

R. Carbone

[D.M. 14 GENNAIO 2008, EUROCODICE 7: UNA METODOLOGIA PER LA SCELTA DEI PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI]

[quaderno di approfondimento alle Linee Guida NTC 08-Gruppo Interregionale Ordine dei Geologi]

COMMISSIONE INTERREGIONALE NTC08

COMPONENTI	ORDINE	COMPONENTI	ORDINE
AIRALDI Paolo	LIGURIA	GALATA' Giovanni	TRENTINO ALTO ADIGE
ANGELONE Domenico	MOLISE	GARBIN Fabio	LAZIO
ANIBALDI Andrea	MARCHE	GIOVINE Vincenzo	LOMBARDIA
BARSANTI Pietro	TOSCANA	LENARDUZZI Gianni	FRIULI VENEZIA GIULIA
BONIOLI Luisella	PIEMONTE	LOMBARDI Gerardo	CAMPANIA
BORGIA Umberto	CAMPANIA	PARMEGGIANI Fabio	EMILIA ROMAGNA
BRUNALDI Raffaele	EMILIA ROMAGNA	PATERNOSTER Stefano	TRENTINO ALTO ADIGE
CADAU Giambattista	SARDEGNA	PETRINI Fabrizio	ABRUZZO
CAGALLI Andrea	VENETO	PIGNATELLI MARIO	VALLE D'AOSTA
CARBONE Raffaele	BASILICATA	PIGNOCCHI Andrea	MARCHE
CARBONELLA Rocco	EMILIA ROMAGNA	PISTIS Salvatore	SARDEGNA
CHESSA Mauro	TOSCANA	PLESCIA Vito Francesco	MOLISE
CINUS DARIO	SARDEGNA	REINA Alessandro	PUGLIA
CIVELLI Carlo	LIGURIA	RISPOLI Francesca	EMILIA ROMAGNA
DEL GENIO Vincenzo	CAMPANIA	SAVI Francesco	UMBRIA
DORDI Amedeo	LOMBARDIA	STORONI RIDOLFI Sergio	MARCHE
FAGIOLI Maria-Teresa	TOSCANA	TODARO Pietro	SICILIA
FALVO Beniamino	CALABRIA	TRONCARELLI Roberto	LAZIO
FARINA Daniele	MARCHE	TROSSERO Massimo	PIEMONTE
FASSER Giovanni	LOMBARDIA	VENISTI Nicola	VENETO
FRAGALE Francesco	CALABRIA	VERRANDO Ampelio	LIGURIA
FRANCESCHINI Marco	EMILIA ROMAGNA	ZANNINIELO Basilio	VENETO

Responsabile Scientifico: Eros AIELLO

Coordinatore: Maria-Teresa FAGIOLI

Comitato di redazione: Carlo CIVELLI, Francesco FRAGALE,
Fabio GARBIN, Gerardo LOMBARDI,
Roberto TRONCARELLI

PREFAZIONE

Alla base del lungo e prezioso lavoro che ha portato all'attesa pubblicazione di questi primi quaderni vi è la consapevolezza della comunità tecnico-scientifica di dover esercitare un necessario compito di formazione ed aggiornamento, attribuendosi un importante ruolo etico, che si traduce in un altrettanto importante ruolo sociale.

La preparazione di chi opera nel settore delle costruzioni, forse ancor di più in questo particolare momento, assume una valenza strategica nei confronti di istanze di sicurezza e di qualità, che nel caso delle attività progettuali si declinano con il raggiungimento di obiettivi di sicurezza dell'opera e del suo contesto e, non ultimo, con il gradimento della comunità dei cittadini.

Allo stesso tempo chi commissiona studi e progetti deve essere consapevole del risultato atteso, che è funzione del variare del livello di indagini e di analisi.

Un buon progetto non è la risultante dell'applicazione tout-court di procedure nel processo di progettazione, ma è figlio di un ordinato sviluppo delle attività, capace di minimizzare gli oneri dovuti ad errori ed a sprechi, ed è frutto di una attività in cui la sfera intellettuale e la capacità manageriale sono complementari.

Le attività di progettazione, con le sue analisi, i suoi approfondimenti, i suoi studi specialistici, le sue indagini, si configurano, per loro natura, in modo ben diverso rispetto ad altri processi, essendo il prodotto di azioni difficilmente standardizzabili, riconducibili alla necessità di gestire problematiche, quindi competenze sempre diverse, ed in cui la competenza e la preparazione del gruppo di progettazione e dei singoli professionisti gioca un ruolo decisivo.

Chi ha compiuto lo sforzo di scrivere questi quaderni ha pensato di operare soprattutto nella direzione della qualità dei professionisti del settore e dei geologi in particolare, che oggi svolgono un ruolo strategico nelle attività di progettazione, rivolgendosi ad essi non solo nelle loro funzioni di progettisti, ma anche in quelle di controllori.

Ai primi perché la quantità di discipline e di soggetti che concorrono oggi alla determinazione di un progetto impone una istanza di cultura tecnica generale anche da parte dei singoli specialisti, che devono poi trovare all'interno del progetto la propria matrice di qualità.

Ai secondi perché è nella fase di controllo che deve estrinsecarsi l'analisi qualitativa dei contenuti progettuali, in quanto le istanze di sicurezza diventano appannaggio della committenza attraverso le procedure di validazione imposte dalla legge.

Non è più possibile infatti demandare al cantiere la modifica di progetti inadeguati o inesatti, che non soddisfino requisiti di compatibilità, produttività, prevenzione dei rischi, sostenibilità, soddisfazione del cliente e immagine.

A chi ha lavorato alla stesura di questo testo va il riconoscimento della comunità geologica, di quella più ampia di area tecnica, ma anche della società civile, perché i suoi contenuti consentono di indirizzare il processo di coordinamento delle idee e le conseguenti scelte progettuali verso requisiti di fattibilità, coerenza e conformità.

Riconoscimento che va esteso ad un sistema ordinistico delle professioni tecniche, e dei geologi in

particolare, che dimostra ancora una volta di saper anteporre gli interessi della collettività a quelli di categoria.

Ed infine un ringraziamento sentito agli Ordini Regionali, la cui dinamicità ed il cui impegno costante nelle innumerevoli questioni che coinvolgono la categoria sono alla base del progressivo riconoscimento del ruolo centrale attribuito ai geologi, che tuttavia ancora oggi molti tardano a riconoscerli.

Il Presidente del Consiglio Nazionale dei Geologi

Gian Vito Graziano

INTRODUZIONE

Le nuove Norme Tecniche sulle Costruzioni furono approvate in fretta e furia sull'onda emotiva del terremoto dell'Aquila, e scaraventate, così com'erano, con piglio decisionista, sul mondo edilizio e sulle professioni tecniche che da anni ne suggerivano gli affinamenti.

Nessun dubbio sulla necessità di allineare la normativa italiana agli Eurocodici, ma la frettolosa logica dell'emergenza portò a non approfondire adeguatamente più di un aspetto della progettazione edilizia; gli aspetti geologici non rimasero immuni da ciò.

La Commissione Interregionale degli Ordini dei Geologi, che già da tempo stava lavorando per proporre i necessari affinamenti e chiarimenti alla norma in gestazione, non si arrese e fatto tesoro di quanto già elaborato ha trasformato quel che avrebbe dovuto essere un supporto tecnico al legislatore in un vademecum per i colleghi alle prese con le carenze della norma promulgata.

In pieno spirito di sussidiarietà e grazie al volontariato di tanti colleghi vuoi professionisti che del mondo accademico, la Commissione Interregionale ha preparato "Le linee guida per le NTC" che furono presentate nel 2° Forum degli Ordini Regionali e del Consiglio Nazionale dei Geologi "NTC-2008 Linee Guida" (Firenze, 21 gennaio 2011). Insieme alle Linee Guida sono state presentate le prime bozze dei quaderni; elaborati tecnici prodotti per supportare i colleghi nell'applicazione di quei punti oscuri o insufficientemente dettagliati della norma.

A distanza di 18 mesi dal Forum questo CdRom presenta la versione definitiva di un primo gruppo di quaderni.

Il CdRom contiene:

1. Glossario;
2. Quaderno "Una metodologia per la scelta dei parametri geotecnici caratteristici";
3. Quaderno "Fondazioni superficiali";
- 3a. Esempi relativi alle fondazioni superficiali: collana "gli spilli";
4. Quaderno "Muri di sostegno e strutture miste";
5. Quaderno "Edifici esistenti";
6. Quaderno "Costruzioni modeste, costruzioni semplici, opere minori, elementi non strutturali, opere provvisoriale, opere interne";
7. Quaderno "Modellazione sismica e stabilità alla liquefazione".

Il Cd Rom contiene inoltre le normative regionali in materia di opere minori o modesta rilevanza (NTC 08 cap. 6.2.2) pervenute a tutto il 24 aprile 2012.

I quaderni con il loro contenuto di riferimenti tecnici, bibliografia ed esempi, lungi da ogni pretesa di esaustività, vogliono comunque segnalare l'avvio di un percorso virtuoso nel quale i colleghi, pongono a disposizione della categoria l'esperienza e la preparazione specifica maturata in decenni di attività professionale e di ricerca, per consentire a ciascuno di noi di affrontare ogni nuovo impegno professionale e

tecnico forti dell'esperienza di tutti.

La selezione degli argomenti trattati dai quaderni ha cercato di rispecchiare la maggioranza delle problematiche che ogni collega che opera nel comparto delle costruzioni si trova ad affrontare.

La Commissione ha ritenuto, inoltre, opportuno elaborare anche un Glossario per prevenire fraintendimenti e conseguenti incomprensioni derivanti da differenti interpretazioni delle tecnologie.

Alla produzione di questo CdRom hanno partecipato sotto la guida tecnico-scientifica del Prof. Eros Aiello colleghi di varie Regioni. A loro un ringraziamento caloroso per aver reso possibile l'iniziativa che assume un carattere di particolare rilevanza in un momento in cui subdoli ed interessati attacchi al geologo, diretti a relegarlo nel settore dell'edilizia in ruoli subalterni, segnalano la rapace miopia di certi poteri forti.

Se da un lato i terremoti e le catastrofi naturali segnalano l'indispensabilità dei nostri saperi di veri ed unici specialisti del sottosuolo, elaborati tecnici come quelli contenuti nel CdRom dimostrano la capacità della nostra categoria di fornire contributi stringenti e fattivi alla risoluzione di problematiche complesse.

Il Coordinatore della Commissione Interregionale

Maria-Teresa Fagioli

SOMMARIO

PREMESSA	pag. 1
1. IL D.M. 14.01.2008 e La Circolare 617/2009 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.....	pag. 1
1.1. METODO STATISTICO E L'EUROCODICE 7 (norma europea prEN1997-1).....	pag. 4
1.2. IL VALORE "MEDIO"	pag. 5
1.3. INDICAZIONI DELL'EUROCODICE 7".....	pag. 5
2. LA METODOLOGIA UTILIZZATA.....	pag. 6
3. IL CASO DI STUDIO.....	pag. 8
3.1. L'INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA.....	pag. 9
3.2. L'INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO DEL SITO DI INTERESSE.....	pag. 10
3.3. L'ANALISI GEOTECNICA E LA SCELTA DEI PARAMETRI CARATTERISTICI.....	pag. 10
4. LIMITI DI APPLICABILITÀ DELLA METODOLOGIA.....	pag. 20
BIBLIOGRAFIA.....	pag. 22

PREMESSA

La determinazione dei valori caratteristici dei parametri geotecnici è fondamentale per la verifica di un qualsiasi stato limite e nell'Eurocodice 7 viene suggerita la logica che deve sovrintendere alla loro scelta, in modo da rappresentare adeguatamente e con ragionevole cautela il comportamento del terreno. In tutti i casi la conoscenza della geologia del sito e l'esperienza su altre opere realizzate nel sito in studio può fornire utili indicazioni per la scelta dei valori dei parametri: le prove di laboratorio possono essere usate, quindi, come riscontro o controllo delle assunzioni. La costruzione dell'opera, inoltre, può influenzare le proprietà del terreno, in maniera positiva o negativa: anche se in molti casi tale influenza avverrà dopo che tutte le indagini e prove sono state completate, i valori caratteristici devono, comunque, tenere conto anche degli effetti causati dalla costruzione delle opere.

