

Ordine Geologi delle Marche con patrocinio Università di Camerino

**Corso di aggiornamento professionale
LE PROVE PENETROMETRICHE
24 Marzo 2023**

Diego Lo Presti

diego.lopresti@ordineingegneripisa.it (docente in pensione, consulente Pagani)

prof.diegolopresti@smstrutture.it (consulente Studio Masiello Strutture)

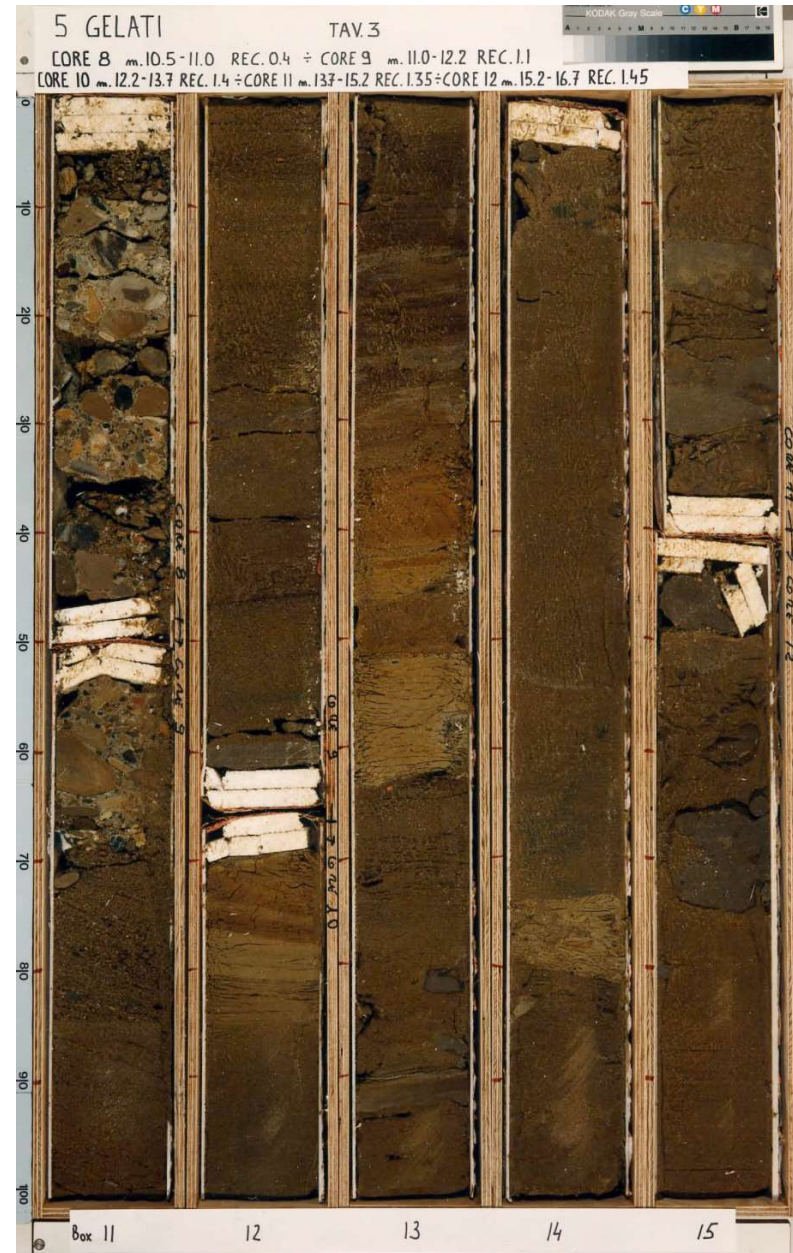
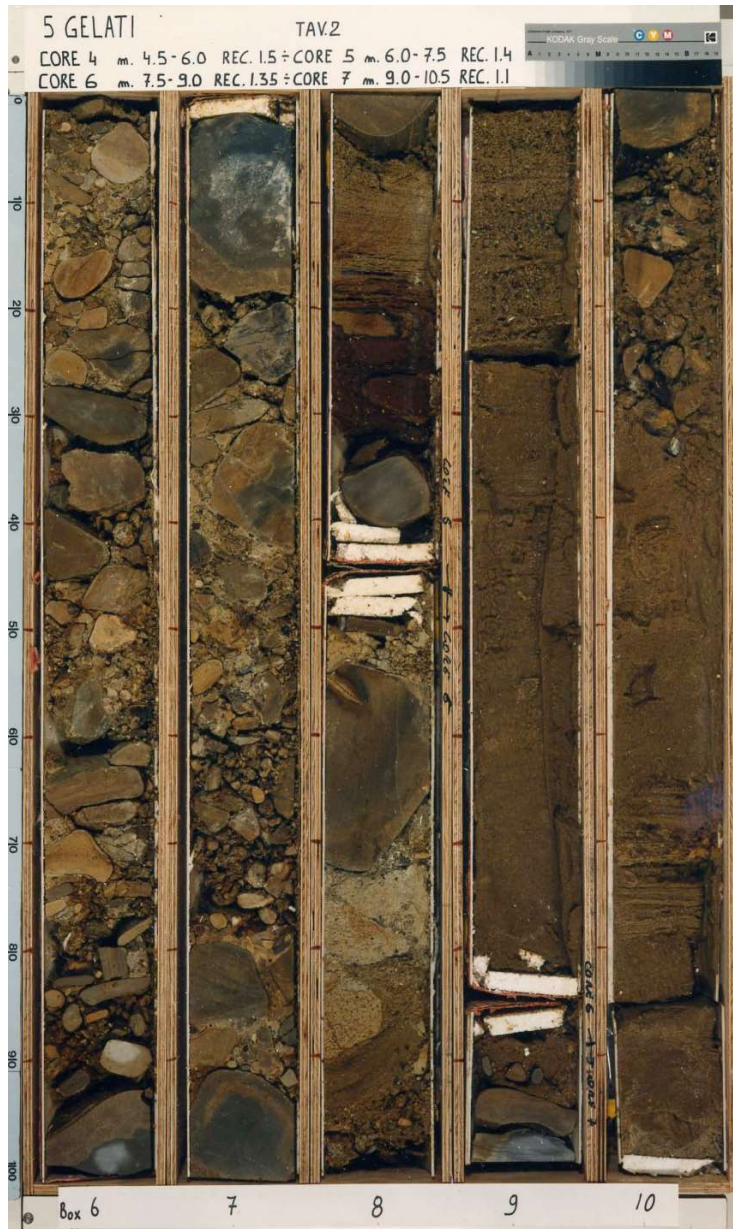
SOMMARIO

