

Professione GEOLOGO

Notiziario dell'Ordine dei Geologi del Lazio

Numero 40

Agosto 2014



Il certificato di laboratorio geotecnico: le prove triassiali. Parte 2

Stefano Cianci

Geologo, Geoplanning Servizi per il Territorio Srl

Massimo Parente

Geologo, Waterways Srl

Le prove triassiali consolidate possono essere condotte in modalità drenata o non drenata, con consolidazione isotropa o meno, in compressione diretta o inversa. Solamente questa prima indicazione sulle modalità di esecuzione mostra le potenzialità che lo strumento triassiale offre, potenzialità che permettono di riprodurre con una approssimazione notevolissima stati tensionali specifici. Nella normale prassi di progettazione, le modalità di prova utilizzate sono di compressione diretta con consolidazione isotropa, con fase di taglio drenata (CID) o non drenata (CIU): tali modalità restituiscono i dati necessari al progettista a costi relativamente contenuti. Se si tiene in considerazione il fatto che le condizioni drenate sono quelle che riproducono le condizioni di resistenza più “critiche”, e dato che la TxCID restituisce direttamente i parametri ed i moduli in termini di tensioni efficaci, tutto ciò fa sì che la TxCID sia tra le prove più importanti

della geotecnica classica, se non la più importante. Infatti, essa restituisce i parametri coesione drenata ed angolo di attrito drenato, oltre a permettere il calcolo dei moduli di elasticità in termini di tensioni efficaci. La prova TxCID è più costosa della TxCIU: questo perché la fase di taglio della TxCID è determinata da velocità di deformazioni molto lente, tali da scongiurare sempre l'insorgere di sovrappressioni interstiziali legate proprio alla velocità. La TxCID dura quindi molto più tempo, determinando un maggiore utilizzo dello strumento triassiale; di norma la prova nel suo complesso dura circa una settimana.

La triassiale cid: modalità di esecuzione

La prova è sempre eseguita su almeno tre provini cilindrici, che vengono confezionati mantenendo l'altezza doppia delle diametro; le loro dimensioni standard sono di 3,8 cm circa per il

diametro e di 7,6 cm circa per l'altezza. Dimensioni maggiori sono possibili, mentre sono sconsigliabili dimensioni più piccole. Viene eseguita sul materiale saturo: è spesso necessario provvedere ad una iniziale fase di saturazione, ed è pertanto essenziale conoscere il grado di saturazione dei provini. Tale fase è realizzata imponendo ai provini delle pressioni di cella (σ_3) man mano crescenti in gradini successivi di carico. Alla pressione di cella è contrapposta una pressione che agisce internamente al provino, detta Back Pressure (o contropressione interstiziale, BP), che è minore della pressione di cella, anch'essa imposta in gradini successivi di carico. L'azione combinata delle due pressioni in condizioni di drenaggio aperto satura progressivamente i provini. La verifica della saturazione viene eseguita chiudendo il drenaggio ed imponendo una ulteriore pressione di cella, misurando la sovrappressione dell'acqua indotta da

Prova di Compressione Triassiale (UNI CEN ISO/TS 17892-9:2005)

Sigla: PC6C3+C5+C9 bis
Prof. (m): 0,0-0,40
Data consegna campione
Data apertura campione

V. Acc. N.
del

Data inizio prova:
Data fine prova:

		Provino		
		A	B	C
Fase Iniziale	Diametro (cm)	3,8	3,8	3,8
	Altezza (cm)	7,6	7,6	7,6
	M.Vol. apparente (Mg/m ³)	1,954	1,970	1,962
dopo prova	Contenuto d'acqua (%)	15,52%	16,75%	15,58%
	M.Vol. appar. secca (Mg/m ³)	1,691	1,687	1,697
	M.Vol. apparente (Mg/m ³)	2,072	2,060	2,060
	Contenuto d'acqua (%)	22,51%	22,14%	21,39%
	M.Vol. appar. secca (Mg/m ³)	1,691	1,687	1,697

Descrizione: Sabbia con limo deb. ghiaiosa deb. argillosa marrone chiaro (Rif. Munsell 2.5Y5/2 Grayish Brown)

Caratteristiche del campione		
Contenuto d'acqua		18,0%
Gravità Specifica		2,720



		Provino		
		A	B	C
Fase di compressione	Pr. in cella (KN/m ²)	220	319	420
	pwp iniziale (KN/m ²)	80,91	86,18	87,04
	σ_3 iniziale (KN/m ²)	139,49	232,32	332,96
	V. di deformazione (mm/min)	0,000	0,003	0,002
	Deformazione (%)	2,151	2,260	2,377
condizioni a rottura	($\sigma_1 - \sigma_3$) (KN/m ²)	1356,576	1529,822	1835,745
	σ_3 (KN/m ²)	139,49	232,32	332,96
	σ_1 (KN/m ²)	1492,19	1765,90	2174,66
	($\sigma_1 - \sigma_3$)/2 (KN/m ²)	676,35	766,792	920,849

Fig 1 - Tabella con i dati inerenti le caratteristiche iniziali e finali dei provini e delle principali fasi della prova. Si può notare come la fase di saturazione non sia citata, e come vengano qui riportate le fotografie dei provini dopo la prova. Si notino le dimensioni nominali dei provini. Questo certificato non riporta mai i valori numerici acquisiti (tali e quali o elaborati), rimanendo però di buon livello.

