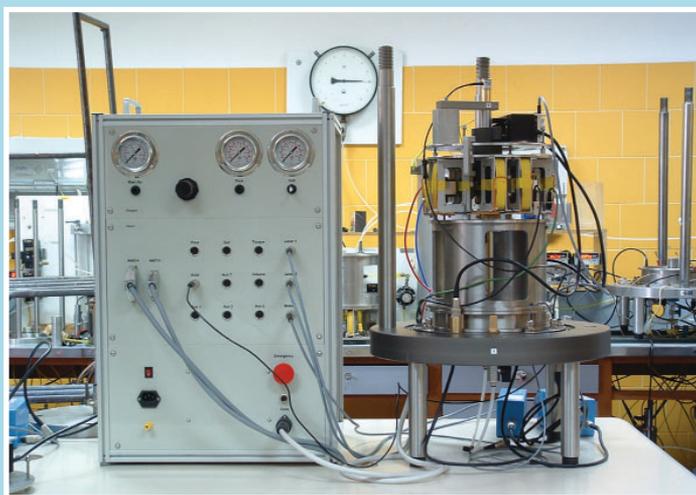


Centro Regionale di Competenza
Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale

Università degli Studi di Napoli Federico II
Dipartimento di Ingegneria Geotecnica

THOR

Apparecchiatura di taglio torsionale ciclico e dinamico



Manuale tecnico a cura di:
Anna d'Onofrio



Centro Regionale di Competenza
Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale

Università degli Studi di Napoli Federico II
Dipartimento di Ingegneria Geotecnica

THOR

Apparecchiatura di taglio torsionale ciclico e dinamico

Manuale tecnico a cura di:
Anna d'Onofrio

Centro Regionale di Competenza
Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale
Polo delle Scienze e delle Tecnologie
Dipartimento di Scienze Fisiche
C/o Facoltà di Ingegneria - Via Nuova Agnano, 11 - III Piano
80125 - Napoli - Italy
www.amra.unina.it
ambiente@na.infn.it
Telefono +39 081 76-85125/124/115
Fax. +39 081 76-85144

Autore
Anna d'Onofrio
Università degli Studi di Napoli Federico II
Dipartimento di Ingegneria Geotecnica

Coordinamento editoriale
doppiavoce
www.doppiavoce.it

Copyright © 2006 Università degli Studi di Napoli Federico II – CRdC-AMRA

Tutti i diritti riservati
È vietata ogni riproduzione

Indice

Introduzione	5
Schema meccanico di riferimento e tipologie di prova	6
Descrizione dell'apparecchiatura	9
Campi di applicazione	14
Bibliografia	15

Introduzione

L'approccio progettuale di tipo prestazionale si sta sempre più affermando in tutti gli ambiti dell'ingegneria civile. Tale modalità è stata fatta propria anche dalle normative più recenti che definiscono i diversi livelli di prestazione che le varie opere civili devono soddisfare in condizioni di carico sia statiche che dinamiche. Il controllo dei requisiti di sicurezza nei confronti dello stato limite di esercizio rientra in questa filosofia. Nella progettazione geotecnica è generalmente necessario imporre un limite alle deformazioni per garantire la statica ma anche la fruibilità delle strutture. A questo scopo è essenziale misurare accuratamente la deformabilità dei terreni. Dal monitoraggio di numerose opere geotecniche è emerso che, in condizioni di carico di esercizio, le deformazioni che si sviluppano nel volume significativo di sottosuolo interessato da un'opera sono contenute in un campo che varia dallo 0.001% allo 1%. Gli stessi campi di deformazione sono propri anche di tutti i problemi di vibrazioni siano esse sismiche o antropiche.

Questi campi di deformazione, nei quali peraltro il comportamento del terreno può essere marcatamente non lineare, sono difficilmente indagabili con le attrezzature di laboratorio tradizionali. Questa difficoltà ha comportato e comporta spesso grossi errori nella previsione del comportamento tensio-deformativo del terreno e quindi nella progettazione delle opere geotecniche con conseguente aggravio dei costi di costruzione a causa di un inadeguato proporzionamento delle opere geotecniche e strutturali.

