005)

Nell'intervallo di temperature considerato si sono osservate solamente piccole variazioni nella resistenza di interfaccia. L'aumento di temperatura da 0 a 33 °C ha provocato un aumento dell'angolo di attrito di picco di 2.9° per l'interfaccia GMS – GT e di 2.3° per l'interfaccia GMT – GT, indipendentemente dalla velocità di spostamento. Variazioni simili sono state osservate per l'angolo di attrito post-picco.

Gli effetti della temperatura sono evidenti negli involuppi di resistenza mostrati in Fig. 7.26. Ad ogni valore di sollecitazione normale, la resistenza di interfaccia aumenta all'aumentare della temperatura. L'incremento della resistenza di interfaccia con la temperatura è anche evidente in Fig. 7.25. Per tutte le velocità di taglio, un aumento della temperatura si traduce in un incremento della resistenza di interfaccia. Questa sensibilità alla temperatura è in linea con il rammollimento dei polimeri (cioè la riduzione di rigidità) all'aumentare della temperatura (Budiman_1994; Lord et al._1995), che comporta un maggiore movimento del polimero sotto un determinato sforzo e un incremento dell'area di contatto (Osswald & Menges_1995).

In Fig. 7.27 è riportato l'angolo di attrito di interfaccia in funzione della temperatura. Dalla figura si può vedere che, all'aumentare della temperatura, gli angoli di attrito di picco e post-picco aumentano, che è coerente con le osservazioni fatte da Bely et al. (1982) e da Daniels (1989) per il coefficiente di attrito tra polimeri. Il variazione totale dell'angolo di attrito è approssimativamente la stessa per entrambe le tipologie di interfacce, sebbene la variazione percentuale dell'angolo di attrito è maggiore nel caso

dell'interfaccia GMS – GT. In media, l'angolo di attrito di interfaccia varia di $0.06 \pm 0.08^\circ$ per $^\circ\text{C}$.

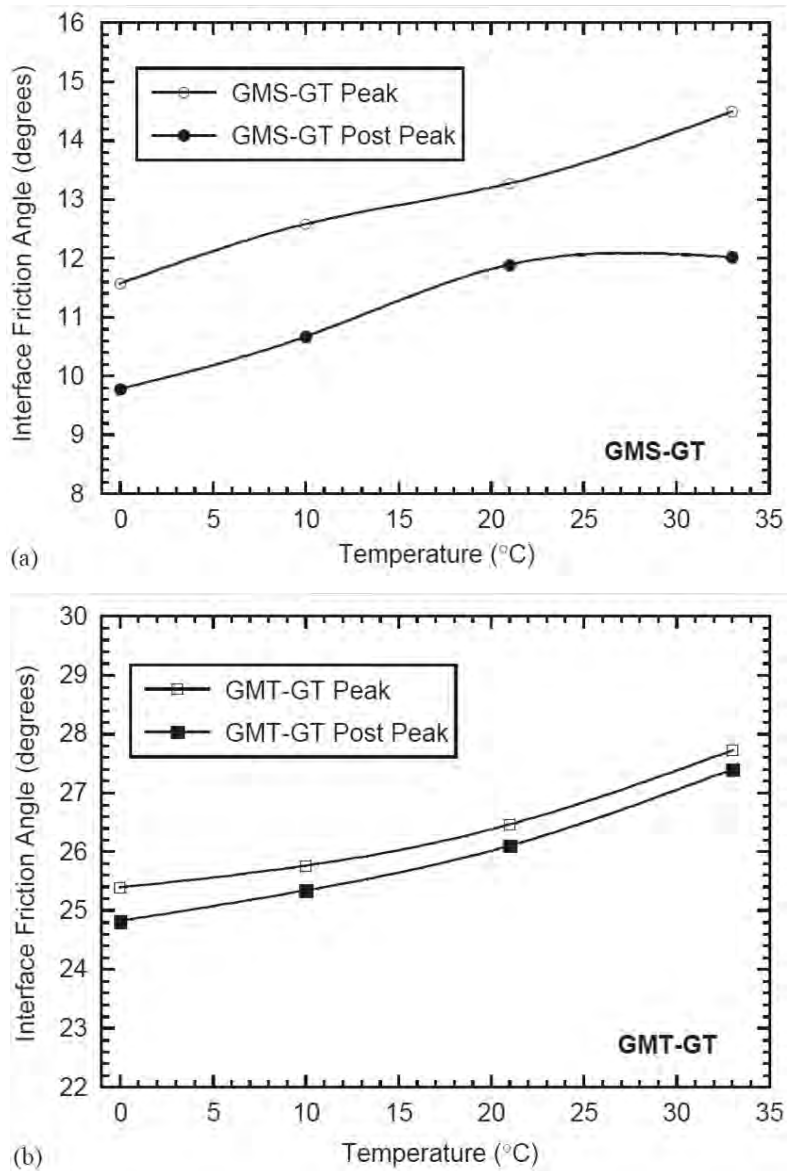


Fig. 7.27. Angoli di attrito di picco e post-picco in funzione della temperatura per le interfacce (a) GMT – GT e (b) GMS – GT. (Akpinar & Benson_2005)

Queste variazioni dell'angolo di attrito riguardano i particolari geosintetici analizzati in questo studio. Per esempio, il procedimento di tessitura dei geosintetici potrebbe incidere sulla sensibilità alla temperatura se le asperità si ammorbidiscono o si sfaldano più facilmente ad alte temperature.

7.7. CONFRONTO DEI RISULTATI DEI TEST SULLE INTERFACCE GEOMEMBRANA LISCIA – GEOTESSUTO E GEOMEMBRANA RUVIDA – GEOTESSUTO

In questo paragrafo, con lo scopo di evidenziare le diversità nel comportamento di attrito di interfaccia tra due delle più comuni interfacce di geosintetici, sono riportati i risultati ottenuti dallo svolgimento di una serie di test con il Piano Inclinato e con l'Apparecchio Anulare di Taglio Diretto.

7.7.1. Risultati ottenuti con il Piano Inclinato

In Fig. 7.28 sono riportati gli inviluppi di resistenza di interfaccia (linee rette) ricavati dai risultati ottenuti da Wasti & Özdüzgün (2001) con delle prove con il piano inclinato per delle interfacce composte da una geomembrana liscia in HDPE e da un geotessuto in poliestere (S-GM(A)/GT(A); S-GM(B)/GT(B)), delle interfacce composte da una geomembrana ruvida in HDPE e da un geotessuto in poliestere (R-GM(A)/GT(A); R-GM(C)/GT(C)) e per una interfaccia composta da una geomembrana in PVC e da un geotessuto in poliestere. Tutte queste prove sono state svolte utilizzando una dimensione del campione di 60 mm x 60 mm, per un intervallo di sollecitazioni normali compreso tra 5 e 50 kPa. Le lettere A, B e C stanno ad indicare la marchio di fabbricazione dei geosintetici.

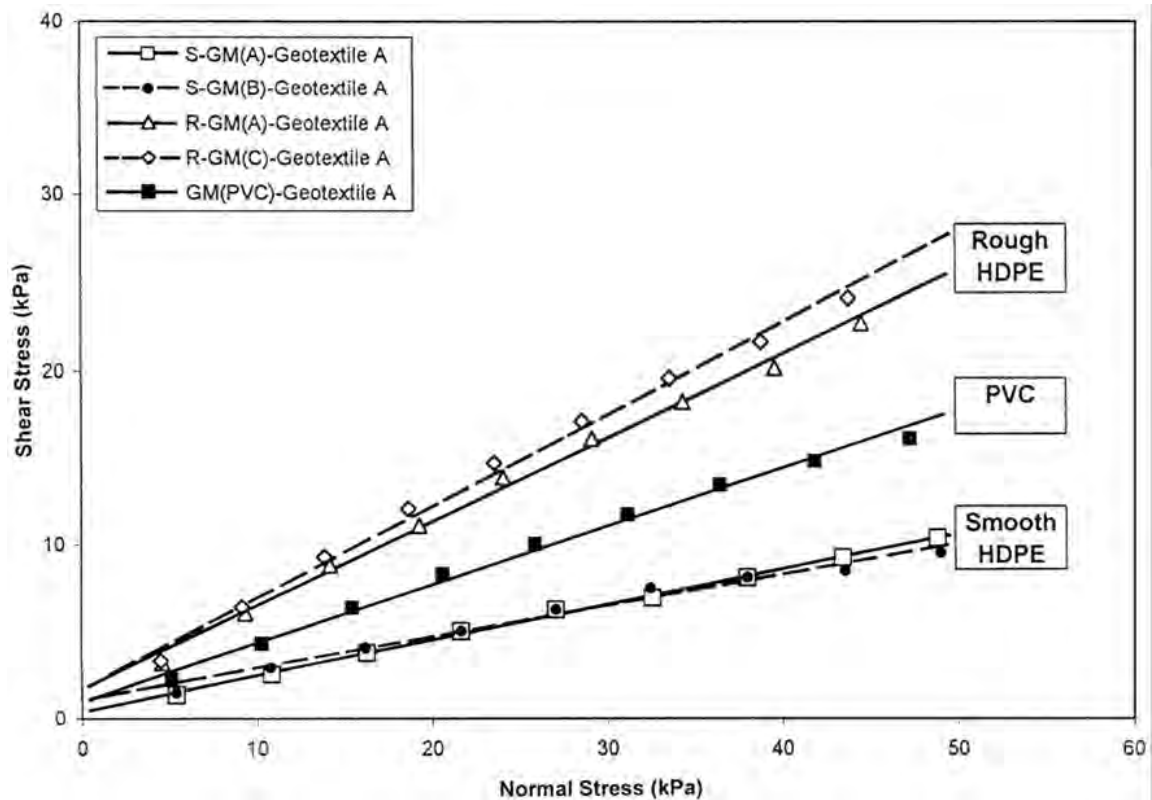


Fig. 7.28. Risultati dei test con il piano inclinato: interfacce geomembrana – geotessuto (60 mm x 60 mm). (Wasti & Özdüzgün_2001)

Dalla rappresentazione degli involucri di resistenza di attrito (Mohr-Coulomb: $\tau = c + \sigma_n \tan\theta$) delle varie interfacce esaminate, si nota che le interfacce contenenti una geomembrana ruvida (R-GM/GT) sono quelle caratterizzate da l'involuppo di resistenza più inclinato e quindi dal maggiore valore di angolo di attrito θ . Inoltre, esse sono caratterizzate dal maggior valore di adesione intercetta c . Invece, gli involucri rappresentanti la minore resistenza al taglio di interfaccia sono quelli propri delle interfacce contenenti una geomembrana liscia (S-GM/GT). L'interfaccia con la geomembrana in PVC è caratterizzata da una resistenza di attrito che sta nel mezzo delle altre interfacce descritte.

7.7.2. Risultati ottenuti con l'Apparecchio Anulare di Taglio Diretto

La Fig. 7.29 mostra i risultati ottenuti da Stark et al. (1996) svolgendo una serie di prove con l'Apparecchio Anulare di Taglio Diretto per delle interfacce geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto e geomembrana liscia – geotessuto non tessuto.

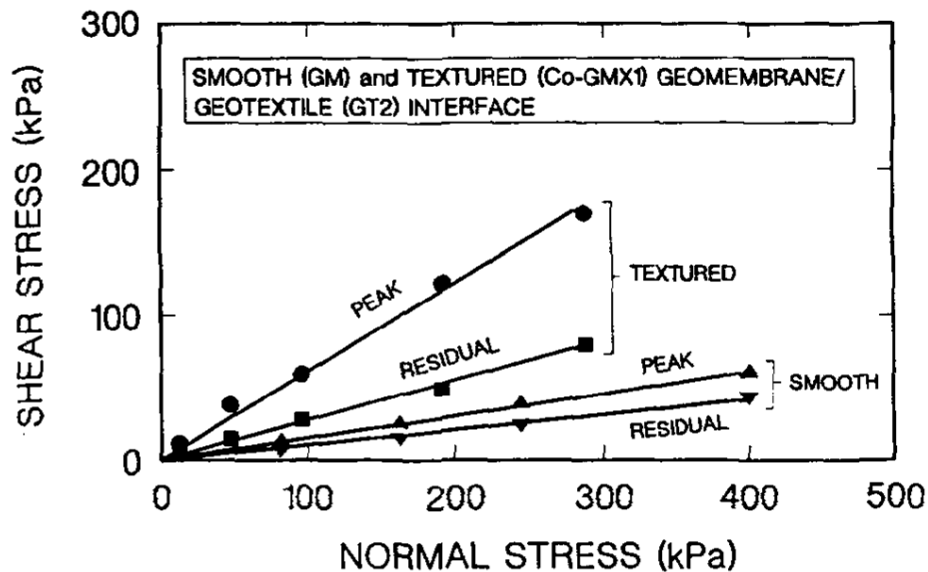


Fig. 7.29. Confronto tra gli involucri di rottura ottenuti con l'Apparecchio Anulare di Taglio Diretto per le interfacce geomembrana liscia e ruvida/geotessuto. (Stark et al. 1996)

Si può vedere che la resistenza al taglio di picco e quella residua dell'interfacce esaminate sono aumentate approssimativamente del 300% e 200%, rispettivamente, passando dall'uso delle geomembrane lisce a quello della geomembrane ruvide.

7.8. CAUSE DELLA PERDITA DI RESISTENZA AL TAGLIO DOPO IL RAGGIUNGIMENTO DI UN VALORE DI PICCO

In Fig. 7.30 sono riportati i risultati dei test svolti da Seo et al. (2007) nell'ambito del loro studio focalizzato a determinare l'influenza dell'umidità sulla resistenza al taglio tra geomembrane e geotessuti tramite un dispositivo di taglio diretto di grandi dimensioni (300 mm x 300 mm) capace di misurare la resistenza al taglio di picco e quella residua

per uno spostamento di 80 mm. Seo et al. hanno analizzato il comportamento di attrito delle interfacce geomembrana liscia – geotessuto non tessuto (GT/S-GM) e delle interfacce geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto (GT/T-GM) sotto condizioni asciutte e bagnate.

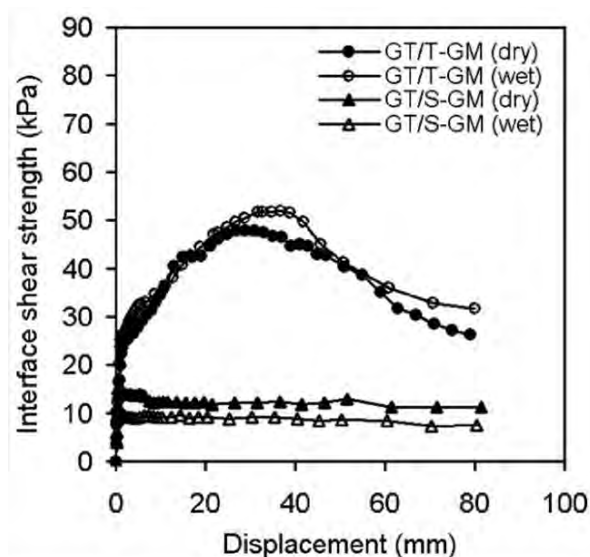


Fig. 7.30. Relazione tra sollecitazione di taglio e spostamento per interfacce geotessuto – geomembrana con un carico normale di 100 kPa. (Seo et al._2007)

Si può vedere come la resistenza al taglio di picco sia seguita da una significativa riduzione di resistenza (“riduzione post-picco”), all’aumentare dello scorrimento di taglio per tutte le interfacce. Per l’interfaccia con una geomembrana liscia (GT/S-GM) la resistenza al taglio di picco dell’interfaccia si mobilita solitamente per uno spostamento tangenziale di circa 3 mm. Mentre, per l’interfaccia con una geomembrana ruvida (GT/T-GM), la resistenza al taglio di picco si mobilita per uno spostamento compreso tra 10 mm e 40 mm. Quindi per mobilitare la resistenza di picco delle interfacce con geomembrane ruvide è necessario uno spostamento maggiore rispetto al caso delle interfacce con geomembrane lisce. Tali differenze di comportamento di resistenza vanno attribuite ai differenti meccanismi di rottura caratteristici delle due diverse interfacce. Nel caso delle interfacce GT/T-GM, la geomembrana ruvida si incastra nelle fibre del geotessuto e le strappa in seguito ad uno scorrimento. La Fig. 7.31 illustra una foto scattata con un microscopio elettronico, nella quale si vede la rottura dei filamenti del geotessuto causata

dalla geomembrana ruvida nei test svolti con l'interfaccia GT/T-GM. Ossia, il comportamento delle interfacce GT/T-GM non è caratterizzato da scorrimento ma dallo strappo delle fibre del geotessuto da parte della superficie ruvida della geomembrana. Invece, per le interfacce comprendenti geomembrane lisce (GT/S-GM) il principale meccanismo di rottura è rappresentato dal solo scorrimento ed in seguito ai test svolti non è stata rilevata alcuna lacerazione dei filamenti del geotessuto.

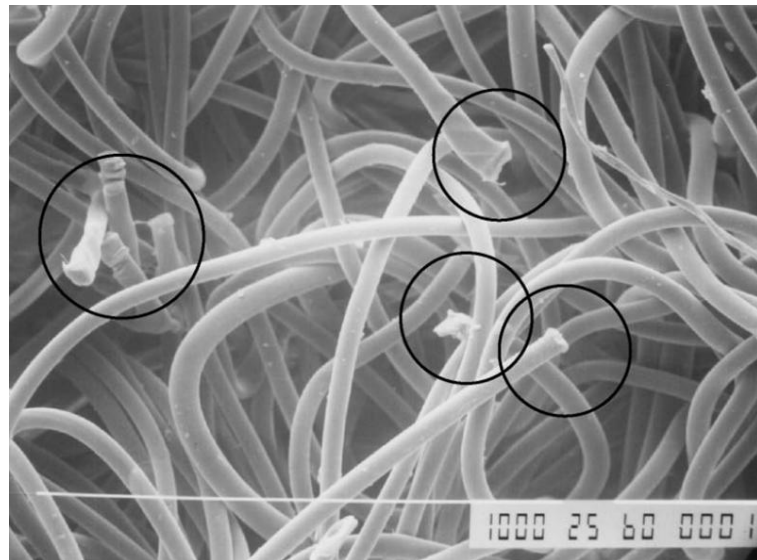


Fig. 7.31. Rottura dei filamenti del geotessuto durante il taglio di una interfaccia geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto (GT/T-GM). (Seo et al._2007)

Riassumendo, il meccanismo di rottura delle interfacce geomembrana liscia – geotessuto non tessuto è caratterizzato da scorrimento, mentre quello delle interfacce geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto può essere caratterizzato da una combinazione di scorrimento, di levigatura della superficie della geomembrana ruvida e di lacerazione delle fibre del geotessuto da parte della superficie ruvida della geomembrana (Fig. 7.31). È proprio per questo motivo che le interfacce con geomembrana ruvida raggiungono una resistenza di picco maggiore rispetto a quelle con geomembrana liscia.

Come abbiamo già visto nel Cap. 3, Stark et al. (1996) dimostrarono che la resistenza a taglio di una interfaccia geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto è indipendente

dalla velocità di scorrimento. Infatti, come si può vedere in Fig. 3.3, dove sono rappresentati i valori di resistenza al taglio di picco e residui di cinque test svolti in un intervallo di velocità di taglio compreso tra 0.029 mm/min e 36.7 mm/min e sotto una sollecitazione normale di 96 kPa, i valori di picco e quelli residui variano leggermente al variare della velocità di taglio. La Fig. 3.3, inoltre, illustra la perdita di resistenza al taglio dopo il raggiungimento di un valore di picco per una tipica interfaccia geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto. Si può vedere che la resistenza al taglio di interfaccia residua è il 50% ÷ 60% inferiore rispetto ai valori di resistenza di picco per le velocità di spostamento considerate.

La perdita di resistenza al taglio dopo il raggiungimento di un valore di picco per una interfaccia geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto, come abbiamo già detto, va principalmente attribuita all'estrazione e alla lacerazione dei filamenti del geotessuto durante il taglio. L'ulteriore deformazione di taglio sembra pettinare o orientare queste fibre distaccate parallelamente alla direzione del taglio. Di conseguenza, la maggior parte dei filamenti dei campioni testati risultano orientati parallelamente alla direzione del taglio. Questo meccanismo di rottura è rappresentato nelle Fig. 7.32 e 7.33. La Fig. 7.32 presenta una fotografia scattata con un microscopio elettronico di un geotessuto non tessuto agugliato e calandrato prima dell'applicazione del taglio. Si può vedere che i filamenti sono orientati in modo casuale e sono inizialmente legati tra loro. La Fig. 7.33 presenta una fotografia scattata con un microscopio elettronico di un geotessuto non tessuto agugliato e calandrato in condizioni di resistenza residue, in seguito all'applicazione del taglio tramite un Apparecchio Anulare di Taglio Diretto. Si può vedere che la maggior parte dei filamenti sono orientati parallelamente alla direzione del taglio. Va osservato che la lucidatura della superficie della geomembrana, inoltre, contribuisce alla perdita di resistenza al taglio dopo il raggiungimento di un valore di picco specialmente per alti valori di sollecitazione normale.

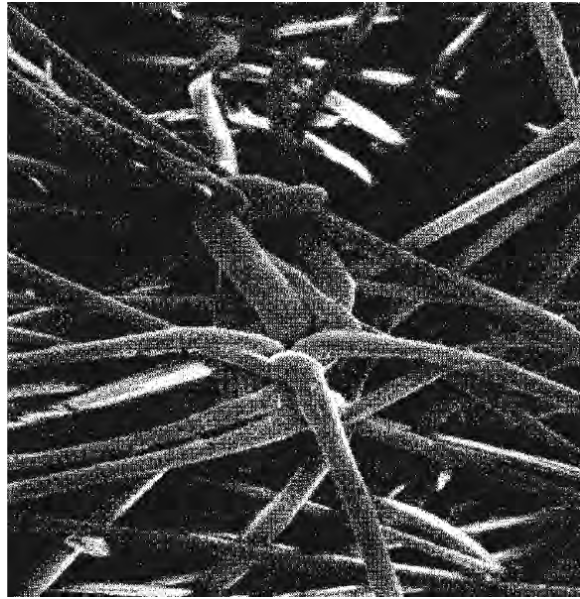


Fig. 7.32. Filamenti di un geotessuto non tessuto agugliato e calandrato prima del taglio. (Stark et al._1996)



Fig. 7.33. Filamenti di un geotessuto non tessuto agugliato e calandrato orientati parallelamente alla direzione del taglio dopo 1000 mm di spostamento in un Apparecchio Anulare di Taglio Diretto. (Stark et al._1996)

Questo meccanismo rottura è in accordo con le osservazione fatte in campo che descrivono una grande resistenza alla deformazione a taglio quando un geotessuto non tessuto viene posto in contatto con una geomembrana ruvida. Questa grande resistenza

viene a volte attribuita ad un meccanismo di attaccamento simile a quello tipico del velcro. Tuttavia, dopo aver trascinato il geotessuto non tessuto sulla geomembrana ruvida per una piccola distanza, la resistenza al taglio o l'effetto velcro solitamente si riduce. Questo suggerisce che alcuni dei filamenti si sono rotti oppure sono stati estratti durante lo scorrimento, con conseguente diminuzione della resistenza al taglio.

Per facilitare il collocamento dei geotessuti non tessuti sopra alle geomembrane ruvide solitamente si utilizza uno strato di separazione, ad esempio un foglio di plastica (Visqueen), una geogriglia o altri materiali, disposto in sommità della geomembrana prima di stendere il geotessuto. Dopo che il geotessuto è stato allineato correttamente viene rimosso lo strato di separazione.

7.9. OSSERVAZIONI SULLA “FORCE PROCEDURE”

Nell'ambito delle osservazioni esposte in questo paragrafo sono stati considerati i risultati di Briançon et al. (2011), ottenuti svolgendo una serie di prove con il piano inclinato utilizzando la “Force Procedure”. Le varie interfacce analizzate sono le seguenti:

- $GMB_{EPDM} - GTX_{nwh}$: interfaccia composta da una geomembrana liscia in EPDM (terpolimero ottenuto dalla copolimerizzazione di etilene, propilene e da un terzo monomero di diene) e da un geotessuto non tessuto termosaldato.
- $GMB_{HDPE} - GTX_{nwn(P1)}$: interfaccia composta da una geomembrana liscia in HDPE e da un geotessuto non tessuto agugliato.
- $GMB_{PVC} - GTX_{nwn(R)}$: interfaccia composta da una geomembrana in PVC e da un geocomposito composto da un geotessuto non tessuto agugliato con sopra una maglia in polietilene tereftalato (PET).

7.9.1. Influenza dello spostamento u_{lim} della scatola superiore:

Come si può notare nelle Fig. 34 e 35, il valore di spostamento u_{lim} non ha influenza sul valore dell'angolo di attrito ϕ_{lim} , anche se lo Step 2 ($\beta_0 \leq \beta \leq \beta_{lim}$) risulta più lungo

quando si assume un valore di u_{lim} maggiore. Di conseguenza, è meglio scegliere un piccolo spostamento u_{lim} :

- nel caso di scorrimento immediato, limitare il valore di u_{lim} consente una limitazione dell'urto quando il cavo collegato alla scatola superiore viene teso;
- nel caso di scorrimento graduale, quando la velocità di spostamento della scatola superiore è molto lenta, limitare il valore di u_{lim} è un modo per ridurre la fase di transizione (Step 2) durante la quale non è possibile determinare l'angolo di attrito.

Tuttavia, bisogna stare attenti che questa limitazione di spostamento risulti tale da consentire l'intera mobilitazione dell'attrito all'interfaccia.

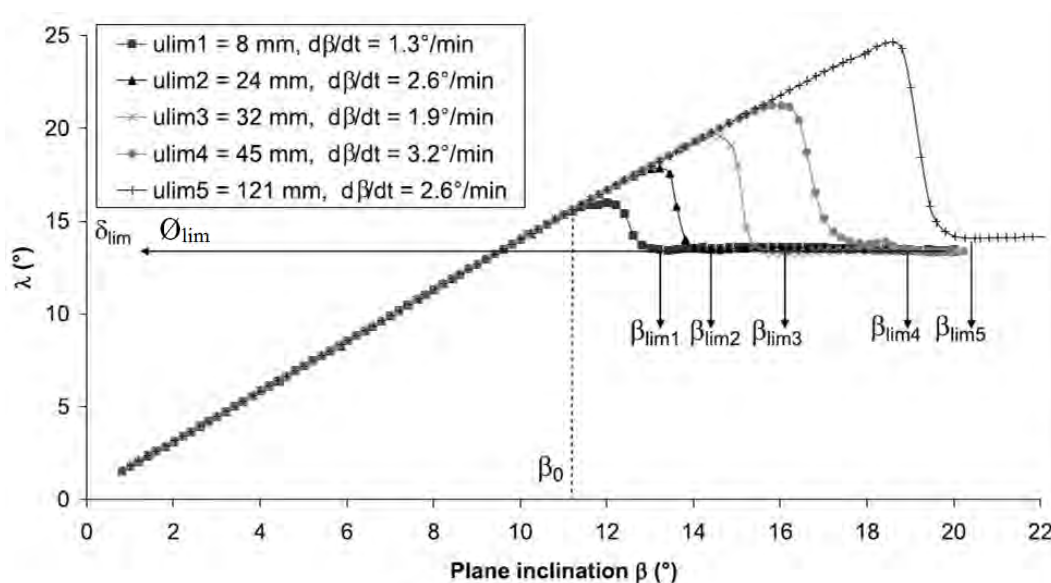


Fig. 34. Influenza dello spostamento u_{lim} su λ_{peak} (attrito tra GMB_{EPDM} e GTX_{nwh}). (L. Briançon et al., 2011)

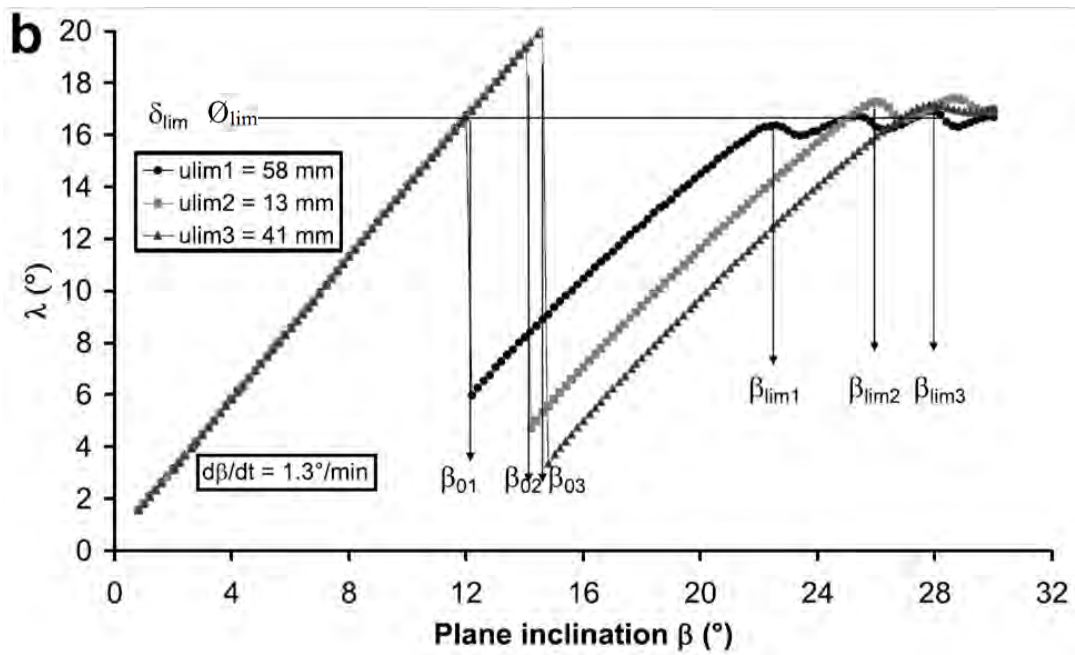
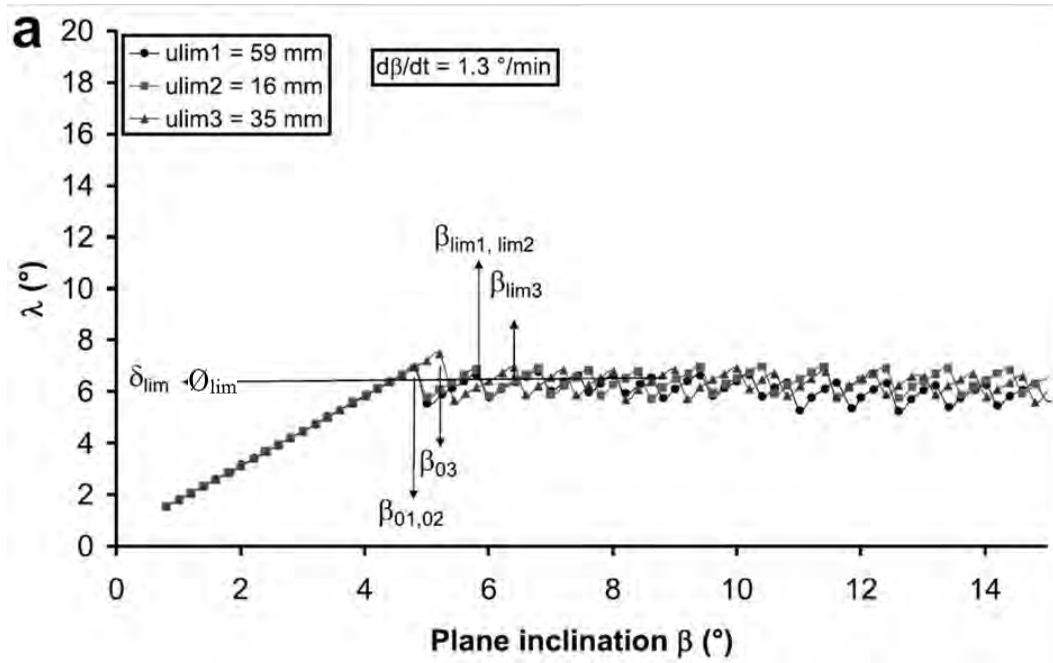


Fig. 35. Influenza dello spostamento u_{lim} nella determinazione di λ_{lim} : esempio di attrito tra (a) $GMB_{HDPE} - GTX_{nwn(P1)}$ e (b) $GMB_{PVC} - GTX_{nwn(R)}$. (L. Briançon et al._2011)

7.9.2 Confronto tra la “Force Procedure” e la “Standard Displacement Procedure”

Il parametro di attrito \varnothing_{stan} ottenuto con la “Standard Displacement Procedure” sovrastima l’angolo di attrito, in particolar modo nel caso di scorrimento graduale. Inoltre, la procedura standard non è rigorosa in quanto considera un approccio statico per delle condizioni che in realtà sono dinamiche. Sulla base dei risultati di Briançon et al. (2011), ottenuti svolgendo una serie di test per varie tipologie di interfacce, si può affermare che la “Force Procedure” fornisce valori di angolo di attrito inferiori rispetto a quelli che si trovano con la “Standard Displacement Procedure” (Tab. 7.4).

\varnothing_{stan} / \varnothing_{lim}	GTX _{nwn(P1)}	GTX _{nwn(R)} *	GTX _{nwh}
GMB _{PVC}	21.5° 20°	20° 17°	17° 13.5°
GMB _{HDPE}	10.5° 7°	15.5° 11°5	9.5° 8.5°
GMB _{EPDM}	25° 20°	27° 20°	20.5° 13.5°

Tab. 7.4. Esempi di angoli di attrito determinati con la “Standard Procedure” (\varnothing_{stan}) e con la “Force Procedure” (\varnothing_{lim}). (L. Briançon et al., 2011)

A causa della difficoltà di implementare la procedura standard in condizioni dinamiche, in particolar modo nel caso di scorrimento graduale con spostamento molto lento o con scorrimento a scatti, la “Force Procedure” sembra essere la migliore procedura per valutare l’angolo di attrito delle interfacce dei geosintetici, tramite l’uso di un piano inclinato, con la maggiore accuratezza.

La scelta dell'angolo residuo ϕ_{lim} come parametro chiave nella "Force Procedure" viene proposta per le seguenti motivazioni:

- questo angolo non è sensibile alle condizioni di test; infatti la velocità di inclinazione del piano, lo spostamento u_{lim} e la successione dei test (eccetto il caso di danneggiamento dell'interfaccia dei geosintetici) sono fattori che non hanno significativa influenza sul valore di ϕ_{lim} ;
- questo angolo è l'unico parametro intrinseco dell'interfaccia dato che è indipendente dallo spostamento relativo all'interfaccia u_{lim} , a partire da un valore minimo di questo spostamento;
- anche se non è stato totalmente dimostrato, la "Force Procedure" fornisce verosimilmente un valore di ϕ_{lim} vicino all'angolo di attrito residuo ϕ_{res} , mentre ϕ_0 potrebbe essere vicino all'angolo ϕ_{peak} .

La scelta di ϕ_{lim} è anche giustificata dalle osservazioni svolte in campo. Infatti, come è noto, durante la realizzazione dei sistemi di rivestimento con geosintetici si verificano grandi spostamenti relativi nelle differenti interfacce. Quindi, il valore limite risulta essere più rappresentativo di questi spostamenti come osservato in campo.

Con queste considerazioni sembra ragionevole suggerire una revisione della procedura standard descritta nella normativa EN ISO 12957-2 (2005).

7.10. UN NUOVO MODELLO COSTITUTIVO PER LE INTERFACCE GEOMEMBRANA RUVIDA – GEOTESSUTO

B. M. Bacas et al. (2011) hanno sviluppato un nuovo modello costitutivo valido per le interfacce geomembrana ruvida – geotessuto e che nasce dalle somiglianze esistenti tra le giunture irregolari di roccia e le interfacce geomembrana – geotessuto. Le somiglianze in questione sono elencate di seguito:

- le superfici di entrambe le aree di contatto sono ruvide;
- entrambe le tipologie di interfacce mostrano un comportamento "strain-softening" durante le prove di taglio diretto;

- un aumento della sollecitazione normale si traduce in un aumento dell'incastro tra i due materiali che compongono l'interfaccia.

Utilizzando i risultati ottenuti con una serie di prove svolte con la scatola di taglio diretto per un'ampia varietà di giunture di roccia alterate e non alterate dalle intemperie, Barton (1973) e Barton & Choubey (1977) svilupparono un'equazione (Eq. 7.6) sperimentale non lineare per il calcolo della resistenza al taglio di picco (τ):

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[JRC \cdot M \cdot \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (7.6)$$

dove:

σ_n = sollecitazione normale

JRC = coefficiente di scabrosità della giuntura

JCS = resistenza a compressione della giuntura

M = coefficiente di deterioramento della giuntura

ϕ_r = angolo di attrito residuo

Così, B. M. Bacas et al. hanno pensato di utilizzare per le interfacce di geosintetici una formula simile all'Eq. 7.6 per le giunture di roccia:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[HL \cdot I \cdot \log \left(\frac{GCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (7.7)$$

dove:

τ = resistenza al taglio di picco

σ_n = sollecitazione normale

GCS = sforzo di compressione di riferimento del geotessuto

HL = coefficiente di adesione

I = coefficiente di inglobamento

ϕ_r = angolo di attrito residuo

Questa relazione sperimentale è stata sviluppata basandosi sui lavori di Barton (1973), Barton & Choubey (1977), Bandi et al. (1983), Barton et al. (1985), Stark et al. (1966) e Hebere et al. (2005).

L'Eq. 7.7 è caratterizzata da quattro parametri: GCS, HL, I e ϕ_r . I significati fisici di ciascun parametro sono i seguenti:

- Lo sforzo di compressione del geotessuto (GCS) è un valore di riferimento. Esso è il valore di sollecitazione normale sul geotessuto con il quale si raggiunge una deformazione normale di 0.8 (Fig. 36). I geotessuti testati mostrano un punto di flesso a 0.8. Da questo punto la sollecitazione normale aumenta asintoticamente. Il valore di GCS controlla il meccanismo di interazione tra i geotessuti e le geomembrane.
- Il coefficiente di adesione (HL = “hook and loop”) rappresenta l’incastro delle fibre di geotessuto (“loop” = anello) con le asperità della geomembrana (“hook” = gancio).
- Il coefficiente di inglobamento (I) caratterizza la penetrazione delle asperità della geomembrana sul geotessuto.
- L’angolo di attrito residuo (ϕ_r) si può ottenere dalle prove di taglio diretto sulle interfacce di geosintetici.