CARATTERISTICHE INIZIALI DEI PROVINI				
Provino		1	2	3
Altezza	cm	7,601	7,669	7,504
Diametro	cm	3,805	3,805	3,800
Volume	cm ³	88,477	87,250	85,104
Peso di volume	kN/m ³	19,82	18,19	18,34
Contenuto d'acqua	%	14,3	16,1	21,2
Peso di volume dei grani	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
Indice dei vuoti		0,515	0,859	0,717
Grado di saturazione	%	74	85	78

FASI DI SATURAZIONE E CONSOLIDAZIONE				
Provino		1	2	3
Variazione di volume dopo saturazione	cm ³	-2,717	-7,803	-3,668
Pressione di cella totale	kPa	324	422	520
Back pressure	kPa	226	226	226
Pressione di cella efficace	kPa	98	196	294
Variazione di volume totale	cm ³	-2,968	-8,032	-2,934
Volume corretto prima del taglio	cm ³	89,445	95,282	88,038
Altezza corretta prima del taglio	cm	7,685	7,884	7,587
Coefficiente B		0,822	0,843	0,946

FASE DI TAGLIO				
Provino		1	2	3
Velocità di deformazione	mm/min	0,0300	0,0300	0,0300
Pressione di cella efficace iniziale	kPa	98	196	294
Contenuto finale d'acqua	%	13,1	14,6	14,7

Fig 2 - Pagina di certificato di una prova TxCID riportante le dimensioni (non nominali) proprietà iniziali e finali dei provini, oltre che le pressioni imposte ed i principali dati acquisiti nelle varie fasi della prova. Seppur meno scenografica della precedente, la tabella è più completa. Inoltre questo certificato riporta alla fine ulteriori 2 pagine contenenti i dati acquisiti elaborati.

questo nuovo sovraccarico, secondo la seguente relazione:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad [1]$$

B è definito come parametro B di Skempton. In un terreno normal consolidato saturo B=1; più complesso è il caso di terreni sovraconsolidati, nei quali il valore di B raramente arriva a 0,75.

Terminata la fase di saturazione i provini sono sottoposti a consolidazione. Si impone quindi la pressione di cella definitiva, con relativa contropressione (BP), lasciando aperto il drenaggio fintanto che le sovrappressioni generate non siano state dissipate, ovvero fintanto che le variazioni di volume dei provini risultano trascurabili. La fase di compressione (o di taglio) avviene imponendo una pressione verticale sul provino (σ_1), in modo da generare uno sforzo deviatorico ($\sigma_1 - \sigma_3$). Come detto, la velocità con cui tale sforzo è imposto è molto lenta. Durante tale fase, il drenaggio dei provini rimane aperto. Note la pressione di cella e la BP, che sono identiche a quelle utilizzate in fase di consolidazione, vengono misurate sia la pressione verticale σ_1 , sia la deformazione e , sia la variazione di volume, sia le pressioni interstiziali. La prova viene conclusa dopo la rottura del provino, definita dalla diminuzione delle resistenze, e comunque dopo che il provino ha raggiunto una deformazione pari al 20% della sua originale altezza (ovvero 15 mm di deformazione nel caso di provini standard).

Le normative

Non è mai stata redatta in Italia una normativa specifica che riguardi la TxCID, e normalmente la prova viene eseguita o secondo le norme A.S.T.M. o secondo le "Raccomandazioni sulle Prove Geotecniche di Laboratorio" (AGI, 1994); attualmente è cogente la normativa europea UNI CEN ISO/TS 17892-9.

I certificati

Si elenca quali informazioni non dovranno mai mancare per avere un certificato completo relativo ad una prova TxCID:

- i riferimenti normativi;
- le misurazioni acquisite;
- le date di esecuzione;
- le caratteristiche iniziali dei provini (contenuto in acqua, parametri di stato e parametri indice, dimensioni);
- unità di misura delle varie grandezze

Prova di Compressione Triassiale (UNI CEN ISO/TS 17892-9:2005)

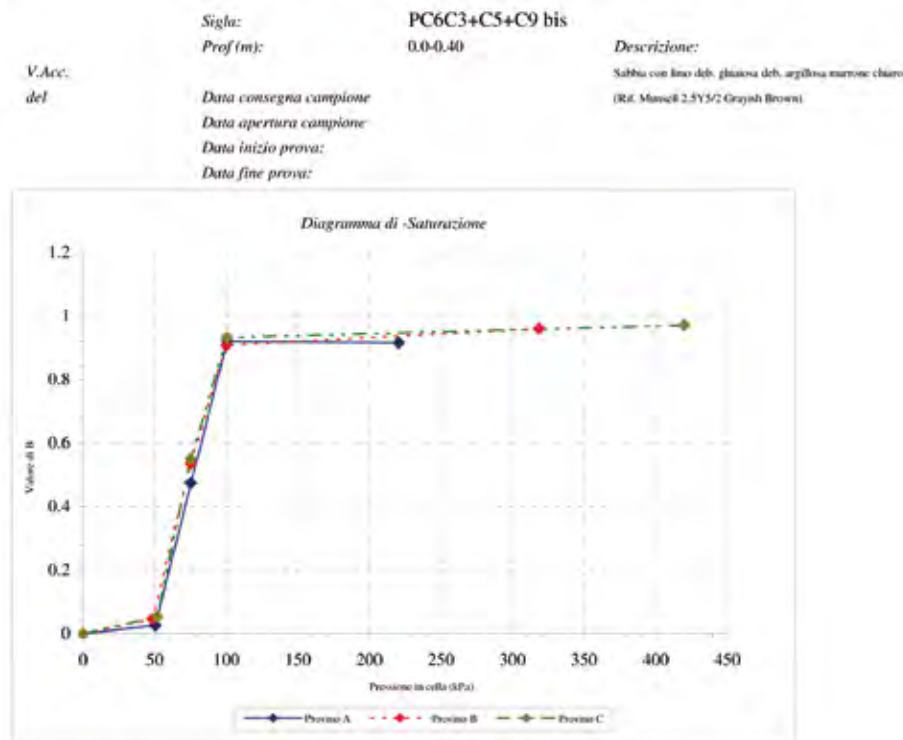


Fig 3 - Diagramma relativo alla fase di saturazione. È riportata solamente la variazione del coefficiente B di Skempton in funzione dell'aumentare della pressione di cella.

