

# Il certificato di laboratorio geotecnico: le prove triassiali. Parte I

Stefano Cianci

Geoplanning Servizi per il Territorio Srl  
stefano.cianci@geoplanning.it

Massimo Parente

Waterways S.r.l.  
massimoparente@waterways.it

In questa prima parte dedicata alle prove triassiali saranno trattate le prove non consolidate, le quali restituiscono valori di resistenza solamente in termini di tensioni totali. Nello specifico sono la prova di compressione in modalità non consolidata non drenata (UU) e la prova di compressione non confinata, conosciuta normalmente come prova di compressione ad espansione laterale libera (ELL).

La prova UU restituisce direttamente un importante parametro, la resistenza in condizioni non drenate, chiamata abitualmente “coesione non drenata” ed indicata con il simbolo  $c_u$ . Dalla prova ELL invece si ottiene il valore a rottura in condizioni non drenate, indicata con il simbolo  $\sigma_f$ : tale simbolo è però utilizzato per indicare genericamente la resistenza a rottura, per cui è sempre opportuno indicare le condizioni di prova per le quali tale rottura è stata ottenuta (consolidate drenate, consolidate non drenate, ecc.). È possibile stimare il valore della coesione non drenata partendo da una prova ELL utilizzando la seguente relazione:

$$c_u = \frac{\sigma_f}{\sim 2} \quad [1]$$

Il denominatore della [1] vale esattamente 2 solamente nel caso di materiali perfettamente saturi ed estremamente impermeabili, ovvero caratterizzati da marcati tenori di argilla p.d. (particelle con diametro minore di 2  $\mu\text{m}$ ): tali condizioni sono, in generale, assai difficili da trovare congiuntamente. Va detto però che tanto più è basso il valore di resistenza a rottura  $\sigma_f$  tanto minore è l'errore di stima della  $c_u$  che si compie; di contro, tanto più è alto il valore a rottura  $\sigma_f$  e tanto più non sono rispettate le condizioni indicate, tanto più è alto (ed a volte proprio sbagliato) il valore di  $c_u$  stimato.

## Prova txuu: modalità di esecuzione

La prova dovrebbe essere eseguita su

tre provini, al fine di poter definire una minima parametrizzazione su base statistica. Di fatto la prova è spesso svolta su uno, massimo due provini. Non è infrequente che i materiali, oltre a non essere né saturi né sostanzialmente impermeabili, non siano neanche omogenei (il che è particolarmente significativo considerando che la prova è svolta su provini provenienti da una carota): pertanto, nel caso in cui sia possibile eseguire la prova su tre provini, utilizzare un solo provino per esprimere le proprie valutazioni tecniche, risulta quantomeno bizzarro. I provini sono cilindrici e vengono confezionati mantenendo l'altezza doppia delle diametri; 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. È necessario conoscere il grado di saturazione dei provini: pertanto è essenziale aver calcolato il peso di volume dei grani del materiale per potere eseguire tale calcolo. I provini confezionati sono inseriti in una guaina elastica impermeabile e posizionati nella cella triassiale; tutti i sistemi di drenaggio della cella vengono chiusi, e viene imposta la pressione di cella ( $\sigma_3$ ), diversa per ognuno dei provini, attraverso dell'acqua pura disareata. Dopo qualche minuto, necessario ad equilibrare le pressioni, viene quindi avviata la fase di compressione imponendo lo sforzo deviatorico ( $\sigma_1$ ). La prova quindi è condotta a volume costante e viene considerata conclusa a rottura, comunque dopo aver raggiunto una deformazione pari al 20% dell'altezza del provino. Nel caso in cui il materiale non sia saturo, è possibile (e necessario) provvedere preliminarmente alla saturazione dello stesso. Tale operazione è tutt'altro che semplice per non indurre ulteriori disturbi al materiale. In ultimo, è possibile misurare le sovrappressioni interstiziali

indotte dallo sforzo deviatorico durante la fase di compressione senza che venga prodotto nessun tipo di drenaggio utile ad