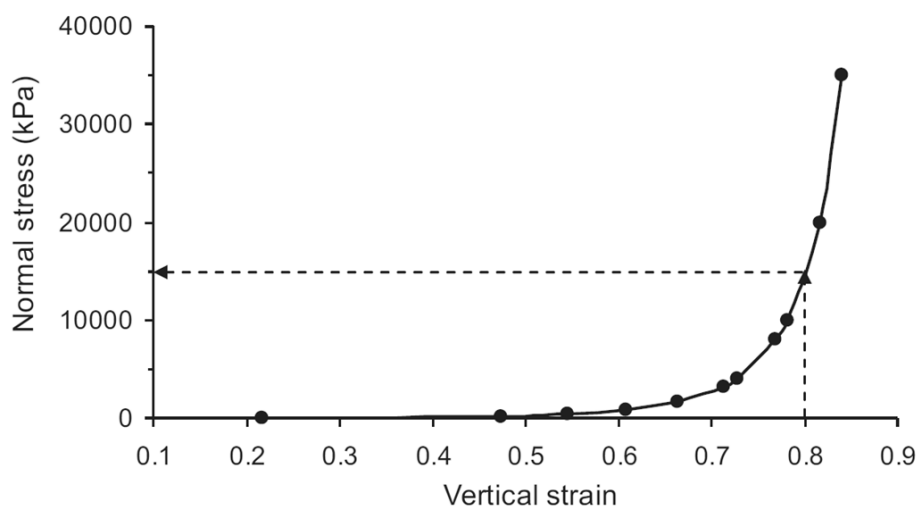


Fig. 36. Compressibilità di un geotessuto non tessuto agulato in polipropilene. (Bacas et al. 2011)

Questa legge di attrito considera i seguenti aspetti:

- La resistenza misurata lungo l'interfaccia geomembrana – geotessuto con le prove di taglio diretto dipende fortemente dalla ruvidità della geomembrana.
- L'area di contatto coinvolta durante il taglio dell'interfaccia geomembrana ruvida – geotessuto nelle prove di taglio diretto dipende dalla sollecitazione normale.
- Il passaggio dal meccanismo di interazione superficiale di adesione (Fig. 37a) che si ha per bassi valori di sollecitazione normale al livello di interazione strutturale (Fig. 37b) che si ha per alti valori di sollecitazione normale dipende dal rapporto GCS/σ_n . Questo rapporto controlla la resistenza al taglio, che è influenzata dall'inglobamento, dalla ruvidità e dal danneggiamento delle fibre.
- La resistenza al taglio di una interfaccia geomembrana – geotessuto può essere pari a zero per un valore nullo di sollecitazione normale.
- La dilatazione osservata nelle prove con la scatola di taglio diretto di grandi dimensioni è molto piccola o nulla.

Come abbiamo detto il valore di sollecitazione normale ha una grossa influenza sul comportamento di resistenza al taglio delle interfacce geomembrana ruvida – geotessuto. Infatti la tipologia di interfacce in questione è caratterizzata dal seguente comportamento:

- ✓ Per bassi valori di sollecitazione normale l'interazione tra un geotessuto non tessuto e una geomembrana ruvida coinvolge i singoli filamenti e il comportamento dipende dalle asperità presenti sulla superficie della geomembrana. L'attrito e l'incastro sono localizzati a livello superficiale, come è illustrato in Fig. 37a.
- ✓ Quando la sollecitazione normale aumenta, il geotessuto si appiattisce e si ingloba sempre più con la geomembrana a causa delle asperità presenti nella superficie di contatto della geomembrana. L'attrito risultante e l'interazione di adesione a livello strutturale sono illustrati in Fig. 37b.

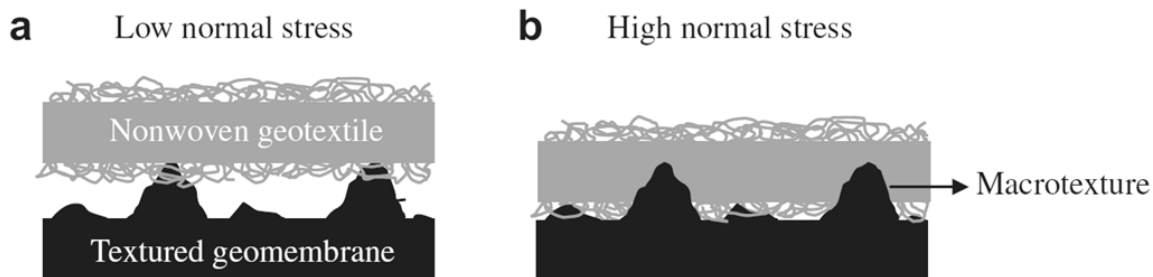


Fig. 37. Meccanismi di interazione tra un geotessuto non tessuto e una geomembrana ruvida per differenti valori di sollecitazione normale: (a) bassa sollecitazione normale, (b) alta sollecitazione normale. (Bacas et al._2011)

Il criterio proposto per calcolare la resistenza al taglio di picco per le interfacce di geosintetici in questione è stato sviluppato sulla base dei risultati ottenuti con una serie di prove di taglio diretto su differenti interfacce geomembrana ruvida – geotessuto.

La Fig. 38 mostra due metodi per presentare i risultati. Nel diagramma di sinistra è presentato un diagramma di $\tan^{-1}(\tau/\sigma_n)$ in funzione di $(\phi_{\text{picco}} - \phi_{\text{residuo}})$, mentre nel diagramma di destra è presentato un diagramma di $\log(GCS/\sigma_n)$ in funzione di $(\phi_{\text{picco}} - \phi_{\text{residuo}})$. L'aumento di attrito, che si può notare in Fig. 38, è dovuto all'incastro tra le asperità della geomembrana e le fibre del geotessuto (come una sorta di effetto velcro).

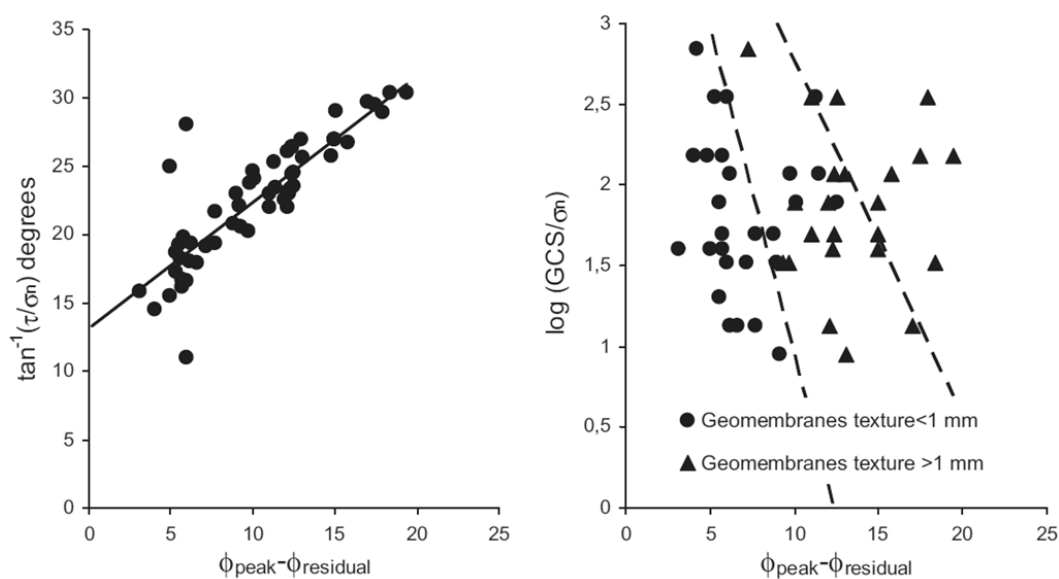


Fig. 38. Due metodi per rappresentare i risultati delle prove di taglio diretto su una interfaccia geomembrana ruvida – geotessuto. (Bacas et al._2011)

La linea retta tra lo sparpagliamento dei dati riportati nel diagramma di sinistra è la retta di regressione ottenuta con il metodo dei minimi quadrati. Le linee punteggiate ottenute nel diagramma di destra, invece, rappresentano vari andamenti per le geomembrane con una macro struttura maggiore di 1 mm e inferiore di 1 mm. Queste linee sono state tracciate in modo che si possano ottenere le seguenti semplici relazioni:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan(\phi_{peak}) \quad (7.8)$$

$$\phi_{peak} - \phi_r = R \cdot \log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right) \quad (7.9)$$

R è il coefficiente di interazione di interfaccia che stima i meccanismi di incastro prodotti durante il taglio. Così, il coefficiente R dipende dai parametri di adesione e di inglobamento (HL e I).

La resistenza al taglio di picco si ottiene direttamente dalle Eq. 7.8 e 7.9:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan\left[R \cdot \log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right) + \phi_r\right] \quad (7.10)$$

Se il parametro R è uguale a HL·I si ottiene l'Eq. 7.7.

8. CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI CON LE VARIE APPARECCHIATURE

In questo capitolo vengono confrontati i risultati ottenuti con le diverse apparecchiature sviluppate per la determinazione dell'attrito di interfacce tra geosintetici. Questo confronto è fondamentale per riuscire ad individuare gli aspetti positivi e quelli negativi propri di ciascuna procedura di prova e per quantificare le differenze dei risultati di attrito ottenuti con ciascun dispositivo.

8.1. PIANO INCLINATO – SCATOLA DI TAGLIO DIRETTO

Come abbiamo visto nel Cap. 2, l'angolo di attrito di interfaccia si calcola con la scatola di taglio diretto seguendo il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb (Fig. 2.10):

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan\phi \quad (8.1)$$

dove c e ϕ sono rispettivamente l'adesione intercetta (kPa) e l'angolo di attrito dell'interfaccia determinati con la regressione lineare.

Per confrontare i risultati ottenuti dalle prove con la scatola di taglio diretto con quelli ottenuti con il piano inclinato, si possono svolgere anche con il piano inclinato più prove con valori di sollecitazione normale (σ) crescenti e quindi riuscire ad ottenere in un grafico τ - σ l'inviluppo di rottura dell'interfaccia esaminata (Mohr-Coulomb), tramite una interpolazione dei punti (regressione lineare).

Con la scatola di taglio, durante la prova si ha una tensione normale costante. Mentre, durante una prova con il piano inclinato viene variata l'inclinazione del piano e quindi di conseguenza varia anche la componente di sollecitazione normale al piano.

Con il criterio di Mohr-Coulomb viene considerato lo “stato di rottura”, che nel caso della scatola di taglio si verifica in corrispondenza del picco della relazione tra resistenza al taglio e spostamento al taglio (Fig.2.8). Nel caso del piano inclinato, invece, la “rottura” corrisponde all’inclinazione δ_f del piano in corrispondenza della quale si verifica lo scorrimento lungo l’interfaccia. La tensione normale e quella di taglio lungo l’interfaccia, in corrispondenza della “rottura”, si calcolano con le seguenti relazioni:

$$\sigma = \sigma_a \cdot \cos\delta_f \quad (8.2)$$

$$\tau = \sigma_a \cdot \sin\delta_f \quad (8.3)$$

dove σ_a = tensione normale applicata all’inizio della prova (quando il piano inclinato è in posizione orizzontale). Dunque, nel caso del piano inclinato, per ottenere tramite regressione lineare la retta interpolatrice dei valori di rottura (involuppo di rottura) è necessario riportare in un grafico τ - σ i valori di resistenza a taglio di picco (τ_{picco}) e di tensione normale a rottura ottenuti con le Eq. 8.2 e 8.3. In questo modo si ottiene, tramite la relazione di Mohr-Coulomb, il valore dell’angolo di attrito di picco. Se, invece, volessimo calcolare il valore il valore dell’angolo di attrito residuo nel caso della scatola di taglio diretto basta riportare in un grafico τ - σ i valori di resistenza al taglio residui (τ_{residuo}) e di tensione normale (σ). Per mezzo di una regressione lineare si ottiene l’involuppo di resistenza residua che è caratterizzato da una inclinazione della retta inferiore rispetto al caso di resistenza di picco (Fig. 2.9) e quindi da un valore di angolo di attrito minore.

Nel caso del piano inclinato, invece, non si riesce ad avere dei valori di resistenza al taglio residui perché con questa prova si arriva al massimo ad un valore di resistenza di picco e poi cambiano le condizioni cinematiche; infatti, si passa da condizioni statiche a condizioni dinamiche in quanto, in corrispondenza del valore di inclinazione del piano δ_f , ha inizio lo scorrimento. Pertanto, se si segue la stessa procedura utilizzata con la scatola di taglio (Mohr-Coulomb) utilizzando il piano inclinato come dispositivo per lo svolgimento dei test non si riesce ad ottenere il valore dell’angolo di attrito residuo. È proprio per questo motivo che è stata inventata la “Force Procedure”: essa consente di determinare un angolo di attrito residuo ($\phi_{\text{lim}} \approx \phi_{\text{residuo}}$) in condizioni statiche.

Un altro modo per riuscire a calcolare l'angolo di attrito residuo con il piano inclinato consiste nel ripetere più volte la stessa prova, potendo così considerare accumulato un grande spostamento e poter quindi finire di interpolare la parte di curva τ - σ dopo il valore di picco (ramo post-softening) che, come è stato detto, con una singola prova con il piano inclinato non si riesce ad ottenere.

In alcuni casi, per particolari interfacce, si è visto che l'angolo di attrito residuo si verifica per spostamenti anche di 20 m. Ma a noi, ai fini delle applicazioni pratiche, ci interessa il valore dell'angolo di attrito in seguito a spostamenti strutturali limitati che non compromettano la funzionalità strutturale. Quindi non sempre ci interessa il valore dell'angolo di attrito residuo vero e proprio, ma piuttosto il valore dell'angolo di attrito dopo un certo spostamento.

Wasti & Özdüzgün (2001) hanno studiato il comportamento a taglio di varie interfacce geomembrana – geotessuto utilizzando come dispositivi il piano inclinato e la scatola di taglio diretto. Hanno svolto una serie di test con la scatola di taglio diretto di dimensioni standard (60 mm x 60 mm) per consentire il confronto dei risultati ottenuti con i test con il piano inclinato (60 mm x 60 mm). Inoltre, hanno condotto vari test con la scatola di taglio diretto di grandi dimensioni (300 mm x 300 mm) per confrontare i risultati con quelli ottenuti con la scatola di taglio diretto di dimensioni standard e con quelli ottenuti con il piano inclinato (300 mm x 300 mm). Le prove con il piano inclinato sono state svolte con un intervallo di carico normale di 5÷50 kPa. Nelle prove con la scatola di taglio diretto il carico normale applicato è di 25÷300 kPa e 110÷400 kPa rispettivamente con la scatola di piccole dimensioni e quella di grandi dimensioni. Di seguito, in Fig. 8.1, sono illustrati i risultati ottenuti con le prove svolte con la scatola di taglio diretto standard e con il piano inclinato per delle interfacce composte da una geomembrana liscia in HDPE e da un geotessuto in poliestere (S-GM(A)/GT(A)) e delle interfacce composte da una geomembrana ruvida in HDPE e da un geotessuto in poliestere (R-GM(A)/GT(A)), entrambe con un campione di dimensioni 60 mm x 60 mm. In questa figura, con lo scopo di ottenere un confronto tra i risultati delle varie prove svolte con i diversi dispositivi, gli involucri rottura (linee rette) sono stati estrapolati oltre gli intervalli di sollecitazione normale caratteristici di ciascun dispositivo.

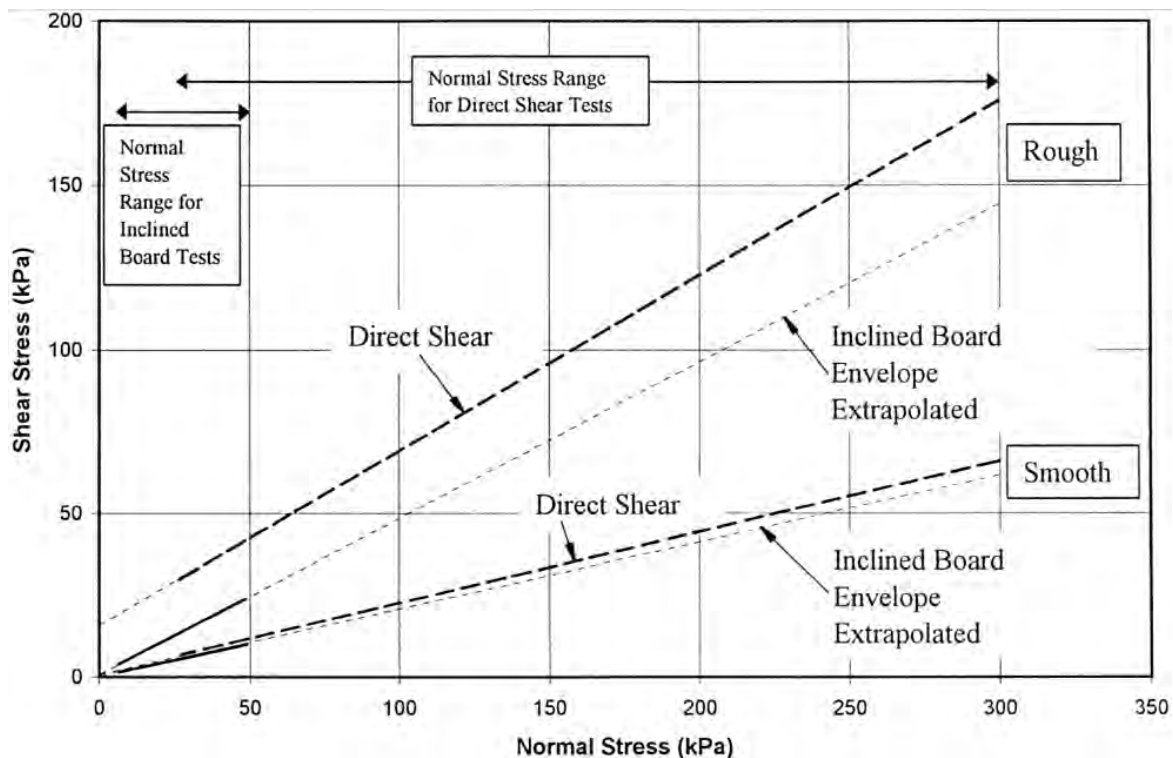


Fig. 8.1. Confronto dei risultati dei test svolti con il piano inclinato e con la scatola di taglio diretto: interfaccia geomembrana HDPE – geotessuto (60 mm x 60 mm). (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

Si nota che i valori di adesione intercetta c e di angolo di attrito ϕ (l'inclinazione delle linee rette) ottenuti con la scatola di taglio diretto sono in generale maggiori rispetto a quelli ottenuti con il piano inclinato. Nel caso delle interfacce con geomembrane lisce i due dispositivi forniscono risultati comparabili: l'adesione intercetta e l'angolo di attrito sono solamente un po' maggiori nel caso della scatola di taglio diretto. Invece, nel caso delle interfacce con geomembrane ruvide testate con la scatola di taglio diretto l'angolo di attrito è solo un po' più grande, mentre l'adesione intercetta è molto maggiore. Pertanto, gli involuipi di rottura (o meglio di resistenza al taglio) ottenuti con i test svolti con la scatola di taglio diretto si trovano sopra a quelli ottenuti con il piano inclinato.

Un confronto dei valori di angolo di attrito (δ_f) ottenuti dai test svolti con il piano inclinato e con la scatola di taglio diretto per l'intervallo di sovrapposizione di bassi valori di sollecitazione normale compreso tra 25 kPa e 50 kPa è inoltre illustrato in Fig. 7.2 (Cap. 7.2). In questa figura, che evidenzia gli effetti del livello di sollecitazione normale sui risultati dei test, si nota che per le interfacce geomembrana ruvida – geotessuto i valori di δ_f ottenuti con la scatola di taglio diretto sono maggiori di circa 13°

rispetto a quelli ottenuti con il piano inclinato. Nel caso, invece, delle interfacce con geomembrane lisce la differenza di δ_f è soltanto di pochi gradi.

Un ulteriore confronto tra il piano inclinato e la scatola di taglio diretto è stato svolto da Reyes Ramirez & Gourc (2003) nell'ambito del loro studio focalizzato sull'utilizzo del piano inclinato per lo svolgimento dei test di attrito di interfaccia. Di seguito sono riportati i risultati ottenuti con i due diversi dispositivi per una interfaccia geotessuto – geogriglia (GTr-GS): inferiormente una geogriglia in HDPE e superiormente un geotessuto non tessuto con fibre di rinforzo.

In Fig. 8.2 sono riportati i risultati ottenuti dalle prove svolte con la scatola di taglio diretto ad una velocità $d\delta/dt = 1 \text{ mm/min}$ e per tre diversi valori di sollecitazione normale (25 kPa, 50 kPa, 75kPa). Questi risultati forniscono un angolo di attrito $\phi = 16.8^\circ$ (ottenuto con il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb). È da notare che per questa particolare interfaccia non è presente alcun picco di resistenza. In Fig. 8.3 sono invece riportati i risultati ottenuti con il piano inclinato con una sollecitazione normale di 5.7 kPa e una velocità di inclinazione del piano $d\beta/dt = 3^\circ/\text{min}$. Questi risultati forniscono un angolo di attrito $\phi = 18.4^\circ$. La differenza dell'angolo di attrito osservata può essere attribuita ad un incremento della sollecitazione normale sull'interfaccia.

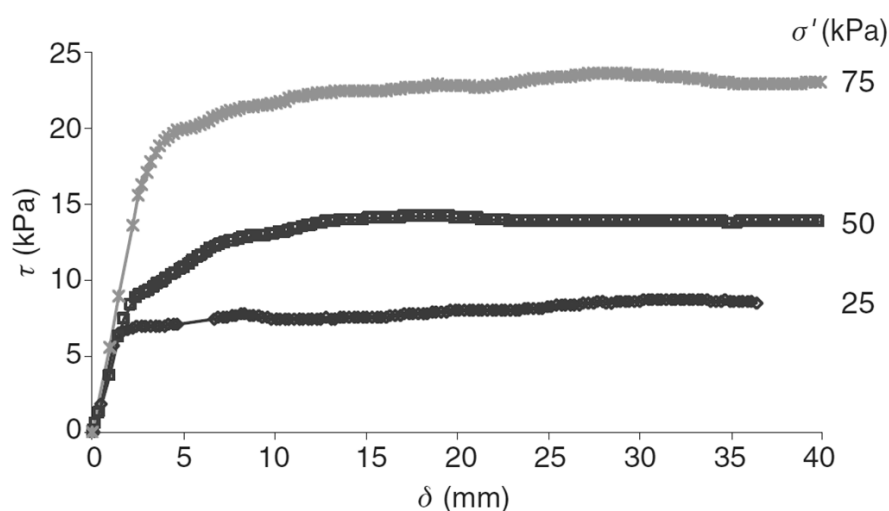


Fig. 8.2. Risultati di un test con la scatola di taglio diretto (GTr-GS): sforzo di taglio in funzione dello spostamento per tre differenti valori di sollecitazione normale. (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

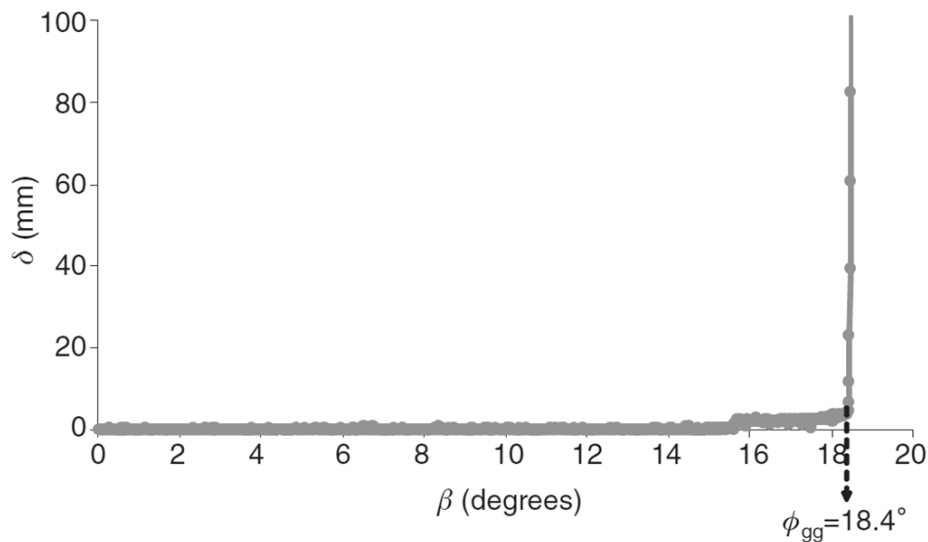


Fig. 8.3. Risultati di un test con il piano inclinato (GTr-GS): spostamento in funzione dell'angolo di pendenza per un carico normale di 5.7 kPa. (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

Per condizioni di prova rigorose, si può considerare che gli angoli di attrito limite determinati con i due tipi di test siano compatibili. Tuttavia si devono tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- I cinematismi nei test con la scatola di taglio diretto e in quelli con il piano inclinato sono considerevolmente differenti. Nei test con la scatola di taglio diretto non si osserva alcuna tensione di rammollimento. Tuttavia, con il piano inclinato non si può misurare l'attrito residuo in nessuna condizione dato che sorge uno scorrimento non-stabilizzato ad un valore costante τ/σ' (per mostrare la tensione di rammollimento è necessario ridurre l'inclinazione β una volta che è stata rilevata l'instabilità).
- Con il piano inclinato l'angolo di attrito limite previsto dalla Normativa Europea si ottiene generalmente per i test di interfacce terreno – geosintetico con uno spostamento di 50 mm. Esso rimane particolarmente alto, almeno per le interfacce geosintetico – geosintetico. Inoltre, le informazioni sul comportamento disponibili nella fase che precede lo scorrimento non-stabilizzato (Fase 2 di transizione), le quali possono essere piuttosto diverse da un geosintetico all'altro, non vengono prese in considerazione. Il comportamento durante questa fase potrebbe servire per distinguere tra le varie

interfacce che forniscono lo stesso valore di angolo di attrito ϕ_{gg} (Fig. 8.4). Questa osservazione spinge ad un confronto del comportamento durante la fase di piccoli spostamenti che precede la fase di scorrimento limite caratterizzata da un angolo ϕ_{gg} .

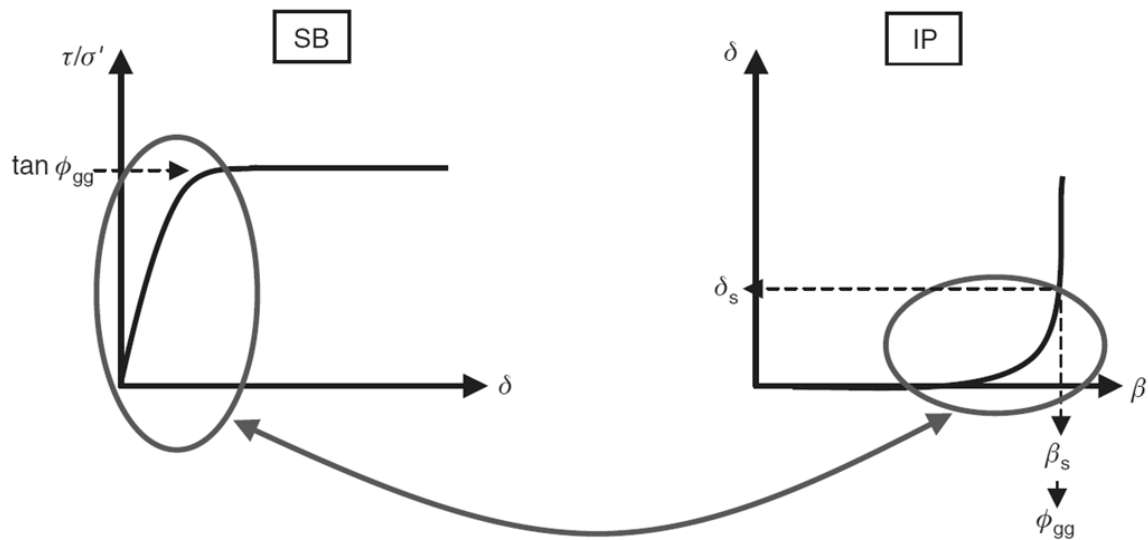


Fig. 8.4. Analisi della fase di scorrimento graduale precedente lo stato limite che generalmente viene trascurata; SB = scatola di taglio diretto, IP = piano inclinato. (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

La tensione normale σ' decresce durante tutta la prova con il piano inclinato e viene scelto il parametro $\tau/\sigma' = \tan\beta$ per consentire il confronto con i test svolti con la scatola di taglio. In Fig. 8.5 sono rappresentate le relazioni (ottenute dalle Fig. 8.2 e 8.3) tra lo spostamento δ e il rapporto di tensioni τ/σ' per i test con il piano inclinato e per quelli con la scatola di taglio per l'interfaccia GTr-GS. I risultati presentati sono stati ottenuti con una sollecitazione normale $\sigma' = 25, 50$ e 75 kPa per la scatola di taglio diretto, mentre nei test con il piano inclinato la sollecitazione normale varia da 5.7 kPa ($\beta = 0$) per $\delta = 0$ a 5.4 kPa ($\beta_s = 18.4$) per $\delta = 50$ mm. Lo spostamento corrispondente al massimo attrito (δ_s) sembra considerevolmente più piccolo nei test con il piano inclinato e questo fatto non è necessariamente dovuto ai valori inferiori di sollecitazione normale. La configurazione della scatola di taglio diretto non consente di svolgere test per bassi valori di sollecitazione normale ($\sigma' = 5.4$ kPa).

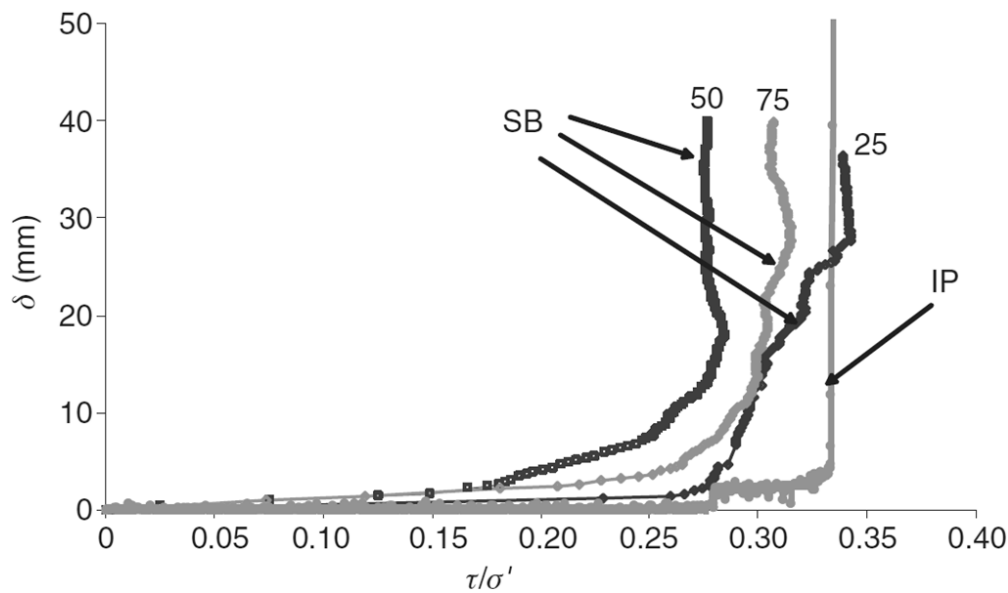


Fig. 8.5. Tentativo di confrontare i risultati ottenuti con il piano inclinato con quelli ottenuti con la scatola di taglio nello stesso diagramma: interfaccia GTr-GS. (Reyes Ramirez & Gourc_2003)

La conoscenza dello spostamento (δ_s) è essenziale quando si cerca di comprendere una accurata relazione con l'attrito di interfaccia per un calcolo elaborato delle deformazioni di sistemi di rivestimento con geosintetici su pendii, per esempio utilizzando il metodo agli elementi finiti.

Nei seguenti diagrammi sono illustrati i risultati di alcune misurazioni svolte da Lalarakotoson et al. (1999), ottenute con il piano inclinato e con la scatola di taglio diretto standard (0.3 cm x 0.3 cm), testando varie interfacce terreno – geosintetico tipiche dei sistemi di rivestimento:

- Loose sand – Gt TGX: interfaccia composta da una sabbia sciolta e da un geotessuto non tessuto agugliato in polipropilene.
- Dense sand – Gt TGX: interfaccia composta da una sabbia densa e da un geotessuto non tessuto agugliato in polipropilene.
- Sand – Gt TGA: interfaccia composta da una sabbia e da un geotessuto in polietilene tereftalato.
- Sand – Gg TFM: interfaccia composta da sabbia e da una geogriglia biassiale in polietilene tereftalato con una maglia 2 cm x 2 cm e con fili trasversali spessi 0.2 cm.

I parametri in questione sono stati analizzati in funzione del valore di tensione normale σ . È da notare, come è già stato detto, che il piano inclinato è stato utilizzato per bassi valori di tensione normale (circa 5kPa), mentre la scatola di taglio diretto per valori di σ elevati (25÷100 kPa).

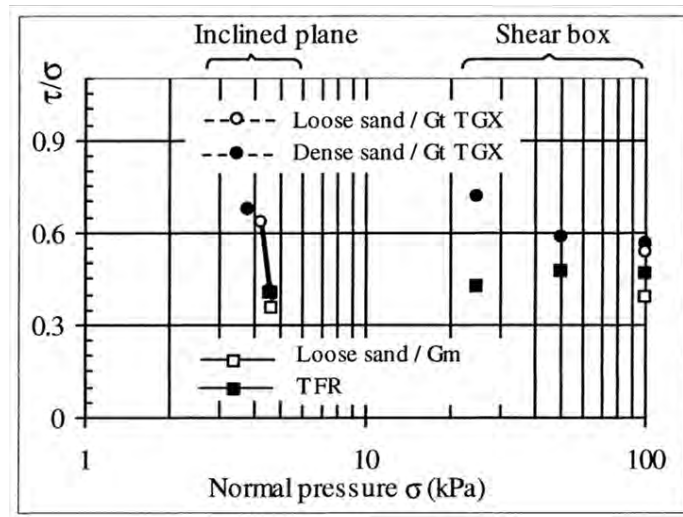


Fig. 8. Confronto delle misurazioni di attrito residuo. (S. Lalarakotoson et al._1999)

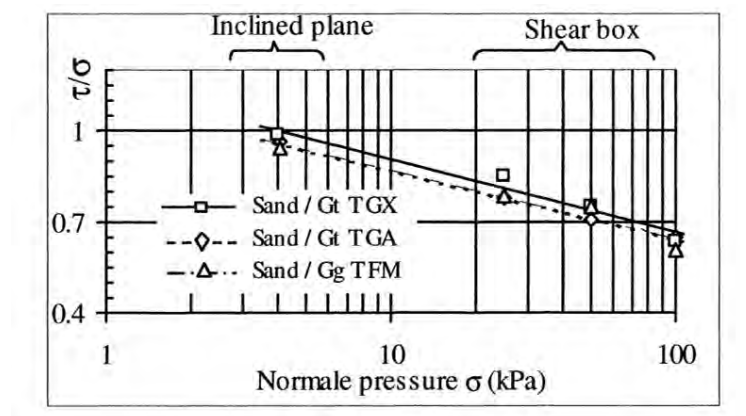


Fig. 9. Confronto delle misurazioni di massimo attrito nel caso di sabbia densa. (S. Lalarakotoson et al._1999)

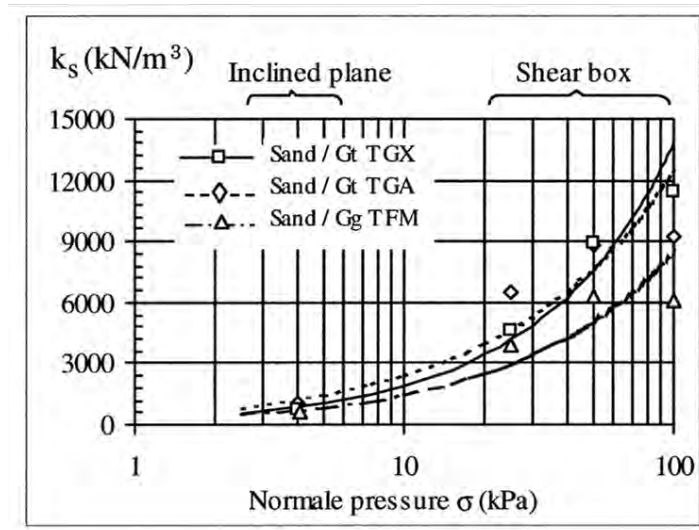


Fig. 10. Confronto delle misurazioni di resistenza a taglio nel caso di sabbia densa. (S. Lalarakotoson et al., 1999)

Dai risultati riportati si possono anche ricavare informazioni sulla influenza del carico normale sul comportamento di attrito delle interfacce esaminate. Infatti, in Fig. 8 si nota come il valore dell'angolo di attrito residuo ϕ_{gr} risulta essere indipendente dalla tensione normale applicata all'interfaccia. Mentre il valore massimo dell'angolo di attrito ϕ_{gp} diminuisce all'aumentare della tensione σ (Fig. 9). È quindi di fondamentale importanza, nel processo di progettazione di un sistema di rivestimento, considerare il valore attuale di σ . Per quanto riguarda la rigidità di attrito (Fig. 10), i valori trovati per le differenti interfacce con il piano inclinato sono abbastanza simili, a differenza di quelli trovati con la scatola di taglio. Questo comportamento è dovuto alla tendenza del taglio a collocarsi nella massa di sabbia ed al minore effetto della struttura interna del geosintetico a causa della bassa pressione di confinamento.

8.2. APPARECCHIO ANULARE DI TAGLIO DIRETTO – SCATOLA DI TAGLIO DIRETTO

La Fig.8.6 presenta la tipica relazione tra la sollecitazione di taglio e lo spostamento dovuto al taglio per una interfaccia geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto testata con l'Apparecchio Anulare di Taglio Diretto utilizzato da Stark et al. (1996). Il valore

della resistenza al taglio di picco dell'interfaccia si mobilita solitamente per uno spostamento di scorrimento di 4÷8 mm. Si può inoltre vedere in Fig. 8.6 che è richiesto uno spostamento di 500÷750 mm per mobilitare la resistenza al taglio residua di questa interfaccia. Questo spostamento può essere maggiore dello spostamento che si può ottenere con i test svolti con la scatola di taglio diretto di grandi dimensioni. Pertanto, i dispositivi di taglio diretto possono sovrastimare il valore di resistenza al taglio residuo delle interfacce geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto.

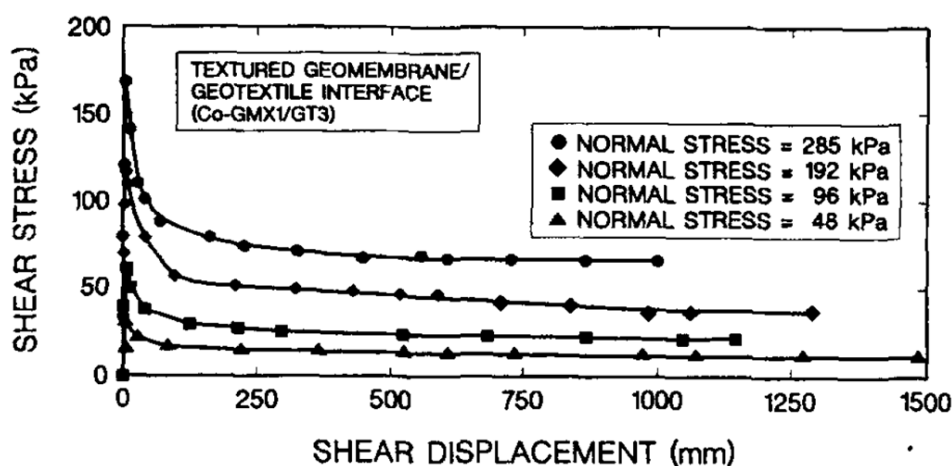


Fig. 8.6. Tipici risultati di un test con un Apparecchio Anulare di Taglio Diretto per una interfaccia geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto. (Stark et al. 1996)

La Fig. 8.7 riporta gli involuipi di resistenza al taglio di picco e di resistenza al taglio residua per l'interfaccia geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto descritta in Fig. 8.6. Si può vedere che gli involuipi di resistenza sono approssimativamente lineari all'interno dell'intervallo di tensione testato. Di conseguenza, gli involuipi di resistenza di picco e di resistenza residua possono essere rispettivamente rappresentati da un angolo di attrito di 32° e 13°. Pertanto, le perdite di resistenza dopo il picco corrispondono ad una riduzione dell'angolo di attrito di 19° o del 60%.