Fase di saturazione

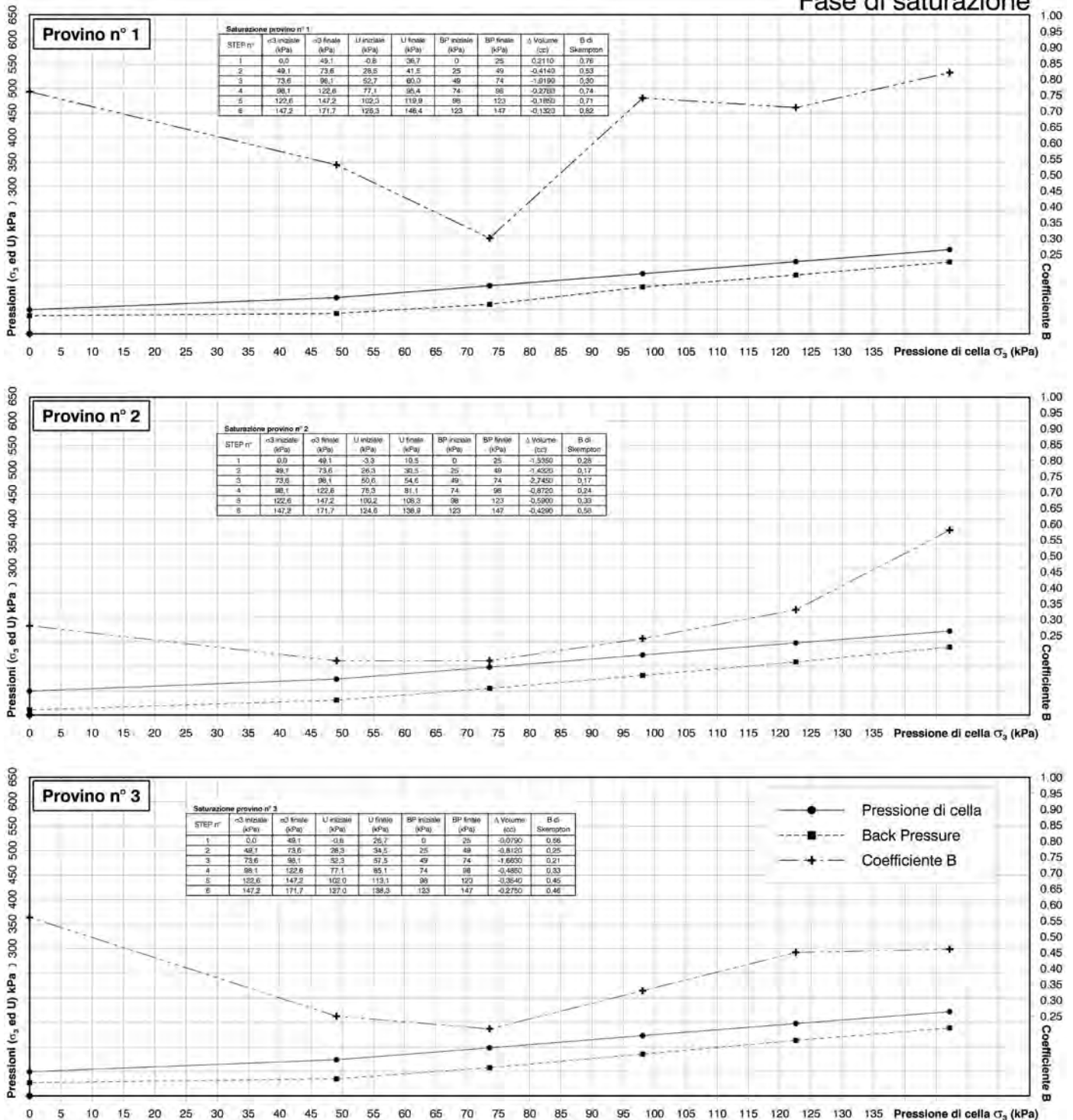


Fig 4 - Diagramma relativo alla fase di saturazione. È riportata la variazione del coefficiente B di Skempton in funzione dell'aumentare della pressione di cella e della Contropressione (Back Pressure - BP). Inoltre in una pagina a parte sono restituite le tabelle con anche altri parametri di controllo (qui riportate in piccolo, modificando il certificato per motivi di spazio).

adeguate agli standard internazionali (es.: pressioni in kPa o multipli). Tutte le informazioni relative ai provini confezionati (pesi di volume, contenuti d'acqua, indici dei vuoti e grado di saturazione) devono essere ben indicate, possibilmente riportate entro una tabella riassuntiva (Figure 1 e 2) che contempli le principali caratteristiche (pressioni imposte, variazioni volumetriche, ecc.)

relative alle varie fasi della prova. Tali fasi dovranno essere descritte separatamente. Non esiste una modalità univoca di restituzione della fase di saturazione, che dovrebbe riportare per tutti i gradini di pressione imposti i valori di pressione di cella, di back pressure, della pressione interstiziale, della variazione volumetrica e di B. Esempi sono riportati nelle Figure 3 e 4. La fase di consolidazione

deve restituire le variazioni di volume ottenute (positive quando il volume diminuisce) in funzione del tempo; nel corrispondente grafico, il tempo è indicato come Radice Quadrata dello stesso. Da questo grafico (Figure 5 e 6) si ricava, attraverso formule che possono differire secondo la normativa o anche l'esperienza maturata dal laboratorio, la velocità di deformazione da applicare in

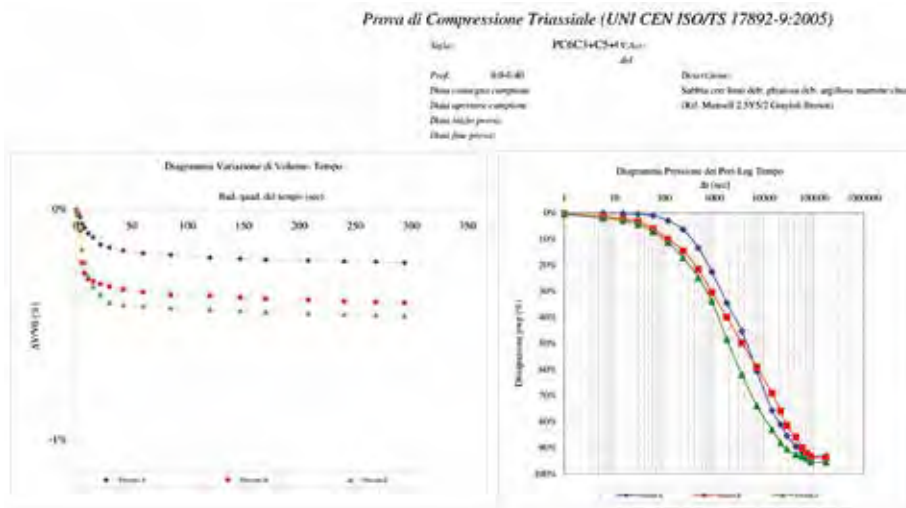


Fig 5 - Diagramma relativo alla fase di consolidazione. È stato riportato anche il diagramma relativo alla dissipazione delle sovrappressioni interstiziali in funzione del tempo.

