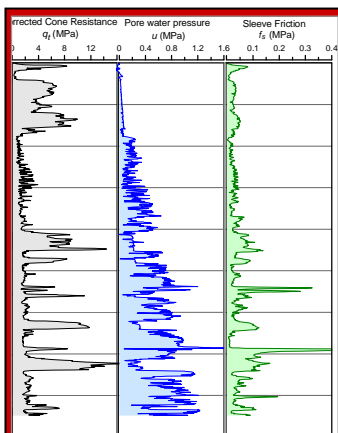


Programmazione delle indagini geotecniche come elemento della progettazione di nuove opere e per il consolidamento di quelle esistenti



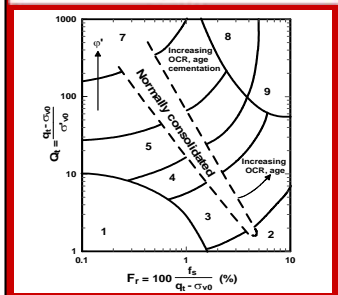
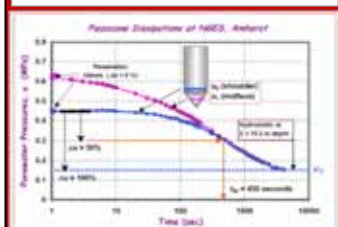
Forum della tecnica delle Costruzioni

Fiera Milano, Rho, 5 Ottobre 2011



Le prove in sito per la determinazione dei parametri geotecnici

Prova Penetrometrica con Piezocono CPTU, SCPTU



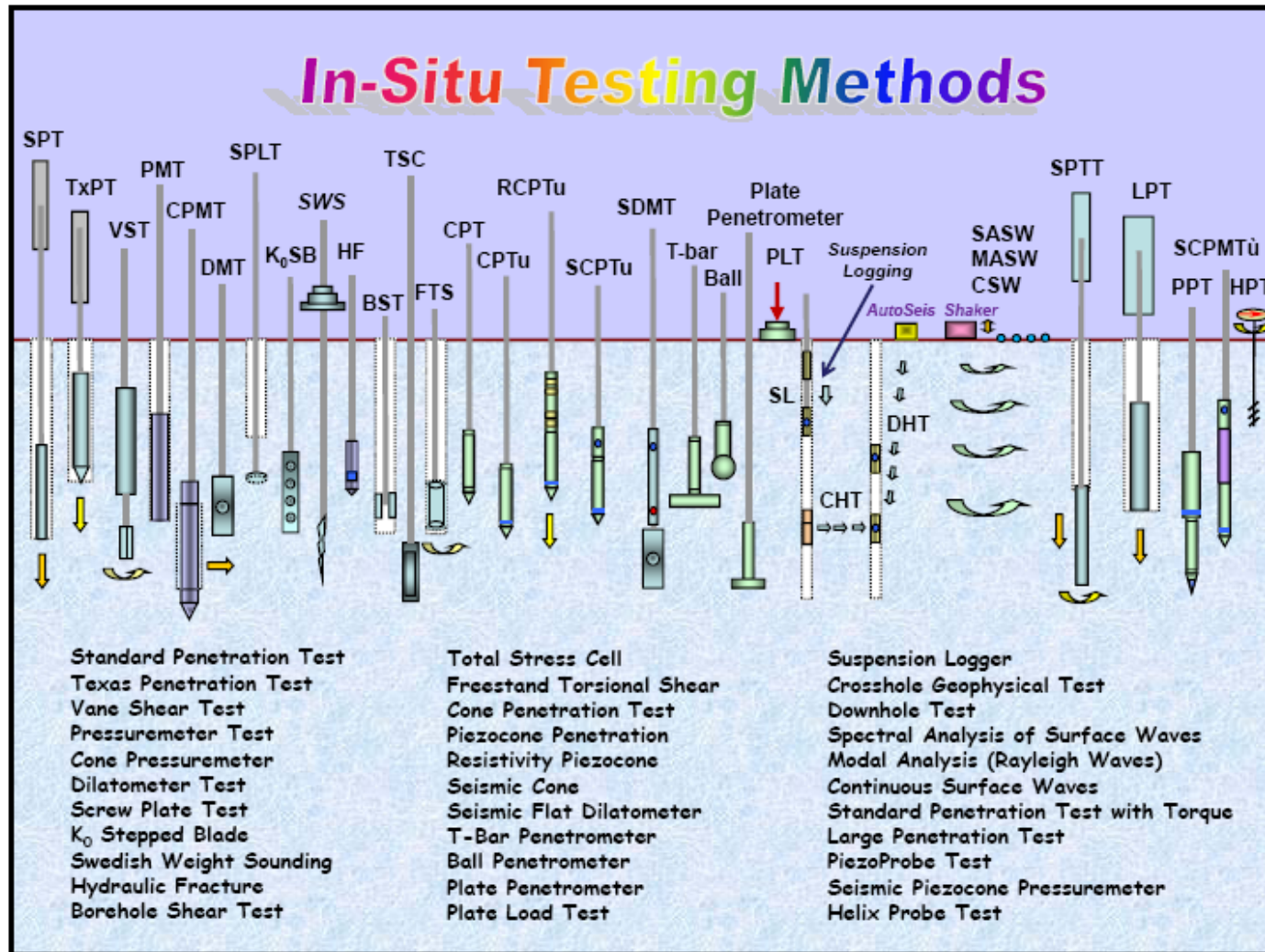
Laura Tonni

DICAM, Università di Bologna

✉ laura.tonni@unibo.it



Sperimentazione in sito



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

□ VANTAGGI DELLE PROVE IN SITO

- Rapide ed economiche;
- Descrizione continua con la profondità;
- Maggiore volume di terreno investigato;
- Stato tensionale e permeabilità definite meglio.

□ SVANTAGGI DELLE PROVE IN SITO

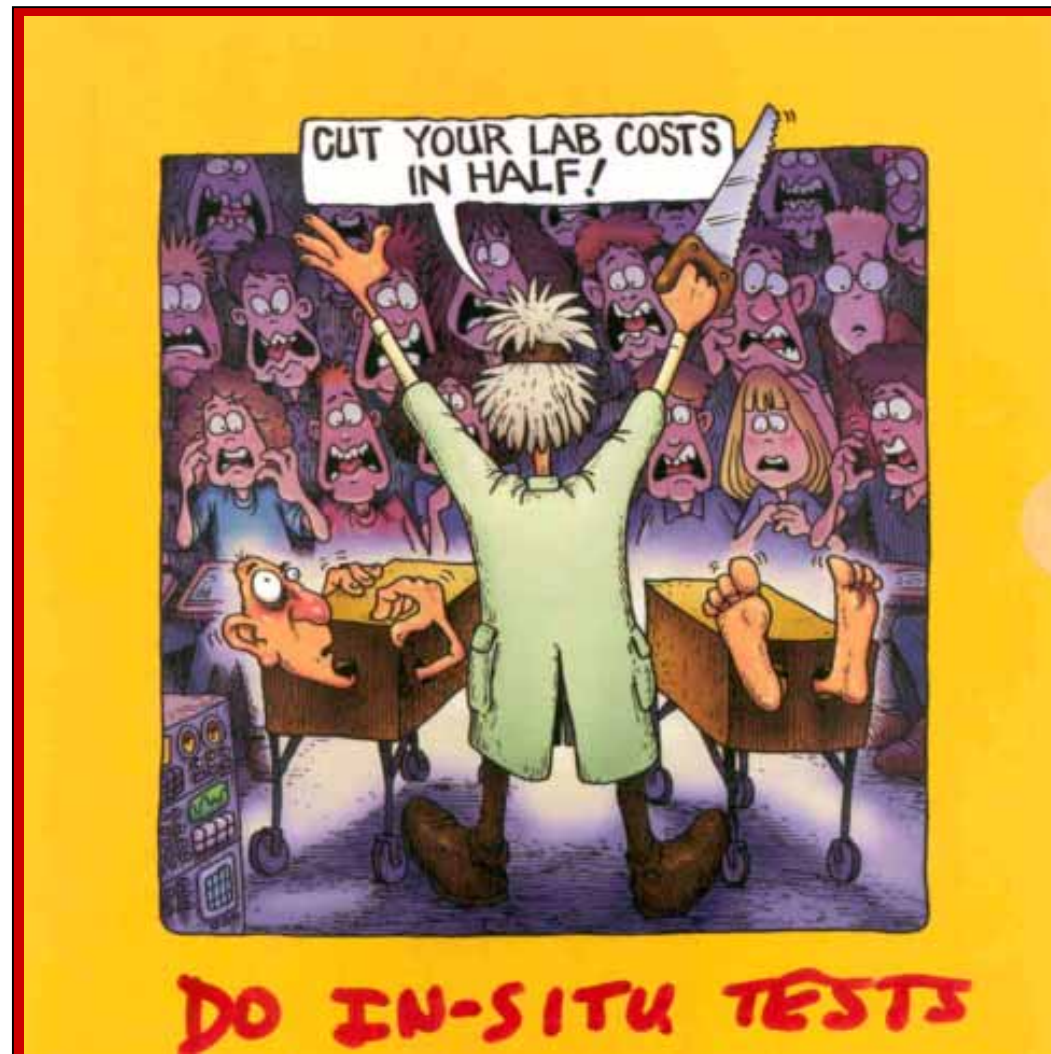
- Condizioni al contorno di complessa individuazione;
- Condizioni di drenaggio spesso incerte;
- Effetti di disturbo indotti sul terreno circostante;
- Necessità di ricorrere a correlazioni empiriche.