1. IL D.M. 14.01.2008 E LA CIRCOLARE 617/2009 DEL CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI

Nel Paragrafo 6.2.2 del D.M. 14.01.2008 si ritrova la seguente definizione: *“Per valore caratteristico di un parametro geotecnico deve intendersi una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato”*. La definizione del D.M. riprende di fatto quella dell'Eurocodice 7, ma non offre metodi operativi per la loro determinazione. La Circolare 617/2009, nel paragrafo C6.2.2 riprende la definizione del valore caratteristico data dal D.M., facendo esplicito riferimento agli Eurocodici: *“... nella progettazione geotecnica, in coerenza con gli Eurocodici, la scelta dei valori caratteristici dei parametri deriva da una stima cautelativa, effettuata dal progettista, del valore del parametro appropriato per lo stato limite considerato”*. Ciò indica chiaramente che la valutazione dei parametri caratteristici va eseguita alla luce delle indicazioni dell'Eurocodice 7 e si specifica che la stima cautelativa va condotta sul parametro più appropriato per lo stato limite preso in considerazione (Di Bernardo, 2009). Infatti, viene premesso: *“... La scelta dei valori caratteristici dei parametri geotecnici avviene in due fasi. La prima fase comporta l'identificazione dei parametri geotecnici appropriati ai fini progettuali...”*. Questo significa che prima di procedere al calcolo dei valori caratteristici dei parametri geotecnici (seconda fase), è necessario decidere quali, fra i vari parametri selezionabili, è quello più adeguato a descrivere il comportamento del terreno nella specifica verifica per lo stato limite considerato (Di Bernardo, 2009). Nel paragrafo C6.2.2 della Circolare, inoltre, viene chiarito, in maniera inequivocabile, cosa si intende nella pratica per valore caratteristico di un parametro geotecnico: *“Nelle valutazioni che il progettista deve svolgere per pervenire ad una scelta corretta dei valori caratteristici, appare giustificato il riferimento a valori prossimi ai valori medi quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno, con possibile compensazione delle eterogeneità o quando la struttura a contatto con il terreno è dotata di rigidezza sufficiente a trasferire le azioni dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti. Al contrario, valori caratteristici prossimi ai valori minimi dei parametri geotecnici appaiono più giustificati nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno, con concentrazione delle deformazioni fino alla formazione di superfici di rottura nelle porzioni di terreno meno resistenti del volume significativo, o nel caso in cui la struttura a contatto con il terreno non sia in grado di trasferire forze dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti a causa della sua insufficiente rigidezza. La scelta di valori caratteristici prossimi ai valori minimi dei parametri geotecnici può essere dettata anche solo dalle caratteristiche dei terreni;... Una migliore approssimazione nella valutazione dei valori caratteristici può essere ottenuta operando le opportune medie dei valori dei parametri geotecnici nell'ambito di piccoli volumi di terreno, quando questi assumano importanza per lo stato limite considerato.”*

Le opere che coinvolgono grandi volumi di terreno sono quelle che inducono variazioni tensionali all'interno di una porzione sufficientemente elevata di sottosuolo da dare origine a una compensazione delle resistenze. Si parla in questo caso di **RESISTENZE COMPENSATE**: le zone di terreno a resistenza minima e massima vengono sollecitate contemporaneamente e quello che emerge è un comportamento meccanico intermedio fra i due estremi. Per questo motivo i valori caratteristici dei parametri geotecnici dovranno corrispondere ad una stima cautelativa del valore medio misurato ((Di Bernardo, 2009). Rientrano in questa categoria (Aiello, 2010):

- terreno di sedime di fondazioni superficiali di grande estensione (platee) o di dimensione ridotta (plinti e travi) ma collegate rigidamente fra loro, in modo da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti;
- pali per la portata laterale;
- pendii naturali e fronti di scavo di elevata estensione;
- opere di contenimento di notevole altezza.

Nel caso di opere che coinvolgono modesti volumi di terreno a essere sollecitate sono piccole porzioni di terreno in cui prevalgono le resistenze locali. Si parla, quindi, di **RESISTENZE NON COMPENSATE** e il valore caratteristico andrà selezionato prendendo come riferimento un valore prossimo al minimo misurato. Rientrano in questa categoria (Aiello, 2010):

- terreno di base di un palo;
- verifica a scorrimento di un muro;
- plinti e travi non collegati;
- fronti di scavo di modesta ampiezza e muri di altezza contenuta;
- strutture con insufficiente rigidità.

In pratica, le Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici suggeriscono che la determinazione del valore caratteristico è basata sul giudizio del geotecnico, così come quella operativa o di progetto. Nelle valutazioni che il geotecnico deve svolgere per pervenire ad una scelta corretta dei valori caratteristici, appare giustificato, secondo il CSLP, il riferimento a **valori prossimi ai valori medi** quando, come già detto, nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno, mentre si può fare riferimento ai **valori minimi** nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno.

In conclusione, pertanto, tenendo ferme le definizioni riportate, per modesti lavori va bene quanto suggerito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Per lavori rilevanti e di grande impatto sul terreno, è opportuno utilizzare il metodo suggerito dall'Eurocodice 7 e di cui si dirà diffusamente in seguito (Aiello, 2010).

1.1. IL METODO STATISTICO E L'EUROCODICE 7 (norma europea prEN1997-1)

L'EC7, al punto 2.4.5.2 2(P), recita: *"Il valore caratteristico di un parametro geotecnico sarà scelto come una stima cautelativa del valore che influenza l'insorgere dello stato limite"*. Definire il valore caratteristico significa pertanto scegliere il parametro geotecnico che influenza il comportamento del terreno in quel determinato stato limite, ed adottarne un valore, o stima, a favore della sicurezza. A tal riguardo, l'unica metodologia delineata dall'EC7 per la definizione dei valori caratteristici è di natura statistica (Nori, 2009). Questa non è resa obbligatoria, tuttavia, non vengono esplicitamente espressi altri metodi di natura oggettiva, se non, al punto 2.4.5.2 12(P), l'eventuale utilizzo di tavole standardizzate (a discrezione degli stati membro).

Anche se *"il metodo statistico per la determinazione dei valori caratteristici non è accettato all'unanimità, soprattutto in ambito accademico poiché si teme un ridimensionamento del giudizio tecnico, dell'esperienza professionale e un utilizzo meccanico della statistica (Nori, 2009)"*, l'applicazione del metodo statistico nell'Eurocodice 7 è molto ben delineata nel punto 2.4.5.2 11 e nella relativa nota.

1.2. IL VALORE "MEDIO"

In generale, in tutta la Letteratura specializzata, così come nella Circolare 617/2009 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, quando si parla di valore caratteristico, si parte sempre dal concetto di *valore medio*. A questo riguardo si possono definire tre tipi di valore medio: *valore medio statistico*, *spaziale* e *probabilistico* (Tanzini, 2006).

Il **valore medio statistico** è semplicemente la media dei valori disponibili, ad esempio i risultati di prove geotecniche in sito o di laboratorio, tenendo eventualmente conto delle condizioni presenti nel sito.

Il **valore medio spaziale** è la media dei valori di un determinato parametro (ad esempio l'angolo di resistenza al taglio) relativamente ad un determinato volume di terreno, come il volume di terreno interessato dall'applicazione di un carico o da una potenziale superficie di scivolamento.

Il **valore medio probabilistico** è un valore, scelto in un campo di incertezza, tale che per lo stato limite da analizzare si ha una probabilità stabilita (ad esempio il 50%) che il valore più adeguato alla situazione che si sta analizzando sia inferiore a tale valore probabilistico medio.

Uno dei vantaggi di impiegare una media probabilistica è che essa è uguale al valore della media statistica se si ha a disposizione un campione di risultati significativi, anche numericamente, e che i valori siano stati corretti per tener conto della differenza di comportamento del terreno nelle prove e in sito.

1.3. LE INDICAZIONI DELL'EUROCODICE 7

Nell'Eurocodice 7 la scelta del valore caratteristico deve partire da una stima della media spaziale. Lo stesso Eurocodice 7 chiarisce che, partendo dal fatto che molti stati limite dipendono dalla variabilità e dal valore medio del terreno nel volume di interesse, si potrà *scegliere* di avere una probabilità del 5% che un valore peggiore governi il comportamento del materiale in sito o, in un'ottica molto meno pessimistica, scegliere una semplice stima cautelativa del valore medio spaziale. In generale quando il campo di variabilità dei dati ottenuti dalle prove è ristretto, quando cioè non si ha una sistematica variazione dei risultati a seconda della posizione dei campioni analizzati nell'area del progetto e con la profondità, e quindi le variazioni possono essere trattate come casuali, potrà essere accettabile adottare un valore cautelativo medio spaziale. Dove, invece, il campo di variazione dei valori ottenuti dalle prove di laboratorio è ampio, è necessario adottare un valore caratteristico più pessimistico: con riferimento ad una distribuzione statistica tale probabilità può essere associata al frattile 5%. Tale scelta, come già detto, è considerata la più attendibile nel punto 2.4.5.2 11 e la relativa nota dell'Eurocodice 7. Pertanto è a questo frattile che si farà riferimento nelle elaborazioni successivamente presentate.

2. LA METODOLOGIA UTILIZZATA

Per strati di terreno dove il parametro geotecnico considerato non mostra una significativa e sistematica variabilità in direzione orizzontale o con la profondità, senza la presenza di significative zone di terreno con proprietà più scadenti, il valore caratteristico X_c può essere determinato, sulla base di una serie di valori ottenuti da prove geotecniche di laboratorio, con la seguente espressione (Frank et al., 2004):

$$X_c = X_{mean} \cdot (1 - K_{mean} \cdot s)$$

in cui:

X_c = valore caratteristico del parametro geotecnico considerato

X_{mean} = valore medio aritmetico relativo ad una serie n di risultati ottenuti da prove di laboratorio eseguite sui campioni ritenuti dal professionista come afferenti al volume di terreno interessato;

K = variabile dipendente dalla *legge di distribuzione di Student* e della probabilità di non superamento adottata;

$s = d_v/X_{mean}$ = deviazione standard della distribuzione/valore medio della distribuzione.