fase di compressione (taglio). Le misure acquisite nella fase di taglio permette di creare molti diagrammi; quello più importante relaziona la deformazione percentuale con la resistenza al taglio in condizioni drenate, cui normalmente è associato il grafico “deformazione-variazione volumetrica” (Figure 7 e 8). Ulteriore grafico è quello sviluppato con il calcolo degli invarianti S-T e P-Q in termini di tensioni efficaci. Tali grafici sono noti più comunemente come *stress path*, e descrivono il percorso tensionale dei provini nel corso della prova. Almeno il grafico S-T dovrebbe essere sempre presente nel certificato, in quanto il suo andamento restituisce importantissime informazioni al progettista (Figure 9 e 7). Degli altri ulteriori grafici dovrebbero

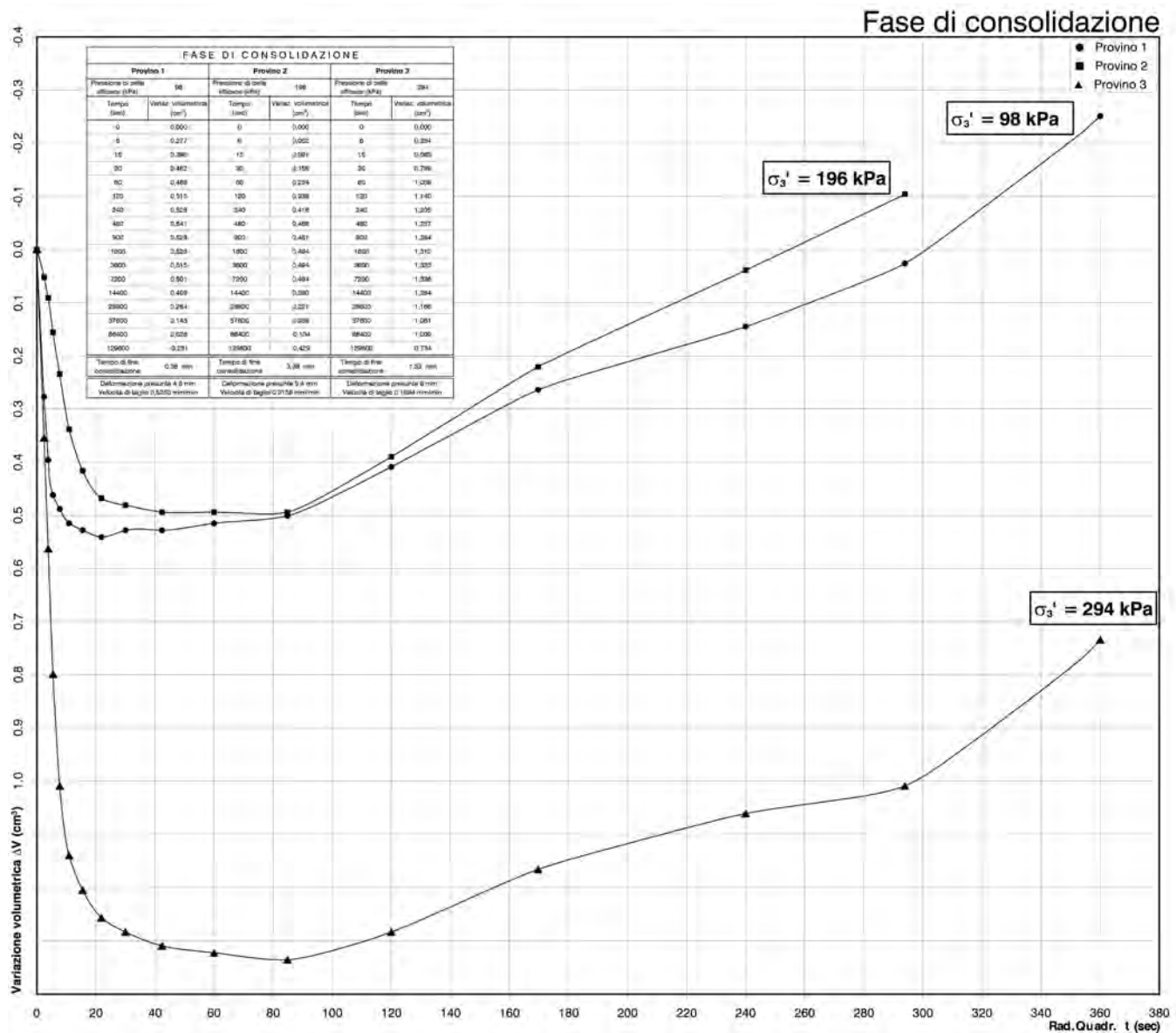


Fig 6 - Diagramma relativo alla fase di consolidazione. Sono restituiti su un'altra pagina le tabelle con i dati della variazione volumetrica e del tempo (qui riportate in piccolo, modificando il certificato per motivi di spazio).

Prova di Compressione Triassiale (UNI CEN ISO/TS 17892-9:2005)

Sigla: PC6C3+CS+C9 Data consegna campione V.Acc. N.
 Data apertura campione del
 Prof. (in): 0.0-0.40 Data inizio prova: Descrizione:
 Data fine prova: Sabbia con limo deb. ghiaiosa deb. argillosa marrone chiaro
 (Ref. Mansell 2.5V3/2 Grayish Brown)

