



Colonna Risonante –  
Allestimento del provino  
all'interno della cella

# La caratterizzazione dinamica del sottosuolo

**Un seminario sulle indagini sperimentali per la caratterizzazione dinamica del sottosuolo è stato organizzato in Messico da Rocher Ingenieria S.A. de C.V. Un evento che ha coinvolto operatori provenienti da aziende, laboratori privati locali e università**

**R**ocher Ingenieria S.A. de C.V., che può essere considerata la più importante impresa privata presente in Messico, opera in attività e servizi dedicati all'ingegneria civile: fondata nel 2004, conta oltre 110 dipendenti e interviene in svariati settori di attività, che vanno dai rilievi topografici alle indagini esplorative preliminari, dalla progettazione alle prove di laboratorio, dalla direzione lavori ai controlli di qualità in corso d'opera.

Nel corso degli ultimi 10 anni Rocher Ingenieria ha operato in prima linea nello sviluppo infrastrutturale del Paese, intervenendo in particolare in opere stradali, aeroportuali, portuali, ferroviarie e idrauliche. Si tratta di un'azienda interdisciplinare di servizi, che pur operando in molteplici settori mette sempre in primo piano la garanzia del servizio nei confronti del cliente in termini di alto livello qualitativo, ottimizzazione dei tempi e delle risorse e riduzione dei costi. Inoltre, considera altresì strategi-

co dal punto di vista manageriale promuovere all'interno dell'azienda programmi di ricerca, in particolare nella sperimentazione di tecnologie innovative.

Ad esempio, ha aderito al protocollo AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto A.C.): si tratta di una nuova proposta per la progettazione di miscele di asfalto di granulometria addensata ad alte prestazioni che, nell'ambito delle normative nazionali, si pone l'obiettivo di sostituire al tradizionale metodo Marshall il metodo SUPERPAVE<sup>®</sup>, che si è sviluppato negli Stati Uniti, adattandolo alle particolari caratteristiche del territorio messicano.

Per quanto riguarda le prove di laboratorio e i controlli di qualità l'impresa ha in dotazione attrezzature d'avanguardia per indagini geotecniche e di meccanica delle rocce, prove sui materiali da costruzione, quali asfalti, conglomerati bituminosi e calcestruzzi.

## Il seminario

Recentemente nel settore del *soil mechanics* il laboratorio ha acquisito attrezzature automatiche di ultima generazione, per effettuare prove sia statiche che dinamiche su provini indisturbati e ricostituiti. Con l'occasione è stato organizzato un seminario al quale hanno aderito circa 30 specialisti provenienti sia da prestigiose aziende e laboratori privati messicani, sia da importanti università come ad esempio la UNAM (Università Nazionale Autonoma del Messico). L'evento ha avuto come obiettivo la sensibilizzazione sull'importanza della sperimentazione nella definizione dei parametri di deformabilità nel campo delle piccole e medie deformazioni per la caratterizzazione del sottosuolo. Sono stati anche presentati alcuni esempi applicativi, dove l'integrazione tra prove di laboratorio (RC, CTS e triassiali cicliche) e prove in sito (CH e DH cross e down hole) ha permesso una completa caratterizzazione statica e dinamica del sottosuolo di determinati siti destinati a nuovi insediamenti.

Nel corso delle prove dimostrative RC (resonant column) e CTS (cyclic torsional shear) effettuate su questa nuova attrezzatura in dotazione al laboratorio sono stati presentati i diagrammi di decadi-



Seminario sulle indagini sperimentali per la caratterizzazione dinamica del sottosuolo

mento del modulo di taglio e l'andamento del fattore di smorzamento, per i diversi livelli di deformazione indagati. Le prove effettuate su provini da 50 mm di diametro per 100 mm di altezza hanno permesso di indagare un ampio range di piccole e medie deformazioni  $\gamma_{pp}$  da 0.0005 a 0.5%.