1. Ruolo delle indagini in sito: potenzialità e limiti
2. Le indagini penetrometriche (scopo e campo d'applicazione)
3. Prove penetrometriche statiche (modalità esecutive, normativa, interpretazione)
 - a. CPT meccanica
 - b. CPTU (piezocono)
 - i. Profilo stratigrafico indiretto (metodi ed esempi), parametri
 - ii. Valutazione del potenziale di liquefazione (metodi ed esempi)
 - iii. Stima dei cedimenti di fondazioni superficiali in terreni incoerenti (metodi ed esempi)
 - iv. Stima del carico limite di fondazioni profonde (metodi ed esempi)
 - c. S-CPTU (piezocono sismico)
 - i. Determinazione sperimentale del profilo di velocità e suo utilizzo
4. Prove penetrometriche dinamiche (modalità esecutive, normativa, interpretazione)
 - a. SPT in foro
 - i. Valutazione del potenziale di liquefazione (esempi)
 - ii. Stima dei cedimenti di fondazioni superficiali in terreni incoerenti (esempi)
 - iii. Stima del carico limite di fondazioni profonde (esempi)
 - b. Dinamiche continue
 - i. Correlazioni tra N_{spt} ed N_{20} (esempi)

NECESSITA' PROVE IN SITO

- Depositi granulari
- Variabilità
- Costi - Tempi

- **LABORATORIO/ SITO
COMPLEMENTARI!**





D. Lo Presti et al.

GERARCHIA INDAGINI IN SITO

- INDAGINI GEOFISICHE
- SBPT
- DMT
- CPT, FVT
- DPSH SPT

CAMPO APPLICAZIONE PENETROMETRIE

- SPT, DPSH (TERRENI GRANULARI)
- CPT, CPTU, SCPTU (ARGILLE LIMI
SABBIE)

