



Università degli Studi di Napoli Federico II  
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale

---

**Consorzio Hirpinia AV**

**PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI**

**DELLA LINEA FERROVIARIA NAPOLI-BARI RADDOPPIO TRATTA APICE-ORSARA, 1°  
LOTTO FUNZIONALE APICE-HIRPINIA TRA LE PK 0+310 E PK 18+715.205  
COMPRESIVA DI ARMAMENTO FERROVIARIO, DEGLI IMPIANTI DI TRAZIONE  
ELETTRICA, DELLE ALTRE TECNOLOGIE FERROVIARIE, DI UN IMPIANTO DI FERMATA  
E UNO DI STAZIONE.**

**PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO**

Il responsabile della sperimentazione

Prof. Ing. Anna d'Onofrio

*Napoli, 07/02/2020*

## PREMESSA

Il Consorzio Hirpinia AV, con sede in Via dei Lucchesi 26, 00187 Roma C.F. e P.I. 15345171001 ha stipulato con il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università di Napoli Federico II, DICEA, una convenzione per l'esecuzione di prove geotecniche di laboratorio su campioni indisturbati estratti da perforazioni di sondaggio.

## PROGRAMMA SPERIMENTALE

L'elenco di tutti i campioni pervenuti è riportato in Tabella I mentre quello delle prove eseguite su ciascun campione è riportato in Tabella III.

Sondaggio	Campione	Prof. (m)
SN01	CI1	6.60-7.10
	CI2	12.50-13.00
	CI3	19.00-19.30
SN02	CI1	8.00-8.50
	CI2	13.50-14.00
SN03	CI1	4.00-4.40
	CI2	9.00-9.30
SN04	CI1	5.50-6.00
	CI2	11.50-12.00
SNME08	CI6	55.90-56.60
	CI7	65.60-66.30
	CI9	79.85-80.25
SNME05	CI2	15.00-15.40
SNGR02	CI1	4.70-5.20
	CI2	24.50-24.80
	CI6	47.70-48.00
SNME01	CI3	17.80-18.40
	CI7	50.00-50.70
SNGR06	CI5	31.50-32.00
SNME01	CI12	78.50-79.00
SNME03	CI5	59.00-59.80
SNGR03	CI1	5.40-6.00
	CI2	15.45-16.00
	CI4	37.30-37.90
	CI5	46.30-46.80
	CI7	67.50-68.00
	CI8	70.45-70.90
SNGR01	CI2	11.50-12.00
	CI4	21.00-21.50
	CI7	33.60-34.00
SNME02	CI12	17.80-18.20
	CI4	56.60-57.00
SNME07	CI3	27.00-27.50
		30.00-30.20
SGR3	CI2	7.00-7.50
SNGR04	CI1	6.00-6.50
	CI2	12.00-12.60
	CI3	17.20-18.00
SNME04	CI2	10.10-10.55
		13.00-13.50
		15.70-16.20
	CI4	24.00-24.60
SNME07	CI4	38.00-38.70
	CI6	57.90-58.65
SNGR05		11.00-11.50
		18.00-18.50
SNGR04	CI4	24.40-25.00
	CI5	36.00-36.50
SNME10	CI1	7.30-8.00
	CI2	13.00-13.60
SNME04	CI3	17.00-17.10
	CI6	35.50-36.00
SNME7	CI7	68.00-68.50

In totale sono stati consegnati presso il laboratorio di Geotecnica del DICEA 53 campioni, contenuti in fustelle metalliche o di PVC sigillate del diametro interno variabile tra 75 e 85 mm e lunghezza variabile tra 200-800 mm, relativi a 24 verticali di sondaggio, prelevati a pressione con diverse tecniche di campionamento. I campioni sono stati conservati in un apposito ambiente in condizioni di temperatura costante ed umidità controllata.