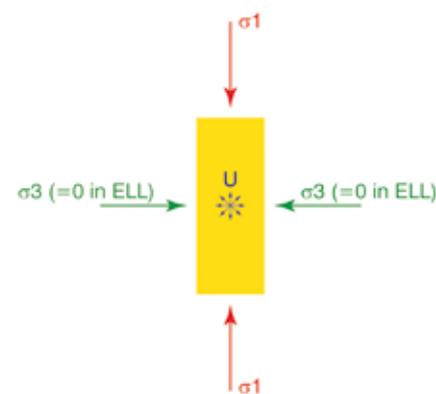


Fig 1 - Schema delle pressioni imposte e sviluppate nel corso di una prova non drenata. Nel caso di una ELL la pressione di cella ( $\sigma_3$ ) è pari a zero. Nel momento in cui vengono applicate la pressione di cella prima e lo sforzo deviatorico ( $\sigma_1$ ) poi, si sviluppano delle sovrappressioni interstiziali ( $U > 0$ ).

esempio per le trivellazioni di pali sotto falda (Figura 1).

## Prova ell: modalità di esecuzione

La differenza sostanziale con la prova TxUU è la mancanza della pressione di cella ( $\sigma_3 = 0$ , da cui il nome della prova), differenza non di poco conto in quanto non è necessario rivestire i provini con la membrana impermeabile. Ciò però da luogo a consolidazione in presenza di materiale permeabile, nonostante la velocità di taglio sia elevata. Inoltre, non sarà possibile saturare eventualmente il provino, né misurare l'entità delle pressioni neutre che si svilupperanno. Per il resto, la prova è condotta esattamente come la TxUU. La prova ELL è sicuramente meno raffinata della TxUU, ma proprio per questo è possibile eseguirla su alcune tipologie di terreni (es.: materiali scagliosi, fogliettati, tettonizzati, ecc.) nei quali il confezionamento di provini standard sani per la TxUU è estremamente difficile, se non impossibile. In tal senso è possibile eseguire la prova anche su tratti di carota

rettificati, avendo cura di mantenere pari a 1/2 il rapporto diametro/altezza del provino. Proprio la possibilità di eseguire prove ELL utilizzando direttamente parti del campione, rende opportuno un ulteriore richiamo alla rappresentatività del materiale e alla necessità di minime, elementari, ma necessarie, analisi statistiche dei risultati.

**Le normative**

Il nostro paese non ha mai emesso normative a riguardo, e pertanto le prove di compressione non drenate vengono eseguite secondo le “Raccomandazioni sulle Prove Geotecniche di Laboratorio” (AGI, 1994). Altri paesi sono stati più lungimiranti (ASTM, BS). In Italia attualmente è cogente la normativa europea UNI CEN ISO/TS 17892-8 per quanto concerne la prova TxUU, mentre per la ELL vale la normativa UNI CEN ISO/TS 17892-7.

**I certificati**

Un certificato completo sia di una prova TxUU sia di una ELL, dovrà contenere:

- 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 adeguate agli standard internazionali (es.: pressioni in kPa o multipli).

Per quel che riguarda la TxUU, dovranno comparire sul certificato chiaramente le pressioni di cella ( $\sigma_3$ ), la velocità di taglio, ed il contenuto d'acqua a fine prova

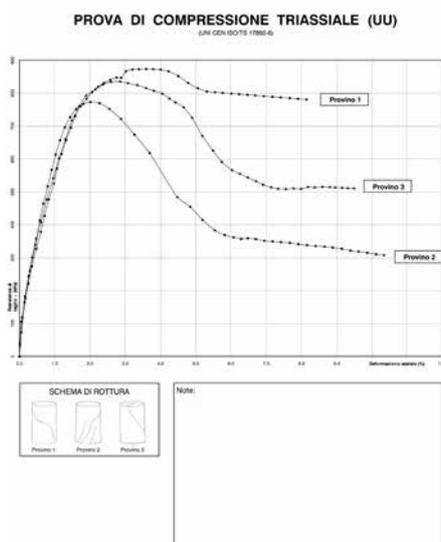


Fig. 2b - Diagramma delle resistenza misurata in relazione alla deformazione in una prova TxUU: sono presenti gli schemi dei provini al termine della prova.