In questo caso, quindi, il valore caratteristico scelto rappresenta una stima cautelativa del valore medio X_{mean} della popolazione statistica. I valori di K_{mean} da utilizzare nell'equazione, come specificato nella definizione, sono quelli ricavabili dalla *distribuzione di Student*, dove $K_{n,mean} = t_{n-1}^{0,95} \sqrt{1/n}$ (con n = numero dei dati disponibili dalle prove di laboratorio eseguite per il livello geotecnico considerato). Il coefficiente $K_{n,mean}$ è calcolato tenendo conto che il fattore "t" relativo alla distribuzione di Student è riferito ad una probabilità del 95% (Frank et al., 2004). Analogamente, per i valori caratteristici dei principali parametri geotecnici da adottare quando il volume del terreno interessato dallo stato limite è piccolo, con riferimento alla lunghezza di fluttuazione della proprietà del terreno, o quando si può assumere che il comportamento del terreno è governato da valori locali bassi, si applica la stessa relazione, ma il coefficiente K , definito in questo caso $K_{n,low}$, è calcolato con la seguente espressione: $K_{n,low} = t_{n-1}^{0,95} \sqrt{(1/n) + 1}$ (con n sempre uguale al numero dei dati disponibili dalle prove di laboratorio eseguite per il livello geotecnico considerato). Da ciò si ricava che, anche in questo caso, è valida la relazione

$$X_c = X_{mean} \cdot (1 - K_{low} \cdot s)$$

dove i valori del coefficiente $K_{n,low}$ sono calcolati, per la definizione del valore caratteristico, come frattile inferiore al 5% (Frank et al., 2004).

Pertanto, mantenendo ferma la relazione di Frank et Al (2004), la differenza fra i due casi si sostanzia nella scelta del valore di K . A questo proposito, al posto delle classiche tabellazioni ricavabili dalla Letteratura specializzata in materia di statistica per i valori di $t_{n-1}^{0,95}$, si sono elaborate funzioni matematiche per il calcolo diretto del fattore K per i due casi K_{mean} e K_{low} :

$$K_{mean} = 6,891 \cdot e^{(-0,6661 \cdot x)} + 0,8315 \cdot e^{(-0,03509 \cdot x)}$$

(I valori ricavabili dall'equazione si approssimano a quelli ottenibili da una applicazione *esatta* della distribuzione di Student con un R^2 pari a 0,9971).

$$K_{low} = 8,703 \cdot e^{(-0,6081 \cdot x)} + 1,997 \cdot e^{(-0,005196 \cdot x)}$$

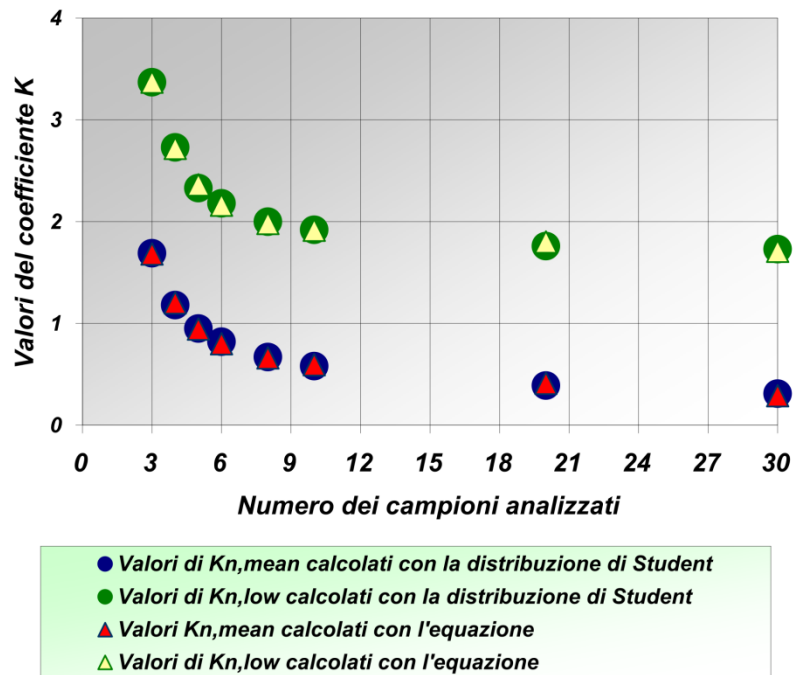
(I valori ricavabili dall'equazione si approssimano a quelli ottenibili da una applicazione *esatta* della distribuzione di Student con un R^2 pari a 0,9988)

In cui x = numero dei dati disponibili per il parametro geotecnico considerato.

A tal proposito, si riporta in forma grafica lo scostamento dei valori di K_{mean} e K_{low} , ricavabili dalle equazioni elaborate, da quelli ottenibili dalla *distribuzione di Student* normalmente riportata in Letteratura.

Fig. 1 - Rappresentazione grafica dei valori di $K_{n,mean}$ e $K_{n,low}$ ricavabili dalla *distribuzione di Student* e dalle equazioni proposte

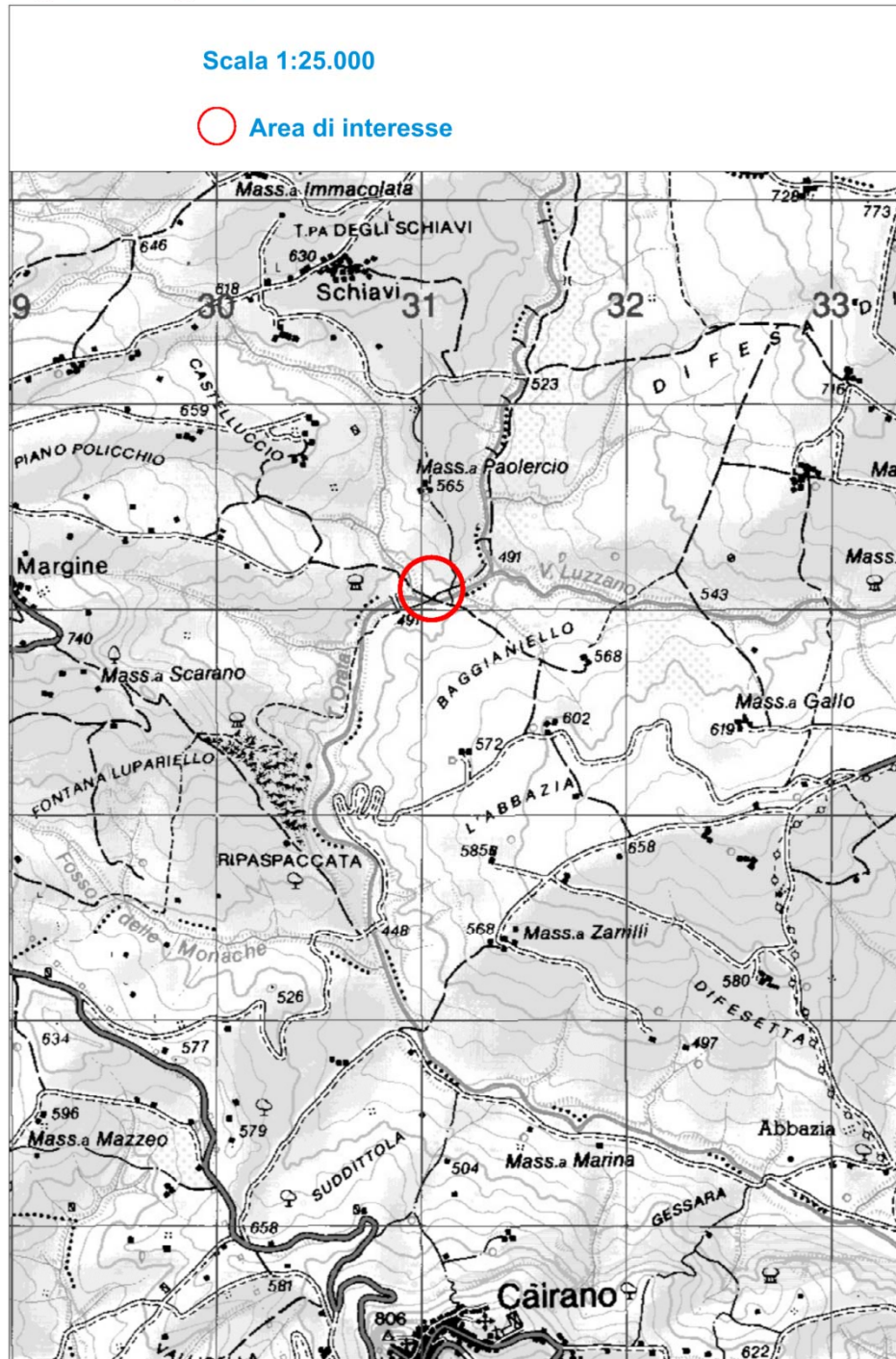
Numero campioni analizzati	Valori dei coefficienti K calcolati con la <i>distribuzione di Student</i>		Valori del coefficiente $K_{n,mean}$ calcolati con l'equazione	Valori del coefficiente $K_{n,low}$ calcolati con l'equazione
	$K_{n,mean}$	$K_{n,low}$		
3	1,69	3,37	1,68	3,37
4	1,18	2,73	1,20	2,72
5	0,95	2,33	0,94	2,36
6	0,82	2,18	0,80	2,16
8	0,67	2,00	0,66	1,98
10	0,58	1,92	0,59	1,92
20	0,39	1,76	0,41	1,80
30	0,31	1,73	0,29	1,71



3. IL CASO DI STUDIO

Vediamo ora un esempio pratico di applicazione delle metodologie di individuazione dei parametri geotecnici caratteristici. Ci si riferisce ad una campagna geognostica, effettuata dalla *Geotest S.a.s.* per la realizzazione di un viadotto sul *Torrente Orata – Calitri (AV)*, nel corso della quale sono stati effettuati 4 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo, spinti alla profondità di 30 metri, e prelevati 24 campioni indisturbati di terreno, successivamente analizzati nel laboratorio geotecnico della stessa *Geotest S.a.s.*

Fig. 2 - Corografia



3.1. L'INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA

Nell'area è stato eseguito un rilevamento geologico-geomorfologico su base topografica in scala 1:2.500.

Il rilevamento ha evidenziato l'affioramento dei seguenti tipi litologici:

- a) Alluvioni costituite da materiale detritico in matrice limo-argillosa di colore marrone chiaro;
 - b) Argille e argille marnose di colore grigio.
- a) Si tratta, sotto il profilo granulometrico, di materiale detritico costituito da abbondanti ciottoli a spigoli vivi, immersi in una matrice essenzialmente limosa di colore marrone chiaro. Il deposito non di rado contiene livelli decimetrici di pezzate lapideo calcareo e calcareo-marnoso e/o di calcare fratturato bianco con noduli di selce rosso-azzurra. Ovviamente, soprattutto negli spessori più superficiali il materiale alluvionale-detritico è misto a terreno vegetale. Questi termini litologici risultano poco addensati, con spessore limitato, variabile da un minimo di 2.80 metri (S1 – S4) ad un massimo di 4.20 metri (S3). Nella parte terminale, al passaggio con le sottostanti *Argille grigie*, il deposito passa gradualmente ad un *limo argilloso con radi ciottoli e venature rossastre*. Questi termini litologici sono riscontrabili solamente in corrispondenza della stretta fascia prospiciente l'alveo del Torrente Orata.
- b) Si tratta di alternanze di argille prevalentemente grigie e scagliettate, con rari livelli di marne calcaree e calcari in strati decimetrici. Dalla *lettura* dei log stratigrafici ricavati dalla perforazione dei sondaggi geognostici, nonché dai risultati delle prove geotecniche in sito e in laboratorio, si evince chiaramente che lo stato di addensamento e le condizioni geostrutturali di questi termini litologici migliorano decisamente con la profondità. In particolare, intorno a - 20 metri, le *argille* passano a marne argillose compatte e omogenee. All'interno del primo spessore, invece, è possibile individuare chiaramente una differenziazione sia in termini granulometrico-tessiturali, sia in termini di risposta geomeccanica: da ~ - 3.00 m a ~ - 7.00 m, le argille risultano laminate, plastiche e compressibili, disturbate tettonicamente e a frattura concoide; da ~ - 7.00 m a ~ - 20.00 m, invece, le caratteristiche fisico-meccaniche migliorano e sono decisamente meno evidenti gli effetti di quella accentuata tettonizzazione che solitamente caratterizza questi termini geologici.