## Prove dinamiche

Nell'ambito delle prove dinamiche il Laboratorio è attrezzato per indagare il comportamento del terreno per effetto, ad esempio, di azioni sismiche. In queste situazioni, che non necessariamente portano al collasso del campione di prova, risulta importante investigare il comportamento in termini di curve sforzi-deformazioni e definire i parametri di deformabilità dei diversi strati di sottosuolo, informazioni richieste per simulare, tra le altre, le condizioni di propagazione di un evento sismico.

Il comportamento del terreno all'interno del range delle piccole deformazioni è altresì importante nella previsione dell'interazione terreno-struttura. I moduli di rigidità misurati nel campo delle deformazioni molto piccole sono ormai riconosciuti tra le proprietà meccaniche fondamentali del terreno. Pertanto, le informazioni desunte dalle prove dinamiche sono anche comunemente utilizzate in campo statico nelle soluzioni dei problemi convenzionali di interazione tra la struttura di un edificio, le sue fondazioni e il sottosuolo.

Sebbene i livelli di deformazione oggetto di indagine siano relativamente piccoli è riconosciuta la necessità di ricorrere a procedure di prova differenti che si adattano appunto ai differenti livelli di deformazione, come riassunto schematicamente dalla figura 1.

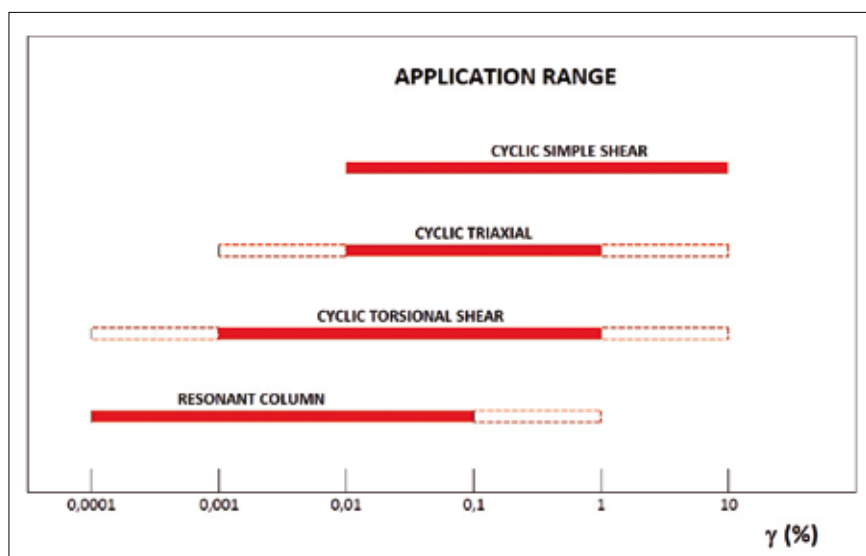
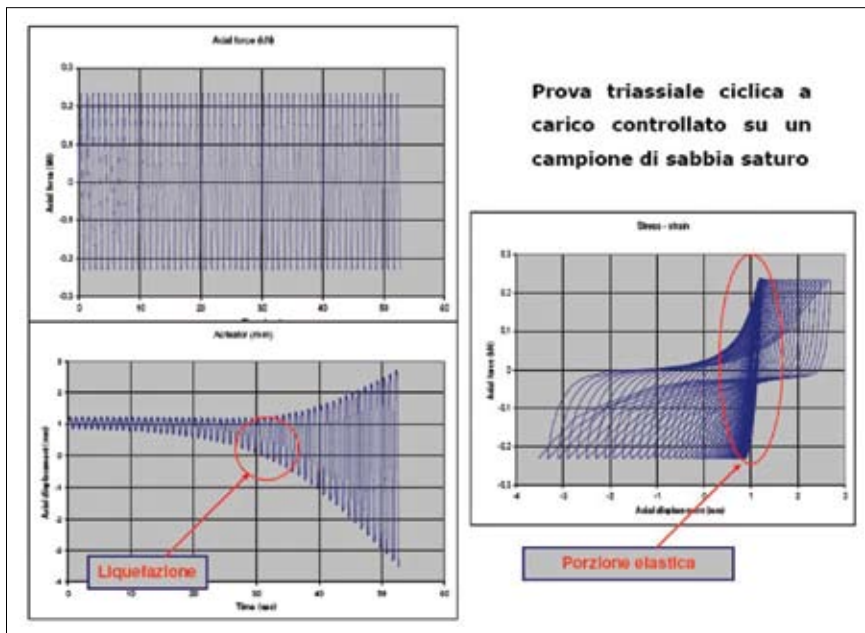