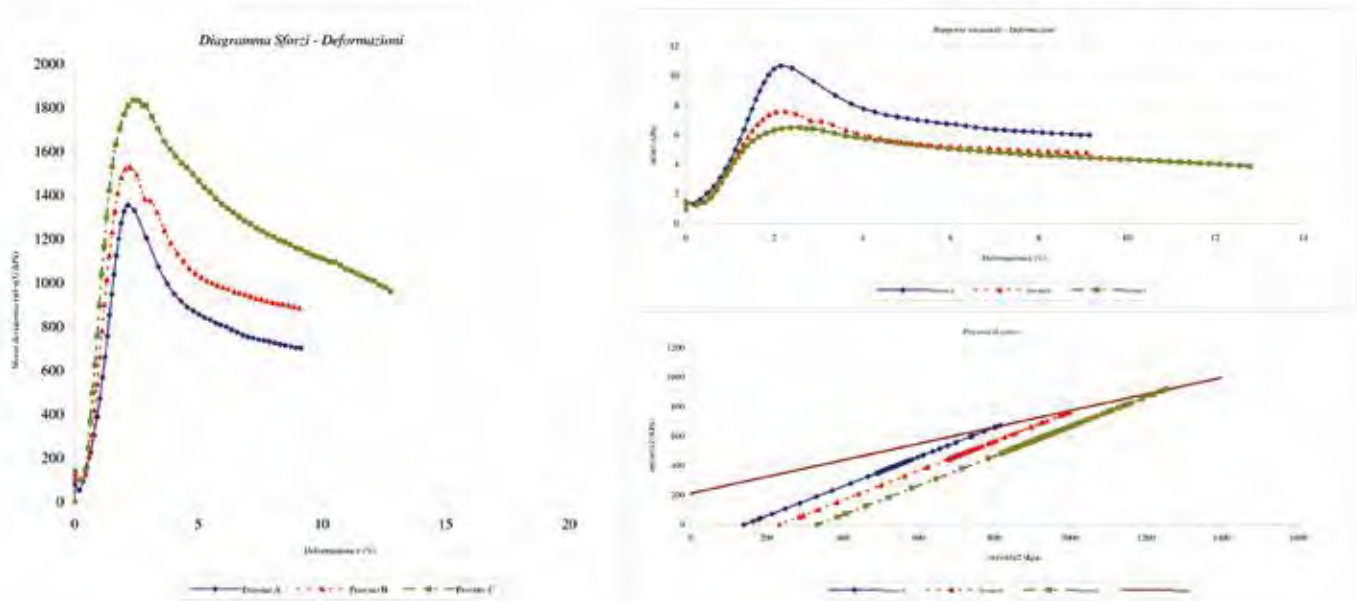


Fig 7 - Diagrammi relativi alla fase di taglio. A destra il classico diagramma tra la deformazione e lo sforzo deviatorico. A destra in alto il grafico tra la deformazione ed il rapporto tra le pressioni agenti (s_1/s_3). A destra in basso gli stress path tra gli invarianti S e T. È riportato anche l'involuppo a rottura, che può essere correlato con quello ottenuto con i cerchi di Mohr: in entrambi i casi però si tratta di una interpretazione. Non è presente il grafico che correla la deformazione con la variazione volumetrica.

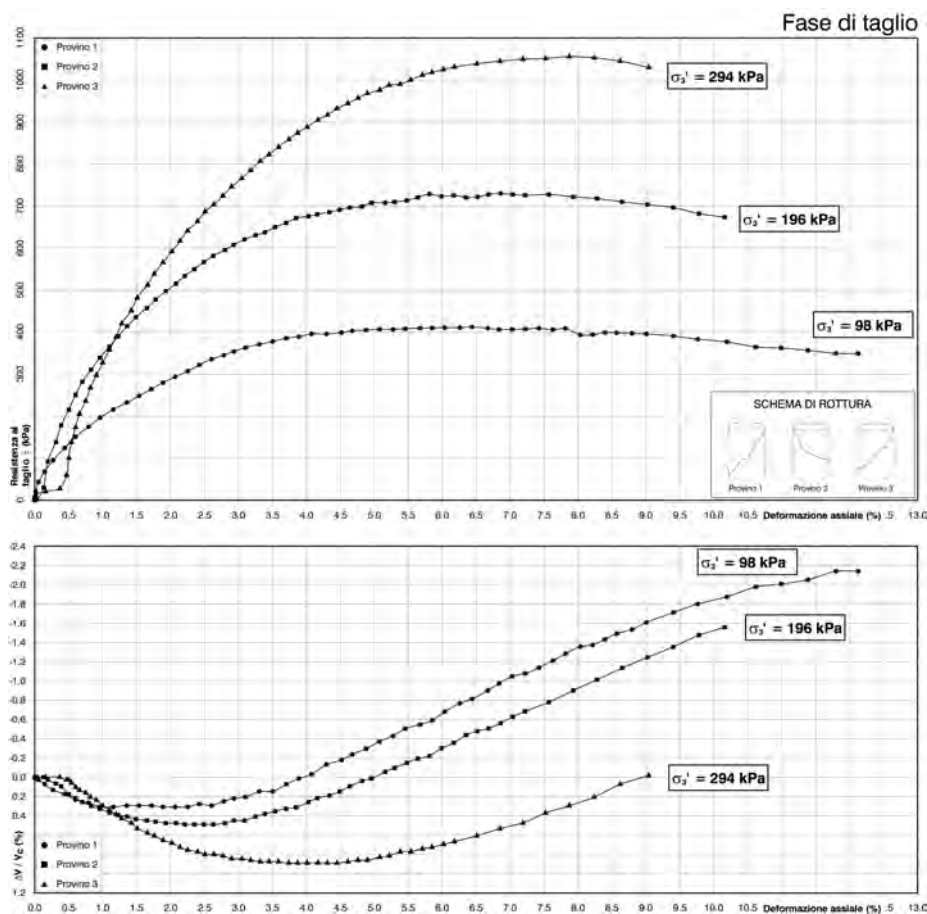


Fig 8 - Diagrammi relativi alla fase di taglio. In questo caso è presente quello che correla la deformazione con la variazione di volume. Si noti la presenza degli schemi di rottura dei provini.

essere presenti; il primo è quello che relaziona la deformazione con il rapporto tra σ_1 e σ_3 , il secondo è quello tra deformazione e pressione interstiziale (o la sua variazione, Figure 10 e 11). Solo questa veloce panoramica, certamente non esauriente, fa capire la difficoltà dell'esecuzione di questa prova, di quante grandezze devono essere continuamente monitorate e misurate, di quali grafici debbono essere restituiti per poter fornire al progettista non solo tutti i dati a lui necessari, ma anche le evidenze di una prova ben preparata, condotta ed eseguita.