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Sperimentazione in sito



Prof. Mayne's web page.



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Finalità delle indagini	Mezzi di indagine
Profilo stratigrafico	<ul style="list-style-type: none"> • Sondaggi • Prove penetrometriche • Dilatometro
Deformabilità	<ul style="list-style-type: none"> • Pressiometro • Prove penetrometriche statiche e dinamiche • Dilatometro • Prova di carico su piastra • Prove geofisiche
Resistenza al taglio	<ul style="list-style-type: none"> • Pressiometro • Prove penetrometriche statiche e dinamiche • Dilatometro • Prova scissometrica • Prova di carico su piastra
Tensione orizzontale a riposo	<ul style="list-style-type: none"> • Pressiometro • Dilatometro



LAURA TONNI

***Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)***

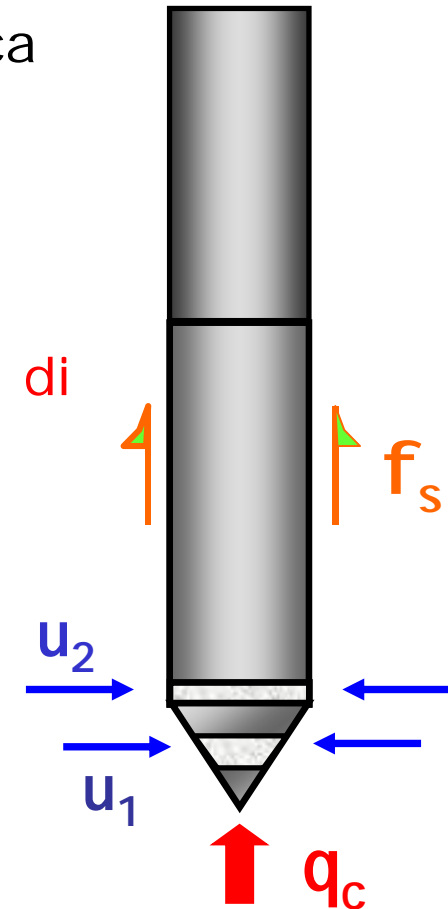
La prova penetrometrica statica (CPT, CPTU, SCPTU)



Consiste nell'infiggere nel terreno una punta conica a velocità di avanzamento costante, misurando:

- lo sforzo necessario per la penetrazione della punta, q_c
- l'attrito che si sviluppa sul manicotto posto al di sopra della punta, f_s

Se la punta è munita di settore poroso e relativo trasduttore (*piezocono*), viene misurata anche la **pressione nei pori** u .



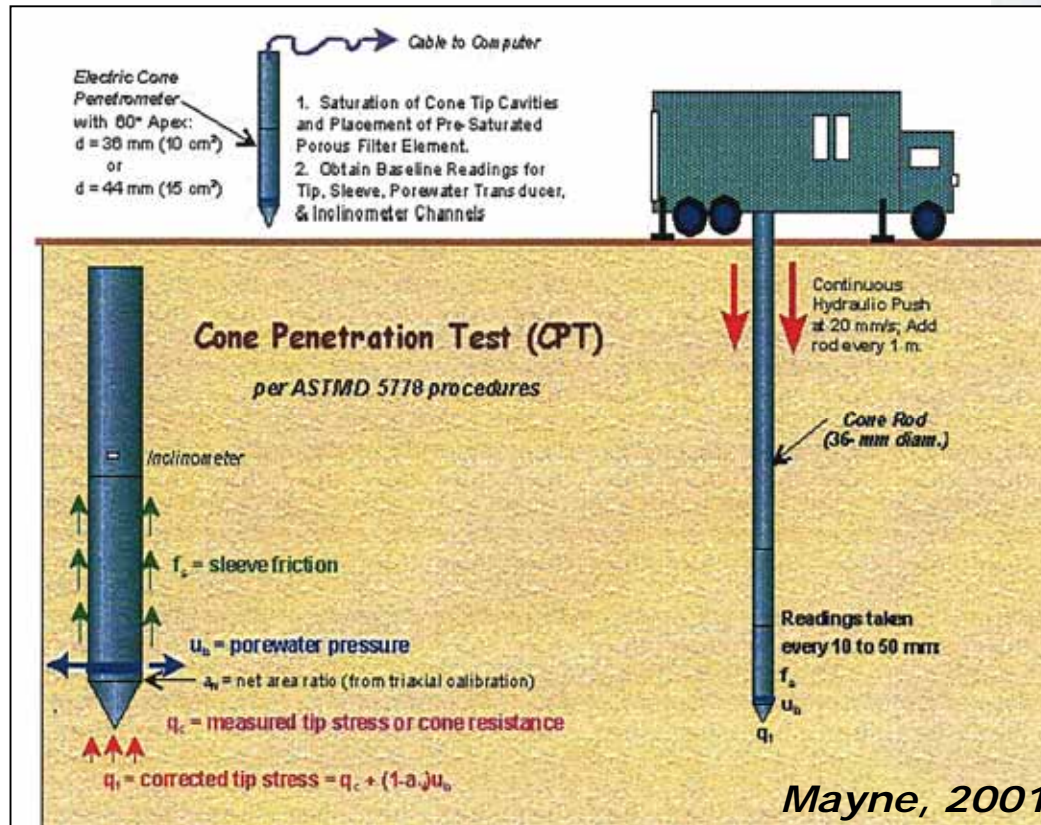
LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

La prova penetrometrica statica



L'attrezzatura comprende **un sistema di aste** per l'infissione della punta penetrometrica e un dispositivo di spinta, zavorrato e/o ancorato.



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**



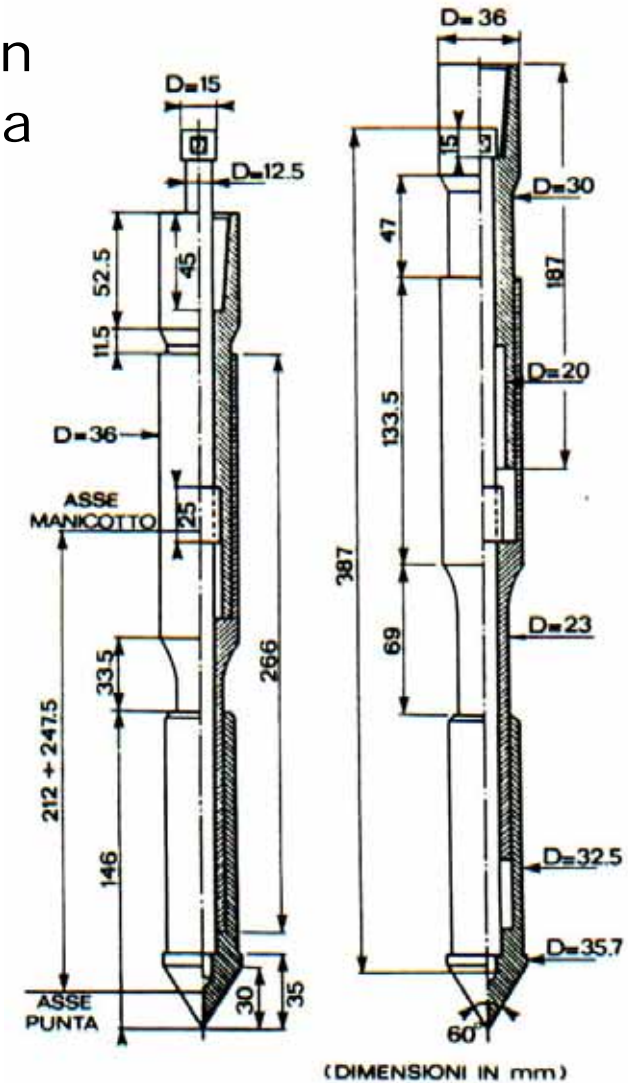
La prova penetrometrica statica “meccanica”



La misura della spinta viene fatta in superficie, misurando la pressione esercitata sulle aste di manovra

Il penetrometro a punta meccanica utilizza una **batteria di aste interne** per infiggere la punta indipendentemente dalle aste di spinta

- ❑ **Bassi costi e semplicità operativa.**
- ❑ Prova affidabile in terreni omogenei di consistenza medio-elevata.