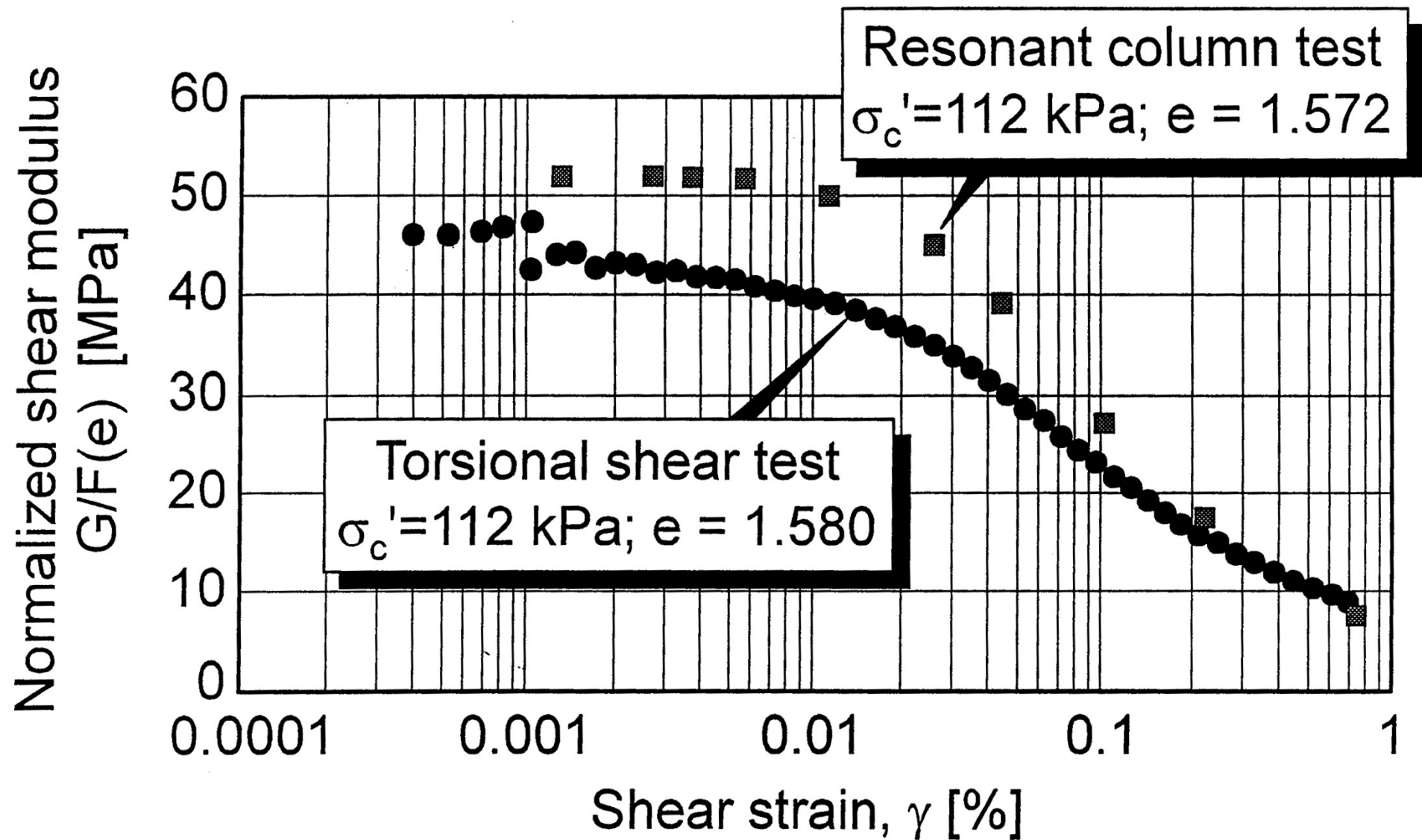
SCOPO

- SPT, DPSH
 - Dr – parametri di resistenza (φ')
 - Cedimenti fondazioni superficiali in sabbia (Burland e Burbidge)
 - Carico limite pali
 - Liquefazione