Per una misura corretta di tensioni e deformazioni occorre disporre di sistemi di misura estremamente accurati; l'apparecchiatura di taglio torsionale e colonna risonante è da tempo indicata come strumentazione in grado di eseguire misure di rigidità a piccoli livelli di deformazione (ASTM 3999-91), ossia in grado di indagare il comportamento dei terreni in quel campo di deformazioni che consuetamente si sviluppano in condizioni di esercizio, o anche a seguito di vibrazioni sia sismiche che antropiche. La cella THOR fa parte di questa categoria di apparecchiature e, in più, è stata particolarmente studiata per otti-

mizzarne le prestazioni sia in termini di sistema di applicazione dei carichi torcenti che di monitoraggio degli spostamenti.

Schema meccanico di riferimento e tipologie di prova

L'apparecchiatura THOR (Torsional High Output Rig) è una cella di taglio torsionale ciclico e dinamico. Essa consente di analizzare il comportamento tensio-deformativo del terreno in condizioni di taglio semplice sottoponendo un provino cilindrico ad una sollecitazione isotropa cui si somma una coppia torcente applicata all'estremità libera di un provino rigidamente vincolato alla base per riprodurre lo schema di mensola (schema fixed-free) (Figura 1).

In base alla modalità di applicazione della coppia torcente è possibile eseguire su uno stesso provino prove statiche o dinamiche. Per prove statiche si intende quelle prove in cui la sollecitazione torcente monotonica o ciclica viene applicata con una velocità tale da poter considerare trascurabile il contributo inerziale (prove di torsione ciclica e monotonica), mentre, per contro le prove dinamiche sono quelle durante le quali il provino è sottoposto ad una sollecitazione periodica caratterizzata da frequenze tali da non poter più considerare trascurabili le forze di inerzia che nascono a seguito delle accelerazioni cui è

sottoposto il provino. Pertanto, in questa seconda modalità di prova per la determinazione delle proprietà meccaniche del terreno è necessario condurre un'analisi dell'equilibrio dinamico del sistema (prove di colonna risonante).

Grazie a tale tipologia di apparecchiatura è possibile valutare il comportamento tensio-deformativo dei terreni in un campo di deformazioni

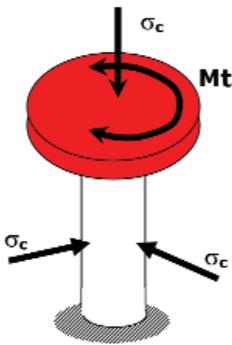


Fig. 1. Schema di sollecitazione in una apparecchiatura di taglio torsionale.

tangenziali piuttosto ampio, senza tuttavia raggiungere le condizioni di rottura. I risultati vengono generalmente sintetizzati in termini di parametri equivalenti, modulo di taglio G e fattore di smorzamento D (Figura 2), e loro variazione con il livello di deformazione tangenziale, γ (Figura 3).

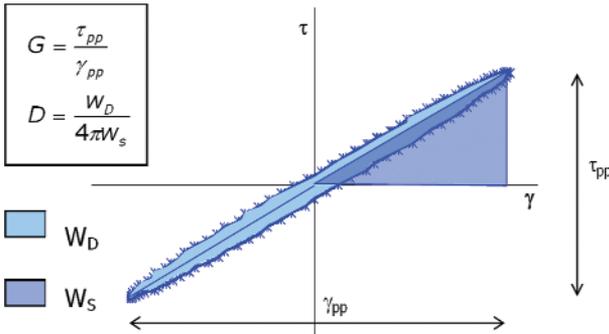


Fig. 2. Definizione di modulo di taglio e fattore di smorzamento.

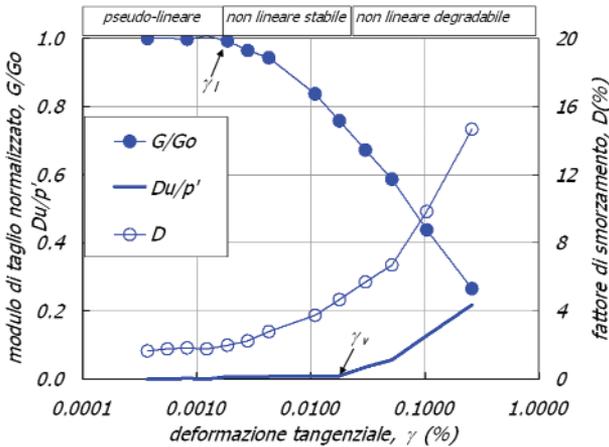


Fig. 3. Livelli deformativi ed aspetti del comportamento meccanico del terreno in condizioni di taglio semplice ciclico.