L'interpretazione dei risultati

Dalla TxCID è possibile ottenere molteplici informazioni in funzione dello stato tensionale che serve al progettista: ciò spiega bene perché l'interpretazione è compito di tale figura professionale, in quanto riportando solamente i valori di rottura la si vincola al risultato imposto dal certificato, e quindi dal laboratorio, sgravandola peraltro da tale responsabilità. Come per le altre prove, l'interpretazione di una TxCID non può prescindere da tutti i dati ottenuti dall'analisi del campione nel suo complesso, con particolare riguardo

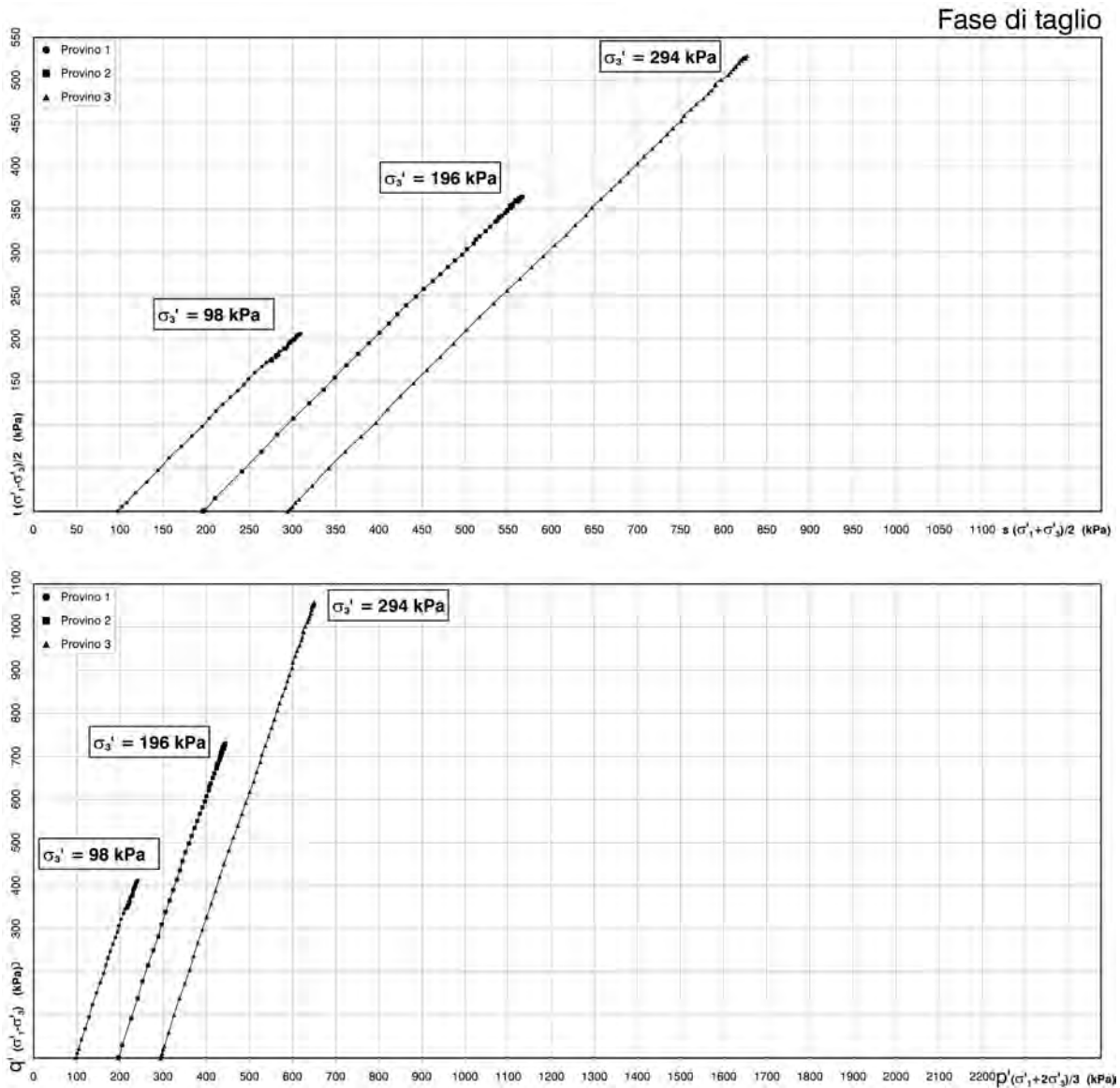


Fig 9 - Grafici con gli stress path. È da sottolineare che tutti i diagrammi della fase di consolidazione e di taglio di questo certificato riportano i valori tensionali efficaci (s_3 di cella).

Prova di Compressione Triassiale (UNI CEN ISO/TS 17892-9:2005)

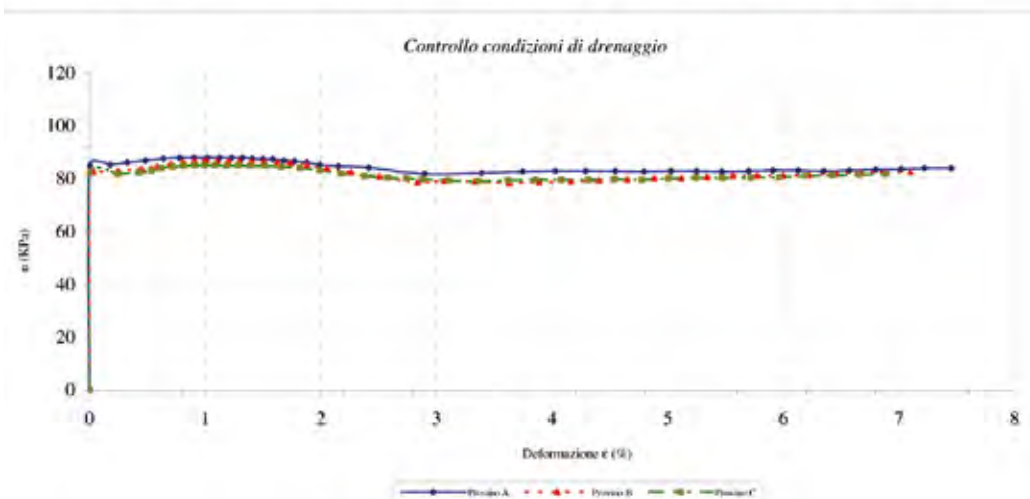


Fig 10 - Diagramma che correla la deformazione con la pressione interstiziale (U) in fase di taglio. L'aumento della pressione ad inizio prova è da relazionare con l'imposizione della pressione di cella ed alla presenza della contropressione (BP). Nel corso della prova le pressioni interstiziali variano di +8 kPa e -3 kPa, quindi sono sostanzialmente costanti.