Le prove sono state eseguite sui campioni indicati in Tabella I e sono consistite in:

- apertura dei campioni e descrizione a vista (DD);
- determinazione del peso specifico dei grani ( $\gamma_s$ );
- analisi granulometriche (AA);
- determinazione dei limiti di Atterberg (LL);
- prove di compressione triassiale consolidate isotropicamente non drenate (CIU);
- prove triassiali cicliche non drenate (TXC)
- prove di taglio torsionale (RCTS)

#### PROCEDURE SPERIMENTALI

La tecnica sperimentale per l'esecuzione delle prove è quella normalmente adoperata da questo Dipartimento ed è di seguito brevemente illustrata.

##### ***a) Apertura dei campioni indisturbati (DD) – [A.S.T.M. D2488-93]***

Ciascun campione indisturbato da sottoporre a prova, contraddistinto dalla sigla del sondaggio, dal numero progressivo e dalla profondità, è stato estruso dalla fustella mediante estrusore orizzontale provvisto di martinetto oleodinamico. Successivamente il campione è stato fotografato e descritto a vista, al fine d'ottenere una prima classifica. Nella descrizione sono state evidenziate le caratteristiche geometriche del campione e, ove presenti, le parti disomogenee, le linee di discontinuità, oltre alle caratteristiche di plasticità e consistenza di massima. Per completare la descrizione di ciascun campione, dove possibile e significativo, si è valutata la presenza di sostanze organiche (mediante reazione all'acqua ossigenata), la presenza di carbonati (mediante reazione all'acido cloridrico), e la resistenza al penetrometro tascabile.

##### ***b) Peso specifico dei grani ( $\gamma_s$ ) - [A.S.T.M. D4753-91]***

Nel caso in esame, attesa la dimensione dei grani, il peso specifico della sostanza solida è stato determinato con il picnometro e bilancia digitale centesimale (A.S.T.M. D4753-91).

##### ***c) Analisi Granulometrica (AA) - [A.S.T.M. D422-39]***

Le analisi granulometriche sono state eseguite per stacciatura sul materiale trattenuto al setaccio n° 40 A.S.T.M. (0.425 mm) e per sedimentazione con eventuale successiva stacciatura sul passante allo stesso vaglio.

La sedimentazione è stata eseguita impiegando l'aerometro di Casagrande e preparando i campioni come illustrato nelle Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio dell'AGI (1994). Come deflocculante è stata adoperata una soluzione di metasilicato di sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$ ) a 3 ° Baumé in ragione di 20 cm<sup>3</sup>/l.

I risultati sono diagrammati riportando in ascissa, in scala logaritmica, i valori dei diametri  $d$  dei granelli, e sulle ordinate, in scala naturale, i valori delle percentuali in peso secco dei granelli il cui diametro è inferiore o uguale al corrispondente valore di  $d$ . I punti ottenuti sono stati successivamente congiunti, ottenendo la curva granulometrica.

La classifica granulometrica è stata eseguita sulla base della terminologia e dei criteri riportati nelle Raccomandazioni per l'esecuzione e la interpretazione delle indagini geotecniche dell'AGI (1977) al punto 4.2 (Classifiche geotecniche).

#### ***d) Determinazione delle caratteristiche fisiche generali***

Si è proceduto alla determinazione del contenuto d'acqua ( $w$ ), del peso dell'unità di volume,  $\gamma$ , dell'indice dei vuoti,  $e$ , della porosità,  $n$  e del grado di saturazione,  $S_r$ , su campioni di dimensioni geometriche note. La procedura sperimentale ha previsto la misura del peso iniziale dei provini, di cui preventivamente erano state rilevate le dimensioni geometriche, e dopo essiccazione in stufa a 105 °C per 24 h.

#### ***e) Determinazione dei limiti di Atterberg (LL) – [A.S.T.M. D4318-84]***

I limiti di consistenza (limiti di Atterberg) sono stati determinati secondo le norme A.S.T.M. D4318-84 sul materiale essiccato all'aria e passante allo staccio n° 40 A.S.T.M. (0.425 mm).