Figura 1 - Livelli di deformazione in relazione alle attrezzature di prova



Il fenomeno della liquefazione replicato nelle prove di laboratorio

Per questa ragione, il Laboratorio di Meccanica delle Terre di Rocher Ingegneria è dotato di due attrezzature dinamiche progettate in maniera specifica per differenti tipi di prova e per differenti livelli di deformazione oggetto di indagine.

**Triassiale Ciclica**

Nel campo di livelli di deformazione medio-alti i parametri dinamici vengono determinati attraverso il sistema Dynatriax della Wykeham Farrance: si tratta di un'attrezzatura dinamica derivata dalla triassiale statica, dove la tensione principale verticale viene fatta variare in maniera ciclica, solitamente sinusoidale, a frequenza costante in un range che generalmente varia tra 0.1 e 2 Hz.

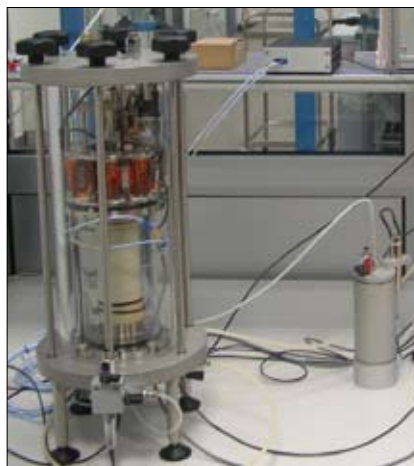
Nel corso della prova, dove la fase dinamica può essere effettuata sia in controllo di carico che in controllo di deformazione, si acquisiscono i cicli di isteresi sforzi-deformazioni e si determinano i relativi parametri di deformabilità.

La stessa attrezzatura permette di indagare la suscettività di depositi naturali prevalentemente sabbiosi più o meno addensati nei confronti della liquefazione. Si tratta di un fenomeno particolarmente insidioso che si verifica in depositi prevalentemente sabbiosi di bassa densità (solitamente depositi alluvionali fluviali) per effetto dell'incremento della pressio-

ne idraulica all'interno dello strato e che determina una drastica e immediata riduzione della resistenza al taglio, con il conseguente collasso del deposito stesso. Le caratteristiche del sistema e le modalità esecutive trovano riscontro nelle Norme ASTM D3999 e D5311.

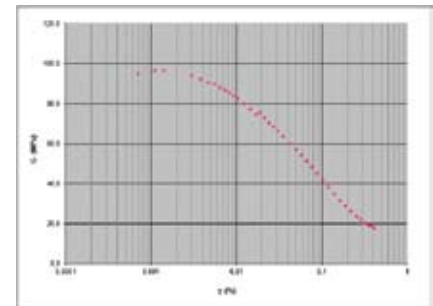
**Colonna Risonante e Taglio Torsionale Ciclico**

Quest'apparecchiatura, nella quale i metodi di misura e applicazione dello stato tensionale sono particolarmente sofisticati, è stata sviluppata in maniera specifica per studiare le caratteristiche di deformabilità dei terreni, partendo da livelli di deformazione estremamente bassi.