**PROVA DI COMPRESIONE TRIASSIALE (UU)**  
(UNI CEN ISO/TS 17892-8)

MISURAZIONI ACQUISITE						
Provino 1		Provino 2		Provino 3		
Deformazione assiale (%)	Pressione interstiziale (kPa)	Deformazione assiale (%)	Pressione interstiziale (kPa)	Deformazione assiale (%)	Pressione interstiziale (kPa)	Tensione deviatorica (kPa)
0,00	0	0,00	0	0,00	0	0
0,01	33	0,01	40	0,05	177	73
0,05	105	0,08	119	0,17	280	177
0,14	165	0,16	183	0,30	340	280
0,25	221	0,26	244	0,45	408	340
0,35	274	0,36	301	0,61	477	408
0,48	327	0,47	358	0,77	541	477
0,61	379	0,58	414	0,95	603	541
0,71	427	0,68	465	1,12	660	603
0,83	477	0,80	517	1,31	717	660
0,98	526	0,91	567	1,48	780	717
1,08	571	1,03	613	1,69	793	780
1,19	615	1,15	657	1,89	811	793
1,32	657	1,29	696	2,15	826	811
1,46	695	1,43	737	2,36	836	826
1,58	731	1,50	752	2,60	834	836
1,73	760	1,61	767	2,86	830	836
1,90	783	2,01	773	3,08	825	830
2,06	804	2,27	770	3,35	818	825
2,23	820	2,55	752	3,59	807	818
2,40	831	2,88	722	3,81	790	807
2,58	840	3,25	674	4,06	763	790
2,76	848	3,69	618	4,26	733	763
2,98	847	4,48	484	4,42	722	733
3,02	867	4,84	455	4,66	725	722
3,21	872	5,19	415	4,90	670	725
3,39	873	5,54	383	5,19	625	670
3,59	874	5,82	369	5,49	591	625
3,79	873	6,07	362	5,74	591	591
4,00	872	6,29	357	6,03	566	566

**PROVA DI COMPRESIONE TRIASSIALE (UU)**  
(UNI CEN ISO/TS 17892-8)

MISURAZIONI ACQUISITE						
Provino 1		Provino 2		Provino 3		
Deformazione assiale (%)	Pressione interstiziale (kPa)	Deformazione assiale (%)	Pressione interstiziale (kPa)	Deformazione assiale (%)	Pressione interstiziale (kPa)	Tensione deviatorica (kPa)
4,23	857	6,43	359	6,08	555	555
4,51	852	6,70	357	6,48	544	544
4,78	831	6,94	352	6,71	533	533
5,06	815	7,18	349	6,91	522	522
5,32	805	7,42	348	7,14	514	514
5,54	803	7,66	345	7,34	510	510
5,76	801	7,91	341	7,56	509	509
6,01	799	8,16	338	7,78	511	511
6,23	797	8,40	336	7,99	509	509
6,46	795	8,66	334	8,18	515	515
6,68	793	8,88	331	8,37	514	514
6,93	791	9,14	327	8,59	516	516
7,17	789	9,39	322	8,80	514	514
7,41	787	9,62	319	8,96	514	514
7,67	785	9,87	315	9,15	512	512
7,90	783	10,11	311	9,31	512	512
8,14	781	10,34	308	9,49	511	511

**PROVA DI COMPRESIONE TRIASSIALE (UU)**  
(UNI CEN ISO/TS 17892-8)

Data di inizio prova:	05/09/13	Data di fine prova:	05/09/13	
<b>CARATTERISTICHE INIZIALI DEI PROVINI</b>				
Provino	1	2	3	
Altezza	cm	7,669	7,605	7,581
Diametro	cm	3,905	3,904	3,916
Volume	cm <sup>3</sup>	87,20	86,43	86,70
Peso di volume	kN/m <sup>3</sup>	20,81	20,08	20,03
Contenuto d'acqua	%	18,1	16,8	16,4
Peso di volume dei grani	kN/m <sup>3</sup>	27,06	27,06	27,06
Indice dei vuoti		0,535	0,574	0,572
Grado di saturazione	%	93	81	79
<b>FASE DI TAGLIO</b>				
Provino	1	2	3	
Velocità di deformazione	mm/min	0,7800	0,7800	0,7800
Pressione di cella totale	kPa	78	128	177
Pressione interstiziale iniziale	kPa	--	--	--
Sacki pressione	kPa	--	--	--
Contenuto finale d'acqua	%	16,6	16,9	16,8
<b>NOTE</b>				

Fig. 2a - Pagina di certificato di una prova TxUU riportante le proprietà iniziali e finali dei provini, oltre che le pressioni imposte.