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

La prova penetrometrica statica “elettrica”

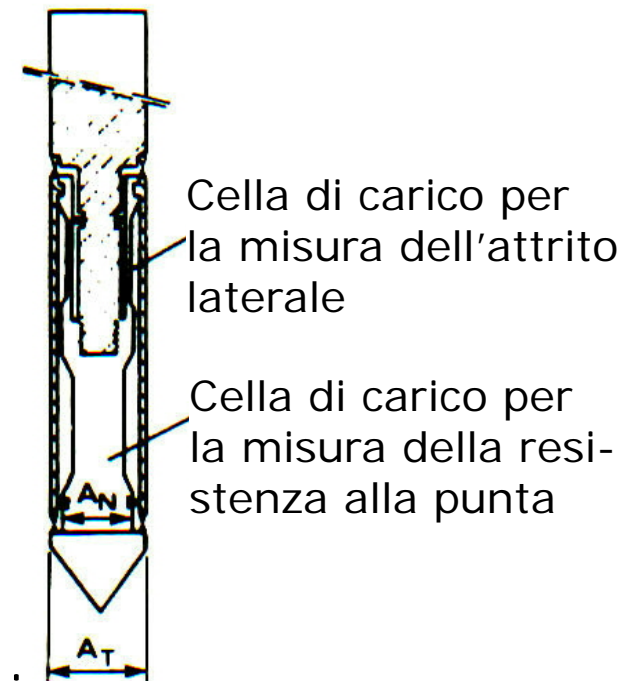


Le punte elettriche contengono le celle di carico che misurano separatamente la resistenza alla punta e l'attrito laterale locale

La punta elettrica produce dei segnali continui, che si prestano ad essere elaborati e visualizzati in diversi modi

Principali Vantaggi:

- ❑ Precisione dei risultati;
- ❑ Affidabilità anche in terreni teneri;
- ❑ Possibilità di introdurre anche altri sensori.



LAURA TONNI

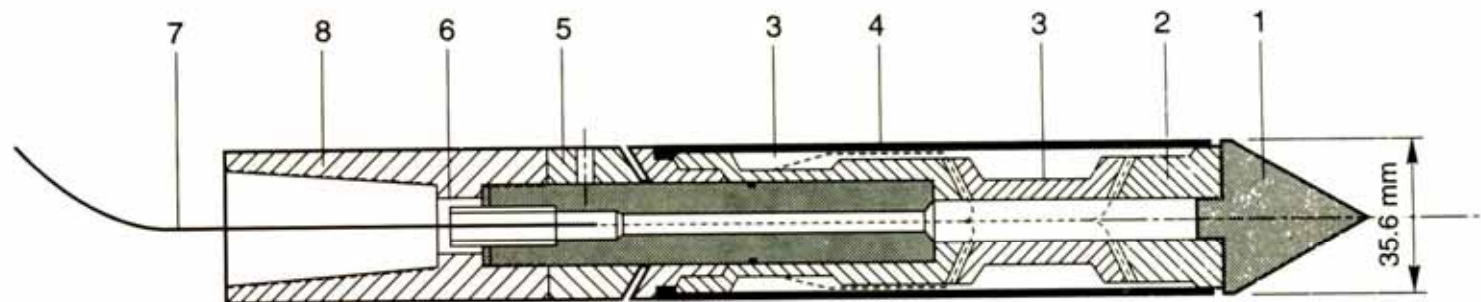
**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

La prova penetrometrica statica “elettrica”



Il penetrometro statico elettrico è stato fatto oggetto di standardizzazione (ASTM, 1979):

- Angolo del cono: 60°
- Area di base: 10 cm^2
- Superficie laterale del manicotto: 150 cm^2
- Velocità di avanzamento: 20 mm/s



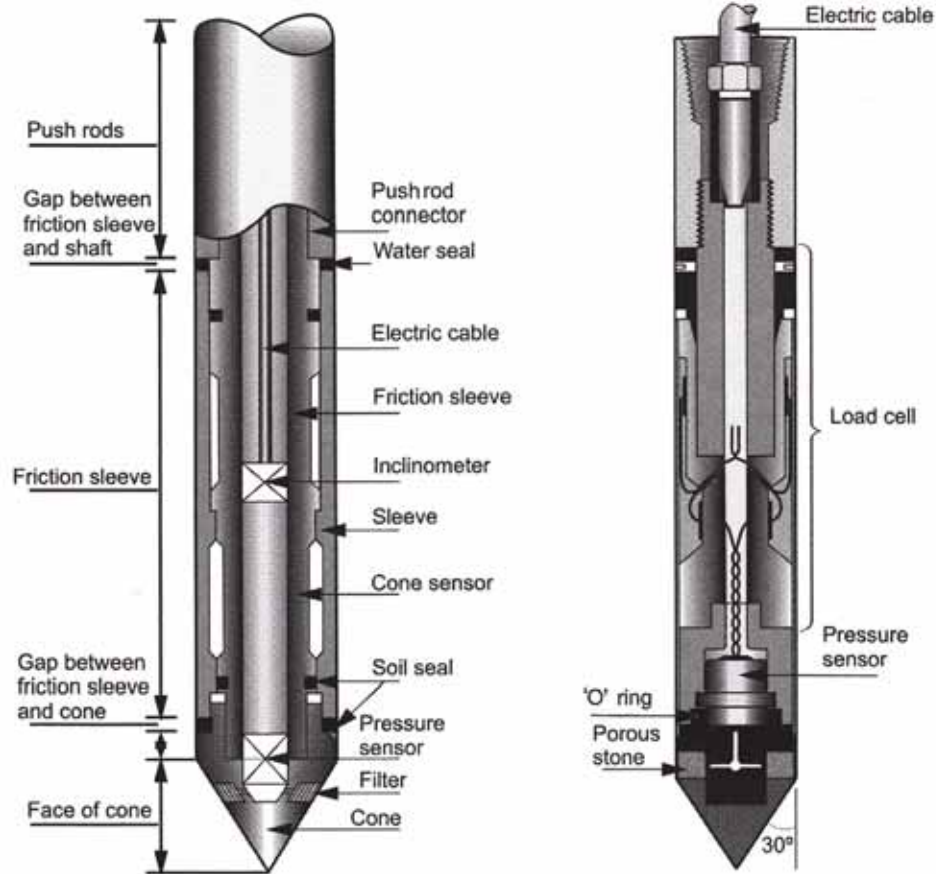
- | | |
|---------------------------------------|------------------------|
| 1 Conical point (10 cm^2) | 5 Adjustment ring |
| 2 Load cell | 6 Waterproof bushing |
| 3 Strain gauges | 7 Cable |
| 4 Friction sleeve | 8 Connection with rods |



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Piezocono (CPTU)



Una pietra porosa collegata ad un trasduttore permette di misurare la **pressione dell'acqua interstiziale** durante l'avanzamento.

L'utilizzo del setto poroso e relativo trasduttore risale agli anni '70.

Tratto da F. Schnaid, 2009



LAURA TONNI

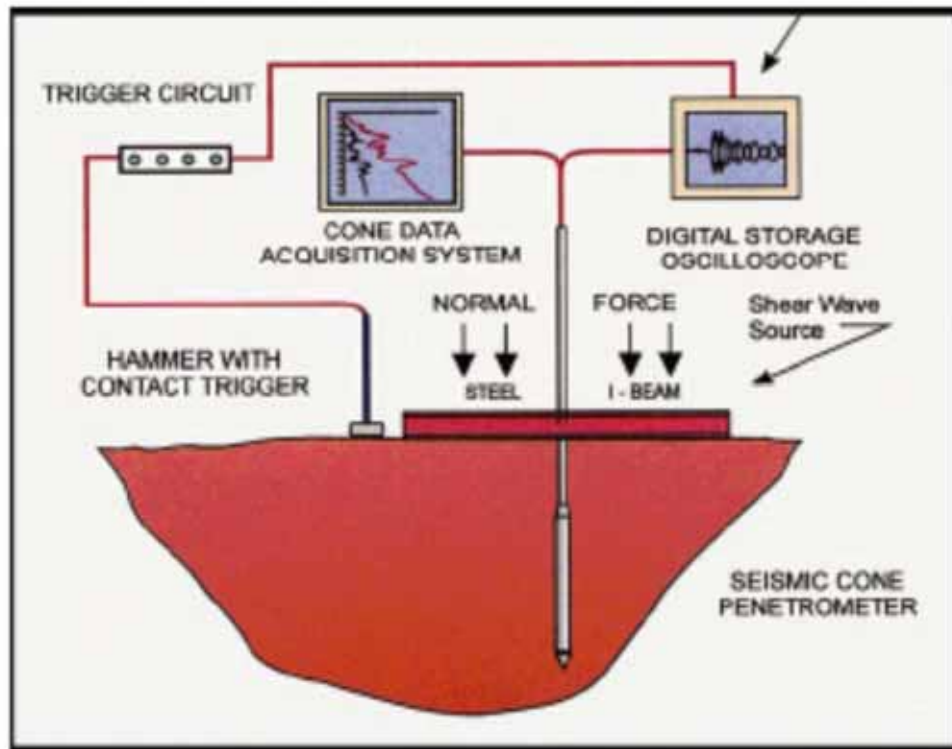
**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Piezocono sismico (SCPTU)



L'inserimento di un geofono sulla punta permette di misurare la velocità (v_s) delle onde sismiche.