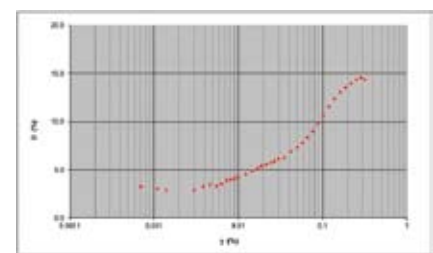


Attrezzatura di colonna risonante e taglio torsionale ciclico

La strumentazione di Colonna Risonante (RC) Wykeham Farrance utilizzata dal laboratorio è stata progettata per lavorare in combinazione con la prova di Taglio Torsionale Ciclica (CTS) e può effettuare sperimentazioni per definire il comportamento deformativo di un campione di terreno, indisturbato o ricostituito, precedente alla rottura, per effetto di una torsione applicata ciclicamente. I parametri desunti dalle curve sforzi deformazioni – quali il modulo di taglio e il fattore di smorzamento – sono ottenuti in termini di diagrammi in funzione della deformazione al taglio per un intervallo compreso tra 0.0001% e 0.1%. I risultati di queste prove sono largamente utilizzati nelle analisi di risposta sismica a livello locale (microzonazione sismica).

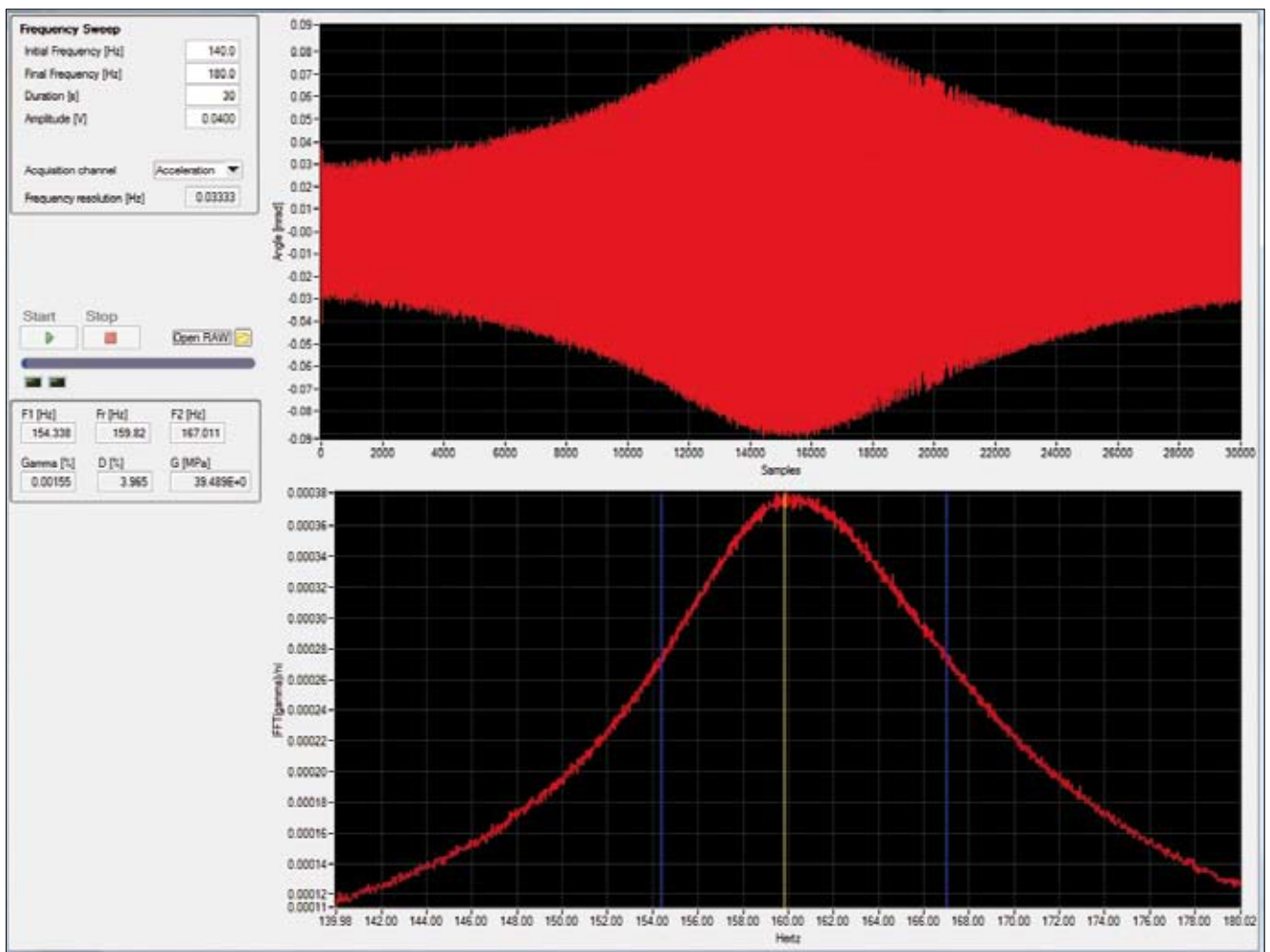


Colonna Risonante - Presentazione dei risultati: modulo di taglio in funzione della deformazione  $\gamma$