Secondo quanto consigliato da Casagrande, i campioni ottenuti dal materiale come descritto in precedenza, mescolati con acqua distillata e pronti per la prova, sono stati lasciati riposare sotto campana di vetro per circa 24 ore prima di effettuare le determinazioni.

#### ***f) Prove triassiali consolidate isotropicamente e non drenate (CIU) [A.S.T.M. D4767-88]***

Le prove di compressione triassiale sono state eseguite sottoponendo di norma a prova tre provini, di dimensioni pari a circa 36 mm di diametro e 72 mm di altezza prelevati dalla stessa sezione del campione.

L'attrezzatura utilizzata consiste in una serie di 3 celle triassiali costituite da una struttura in acciaio inossidabile e cilindro in plexiglas, in grado di sopportare pressioni fino a 1,4 MPa. La tensione di confinamento viene applicata mediante interfacce acqua-aria. Le celle sono poggiate su un banco-pressa a tre posti con avanzamento regolabile e controllo della velocità di avanzamento.

I carichi sono misurati mediante celle di carico, mentre gli accorciamenti assiali mediante LVDT. I carichi verticali massimi applicabili sono pari a 300 kg.

I provini, posti in cella triassiale nelle condizioni di umidità naturale, sono stati preventivamente pesati e misurati per valutare il peso dell'unità di volume iniziale. Chiusa la cella triassiale ed

aggiunto il fluido di confinamento, si è proceduto contemporaneamente all'applicazione di una contropressione pari a - 200 kPa ed all'applicazione della tensione di confinamento desiderata.

Durante la consolidazione isotropa sono state misurate le variazioni di volume e di altezza del provino; da questi valori, ipotizzando un comportamento isotropo ed omogeneo del materiale, sono state calcolate le dimensioni del provino prima della fase di rottura, utilizzate come base per il calcolo delle tensioni e delle deformazioni.

Completata la consolidazione il provino è stato isolato idraulicamente e portato a rottura con una velocità di deformazione scelta in funzione delle caratteristiche di consolidazione valutate nella fase precedente: di norma si è operato con una velocità di 0.01 mm/min, inferiore a quella teorica calcolata sulla base del tempo di consolidazione (Bishop ed Henkel, 1957). Nella fase di rottura sono stati misurati i valori del carico applicato, dell'accorciamento assiale e della pressione interstiziale. Quest'ultima misura ha permesso l'interpretazione dei risultati in termini di tensioni efficaci.

La rottura è convenzionalmente individuata dal valore massimo del carico deviatorico misurato, ed ove tale carico non sia individuabile con certezza, il valore a rottura è identificato con quello corrispondente ad una deformazione del 20%.

#### **g) Prove triassiali cicliche [A.S.T.M. D5311]**

Le prove di compressione triassiale ciclica sono state eseguite sottoponendo un provino, di dimensioni pari a circa 38 mm di diametro e 76 mm di altezza ad una preliminare fase di compressione isotropa in condizioni di drenaggio libero, seguita da una fase ciclica non drenata a tensione controllata. Nella prima fase, la tensione di confinamento viene stabilita sulla base di una stima dello stato tensionale efficace agente in sito. Durante la fase di consolidazione vengono monitorate le variazioni di altezza e di volume del provino al fine di determinare le dimensioni di quest'ultimo prima di passare alla fase ciclica non drenata.

La fase ciclica non drenata viene eseguita sottoponendo il provino a una variazione del deviatore secondo una legge sinusoidale, stabilendo l'ampiezza massima, la frequenza e il numero di cicli cui sottoporre il provino. Durante questa fase vengono misurate le variazioni di pressione dei pori e gli spostamenti assiali del provino.

L'attrezzatura utilizzata è una cella triassiale tipo Bishop e Wesley che consente l'applicazione e il controllo indipendente in retroazione della pressione di cella, della pressione dei pori e del deviatore attraverso l'utilizzo di altrettante valvole elettropneumatiche controllate via pc.