Per uno scopo di confronto in Fig. 8.7 è riportato l'involuppo di resistenza corrispondente ad uno spostamento dovuto al taglio di 50 mm nell'apparecchio anulare di taglio diretto. Il valori di resistenza al taglio rappresentati sono stati ottenuti dalla Fig. 8.6 ad uno spostamento di 50 mm. con una scatola di taglio diretto di grandi dimensioni (30

cm x 30 cm) di solito si possono raggiungere spostamenti tra 25 mm e 75 mm. Pertanto, se si svolgesse un test con l'apparecchio anulare di taglio diretto o con la scatola di taglio diretto per uno spostamento di 50 mm, l'involuppo di resistenza corrispondente sarebbe significativamente più elevato rispetto all'involuppo di resistenza residua. Questo si tradurrebbe in una sovrastima della resistenza al taglio residua di interfaccia.

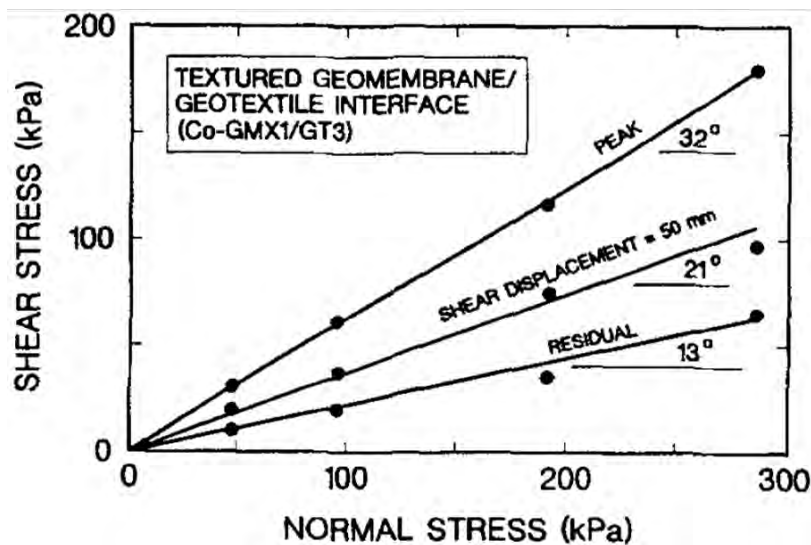


Fig. 8.7. Tipici involuppi di resistenza ottenuti con un Apparecchio Anulare di Taglio Diretto per una interfaccia geomembrana ruvida – geotessuto non tessuto. (Stark et al. 1996)

8.3. APPARECCHIO CILINDRICO DI TAGLIO DIRETTO – SCATOLA DI TAGLIO DIRETTO

Con lo scopo di convalidare l'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto (Cap.4) sviluppato per determinare la resistenza al taglio di una interfaccia di geosintetici a grandi spostamenti, A. L. Moss & L. R. Anderson (2000) hanno svolto un confronto tra i risultati ottenuti con una serie di test degli stessi materiali geosintetici sotto le stesse condizioni utilizzando una scatola di taglio diretto di grandi dimensioni (0.3 m x 0.3 m) e l'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto (0.3 m x 0.33 m). In modo da ottenere con la scatola di taglio diretto degli spostamenti paragonabili agli spostamenti disponibili con l'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto è stata utilizzata la tecnica di riportare la scatola di taglio diretto nella posizione iniziale e di ripetere il test più volte.

8.3.1. Geomembrana HDPE liscia / geotessuto non tessuto

La Fig. 8.8 mostra come varia l'angolo di attrito in funzione dello spostamento sia per l'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto e sia per la scatola di taglio diretto. È presente un salto iniziale dell'angolo di attrito di circa $1\div 2^\circ$ nei primi pochi cm di spostamento, per entrambi i metodi; poi l'attrito dell'interfaccia geomembrana liscia in HDPE – geotessuto non tessuto si stabilizza. Dopo un po' di spostamento la resistenza al taglio di picco e quella residua sono simili per questa interfaccia.

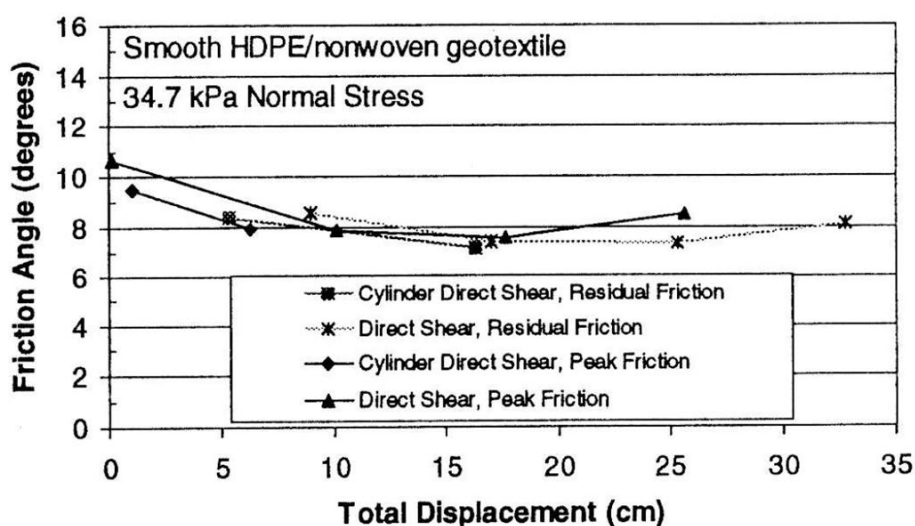


Fig. 8.8. Confronto dei risultati dei test con l'Apparecchio cilindrico di Taglio Diretto e con la Scatola di Taglio Diretto: angolo di attrito in funzione dello spostamento per una interfaccia geomembrana liscia HDPE – geotessuto non tessuto . (Moss & Anderson_2000)

La Fig. 8.9 presenta l'involuppo di resistenza al taglio residua di Mohr-Coulomb ottenuto con il dispositivo cilindrico di taglio diretto, insieme ai singoli test di confronto svolti per un simile valore di spostamento con l'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto e con la scatola di taglio diretto. Questi due punti rappresentano gli spostamenti comparabili pari a 16.3 cm e 17.0 cm, rispettivamente, testati con lo stesso valore di sollecitazione normale per i due metodi. L'angolo di attrito calcolato con l'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto è pari a 7.2° , mentre quello calcolato con la scatola di taglio

diretto è pari a 7.0° . La somiglianza è eccellente. I dati ottenuti con entrambe le procedure di test hanno una dispersione comparabile e i risultati ottenuti con l'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto si possono confrontare molto bene con quelli ottenuti con la scatola di taglio diretto di grandi dimensioni per le interfacce geomembrana liscia in HDPE – geotessuto non tessuto.

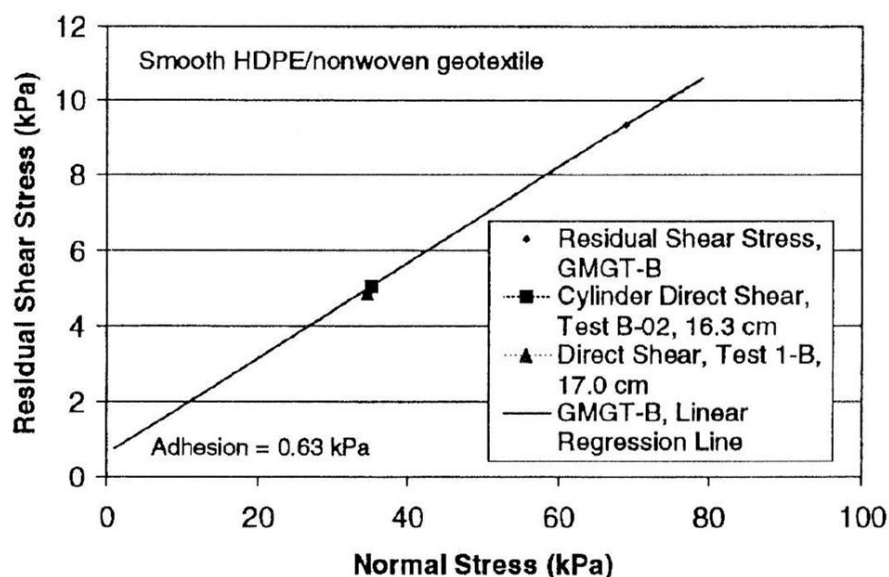


Fig. 8.9. Confronto dei risultati dei test con l'Apparecchio cilindrico di Taglio Diretto e con la Scatola di Taglio Diretto per uno spostamento simile e riportati sull'involucro di resistenza di Mohr-Coulomb ottenuto con la Scatola di Taglio Diretto per una interfaccia geomembrana liscia HDPE – geotessuto non tessuto.

(Moss & Anderson_2000)

8.3.2. Geomembrana HDPE liscia / Geomembrana HDPE liscia

La combinazione di due geomembrane lisce non rappresenta una comune interfaccia, ma viene utilizzata come divisore nelle costruzioni in geosintetico, nella realizzazione di cuscinetti per l'isolamento sismico nella costruzione di edifici ed è, inoltre, di interesse per scopi di confronto tra i test svolti con l'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto e con la scatola di taglio diretto. La Fig. 8.10 mostra l'andamento dell'angolo di attrito in funzione dello spostamento per una interfaccia geomembrana HDPE liscia – geomembrana HDPE liscia. Si nota l'andamento pianeggiante della resistenza al taglio residua per entrambi i metodi per spostamenti maggiori di 10 cm / 20 cm.

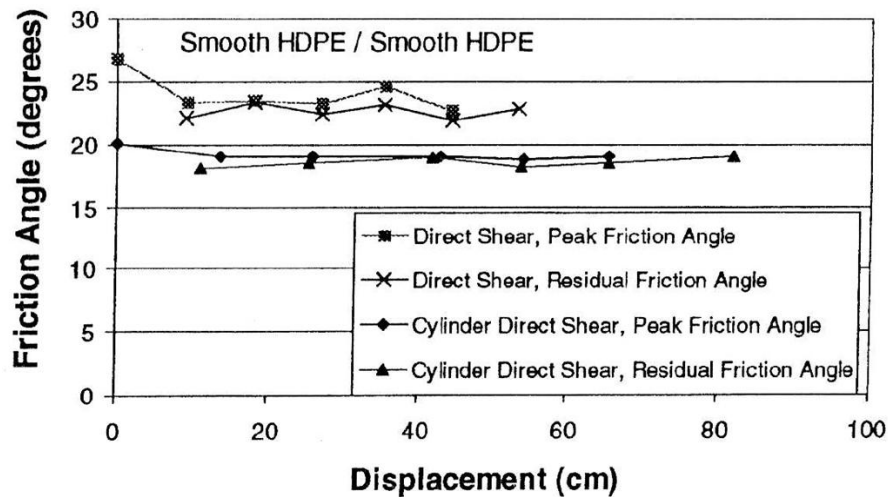


Fig. 8.10. Confronto dei risultati dei test con l'Apparecchio cilindrico di Taglio Diretto e con la Scatola di Taglio Diretto: angolo di attrito in funzione dello spostamento per una interfaccia geomembrana liscia HDPE – geomembrana liscia HDPE. (Moss & Anderson_2000)

In Fig. 8.11 è rappresentato l'involuppo di resistenza residua di Mohr-Coulomb ottenuto con il dispositivo cilindrico di taglio diretto, insieme ai punti di prova selezionati per uno spostamento simile per entrambi i metodi di prova. Lo stretto raggruppamento dei punti mostra l'eccellente confronto dei due metodi di prova per l'interfaccia geomembrana HDPE liscia – geomembrana HDPE liscia.

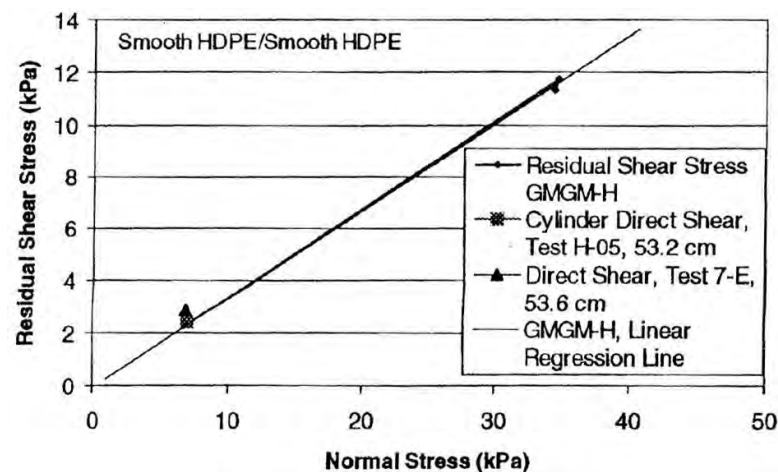


Fig. 8.11. Confronto dei risultati dei test con l'Apparecchio cilindrico di Taglio Diretto e con la Scatola di Taglio Diretto per uno spostamento simile e riportati sull'involuppo di resistenza di Mohr-Coulomb ottenuto con la Scatola di Taglio Diretto per una interfaccia geomembrana liscia HDPE – geomembrana liscia HDPE. (Moss & Anderson_2000)

I test svolti con l'Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto presentati in questo paragrafo sono stati svolti con una sollecitazione normale di 7.0 kPa e hanno fornito un valore medio di resistenza al taglio residua di 2.4 kPa. I test equivalenti svolti con la scatola di taglio diretto di grandi dimensioni (0.3 m x 0.3 m) hanno fornito un valore medio di resistenza al taglio residua pari a 2.9 kPa. La differenza di resistenza residua di 0.5 kPa è rappresentata dalla distanza tra le curve presentate in Fig. 8.10, con i test svolti con la scatola di taglio diretto aventi i valori maggiori. Questa differenza riscontrata è da imputare alla nascita di un problema legato alla rigidità delle geomembrane a bassi valori di sollecitazione normale nel caso che una geomembrana (HDPE) venga testata come materiale di interfaccia esterno in un Apparecchio Cilindrico di Taglio Diretto. Infatti, se si svolge un test con una interfaccia geomembrana – geomembrana la geomembrana esterna, che è avvolta attorno al fusto e ancorata lungo il bordo, utilizza un po' dello sforzo normale applicato sul perimetro esterno del campione cilindrico di geosintetici per vincere la rigidità della geomembrana stessa. Di conseguenza la sollecitazione normale realmente applicata sulla interfaccia risulta essere inferiore alla sollecitazione normale applicata all'esterno del campione (mediante la membrana in gomma di lattice). Pertanto, questo problema implica una sottostima del valore di resistenza al taglio residuo, tanto più marcata quanto più basso è il valore della sollecitazione normale. Il problema esposto è già stato trattato nel Cap. 4.

9. SPERIMENTAZIONE CON IL DISPOSITIVO DELL'UNIVERSITA' DI PADOVA

9.1. DESCRIZIONE DELL'APPARECCHIATURA

Il dispositivo in dotazione al laboratorio di geotecnica dell'Università di Padova presso il dipartimento ICEA è stato progettato e sviluppato da l'Ing. Paolo Pavanello e il Prof. Paolo Carrubba (2012) nell'ambito di un finanziamento per progetti di Ateneo. Esso è costituito da un piano inclinato di alluminio sopra il quale scorre una slitta (o blocco) in acciaio. Il dispositivo è installato su una tavola vibrante monodirezionale, mossa da un impianto oleodinamico servo-controllato, che consente di replicare sia segnali sismici che impulsi regolari, come ad esempio delle sinusoidi. Il sistema così composto consente di indagare la resistenza di interfaccia sotto sollecitazioni sia statiche che dinamiche.

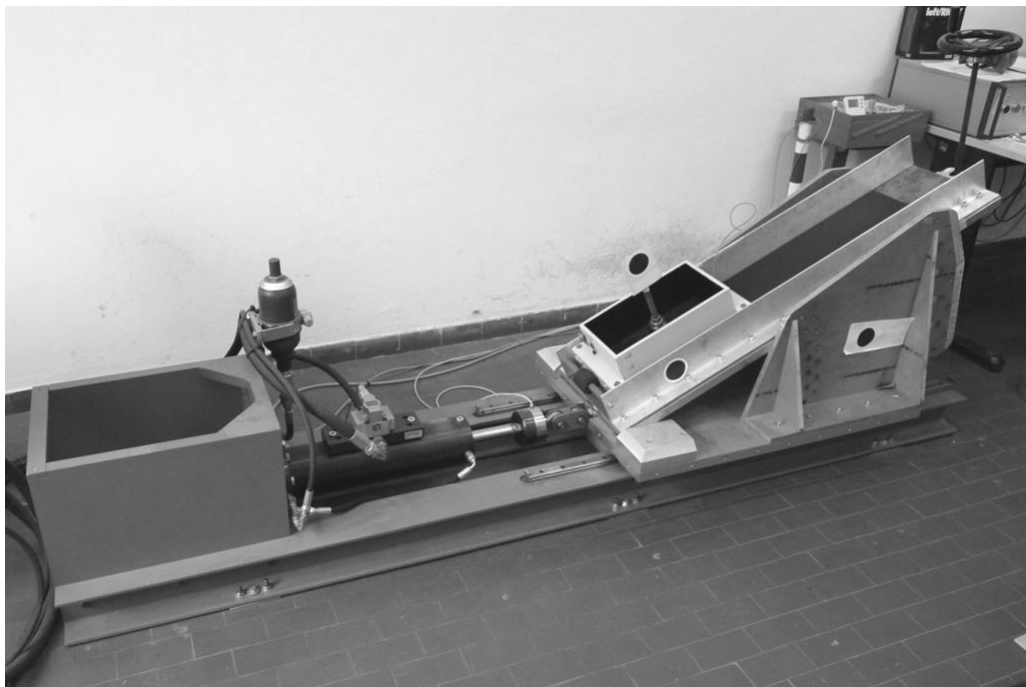


Fig. 9.1. l'apparecchiatura sperimentale dell'Università di Padova (ICEA).

9.1.1. Caratteristiche del Piano Inclinato

Il piano inclinato ha una lunghezza 1.10 m ed una larghezza di 0.24 m; la slitta presenta una lunghezza di 0.35 m e larghezza di 0.20 m. L'inclinazione del piano può essere fatta variare manualmente tra 0° e circa 45°. Il piano metallico può essere fissato, nel caso delle prove con la tavola vibrante, ad inclinazioni variabili tra $0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$ rispetto all'orizzontale, ad intervalli fissi di 2.5°. Su tale piano viene fissato uno dei geosintetici costituenti l'accoppiamento in esame. E' stata poi predisposta una slitta mobile, da porsi al di sopra del piano inclinato e sul cui fondo viene vincolato il secondo geosintetico. La massa complessiva della slitta può essere fatta variare, mediante l'inserimento di piastre metalliche, in modo da raggiungere pressioni di contatto comprese tra circa 4 kPa e 14 kPa. La slitta è dotata di guide laterali che garantiscono la linearità del moto, senza peraltro indurre attriti rilevanti (Fig. 9.4).

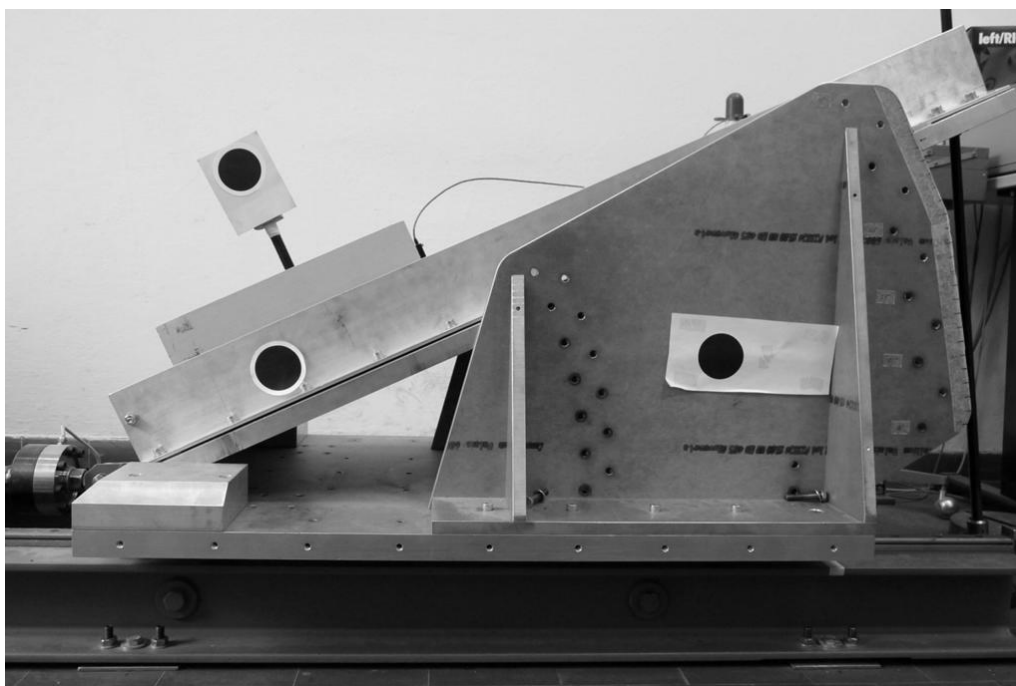


Fig. 9.2. Particolare del piano inclinato del dispositivo sperimentale dell'Università di Padova (ICEA).

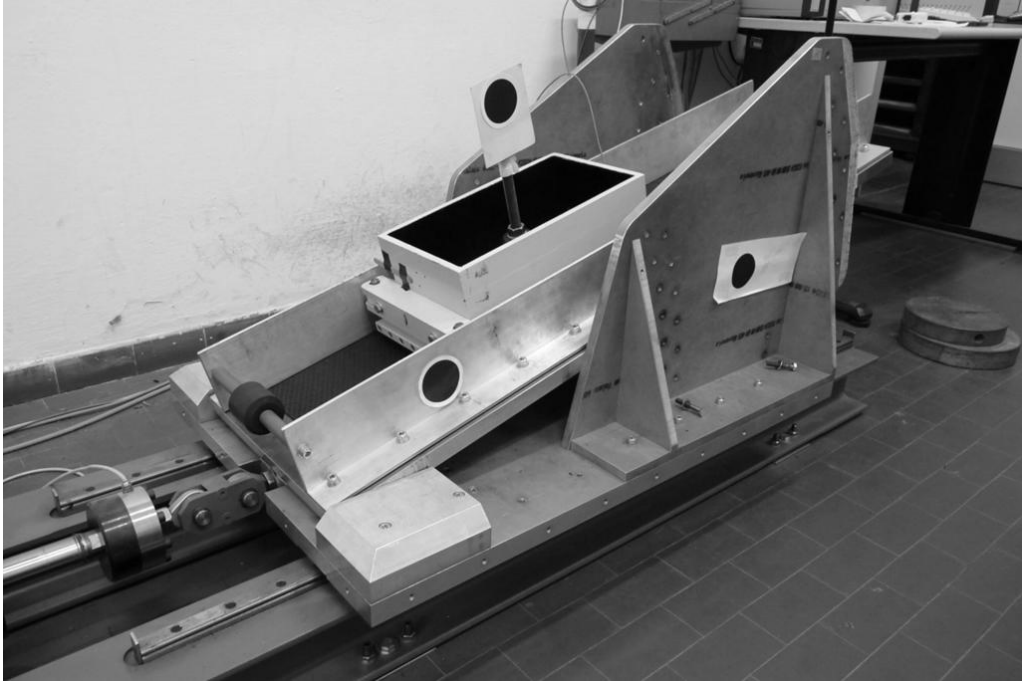


Fig. 9.3. Particolare del piano inclinato del dispositivo sperimentale dell'Università di Padova (ICEA).

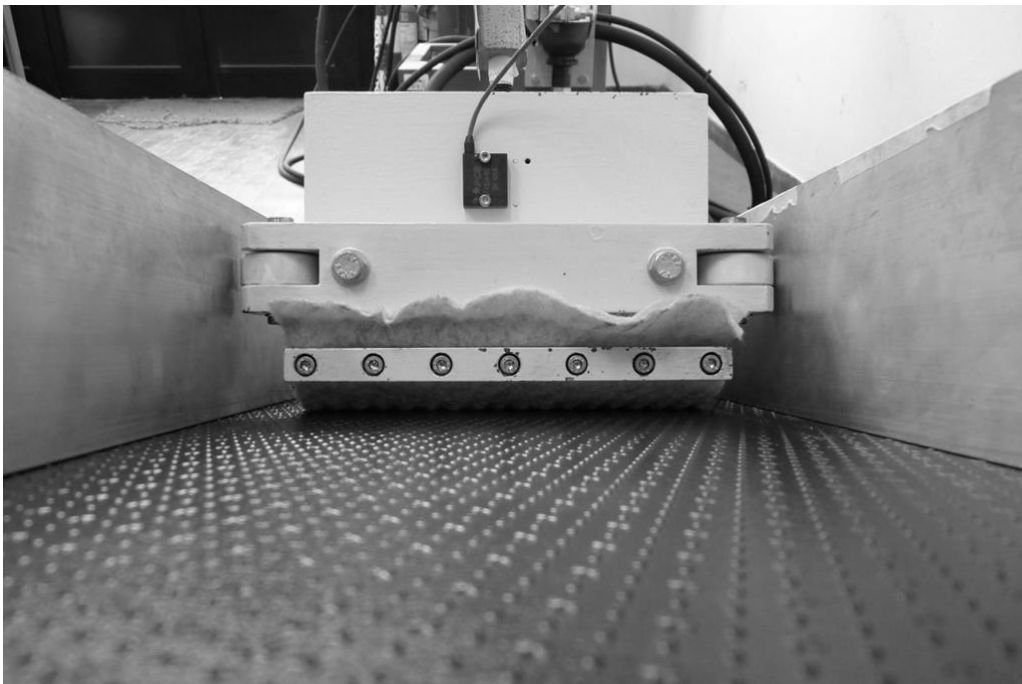


Fig. 9.4. Particolare della slitta del dispositivo sperimentale dell'Università di Padova (ICEA).



Fig. 9.5. Particolare del sistema di inclinazione del piano ad avvitamento manuale del dispositivo sperimentale dell'Università di Padova (ICEA).

La scelta adottata di utilizzare un sistema di inclinazione del piano ad avvitamento manuale (Fig. 9.5) consente, durante lo svolgimento di una prova, di arrestare l'inclinazione del piano nell'istante desiderato e se necessario di riprendere l'inclinazione del piano controllandone la velocità di inclinazione a seconda del comportamento della slitta. Questa soluzione risulta molto utile nel caso l'interfaccia da analizzare presenti un comportamento viscoso, e di conseguenza non risulta facile determinare il valore di attrito di primo distacco.

9.1.2. Caratteristiche della Tavola Vibrante

L'apparecchiatura utilizzata nella ricerca consiste in una tavola vibrante di piccole dimensioni volta a riprodurre la componente orizzontale di sismi caratterizzati da intensità medio-alte. Essa è di tipo monodirezionale orizzontale e possiede uno schema modulare facilmente adattabile a diverse esigenze sperimentali, quale quella relativa allo scorrimento di un blocco ad attrito su di un piano inclinato.

L'elemento principale è costituito da una base mobile, di larghezza 600 mm e lunghezza 900 mm, vincolata con guide lineari a sfere al sistema di contrasto, ove trova sede l'attuatore oleodinamico (Fig. 9.6). Particolare attenzione è stata prestata nel garantire un'elevata rigidità del sistema al fine di prevenire la generazione di vibrazioni parassite durante il moto sismico della tavola.

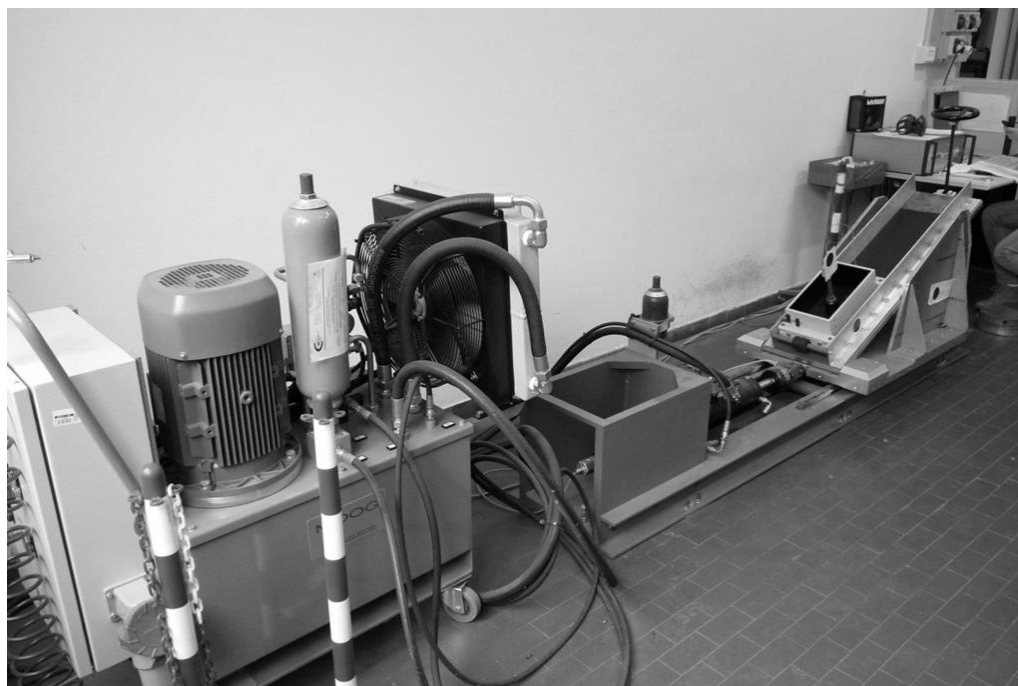


Fig. 9.6. Particolare della centrale oleodinamica del dispositivo sperimentale dell'Università di Padova (ICEA).

Il servo-attuatore è alimentato da una centrale oleodinamica dotata di una pompa capace di erogare una portata di 22 l/min con una pressione massima di 210 Bar, ed è in grado di

garantire spostamenti orizzontali massimi di ± 125 mm e corsa massima peak to peak di 250 mm. La massa complessiva movimentabile, con accelerazione di picco pari a 1g, è di 200 Kg. La frequenza garantita dal sistema di alimentazione è di 5 Hz in corrispondenza del picco di accelerazione.

L'intero impianto è gestito da scheda elettronica collegata ad un personal computer. Il movimento della tavola viene comandato, attraverso il pistone, dalla scheda elettronica che agisce sull'apertura e sulla chiusura della servo-valvola che regola l'afflusso dell'olio in pressione dalla centrale all'attuatore.

Lo spostamento del pistone viene monitorato in continuo da un trasduttore di posizione di alta precisione. In definitiva, al fine di generare un pre-determinato moto della tavola occorre fornire alla scheda di controllo la corrispondente time-history degli spostamenti. Nell'ambito dei limiti delle caratteristiche meccaniche dell'apparecchiatura, è possibile generare moti sia regolari che irregolari, come ad esempio il moto sismico; a tal riguardo, si procede all'implementazione di terremoti storici presenti nei database nazionali ed internazionali.

9.2. PROCEDURE UTILIZZATE

Come è già stato detto il dispositivo dell'Università di Padova (ICEA) è composto da un piano inclinato posizionato sopra ad una tavola vibrante. Dunque l'utilizzo del piano inclinato non si limita allo studio classico dell'attrito con questo dispositivo fisso al suolo ma si estende allo studio delle condizioni tipiche dei pendii sottoposti a sollecitazioni dinamiche. Quest'ultimo caso è di fondamentale importanza, si ricorda a tal proposito che nella letteratura tecnica sono riportati diversi casi di rottura delle barriere a seguito di eventi sismici, in particolar modo delle coperture dove i geosintetici sono soggetti a basse pressioni di confinamento.

Lo studio delle interfacce di geosintetici con il macchinario in questione si suddivide fondamentalmente in due casi ben distinti:

- *Prove a tavola ferma*
- *Prove con la tavola in movimento*

A tavola ferma, lo schema di prova permette di eseguire prove di attrito statico e radente ($\tan \varnothing_{stat}$ e $\tan \varnothing_{din}$). L'inclinazione del piano può essere fatta variare in modo regolare, a bassa velocità (1-2 gradi al minuto), fino all'istante di inizio del moto di scivolamento della slitta superiore, consentendo quindi la misura del coefficiente di attrito statico associato alla condizione di equilibrio limite (β_{lim}):

$$\tan \varnothing_{stat} = \tan \beta_{lim} \quad (9.1)$$

Nella fase di slittamento del blocco, a tavola ferma, dalle misure di accelerazione della slitta (a_{blocco}), noto l'angolo di inclinazione del piano, è possibile risalire al coefficiente di attrito radente:

$$\tan \varnothing_{din} = \frac{\sin \beta_{lim} - \frac{a_{blocco}}{g}}{\cos \beta_{lim}} \quad (9.2)$$

Nelle prove con la tavola in moto (schema di prova in condizioni dinamiche), invece, si fissa l'inclinazione del piano ad un valore inferiore a quello limite per lo scivolamento del blocco, e si sottopone il sistema ad una sollecitazione di tipo sismico o ad una sollecitazione regolare (sinusoide), rilevando accelerazioni e spostamenti indotti nella slitta. Per le misure di accelerazione si è fatto uso di un accelerometro piezoelettrico monoassiale fissato sul lato superiore della slitta, come si può vedere in Fig. 9.4.

Nell'arco della sperimentazione, durante lo svolgimento delle prove con sollecitazione dinamica, ma anche durante le prove di scorrimento per la determinazione dell'attrito radente, oltre all'utilizzo dell'accelerometro per la registrazione delle accelerazioni e degli spostamenti, è stato utilizzato anche un sistema di registrazione video ed una successiva elaborazione dei video con Matlab per l'estrapolazione dei dati. Con una videocamera vengono registrate le posizioni di due punti fissi individuati da due dischetti neri fissati uno sulla tavola e uno sulla slitta (Fig. 9.2), con una velocità di acquisizione di 30 fotogrammi al secondo. In seguito, si utilizza un programma di elaborazione dei dati sviluppato con Matlab dall'Ing. Paolo Pavanello che divide il video nei singoli fotogrammi e per ogni fotogramma individua la posizione dei pallini approssimandola ad un punto coincidente con il centro dei dischetti. Si ottiene così l'intero andamento dello spostamento nel tempo della slitta e della tavola con un sistema indipendente dai due oggetti in questione, e quindi privo da errori di misurazione. In seguito tramite una elaborazione dei dati in Excell si possono ricavare le relative velocità e accelerazioni. Il

sistema video risulta molto utile soprattutto nell'analisi delle prove con sollecitazioni dinamiche dove, oltre determinati valori di accelerazione, la slitta scorre sul piano (fissato alla tavola) e quindi si genera uno spostamento relativo tra la tavola e la slitta.

Nello svolgimento delle prove con la "Force Procedure" con il dispositivo dell'Università di Padova, si adotta una piccola variante che non comporta alcuna modifica dal punto di vista concettuale della prova, ma che anzi consente di considerare l'eventuale viscosità che caratterizza l'interfaccia di geosintetici da analizzare. In sostituzione al cavo, che in seguito ad un certo valore di scorrimento della slitta si tende e misura la forza necessaria a trattenere la slitta, viene adottato un dinamometro posto a fine corsa (Fig.9.7). Quando la slitta, dopo un predeterminato valore di scorrimento, si appoggia sul dinamometro, esso comincia a misurare la forza necessaria a trattenere la slitta. La lancetta del dinamometro impiega un po' di tempo per stabilizzarsi su un valore fisso di forza a causa del fatto che i materiali geosintetici che compongono l'interfaccia analizzata sono caratterizzati da fenomeni da comportamento viscoso, più o meno evidente a seconda della tipologia di interfaccia. Registrando la forza indicata dal dinamometro ad intervalli costanti di tempo e a diverse inclinazioni, dall'equilibrio delle forze in gioco si riesce ad ottenere una definizione dell'attrito che considera gli aspetti appena citati.

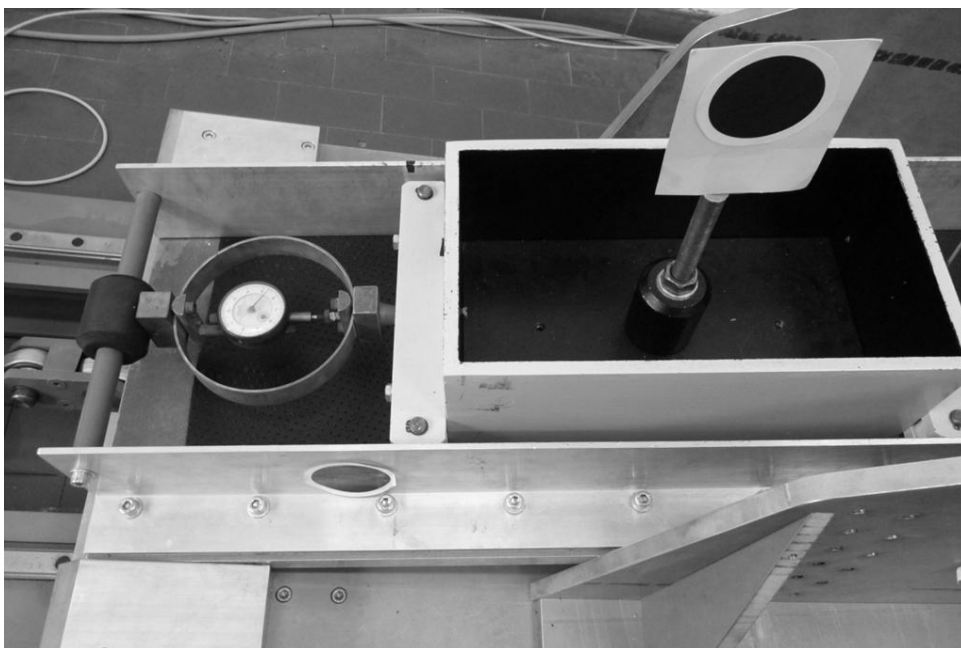


Fig. 9.7. "Force Procedure" con il dispositivo sperimentale dell'Università di Padova (ICEA).