Colonna Risonante – Presentazione dei risultati: fattore di smorzamento in funzione della deformazione  $\gamma$

Nel caso delle prove CTS, mentre la base del provino è fissa, alla testa viene applicata una coppia torcente sinusoidale a bassa frequenza (~0.1÷5 Hz) per un determinato numero di cicli. La coppia torcente e le corrispondenti deformazioni angolari vengono registrate continuamente e permettono di diagrammare i cicli di isteresi in termini di tensioni di taglio medie.



Colonna Risonante – Determinazione della frequenza di risonanza

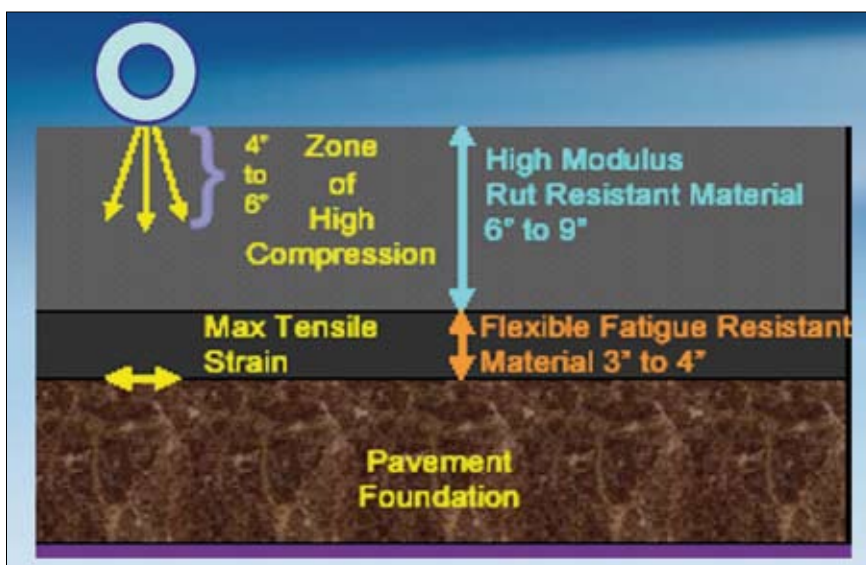
### Modulo Resiliente

Al fine di determinare alcuni parametri di rigidità delle strutture stradali sono state messe a punto metodologie sperimentali

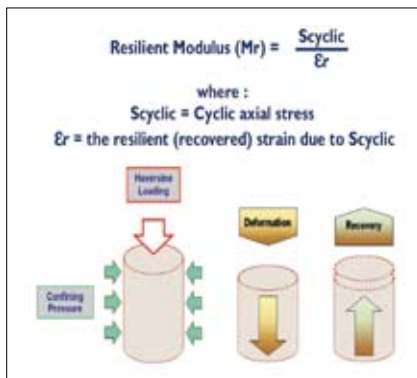
che permettono di simulare il comportamento degli strati di sottofondo e di base, per effetto dei carichi pulsanti prodotti dal traffico di veicoli; in parti-

colare, procedure che fanno riferimento alle Norme AASHTO.