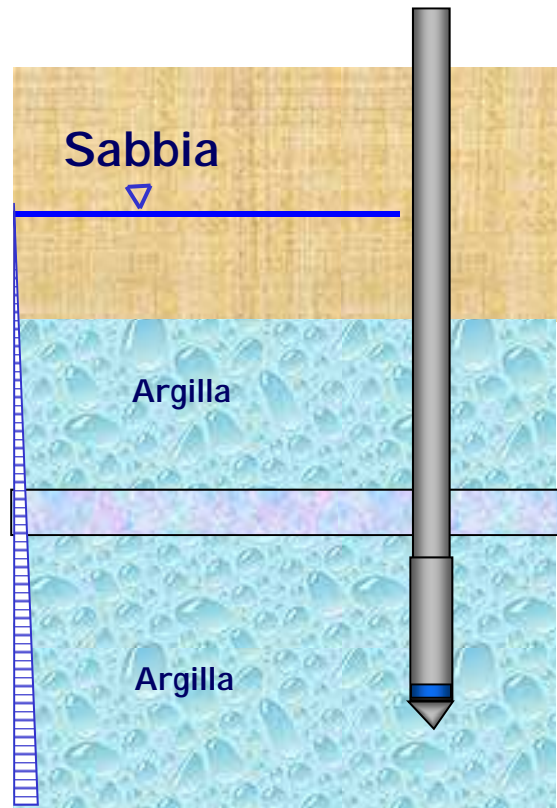
La perturbazione viene generata in superficie, sotto forma di onde di taglio.



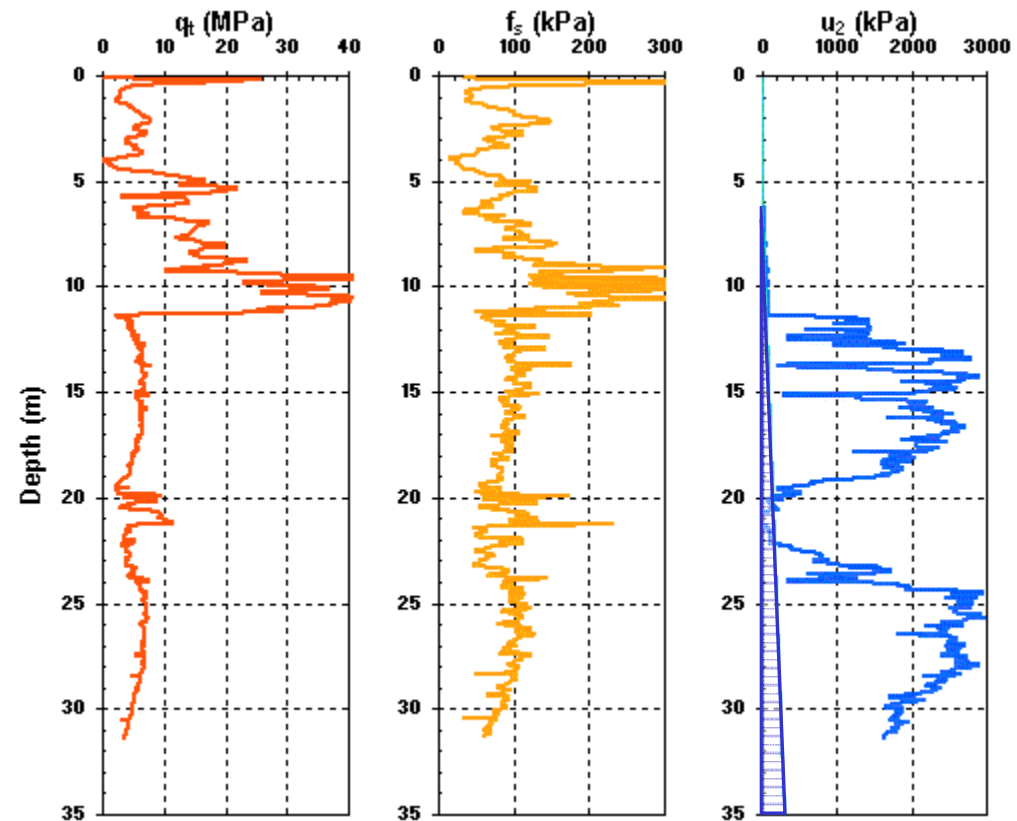
LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Presentazione delle misure



Pressione neutra iniziale u_0



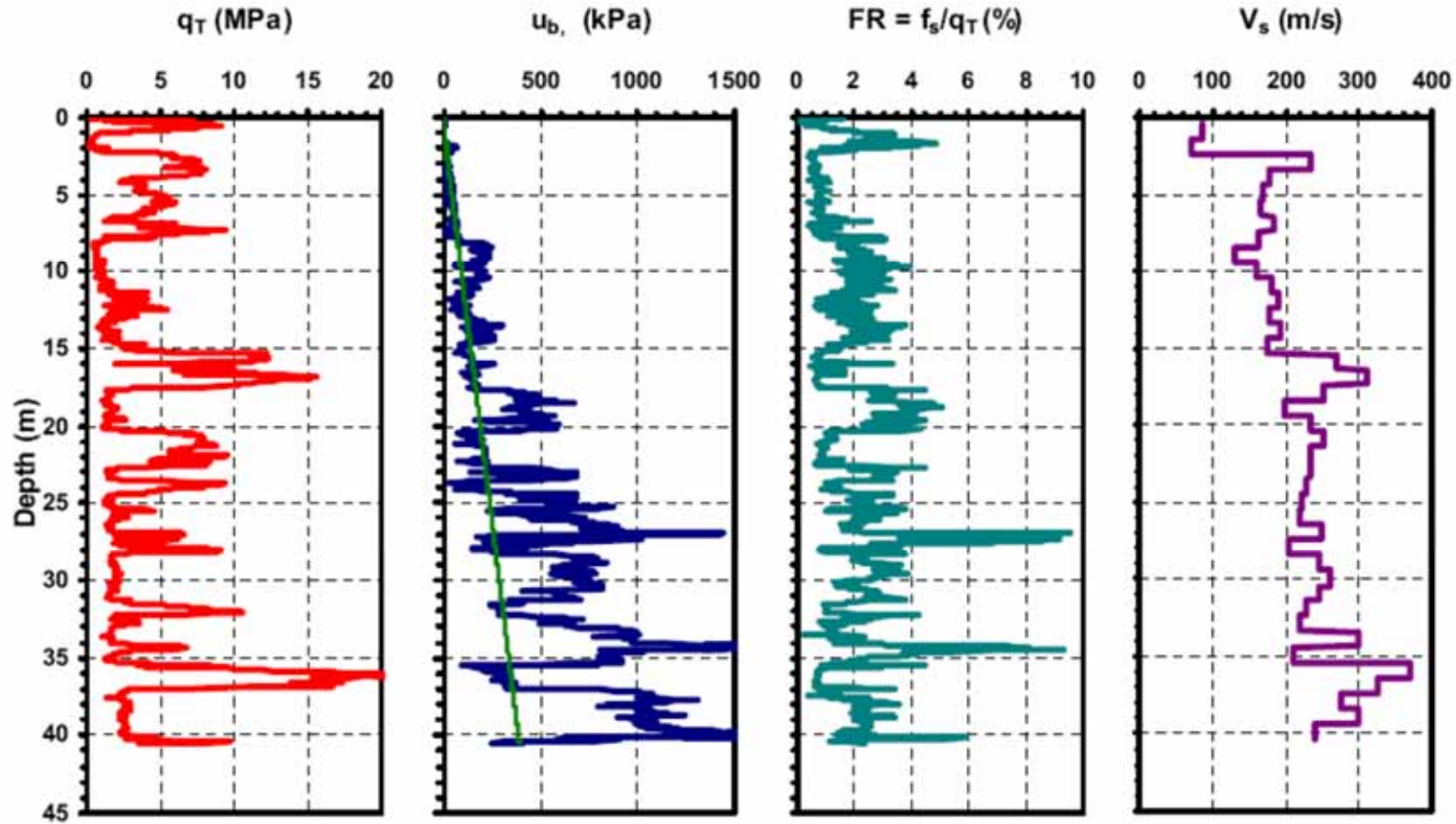
- Resistenza alla punta q_c
- Attrito laterale f_s
- Pressioni neutre u (piezocono)