3.2. GEOMORFOLOGICO DEL SITO DI INTERESSE

L'INQUADRAMENTO

Il sito del costruendo viadotto è ubicato sull'alveo del Torrente Orata che scorre con asse ~ E-W. Poco distante, a ~ 150 m, è presente la confluenza con un'altra linea di incisione che versa le sue acque, appunto, nello stesso Torrente Orata. Sono questi i due elementi morfologici di rilievo che condizionano, oltre alla natura dei terreni affioranti, la morfologia dei luoghi oggetto dello studio. Il paesaggio, infatti, è tipico di aree il cui modellamento è dovuto a processi morfogenetici quali frane ed erosione lineare, con linee di drenaggio a densità elevata e a sviluppo dendritico. Ciò è dovuto alla spiccata predisposizione alla franosità dei terreni argillosi ad alta plasticità delle successioni affioranti nell'area, assumendo particolare rilevanza nel caso di contatto delle argille con acqua. Il versante a N-W del sito dove verrà realizzato il viadotto è solcato da una fitta rete di rigagnoli e solchi a cui sono associati fenomeni di instabilità. Questi fenomeni sono imputabili all'intensa erosione lineare operata dai solchi torrentizi, alle acque di scorrimento selvaggio, per niente regimate, e, come già detto, alla natura dei terreni affioranti. Il versante citato, così come riportato nell'allegata Carta geologica-geomorfologica, è interessato, infatti, da colamenti con superfici di movimento non sempre ben definite; tali fenomeni sono diffusi e si rilevano in superficie per la morfologia irregolare del pendio, cioè caratterizzata da numerose ondulosità del terreno. E' possibile così individuare un'area più vasta, definibile *frana quiescente*, caratterizzata da gradini morfologici, avvallamenti, zone di accumulo recente, all'interno della quale risulta evidente una zona più ristretta in cui l'instabilità è palesemente in piena attività, attività resasi eclatante in concomitanza degli eventi meteorici dell'ultima stagione invernale. In buona sostanza il pendio lungo il quale si dovrebbe sviluppare il tracciato stradale dopo il viadotto, in direzione Andretta, così come previsto dal *percorso di progetto*, presenta una sorta di disequilibrio gravitativo latente, a luoghi attivo, comunque suscettibile di riattivazione.

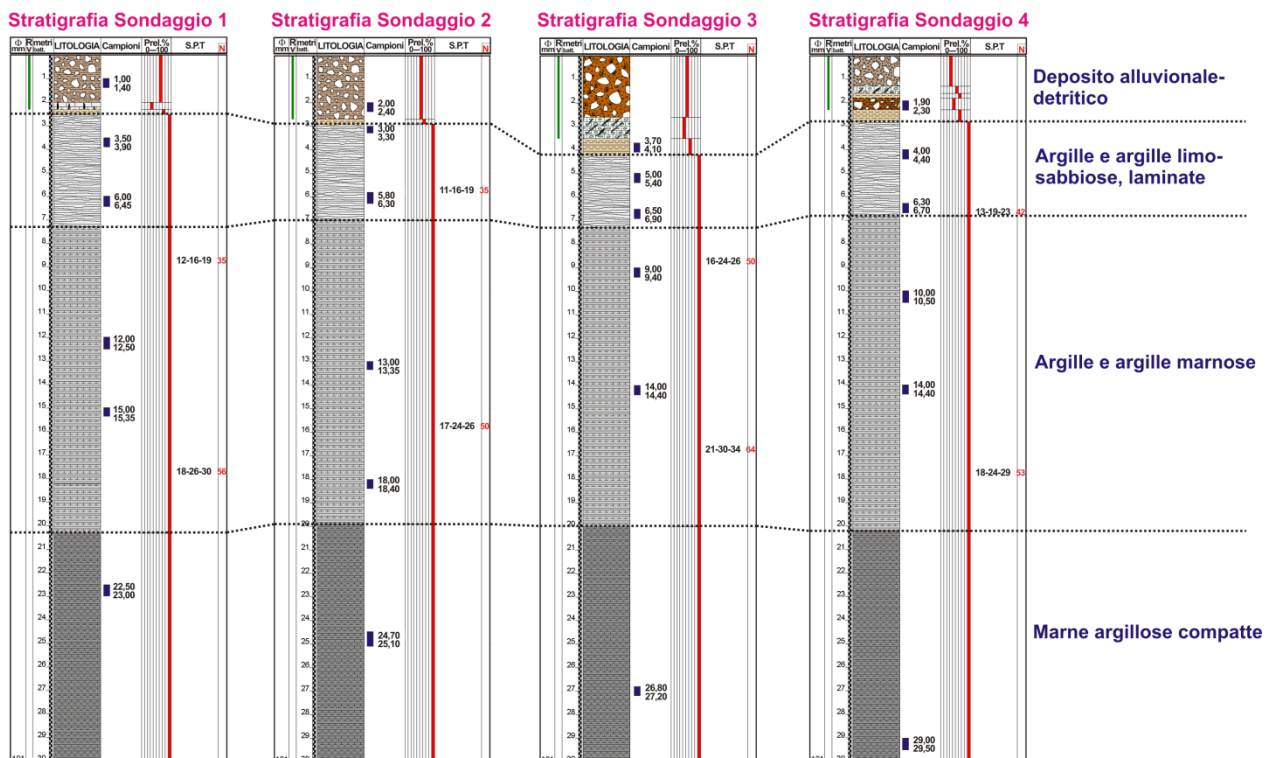
L'area ristretta, che sarà interessata dalla realizzazione del viadotto, invece, non è interessata da fenomeni gravitativi dalle evidenze superficiali. Come meglio verrà specificato in seguito, le terebrazioni effettuate rilevano una coltre superficiale alterata, consistente in *Depositi alluvionali-detritici*, profonda mediamente circa 3.00 metri, e un successivo spessore, di circa 4.00 metri, rappresentante la porzione più superficiale e alterata delle sottostanti *Argille e argille marnose*. I terreni alluvionali e detritici mostrano, comunque, evidenti segni di fenomeni superficiali, consistenti in soliflusso, accentuati dal ruscellamento selvaggio e dall'imbibizione delle acque di precipitazione meteorica.

3.3. L'ANALISI GEOTECNICA E LA SCELTA DEI PARAMETRI CARATTERISTICI

La *lettura* delle stratigrafie dei sondaggi e i risultati delle analisi geotecniche hanno permesso l'individuazione di 4 *orizzonti geotecnici*, corrispondenti ad altrettante condizioni strutturali e geomeccaniche dei terreni attraversati dalle terebrazioni. Su tutti i campioni, oltre alla definizione delle caratteristiche fisiche, delle proprietà indice e delle caratteristiche granulometriche, sono state effettuate prove edometriche, prove triassiali del tipo CID e prove di compressione ad Espansione Laterale Libera (E.L.L.). Le prove triassiali hanno permesso l'acquisizione dei parametri geomeccanici a lungo termine (*Condizioni drenate*). Le prove di compressione E.L.L. hanno permesso l'acquisizione della *Coesione non drenata*. Sui soli campioni afferenti all'*orizzonte geotecnico* più superficiale, che, come già detto, da evidenze di superficie e dall'analisi del carotaggio continuo mostrava evidenti segni di alterazione e scompaginamento, è stata effettuata anche la prova di *Taglio Torsionale su provino anulare* per l'acquisizione della resistenza residua. Quest'ultima metodologia di prova, rispetto ai classici cicli di reverse nella scatola di Casagrande, come è noto, meglio rappresenta le condizioni *ultime* di resistenza meccanica.

I sondaggi sono stati eseguiti lungo una direzione perpendicolare al letto del Torrente Orata, esattamente lungo il tracciato del viadotto, ad una distanza reciproca di ~ 40 metri, ed hanno interessato, in senso trasversale, tutta la fascia di affioramento dei depositi detritico-alluvionali (~ 120 metri). In Figura 4 sono riportate le stratigrafie semplificate delle terebrazioni con l'individuazione degli *orizzonti geotecnici*.

Fig. 4 - Stratigrafie Sondaggi geognostici



Gli orizzonti geotecnici individuati sono:

- **Orizzonte geotecnico 1 – Deposito alluvionale–detrítico – prof. 0,00-3,00 m**
- **Orizzonte geotecnico 2 – Argille e argille limo-sabbiose, laminate – prof. 3,00-7,00 m;**
- **Orizzonte geotecnico 3 – Argille e argille marnose – prof. 7,00-20,00 m;**
- **Orizzonte geotecnico 4 – Marne argillose compatte – prof. 20,00-30,00 m.**

Si riportano di seguito i risultati delle analisi geotecniche effettuate e delle elaborazioni semiprobabilistiche conseguenti, distinte per orizzonte geotecnico, con l'avvertenza che, per quanto riguarda l'angolo di resistenza al taglio, le *espressioni* sono state applicate ai valori della tg di ϕ :

Tabella 1a - Orizzonte geotecnico 1 – Risultati delle analisi fisico-meccaniche

PARAMETRI FISICI													Analisi Granulometrica			
N° d'ordine	Rif. interno	Sond.	Camp.	Profondità		γ_n (kN/m ³)	Wn (%)	γ_s	LL (%)	LP (%)	I.P. (%)	I.C.	G	S	L	A
1	149-09	1	1	1,00	1,40	18,1	38,4	2,68	64,5	35,4	29,1	0,90	12,0	24,5	36,3	27,2
2	150-09	2	1	2,00	2,40	18,5	30,3	2,69	60,4	29,7	30,7	0,98	15,3	20,2	30,5	34,0
3	151-09	3	1	3,70	4,10	18,8	36,7	2,72	74,3	34,8	39,5	0,95	3,5	18,3	36,8	41,4
4	152-09	4	1	1,90	2,30	18,0	32,3	2,67	57,3	29,1	28,2	0,89	18,3	26,4	44,4	10,9
VALORE MASSIMO						18,80	38,40	2,72	74,30	35,40	39,50	0,98	18,30	26,40	44,40	41,40
VALORE MINIMO						18,00	30,30	2,67	57,30	29,10	28,20	0,89	3,50	18,30	30,50	10,90
MEDIA						18,35	34,43	2,69	64,13	32,25	31,88	0,93	12,28	22,35	37,00	28,38
MEDIANA						18,30	34,50	2,69	62,45	32,25	29,90	0,92	13,65	22,35	36,55	30,60
DEVIAZIONE STANDARD						0,37	3,76	0,02	7,40	3,31	5,19	0,04	6,39	3,74	5,70	13,01
COEFFICIENTE DI VARIAZIONE %						2,0	10,9	0,8	11,5	10,3	16,3	4,8	52,1	16,8	15,4	45,9