LE PROVE DI TORSIONE CICLICHE E MONOTONICHE

Nelle prove di torsione ciclica o monotonica, ad una sollecitazione di tipo isotropo viene sovrapposta una coppia torcente variabile nel tempo con legge sinusoidale (torsione ciclica) di frequenza, ampiezza e numero di cicli noti oppure monotonicamente crescente con velocità costante (torsione monotona).

LE PROVE DI COLONNA RISONANTE

Nelle prove di colonna risonante il provino è sollecitato da una coppia torcente di ampiezza costante e di frequenza variabile in un campo che includa la prima frequenza di risonanza, f_r , del sistema costituito dal provino e dall'attuatore dei carichi. (si veda ad esempio ASTM D4015-92).

Per lo schema fixed-free, l'interpretazione delle prove si basa sull'individuazione della prima frequenza di risonanza f_r e delle frequenze di taglio f_1 e f_2 (valori di frequenza corrispondenti rispettivamente alla rotazione massima θ_{max} ed a $\sqrt{2}/2$ di quella massima) dell'insieme composto dal provino e dal dispositivo di eccitazione. Note l'inerzia polare del sistema di eccitazione I_0 e quella del provino I , risulta possibile definire i valori di rigidità G e smorzamento D del terreno tramite la risoluzione dell'equazione caratteristica del modello dinamico di riferimento (si veda ad esempio Drnevich, 1985 o Silvestri, 1991). Lo smorzamento si può ottenere utilizzando i due diversi metodi, quello della 'semibanda di potenza' e quello del 'fattore di risonanza'. La deformazione tangenziale a cui associare tali valori è ricavata dalla conoscenza di γ_{max} (Figura 4).

Sia con le prove di colonna risonante che con quelle di torsione ciclica non è possibile raggiungere la condizione di rottura, per cui le prove sono utilizzate solo per determinare le leggi di decadimento della rigidità e di incremento del fattore di smorzamento con la deformazione tangenziale.

Una tipica sequenza di prova consiste quindi nel sottoporre il provino una definita storia di carico isotropa durante la quale vengono eseguiti una serie di step non drenati (torsione ciclica e colonna risonante), a livelli di deformazione crescenti.

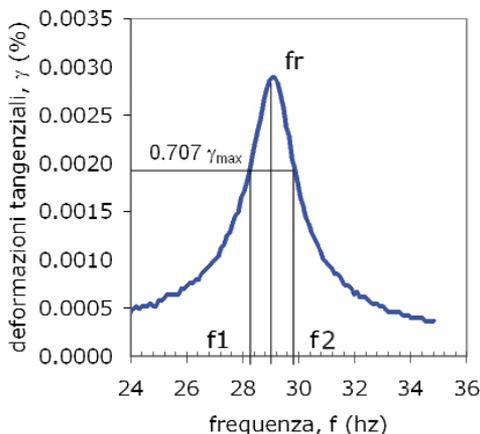


Fig. 4. Curva di risonanza ottenuta durante una prova di colonna risonante.

Maggiori dettagli sulle procedure sperimentali adottate in Italia per le prove di colonna risonante e taglio torsionale sono riportati in Cavallaro et al., 2001, a cui si rimanda per ulteriori approfondimenti.

Una peculiarità dell'apparecchiatura THOR è infine quella di poter eseguire prove di torsione monotona a velocità di carico o di deformazione controllata nel corso delle quali è possibile valutare la variazione del modulo di taglio e del fattore di smorzamento iniziali eseguendo prove di torsione ciclica o colonna risonante lungo il percorso.

Descrizione dell'apparecchiatura

L'apparecchiatura THOR è stata appositamente progettata per eseguire prove di taglio torsionale sia su terreni poco consistenti che su rocce tenere, analizzando nel dettaglio il comportamento meccanico a piccole e medie deformazioni (d'Onofrio et al, 1999). In figura 5 è riportato uno schema dell'apparecchiatura. Di seguito si procederà alla descrizione delle diverse parti dell'apparecchiatura.