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Presentazione delle misure



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Presentazione delle misure

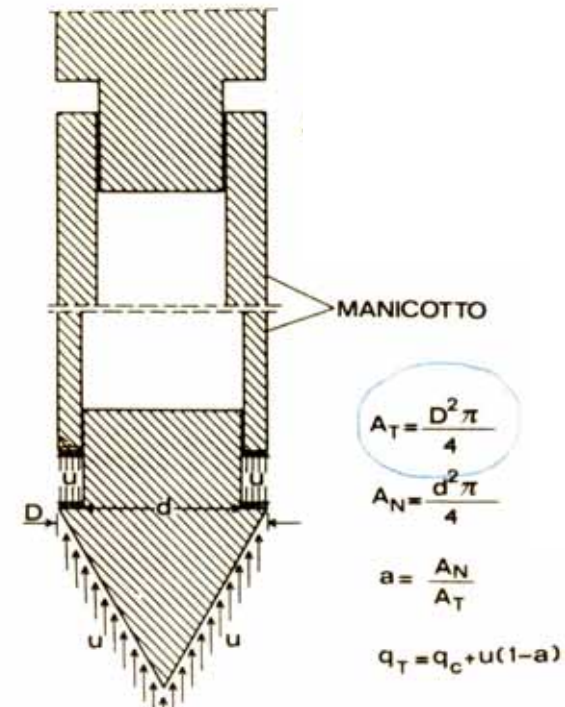


○ RAPPORTO DI FRIZIONE R_f :

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100$$

○ Resistenza alla punta corretta q_t :

$$q_t = q_c + \left(1 - \frac{A_N}{A_T}\right) \cdot u$$



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Interpretazione delle misure



Dalle misure di una prova penetrometrica, è possibile risalire a:

- Stratigrafia;
- Parametri di resistenza al taglio;
- Parametri di compressibilità;
- Storia tensionale del deposito (*da piezocono*)
- Caratteristiche di consolidazione dei materiali coesivi teneri (*da piezocono*)



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Applicabilità delle prove in sito



Group	Device	Soil Parameters													
		Soil type	Profile	u	$*\phi'$	s_u	I_D	m_v	c_v	k	G_0	σ_h	OCR	$\sigma-c$	
Penetrometers	Dynamic	C	B	-	C	C	C	-	-	-	C	-	C	-	
	Mechanical	B	A/B	-	C	C	B	C	-	-	C	C	C	-	
	Electric (CPT)	B	A	-	C	B	A/B	C	-	-	B	B/C	B	-	
	Piezocono	A	A	A	B	B	A/B	B	A/B	B	B	B/C	B	C	
	Piezocono sismico	A	A	A	B	A/B	A/B	B	A/B	B	A	B	B	B	
	Flat dilatometer (DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	-	B	B	B	C	
	Standard penetration test (SPT)	A	B	-	C	C	B	-	-	-	C	-	C	-	
Resistivity probe	B	B	-	B	C	A	C	-	-	-	-	-	-		
Pressuremeters	Pre-bored (PBP)	B	B	-	C	B	C	B	C	-	B	C	C	C	
	Self boring (SBP)	B	B	A ¹	B	B	B	B	A ¹	B	A ²	A/B	B	A/B ²	
	Full displacement (FDP)	B	B	-	C	B	C	C	C	-	A ²	C	C	C	
Others	Vane	B	C	-	-	A	-	-	-	-	-	-	B/C	B	
	Plate load	C	-	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	
	Screw plate	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	-	
	Borehole permeability	C	-	A	-	-	-	-	B	A	-	-	-	-	
	Hydraulic fracture	-	-	B	-	-	-	-	C	C	-	B	-	-	
	Crosshole/downhole/surface seismic	C	C	-	-	-	-	-	-	-	A	-	B	-	

(Da Lunne, Robertson & Powell, 1997)



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Applicabilità delle prove in sito



Group	Device	Ground Type						
		Hard rock	Soft rock	Gravel	Sand	Silt	Clay	Peat
Penetrometers	Dynamic	-	C	B	A	B	B	B
	Mechanical	-	C	C	A	A	A	A
	Electric (CPT)	-	C	C	A	A	A	A
	Piezocono	-	C	-	A	A	A	A
	Piezocono sismico	-	C	-	A	A	A	A
	Flat dilatometer (DMT)	C	C	-	A	A	A	A
	Standard penetration test (SPT)	-	C	B	A	A	A	A
Resistivity probe	-	C	-	A	A	A	A	

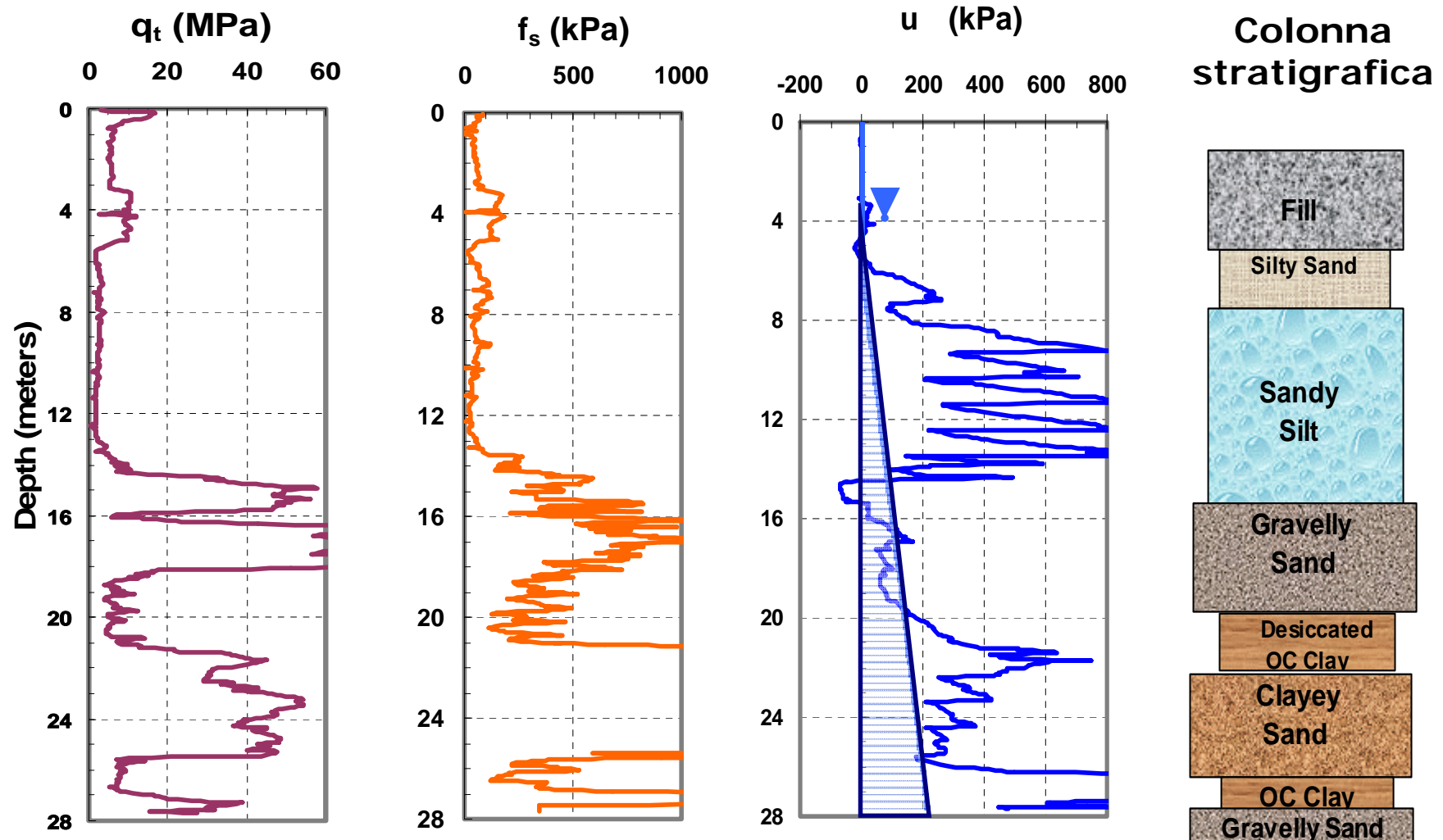
(Da Lunne, Robertson & Powell, 1997)



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Definizione della stratigrafia