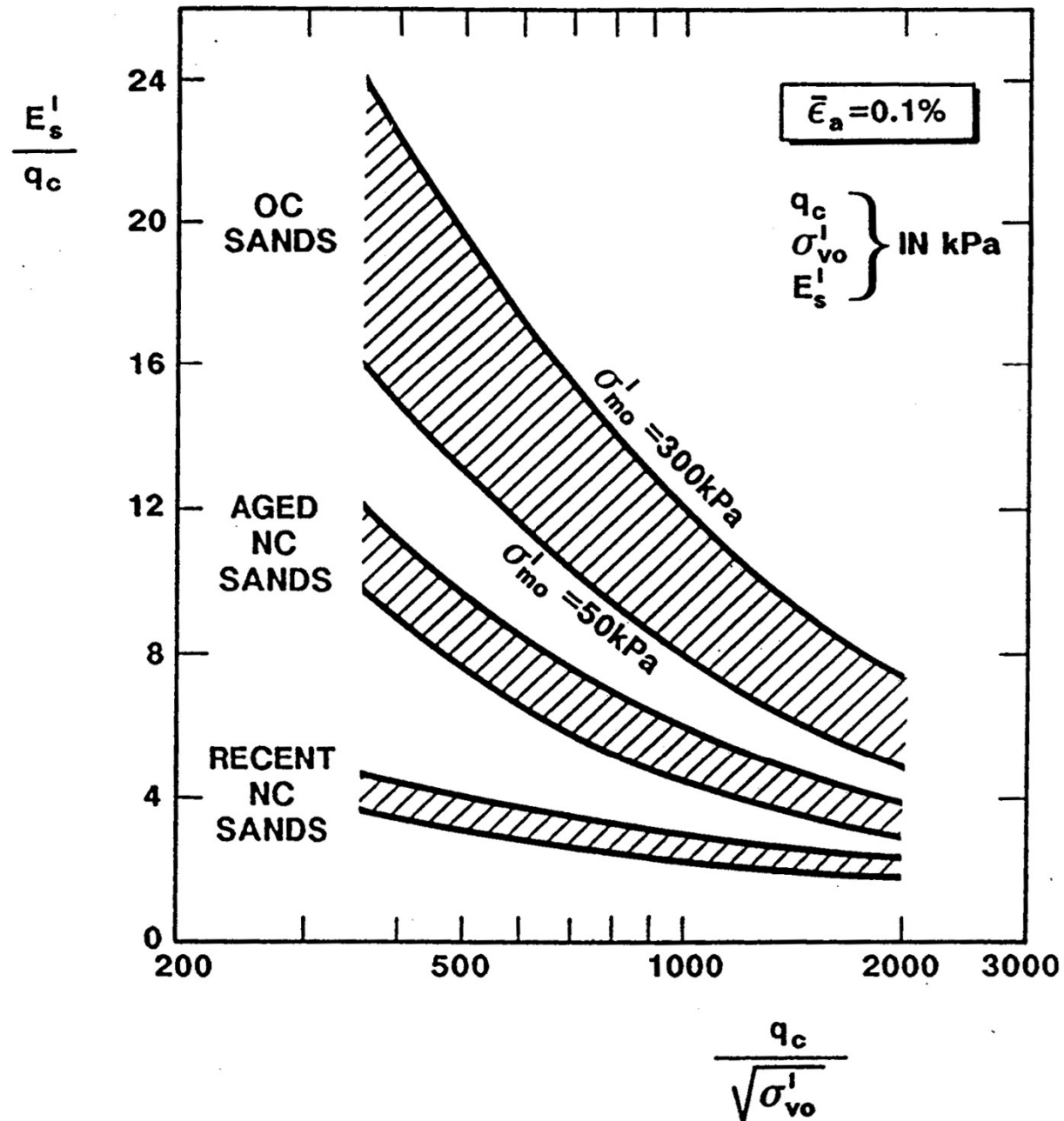
SCOPO

- SCPTU (parametri)
 - C_u (semiempirico)
 - $C_u = (q_t - \sigma_{vo})/Nkt$
 - $Nkt = 15 - 30$
 - Angolo resistenza al taglio ϕ' (empirico)
 - $c' = 0.02\sigma'_p = f(\text{OCR})$ (empirico)
 - OCR, M, E (empirico)
 - Profilo stratigrafico indiretto (empirico)
 - K, V_s , V_p misure ripetute