9.3. MATERIALI TESTATI

Nell'arco della sperimentazione svolta nel laboratorio di geotecnica dell'Università di Padova (ICEA) è stato preso in considerazione un tipico strato di copertura di una discarica composto da tre geosintetici sovrapposti. Esso è costituito a partire dallo strato superiore da una geostuoia antierosione rinforzata, da un geocomposito drenante e da una geomembrana bugnata per l'impermeabilizzazione. Sono state quindi analizzate le due interfacce che compongono lo strato di copertura considerato:

- Interfaccia superiore: *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*
- Interfaccia inferiore: *GCD – GMB bugnata*

9.3.1. *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*

Si tratta di una interfaccia composta superiormente da una geostuoia antierosione rinforzata (Fig. 9.8) ed inferiormente da un geocomposito drenante (Fig.9.9). La geostuoia testata è una *MACMAT R* prodotta dal Gruppo Maccaferri, caratterizzata da una struttura tridimensionale in filamento di polietilene, avente struttura a doppia cuspide in grado di trattenere al proprio interno il suolo, essendo caratterizzata da un indice dei vuoti superiore al 90%. Essa è inoltre fissata mediante un processo termico, già durante la fase produttiva, ad una geogriglia in poliestere con rivestimento polimerico che funge da elemento di rinforzo. La geogriglia ha uno spessore nominale di 12 (\pm 2) mm, una massa areica di 800 g/m² e una resistenza a trazione di circa 200 KN/m.



Fig. 9.8. Geostuoia antierosione rinforzata: *MACMAT R*.

Il geocomposito drenante testato è un *Interdrain GMG 512* prodotto dal gruppo Geosintex, costituito da una georete in polietilene ad alta densità accoppiata a due geotessili non tessuti in polietilene, dotato di elevata capacità drenante anche ad elevate pressioni e bassi gradienti idraulici. In particolare il geocomposito svolge le funzioni di drenaggio, filtrazione e separazione.



Fig. 9.9. Geocomposito drenante: *Interdrain GMG 512*.

Caratteristiche	Norma	u.m.	Valore medio
Georete			
Tipo di polimero			Polietilene ad alta densità (HDPE)
Spessore a 2 kPa / 200 kPa	ISO 9863-1	mm	5,2/4,8
Densità	ASTM D 1505	g/cm ³	>0,94
Carbon black	ASTM D 4218	%	1,2-2,5
Geotessile filtrante			
Tipo di polimero			Polipropilene (PP)
Massa areica	ISO 9864	g/m ²	120
Cone Drop	ISO 13433	mm	30
CBR	ISO 12236	kN	1,4
Permeabilità normale al piano	ISO 11058	l/(m ² s)	90
Opening size	ISO 12956	µm	< 170
Geocomposito			
Massa areica	ISO 9864	g/m ²	890
Spessore a 2 kPa / 200 kPa	ISO 9863-1	mm	5,8/5,2
Resistenza a trazione a rottura MD/CD	ISO 10319	kN/m	20/17
Allungamento a rottura MD/CD	ISO 10319	%	40/50
Cone Drop	ISO 13433	mm	10
CBR	ISO 12236	kN	3,6
Resistenza allo schiacciamento	ASTM D 1621	kPa	>700

Fig. 9.10 Scheda tecnica *Interdrain GMG 512* (Geosintex).

I geotessuti non tessuti che compongono le due facce del geocomposito drenante *Interdrain GMG 512* non sono fissati alla georete nello stesso modo, infatti il GCD risulta di fatto caratterizzato da due differenti superfici. In Fig. 9.11 viene illustrata la superficie superiore a contatto con la geostuoia antierosione rinforzata, mentre in Fig. 9.12 viene illustrata la superficie inferiore a contatto con la geomembrana bugnata. Si può notare come la superficie superiore risulta più liscia ed omogenea, mentre quella inferiore risente in maniera più evidente della presenza della georete risultando complessivamente meno liscia.

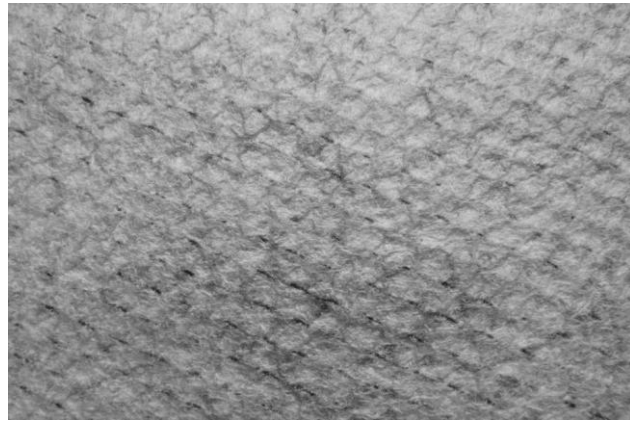


Fig. 9.11. Particolare del geocomposito drenante *Interdrain GMG 512*: lato a contatto con la geostuoia antierosione rinforzata.

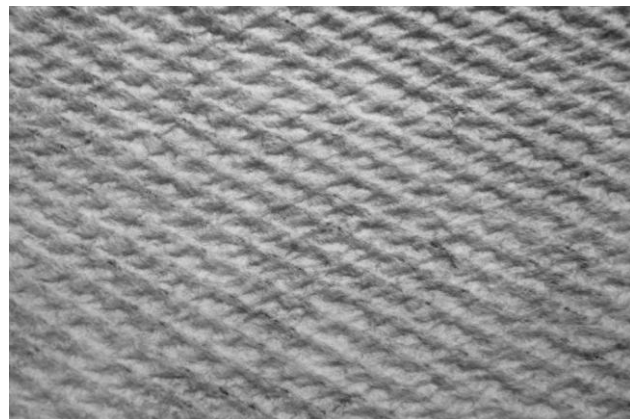


Fig. 9.12. Particolare del geocomposito drenante *Interdrain GMG 512*: lato a contatto con la geomembrana bugnata.

9.3.2. GCD – GMB bugnata

Si tratta di una interfaccia composta superiormente da lo stesso geocomposito drenante descritto nel precedente paragrafo (*Interdrain GMG 512*) e inferiormente da una geomembrana bugnata. La geomembrana analizzata è una *ATARFIL TM 2.00*. Essa è una geomembrana in polietilene ad alta densità, strutturata nel lato superiore con una serie di bugne e liscia dall'altro. Con uno spessore di 2 mm la *ATARFIL TM* contiene il 97.5 % di polimero puro e il 2.5 % di carbone nero, sostanze antiossidanti e stabilizzanti termici. Il prodotto non contiene plastificanti o materiali di riempimento che possono migrare nel tempo.

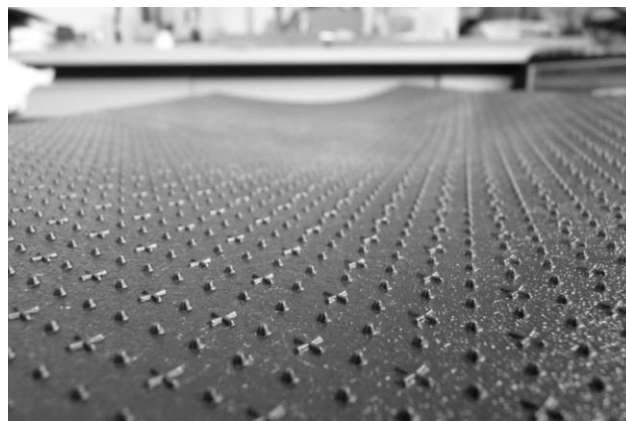


Fig. 9.13. Geomembrana bugnata: *ATARFILL TM*.

	Tested Property	Unit	Test Method	Value
Raw Material Identification	Density of Raw Material	g/cm ³	UNE EN ISO 1183-1	≥ 0,932
	Density of Geomembrane	g/cm ³	UNE EN ISO 1183-1	0,946 ± 0.004
	Melt Flow Index	g/10 min	UNE EN ISO 1133 D Condition (190°C/2,18 Kg)	≤ 0,40
			UNE EN ISO 1133 T Condition (190°C/5 Kg)	≤ 1,30
	Carbon Black Content	%	ASTM D 4218	2,0 - 2,5
Durability	Oxidative Induction Time (OIT)	min	UNE EN 728 (200°C)	> 100
	Stress Crack Resistance/NCTI ⁽¹⁾	h	ASTM D 5397	≥ 400
	Oxidation	%	UNE EN 14575	≤ 15

	Tested Property	Unit	Test Method	Value
Functional Properties	Low Temperature Brittleness (t ^a : -40°C)	-	UNE EN 495-5	No cracks
	Water Permeability	m ³ /m ² ·day	UNE EN 14150	< 1·10 ⁻⁶
	Coefficient of Linear Thermal Expansion	1/°C	ASTM D 696	2,15·10 ⁻⁴
	Water Absorption	%	UNE EN ISO 62 (24h)	≤ 0,1
			UNE EN ISO 62 (6 days)	≤ 0,1
	Thickness of Coextruded Layer	%	UNE EN 1849-2	-
	Asperity Height	mm	ASTM D 7466	≥ 0,90

	Tested Property	Unit	Test Method	Value					
Strength Characteristics Quality of Final Product	Thickness	mm	UNE EN 1849-2	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	
	Confidence level 95%	%	-	Tolerance: ± 6					
	Confidence level 90%	%	-	Tolerance: ± 4					
	Tensile Properties (*)								
	Tensile strength at Yield	N/mm	UNE-EN ISO 527 (Type 5)	18 (16)	27 (24)	36 (32)	45 (40)	54 (48)	
	Elongation at Yield	%		12 (9)					
	Tensile strength at Break (**)	N/mm		32 (26)	48 (39)	64 (52)	80 (65)	96 (78)	
	Elongation at Break (**)	%		800 (700)					
	Tear Resistance	N	ISO 34-1	140 (135)	210 (202)	280 (270)	350 (337)	420 (405)	
	Puncture Resistance (**)	KN	UNE-EN ISO 12236	3.0 (2.5)	4.5 (4.0)	5.5 (5.0)	6.5 (6.0)	6.8 (6.5)	
	Exploding Resistance	%	pr EN 14151	< 15					
	Dimensional Stability	%	UNE EN ISO 14632 (100°C, 1h)	± 1,5					

Fig. 9.14 Scheda tecnica ATARFILL TM.

9.4. PROGRAMMA DELLE PROVE

Per ognuna delle due differenti interfacce, nell'arco della sperimentazione, sono state svolte una serie di prove che si dividono in due campi principali: campo statico e campo dinamico.

Tutte le prove statiche e dinamiche svolte nell'arco della sperimentazione sono state svolte con un carico normale agente sull'interfaccia pari a 5.35 kPa. Inoltre, sono stati svolti dei *Test con Carico Incrementato* per studiare l'influenza del carico normale sull'attrito di interfaccia.

9.4.1. Prove Statiche

Le prove statiche svolte si dividono nelle seguenti tipologie:

- *Determinazione dell'angolo di primo distacco*
- *Procedura Standard*
- *Metodo della Forza*

Tutte le prove statiche si svolgono con il solo utilizzo del Piano Inclinato.

9.4.1. Prove Dinamiche

Le prove dinamiche svolte si dividono in:

- *Prove di scorrimento*
- *Prove con sinusoidi*
- *Prove con sisma*

Le prove di scorrimento si svolgono con la tavola ferma, con il solo utilizzo del Piano Inclinato. Le prove con sinusoidi o con sisma, invece, si svolgono con la tavola in movimento, fissando il piano ad una inclinazione fissa.

10. RISULTATI DELLE PROVE STATICHE

10.1. INTERFACCIA GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD

Di seguito sono illustrati i risultati ottenuti con le prove statiche svolte sull'interfaccia *MACMAT R - Interdrain GMG 512*. La geostuoia è stata fissata sulla scatola con il lato con la geogriglia a contatto con il geocomposito drenante fissato sul piano inclinato.

10.1.1. Determinazione dell'angolo di primo distacco (θ_0)

Il valore di attrito di primo distacco è stato ottenuto partendo con il piano ad inclinazione nulla ed alzandolo con una velocità di circa 3 °/min fino all'istante in cui il blocco ha iniziato a muoversi. In questo istante il valore di inclinazione del piano coincide con il valore di attrito di primo distacco.

In Fig. 10.1 è riportato la stabilizzazione dell'angolo di attrito di primo distacco in funzione dello spostamento accumulato dal blocco. Risulta che l'angolo d'attrito di primo distacco con l'interfaccia nuova è di circa 26.2° e si stabilizza attorno a 22.3° in seguito ad uno scorrimento del blocco di circa 4 m.

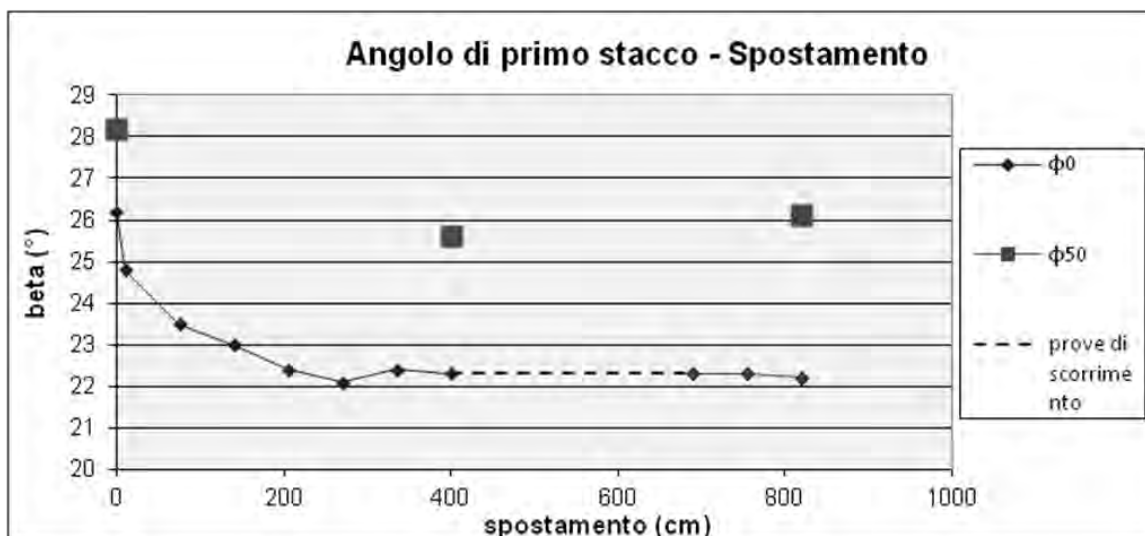


Fig. 10.1. Stabilizzazione dell'angolo di attrito di primo distacco e Procedura Standard: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

Il tratto tratteggiato indica l'intervallo durante il quale sono state svolte una serie di prove di scorrimento del blocco.

10.1.2. Procedura Standard (ϕ_{50})

I quadratini viola in Fig. 10.1 indicano i valori ottenuti con la Procedura Standard. Seguendo le indicazioni tecniche della Normativa Europea EN ISO 12957-2 (2005), per la determinazione dell'angolo di attrito statico si deve fare riferimento al valore di inclinazione del piano in corrispondenza del quale si ha uno scorrimento del blocco pari a 50 mm. Quindi, partendo sempre da inclinazione nulla del piano e alzandolo con un velocità di circa 3 °/min, con la Procedura Standard non ci si deve fermare all'istante in cui il blocco comincia a muoversi ma si deve continuare ad aumentare l'inclinazione fino a che il blocco non ha percorso 50 mm di spostamento.

È da notare come con l'interfaccia *MACMAT R - Interdrain GMG 512*, seguendo la Procedura Standard si ottengono valori di attrito statico di molto superiori ai valori di attrito di primo distacco. Questo è dovuto al fatto che la particolare tipologia di interfaccia analizzata presenta uno scorrimento del blocco a bassi valori di velocità e quindi nell'arco di tempo necessario affinché il blocco percorra 50 mm l'inclinazione del

piano è aumentata di molto. Si può quindi affermare che la Procedura Standard per l'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* non risulta una soluzione valida in quanto fornisce valori di attrito statico che sovrastimano abbondantemente il valore di attrito di primo distacco. Con l'interfaccia nuova la differenza tra il valore di primo distacco e quello Standard è di circa 2° , con l'interfaccia stabilizzata e uno spostamento pregresso di 400 m la differenza aumenta a 3.3° e con l'interfaccia stabilizzata e uno spostamento pregresso di 820 m la differenza è di 3.9° .

In Fig. 10.2 sono riportati i risultati ottenuti con la Procedura Standard con l'interfaccia nuova. Si può vedere come, nell'arco di tempo impiegato dal blocco per percorrere 5 cm, l'inclinazione del piano aumenti di circa 2° .

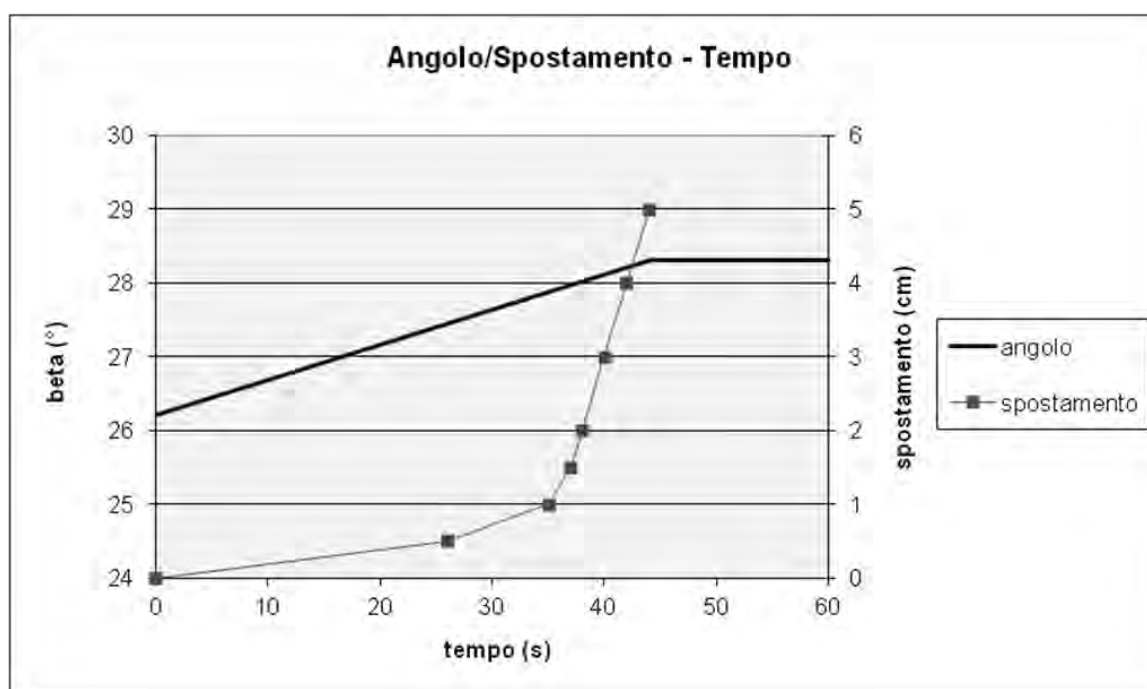


Fig. 10.2. Procedura Standard: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

10.1.3. Metodo della Forza (θ_{lim})

Come già detto al Cap. 9.2 il test della forza è stato svolto con l'utilizzo di un dinamometro in sostituzione al classico cavo usato per misurare la forza necessaria a trattenere il blocco sul piano inclinato. Questa soluzione non comporta alcuna modifica

dal punto di vista concettuale del test, anzi consente di considerare il comportamento viscoso dei materiali geosintetici, più o meno evidente a seconda della tipologia di interfaccia che si considera.

Quando la slitta, dopo un predeterminato valore di scorrimento, si appoggia sul dinamometro, esso comincia a misurare la forza necessaria a trattenere la slitta. La lancetta del dinamometro impiega un po' di tempo per stabilizzarsi su un valore fisso di forza a causa della presenza di fenomeni viscosi caratteristici dell'interfaccia. Nelle prove svolte con la Force Procedure, per varie inclinazioni del piano si sono registrati i valori di forza indicati dal manometro dopo i seguenti valori di tempo dall'inizio del contatto slitta manometro: 10 s, 30 s, 60 s, 240 s, 360 s.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti con lo stesso campione di interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* i sui risultati di attrito di primo distacco sono stati presentati nel Cap. 10.1. In particolare vengono presentati i risultati ottenuti con i test svolti ai seguenti livelli di usura:

- usura trascurabile (Fig. 10.3 e 10.4): campione nuovo, spostamento pregresso di 10 cm;
- usura media (Fig. 10.5 e 10.6): spostamento pregresso di 690 cm;
- usura massima (Fig. 10.7 e 10.8): spostamento pregresso di 1220 cm.

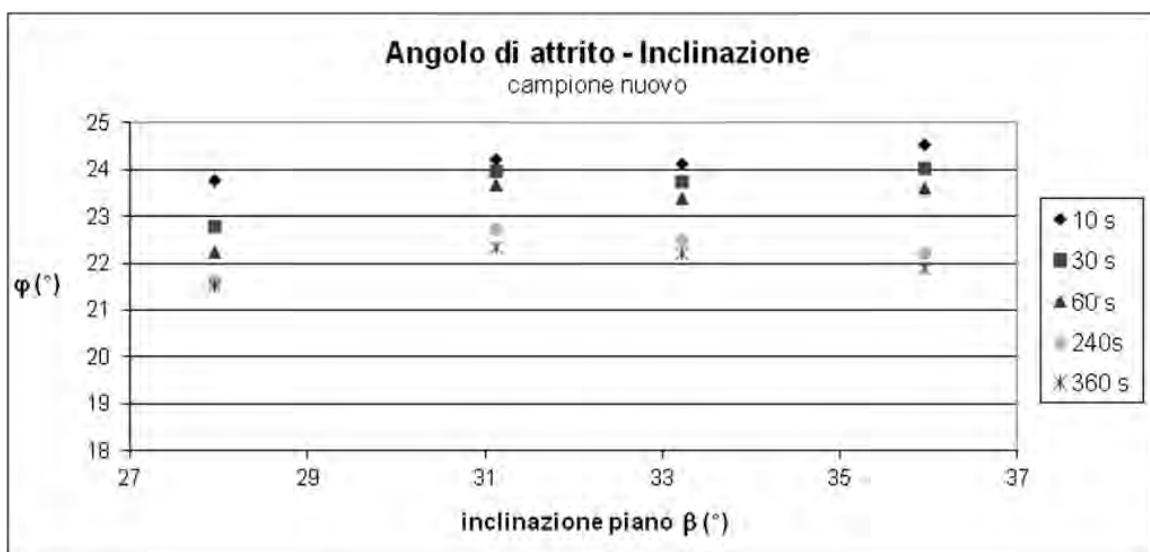


Fig. 10.3. Metodo della forza: spostamento pregresso = 10 cm. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

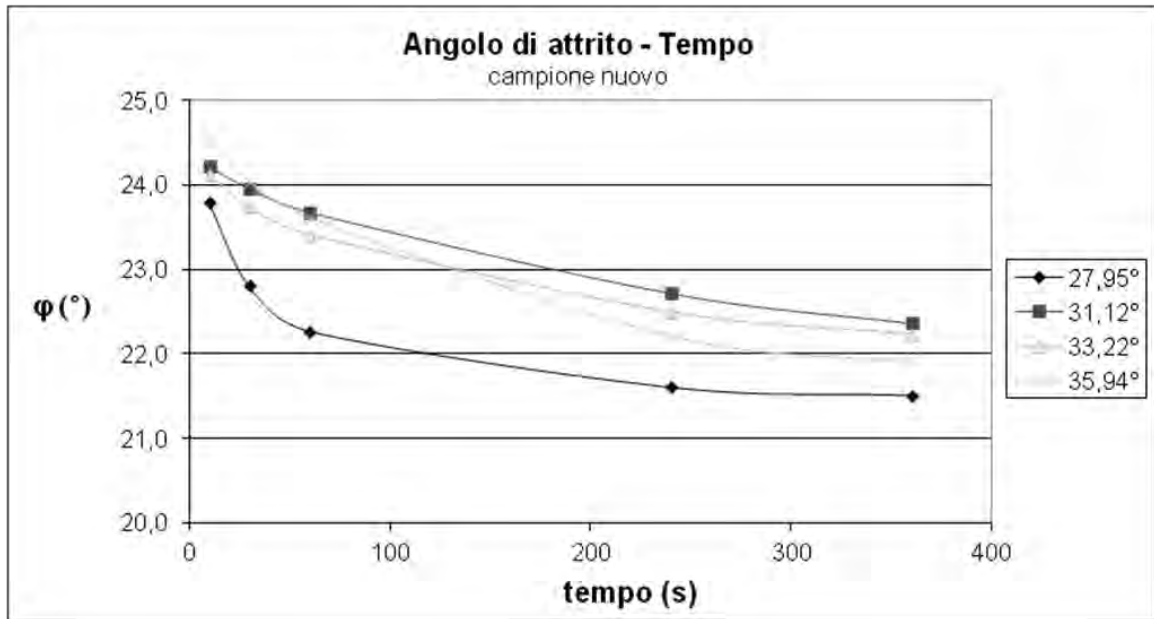


Fig. 10.4. Metodo della forza: spostamento pregresso = 10 cm. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata* – GCD.

Come si può vedere in Fig. 10.3 e 10.4, l'angolo di attrito si assesta dopo circa 6 minuti ad un valore di 22° circa, indipendentemente dall'inclinazione del piano. È da notare che il valore di attrito non ancora stabilizzato, invece, si avvicina al valore di attrito di primo distacco ottenuto per lo stesso spostamento pregresso (10cm) e pari a 24.8°.

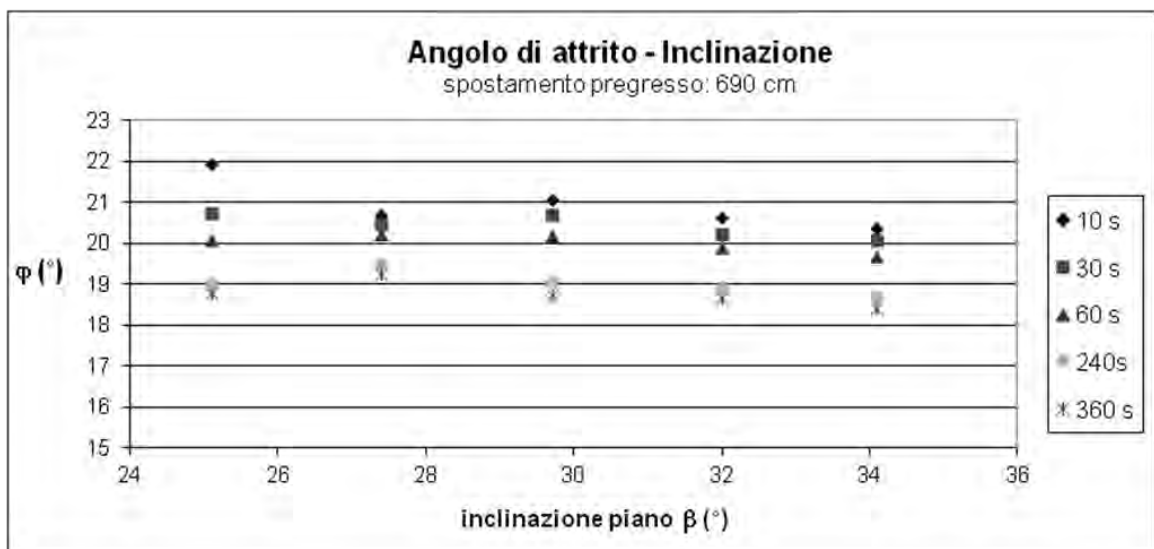


Fig. 10.5. Metodo della forza: spostamento pregresso = 690 cm. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata* – GCD.

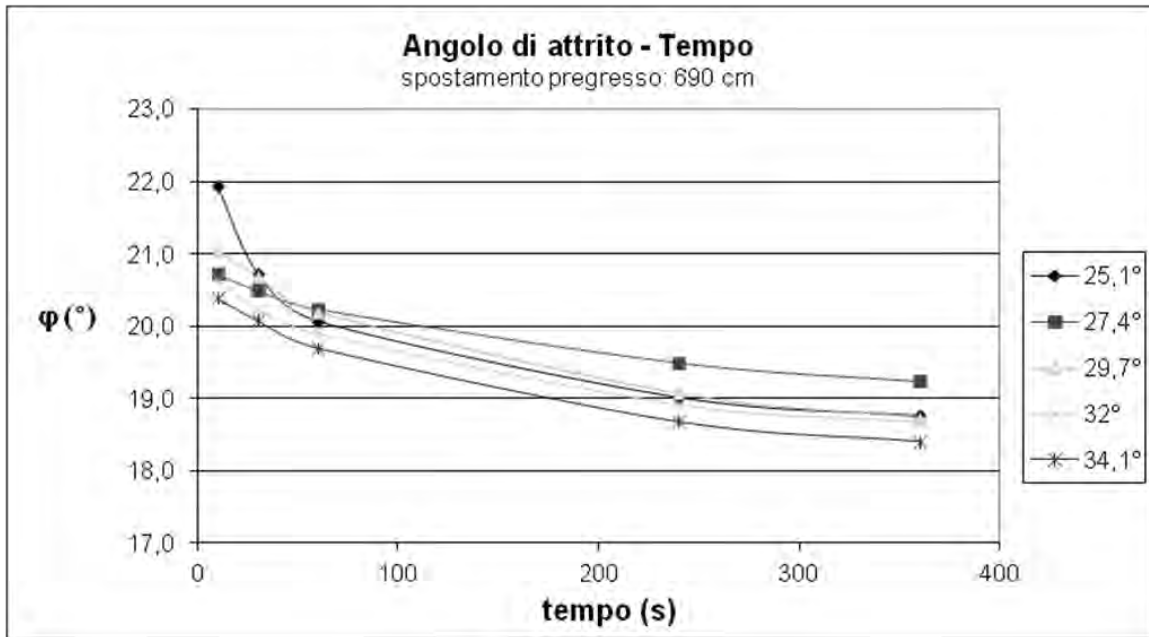


Fig. 10.6. Metodo della forza: spostamento pregresso = 690 cm. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

Come si può vedere in Fig. 10.5 e 10.6, l'angolo di attrito si assesta dopo circa 6 minuti ad un valore di 18.7° circa, indipendentemente dall'inclinazione del piano. È da notare che il valore di attrito non ancora stabilizzato, invece, si avvicina (anche se in quantità inferiore rispetto al caso di interfaccia nuova) al valore di attrito di primo distacco ottenuto per lo stesso spostamento pregresso (690cm) e pari a circa 22°.

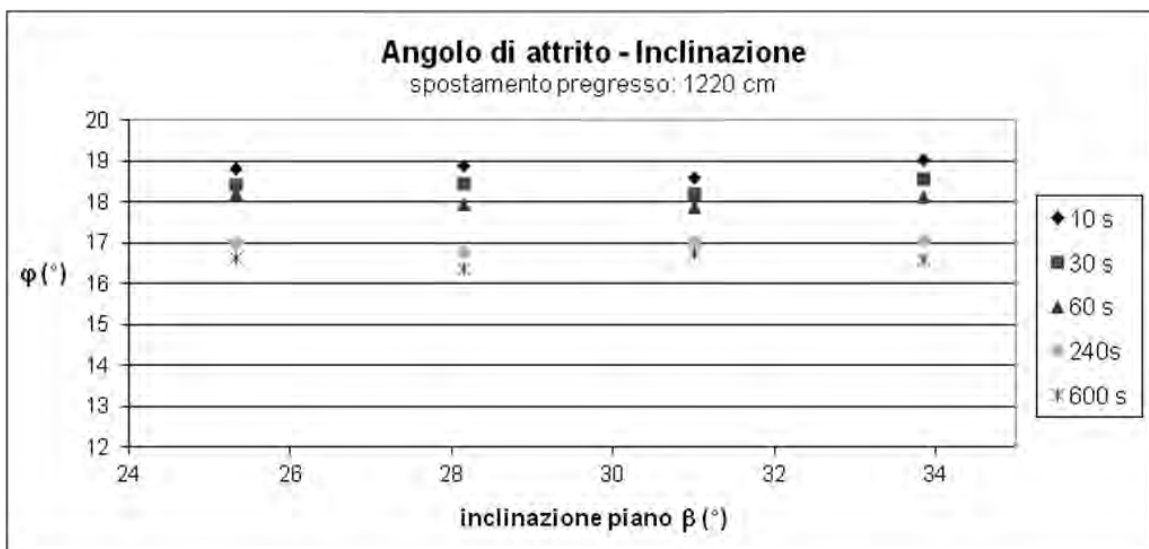


Fig. 10.7. Metodo della forza: spost. pregresso = 1220 cm. (*GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*)

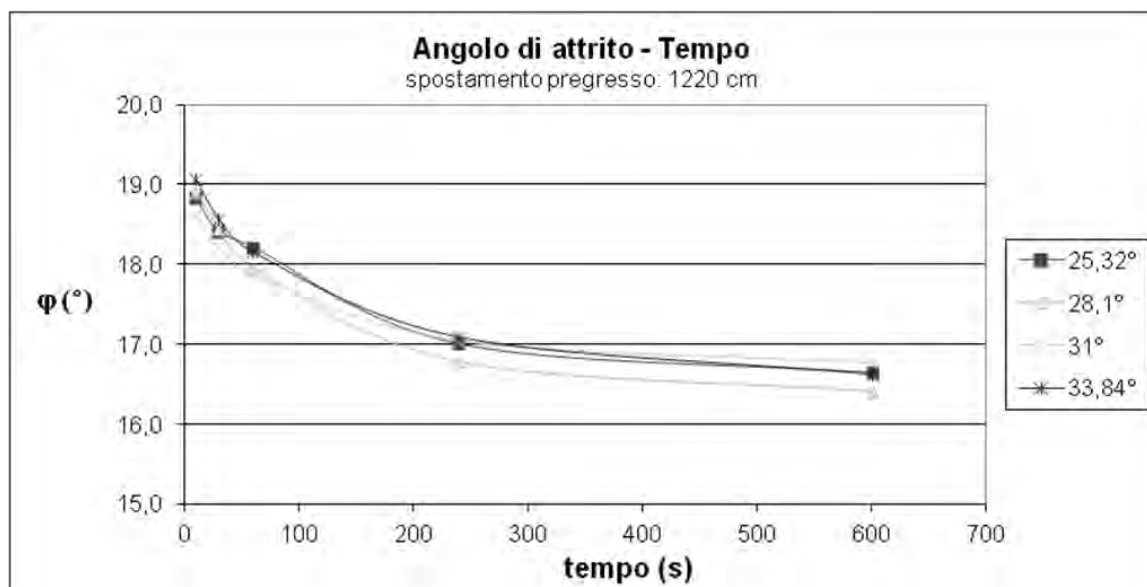


Fig. 10.8. Metodo della forza: spostamento pregresso = 1220 cm. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata* – GCD.

Come si può vedere in Fig. 10.7 e 10.8, l'angolo di attrito si assesta dopo circa 6 minuti ad un valore di 17° circa, indipendentemente dall'inclinazione del piano. A differenza dei casi con il campione nuovo o a usura intermedia, in questo caso di massima usura il valore di attrito non ancora stabilizzato (18.9°) non si avvicina più al valore di attrito di primo distacco ottenuto per lo stesso spostamento pregresso e pari a circa 22°.

Nell'insieme delle prove svolte con il metodo della forza è stato riscontrato che l'attrito (ϕ_{lim}) statico tende a stabilizzarsi dopo circa 6 min. Si può quindi considerare valido il valore arbitrario da noi assunto di 6 min, per definire l'attrito statico con il metodo della forza.

10.1.4. Test con carico incrementato

Tutte le prove statiche e dinamiche svolte nell'arco della sperimentazione sono state svolte con un carico normale agente sull'interfaccia pari a 5.35 kPa. Oltre a questa serie di prove sono stati svolti dei test con carico incrementato per studiare l'influenza del carico normale sull'attrito di interfaccia. In Tab. 10.1 sono riportati i valori di carico

normale con i quali è stata testata l'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* e i corrispettivi valori di angolo di attrito ottenuti.

CARICHI NORMALI UTILIZZATI	
carico normale (kPa)	Φ_0 di primo distacco (°)
5,35	26,5
7,97	25,1
9,93	24,5
13,86	24,1

Tab. 10.1. Valori di carico normale utilizzati per le prove e corrispettivi angoli di attrito di primo distacco: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

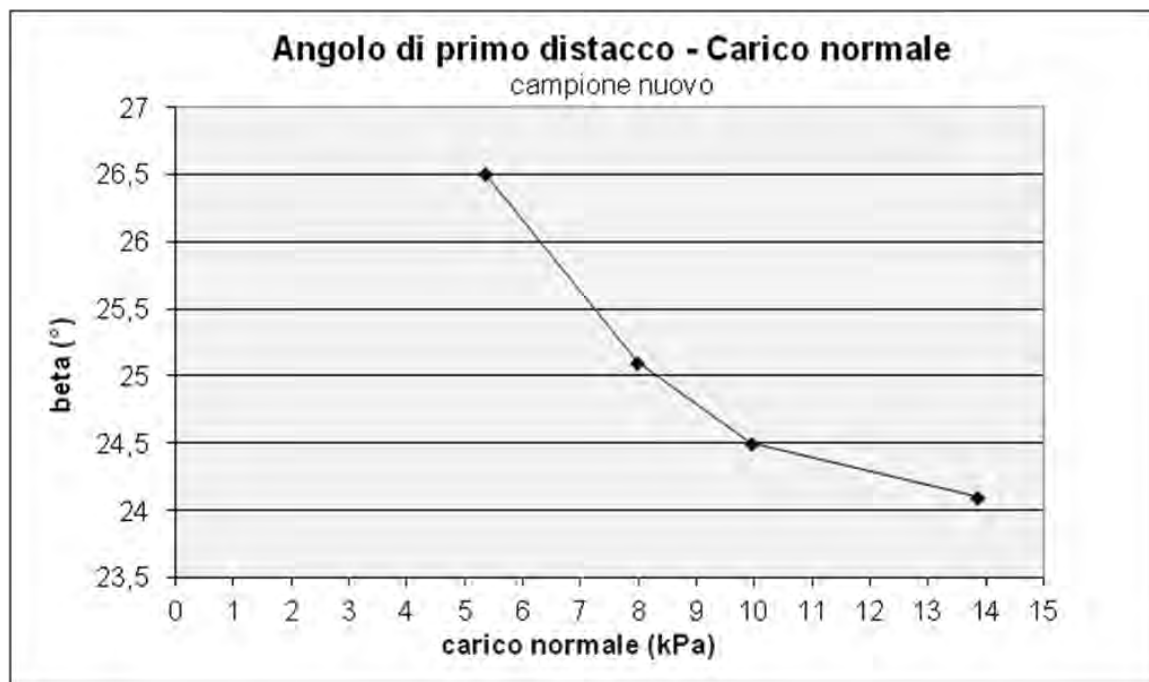


Fig. 10.9. Andamento dell'angolo di attrito di primo distacco in funzione del carico normale. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

In Fig. 10.9 invece si vede l'andamento dell'angolo di attrito di primo distacco in funzione del carico normale con l'interfaccia nuova (spostamento pregresso nullo). Si nota una notevole riduzione dell'angolo di attrito di primo distacco all'aumentare del carico. In particolare, la variazione maggiore si ha tra i 5 kPa e gli 8 kPa, con una riduzione di attrito di circa 1.5° , mentre tra 8 kPa e 10 kPa e tra 10 kPa e 14 kPa si ottiene una variazione in entrambi gli intervalli di circa 0.5° , il che indica una diminuzione dell'influenza del carico normale sull'attrito oltre un certo valore di carico normale.