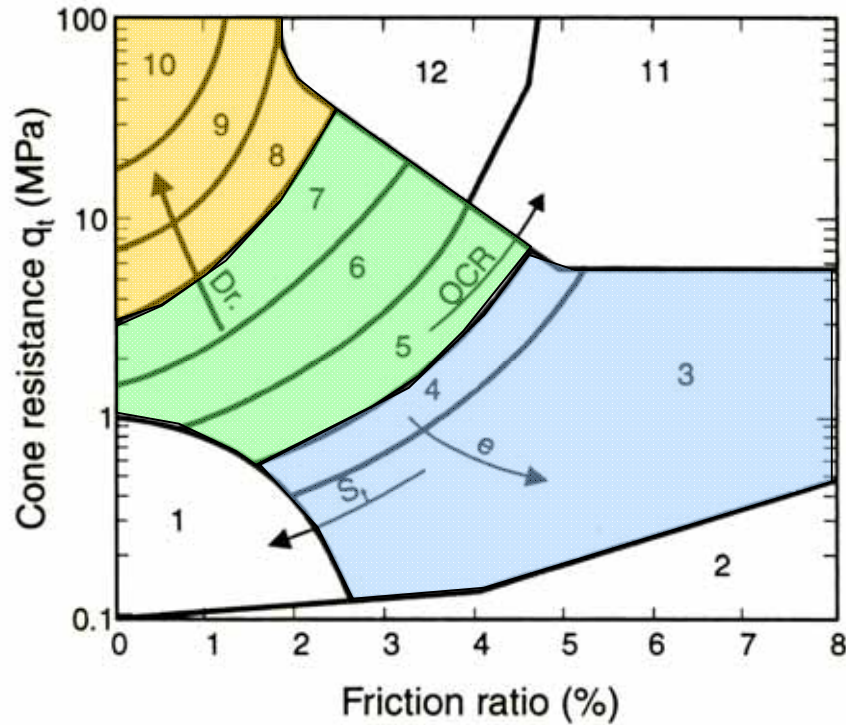


CPTU Profile, Downtown Memphis.
Prof. Mayne's web page.

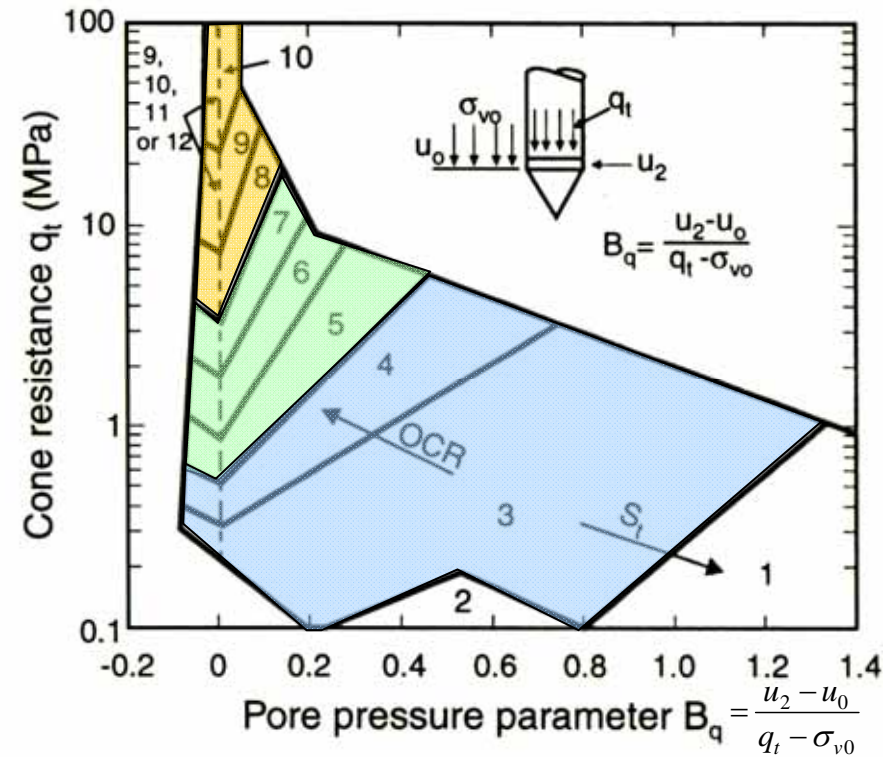


LAURA TONNI
Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)

Definizione della stratigrafia



Robertson, 1986



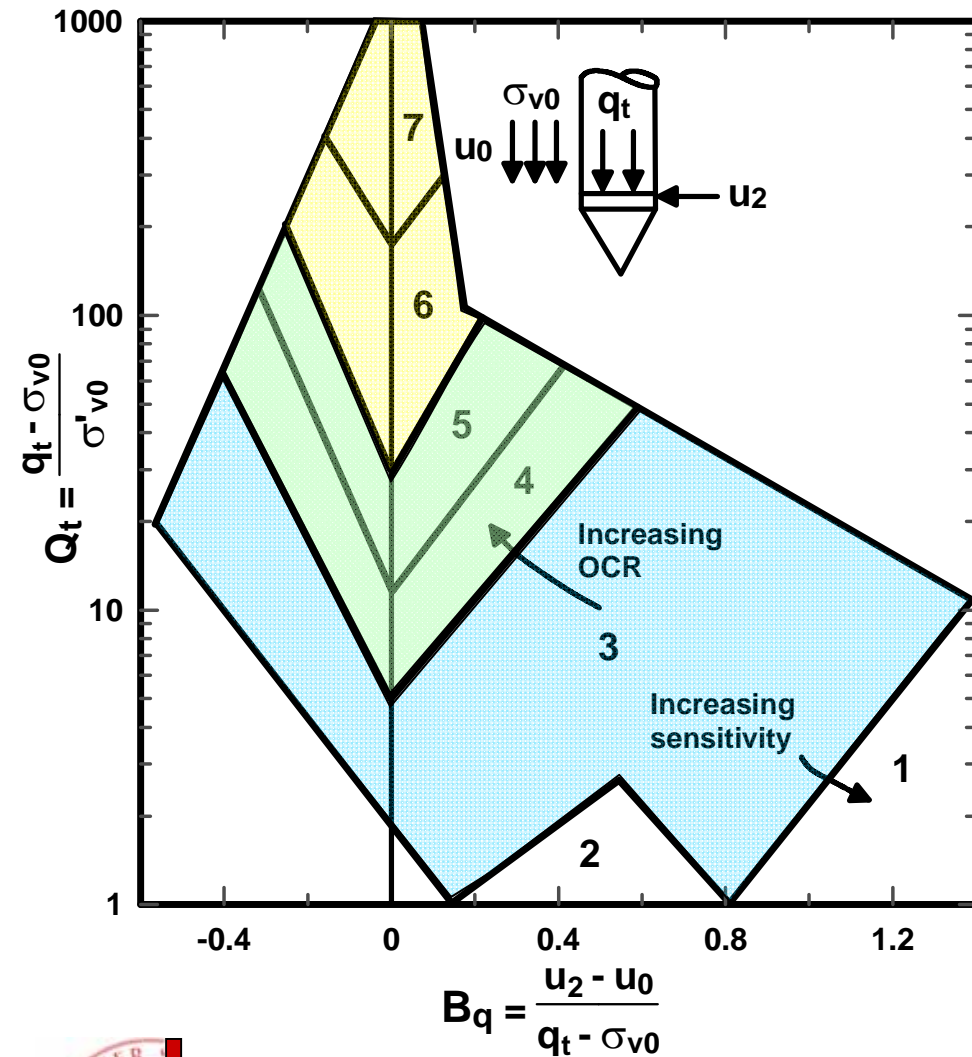
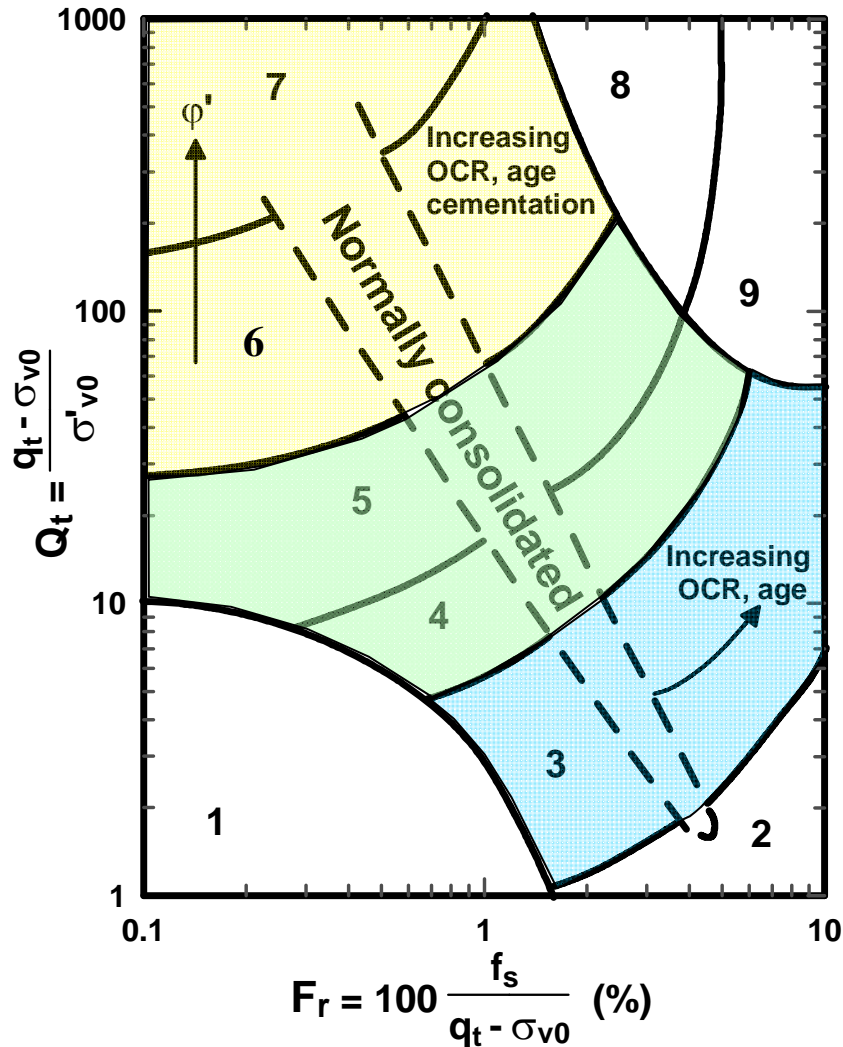
LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Definizione della stratigrafia