PARAMETRI GEOMECCANICI											
N° d'ordine	Rif. interno	Sond.	Camp.	Profondità		C' (kPa)	ϕ' (°)	tg ϕ'	ϕ_r (°)	tg ϕ_r	Cu (kPa)
1	149-09	1	1	1,00	1,40	10,7	17,3	0,31	14,0	0,25	45
2	150-09	2	1	2,00	2,40	16,7	22,5	0,41	19,4	0,35	56
3	151-09	3	1	3,70	4,10	22,2	21,4	0,39	18,3	0,33	78
4	152-09	4	1	1,90	2,30	20,3	18,4	0,33	14,9	0,27	42
VALORE MASSIMO						22,20	22,50	0,41	19,40	0,35	78,0
VALORE MINIMO						10,70	17,30	0,31	14,00	0,25	42,0
MEDIA						17,48	19,90	0,36	16,65	0,30	55,3
MEDIANA						18,50	19,90	0,36	16,60	0,30	50,5
DEVIAZIONE STANDARD						5,06	2,45	0,05	2,61	0,05	16,3
COEFFICIENTE DI VARIAZIONE %						29,0	12,3	13,4	15,7	16,6	29,5

I valori percentuali del coefficiente di variazione (COV) risultano, per i più significativi parametri geotecnici, superiori al 10%. Il COV esprime una misura della affidabilità della tendenza centrale di una serie di dati o, in maniera equivalente, della dispersione della componente fluttuante rispetto al valore medio del trend. Minore è il valore del COV, minore la dispersione dei dati. Dalla Letteratura (Vannucchi, Uzielli, 2004) risulta che valori del COV inferiori al 10% possano essere considerati "bassi"; valori compresi tra 10 e 30% "medi"; valori superiori al 30% "alti". Nel nostro caso risultano significativi, in particolare, i valori del Coefficiente di Variazione della Coesione drenata e della Coesione non drenata, risultando comunque superiori al 10% quelli dell'Angolo della resistenza al taglio drenata e residua. Pertanto, data la variabilità intrinseca dei valori, in considerazione anche del fatto che il volume del terreno in questo primo *orizzonte geotecnico* è piccolo e che il comportamento del terreno è governato da valori locali bassi, facendo riferimento al frattile 5%, nelle formulazioni si è ritenuto di applicare il valore di K_{low} . Al proposito, si rammenta che la stima cautelativa comporta generalmente valori più bassi del valore medio dei dati a disposizione, ma talora, in particolari circostanze, può comportare valori *più alti* (come nel nostro caso, attrito negativo lungo il fusto di pali, ma anche densità del terreno nelle verifiche di stabilità dei pendii, cedimenti differenziali, etc.).

I principali valori dei parametri geotecnici caratteristici per questo orizzonte saranno:

Tabella 1b - Orizzonte geotecnico 1 – Parametri geotecnici caratteristici

Densità naturale	$\gamma_{low} = \gamma_m \cdot (1 - k \cdot s_\gamma)$	=	17,3	kN/m ³
Coesione (tensioni efficaci)	$C'_{low} = C'_m \cdot (1 - k \cdot s_c)$	=	3,4	kPa
Tangente dell'Angolo di resistenza al taglio (tensioni efficaci)	$tg \phi'_{low} = tg \phi'_m \cdot (1 - k \cdot s_{tg \phi'})$	=	0,2283	Angolo (°) 12,9
Tangente dell'Angolo di resistenza al taglio residuo	$tg \phi'_{r,low} = tg \phi'_{r,m} \cdot (1 - k \cdot s_{tg \phi' r})$	=	0,1620	Angolo (°) 9,2
Coesione non drenata	$Cu_{low} = Cu_m \cdot (1 - k \cdot s_{Cu})$	=	10,0	kPa

Tabella 2a - Orizzonte geotecnico 2 – Risultati delle analisi fisico-meccaniche

PARAMETRI FISICI																
N° d'ordine	Rif. interno	Sond.	Camp.	Profondità		Analisi Granulometrica										
						γ_n (kN/m ³)	Wn (%)	γ_s	LL (%)	LP (%)	I.P. (%)	I.C.	G	S	L	A
1	153-09	1	2	3,50	3,90	20,0	20,1	2,72	30,3	20,2	10,1	1,01	0,0	25,6	40,2	34,2
2	154-09	1	3	6,00	6,45	19,5	18,2	2,73	29,9	19,8	10,1	1,16	0,0	9,9	28,5	61,6
3	155-09	2	2	3,00	3,30	20,5	21,8	2,74	38,9	28,4	10,5	1,63	0,0	19,1	34,8	46,1
4	156-09	2	3	5,80	6,30	20,2	21,2	2,73	40,5	26,6	13,9	1,39	0,0	10,3	29,6	60,1
5	157-09	3	2	5,00	5,40	20,1	19,2	2,73	59,0	21,0	38,0	1,05	0,8	10,1	24,2	64,9
6	158-09	3	3	6,50	6,90	20,5	22,8	2,73	40,1	27,7	12,4	1,40	0,5	12,6	36,7	50,2
7	159-09	4	2	4,00	4,40	19,2	15,1	2,73	26,4	19,2	7,2	1,57	1,4	38,5	37,0	23,1
8	160-09	4	3	6,30	6,70	20,0	20,2	2,73	35,2	23,7	11,5	1,30	0,0	24,5	39,7	35,8
VALORE MASSIMO						20,50	22,80	2,74	59,00	28,40	38,00	1,63	1,40	38,50	40,20	64,90
VALORE MINIMO						19,20	15,10	2,72	26,40	19,20	7,20	1,01	0,00	9,90	24,20	23,10
MEDIA						20,00	19,83	2,73	37,54	23,33	14,21	1,31	0,34	18,83	33,84	47,00
MEDIANA						20,05	20,15	2,73	37,05	22,35	11,00	1,35	0,00	15,85	35,75	48,15
DEVIAZIONE STANDARD						0,45	2,40	0,01	10,13	3,79	9,81	0,23	0,53	10,23	5,77	15,01
COEFFICIENTE DI VARIAZIONE %						2,3	12,1	0,2	27,0	16,2	69,0	17,4	155,9	54,3	17,1	31,9

PARAMETRI GEOMECCANICI									
N° d'ordine	Rif. interno	Sond.	Camp.	Profondità		C' (kPa)	ϕ' (°)	tg ϕ'	Cu (kPa)
2	154-09	1	3	6,00	6,45	19,5	22,3	0,41	60
3	155-09	2	2	3,00	3,30	21,7	23,7	0,44	75
4	156-09	2	3	5,80	6,30	25,6	19,8	0,36	70
5	157-09	3	2	5,00	5,40	31,7	17,0	0,31	72
6	158-09	3	3	6,50	6,90	22,4	22,1	0,41	73
7	159-09	4	2	4,00	4,40	16,7	25,4	0,47	62
8	160-09	4	3	6,30	6,70	21,2	19,8	0,36	53
VALORE MASSIMO						31,70	25,40	0,47	75,0
VALORE MINIMO						16,70	17,00	0,31	50,0
MEDIA						22,41	21,20	0,39	64,4
MEDIANA						21,45	20,95	0,38	66,0
DEVIAZIONE STANDARD						4,52	2,68	0,05	9,5
COEFFICIENTE DI VARIAZIONE %						20,2	12,7	13,9	14,8

Anche per questo secondo *orizzonte geotecnico* i valori percentuali del coefficiente di variazione (COV) risultano, per i più significativi parametri geotecnici, superiori al 10%. Pertanto, data la variabilità intrinseca dei valori e, soprattutto, le caratteristiche di alterazione dello strato, che mostra, dall'analisi del carotaggio continuo, significative variazioni strutturali e tessiture, facendo riferimento al frattile 5%, nelle formulazioni si è ritenuto di applicare il valore di K_{low} . I principali valori dei parametri geotecnici caratteristici per questo orizzonte saranno:

Tabella 2b - Orizzonte geotecnico 2 – Parametri geotecnici caratteristici

Densità naturale	$\gamma_{low} = \gamma_m \cdot (1 - k \cdot s_\gamma)$	=	19,1	kN/m^3
Coesione (tensioni efficaci)	$C'_{low} = C'_m \cdot (1 - k \cdot s_c)$	=	13,8	kPa
Tangente dell'Angolo di resistenza al taglio (tensioni efficaci)	$tg \phi'_{low} = tg \phi'_m \cdot (1 - k \cdot s_{tg \phi'})$	=	0,2861	Angolo (°) 16,0
Coesione non drenata	$Cu_{low} = Cu_m \cdot (1 - k \cdot s_{Cu})$	=	46	kPa

Tabella 3a - Orizzonte geotecnico 3 – Risultati delle analisi fisico-meccaniche

PARAMETRI FISICI													Analisi Granulometrica			
N° d'ordine	Rif. interno	Sond.	Camp.	Profondità		γ_n (kN/m^3)	Wn (%)	γ_s	LL (%)	LP (%)	I.P. (%)	I.C.	G	S	L	A
1	161-09	1	4	12,00	12,50	20,2	18,3	2,73	38,4	26,2	12,2	1,65	0,0	30,0	38,3	31,7
2	162-09	1	5	15,00	15,35	20,3	17,2	2,73	36,7	25,0	11,7	1,67	0,0	33,0	39,5	27,5
3	163-09	2	4	13,00	13,35	20,6	16,5	2,74	37,0	27,9	9,1	2,25	0,3	16,1	36,9	46,7
4	164-09	2	5	18,00	18,40	20,7	15,4	2,73	39,5	28,6	10,9	2,21	0,0	14,2	30,3	55,5
5	165-09	3	4	9,00	9,40	20,2	18,6	2,73	37,8	26,2	11,6	1,66	0,0	27,7	38,5	33,8
6	166-09	3	5	14,00	14,40	20,5	17,6	2,73	33,0	24,1	8,9	1,73	0,0	18,5	41,5	40,0
7	167-09	4	4	10,00	10,50	20,4	17,1	2,73	35,9	25,4	10,5	1,79	0,0	19,4	38,6	42,0
8	168-09	4	5	14,00	14,40	20,7	16,6	2,74	26,6	18,5	8,1	1,23	0,0	37,5	31,4	31,1
VALORE MASSIMO						20,70	18,60	2,74	39,50	28,60	12,20	2,25	0,30	37,50	41,50	55,50
VALORE MINIMO						20,20	15,40	2,73	26,60	18,50	8,10	1,23	0,00	14,20	30,30	27,50
MEDIA						20,45	17,16	2,73	35,61	25,24	10,38	1,77	0,04	24,55	36,88	38,54
MEDIANA						20,45	17,15	2,73	36,85	25,80	10,70	1,70	0,00	23,55	38,40	36,90
DEVIAZIONE STANDARD						0,21	1,03	0,00	4,12	3,09	1,50	0,33	0,11	8,62	3,95	9,37
COEFFICIENTE DI VARIAZIONE %						1,0	6,0	0,2	11,6	12,3	14,5	18,5	282,8	35,1	10,7	24,3

PARAMETRI GEOMECCANICI									
N° d'ordine	Rif. interno	Sond.	Camp.	Profondità		c' (kPa)	ϕ' (°)	$tg \phi'$	Cu (kPa)
1	161-09	1	4	12,00	12,50	50,5	18,5	0,33	94
2	162-09	1	5	15,00	15,35	63,4	18,0	0,32	100
3	163-09	2	4	13,00	13,35	62,5	18,4	0,33	120
4	164-09	2	5	18,00	18,40	60,4	17,8	0,32	121
5	165-09	3	4	9,00	9,40	52,4	18,0	0,32	102
6	166-09	3	5	14,00	14,40	55,8	17,1	0,31	99
7	167-09	4	4	10,00	10,50	53,4	18,2	0,33	100
8	168-09	4	5	14,00	14,40	64,0	18,0	0,32	101
VALORE MASSIMO						64,00	18,50	0,33	121,0
VALORE MINIMO						50,50	17,10	0,31	94,0
MEDIA						57,80	18,00	0,32	104,5
MEDIANA						58,10	18,00	0,32	100,5
DEVIAZIONE STANDARD						5,40	0,43	0,01	10,1
COEFFICIENTE DI VARIAZIONE %						9,4	2,4	2,6	9,7

Per questo *orizzonte geotecnico* i valori del COV % dei principali parametri geotecnici è inferiore al 10%, a testimonianza di una bassa fluttuazione dei dati. Rientriamo nel caso in cui le variazioni dei parametri geotecnici sono del tutto casuali, senza la presenza di significative zone di terreno con proprietà più scadenti e senza un significativo andamento con la profondità. Si assume, pertanto, che il comportamento geomeccanico del terreno è governato dai valori medi dei parametri geotecnici e i valori caratteristici sono una semplice stima cautelativa di tali valori.