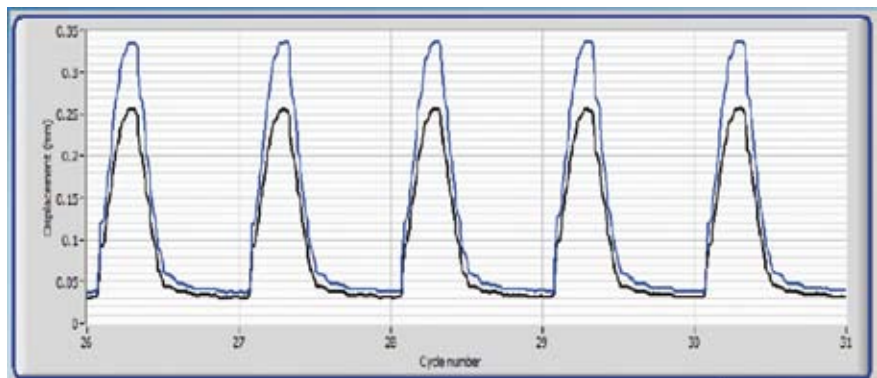
Il sistema Dynatriax, in dotazione al laboratorio di Rocher Ingenieria è corredata di un software specifico per effettuare una prova dinamica che permette di determinare il modulo resiliente secondo la AASHTO Designation T 307-99 (2003). Si tratta di una prova che prevede l'applicazione ripetuta di un impulso dinamico di compressione seguito da un breve periodo di carico statico, sempre di compressione, su campioni cilindrici compattati con materiali non legati, in condizioni di densità e contenuto d'acqua ottimali e sottoposti a pressione isotropa in cella triassiale. La sequenza di impulso e carico statico viene ripetuta per diversi livelli di pressione in cella. I risultati sono presentati in termini di diagramma del modulo resiliente in funzione del livello di impulso e per i diversi valori di pressione isotropa applicati.