#### **h) Prove di taglio torsionale [A.S.T.M. D4015-87]**

L'apparecchiatura utilizzata è la cella di taglio torsionale THOR (Figura A.1), progettata e realizzata presso l'Università di Napoli Federico II (d'Onofrio, 1996) sulla base del prototipo originario di colonna risonante 'fixed-free' messo a punto presso l'Università del Texas di Austin (Isenhower, 1979; Ni, 1987). Le caratteristiche tecniche dell'apparecchiatura sono dettagliate da d'Onofrio et al. (1999). In Tabella II sono sintetizzate le principali caratteristiche del sistema, ed in Figura A.2 uno schema della catena strumentale per il controllo e l'acquisizione.

Tipo di prova		Colonna risonante / Taglio torsionale
Nome dell'apparecchiatura		THOR
Provino	Diametro esterno	36mm
	Altezza	72mm
	Accuratezza nella misura delle dimensioni e del peso del provino	0.1 mm, 0.1gr
	Metodo di preparazione del provino	Fustellamento
	Saturazione	In cella via back-pressure
	Test di B	B > 0.95 mediando i valori ottenuti incrementando e decrementando la pressione di cella
	Contatto tra provino e apparecchiatura	Piastra rugosa avvitata nella testa di carico e pietra porosa di carburo di silicio avvitata al piedistallo
Sistema di applicazione dei carichi torcenti	Tipo	Motore elettromagnetico
Accuratezza del sistema di controllo	Pressione di cella	40 Pa attraverso convertitore E/P
	Contropressione	Senza controllo
	Sistema di applicazione dei carichi torcenti	Controllo in corrente risoluzione $1.6 \cdot 10^{-5}$ Nm (2 Pa per il provino $\varnothing$ 36 mm) Fondo scala 5 Nm Non c'è effetto della forza elettromotrice indotta
Tipo di trasduttori utilizzati	Pressione di cella	Sensore di pressione di elevate prestazioni con membrana al silicone
	Contropressione	Trasduttore miniaturizzato con diaframma al silicone
	Pressione neutra	Trasduttore miniaturizzato con diaframma al silicone
	Coppia torcente	Cella torsionale a strain-gage
	Spostamenti assiali	LVDT in corrente continua
	Variazioni di volume	Trasduttore differenziale di pressione/ volumometro
	Accelerazioni	Accelerometro piezoelettrico
	Rotazioni	Laser /Proximitor
Accuratezza delle misure	Pressione di cella	1.5 Pa
	Contropressione	0.7 Pa
	Pressione interstiziale	0.7 Pa
	Coppia torcente	$6 \times 10^{-3}$ Nm
	Spostamenti assiali	1 $\mu$ m
	Variazioni di volume	0.0014 cm <sup>3</sup>
	Rotazioni	$2.5 \times 10^{-7}$ rad (prox)

Tabella II. Principali caratteristiche della cella di taglio torsionale THOR.

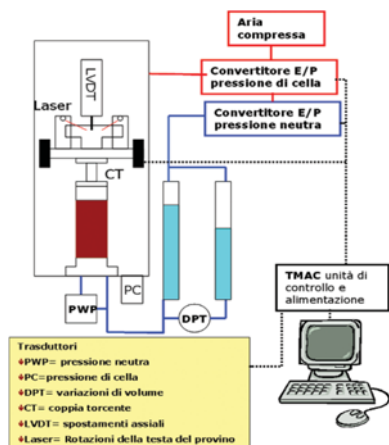


Figura 1. Diagramma schematico del sistema di controllo e acquisizione di THOR

### Procedure sperimentali per le prove di taglio torsionale

Ciascun provino è sottoposto ad una prima fase di applicazione della sollecitazione sferica per ricondurre il provino alla tensione efficace stimata agente in sito. Al termine di questa fase viene

applicato il carico torsionale  $M(t)$ , avente caratteristiche diverse in funzione del tipo di prova. In particolare, in relazione alla frequenza con la quale vengono fatte variare le sollecitazioni nel tempo, è possibile distinguere due tipi di prova: prove «cicliche» (torsione ciclica, CTS) e prove «dinamiche» propriamente dette (colonna risonante, RC).