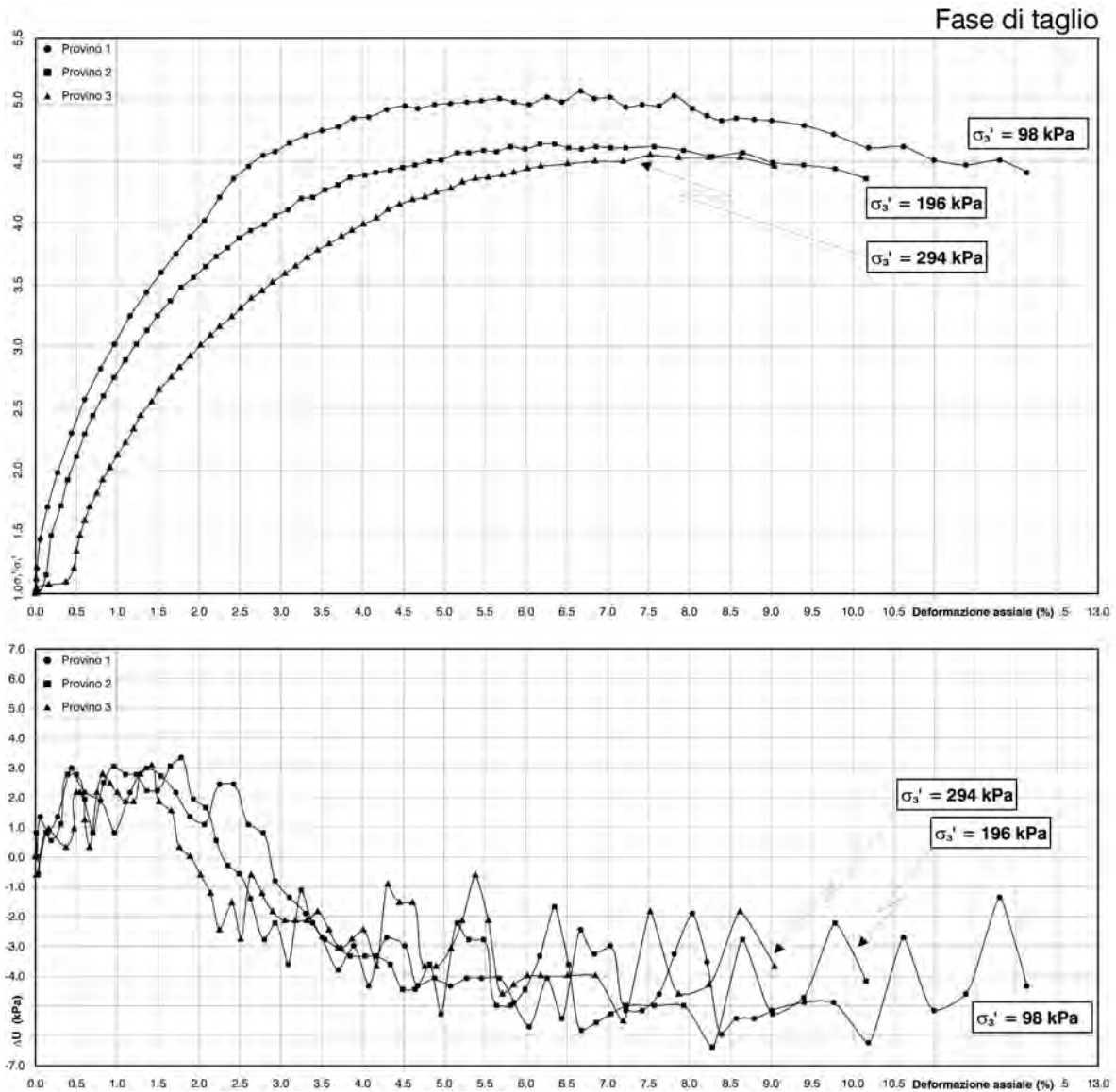


Fig. 11 - Diagrammi relativi alla fase di taglio. Si noti l'apparente estrema variabilità della variazione della pressione interstiziale (ΔU): si ricorda che $1 \text{ kPa} = 1,01 \text{ g/cm}^2$.

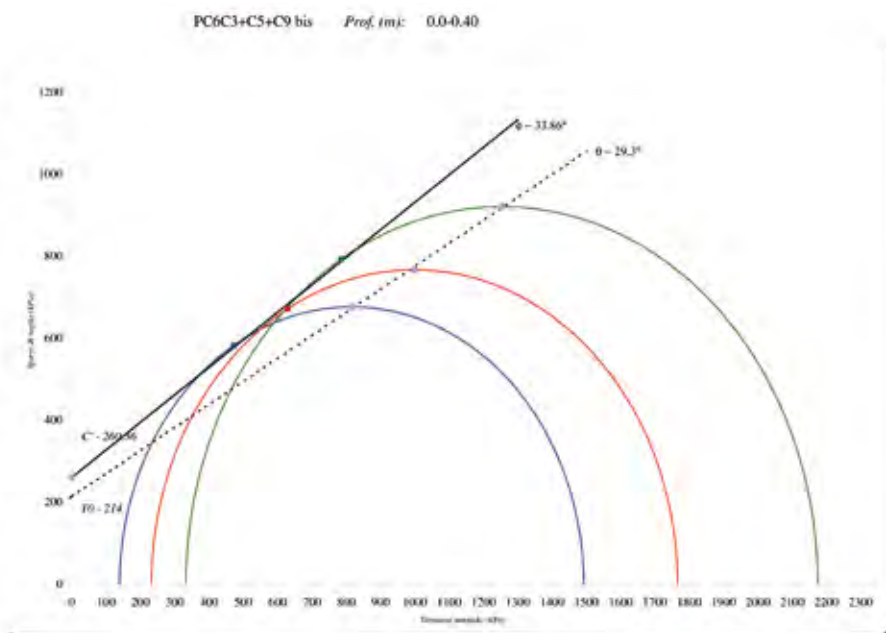


Fig. 12 - Interpretazione della prova TxCID. I dati a rottura non sono noti; è però elegantemente riportata anche l'interpretazione dell'attrito (θ) e della coesione (T_0) ottenuta dagli stress path (Figura X).