Tabella 3b - Orizzonte geotecnico 3 – Parametri geotecnici caratteristici

Densità naturale	$\gamma_{mean} = \gamma_m \cdot (1 - k \cdot s_\gamma)$	=	20,3	kN/m ³
Coesione (tensioni efficaci)	$C'_{mean} = C'_m \cdot (1 - k \cdot s_c)$	=	54,3	kPa
Tangente dell'Angolo di resistenza al taglio (tensioni efficaci)	$tg \phi'_{mean} = tg \phi'_m \cdot (1 - k \cdot s_{tg \phi'})$	=	0,3196	Angolo (°) 17,7
Coesione non drenata	$Cu_{mean} = Cu_m \cdot (1 - k \cdot s_{Cu})$	=	98	kPa

Tabella 4a - Orizzonte geotecnico 4 – Risultati delle analisi fisico-meccaniche

PARAMETRI FISICI														Analisi Granulometrica			
N° d'ordine	Rif. interno	Sond.	Camp.	Profondità	γ_n (kN/m ³)	Wn (%)	γ_s	LL (%)	LP (%)	I.P. (%)	I.C.	G	S	L	A		
1	169-09	1	6	22,50 23,00	20,6	16,2	2,73	34,2	24,1	10,1	1,78	0,0	22,5	35,5	42,0		
2	170-09	2	6	24,70 25,10	20,7	16,0	2,73	35,3	23,8	11,5	1,68	0,0	21,4	34,2	44,4		
3	171-09	3	6	26,80 27,20	20,6	15,8	2,73	35,7	24,4	11,3	1,76	0,0	20,0	36,8	43,2		
4	172-09	4	6	29,00 29,50	20,6	16,1	2,74	34,8	24,0	10,8	1,73	0,0	19,7	34,7	45,6		
VALORE MASSIMO					20,70	16,20	2,74	35,70	24,40	11,50	1,78	—	22,50	36,80	45,60		
VALORE MINIMO					20,60	15,80	2,73	34,20	23,80	10,10	1,68	—	19,70	34,20	42,00		
MEDIA					20,63	16,03	2,73	35,00	24,08	10,93	1,74	—	20,90	35,30	43,80		
MEDIANA					20,60	16,05	2,73	35,05	24,05	11,05	1,75	—	20,70	35,10	43,80		
DEVIAZIONE STANDARD					0,05	0,17	0,01	0,65	0,25	0,62	0,05	—	1,30	1,13	1,55		
COEFFICIENTE DI VARIAZIONE %					0,2	1,1	0,2	1,9	1,0	5,7	2,6	—	6,2	3,2	3,5		
PARAMETRI GEOMECCANICI																	
N° d'ordine	Rif. interno	Sond.	Camp.	Profondità	C' (kPa)	ϕ' (°)	tg ϕ'	Cu (kPa)									
1	169-09	1	6	22,50 23,00	68,3	18,5	0,33	120									
2	170-09	2	6	24,70 25,10	70,5	18,7	0,34	125									
3	171-09	3	6	26,80 27,20	71,2	18,4	0,33	127									
4	172-09	4	6	29,00 29,50	67,9	18,3	0,33	121									
VALORE MASSIMO					71,20	18,70	0,34	127,0									
VALORE MINIMO					67,90	18,30	0,33	120,0									
MEDIA					69,48	18,48	0,33	123,3									
MEDIANA					69,40	18,45	0,33	123,0									
DEVIAZIONE STANDARD					1,62	0,17	0,00	3,3									
COEFFICIENTE DI VARIAZIONE %					2,3	0,9	1,0	2,7									

Anche per quest'ultimo orizzonte geotecnico è possibile riscontrare molto limitate fluttuazioni dei dati e, pertanto, si può assumere che il comportamento geomeccanico del terreno è governato dai valori medi dei parametri geotecnici. I valori caratteristici sono, quindi, una semplice stima cautelativa dei valori medi (K_{mean}). Un'ultima considerazione va fatta in riferimento ai bassissimi valori del COV% della Coesione non drenata. Questi, come è noto, normalmente, per la natura stessa del parametro, sono abbastanza elevati, compresi fra 10-15% e 70%. Nel nostro caso la ridottissima variabilità può essere attribuita alla grande omogeneità dello strato, al naturale disturbo ingenerato dal prelievo dei campioni, che tende a livellare le differenze di risposta nei terreni a comportamento più rigido, e allo spessore limitato entro il quale sono stati prelevati i quattro campioni (~ 7 metri) .

Tabella 4b - Orizzonte geotecnico 4 – Parametri geotecnici caratteristici

Densità naturale	$\gamma_{mean} = \gamma_m \cdot (1 - k \cdot s_\gamma)$	=	20,6	kN/m^3
Coesione (tensioni efficaci)	$C'_{mean} = C'_m \cdot (1 - k \cdot s_c)$	=	67,4	kPa
				Angolo (°)
Tangente dell'Angolo di resistenza al taglio (tensioni efficaci)	$tg \phi'_{mean} = tg \phi'_m \cdot (1 - k \cdot s_{tg\phi'})$	=	0,3300	18,3
Coesione non drenata	$Cu_{mean} = Cu_m \cdot (1 - k \cdot s_{Cu})$	=	119	kPa

Nelle figure seguenti sono rappresentati graficamente tutti i valori di Coesione drenata (Fig. 5), Coesione non drenata (Fig. 6) ed Angolo di Resistenza al taglio (Fig. 7) per gli Orizzonti geotecnici individuati, insieme ai corrispondenti valori medi e ai valori caratteristici stimati.

Fig. 5 - Rappresentazione grafica dei valori di Coesione drenata per i 4 Orizzonti geotecnici

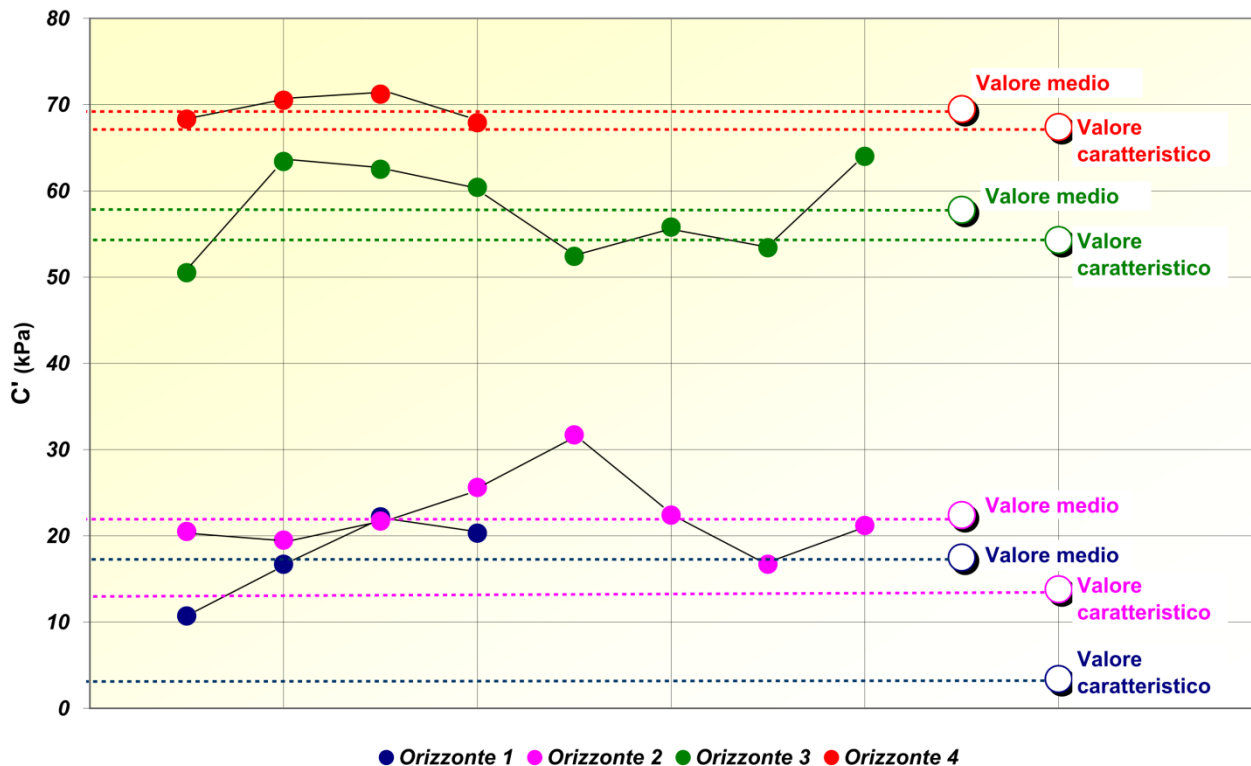


Fig. 6 - Rappresentazione grafica dei valori di Coesione non drenata per i 4 Orizzonti geotecnici