I criteri di interpretazione delle prove in termini di rigidità e smorzamento sono variabili a seconda delle caratteristiche della sollecitazione torsionale applicata. Infatti, nelle prove TS l'effetto delle forze di inerzia è trascurabile e quindi l'interpretazione è di tipo «quasi statico», mentre per le prove RC è necessario fare riferimento a modelli d'analisi dinamici. I criteri descritti in seguito sono quelli pressoché universalmente adottati per l'interpretazione delle prove RC e TS, conformi alle norme ASTM (ASTM D4015/92). Presso il Laboratorio di Geotecnica del DICEA sono state messe a punto, e vengono normalmente utilizzate, procedure di interpretazione più complesse, che si avvalgono della completa automazione e digitalizzazione delle prove. Queste procedure, ampiamente descritte altrove (Papa et al., 1988; Silvestri, 1991, d'Onofrio, 1996), tra l'altro consentono di aumentare l'affidabilità dei risultati anche quando il livello di deformazioni indagato è piccolo e quindi si è in presenza di un rapporto segnale/rumore non elevato. Per approfondimenti si rimanda a Silvestri (1991).

#### *Prova di torsione ciclica (TS)*

Durante una prova di torsione ciclica (Figura 2), il provino viene sottoposto ad un momento torcente  $M(t)$  variabile nel tempo con legge sinusoidale (di ampiezza e frequenza costanti) e si misura la rotazione della testa  $\theta(t)$ .

Le tracce temporali rappresentative di momenti e rotazioni vengono tradotte in termini di andamenti  $\tau(t)$  e  $\gamma(t)$ , mediante le opportune costanti di taratura ed assumendo alcune ipotesi semplificative sulla distribuzione dello stato tensio-deformativo all'interno del provino.

Per ciascun ciclo di carico si individuano quindi i valori di picco della tensione e della deformazione tangenziali ( $\tau_{\max}$  e  $\gamma_{\max}$ ), e l'andamento del ciclo di isteresi risultante dall'accoppiamento di  $\tau(t)$  e  $\gamma(t)$ .

I valori di G e D vengono calcolati utilizzando le relazioni:

$$G = \frac{\tau_{pp}}{\gamma_{pp}} \quad D = \frac{W_d}{4\pi W_s}$$

Per l'interpretazione dei risultati relativi alle prove di torsione ciclica si è attribuita maggiore affidabilità a tecniche di regressione statistica ai bassi livelli di deformazione (adoperando una regressione sinusoidale, cfr. Papa et al., 1988); non appena i disturbi elettrici sono apparsi senz'altro trascurabili, si è ricorsi ai criteri ordinari (ampiezze picco-picco, area del ciclo di isteresi).

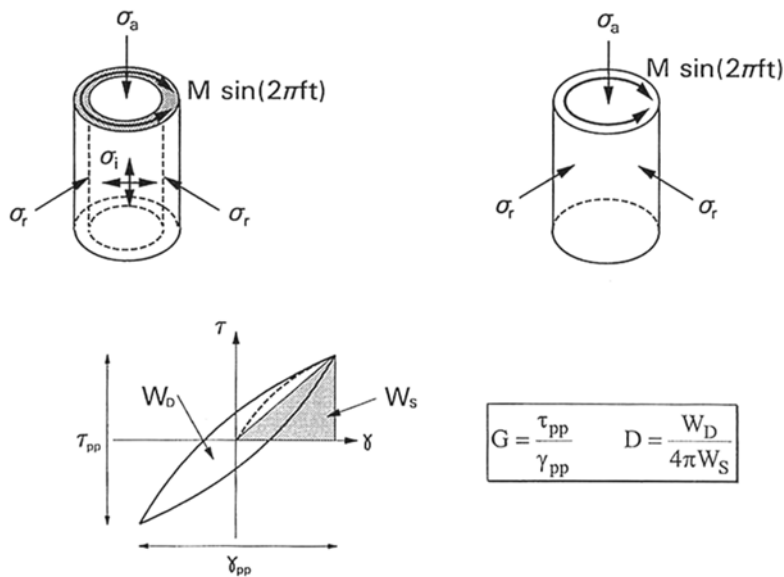


Figura 2: Interpretazione delle prove di torsione ciclica.