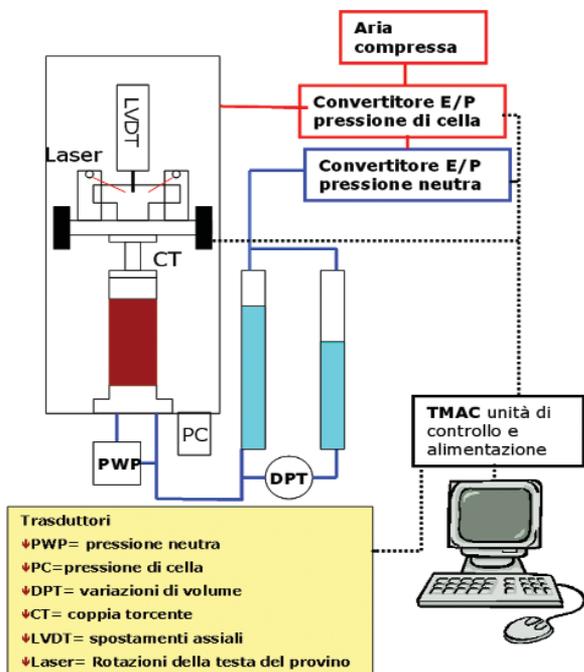


Fig. 5. Schema dell'apparecchiatura THOR.

LA MECCANICA DELLA CELLA

Nella Figura 6 è riportata una vista delle principali parti meccaniche di cui è costituita la cella. Su di un piatto di acciaio poggiato su quattro piedini dotati di isolatori, è disposto il piedistallo su cui viene sistemato il provino (Figura 6a). Il piedistallo è dotato di due linee di drenaggio collegate con il sistema di misura e controllo delle pressioni neutre e con quello di misura delle variazioni di volume. Inoltre esso è dotato di una base scabra per la trasmissione del carico torcente. Tra il provino e l'attuatore dei carichi (motore elettromagnetico) è interposta una testa di carico, anch'essa dotata di un'estremità scabra, e una cella per la misura dei carichi torcenti applicati. Sia la base che la testa di carico sono intercambiabili per consentire di alloggiare provini con diametro di 50 e 70 mm. Nel piatto inferiore sono disposti

tutti i passacavi per i collegamenti delle parti elettriche, e per allocare l'alimentazione di aria compressa che consente di applicare la pressione di cella sul provino (Figura 6b). La pressione di cella è applicata attraverso aria in pressione per la presenza del motore non immergibile; per applicarla al provino, sul piatto inferiore viene poggiato un cilindro in alluminio del diametro di 450mm e di altezza 800mm, che viene serrato superiormente da un altro piatto attraverso 4 colonne esterne.

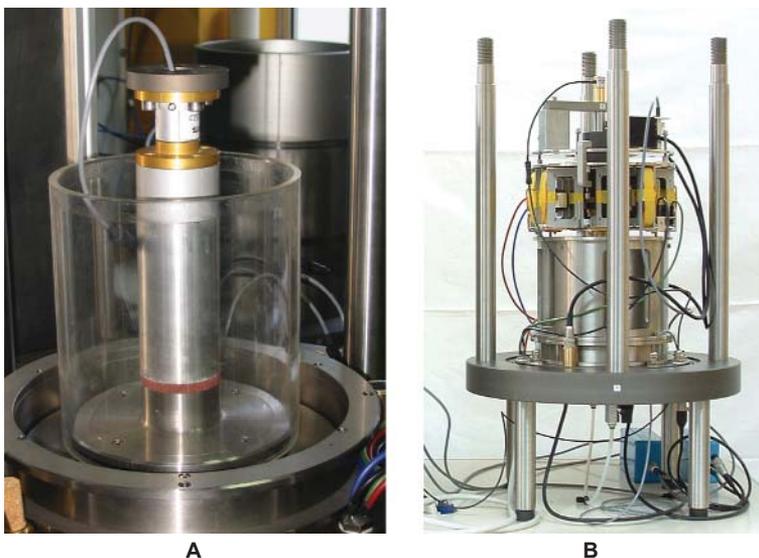


Fig. 6. La meccanica dell'apparecchiatura.