alla descrizione, all'Indice Plastico ed alla granulometria. Ma se si prende in considerazione il massimo valore di resistenza come solo punto di interesse, anche il laboratorio può fornire una sua interpretazione ufficiosa (ovvero non su carta intestata), ricavando i parametri coesione intercetta ed angolo di attrito in termini efficaci utilizzando i cerchi di Mohr: questa operazione è comunque assai complessa. La Figura 12 riporta l'interpretazione della prova TxCID riportata dal certificato visualizzato dalle Figure 1, 3, 5, 7 e 10, figure dove è sempre indicata la granulometria del materiale. La Figura 13 si riferisce invece all'interpretazione della prova eseguita su una sabbia (76%) limosa debolmente argillosa e ghiaiosa, omogenea, ben addensata (NPST > 50 colpi); la prova è descritta nel certificato visualizzato dalle Figure 2, 4, 6, 8, 9 e 11.

Sondaggio n° 1	Campione n° 2	Profondità di prelievo: da m 08.00 a m 08.50
----------------	---------------	---

Provino n°		1	2	3
Tensione deviatorica a rottura	kPa	411	730	1056
Deformazione assiale a rottura	%	6,26	6,86	7,87
Variazione volumetrica a rottura	%	-0,77	-0,56	0,30
Pressione di cella efficace	kPa	102	202	299
Tensione deviatorica media	kPa	205	365	528
Tensione efficace media	kPa	307	567	827
Pressione interstiziale a rottura (U)	kPa	227	224	228

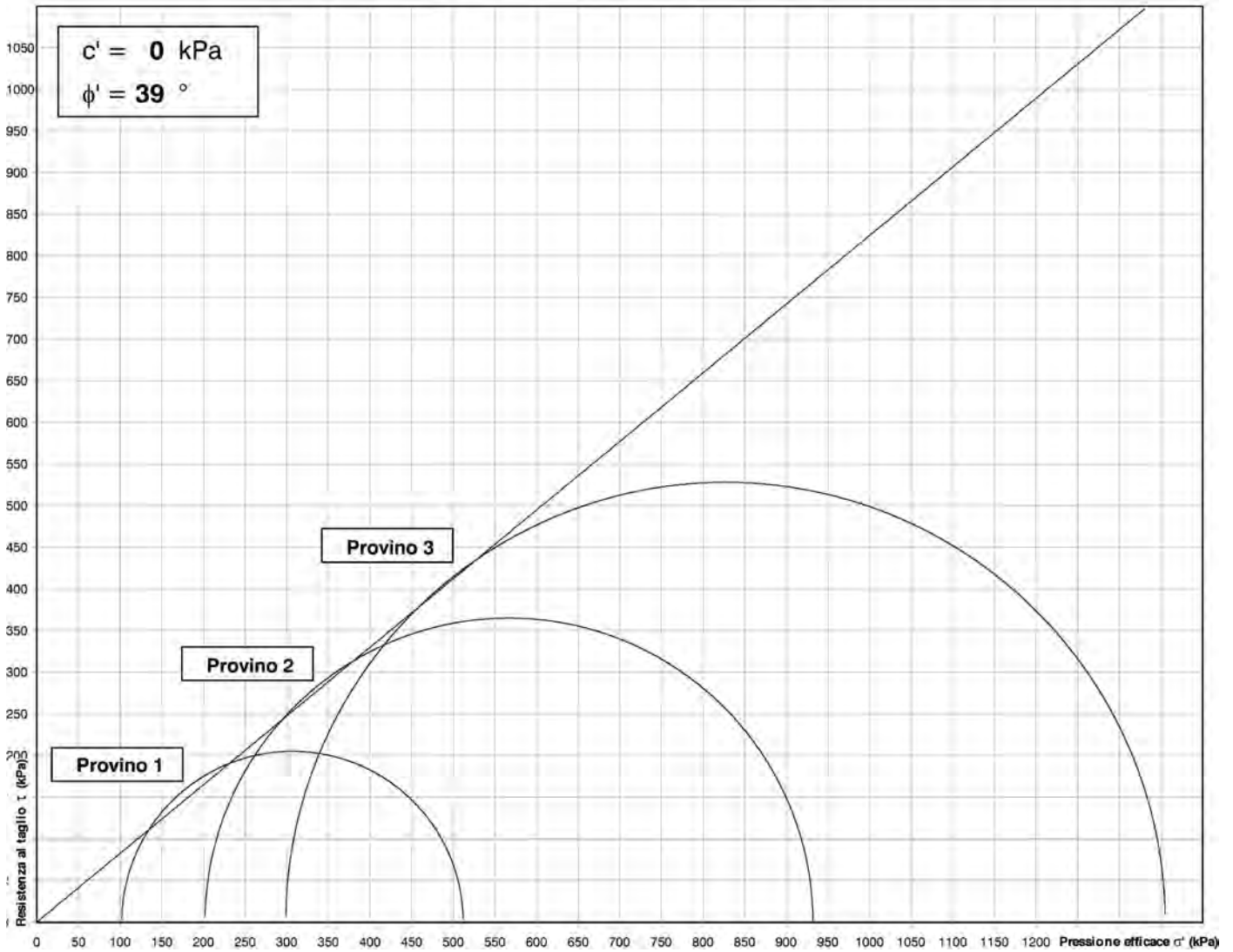


Fig. 13 - Interpretazione della prova TxCID. Sono indicati tutti i parametri necessari alla costruzione dei cerchi (tabella in alto).