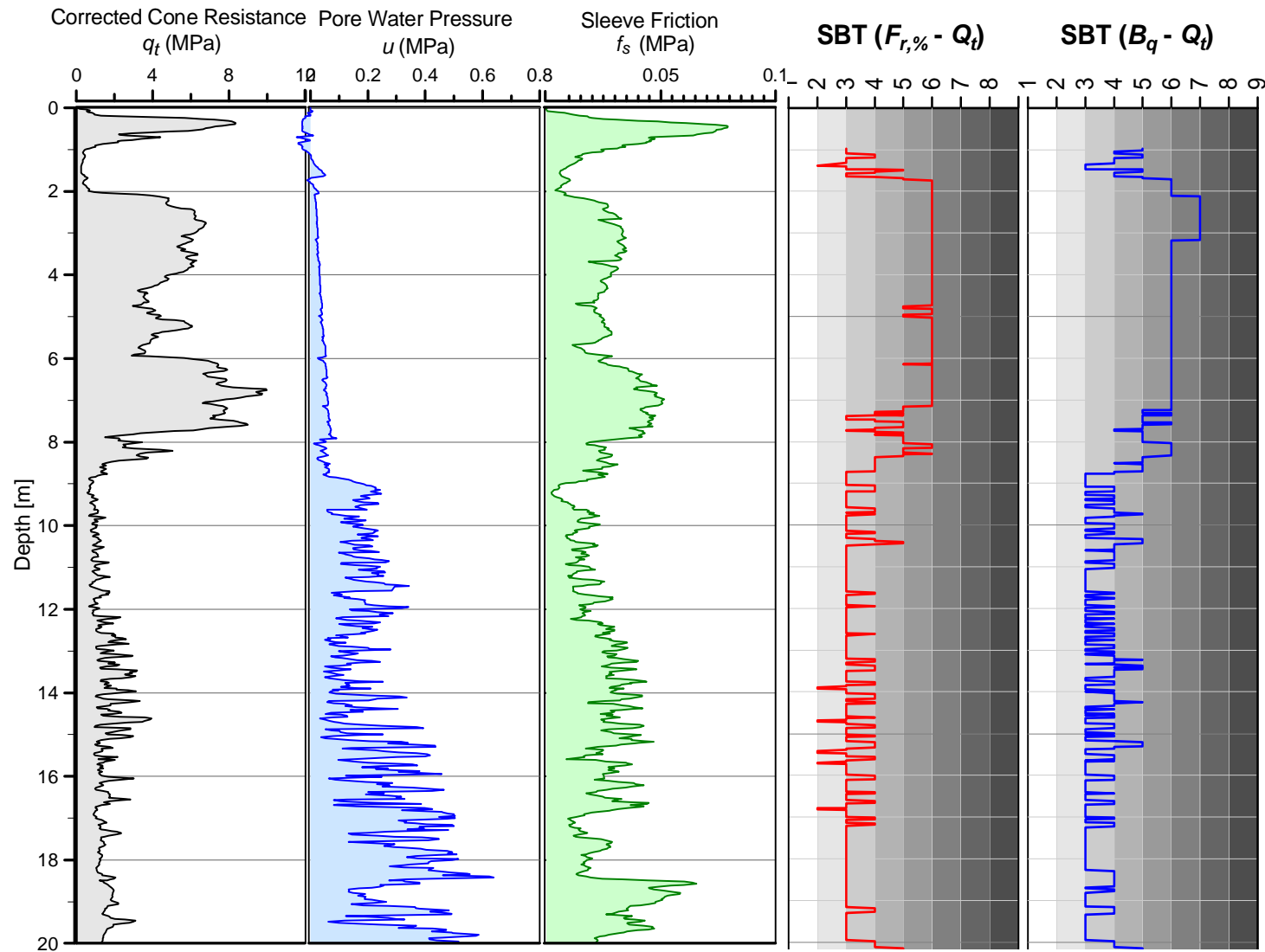
Robertson, 1990



LAURA TONNI

Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)

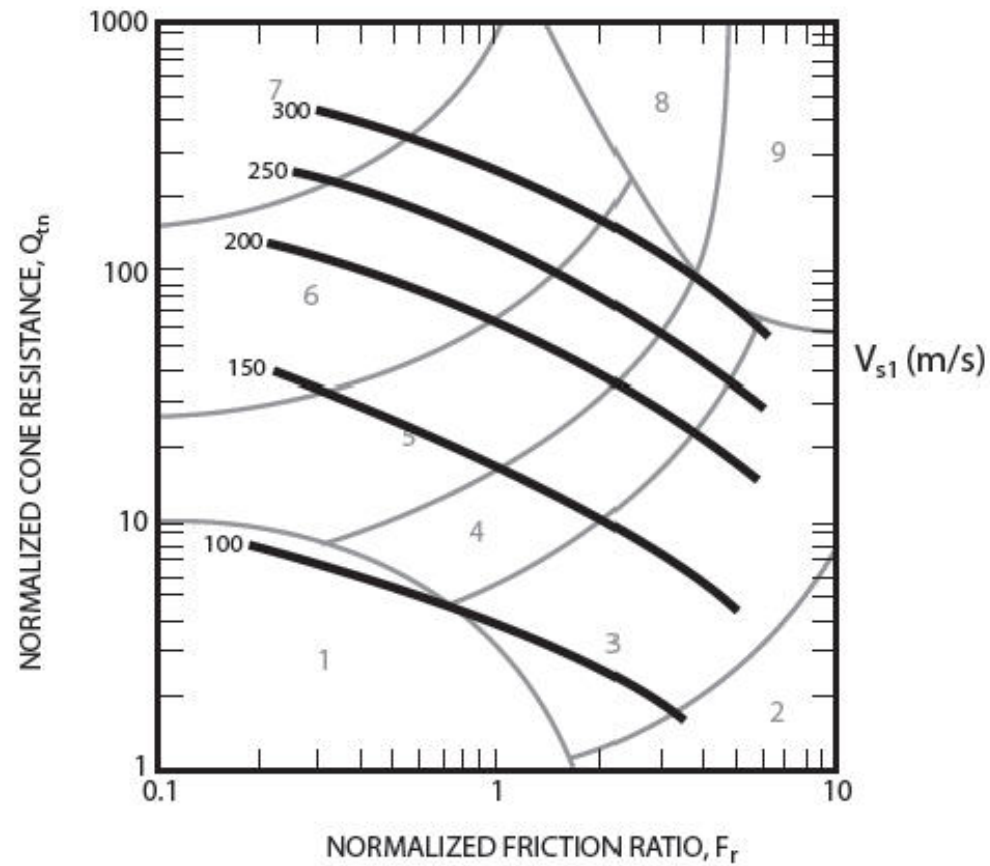
Definizione della stratigrafia



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Definizione della stratigrafia



Roberston, 2009



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Determinazione dei parametri



I metodi di interpretazione fanno riferimento a:

- Soluzioni teoriche basate su assunzioni fortemente semplificate
 - capacità portante;
 - espansione delle cavità in un mezzo elastoplastico;
 - approcci numerici
- Correlazioni di tipo empirico



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Determinazione dei parametri



L'avanzamento della punta **nei terreni a grana fine** è generalmente **NON DRENATO**.