Schematizzazione della struttura stradale sottoposta al traffico veicolare



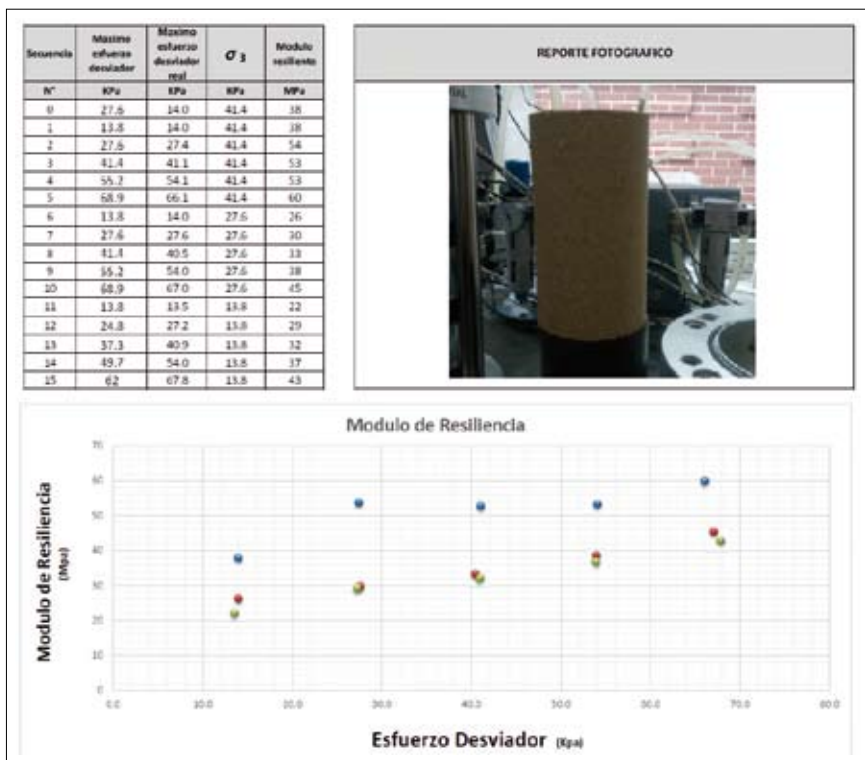
Definizione del Modulo Resiliente



Modulo Resiliente – Monitoraggio della compressione del provino per effetto dell'applicazione degli impulsi ripetuti

| Peak Data                             | Amplitude Data |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                       | 96             | 97    | 98    | 99    | 100   | Mean  | SD    |
| Maximum axial load (N)                | 176            | 176   | 175   | 176   | 176   | 176   | 1     |
| Contact load (N)                      | 3              | 4     | 3     | 3     | 3     | 3     | 0     |
| Cyclic load (N)                       | 172            | 172   | 172   | 173   | 173   | 172   | 0     |
| Maximum axial stress (kPa)            | 45.7           | 45.6  | 45.4  | 45.8  | 45.7  | 45.6  | 0.2   |
| Contact stress (kPa)                  | 0.9            | 0.9   | 0.7   | 0.9   | 0.8   | 0.8   | 0.1   |
| Cyclic stress (kPa)                   | 44.8           | 44.7  | 44.7  | 44.9  | 44.9  | 44.8  | 0.1   |
| Actuator pos. recoverable def (mm)    | 0.100          | 0.101 | 0.100 | 0.101 | 0.101 | 0.100 | 0.001 |
| Actuator pos. recoverable strain (%)  | 0.07           | 0.07  | 0.07  | 0.07  | 0.07  | 0.07  | 0.00  |
| Actuator pos. Resilient Modulus (MPa) | 629.3          | 622.8 | 628.5 | 621.3 | 621.7 | 624.7 | 3.9   |
| Av disp recoverable def (mm)          | 0.087          | 0.088 | 0.088 | 0.087 | 0.088 | 0.088 | 0.000 |
| Av disp recoverable strain (%)        | 0.06           | 0.06  | 0.06  | 0.06  | 0.06  | 0.06  | 0.00  |
| Av disp Resilient Modulus (MPa)       | 717.2          | 710.0 | 710.4 | 719.0 | 712.1 | 713.7 | 4.1   |
| Actuator pos. permanent def (mm)      | 0.490          | 0.489 | 0.490 | 0.489 | 0.489 | 0.489 | 0.000 |

Modulo Resiliente – Elaborazione dati in tempo reale secondo AASHTO T307



Modulo Resiliente – Presentazione dei risultati

Oltre a queste attrezzature particolarmente sofisticate, il settore di Meccanica delle Terre di Rocher Ingegneria utilizza anche attrezzature per prove tradizionali di compressibilità e resistenza al taglio solitamente adottate nei laboratori geotecnici quali, ad esempio:

- AUTOTRIAX - sistema di monitoraggio e controllo idoneo a eseguire prove triassiali statiche "effective stress" e "stress path" in modalità completamente automatiche;
- ACE - sistema automatico a gradini di carico per prove di compressibilità in cella edometrica;
- SHEARMATIC - attrezzatura automatica per l'esecuzione di prove di taglio diretto su campioni di grandi dimensioni, costituiti ad esempio da terreni granulari addensati.

Tutte le attrezzature descritte, sia di ricerca avanzata che tradizionali, sono progettate e prodotte da Wykeham Farrance, la Divisione di Controls Group nel settore del Soil Mechanics, e operano con sistemi di monitoraggio particolarmente avanzati, a gestione e controllo automatico, acquisizione ed elaborazione dati. Il tutto, in conformità alle principali normative internazionali. ■