IL SISTEMA DI ATTUAZIONE DEI CARICHI TORCENTI

I carichi torcenti vengono applicati alla testa del provino attraverso un motore elettromagnetico. Quattro magneti di neodimio-ferro boro sono sistemati all'estremità di quattro bracci solidali alla testa di carico, ma non vincolati al telaio fisso.

Otto bobine sono invece allocate su un telaio fisso completamente indipendente dal suddetto piatto. Il motore consente di applicare una coppia massima di 10 Nm.

L'utilizzo di un motore elettromagnetico consente di applicare le coppie torcenti alla testa del provino non vincolandola. E consentendo quindi l'esecuzione delle prove di colonna risonante durante le quali lo schema dinamico di riferimento è quello di una mensola vincolata alla base e libera in testa.

I TRASDUTTORI

Nell'apparecchiatura THOR è possibile seguire l'evoluzione del comportamento tensio-deformativo nel provino attraverso la misura dei carichi e degli spostamenti del provino nel corso di una prova. In particolare è possibile misurare:

- la pressione di cella applicata a mezzo di aria in pressione;
- la pressione dell'acqua contenuta nei pori del terreno;
- la coppia torcente applicata alla testa del provino;
- gli spostamenti assiali del provino;
- la variazioni di volume del provino;
- le rotazioni della testa del provino.

La pressione di cella viene misurata da un trasduttore a membrana esposta PDCR 810 DRUCK con fondo scala di 1.5 MPa, e controllata attraverso un convertitore elettro-pneumatico collegato all'output di una scheda A/D. La pressione neutra, viene misurata da un trasduttore a membrana esposta PDCR 200 sistemato in un blocchetto in alluminio posto su una delle due linee di drenaggio, immediatamente al di sotto del piedistallo.

Anche la pressione neutra viene controllata via convertitore E/P. Per la misura delle coppie torcenti una cella di carico torsionale è sistemata tra la testa di carico e il piatto del motore (Figura 6). Il trasduttore è un ponte estensimetrico resistivo.

Le dimensioni e i materiali di cui è costituita la cella torcente sono stati studiati affinché essa non modifichi sostanzialmente il momento di inerzia polare della testa di carico e non induca sensibili variazioni della deformabilità del sistema di carico.

Per la misura degli spostamenti assiali la cella è dotata di un LVDT Linear Variable Displacement Transducer (linearità migliore dello 0,1% e corsa di +/- 12,5mm) il cui nucleo è solidale alla testa di carico del provino mentre tutti i circuiti sono contenuti

all'interno di un cilindro coassiale al nucleo e allocato su un sostegno solidale alla parte fissa dell'attuatore dei carichi.

Le variazioni di volume vengono misurate attraverso un sistema a doppia buretta, collegato ad un trasduttore differenziale di pressione. Una buretta è collegata alla linea di drenaggio del provino, mentre l'altra funge da riferimento, entrambe sono messe in contropressione.

La misura statica e dinamica delle rotazioni è affidata a una coppia di triangolatori laser M5L4 con risoluzione di 1 micron e linearità di 12 micron su fondo scala di ± 2 mm corrispondenti a rotazioni di ± 2 gradi (Figura 7). I sensori sono motorizzati e automaticamente azzerati



Fig. 7. Triangolatori laser per la misura delle rotazioni delle testa del provino.

per accomodare cedimenti e deflessioni fino a ± 7 mm. Il sensore laser misura la distanza di un target solidale alla testa del provino utilizzando il principio della triangolazione. L'uscita analogica rappresenta in volt la deviazione del raggio dalla distanza di riferimento. Il raggio riflesso viene proiettato ad un Position Sensitive Device attraverso una lente posta sullo stesso sensore.

IL SISTEMA DI CONTROLLO E ACQUISIZIONE

Una unità principale di controllo e alimentazione (TMAC) contiene tutti i sistemi di alimentazione elettrica e pneumatica e tutti i dispositivi di condizionamento e amplificazione necessari all'attrezzatura (Figura 8).