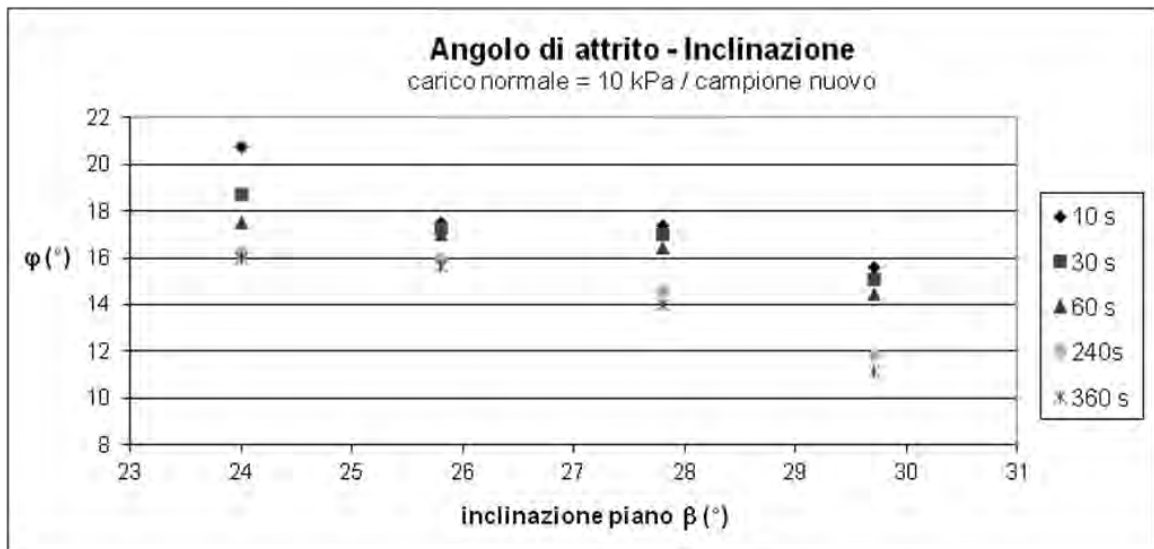


Fig. 10.10. Metodo della forza: spostamento pregresso = 5 cm, carico normale 9.93 kPa. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

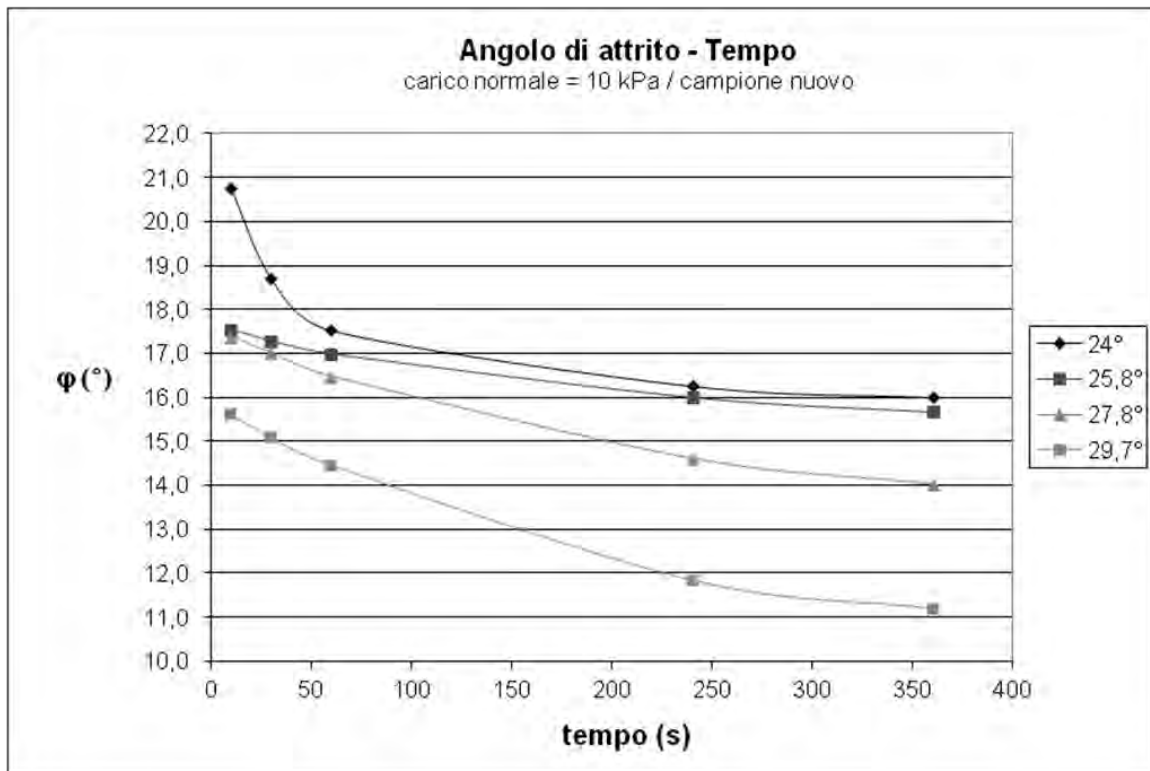


Fig. 10.11. Metodo della forza: spostamento progressivo = 5 cm, carico normale 9.93 kPa. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

In Fig. 10.10 e 10.11 sono riportati i risultati di una prova con il metodo della forza per una interfaccia nuova con un carico normale di circa 10 kPa (il doppio rispetto alle prove presentate nel Cap. 10.3 a 5.35 kPa). L'incremento del carico non permette di determinare un valore di attrito univoco con il metodo della forza, poiché al variare dell'inclinazione del piano varia anche l'angolo di attrito ottenuto. Se si scartano i valori ottenuti con l'inclinazione del piano a 29.7°, si può considerare che l'angolo di attrito si assesta dopo circa 6 minuti ad un valore di 15.5° circa. Confrontando questo valore con quello ottenuto con la prova svolta a 5 kPa, sempre con il campione nuovo, si osserva una riduzione di attrito di circa 6.8°.

Riassumendo (Tab. 10.2), passando da un carico di circa 5 kPa ad uno di circa 10 kPa sono state registrate le seguenti variazioni per un campione nuovo:

- l'angolo di attrito di primo distacco cala di 2°, passando da 26.5° a 24.5°.
- l'angolo di attrito ottenuto con il metodo della forza dopo 6 min (ma anche quello dopo 10 s) cala di circa 6.5°, passando da circa 22° a circa 15.5°.

INFLUENZA DEL CARICO					
campione vergine <i>GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD</i> .					
Prova	angolo statico		5 kPa	10 kPa	$\Delta\phi$
di primo stacco	angolo di primo distacco (°)	ϕ_0	26,5	24,5	2
metodo della forza	angolo limite a 6 min (°)	ϕ_{lim}	22	15,5	6,5

Tab. 10.2. Influenza del carico normale: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

10.1.5. Osservazione dei risultati

10.1.5.1. Recupero di attrito dell'interfaccia tra un test e l'altro

L'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* ha mostrato nell'arco della sperimentazione un singolare comportamento di recupero di attrito, quando tra un test e l'altro trascorre un certo lasso di tempo. Durante questo arco di tempo i materiali geosintetici componenti l'interfaccia, in particolar modo la geostuoia antierosione rinforzata, hanno il tempo di recuperare in parte le proprie caratteristiche strutturali. Infatti, il recupero di attrito dell'interfaccia riscontrato durante la sperimentazione va probabilmente attribuito al recupero di deformazione elastica cui è soggetta la geostuoia durante una prova statica.

Con lo scopo di analizzare il comportamento di recupero di attrito riscontrato, è stata svolta una serie di prove (Fig. 10.12) per vedere come varia il valore dell'angolo di primo distacco in funzione dello spostamento cumulato dal blocco se tra lo svolgimento di un gruppo di prove e un altro viene fatto trascorrere un certo lasso di tempo oppure se si minimizza il tempo tra una prova e la successiva minimizzandone il tempo di recupero.

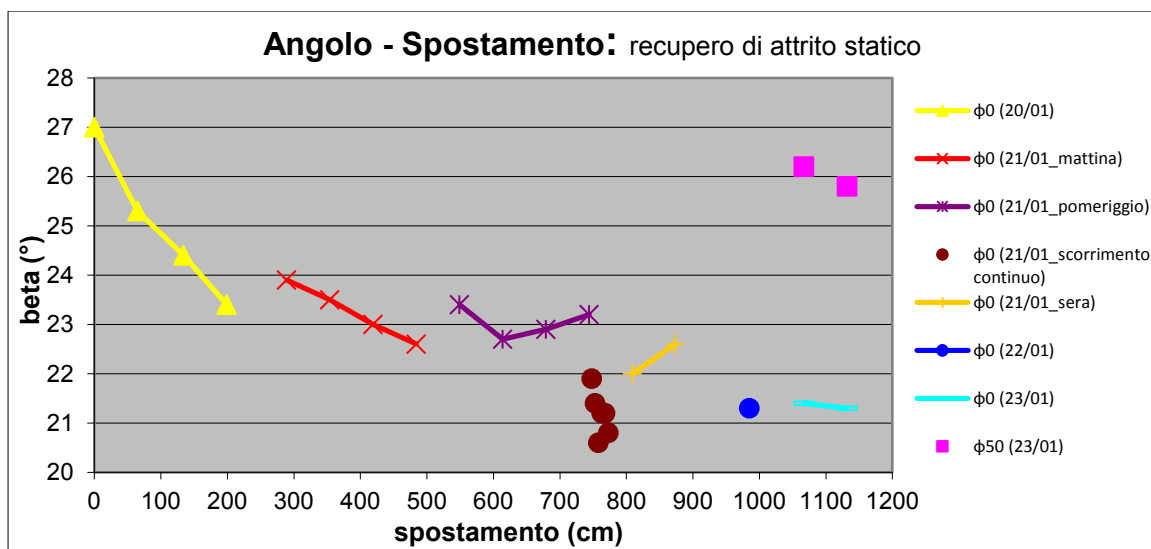


Fig. 10.12. Studio del comportamento di recupero di attrito mostrato dall'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

Il tratto evidenziato in giallo rappresenta l'andamento dei valori ottenuti con delle prove eseguite in successione (20/01/2015), il tratto in rosso invece rappresenta l'andamento ottenuto con delle prove svolte al mattino del giorno seguente (21/01/2015). Tra l'ultimo valore ottenuto il primo giorno di prove e il primo valore ottenuto il giorno successivo è stato registrato un recupero di attrito di 0.5° . Durante il secondo giorno di prove (21/01/2015) con questa interfaccia, il campione è stato lasciato riposare circa 2 ore nell'arco della pausa pranzo, dopo di che durante il pomeriggio è stata svolta una seconda serie di prove in successione, evidenziata in figura in viola. Tra l'ultimo valore ottenuto al mattino e il primo valore ottenuto il pomeriggio c'è un recupero di attrito di 0.8° . Il pomeriggio stesso si è deciso di vedere come si comporta l'attrito nel caso si riduca il tempo che trascorre tra una prova e la successiva, quindi cercando di minimizzare il tempo di recupero di attrito dell'interfaccia. Per fare ciò è stata svolta una serie di prove per determinare l'angolo di attrito di primo distacco arrestando il blocco una volta raggiunto uno spostamento di 5 cm e ripetendo la prova successiva partendo dalla posizione raggiunta lungo il piano con l'ultima prova svolta. In questo modo si è riuscito a valutare l'attrito di primo distacco percorrendo solamente 30 cm di spostamento ma soprattutto senza dovere alzare il blocco ogni volta per riportarlo in sommità al piano, concedendo così la possibilità ai materiali componenti l'interfaccia di scaricarsi dal peso del blocco (5 kPa) cui sono soggetti e di poter in questo modo recuperare in parte le

proprie caratteristiche strutturali. Infine, con questa procedura utilizzata si è ridotto l'arco di tempo tra una prova e l'altra. In questo modo si è osservata una rapida riduzione del valore di attrito di primo distacco di 1.1° , scendendo a circa 20.8° . Questa evidente riduzione è un'ulteriore dimostrazione dell'esistenza del comportamento di recupero di attrito cui è soggetta l'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* tra un test e l'altro. Sempre durante la stessa giornata, a fine pomeriggio, in seguito alle prove appena descritte, sono state svolte due prove classiche (riportando il blocco in sommità al piano ogni volta e lasciandolo scorrere per tutta la lunghezza del piano) per determinare il valore di primo distacco. I valori così trovati sono evidenziati in figura in arancione e mostrano un recupero di circa 1.2° . I gironi seguenti sono stati svolti altri tre test di primo distacco (uno il 22/01/2015 e due il 23/01/2015) e due Prove Standard (23/01/2015). I risultati ottenuti confermano il valore di 22° come angolo d'attrito di primo distacco dell'interfaccia stabilizzata. I valori di attrito ottenuti con le Prove Standard risultano, come è già stato discusso al Cap. 10.2, notevolmente maggiori rispetto ai valori di primo distacco per uno stesso valore di scorrimento pregresso (1070 cm e 1130 cm). In particolare la differenza riscontrata con uno scorrimento pregresso del blocco di circa 11 m è di circa 4.1° , maggiore rispetto alle differenze riscontrate per uno scorrimento pregresso nullo (2° circa), per uno scorrimento pregresso di 4 m (3.3° circa) e per uno scorrimento di 820 cm (3.9° circa). Si è quindi evidenziato, con questa tipologia di interfaccia un incremento con lo scorrimento accumulato dal blocco della differenza tra i valori di attrito di primo distacco e quelli ottenuti con la Procedura Standard.

I salti di spostamento tra un set di prove e l'altro presenti in Fig. 10.12 vanno imputati allo svolgimento di prove con inclinazioni inferiori al valore di primo distacco, per lo studio dell'accentuato comportamento viscoso caratteristico dell'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GC*.

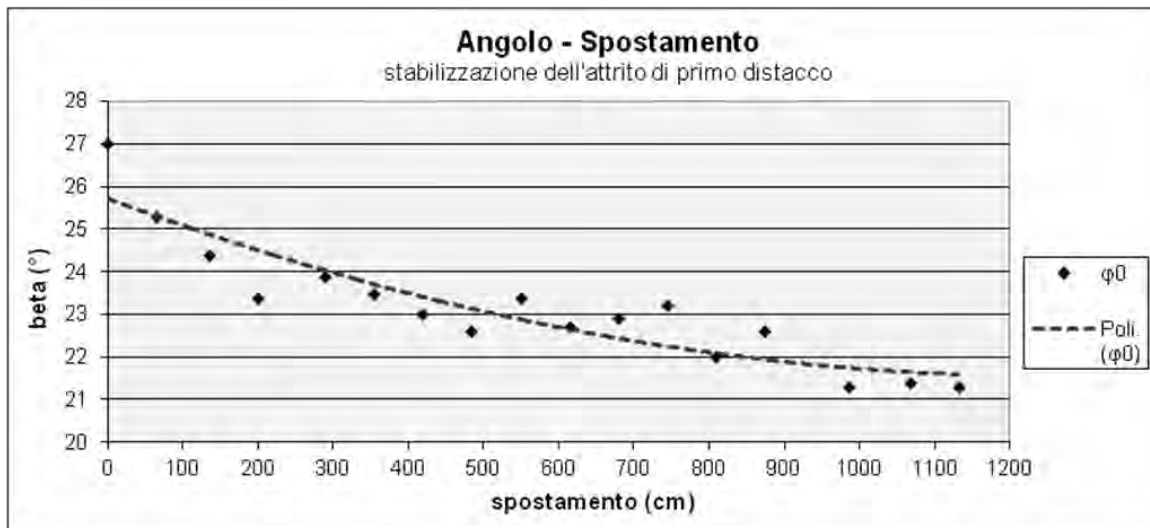


Fig. 10.13. Stabilizzazione dell'attrito di primo distacco: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

Se infine si riportano in un grafico i valori puntuali di attrito di primo distacco ottenuti con la serie di prove svolte e se ne traccia l'andamento (curva in rosso Fig. 10.13), si ottiene che l'attrito di primo distacco parte con un valore di circa 26° con l'interfaccia nuova e arriva a circa 22° con l'interfaccia stabilizzata. Sono stati così ritrovati gli stessi valori riportati in Fig. 10.1; in questo caso però è servito uno spostamento pregresso maggiore per riuscire a stabilizzare l'interfaccia, a causa del fatto che tra le varie prove svolte è stato concesso un certo tempo di recupero.

10.1.5.2. *Comportamento viscoso dell'interfaccia*

L'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* analizzata presenta un forte comportamento viscoso. Questo comportamento si nota fondamentalmente nelle seguenti due situazioni:

- 1) Durante le prove per determinare l'attrito di primo distacco: se si svolge la prova rallentando la velocità di inclinazione del piano in prossimità al valore di primo distacco, si riscontra l'attivazione di uno scorrimento del blocco lento ma continuo, il che mette in discussione il valore di primo distacco determinabile svolgendo la prova con un incremento di inclinazione del piano a velocità costante

fino al verificarsi dello scorrimento. Infatti è stato notato che lasciando il blocco fermo in sommità al piano inclinato per intervalli di tempo dell'ordine delle ore, ad angolazioni costanti ben inferiori ai valori di primo distacco registrati, si verifica lo stesso uno scorrimento del blocco. È stata svolta una serie di prove con la procedura appena citata per vedere a quale inclinazione si genera lo scorrimento del blocco lungo il piano se gli si lascia il tempo necessario a partire (Tab. 10.3: “prove a lungo termine e inclinazione fissa”).

La differenza riscontrata tra l'angolo di primo distacco (\emptyset_0) e l'angolo minimo con il quale il blocco scorre lasciandogli il tempo di partire è risultata più o meno costante in funzione del valore di scorrimento pregresso e mediamente pari a 4.3° . È da notare che, con l'interfaccia nuova, la procedura sopra citata ha fornito un valore di attrito di circa 22° (a differenza dei 26° circa ottenuti svolgendo la prova con il procedimento classico), valore simile a quello ottenuto con il test della forza con la stessa interfaccia (2C) e allo stesso valore di spostamento pregresso (vedi Fig. 10.3). Si verifica dunque la presenza di una differenza di circa 4° tra l'angolo di primo distacco (\emptyset_0) e l'angolo minimo con il quale il blocco scorre lasciandogli il tempo di partire. Mentre con l'interfaccia stabilizzata per uno scorrimento pregresso del blocco lungo il piano di circa 1220 cm, la procedura sopra citata ha fornito un valore di attrito di 17.0° circa (a differenza dei 21.5° circa ottenuti svolgendo la prova con il procedimento classico), valore simile a quello ottenuto con il test della forza con la stessa interfaccia (2A) e allo stesso valore di spostamento pregresso (vedi Fig. 10.7). Si verifica dunque la presenza di una differenza di circa 4.5° tra l'angolo di primo distacco (\emptyset_0) e l'angolo minimo con il quale il blocco scorre lasciandogli il tempo di partire. Il Metodo della Forza, dopo 6 min (\emptyset_{lim}), ha quindi fornito all'incirca ($\pm 0.3^\circ$) gli stessi risultati ottenuti aspettando, con inclinazione del piano fissa, che il blocco partisse.

- 2) Con lo svolgimento delle prove con il Metodo della Forza è stata osservata una notevole variazione del valore di attrito in funzione del tempo: infatti la differenza tra i valori di attrito ottenuti a 10 s e quelli ottenuti dopo 6 min è di circa 2.5° . Questa forte variazione dell'attrito nel tempo è indice di un comportamento viscoso dell'interfaccia analizzata. Il Metodo della Forza può quindi essere considerato un buon strumento di analisi dell'attrito delle interfacce di geosintetici caratterizzate da un marcato comportamento viscoso.

INTERFACCIA: <i>GEOSTUOIA antierosione rinforzata - GCD_2A</i>								
	Prove di primo distacco	Prove a lungo termine e inclinazione fissa						
spostamento pregresso	φ_0	inclinazione piano β	durata	scorrimento blocco		tipo di scorrimento		velocità
(cm)	(°)	(°)	(h)	si	no	percettibile	impercettibile	(cm/s)
134	24,4	19,3		•			•	
199	23,4	20		•		•		
265		19,1	15	•			•	0,0004
549	22,6	18,1	1,5		•			
939		18,1	15	•			•	0,0008
1029		17,1	15	•			•	0,0007
1222		15,5	15		•			

Tab. 10.3. Prove di primo distacco e Prove a lungo termine: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

Un altro aspetto indagato con questa interfaccia, che ha sempre a che fare con la viscosità, consiste nell'individuare fino a che valori di inclinazione si mantiene attivo il moto di scorrimento del blocco lungo il piano, una volta attivato lo scorrimento. Per far ciò, con l'interfaccia nuova, partendo dall'angolo di primo distacco con il moto del blocco avviato, si è abbassato gradualmente il piano per vedere fino a che inclinazione il blocco continuava a muoversi (Tab. 10.4: “prove abbassando”). Il blocco ha continuato a muoversi fino ad un valore di inclinazione di circa 22°, stesso valore ottenuto sempre con la stessa interfaccia nuova ma partendo da inclinazione del piano nulla e alzando il piano un po' alla volta, lasciando trascorrere il tempo necessario per l'avviamento del moto di scorrimento del blocco, con inclinazione del piano fissa (Tab. 10.4: “prove alzando”). È da notare che il valore di attrito ottenuto con entrambe le metodologie di verifica coincide ($\pm 0.3^\circ$) con il valore ottenuto con il test della forza con la stessa interfaccia (2C) e allo stesso valore di spostamento pregresso (vedi Fig. 10.3).

INTERFACCIA: <i>GEOSTUOIA antierosione rinforzata - GCD_2C</i>						
spostamento pregresso (cm)	inclinazione piano β (°)	Prova abbassando	Prova alzando	durata	scorrimento blocco	
				(h)	si	no
0	26,5	•		0,25	•	
0	25	•		0,25	•	
0	23,8	•		0,25	•	
0	23,1	•		0,25	•	
0	22,5	•		0,25	•	
0	21,9	•		0,25		•
2,5	22,5		•	0,5	•	
2,5	22		•	0,5	•	
2,5	21,6		•	1		•
2,5	20,15		•	15		•

Tab. 10.4. Prove : interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

10.1.5.3. Adesione tra *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*

Durante lo svolgimento dei test statici svolti con inclinazioni del piano inferiori ai valori di primo distacco, con lo scopo di determinare un valore di attrito che consideri l'effetto della viscosità a cui è soggetta l'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*, si è presentato un problema dovuto all'instaurarsi di una sorta di adesione tra i due geosintetici che compongono l'interfaccia, quando il blocco viene lasciato sul piano fisso ad una certa inclinazione per un lungo arco di tempo per vedere se si attiva un moto di scorrimento. Infatti, per esempio, con l'interfaccia nuova, sapendo che il blocco, se gli si viene lasciato il tempo necessario, comincia a muoversi per una inclinazione di circa 22°, si è alzato il piano da una inclinazione nulla fino ad una inclinazione di 20.2°, lasciando il piano fisso per 15 ore per vedere se il blocco si muoveva. Si è visto che il blocco non si è mosso. In seguito, dopo un certo lasso di tempo, lasciando il blocco nella posizione finale della prova svolta, si è provato ad alzare il piano a varie inclinazioni, sempre lasciando il tempo al blocco per cominciare a muoversi, per vedere quando partiva. Si è osservato che il blocco è ripartito solamente una volta raggiunta l'inclinazione di 24°, valore ben al di sopra dei 22° per i quali il blocco si è verificato cominciare a muoversi a causa di fenomeni viscosi. Questo fatto può essere imputato all'instaurarsi di una sorta di adesione tra le due superfici di geosintetici a contatto, in seguito ad un lungo lasso di tempo in cui il blocco non si muove e grava con il suo peso sul campione di interfaccia che si sta testando.

10.2. INTERFACCIA GCD – GMB bugnata

Di seguito sono illustrati i risultati ottenuti con le prove statiche svolte sull'interfaccia *Interdrain GMG 512 – ATARFIL TM 2.00*. Il geocomposito drenante è stato fissato sulla scatola con il lato di geotessuto meno uniforme a contatto con la geomembrana bugnata fissata sul piano inclinato.

10.2.1. Determinazione dell'angolo di primo distacco (θ_0)

Come già detto il valore di attrito di primo distacco è stato ottenuto partendo con il piano ad inclinazione nulla ed alzandolo con una velocità di circa 3 °/min fino all'istante in cui il blocco inizia a muoversi. In questo istante il valore di inclinazione del piano coincide con il valore di attrito di primo distacco.

La determinazione dell'angolo di attrito di primo distacco con l'interfaccia *GCD – GMB bugnata* è risultata più semplice rispetto al caso dell'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*, in quanto questa nuova interfaccia non presenta alcun effetto di recupero dell'attrito statico tra una prova e l'altra, anche se trascorre un arco di tempo prolungato (confermando l'imputazione dell'effetto di recupero dell'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* al recupero di deformazione elastica della geostuoia).

Un aspetto, invece, che ha creato qualche difficoltà nella definizione dell'attrito di primo distacco è rappresentato dalla moderata variabilità dei valori ottenuti portando a stabilizzare diversi campioni di interfaccia *Interdrain GMG 512 – ATARFIL TM 2.00*. In Fig. 10.14 sono riassunti i risultati delle prove svolte con 4 differenti campioni di interfaccia. Si può notare come, seppure ci sia una certa variabilità dei risultati ottenuti, l'andamento della stabilizzazione dell'angolo di attrito di primo distacco in funzione dello spostamento percorso dal blocco risulta in genere lo stesso con ogni campione di interfaccia testato.

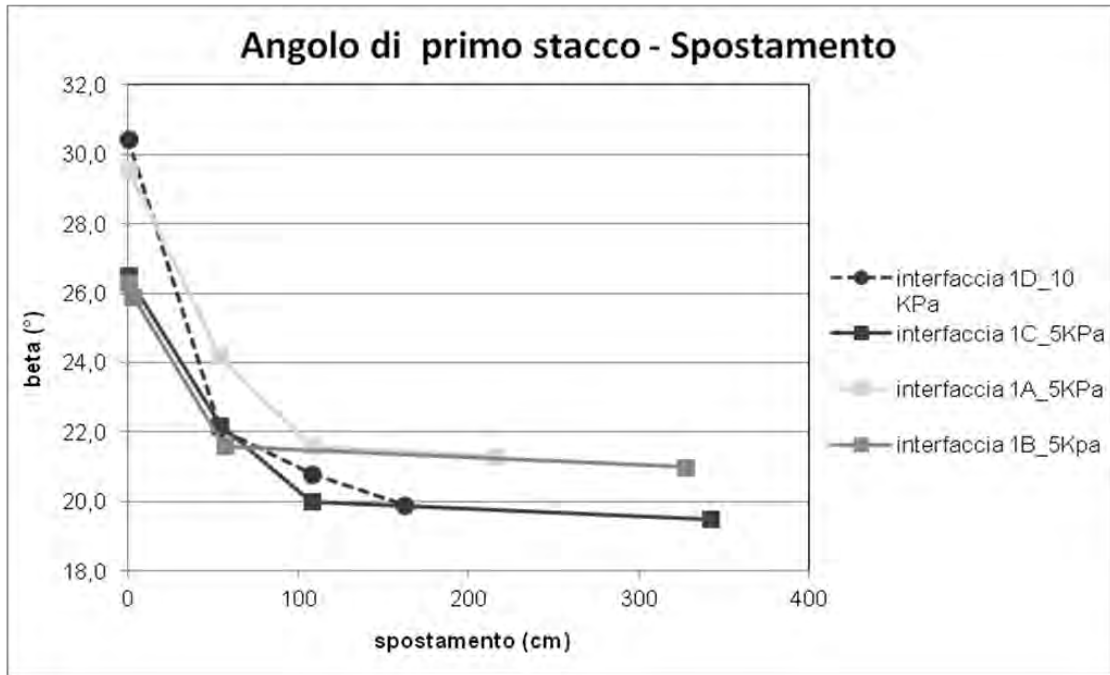


Fig. 10.14. Stabilizzazione dell'angolo di attrito di primo distacco: interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

Se si traccia una curva (Fig. 10.15) che approssima i valori puntuali di attrito di primo distacco ottenuti con la totalità delle prove svolte, si osserva che l'angolo d'attrito di primo distacco con l'interfaccia nuova è di circa $28^\circ (\pm 2.3^\circ)$ e si stabilizza attorno a $20^\circ (\pm 0.75)$ in seguito ad uno scorrimento del blocco di circa 4 m.

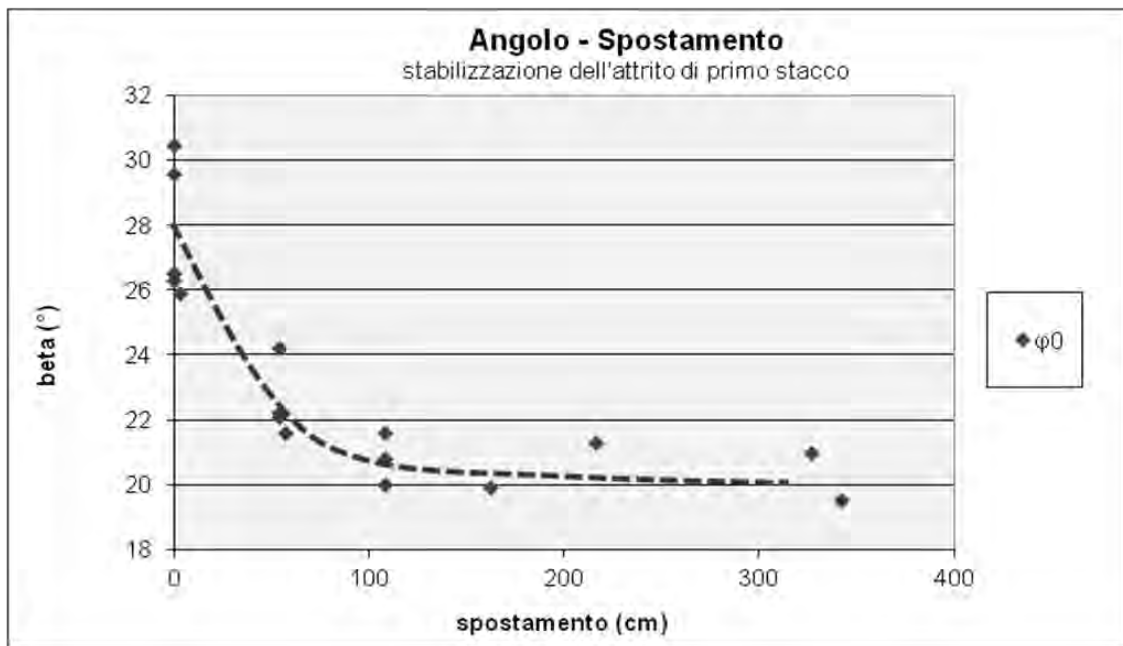


Fig. 10.15. Stabilizzazione dell'angolo di attrito di primo distacco: interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

10.2.2. Metodo della Forza (ϕ_{lim})

Di seguito vengono esposti i risultati delle prove svolte con il Metodo della Forza per la definizione dell'attrito nel caso di interfaccia *GCD – GMB bugnata*. In particolare vengono presentati i risultati ottenuti per i due seguenti livelli di usura:

- campione nuovo (Fig. 10.16 e 10.17): spostamento pregresso di 1.5 cm;
- campione stabilizzato (Fig. 10.18 e 10.19): spostamento pregresso di 650 cm;

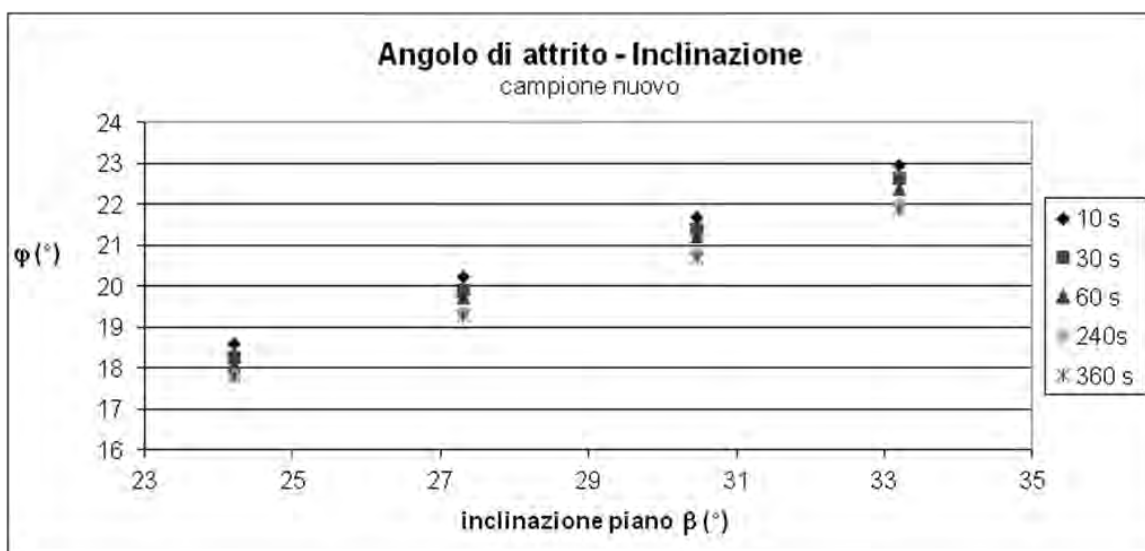


Fig. 10.16. Metodo della forza: campione nuovo. Interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

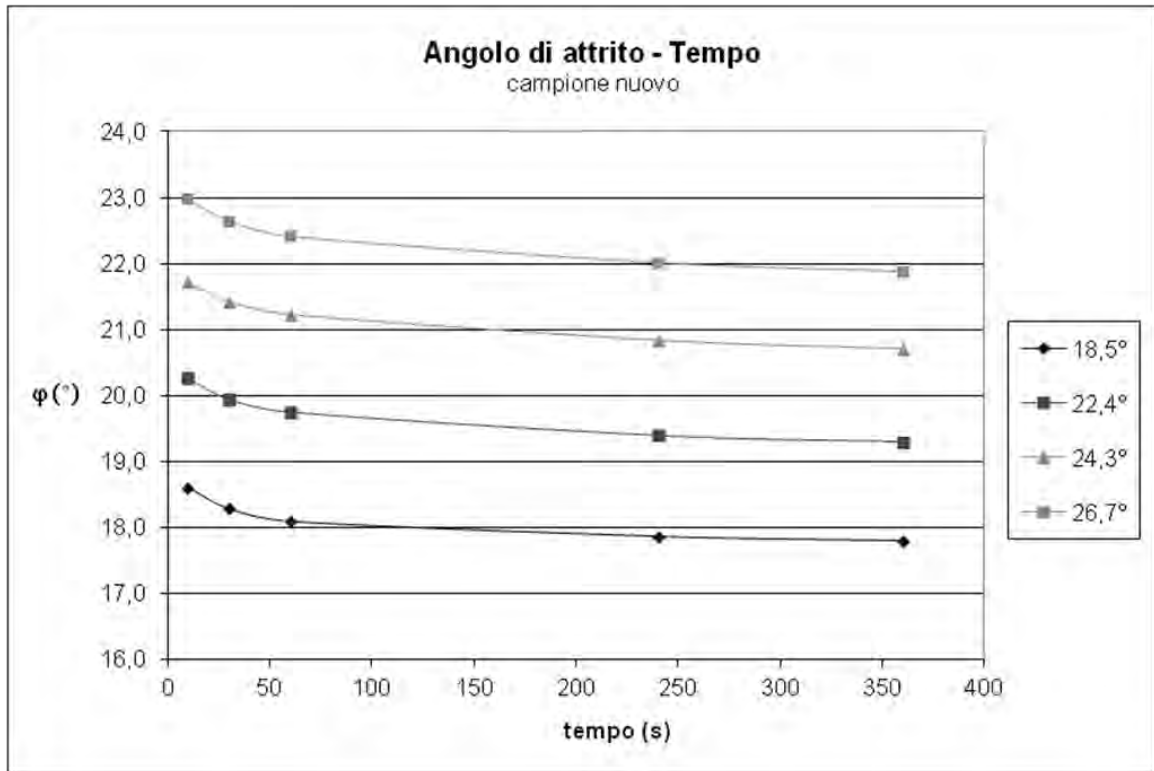


Fig. 10.17. Metodo della forza: campione nuovo. Interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

Come si può vedere in Fig. 10.16 e 10.17, ad interfaccia nuova, con il metodo della forza non si riesce a determinare un valore di attrito univoco, poiché al variare dell'inclinazione del piano varia anche l'angolo di attrito ottenuto. La variazione riscontrata consiste in una riduzione di circa 4° passando da una inclinazione del piano di 18.5° ad una inclinazione di 26.7°.