Fig. 3a e 3b - tabelle delle misurazioni acquisite di una prova TxUU. Nello specifico la prova è stata condotta senza la misura delle pressioni neutre (U), ma si sarebbero potute restituire nel caso fossero state registrate.

dei provini (Figura 2a). Le pressioni di cella sono indispensabili anche per la successiva interpretazione, basata sulla costruzione dei cerchi di Mohr, che è anche in questo caso responsabilità del progettista. Il valore del contenuto finale d'acqua servirà a calcolare il grado di saturazione del materiale al termine della prova. Nel caso in cui sia stata eseguita la fase di saturazione, questa dovrà essere riportata nel certificato indicando i vari step delle pressioni cui i provini sono stati sottoposti, ed il relativo calcolo del parametro B di Skempton.

L'eventuale misura delle sovrappressioni interstiziali dovrà essere riportata nelle tabelle dei dati acquisiti, oltre ad essere diagrammata in relazione alla deformazione percentuale dei vari provini. Il grafico più importante è quello che mette in relazione la deformazione percentuale con la resistenza al taglio in condizioni non drenate (Figure 2b, 4 e 5): questo diagramma deve essere sempre presente, anche nelle prove ELL. Da tale grafico infatti è possibile ricavare i moduli elastici in condizioni non drenate. In un certificato relativo ad una ELL dovrà essere presente, oltre a quanto indicato all'inizio del presente paragrafo e relativamente al grafico “Deformazione-resistenza”, l'indicazione sulla velocità di prova: ricordiamo, infatti, che il sistema di prova non è isolato dall'esterno, e se la velocità di deformazione non è sufficientemente veloce, nel caso di materiali “permeabili” c'è il rischio di vedere vanificata tutta la prova. Per entrambe le prove è infine molto importante che siano riportati gli schemi dei provini a fine prova: potranno essere sia disegnati, sia riportati in fotografia (Figure 2b, 4 e 5).

**L'interpretazione dei risultati**

Nel caso delle prove non drenate ciò che viene preso in considerazione è il **massimo valore di resistenza**, in quanto il solo punto di interesse. Nel caso della ELL indicare tale valore ( $\sigma_p$ ) sul certificato non comporta nessuna interpretazione, ma ricavare la resistenza non drenata ( $c_u$ ) sulla base della [1] è una interpretazione. La costruzione dei cerchi di Mohr dai dati di una prova TxUU per l'ottenimento della resistenza non drenata è una interpretazione, e pertanto, come per la ELL, è responsabilità del progettista. Nel caso dei cerchi di Mohr, questi sono di solito forniti dal laboratorio, anche se non su carta non intestata