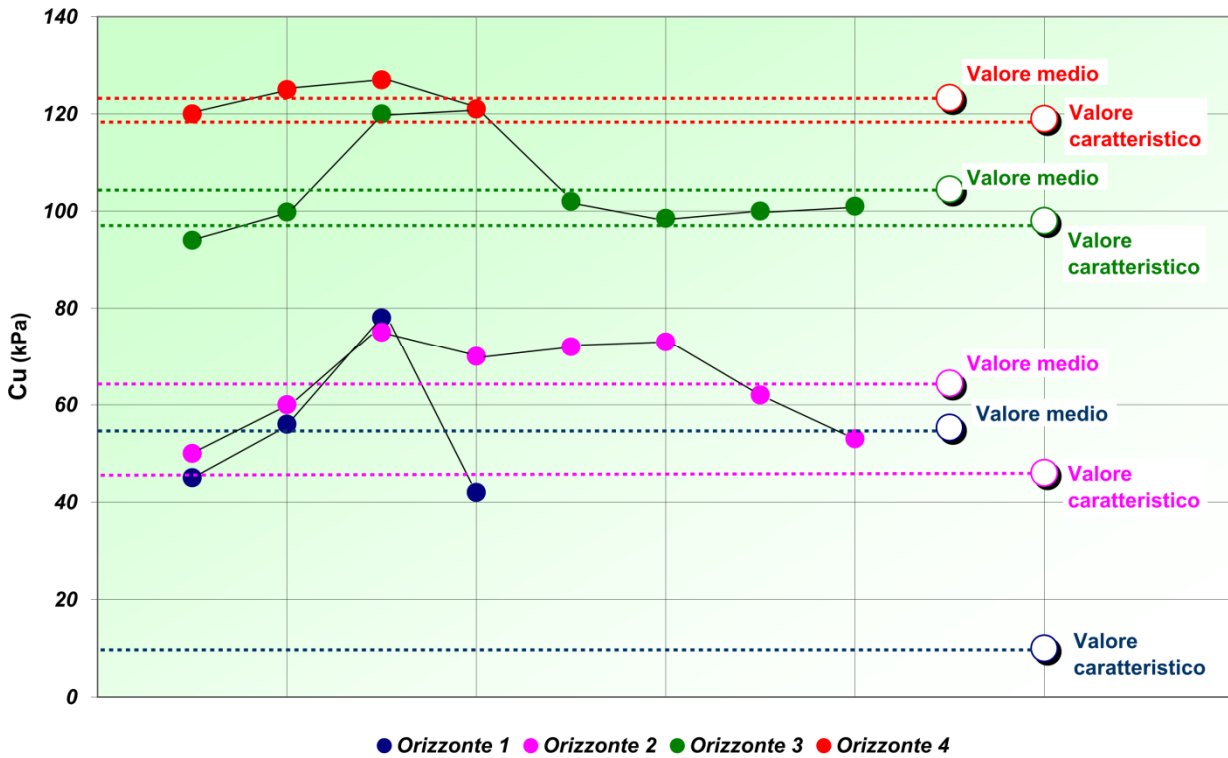
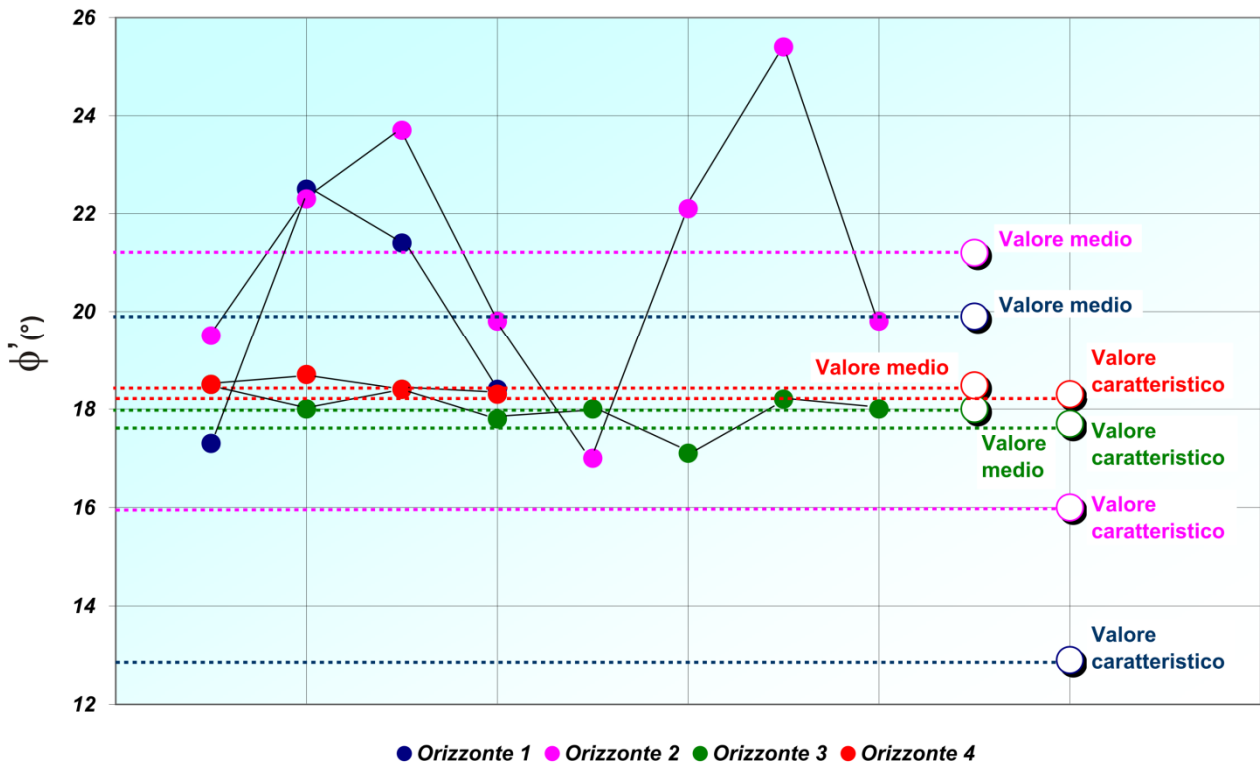
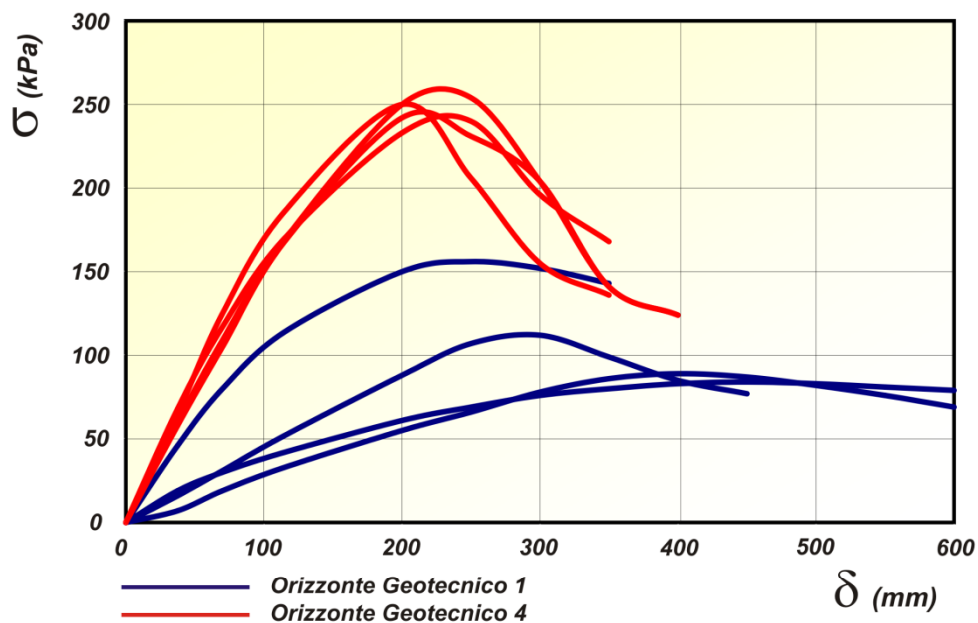


Fig. 7 - Rappresentazione grafica dei valori di Angolo di resistenza al taglio (condizioni drenate) per i 4 Orizzonti geotecnici



Un'ultima rappresentazione grafica (Fig. 8) riguarda l'andamento delle curve sforzo-deformazione delle prove E.L.L. eseguite sui campioni degli Orizzonti geotecnici 1 e 4, cioè i livelli geotecnici *limite* dal punto di vista delle caratteristiche geomeccaniche. Nella Figura 8, inoltre, sono riportati i valori calcolati dei Moduli di Elasticità *Tangente*, *Secante* e a *Rottura* per i singoli campioni. L'analisi delle curve conferma: la variabilità dei campioni afferenti all'Orizzonte geotecnico 1, il sostanziale comportamento *plastico* dei campioni stessi e gli elevati valori dei Coefficienti di variazione % dei Moduli di elasticità; l'omogeneità dei campioni afferenti all'Orizzonte geotecnico 4, il sostanziale comportamento *rigido* dei campioni stessi e i bassissimi valori dei Coefficienti di variazione % dei Moduli di elasticità.

Fig. 8 - Rappresentazione grafica delle curve Sforzo-Deformazione relative alle Prove ad Espansione Laterale Libera eseguite sui campioni degli Orizzonti Geotecnici 1 e 4 e valori dei Moduli di Elasticità



Moduli di Elasticità (kPa)			
Orizzonte Geotecnico 1			
	Tangente	Secante	A rottura
S1-C1 prof. 1,00-1,40	1445	2553	1955
S2-C1 prof. 2,00-2,40	3316	3439	2841
S3-C1 prof. 3,70-4,10	9438	8697	4764
S4-C1 prof. 1,90-2,30	4430	2776	1425
Media	4657	4366	2746
Deviazione Standard	3417	2912	1467
Coefficiente di Variazione	73%	67%	53%
Orizzonte Geotecnico 4			
	Tangente	Secante	A rottura
S1-C6 prof. 22,50-23,00	13855	12756	7317
S2-C6 prof. 24,70-25,10	12501	13586	9528
S3-C6 prof. 26,80-27,20	13081	11570	7738
S4-C6 prof. 29,00-29,50	11726	11301	9219
Media	12791	12303	8451
Deviazione Standard	901	1063	1087
Coefficiente di Variazione	7%	9%	13%

Riguardo all'adozione dei valori dei parametri geotecnici caratteristici, così come determinati dalle elaborazioni precedenti, in riferimento al D.M. 14.01.2008, e in particolare al paragrafo 6.4.3 – Fondazioni su pali, si considera applicabile il caso in cui le verifiche SLU (Stato Limite Ultimo) e SLE (Stato Limite di Esercizio) vadano condotte con riferimento ai soli pali. Pertanto, le verifiche SLU e SLE dovranno soddisfare quanto riportato ai §§ 6.4.3.1 e 6.4.3.2 del D.M. e della relativa Circolare 617/2009: in tutti i previsti approcci progettuali i valori dei parametri geotecnici caratteristici dovranno tener conto dei coefficienti parziali di cui alla colonna M1 della Tabella 6.2.II. In pratica, essendo 1,0 il valore del coefficiente per tutti i principali parametri, è possibile l'adozione dei valori caratteristici così come calcolati, senza ulteriori riduzioni.

Circa l'affidabilità della campagna geognostica e geotecnica, infine, è utile riportare testualmente quanto dettato al comma 4 del paragrafo § 6.4.3.1 della Circolare 617/2009: *"In analogia con l'Eurocodice 7, le Norme introducono una serie di fattori di correlazione che dipendono... dall'affidabilità della caratterizzazione geotecnica nel volume significativo, premiando la numerosità e la completezza degli accertamenti. Ad esempio, nel caso in cui la resistenza caratteristica sia valutata con procedimenti analitici, i valori dei fattori di correlazione permettono di valorizzare la qualità del modello geotecnico di sottosuolo, la cui accuratezza può essere migliorata al crescere del numero di verticali d'indagine lungo le quali risulti una completa caratterizzazione geotecnica dei terreni. A questo proposito si deve ribadire che il numero di verticali d'indagine, con i requisiti necessari innanzi richiamati per ciascuna di esse, deve essere riferito al volume significativo. Ciò significa, ad esempio,.... che per un'opera lineare, come un viadotto, il volume significativo riguarda ogni singola fondazione"*.

4. LIMITI DI APPLICABILITÀ DELLA METODOLOGIA

Già si è detto circa il significato del *Coefficiente di Variazione* COV% quale misura della affidabilità della tendenza centrale di una serie di dati o, in maniera equivalente, della dispersione della componente fluttuante rispetto al valore medio del trend. Pertanto, di seguito si riportano due simulazioni, con applicazione rispettiva del K_{mean} e del K_{low} , per valori fissi della media aritmetica (X_{mean}), calcolata per una serie di dati da 2 a 15, per la *Coesione drenata* ($c'_{mean} = 12$ kPa) e per l'*Angolo di resistenza al taglio in condizioni drenate* ($\phi'_{mean} = 15^\circ$). Sono stati calcolati, quindi, i valori del parametro caratteristico X_c per valori del COV% progressivamente maggiori, da 10% a 50%, mantenendo fisso, come detto, il valore della media aritmetica per entrambi i parametri c' e ϕ' . La rappresentazione, in forma tabellare e in forma grafica, permette di operare utili considerazioni sui limiti di applicabilità della metodologia.