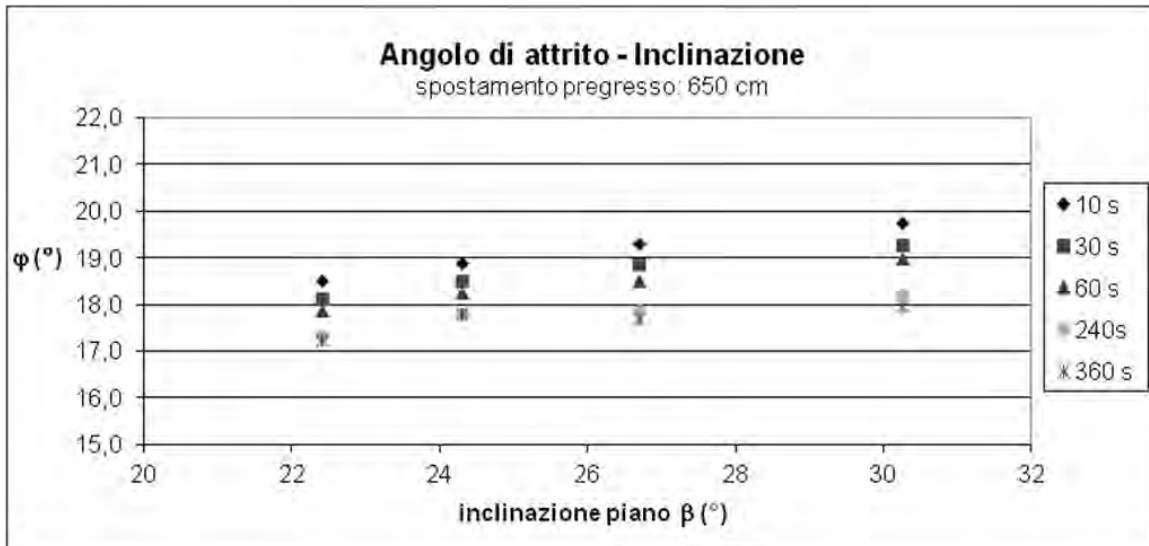


Fig. 10.18. Metodo della forza: spostamento pregresso = 650 cm. Interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

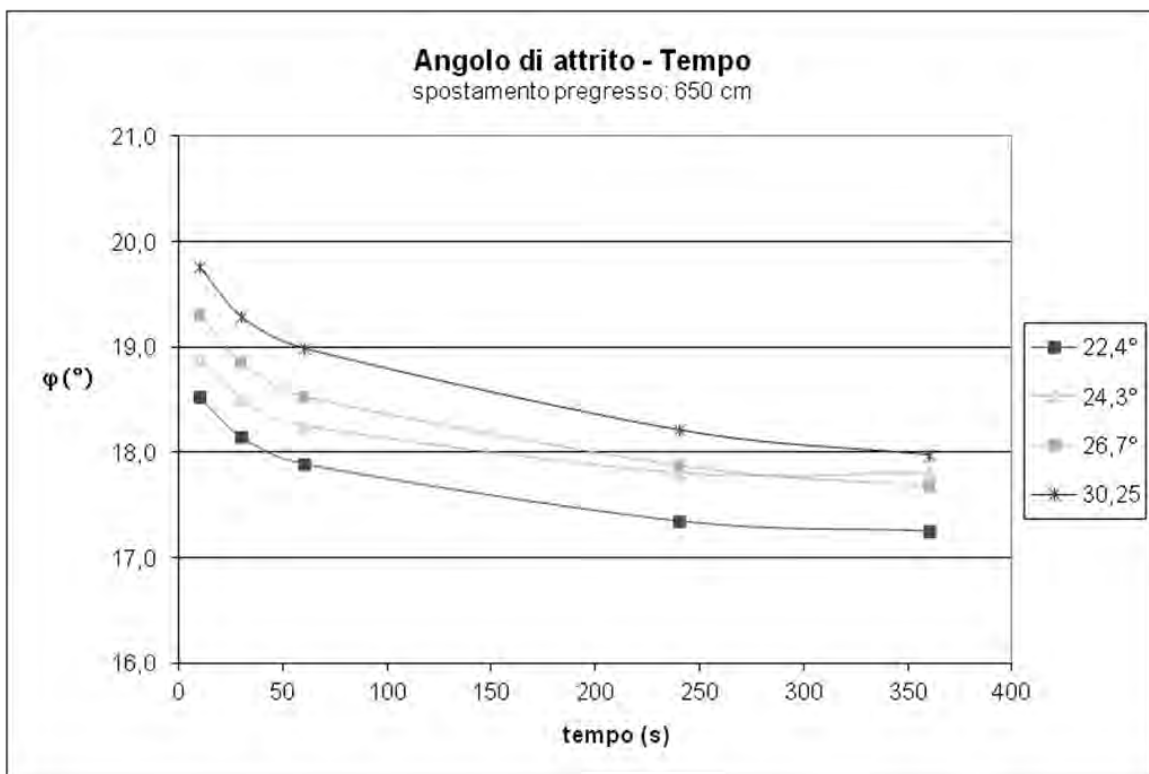


Fig. 10.19. Metodo della forza: spostamento pregresso = 650 cm. Interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

Con il Metodo della Forza con l'interfaccia stabilizzata (Fig. 10.18 e 10.19), a differenza dei risultati ottenuti con l'interfaccia nuova, si riesce a determinare un valore di

attrito approssimativamente univoco. Infatti, l'angolo di attrito si assesta dopo circa 6 minuti ad un valore di circa 17.7° , indipendentemente dall'inclinazione del piano. È da notare che il valore di attrito non ancora stabilizzato, invece, si avvicina al valore di attrito di primo distacco ottenuto con l'interfaccia stabilizzata e pari a 20° .

Anche con questa tipologia di interfaccia è stato riscontrato un po' di comportamento viscoso, ma in quantità notevolmente inferiore rispetto all'altra interfaccia analizzata. Con l'interfaccia *GCD – GMB bugnata*, dall'analisi dei risultati ottenuti con il Metodo della Forza, è stata riscontrata una variazione di attrito (tra i valori di attrito ottenuti a 10 s e quelli ottenuti dopo 6 min) dovuta a fenomeni viscosi dei materiali che compongono l'interfaccia pari a circa 2.5° . Mentre, con l'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* è stata riscontrata una variazione di attrito dovuta a fenomeni viscosi notevolmente inferiore e pari a circa 1° .

In definitiva, il Metodo della Forza può essere considerato un buon strumento di indagine dei fenomeni viscosi che caratterizzano i materiali geosintetici che compongono le interfacce tipiche dei sistemi di copertura delle discariche o delle strutture di ingegneria idraulica.

10.2.3. Test con carico incrementato

Come è già stato detto, tutte le prove statiche e dinamiche svolte nell'arco della sperimentazione sono state svolte con un carico normale agente sull'interfaccia pari a 5.35 kPa. Con l'interfaccia *GCD – GMB bugnata*, oltre alla serie di prove a 5 kPa, sono state svolte delle prove con un carico di 10 kPa (per esattezza 9.93 kPa) per studiare l'influenza del carico normale sull'attrito di interfaccia. I risultati ottenuti con le prove svolte a 10 kPa sono evidenziati in Fig. 10.14 in rosso e mostrano come il carico normale non abbia alcuna influenza significativa sulla definizione dell'attrito statico dell'interfaccia *GCD – GMB bugnata*. L'unica osservazione che si può fare riguarda la pendenza del primo tratto della spezzata rappresentante la stabilizzazione dell'attrito di primo distacco in funzione dello spostamento. Infatti, mentre tutti i campioni testati con un carico normale di 5 kPa presentano la stessa pendenza del primo tratto di spezzata (fino ad uno spostamento pregresso di 54 cm) con un salto di circa 5° , il campione testato

con un carico normale di 10 kPa presenta una maggiore pendenza e quindi un salto maggiore di circa 8.5° .

10.2.4. Osservazione dei risultati

Durante la sperimentazione dell'interfaccia *GCD – GMB bugnata* è stato riscontrato che per questa tipologia di interfaccia non è possibile svolgere test per valori di scorrimento pregresso che superano i 4 m circa (come si può vedere in Fig. 10.20 e 10.21), perché la struttura del geotessuto a contatto con la geomembrana bugnata si altera in seguito a grandi scorrimenti. Probabilmente le fibre del geotessuto nell'arco della stabilizzazione dell'interfaccia si orientano nella direzione dello scorrimento mentre una piccola parte di esse si strappa, invece a grandi valori di scorrimento cominciano a strapparsi tutte le fibre di geotessuto, alterandosi così il comportamento di resistenza dell'interfaccia.

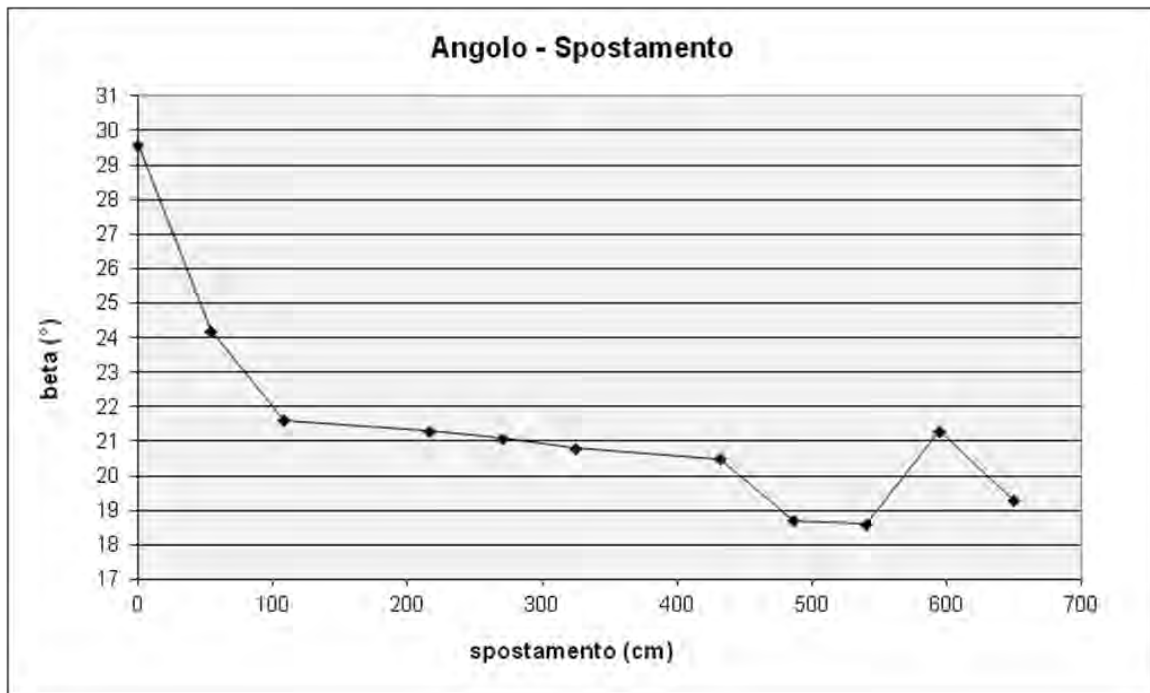


Fig. 10.20. Alterazione delle caratteristiche di resistenza dell'interfaccia *GCD – GMB bugnata* per alti valori di scorrimento pregresso.

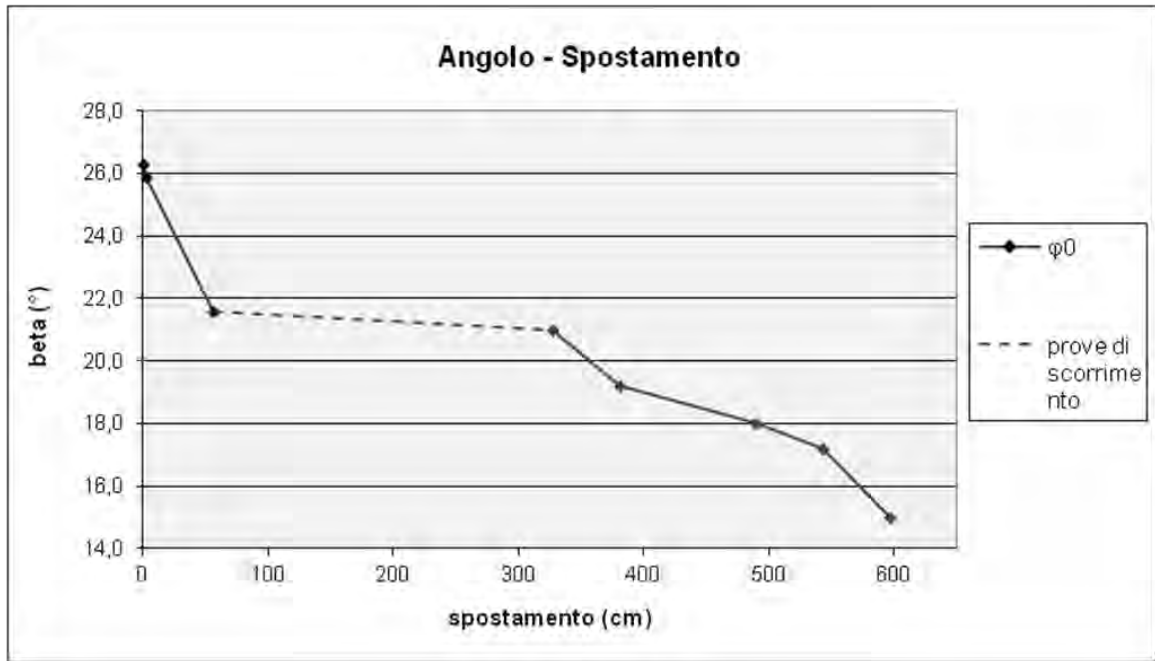


Fig. 10.21. Alterazione delle caratteristiche di resistenza dell'interfaccia *GCD – GMB bugnata* per alti valori di scorrimento progressivo.

11. RISULTATI DELLE PROVE DINAMICHE

11.1. INTERFACCIA GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD

Di seguito sono illustrati i risultati ottenuti con le prove dinamiche svolte sull'interfaccia *MACMAT R - Interdrain GMG 512*. La geostuoia è stata fissata sulla scatola con il lato con la geogriglia a contatto con il geocomposito drenante fissato sul piano inclinato.

11.1.1. Prove di Scorrimento

Per la determinazione dell'attrito dinamico di interfaccia sono state svolte una serie di prove fissando il piano inclinato a diversi valori di inclinazione superiori ai valori di primo stacco ottenuti con il corrispondente livello di spostamento pregresso e registrando le accelerazioni del blocco durante l'intera fase di scorrimento. Dalle misure di accelerazione della slitta (a_{blocco}), noto l'angolo di inclinazione del piano, è possibile risalire al coefficiente di attrito radente tramite l'eq. 9.2.

L'accelerazione del blocco è stata registrata sia con l'accelerometro collegato al blocco, sia tramite una registrazione video e successiva elaborazione dei dati in MATLAB.

L'analisi dei dati delle prove di scorrimento svolte con varie inclinazioni del piano ha messo in luce due classi di comportamento:

- *scorrimento immediato;*
- *scorrimento graduale.*

Nel caso di *scorrimento immediato* (Fig. 11.1 e 11.2), una volta attivato il moto del blocco lungo il piano, si ha un brusco aumento dell'accelerazione relativa che poi può più o meno mantenersi costante nella fase di scivolamento, a seconda dei materiali testati e

del valore di inclinazione del piano durante lo svolgimento della prova. Tale comportamento consente di applicare l'eq. 9.2 per la determinazione dell'attrito dinamico, anche se la precisione del valore ottenibile dipende, essenzialmente, da quanto il moto di scivolamento possa essere assimilato ad un moto uniformemente accelerato, ovvero dalla costanza o meno dell'accelerazione nel corso dello slittamento.

Nel caso di *scorrimento graduale* (Fig. 11.3 e 11.4), invece, non si osserva un brusco scivolamento del blocco lungo il piano, bensì l'instaurarsi di un moto lento, a velocità pressoché costante. In tale cinematismo si hanno valori di accelerazione relativa, del blocco rispetto al piano, estremamente piccoli nell'istante di inizio del moto e praticamente nulli nella fase di scivolamento. Partendo dalla osservazione sperimentale che il moto di scivolamento avviene a velocità costante, e che quindi l'accelerazione del blocco è nulla, si deduce che nel caso di scorrimento graduale non si verifica una riduzione dell'attrito nel passaggio dal valore statico a quello dinamico, dato che, per l'assenza di accelerazione, l'attrito dinamico deve eguagliare l'inclinazione del piano. Vista l'assenza di una accelerazione apprezzabile, l'eq. 9.2 coincide con l'eq. 9.1. Al fine di realizzare un moto di scivolamento con accelerazioni significative, e quindi misurabili, è necessario un cambiamento delle modalità di prova. In questi casi è opportuno fissare l'inclinazione del piano ad un valore sensibilmente superiore a quello limite per l'equilibrio statico e monitorare il moto accelerato di scivolamento del blocco in tali condizioni.

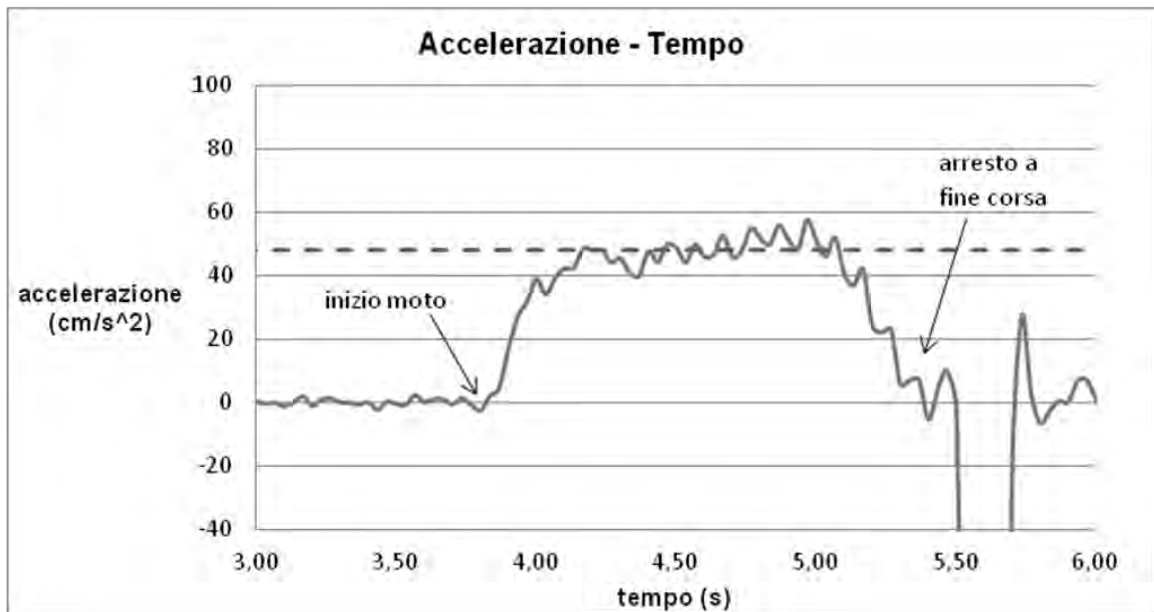


Fig. 11.1. Valutazione dell'attrito dinamico da misure di accelerazione con piano ad inclinazione fissa di 29.4°, per una interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

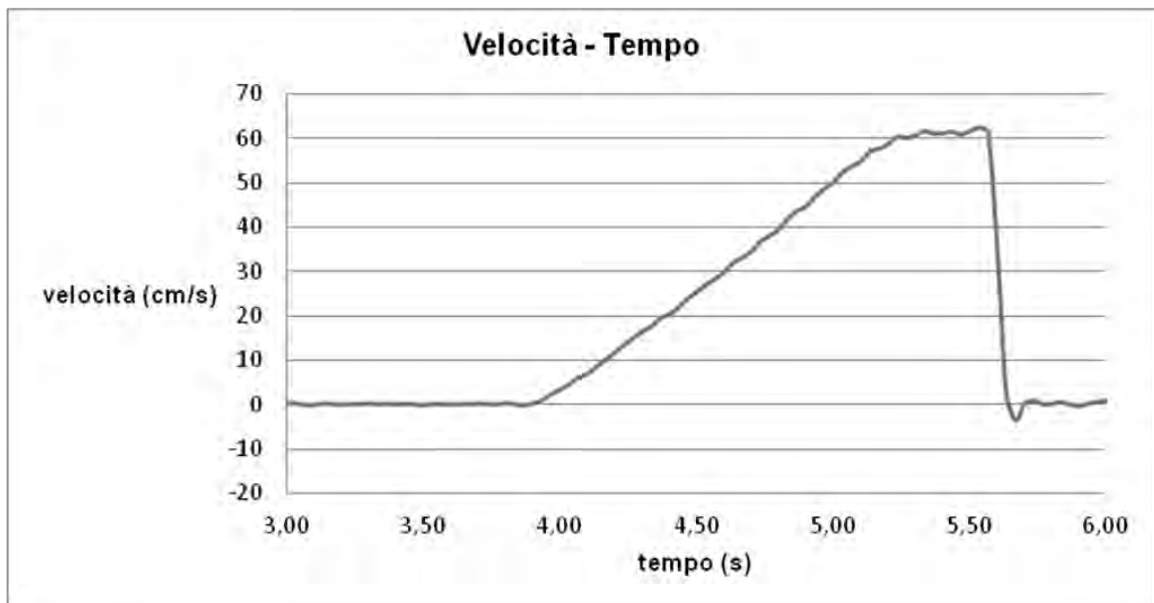


Fig. 11.2. Valutazione della velocità di scorrimento del blocco con piano ad inclinazione fissa di 29.4°, per una interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

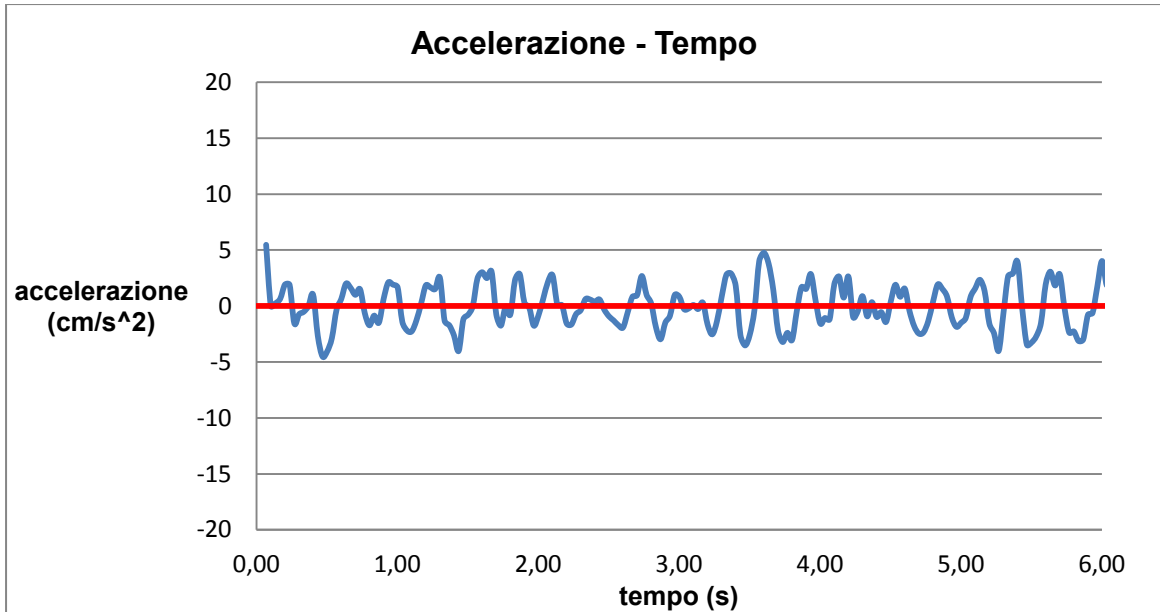


Fig. 11.3. Valutazione dell'attrito dinamico da misure di accelerazione con piano ad inclinazione fissa di 27.5°, per una interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

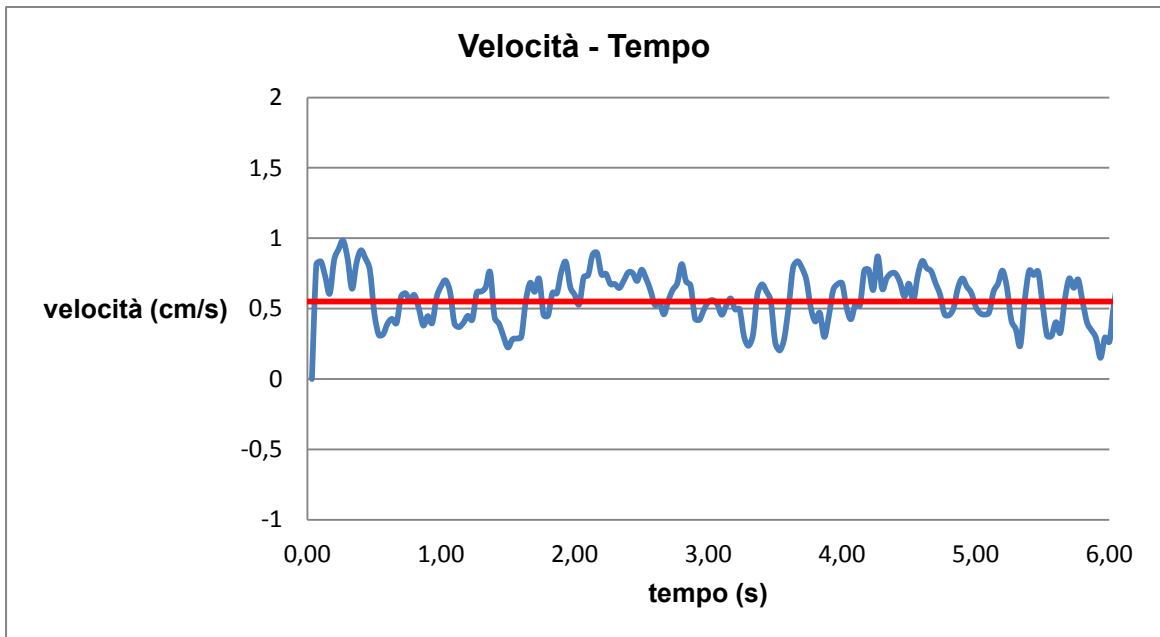


Fig. 11.4. Valutazione della velocità di scorrimento del blocco con piano ad inclinazione fissa di 27.5°, per una interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

In Fig. 11.5 sono riportati i risultati ottenuti con le prove di scorrimento svolte su più campioni di interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*, per valori di scorrimento pregresso confrontabili (da 0 a 3 m circa). L'insieme dei dati ottenuti definisce la variazione dell'attrito dinamico in funzione della velocità di scorrimento del blocco. L'attrito dinamico risulta definito da una curva che cresce rapidamente per bassi valori di velocità e si stabilizza intorno a 27.7° . Il tratto iniziale della curva, caratterizzato da bassissimi valori di scorrimento è stato ottenuto cronometrando visivamente la velocità di scorrimento del blocco, in quanto il blocco per bassi valori di inclinazione del piano si muove con velocità costante (moto uniforme). In questo caso, essendo nulla l'accelerazione del blocco, il valore di attrito dinamico coincide con l'inclinazione del piano. La parte alta della curva, essendo caratterizzata da alte velocità di scorrimento, è stata ottenuta con l'analisi dei dati registrati con un sistema video.

Nel primo tratto di curva a bassi valori di velocità ($v < 2$ cm/s), è stato registrato un incremento della velocità di circa 4.7° passando da velocità nulla a velocità di 2 cm/s.

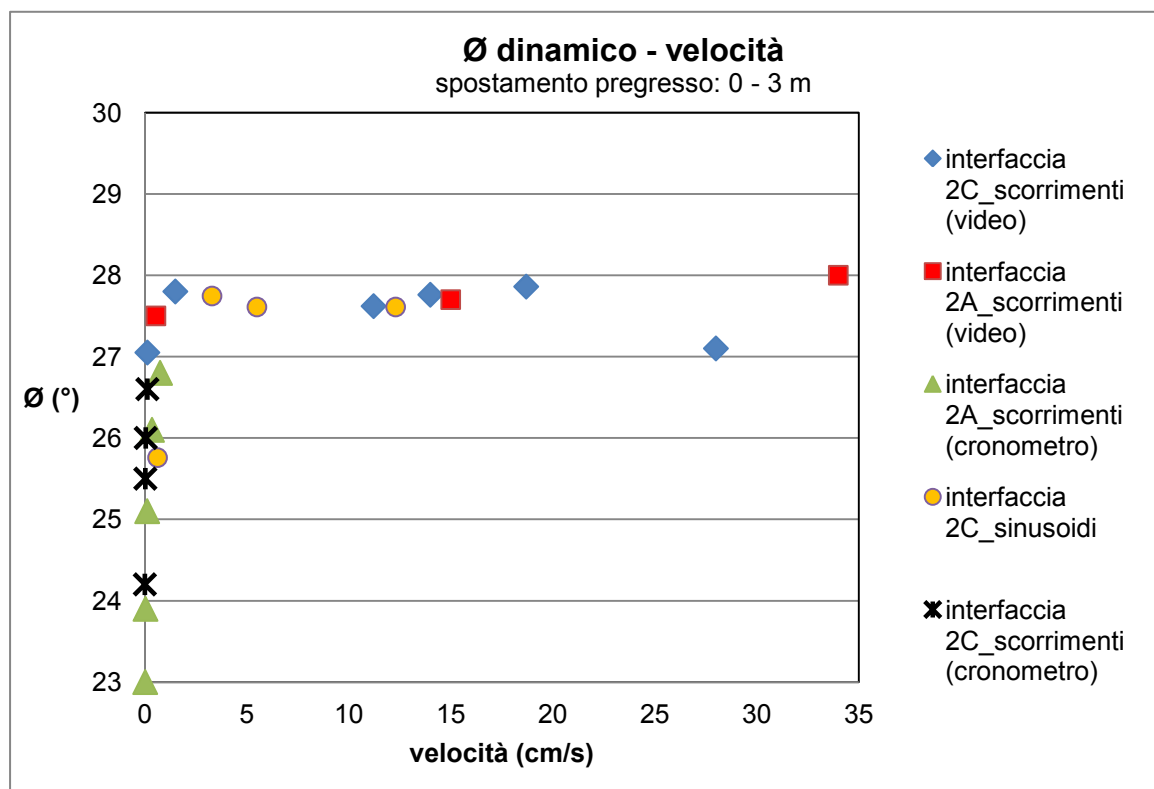


Fig. 11.5. Attrito dinamico in funzione della velocità: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

In Fig. 11.6 sono riportati i risultati delle prove di scorrimento svolte su due campioni di interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*, per valori di scorrimento pregresso compresi tra 12 m e 18 m. È stato riscontrato che per grandi valori scorrimento pregresso l'attrito dinamico diminuisce all'aumentare della velocità di scorrimento. La diminuzione registrata è comunque modesta e pari a circa 1° nell'intervallo di velocità 0 ÷ 70 cm/s.

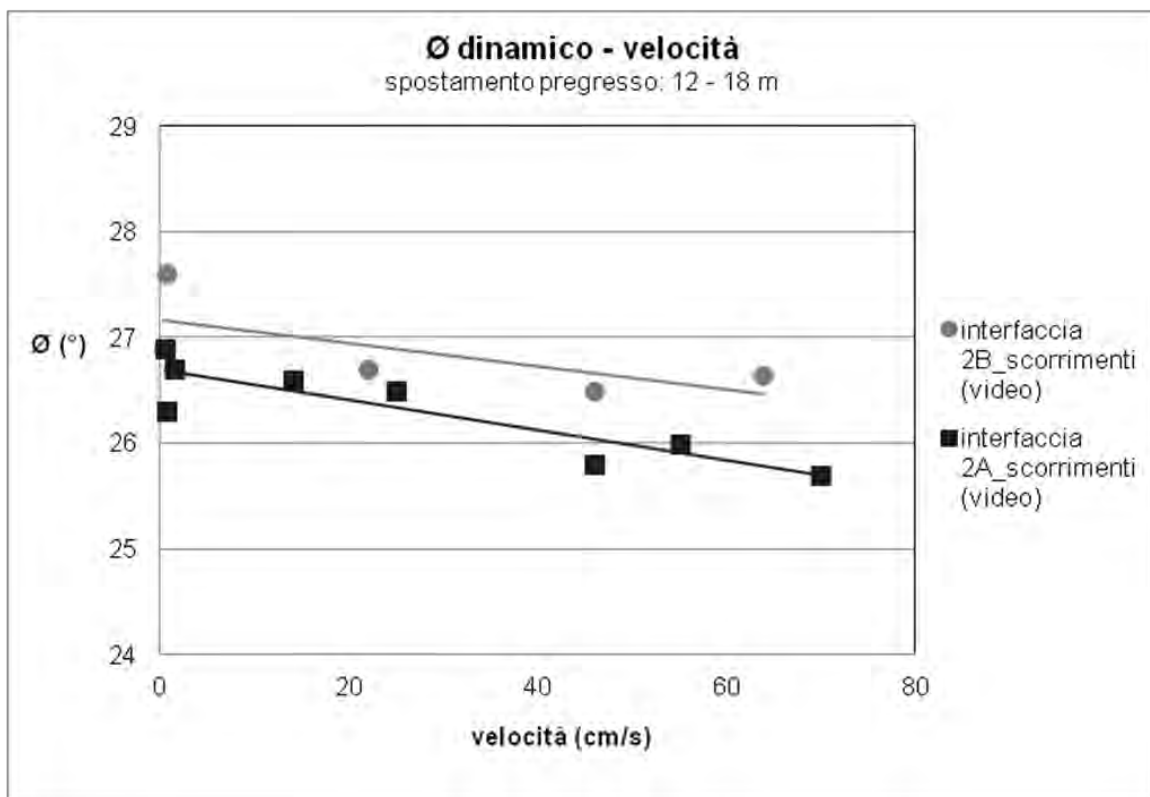


Fig. 11.6. Attrito dinamico in funzione della velocità: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

11.1.2. Prove con Sinusoide

Su una stessa interfaccia (2C) *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* sono state svolte una serie di prove con inclinazione fissa, applicando una certa sollecitazione dinamica di tipo sinusoidale alla tavola. Le prove svolte sono elencate di seguito:

- sinusoide: 3Hz_0.4g_inclinazione piano 12.5°
- sinusoide: 1.5Hz_0.4g_inclinazione piano 12.5°
- sinusoide: 3Hz_0.8g_inclinazione piano 0°
- sinusoide: 1.5Hz_0.2g_inclinazione piano 15°
- sinusoide: 1.5Hz_0.4g_inclinazione piano 10°

Per l'analisi di queste prove è stato utilizzato un sistema di registrazione video di due punti fissi (uno sulla tavola e uno sul blocco) e in seguito i dati video registrati sono stato elaborati con MATLAB, per ricavare gli spostamenti, le velocità e le accelerazioni. Sono, inoltre, state utilizzate i valori di accelerazione registrati dall'accelerometro fissato sul blocco e la time-history del segnale sinusoidale.

Di seguito vengono riportati, come esempio, i risultati della prova svolta applicando una sollecitazione sinusoidale di 3Hz_0.4g_inclinazione piano 12.5°. Durante questa prova il blocco è arrivato a fine corsa, percorrendo complessivamente 52 cm (Fig.11.9).

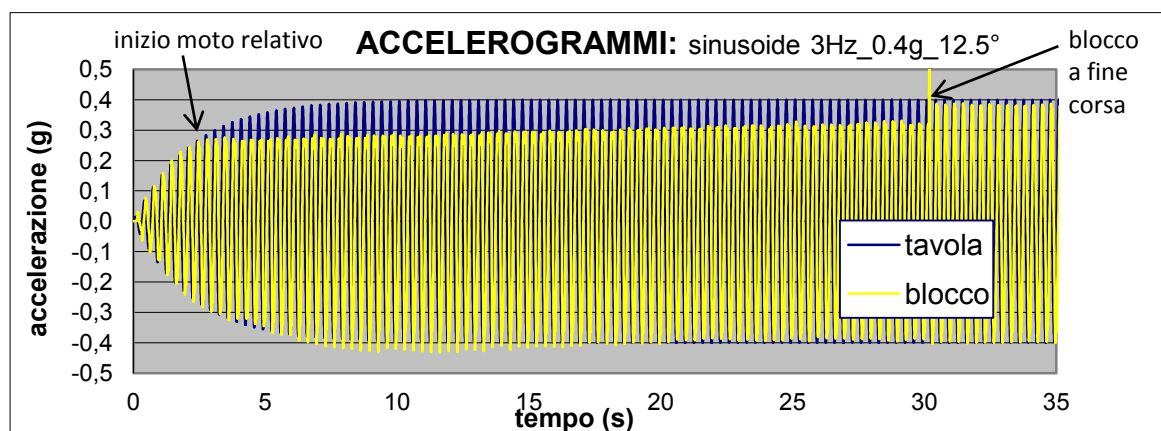


Fig. 11.7. Accelerogrammi della tavola e del blocco per una sollecitazione sinusoidale di 3Hz_0.4g e una inclinazione del piano di 12.5°: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

In Fig. 11.7 si può vedere come oltre un certo valore di accelerazione della tavola, ha inizio un moto di scorrimento relativo tra la tavola e il blocco. Questo valore di accelerazione viene chiamato *accelerazione critica* ed è indice dell'attrito dinamico dell'interfaccia in questione. In questo caso il valore di accelerazione critica è di circa

0.26 g e cresce leggermente con il numero di cicli, aumentando di conseguenza anche il valore di attrito dinamico (Fig. 11.8) calcolabile con l'Eq. 6.4 ($\varnothing_{\text{din}} = \tan^{-1}(a_b/g)$).

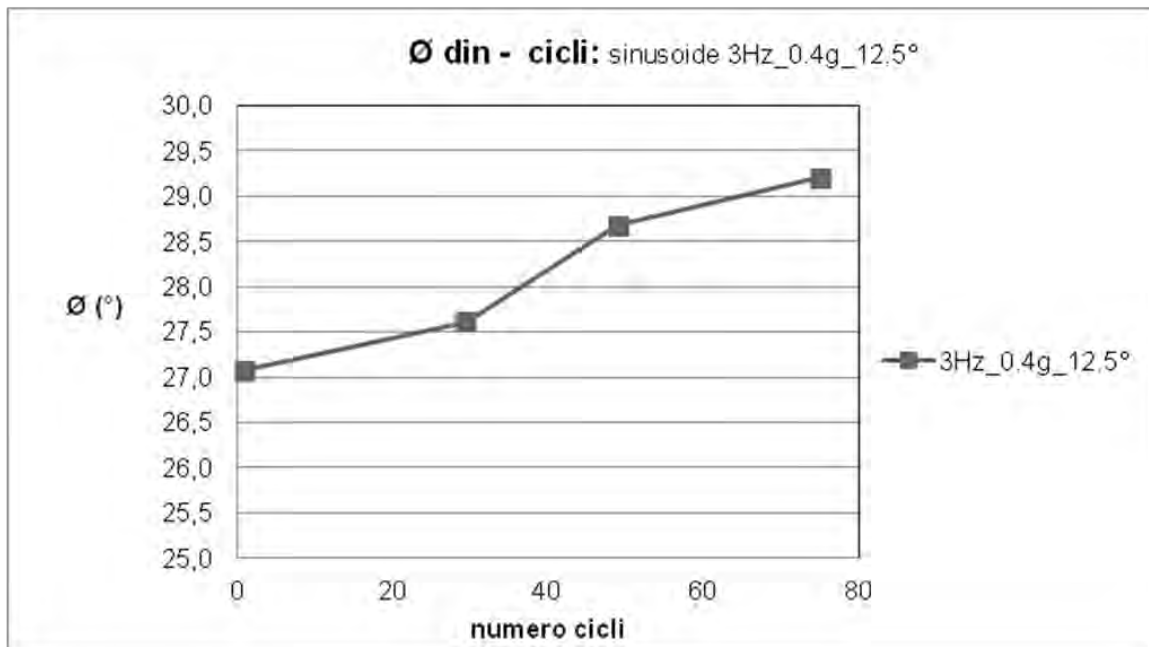


Fig. 11.8. Attrito dinamico in funzione del numero di cicli per una sollecitazione sinusoidale di 3Hz_0.4g e una inclinazione del piano di 12.5°: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

Questo aumento di attrito dinamico con il numero di cicli va imputato anche al fatto che all'aumentare del numero di cicli il blocco scorrendo si avvicina a fine corsa, e nell'arco della sperimentazione svolta con questa interfaccia è stato riscontrato che nella parte verso valle del campione di interfaccia si ha un attrito maggiore. Quindi, ai fini della definizione dell'attrito dinamico, vanno considerati solamente i valori fino a circa 40 cicli.