Resistenza al taglio
non drenata

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}}$$

Modulo di
compressibilità

$$M = 8.25 \cdot (q_t - \sigma_{v0})$$

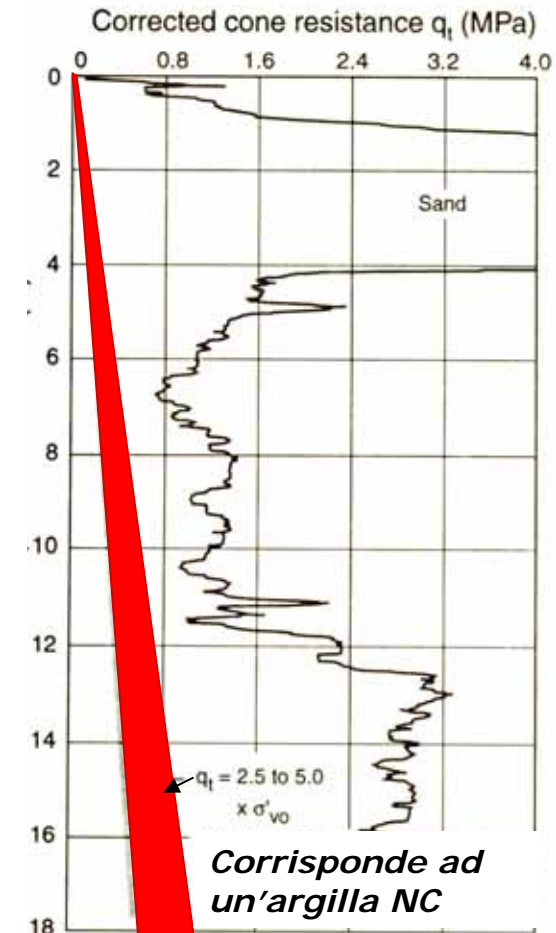
Kulhawy & Mayne, (1990)

Rapporto di
sovracconsolidazione

$$OCR = k \cdot \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right)$$

$$OCR = 2 \cdot \left[\frac{1}{1.95M + 1} \left(\frac{q_t - u}{\sigma'_{v0}} \right) \right]^{1.33}$$

Mayne, 1991



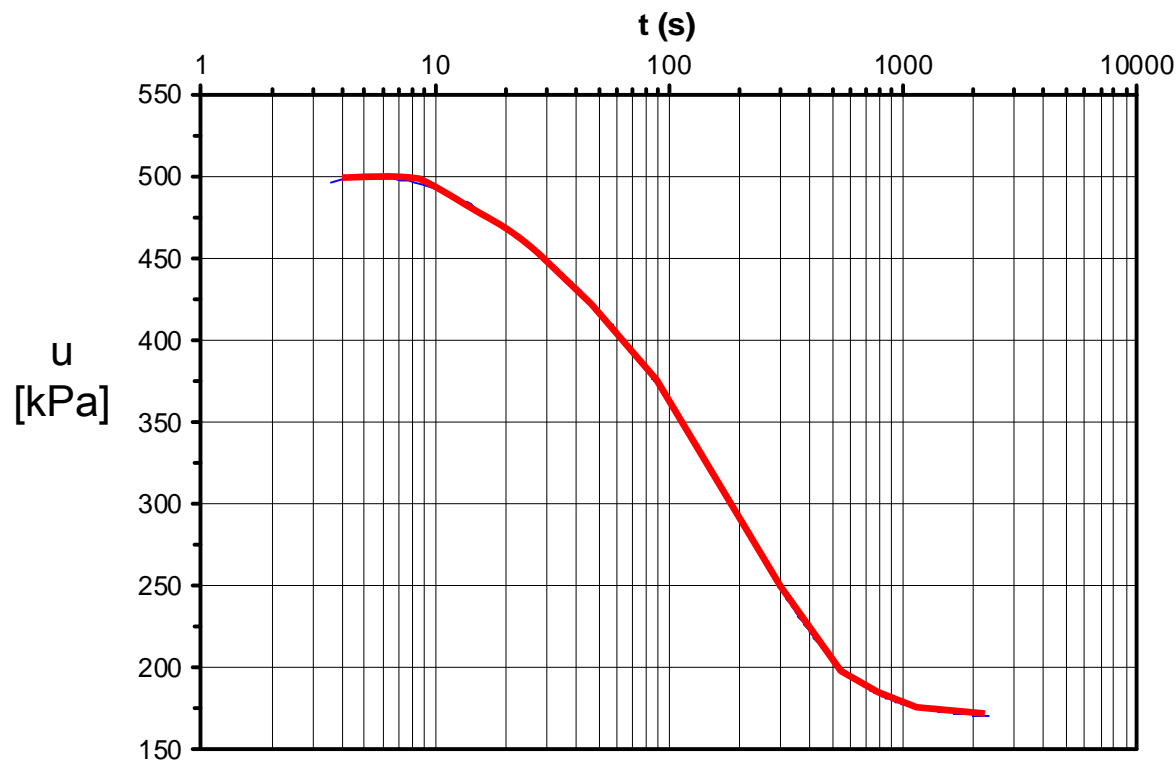
LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Determinazione dei parametri



Con il piezocono è possibile effettuare **PROVE DI DISSIPAZIONE** della pressione neutra, da cui si possono ottenere informazioni sulle **caratteristiche di consolidazione** del terreno.



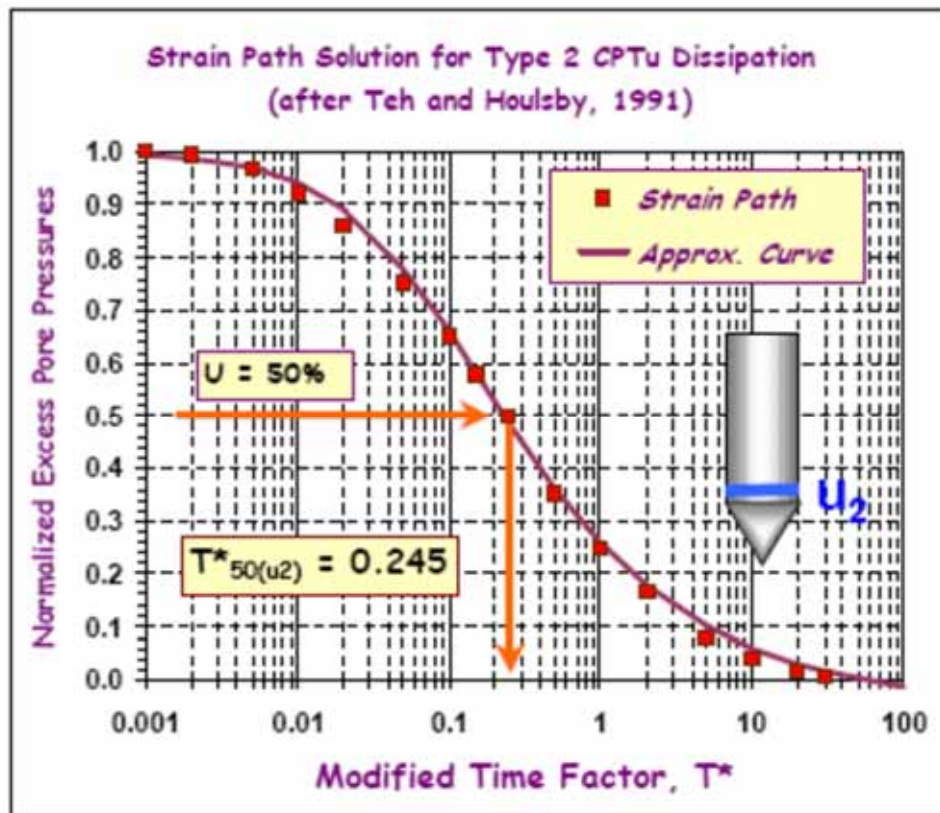
LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Determinazione dei parametri



L'approccio più comunemente usato è quello proposto da Houlby & Teh (1991), che permette di determinare un **coefficiente di consolidazione orizzontale** c_h .



$$c_h = \frac{T^*_{50} \cdot r^2 \cdot \sqrt{I_r}}{t_{50}}$$

$$I_r = G/c_u$$



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**

Determinazione dei parametri



L'avanzamento della punta **nei terreni a grana grossa** è generalmente **DRENATO**.

**Resistenza al taglio
drenata**

Impossibilità di ottenere relazioni q_c - ϕ' semplici e generali.

$$\phi' = 17.6 + 11 \cdot \log \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right)$$

Kulhawy & Mayne, (1990)

Per sabbie non cementate pulite, prevalentemente quarzose

**Modulo di
compressibilità**

$$M = 4q_c \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_z/2}{\sigma'_{v0}}}$$

per $q_c < 10$ MPa

$$M = (2q_c + 20) \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_z/2}{\sigma'_{v0}}}$$

per $10 < q_c < 50$ MPa

Lunne & Christophersen, 1983



LAURA TONNI

**Prova Penetrometrica con piezocono
(CPTU, SCPTU)**