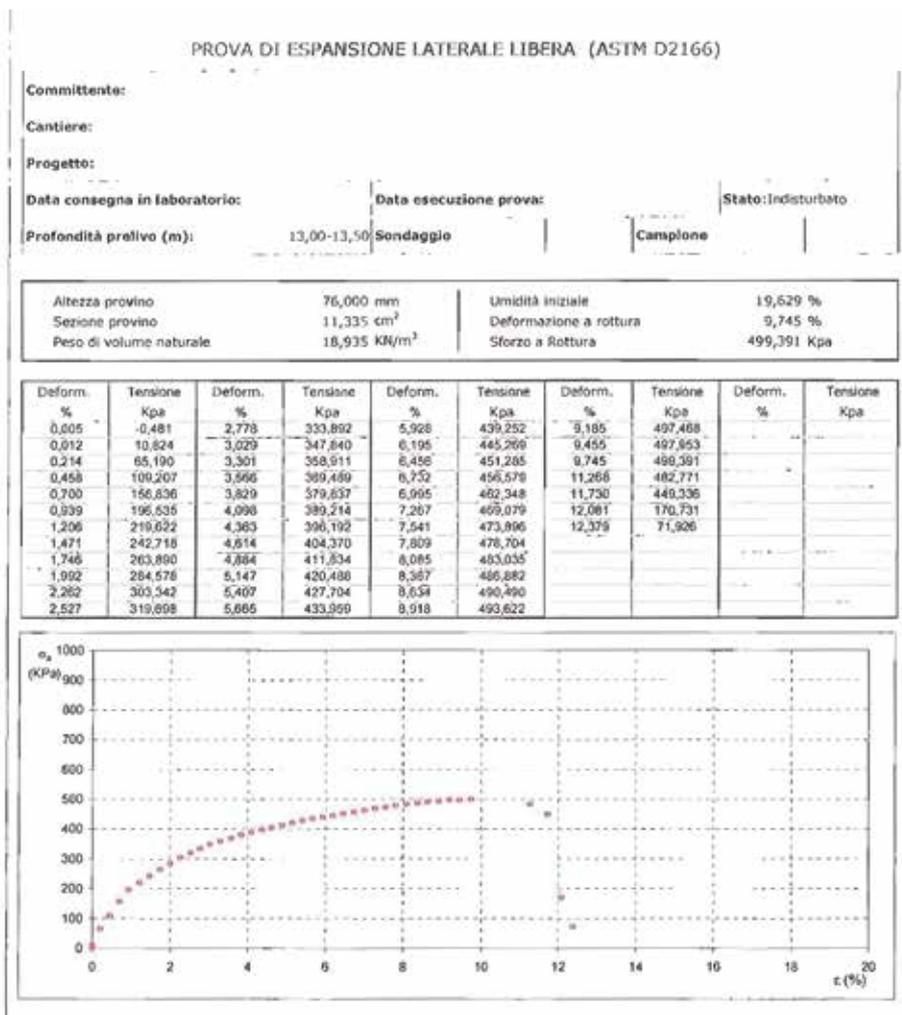


Fig 4 - Certificato di una prova ELL: il documento è stato sviluppato su un unico foglio. I dati relativi alle caratteristiche iniziali dell'unico provino non sono completi (raffrontare con quelli di Figura 5). I valori iniziali non sono stati corretti a zero (vedere Figura 6). Tutta la porzione superiore e buona parte della porzione destra del grafico sono desolatamente vuote. Il valore in kPa delle resistenze è sempre opportuno approssimarlo all'intero. Non sono presenti gli sketch dei provini a fine prova. Viene da chiedersi come sarebbe stata restituita la prova se fosse stato richiesto di eseguirla su tre provini.

(Figura 7). Nel caso di evidenti differenze dei valori di  $c_u$ , i valori di resistenza non drenata ottenuti dovrebbero essere trattati statisticamente, o essere riferiti a particolarità del campione (es. per livelli e disomogeneità del materiale vedere "Il certificato di laboratorio geotecnico: la descrizione del campione" in Professione Geologo n. 31 del maggio 2012).

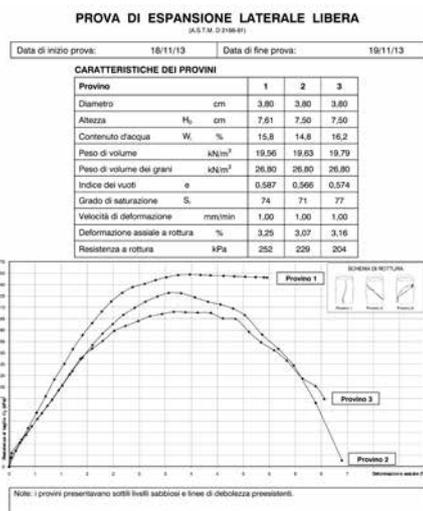


Fig 5 - Certificato di una prova ELL. Sono chiaramente riportati, oltre ai dati relativi alle caratteristiche iniziali dei tre provini, i valori di rottura. Le note a piè di pagina giustificano per parte i differenti valori di rottura: il progettista potrà (e dovrà) quindi tenerne conto.



Fig 6 - Tabella delle misurazioni acquisite di una prova ELL, relativa alla Figura 5. I valori iniziali sono stati corretti a zero.

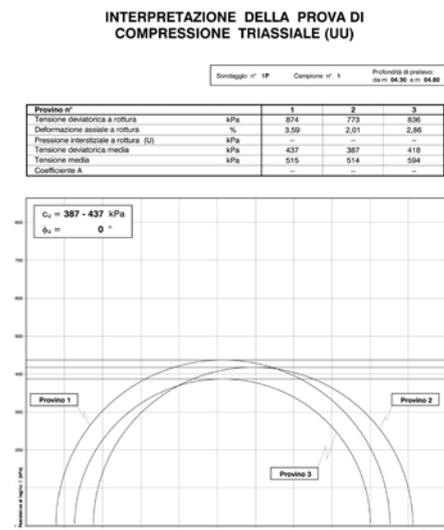


Fig 7 - Interpretazione della prova TxUU riportata nelle precedenti Figure 2e 3. Sono indicati tutti i parametri necessari alla costruzione dei cerchi (tabella in alto). La differenza tra il massimo ed il minimo valore di resistenza non drenata ( $c_u$ ) misurata è maggiore del 10% della massima  $c_u$  riportata. Ciò avverte il progettista di verificare bene quale valore utilizzare.