Innanzitutto è evidente come, all'aumentare del numero di campioni analizzati, il valore del parametro caratteristico tende progressivamente ad avvicinarsi al valore medio (X_{mean}): questo, chiaramente, è tanto più evidente per l'ipotesi K_{mean} (strati di terreno dove il parametro geotecnico considerato non mostra una significativa e sistematica variabilità in direzione orizzontale o con la profondità, senza la presenza di significative zone di terreno con proprietà più scadenti).

E' altrettanto evidente che, all'aumentare del Coefficiente di variazione COV%, i valori del parametro caratteristico si *deprimono* considerevolmente, soprattutto per l'ipotesi K_{low} (volume *piccolo* del terreno interessato dallo stato limite, con riferimento alla lunghezza di fluttuazione della proprietà del terreno, o quando si può assumere che il comportamento del terreno è governato da valori locali bassi). Superato il 40% di COV%, per esempio, non ha senso una elaborazione in termini di K_{mean} basata su due campioni (cosa peraltro logica in ogni caso), o, superato il 30% del COV%, non ha senso una elaborazione in termini di K_{low} basata su tre campioni, o, superato il 50%, una elaborazione basata su sette campioni.

In buona sostanza, si ribadisce la necessità di effettuare una approfondita campagna geognostica per disporre di un numero significativo di campioni analizzati (... *premiando la numerosità e la completezza degli accertamenti*) e, qualora il *Coefficiente di variazione* dovesse superare la soglia del 30%-40%, di rivedere complessivamente l'individuazione del volume significativo e la conseguente attribuzione dei risultati delle analisi geotecniche allo stesso. Ovviamente tutto ciò non dovrà mai prescindere da attente ed accurate valutazioni di carattere geologico, oltre che geotecnico s.s..

Fig. 9 - Valori del parametro caratteristico X_c per Coesione drenata $\mu_{mean} = c'_{mean} = 12$ kPa

$X_c (K_{mean})$		Coefficiente di variazione %				
X	10%	20%	30%	40%	50%	
2	8.9	5.8	2.7	-0.4	-3.6	
3	10.0	8.0	5.9	3.9	1.9	
4	10.6	9.1	7.7	6.2	4.8	
5	10.9	9.7	8.6	7.5	6.3	
6	11.0	10.1	9.1	8.2	7.2	
7	11.1	10.3	9.4	8.6	7.7	
8	11.2	10.4	9.6	8.8	8.0	
9	11.3	10.5	9.8	9.0	8.3	
10	11.3	10.6	9.9	9.1	8.4	
11	11.3	10.6	9.9	9.3	8.6	
12	11.3	10.7	10.0	9.4	8.7	
13	11.4	10.7	10.1	9.5	8.8	
14	11.4	10.8	10.2	9.6	8.9	
15	11.4	10.8	10.2	9.6	9.1	

$X_c (K_{low})$		Coefficiente di variazione %				
X	10%	20%	30%	40%	50%	
2	6.5	1.1	-4.4	-9.9	-15.3	
3	8.0	3.9	-0.1	-4.2	-8.2	
4	8.7	5.5	2.2	-1.1	-4.3	
5	9.2	6.3	3.5	0.7	-2.2	
6	9.4	6.8	4.2	1.6	-1.0	
7	9.5	7.1	4.6	2.2	-0.3	
8	9.6	7.2	4.9	2.5	0.1	
9	9.7	7.3	5.0	2.7	0.3	
10	9.7	7.4	5.1	2.8	0.5	
11	9.7	7.4	5.2	2.9	0.6	
12	9.7	7.5	5.2	3.0	0.7	
13	9.8	7.5	5.3	3.0	0.8	
14	9.8	7.5	5.3	3.1	0.8	
15	9.8	7.6	5.3	3.1	0.9	

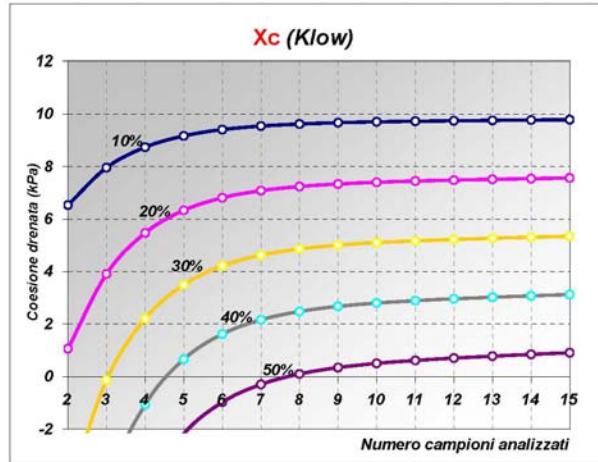
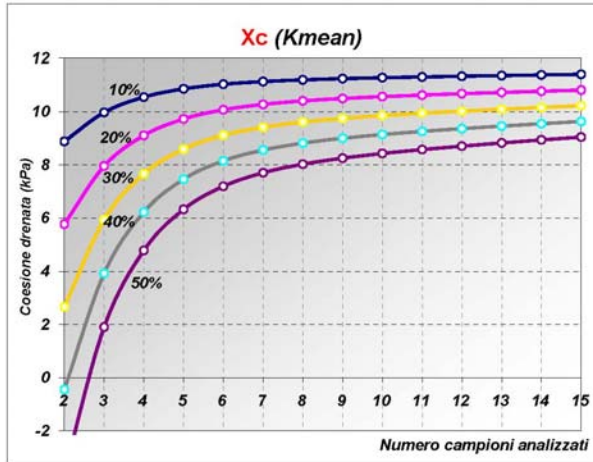
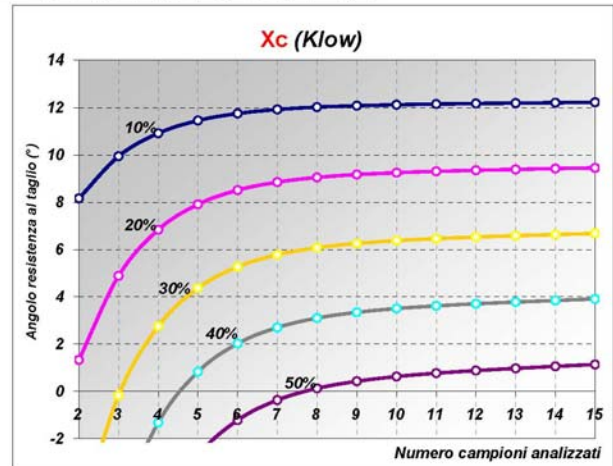
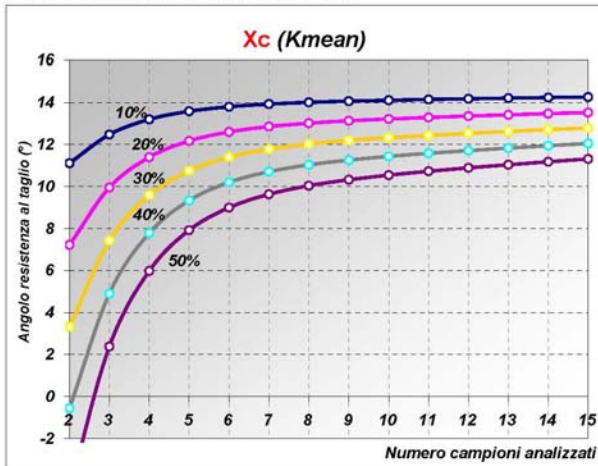


Fig. 10 - Valori del parametro caratteristico X_c per Angolo di resistenza al taglio $\mu_{mean} = \phi'_{mean} = 15^\circ$

$X_c (K_{mean})$		Coefficiente di variazione %				
X	10%	20%	30%	40%	50%	
2	11.1	7.2	3.3	-0.6	-4.5	
3	12.5	10.0	7.4	4.9	2.4	
4	13.2	11.4	9.6	7.8	6.0	
5	13.6	12.2	10.8	9.3	7.9	
6	13.8	12.6	11.4	10.2	9.0	
7	13.9	12.9	11.8	10.7	9.6	
8	14.0	13.0	12.0	11.0	10.0	
9	14.1	13.1	12.2	11.3	10.3	
10	14.1	13.2	12.3	11.4	10.5	
11	14.1	13.3	12.4	11.6	10.7	
12	14.2	13.4	12.5	11.7	10.9	
13	14.2	13.4	12.6	11.8	11.0	
14	14.2	13.5	12.7	11.9	11.2	
15	14.3	13.5	12.8	12.1	11.3	

$X_c (K_{low})$		Coefficiente di variazione %				
X	10%	20%	30%	40%	50%	
2	8.2	1.3	-5.5	-12.3	-19.2	
3	9.9	4.9	-0.2	-5.2	-10.3	
4	10.9	6.8	2.8	-1.3	-5.4	
5	11.5	7.9	4.4	0.8	-2.7	
6	11.8	8.5	5.3	2.0	-1.2	
7	11.9	8.9	5.8	2.7	-0.4	
8	12.0	9.1	6.1	3.1	0.1	
9	12.1	9.2	6.3	3.3	0.4	
10	12.1	9.3	6.4	3.5	0.6	
11	12.2	9.3	6.5	3.6	0.8	
12	12.2	9.4	6.5	3.7	0.9	
13	12.2	9.4	6.6	3.8	1.0	
14	12.2	9.4	6.6	3.8	1.1	
15	12.2	9.5	6.7	3.9	1.1	



BIBLIOGRAFIA

- E. AIELLO (2010), "Dispense corso NTC 08", Ordine dei Geologi del Lazio, www.geologilazio.it
- A. DI BERNARDO (2009), "Valori caratteristici del terreno", Program Geo
- CIRCOLARE 617/2009, "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni – D.M. 14.01.2008 - Cap. 6 – Progettazione Geotecnica"
- D.M. 14 GENNAIO 2008, "Norme Tecniche per le Costruzioni – Cap. 6 – Progettazione Geotecnica"
- FRANK R., BAUDUIN C., DRISCOL R., KAVVADAS M., KREBS OVESEN N., ORR T., SCHUPPENER B. (2004), "Designer's Guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical design-General rules", Thomas Telford Publishing
- LUCA "MCCOY" – GEOLOGO (2009), "Introduzione operativa al concetto dei valori caratteristici secondo l'Eurocodice 7 (norma europea prEN1997-1)", www.nuke.mccoy.it
- ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI BERGAMO (COMMISSIONE GEOTECNICA) - UNIVERSITÀ DI BERGAMO (FACOLTÀ DI INGEGNERIA) – PROF. MARIO MANASSERO (POLITECNICO DI TORINO), BERGAMO, 30 MAGGIO 2008, "Corso d'aggiornamento Nuove Norme Tecniche sulle Costruzioni – D.M. 14 Maggio 2008", File di presentazione - www.ordineingegneri.bergamo.it/atti/geotecnica/008
- TANZINI M. (2006), "Fondazioni – Caratterizzazione geotecnica, verifiche geotecniche, dimensionamento", Dario Flaccovio Editore, Palermo, 81-108
- VANNUCCHI G., UZIELLI M. (2004), "Variabilità geotecnica e affidabilità della sperimentazione", Atti del seminario sulla caratterizzazione geotecnica dei terreni in relazione a problemi di ingegneria civile, Firenze