Il sistema di alimentazione del motore può generare sinusoidi di ampiezza e frequenza variabili, nonché rampe di carico a velocità costante. TMAC converte il segnale d'ingresso di tensione (che rappresenta la coppia o la deformazione torsionale desiderata sul provino) in una corrente elevata della stessa forma d'onda con distorsione trascurabile. Questa peculiarità del si-



stema di alimentazione consente di evitare gli errori di misura dello smorzamento derivanti dalla generazione di una forza elettromotrice indotta nel motore elettromagnetico.

Fig. 8. Il sistema di controllo e alimentazione TMAC.

Campi di applicazione

Le celle THOR sono sicuramente le apparecchiature più adeguate, insieme con quelle triassiali Matrix, in dotazione del centro di competenza, per misurare tensioni e deformazioni in modo accurato e continuo al fine di una progettazione geotecnica corretta. Esse consentono infatti di indagare in modo estremamente accurato il comportamento tensio-deformativo dei terreni in condizioni lontane dalla rottura, definendo dettagliatamente l'evoluzione del modulo di taglio sin dai più piccoli livelli di deformazione. Il loro utilizzo si rende necessario ogni qual volta occorre affrontare problemi di ingegneria geotecnica che richiedono l'impiego di modelli costitutivi complessi, al fine di fornire parametri realistici nelle analisi numeriche.

Le stesse apparecchiature diventano essenziali per la caratterizzazione del comportamento dei terreni in condizioni di sollecitazione dinamica, esse infatti consentono di valutare sia i parametri di rigidità e smorzamento da utilizzare in un'analisi lineare della propagazione delle onde di taglio, sia di valutare l'evoluzione del modulo di taglio e del fattore di smorzamento al crescere del livello di deformazione, necessari per un'analisi di propagazione non lineare, che diventa opportuna per la valutazione degli effetti locali in condizioni di strong motion.

Le apparecchiature THOR sono state già ampiamente utilizzate per la caratterizzazione dei terreni in condizioni sia statiche che dinamiche. Esse sono state impiegate per la caratterizzazione dei terreni coinvolti nella costruzione delle stazioni sotterranee della TAV di Bologna e di Firenze. D'altra parte queste stesse apparecchiature sono state adoperate diffusamente per la caratterizzazione dei terreni nell'ambito delle analisi di risposta sismica locale di diversi comuni italiani. È infine opportuno precisare che se da un lato l'utilizzo di tali apparecchiature non è diffuso né tra i laboratori commerciali né in quelli accademici, va sempre più affermandosi la necessità di un loro utilizzo, vista l'evoluzione della normativa vigente in Italia (OPCM, testo Unico) per le costruzioni in zona sismica, che prescrive una caratterizzazione più accurata dei terreni interessati nella costruzione di un manufatto, che può essere ottenuta grazie all'utilizzo di apparecchiature come THOR.

Le metodologie di caratterizzazione geotecnica, i criteri e le tecniche sperimentali potranno essere trasferite a studiosi, società, professionisti ed a strutture pubbliche di protezione civile. Le stesse potranno essere adoperate nell'ambito del Centro di Competenza per fornire servizi di ingegneria a enti gestori di opere e strutture pubbliche.

Bibliografia

- ASTM D4015-92 Standard Test Method for MODULUS and DAMPING OF SOILS by the RESONANT-COLUMN METHOD.
- Drnevich VP. Recent development in resonant column testing. Ritchard commemorative lecture, ASCE, Detroit MI, R.D. Woods Ed. 1985.
- Silvestri F. Analisi del comportamento dei terreni naturali in prove cicliche e dinamiche di taglio torsionale. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Napoli Federico II, 1991.
- Cavallaro A, Fioravante V, Lanzo G, Lo Presti D, Pallara O, Rampello S, d'Onofrio A, Santucci de Magistris F, Silvestri F. Report on the current situation of laboratory stress-strain testing of geomaterials in Italy and its use in practice. Tatsuoka et al. Eds., Swets & Zeitlinger Publishers Lisse, Netherlands, pp. 15-44, 2001.
- d'Onofrio A, Silvestri F, Vinale F. A new torsional shear device. ASTM Geotechnical Testing Journal, 22(2);107-17, 1999.

Finito di stampare nel mese di luglio 2006
presso Officine Grafiche Francesco Giannini & Figli S.p.A. – Napoli

I manuali del CRdC-AMRA 15