#### 4. RISULTATI SPERIMENTALI

I risultati ottenuti sono forniti sotto forma di schede, tabelle e diagrammi.

In particolare, per ciascun campione, è fornita una scheda che riporta la descrizione a vista (DD), una contenente la determinazione del peso specifico, delle caratteristiche fisiche generali e dei limiti di Atterberg (LL). In un secondo modulo sono forniti i risultati delle analisi granulometriche (AA).

I risultati delle prove triassiali consolidate isotropicamente non drenate (CIU) sono forniti sotto forma di schede, tabulati e diagrammi:

- la scheda contenente i dati generali relativi ai provini (dimensioni, caratteristiche fisiche, tensioni di prova);
- la tabella contenente i valori delle deformazioni, tensioni e sovrappressioni neutre rilevati nel corso della fase di consolidazione e durante l'applicazione della tensione deviatorica;
- i diagrammi de:
- il deviatore  $q$  in funzione della deformazione assiale  $\varepsilon_a$ ;
- la sovrappressione neutra  $u-u_0$  in funzione della deformazione assiale  $\varepsilon_a$ ;
- il modulo di rigidezza non drenato  $E_u$  in funzione della deformazione assiale  $\varepsilon_a$ ;
- il coefficiente  $A$  di Skempton in funzione della deformazione assiale  $\varepsilon_a$ ;
- i cerchi di Mohr a rottura in termini di tensioni efficaci;
- i percorsi di sollecitazione rappresentati nel piano  $(q, p')$ ;
- l'involuppo di rottura nel piano  $(s', t)$  e  $(q, p')$ .



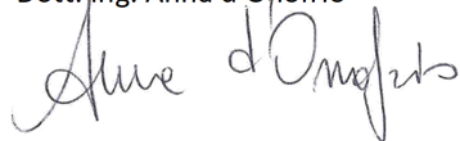
I risultati delle prove triassiali cicliche non drenate (TXC) sono forniti sotto forma di schede, tabulati e diagrammi:

- la scheda contenente i dati generali relativi ai provini (dimensioni, caratteristiche fisiche, tensioni di prova);
- la tabella contenente i valori degli spostamenti assiali, delle letture della cella di carico assiale e delle sovrappressioni neutre rilevati nel corso della fase ciclica;
- i diagrammi de:
  - il deviatore  $q$  in funzione della deformazione assiale  $\varepsilon_a$ ;
  - il rapporto di sovrappressione neutra  $(u-u_0)/p'_0$  in funzione del numero di cicli;
  - le deformazioni assiali in funzione del numero di cicli
- i percorsi di sollecitazione rappresentati nel piano  $(q, p')$ ;

Napoli, Febbraio 2020

Il responsabile della sperimentazione

Dott. Ing. Anna d'Onofrio



	SN01c1	SN01c2	SN02c1	SN02c2	SN03c1	SN03c2	SN04c1	SN04c2	SNGR02-C1	SNGR02-C2	SNGR02-C6	SNMED1-C3	SNMED5-C2	SNMED1-C7	SNGR03-C2	SNGR03-C5	SNGR03-C4	SNGR03-C5	SNGR03-C7	SNMED1-C12	SNMED7-C3	SNGR01-C7	SNGR01-C2	SNGR01_C4	SNV01-C3	SNMED2-C2	SNMED2-C4	SNGR04_C4
DD	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
AA	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
LL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
G6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
n1,7/W	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TX CIU	X				X		X	X	X			X								X	X		X	X				
TXC					X		X	X			X	X					X				X							X
RCTS		X			X	X	X	X	X		X	X					X		X									X

Tabella III. Elenco prove eseguite