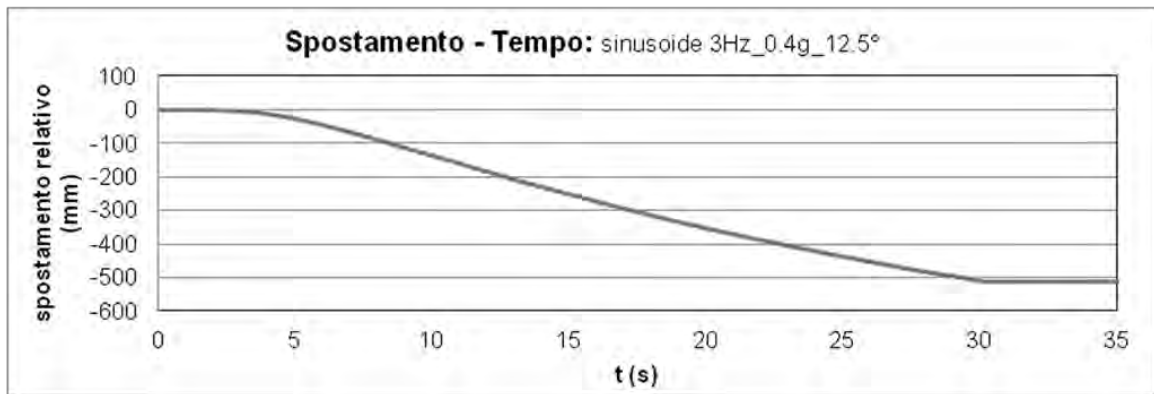


Fig. 11.9. Spostamento del blocco per una sollecitazione sinusoidale di 3Hz_0.4g e una inclinazione del piano di 12.5°: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

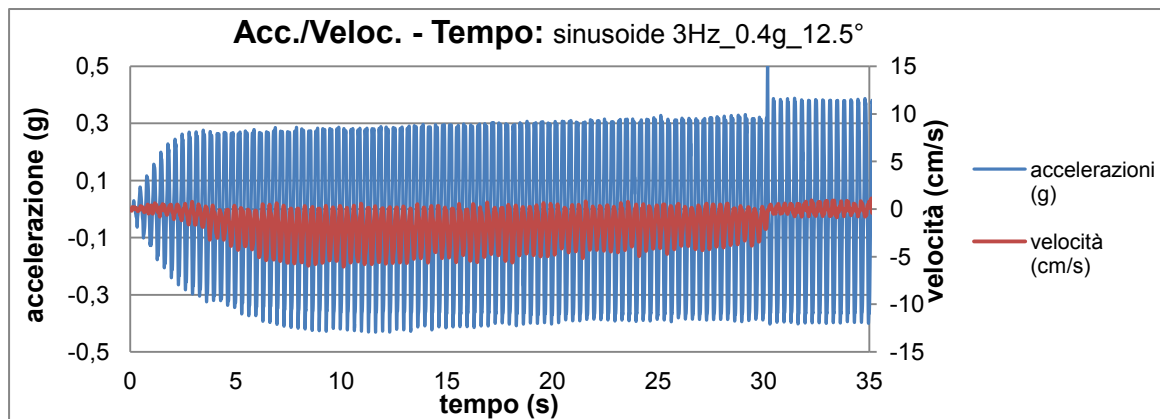


Fig. 11.10. Accelerazioni e velocità relative per una sollecitazione sinusoidale di 3Hz_0.4g e una inclinazione del piano di 12.5°: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

In Fig. 11.10 sono riportate le accelerazioni e le velocità relative che si ottengono applicando una sinusoide 3Hz_0.4g_ inclinazione piano 12.5° con l'interfaccia in questione.

Si considerano ora i risultati ottenuti con l'insieme delle prove con sinusoide svolte, trascurando il caso di inclinazione del piano nulla, e considerando i valori di attrito dinamico in funzione della velocità in corrispondenza della stessa posizione del blocco sul piano rispetto a fine corsa (spostamento = 30 cm da fine corsa). Se si riportano i valori di attrito dinamico nel grafico in funzione della velocità (Fig. 11.5, pallini arancioni), essi si inseriscono perfettamente nell'andamento già delineato con i risultati delle prove di

scorrimento. Questo fatto conferma la validità delle prove di scorrimento svolte in precedenza migliora la caratterizzazione dell'attrito dinamico in funzione della velocità.

Un risultato singolare è stato ottenuto svolgendo una prova con inclinazione del piano di 0° e una sinusoide di 3Hz_0.8g. In questo caso infatti sono stati ottenuti valori di attrito dinamico pari a circa 31.8° , ben maggiori (circa 4°) rispetto ai 27.7° ottenuti con inclinazioni del piano maggiori di zero.

Oltre alle prove discusse fino ad ora, sono state svolte una serie di 3 prove cicliche con un nuovo campione di interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*. È stato utilizzato un segnale sinusoidale di 3Hz_0.8g ed una inclinazione del piano di 0° . Le tre prove sono state svolte in sequenza quindi si può graficare come varia l'angolo di attrito dinamico in funzione del numero di cicli. Si ottiene che l'angolo di attrito dinamico rimane invariato all'aumentare dei numeri di cicli e pari ad un valore di circa 30.5° . Anche in questo caso di prove con inclinazione del piano nulla, è stato ottenuto un valore di attrito dinamico ben maggiore rispetto ai casi con inclinazione maggiore di zero.

In definitiva si può affermare che con le prove dinamiche (prove di scorrimenti e prove con sinusoidi) svolte con inclinazione del piano nulla si ottengono valori di attrito dinamico notevolmente maggiori rispetto a quelli ottenuti svolgendo le stesse prove ma con inclinazioni del piano maggiori di zero. In Fig. 11.11 sono riportati i valori medi di attrito dinamico per velocità medio alte ($10 \div 20$ cm/s) e spostamento pregresso compreso tra 0 m e 3 m circa, ottenuti con le prove dinamiche svolte.

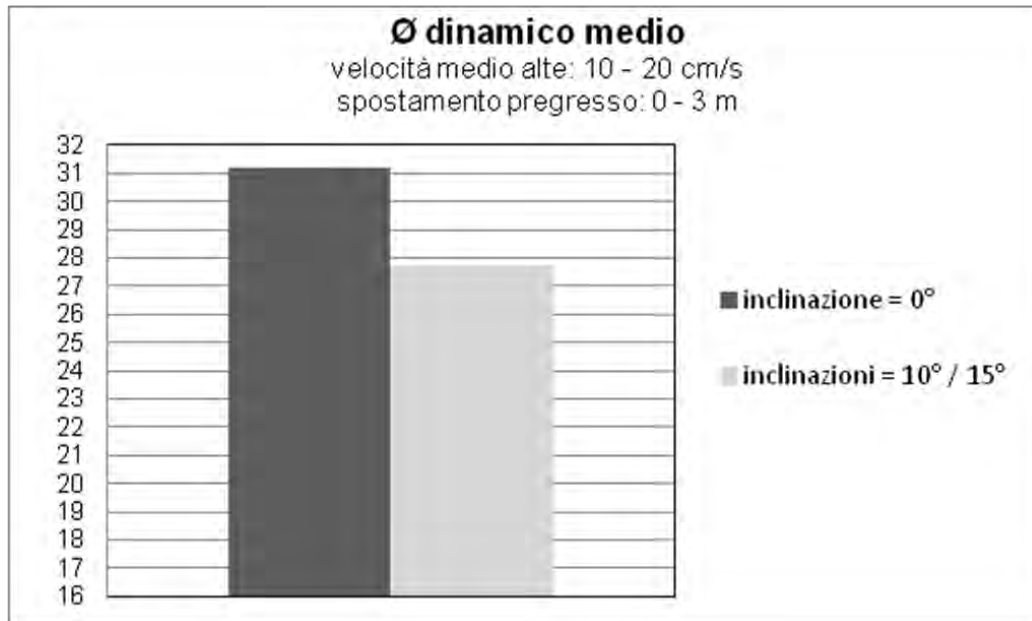


Fig. 11.11. Valori medi di attrito dinamico per velocità medio alte e spostamento pregresso compreso tra 0 m e 3 m: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

11.1.3. Prove con Sisma

Su una stessa interfaccia (2D) *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* sono state svolte due prove con inclinazione fissa, applicando come sollecitazione dinamica due diversi segnali sismici. I segnali sismici riprodotti durante lo svolgimento delle prove sono i seguenti:

- *Terremoto de L'Aquila* del 6/04/2009: registrato a Valle Alterno; componente WE; PGA = 0.66 g.
- *Terremoto Umbria-Marche* del 26/09/1997: seconda scossa registrata a Nocera Umbra; componente NS; scalato a PGA = 0.66 g.

Per entrambe le prove svolte è stata utilizzata una inclinazione fissa del piano di 15°. In Fig. 11.12 sono riportati gli accelerogrammi registrati durante lo svolgimento della prova con il *Terremoto de L'Aquila*. Si vede che il blocco comincia a scorrere rispetto al piano una volta raggiunto un valore di accelerazione critica di circa 0.22 g, a cui corrisponde un valore di attrito dinamico di circa 27.5°, valore coincidente con quello trovato svolgendo le prove dinamiche (prove di scorrimento e prove con sinusoidi) a velocità medio alte.

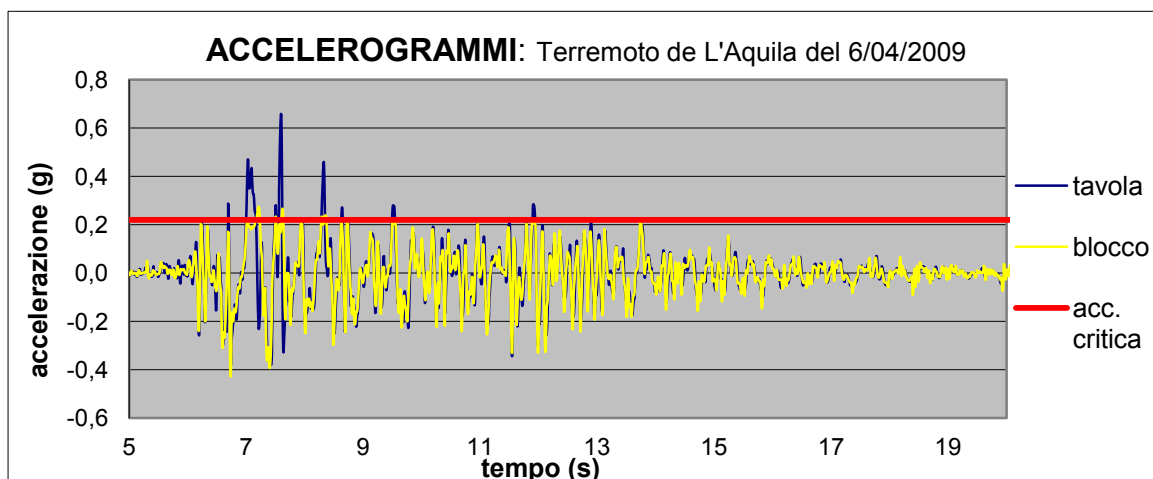


Fig. 11.12. Accelerogrammi della tavola e del blocco per una riproduzione del Terremoto de L'Aquila del 6/04/2009 e una inclinazione del piano di 15°: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

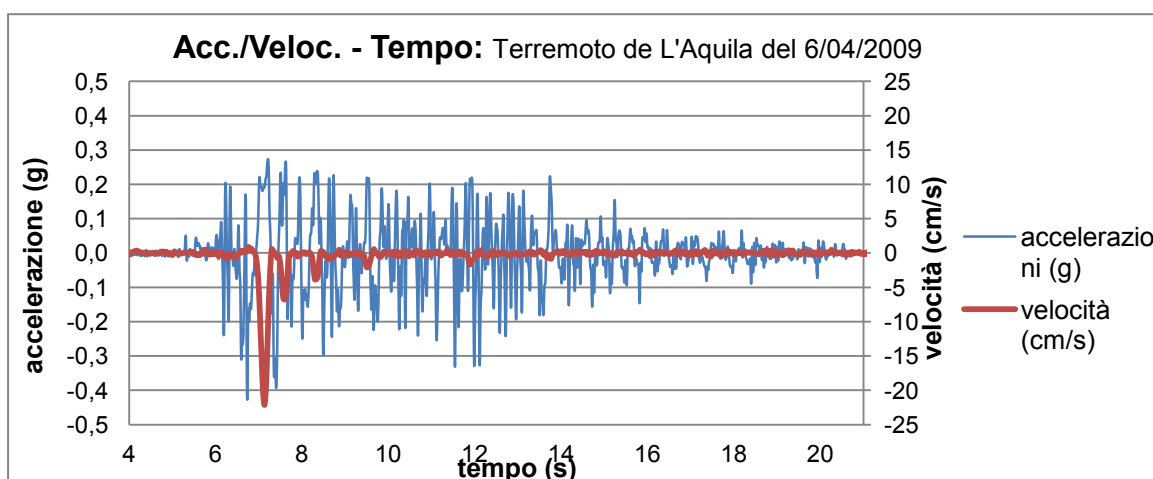


Fig. 11.13. Accelerazioni e velocità relative per una riproduzione del Terremoto de L'Aquila del 6/04/2009 e una inclinazione del piano di 15°: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

In Fig. 11.4 è riportato lo spostamento del blocco durante l'applicazione del Terremoto de L'Aquila e le previsioni ottenute con l'analisi numerica, con un programma sviluppato dall'Ing. Paolo Pavanello, ipotizzando due diversi valori di attrito dinamico fissi: 26.0° e 26.3°. Si può notare che la simulazione sismica con l'analisi numerica fornisce buoni risultati.

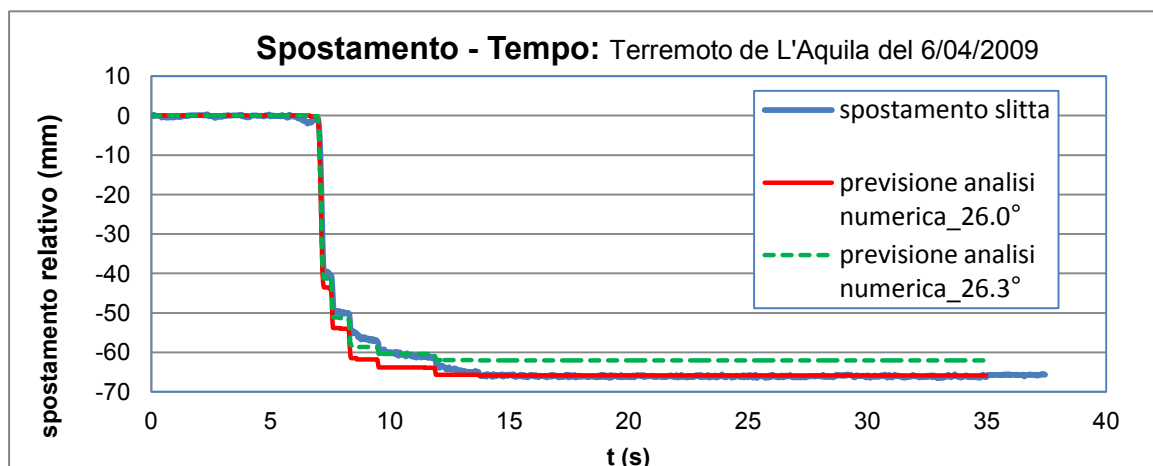


Fig. 11.14. Spostamento del blocco per una riproduzione del Terremoto de L'Aquila del 6/04/2009 e una inclinazione del piano di 15° . Confronto tra valori misurati e analisi numerica. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

In Fig. 11.15 sono riportati gli accelerogrammi registrati durante lo svolgimento della prova con il Terremoto Umbria-Marche. Anche in questo caso, come per il Terremoto de L'Aquila, si vede che il blocco comincia a scorrere rispetto al piano una volta raggiunto un valore di accelerazione critica di circa 0.22 g , a cui corrisponde un valore di attrito dinamico di circa 27.5° , valore coincidente con quello trovato svolgendo le prove dinamiche (prove di scorrimento e prove con sinusoidi) a velocità medio alte.

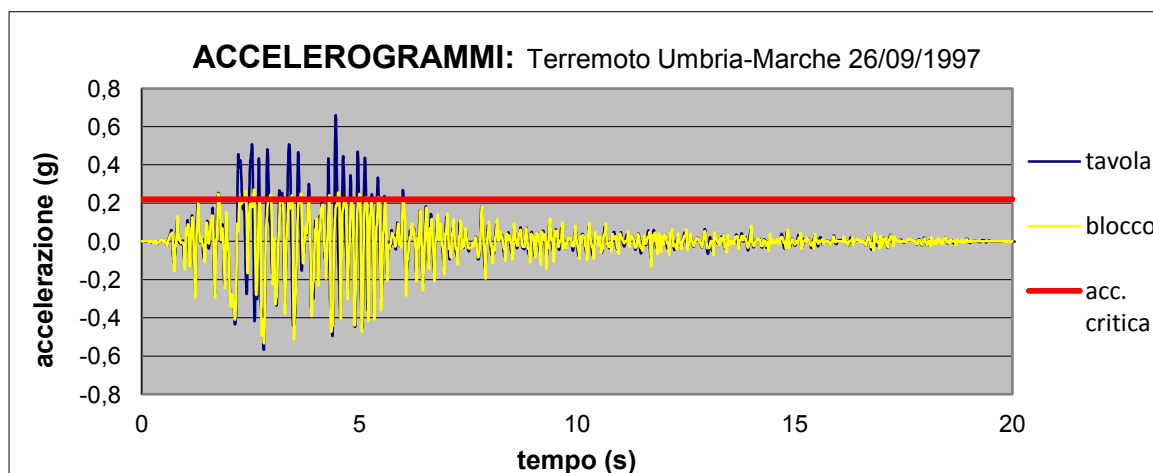


Fig. 11.15. Accelerogrammi della tavola e del blocco per una riproduzione del Terremoto Umbria-Marche del 26/09/1997 e una inclinazione del piano di 15°: interfaccia *GHOSTUOIA antierosione rinforzata* – *GCD*.

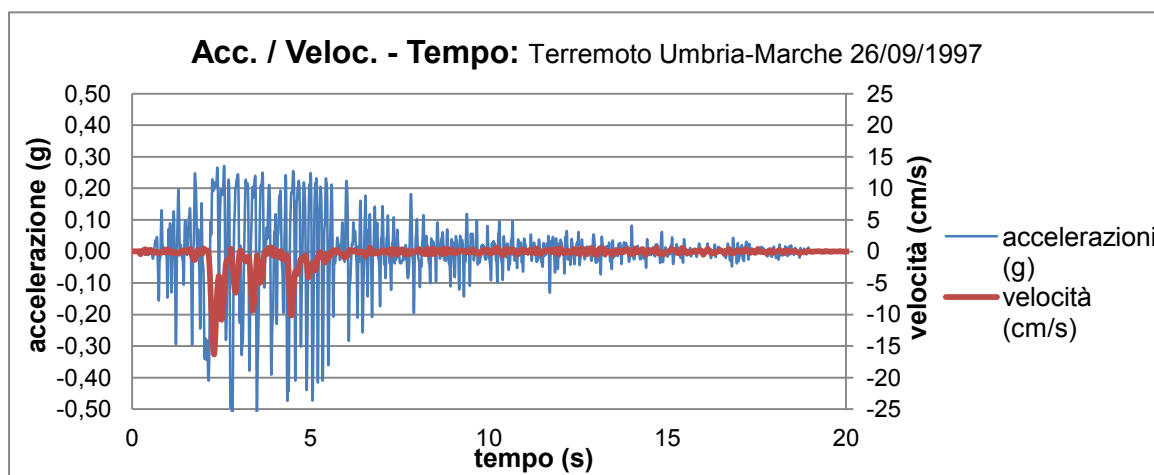


Fig. 11.16. Accelerazioni e velocità relative per una riproduzione del Terremoto Umbria-Marche del 26/09/1997 e una inclinazione del piano di 15°: interfaccia *GHOSTUOIA antierosione rinforzata* – *GCD*.

In Fig. 11.7 è riportato lo spostamento del blocco durante l'applicazione del Terremoto Umbria-Marche e le previsioni ottenute con l'analisi numerica, con un programma sviluppato dall'Ing. Paolo Pavanello, ipotizzando un valore di attrito dinamico costante di 26,4°. Si può notare che in questo caso la simulazione sismica con l'analisi numerica fornisce ottimi risultati.

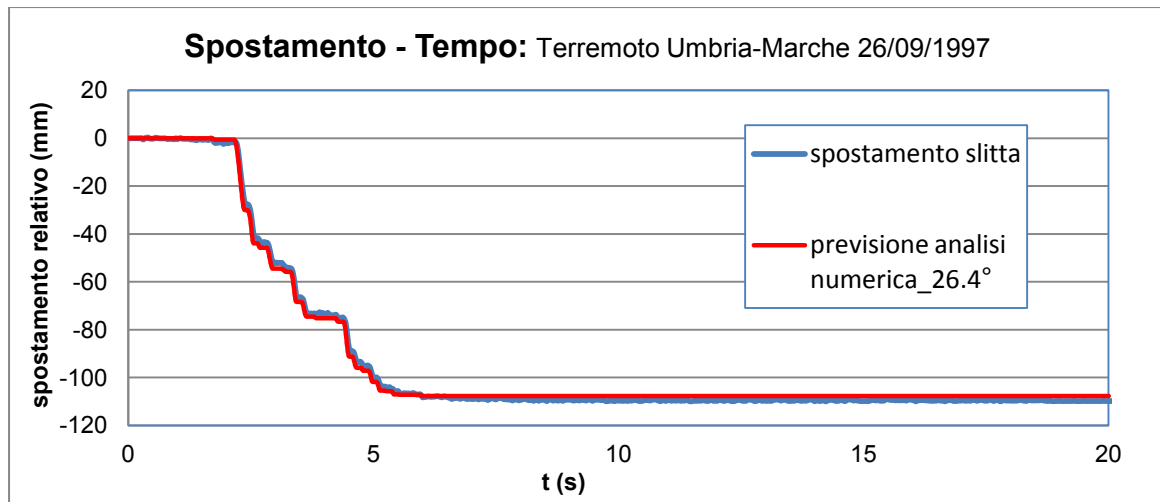


Fig. 11.17. Spostamento del blocco per una riproduzione del Terremoto de L'Aquila del 6/04/2009 e una inclinazione del piano di 15°. Confronto tra valori misurati e analisi numerica. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

11.1.4. Prove con carico incrementato

Con un campione nuovo di interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* (interfaccia 2D) sono state svolte due serie di scorrimenti con i seguenti valori di sollecitazione normale:

- circa 5 kPa (esattamente 5.35 kPa);
- circa 10 kPa (esattamente 9.93 kPa).

Gli andamenti dell'angolo di attrito dinamico in funzione della velocità sono riportati in Fig. 11.18. Si nota come il carico non influisce in alcun modo nella definizione dell'attrito dinamico in funzione della velocità. Inoltre, se si inseriscono i risultati ottenuti con queste prove nel grafico riportato in Fig. 11.5, essi si inseriscono perfettamente nel primo tratto di curva a basse velocità, durante il quale si ha una forte variazione di attrito dinamico.

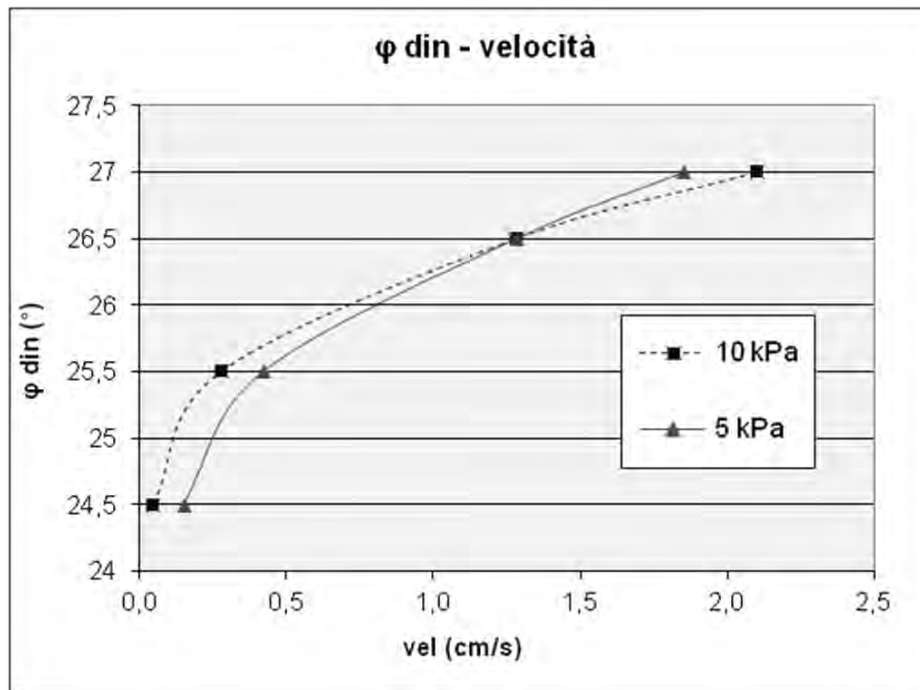


Fig. 11.18. Attrito dinamico in funzione della velocità: prove a 5 kPa e a 10 kPa. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

11.2. INTERFACCIA GCD – GMB bugnata

Di seguito sono illustrati i risultati ottenuti con le prove dinamiche svolte sull'interfaccia *Interdrain GMG 512 – ATARFIL TM 2.00*. Il geocomposito drenante è stato fissato sulla scatola con il lato di geotessuto meno uniforme a contatto con la geomembrana bugnata fissata sul piano inclinato.

11.2.1. Prove di Scorrimento

In Fig. 11.19 sono riportati i risultati ottenuti con le prove di scorrimento svolte su più campioni di interfaccia *GCD – GMB bugnata*, per valori di scorrimento pregresso confrontabili (da 1.3 m a 3 m circa). L'insieme dei dati ottenuti definisce la variazione dell'attrito dinamico in funzione della velocità di scorrimento del blocco. L'attrito dinamico risulta definito da una curva, approssimabile con un polinomio di quarto ordine. Si vede che l'attrito dinamico cresce con la velocità fino a valori di circa 17 cm/s, in

corrispondenza dei quali si ha un attrito dinamico di circa 21°, per poi decrescere fino a stabilizzarsi ad un valore di circa 19.2°.

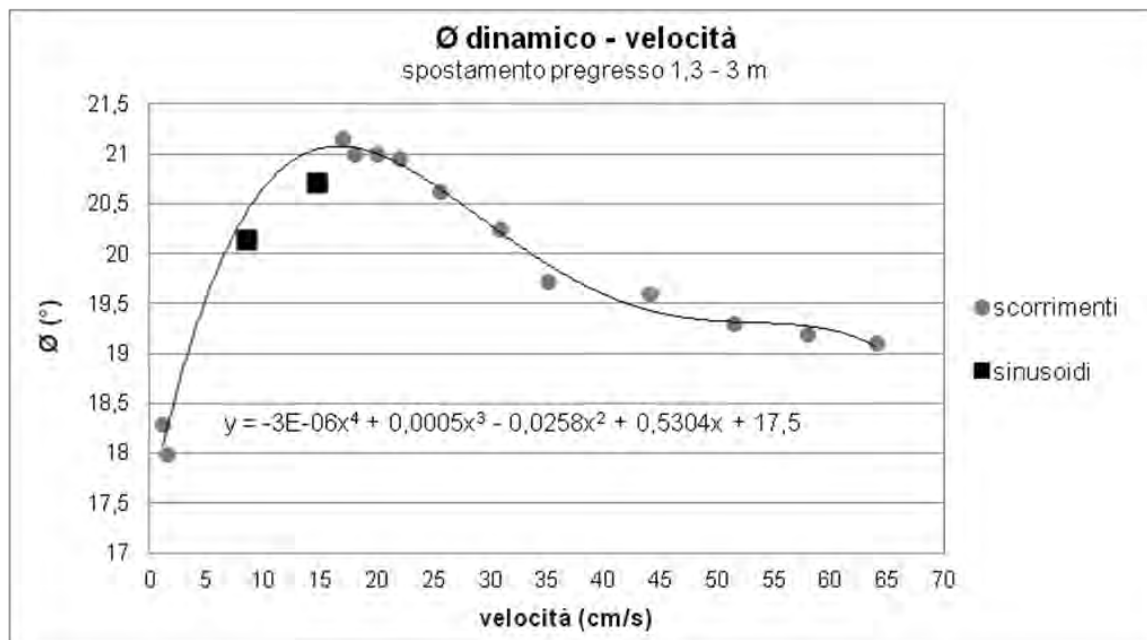


Fig. 11.19. Attrito dinamico in funzione della velocità: interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

11.1.2. Prove con Sinusoide

Su una stessa interfaccia (1C) *GCD – GMB bugnata* sono state svolte una serie di prove con inclinazione fissa, applicando una certa sollecitazione dinamica di tipo sinusoidale alla tavola. Le prove svolte sono elencate di seguito:

- sinusoide: 1.5Hz_0.2g_ inclinazione piano 15°
- sinusoide: 1.5Hz_0.15g_ inclinazione piano 15°
- sinusoide: 3Hz_0.8g_ inclinazione piano 0°

Come è già stato detto, per l'analisi di queste prove è stato utilizzato un sistema di registrazione video di due punti fissi (uno sulla tavola e uno sul blocco) e in seguito i dati video registrati sono stato elaborati con MATLAB, per ricavare gli spostamenti, le velocità e le accelerazioni. Sono, inoltre, state utilizzati i valori di accelerazione registrati dall'accelerometro fissato sul blocco e la time-history del segnale sinusoidale.

Di seguito vengono riportati, come esempio, i risultati della prova svolta applicando una sollecitazione sinusoidale di 1.5Hz_0.15g_ inclinazione piano 15°. Durante questa prova il blocco è arrivato a fine corsa, percorrendo complessivamente 52 cm.

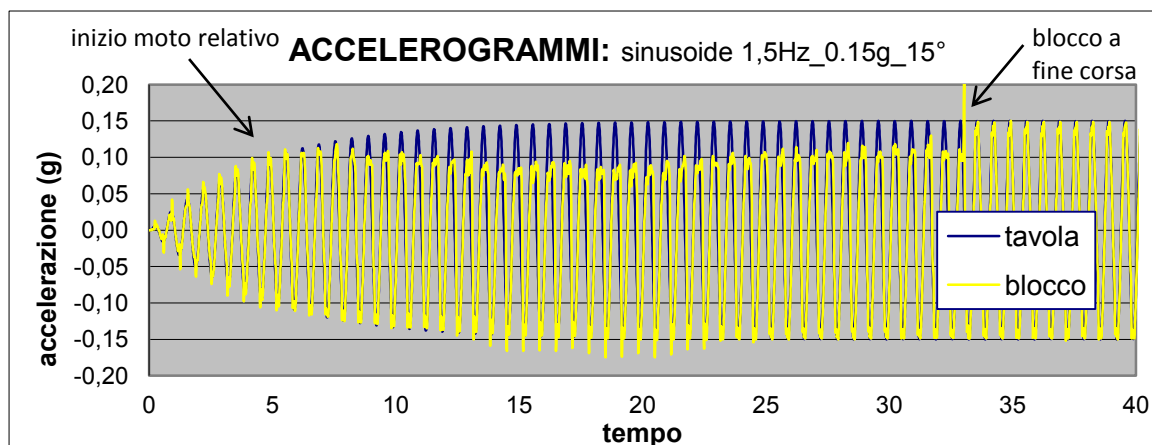


Fig. 11.20. Accelerogrammi della tavola e del blocco per una sollecitazione sinusoidale di 1.5Hz_0.15g e una inclinazione del piano di 15°: interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

In Fig. 11.20 si può vedere come oltre un certo valore di accelerazione della tavola, ha inizio un moto di scorrimento relativo tra la tavola e il blocco. Questo valore di accelerazione viene chiamato *accelerazione critica* ed è indice dell'attrito dinamico dell'interfaccia in questione. In questo caso il valore di accelerazione critica è di circa 0.1 g e varia leggermente con il numero di cicli, variando di conseguenza anche il valore di attrito dinamico (Fig. 11.22) calcolabile con l'Eq. 6.4 ($\phi_{\text{din}} = \tan^{-1} (a_b/g)$).

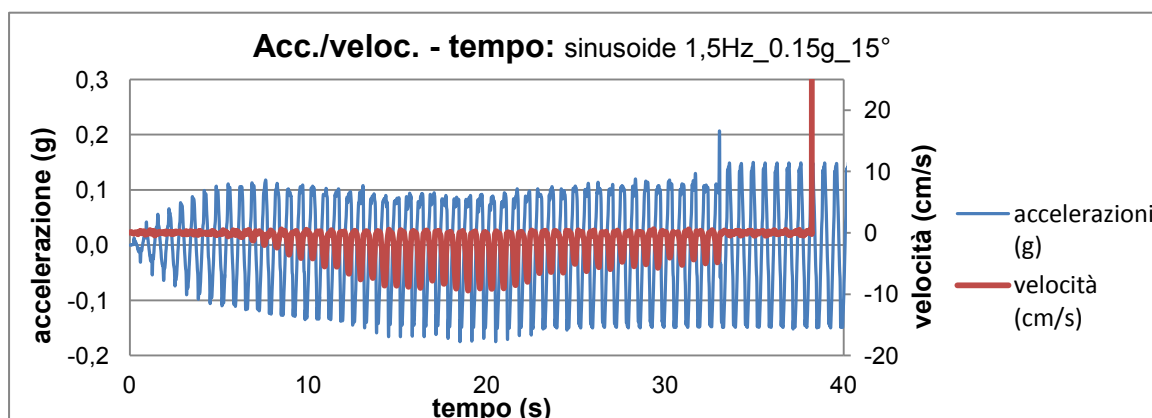


Fig. 11.21. Accelerazioni e velocità relative per una sollecitazione sinusoidale di 1.5Hz_0.15g e una inclinazione del piano di 15°: interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

In Fig. 11.21 sono riportate le accelerazioni e le velocità relative che si ottengono applicando una sinusoide 1.5Hz_0.15g_ inclinazione piano 15° con l'interfaccia in questione.

Si considerano ora i risultati ottenuti con l'insieme delle prove con sinusoide svolte, trascurando il caso di inclinazione del piano nulla, e considerando i valori di attrito dinamico in funzione della velocità in corrispondenza della stessa posizione del blocco sul piano rispetto a fine corsa (spostamento = 30 cm da fine corsa). Se si riportano i valori di attrito dinamico nel grafico in funzione della velocità (Fig. 11.19, quadrati rossi), essi consentono di completare la definizione dell'andamento delineato con i risultati delle prove di scorrimento, per valori di velocità inferiori a 20 cm/s.

Un risultato singolare è stato ottenuto svolgendo una prova con inclinazione del piano di 0° e una sinusoide di 3Hz_0.8g. In questo caso infatti sono stati ottenuti valori di attrito dinamico pari a circa 27.2°, ben maggiori (circa 6°) rispetto ai 21° ottenuti con inclinazioni del piano maggiori di zero (Fig.11.22).

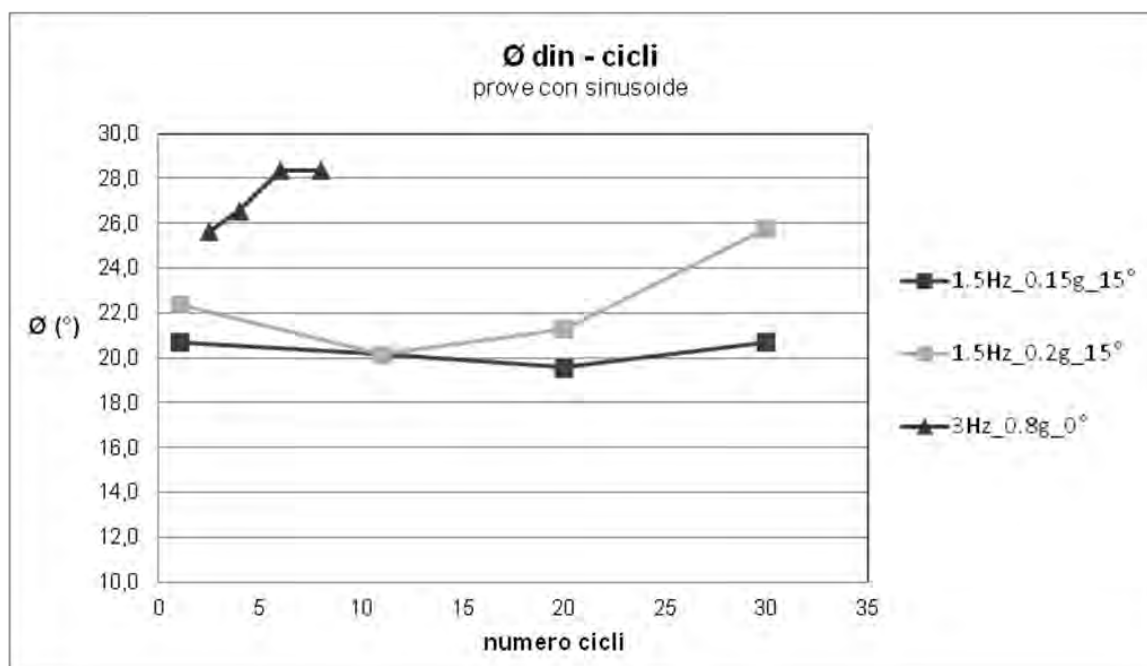


Fig. 11.22. Attrito dinamico in funzione del numero di cicli per sollecitazioni sinusoidali ad inclinazioni del piano di 15° e 0°: interfaccia GCD – GMB bugnata.

L'incremento dei valori, tra i 25 e i 30 cicli nel caso delle prove ad inclinazione di 15°, va imputato anche al fatto che all'aumentare del numero di cicli il blocco scorrendo si avvicina a fine corsa, e nell'arco della sperimentazione svolta con questa interfaccia è stato riscontrato che nella parte verso valle del campione di interfaccia si ha un attrito maggiore. Quindi, ai fini della definizione dell'attrito dinamico, vanno considerati solamente i valori fino a circa 20 cicli.

In definitiva si può affermare che con le prove dinamiche (prove di scorrimenti e prove con sinusoidi) svolte con inclinazione del piano nulla si ottengono valori di attrito dinamico notevolmente maggiori rispetto a quelli ottenuti svolgendo le stesse prove ma con inclinazioni del piano maggiori di zero. In Fig. 11.23 sono riportati i valori medi di attrito dinamico per velocità medio alte (10 ÷ 20 cm/s) e spostamento pregresso compreso tra 0 m e 3 m circa, ottenuti con le prove dinamiche svolte.

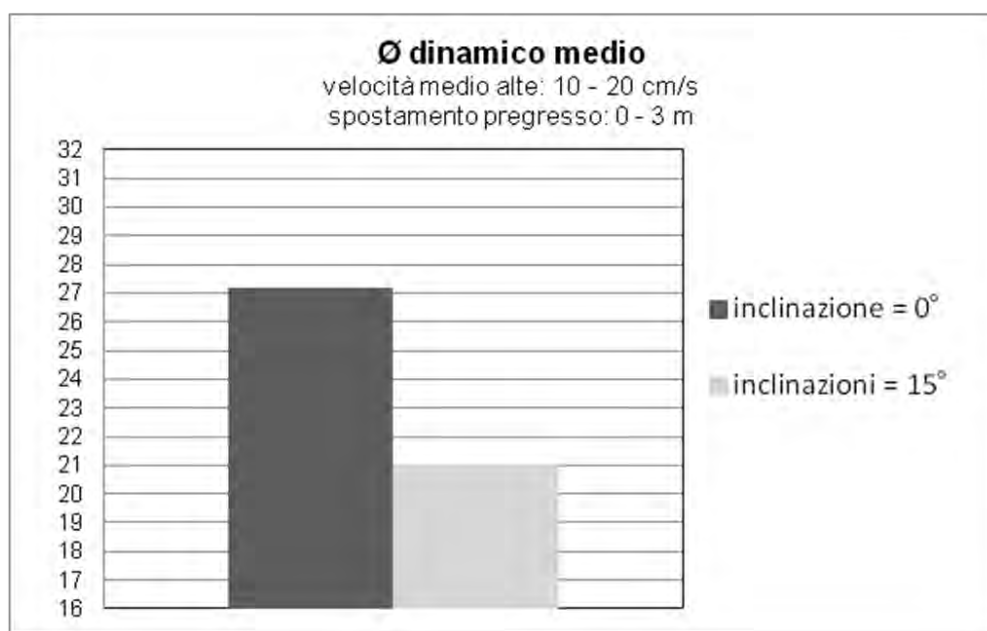


Fig. 11.23. Valori medi di attrito dinamico per velocità medio alte e spostamento pregresso compreso tra 0 m e 3 m: interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

11.2.3. Prove con Sisma

Sulla stessa interfaccia *GCD – GMB bugnata* su cui sono state svolte le prove con sinusoidi (interfaccia 1C), ad un livello di spostamento pregresso compreso tra 2.5 m e 3.0 m, sono state svolte due prove con inclinazione fissa, applicando come sollecitazione dinamica due diversi segnali sismici. I segnali sismici riprodotti durante lo svolgimento delle prove sono i seguenti:

- *Terremoto de L'Aquila* del 6/04/2009: registrato a Valle Alterno; componente WE; PGA = 0.66 g.
- *Terremoto Umbria-Marche* del 26/09/1997: seconda scossa registrata a Nocera Umbra; componente NS; scalato a PGA = 0.66 g.

Per entrambe le prove svolte è stata utilizzata una inclinazione fissa del piano di 15°. In Fig. 11.24 sono riportati gli accelerogrammi registrati durante lo svolgimento della prova con il Terremoto de L'Aquila. Si vede che il blocco comincia a scorrere rispetto al piano una volta raggiunto un valore di accelerazione critica di circa 0.1 g, a cui corrisponde un valore di attrito dinamico di circa 20.7°, valore coincidente con quello trovato svolgendo le prove dinamiche (prove di scorrimento e prove con sinusoidi) a velocità medio alte.

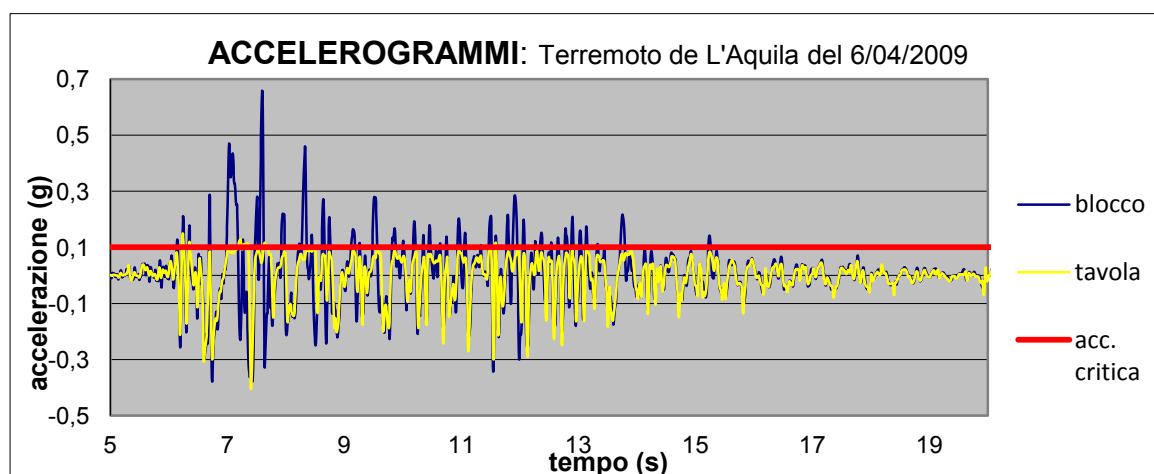


Fig. 11.24. Accelerogrammi della tavola e del blocco per una riproduzione del Terremoto de L'Aquila del 6/04/2009 e una inclinazione del piano di 15°: interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

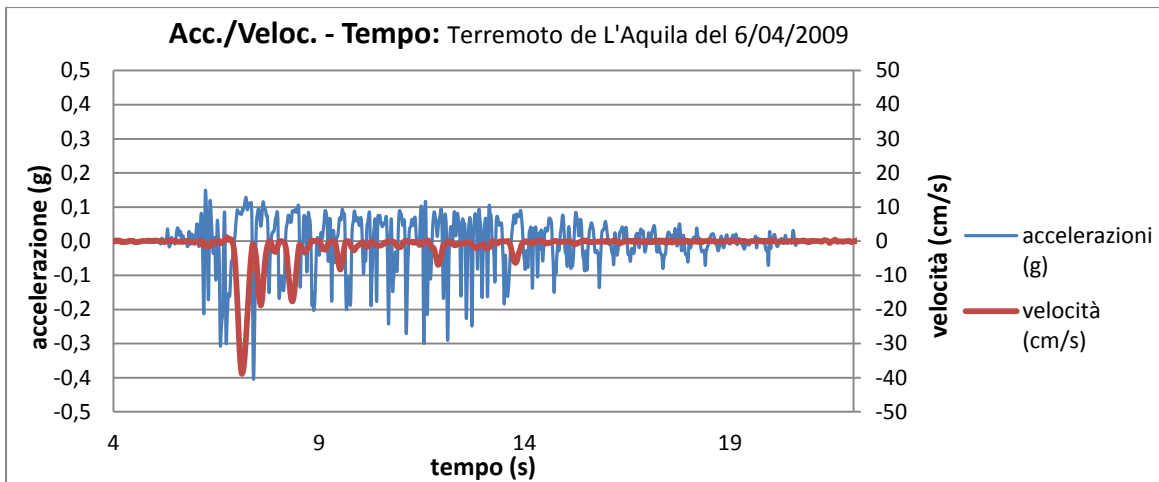


Fig. 11.25. Accelerazioni e velocità relative per una riproduzione del Terremoto de L'Aquila del 6/04/2009 e una inclinazione del piano di 15°: interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

In Fig. 11.26 è riportato lo spostamento del blocco durante l'applicazione del Terremoto de L'Aquila e le previsioni ottenute con l'analisi numerica, con un programma sviluppato dall'Ing. Paolo Pavanello, considerando la relazione attrito dinamico – velocità presentata in Fig. 11.19. Si può notare che la simulazione sismica con l'analisi numerica in questo caso fornisce valori di spostamento del blocco coincidenti con gli spostamenti realmente verificati durante la prova.

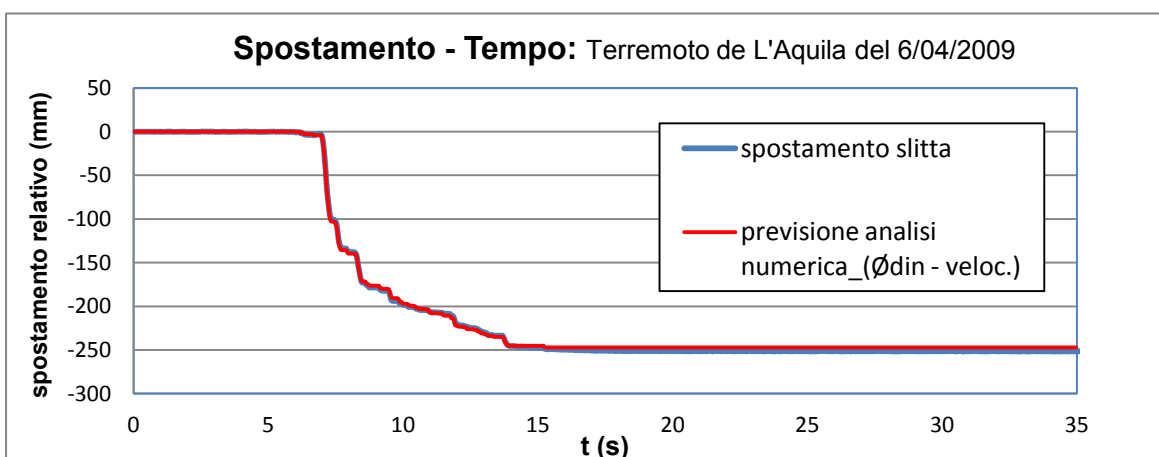


Fig. 11.26. Spostamento del blocco per una riproduzione del Terremoto de L'Aquila del 6/04/2009 e una inclinazione del piano di 15°. Confronto tra valori misurati e analisi numerica. Interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

In Fig. 11.27 sono riportati gli accelerogrammi registrati durante lo svolgimento della prova con il Terremoto Umbria-Marche. Anche in questo caso, come per il Terremoto de L'Aquila, si vede che il blocco comincia a scorrere rispetto al piano una volta raggiunto un valore di accelerazione critica di circa 0.1 g, a cui corrisponde un valore di attrito dinamico di circa 20.7° , valore coincidente con quello trovato svolgendo le prove dinamiche (prove di scorrimento e prove con sinusoidi) a velocità medio alte.

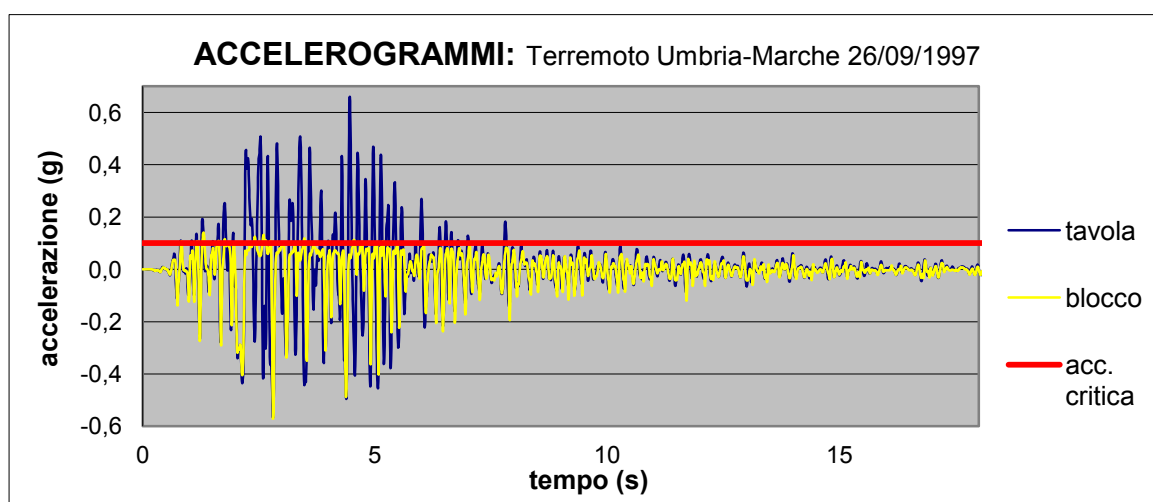


Fig. 11.27. Accelerogrammi della tavola e del blocco per una riproduzione del Terremoto Umbria-Marche del 26/09/1997 e una inclinazione del piano di 15° : interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

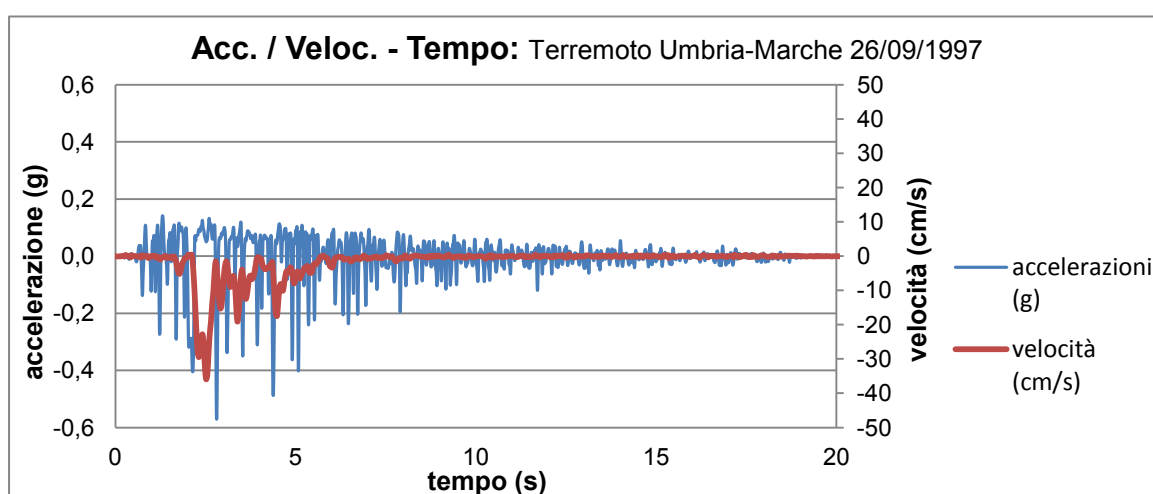


Fig. 11.28. Accelerazioni e velocità relative per una riproduzione del Terremoto Umbria-Marche del 26/09/1997 e una inclinazione del piano di 15° : interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

In Fig. 11.29 è riportato lo spostamento del blocco durante l'applicazione del Terremoto de L'Aquila e le previsioni ottenute con l'analisi numerica, con un programma sviluppato dall'Ing. Paolo Pavanello, considerando la relazione attrito dinamico – velocità presentata in Fig. 11.19. Si può notare che la simulazione sismica con l'analisi numerica in questo caso fornisce buoni risultati, anche se in maniera ridotta rispetto al caso con il Terremoto de L'Aquila.

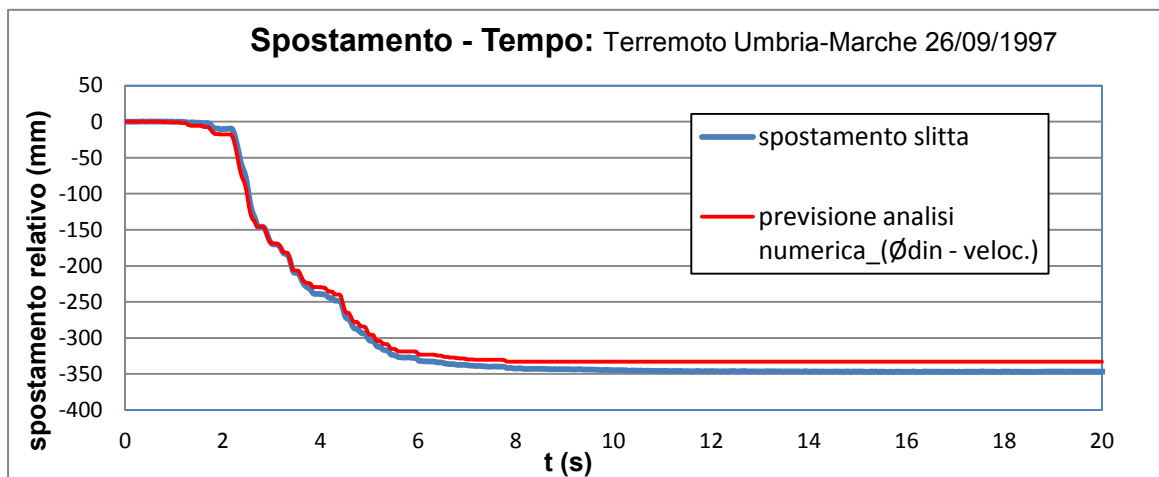


Fig. 11.29. Spostamento del blocco per una riproduzione del Terremoto de L'Aquila del 6/04/2009 e una inclinazione del piano di 15°. Confronto tra valori misurati e analisi numerica. Interfaccia *GCD – GMB* bugnata.

12. CONCLUSIONI

Di seguito sono riportate le conclusioni sviluppate dall'osservazione dei risultati ottenuti con le prove svolte durante l'analisi sperimentale delle interfacce *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* e *GCD – GMB bugnata* con il dispositivo sperimentale dell'Università di Padova.

12.1. PROVE STATICHE

L'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* ha dimostrato un maggiore comportamento viscoso rispetto all'interfaccia *GCD – GMB bugnata*. Questa differenza di comportamento delle interfacce è risultata evidente nel confronto dei risultati delle prove svolte con il Metodo della Forza. La variazione media dell'attrito statico nel tempo, da 10 s a 6 min, registrata con il metodo della forza con le due interfacce analizzate è riassunta in Tab. 12.1.

VARIAZIONE DI ATTRITO STATICO DOVUTA ALLA VISCOSITA' CON IL METODO DELLA FORZA (da 10 s a 6 min)	
interfaccia	$\Delta\varphi$ viscoso medio
GEOSTUOIA antierosione rinforzata - GCD	2,25°
GCD - GMB bugnata	1°

Tab. 12.1. Valori di carico normale utilizzati per le prove e corrispettivi angoli di attrito di primo distacco: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

In seguito alla sperimentazione svolta si può affermare la validità delle prove svolte con il Metodo della Forza con il dinamometro, in sostituzione al cavo teso utilizzato nella letteratura. Infatti con le prove con il cavo, durante l'inclinazione del piano, una volta

attivato il blocco e raggiunta la tensione del cavo, si continua ad alzare il piano, senza lasciare trascorrere alcun lasso di tempo ad inclinazione fissa. Questo procedimento non permette di considerare la viscosità che caratterizza le interfacce di geosintetici, che invece è possibile conteggiare con l'utilizzo di un semplice dinamometro.

Con le prove svolte con il Metodo della Forza, per entrambe le tipologie di interfaccia testate, si può ritenere rappresentativo il valore di φ_{lim} dopo 6 min, in quanto dopo questo intervallo di tempo si nota una stabilizzazione dell'attrito statico, in qualsiasi condizione di svolgimento della prova (vedi Fig. 12.1 e 10.4, 10.6, 10.8, 10.11, 10.17, 10.19).

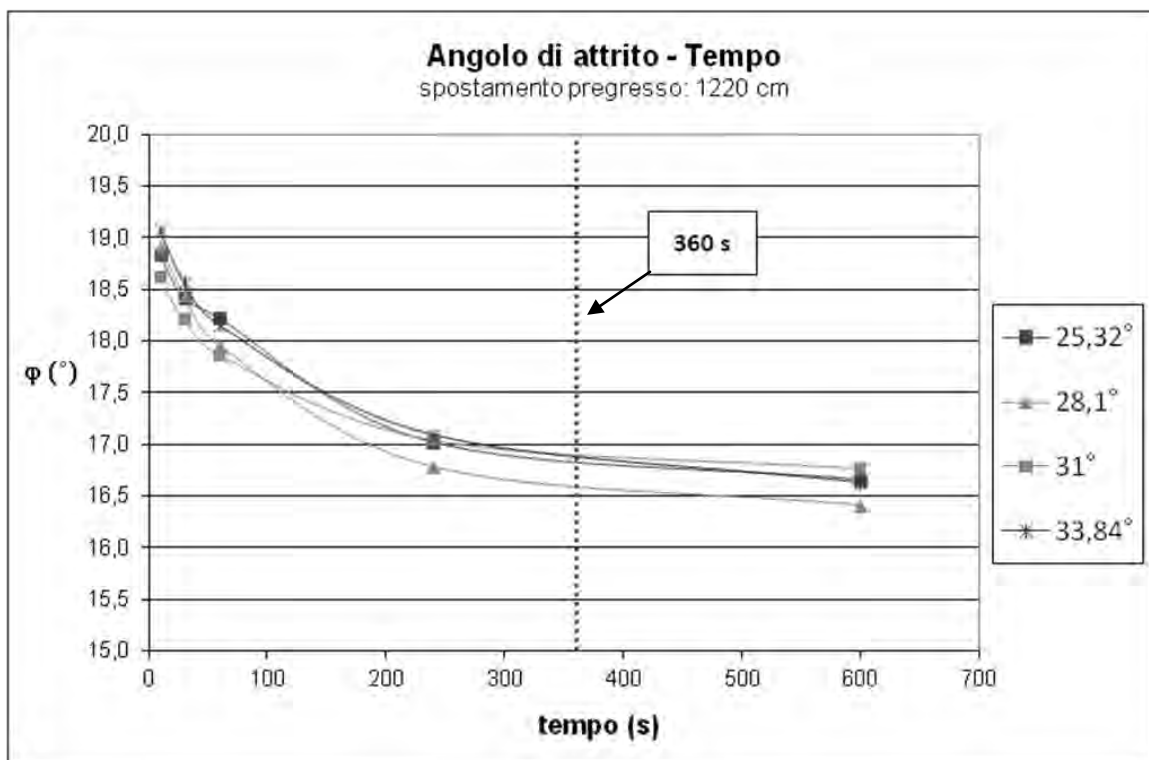


Fig. 12.1. Metodo della forza: stabilizzazione dell'attrito statico per uno spostamento pregresso di 1220 cm. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

Le prove con il Metodo della Forza dopo 6 min (φ_{lim}), svolte con lo stesso campione di interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* e a stessi livelli di scorrimento pregresso (interfaccia nuova e interfaccia stabilizzata a 1200 cm), hanno fornito gli stessi

valori di attrito ottenuti con le due seguenti tipologie di indagine, svolte nell'ambito dello studio della viscosità caratteristica dell'interfaccia (vedi Cap. 10.1.5.2):

- Prove svolte per determinare a quale inclinazione si genera lo scorrimento del blocco, aspettando a lungo termine che il blocco parta ($\varphi_{l.t.}$), con una inclinazione del piano fissa inferiore ai valori di primo distacco (φ_0) registrati.
- Prove svolte per determinare, una volta attivato il moto del blocco, fino a quale inclinazione del piano si mantiene attivo lo scorrimento del blocco, abbassando un po' alla volta il piano ($\varphi_{abbassando}$).

Per tanto, nel caso dell'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* (caratterizzata da una forte viscosità) si devono considerare come valori di attrito statico quelli ottenuti con le prove svolte con il Metodo della Forza (φ_{lim} dopo 6 min) e non quelli ottenuti con le prove di primo distacco (φ_0) o con le Prove Standard. Infatti, le prove di primo distacco, come anche le Prove Standard, non tengono conto dei fenomeni viscosi che caratterizzano l'interfaccia. Mentre, le prove con il Metodo della Forza sono in grado di considerare i fenomeni viscosi, con un buon livello di definizione dell'attrito statico ($\pm 0.3^\circ$).

In Fig. 12.2 vengono messi a confronto i risultati ottenuti con le tre metodologie di indagine svolte con l'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*. Si nota che il Metodo della Forza è la metodologia di prova che fornisce i valori più bassi di attrito statico. Il metodo di indagine che segue le indicazioni tecniche della Normativa Europea EN ISO 12957-2 (2005) (Prove Standard: φ_{50}) sovrastima l'attrito statico dell'interfaccia in questione in quantità notevole, fornendo valori superiori all'attrito statico ottenuto con il Metodo della Forza (φ_{lim}), di circa 7.2° . Con le prove di primo distacco si va sempre a sovrastimare l'attrito statico dell'interfaccia, ma in quantità inferiore rispetto alle Prove Standard. In particolare, con le prove di primo distacco (φ_0) si sovrastima l'attrito statico ottenuto con il Metodo della Forza di circa 4.2° . In Tab. 12.2 vengono riassunti gli scostamenti ottenuti nella definizione dell'attrito statico con le tre tipologie di prova svolte a vari valori di spostamento pregresso. Con le prove di primo distacco la sovrastima $\Delta\varphi$ dell'attrito statico rispetto al valore ottenuto con il Metodo della Forza resta all'incirca costante con lo spostamento pregresso ($\Delta\varphi_{medio} = 4.2^\circ$), mentre con le Prove Standard la sovrastima aumenta passando da $\Delta\varphi = 6.2^\circ$, per uno

spostamento pregresso di circa 0 m, a $\Delta\varphi = 9.0^\circ$, per uno spostamento pregresso di circa 12 m.

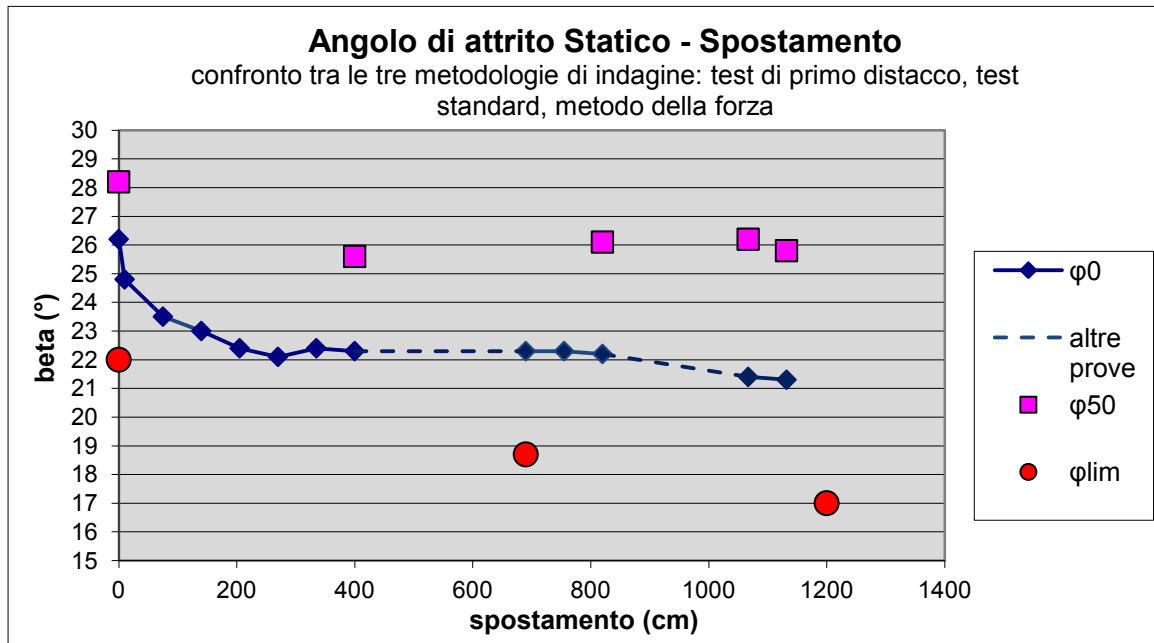


Fig. 12.2. Confronto tra le tre principali metodologie di indagine: test di primo distacco, test standard, metodo della forza. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

CONFRONTO TRA LE METODOLOGIE DI INDAGINE				
Sovrastima $\Delta\phi$ dell'attrito statico rispetto al valore ottenuto con il Metodo della Forza				
GEOSTUOIA antierosione rinforzata - GCD				
Metodo di indagine				
Metodo della Forza	ϕ statico ($^{\circ}$)			
	spostamento pregresso	≈ 0 m	≈ 7 m	≈ 12 m
		22	18,7	17
Prove di primo distacco	$\Delta\phi$ ($^{\circ}$)			
	spostamento pregresso	≈ 0 m	≈ 7 m	≈ 12 m
		4,2	3,6	4,5
Prove Standard (EN ISO 12957-2)		6,2	6,3	8,8
legenda:	$\Delta\phi$ campione nuovo		$\Delta\phi$ campione stabilizzato	

Tab. 12.2. Sovrastima dell'attrito statico ottenuta con le Prove di primo distacco e con le Prove Standard, rispetto al valore reale ottenibile con il Metodo della Forza: interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

Per l'interfaccia *GCD – GMB bugnata*, invece, con le prove svolte con il Metodo della Forza non si riesce a caratterizzare l'attrito statico in maniera adeguata, in quanto le prove svolte non hanno fornito valori univoci di attrito statico. Infatti sono stati ottenuti valori di attrito variabili in funzione dell'inclinazione del piano. L'unico valore di attrito che si è riuscito a definire approssimativamente con il Metodo della Forza è stato ottenuto con l'interfaccia stabilizzata e vale circa 17.7° . Se si confronta questo valore di attrito con quello ottenuto con le prove di primo distacco, sempre a livello di interfaccia stabilizzata (circa 20°), si riscontra una differenza di circa 2.3° . Quindi, anche con l'interfaccia *GCD – GMB bugnata* è stato osservato che il Metodo della Forza fornisce valori di attrito minori rispetto alle prove di primo distacco, a causa del fatto che esso considera i fenomeni viscosi. Questa differenza è minore rispetto a quella osservata nel caso dell'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*, poiché si è visto che

l'interfaccia *GCD – GMB bugnata* è caratterizzata da una minore viscosità rispetto all'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*.

Mettendo insieme i risultati delle prove di primo distacco svolte con l'interfaccia *GCD – GMB bugnata*, per determinare come il valore di attrito di primo distacco φ_0 si stabilizza con lo scorrimento, è stata riscontrata una notevole dispersione dei risultati (Fig. 10.14 e 10.15). Si osserva che l'angolo d'attrito di primo distacco con l'interfaccia nuova è di circa 28° , con una dispersione dal valor medio di $\pm 2.3^\circ$, e si stabilizza attorno a 20° in seguito ad uno scorrimento del blocco di circa 4 m, con una dispersione dal valor medio di ± 0.75 .

12.2. PROVE DINAMICHE

Con lo svolgimento delle prove con sinusoidi con una inclinazione del piano uguale a $\beta = 0^\circ$ e con le prove di scorrimento, sono stati ottenuti valori di attrito dinamico (φ_{din}) maggiori rispetto allo svolgimento delle stesse prove con sinusoidi con inclinazione del piano $\beta > 0^\circ$ ($\beta = 10\div 15^\circ$). In Fig. 12.3 sono riportati i valori medi di attrito dinamico ottenuti nei due casi di inclinazione del piano $\beta = 0^\circ$ e $\beta > 0^\circ$. Si nota come l'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* è caratterizzata da valori di attrito dinamico maggiori rispetto al caso di interfaccia *GCD – GMB bugnata*. Inoltre, si può osservare come la differenza tra i valori ottenuti con le prove dinamiche condotte con inclinazione del piano $= 0^\circ$ e quelli ottenuti con le stesse prove con sinusoidi con inclinazione del piano $> 0^\circ$ risulti maggiore nel caso dell'interfaccia *GCD – GMB* ($\Delta\varphi \approx 6.2^\circ$). Con l'interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD*, la differenza di attrito dinamico riscontrata è quasi la metà ($\Delta\varphi \approx 3.5^\circ$) rispetto all'interfaccia *GCD – GMB*.

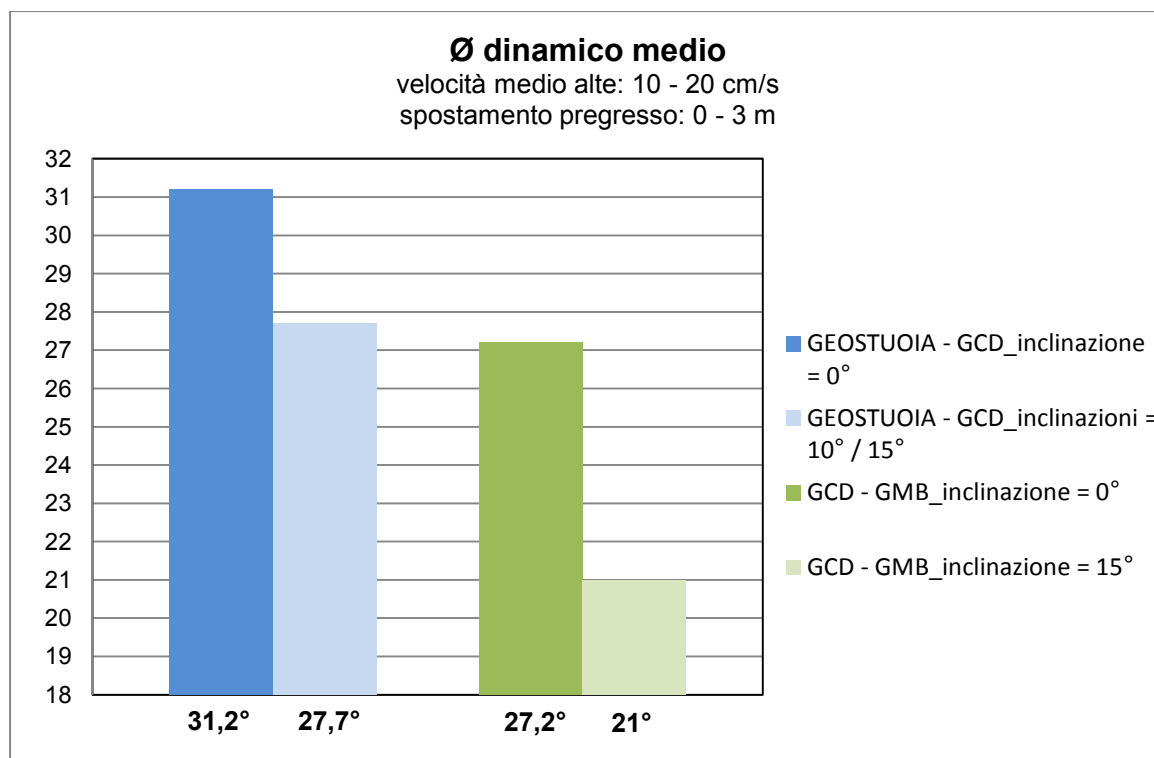


Fig. 12.3. Valori di attrito dinamico medio per velocità medio alte e spostamento progressivo compreso tra 0 m e 3 m: risultati prove ad inclinazione = 0° e > 0°. Interfaccia *GEOSTUOIA antierosione rinforzata – GCD* e interfaccia *GCD – GMB bugnata*.

Le simulazioni del Terremoto de L’Aquila 6/04/2009 e del Terremoto Umbria-Marche 26/09/1997, svolte per l’interfaccia *GCD – GMB bugnata*, con un programma sviluppato in Matlab dall’Ing. Paolo Pavanello, hanno fornito buoni risultati (vedi Fig. 11.14, 11.17, 11.26 e 11.29). In particolare è stato riscontrato che, considerando la relazione attrito dinamico – velocità, inserendo l’equazione che la governa all’interno del programma di simulazione, sono stati ottenuti risultati migliori rispetto alle simulazioni svolte considerando solamente un certo valore di attrito dinamico costante. Inoltre, la qualità dei risultati ottenuti con le simulazioni svolte variano da sima a sima, poiché entrambi i terremoti sono caratterizzati dagli stessi valori di accelerazione di picco (0.66 g) ma da diversi contenuti di frequenza del segnale.

BIBLIOGRAFIA

- Akpınar, M. V., & Benson, C. H. (2005). Effect of temperature on shear strength of two geomembrane–geotextile interfaces. *Geotextiles and geomembranes*, 23(5), 443-453.
- Bacas, B. M., Konietzky, H., Berini, J. C., & Sagasetta, C. (2011). A new constitutive model for textured geomembrane/geotextile interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(2), 137-148.
- Briançon, L., Girard, H., & Gourc, J. P. (2011). A new procedure for measuring geosynthetic friction with an inclined plane. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(5), 472-482.
- Briançon, L., Girard, H., & Poulain, D. (2002). Slope stability of lining systems—experimental modeling of friction at geosynthetic interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(3), 147-172.
- Carbone, L., Briançon, L., Gourc, J. P., Moraci, N., & Carrubba, P. (2012, September). Geosynthetic interface friction using Force Procedure at the Tilting Plane. In *5th European Conference on Geosynthetics-Eurogeo* (Vol. 5, pp. 93-98).
- Carbone, L., Gourc, J. P., Briançon, L., Moraci, N., & Carrubba, P. (2013). What value of interface friction to select for geosynthetic liner on landfill slopes. *Geosynthetic International*.
- De, A., & Zimmie, T. F. (1998). Estimation of dynamic interfacial properties of geosynthetics.
- G. Stolz & N. Vidal (2013). Alteration of Friction Characteristics of Geosynthetics Interfaces Following Successive Slidings.
- Giroud, J. P., Darrasse, J., & Bachus, R. C. (1993). Hyperbolic expression for soil-geosynthetic or geosynthetic-geosynthetic interface shear strength. *Geotextiles and Geomembranes*, 12(3), 275-286.

- Gourc, J. P., & Ramirez, R. R. (2004). Dynamics-based interpretation of the interface friction test at the inclined plane. *Geosynthetics International*, 11(6), 439-454.
- Gourc, J. P., Lalarakotoson, S., Muller-Rochholz, H., & Bronstein, Z. (1996). Friction measurement by direct shearing or tilting process: development of a European standard. In *Proceedings, Eurogeo* (Vol. 1, pp. 1039-1046).
- Hebel, G. L., Frost, J. D., & Myers, A. T. (2005). Quantifying hook and loop interaction in textured geomembrane–geotextile systems. *Geotextiles and Geomembranes*, 23(1), 77-105.
- Jones, D. R. V., & Dixon, N. (1998). Shear strength properties of geomembrane/geotextile interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, 16(1), 45-71.
- Karademir, T. (2011). *Elevated temperature effects on interface shear behavior* (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology).
- Kim, J., Riemer, M., & Bray, J. D. (2005). Dynamic properties of geosynthetic interfaces. *Geotechnical Testing Journal*, 28(3), 1-9.
- Lalarakotoson, S., Villard, P., & Gourc, J. P. (1999). Shear strength characterization of geosynthetic interfaces on inclined planes. *ASTM geotechnical testing journal*, 22(4), 284-291.
- Moss, A. L., & Anderson, L. R. (2000). Cylinder Direct Shear: A New Test Method. *Geotechnical Special Publication*, 106-116.
- Narejo, D. B. (2003). A simple tilt table device to measure index friction angle of geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(1), 49-57.
- Norma, EN ISO 12957-1, 2005. *Parte, 1*.
- Norma, EN ISO 12957-2, 2005. *Part, 2*.
- Pitanga, H. N., Gourc, J. P., & Vilar, O. M. (2009). Interface shear strength of geosynthetics: Evaluation and analysis of inclined plane tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(6), 435-446.

- Pitanga, H. N., Gourc, J. P., & Vilar, O. M. (2011). Enhanced measurement of geosynthetic interface shear strength using a modified inclined plane device. *Geotechnical Testing Journal*, 34(6), 10-pp.
- Ramirez, R. R., & Gourc, J. P. (2003). Use of the inclined plane test in measuring geosynthetic interface friction relationship. *Geosynthetics International*, 10(5), 165-175.
- Seo, M. W., Park, I. J., & Park, J. B. (2004). Development of displacement-softening model for interface shear behavior between geosynthetics. *地盤工学会論文報告集*, 44(6), 27-38.
- Seo, M. W., Park, J. B., & Park, I. J. (2007). Evaluation of interface shear strength between geosynthetics under wet condition. *Soils and Foundations*, 47(5), 845-856.
- Stark, T. D., & Poeppl, A. R. (1994). Landfill liner interface strengths from torsional-ring-shear tests. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(3), 597-615.
- Stark, T. D., Williamson, T. A., & Eid, H. T. (1996). HDPE geomembrane/geotextile interface shear strength. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(3), 197-203.
- Villard, P., Gourc, J. P., & Feki, N. (1999). Analysis of geosynthetic lining systems (GLS) undergoing large deformations. *Geotextiles and Geomembranes*, 17(1), 17-32.
- Wasti, Y., & Özdüzgün, Z. B. (2001). Geomembrane–geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(1), 45-57.
- Wu, W., Wick, H., Ferstl, F., & Aschauer, F. (2008). A tilt table device for testing geosynthetic interfaces in centrifuge. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(1), 31-38.
- Yegian, M. K., & Kadakal, U. (1998). Geosynthetic interface behavior under dynamic loading. *Geosynthetics International*, 5(1-2), 1-16.

- Yegian, M. K., & Lahlaf, A. M. (1992). Dynamic interface shear strength properties of geomembranes and geotextiles. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(5), 760-779.