SHEAR MODULUS OF ISOTROPICALLY CONSOLIDATED UPPER PISA CLAY



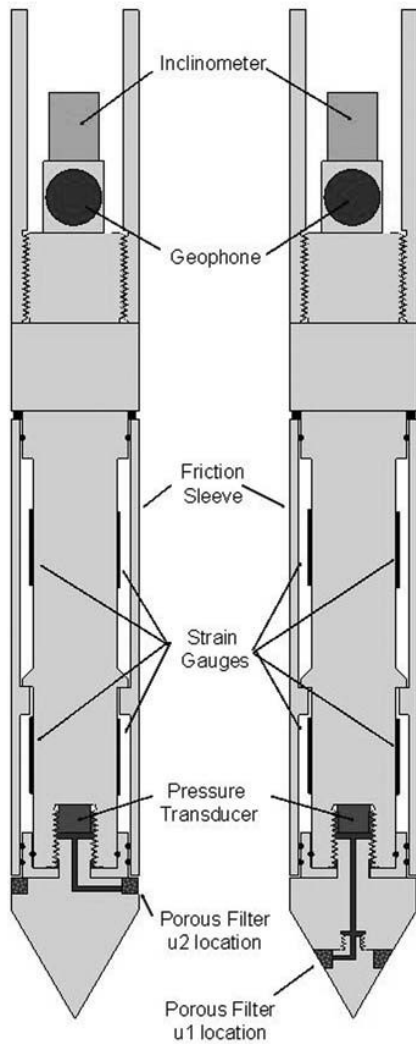
EVALUTATION OF DRAINED YOUNG' S MODULUS FROM CPT FOR SILICA SANDS



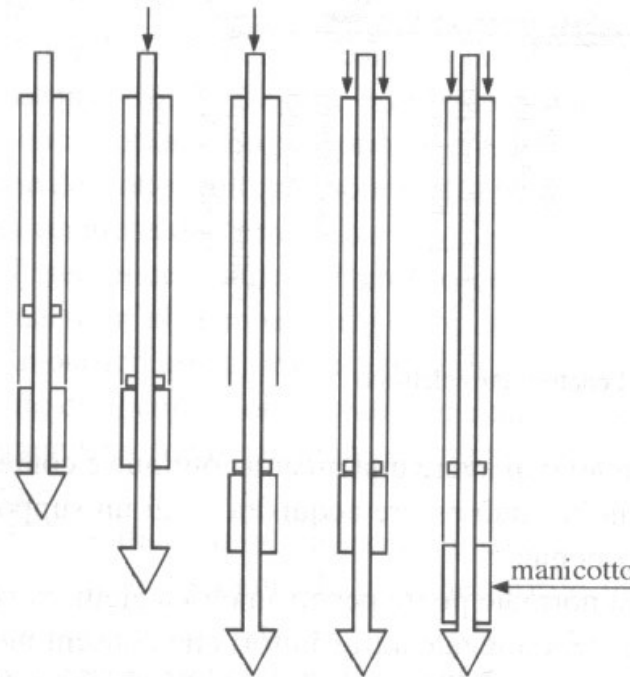
SCOPO

- SCPTU
 - Cedimenti fondazioni superficiali (Schmertmann)
 - Carico limite pali
 - Liquefazione
 - Categoria di sottosuolo

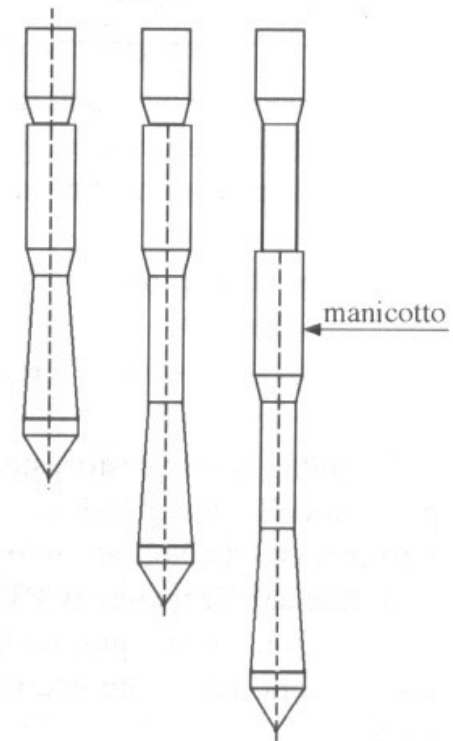
Attrezzatura (CPTU – CPT)



Schema della prova con manicotto



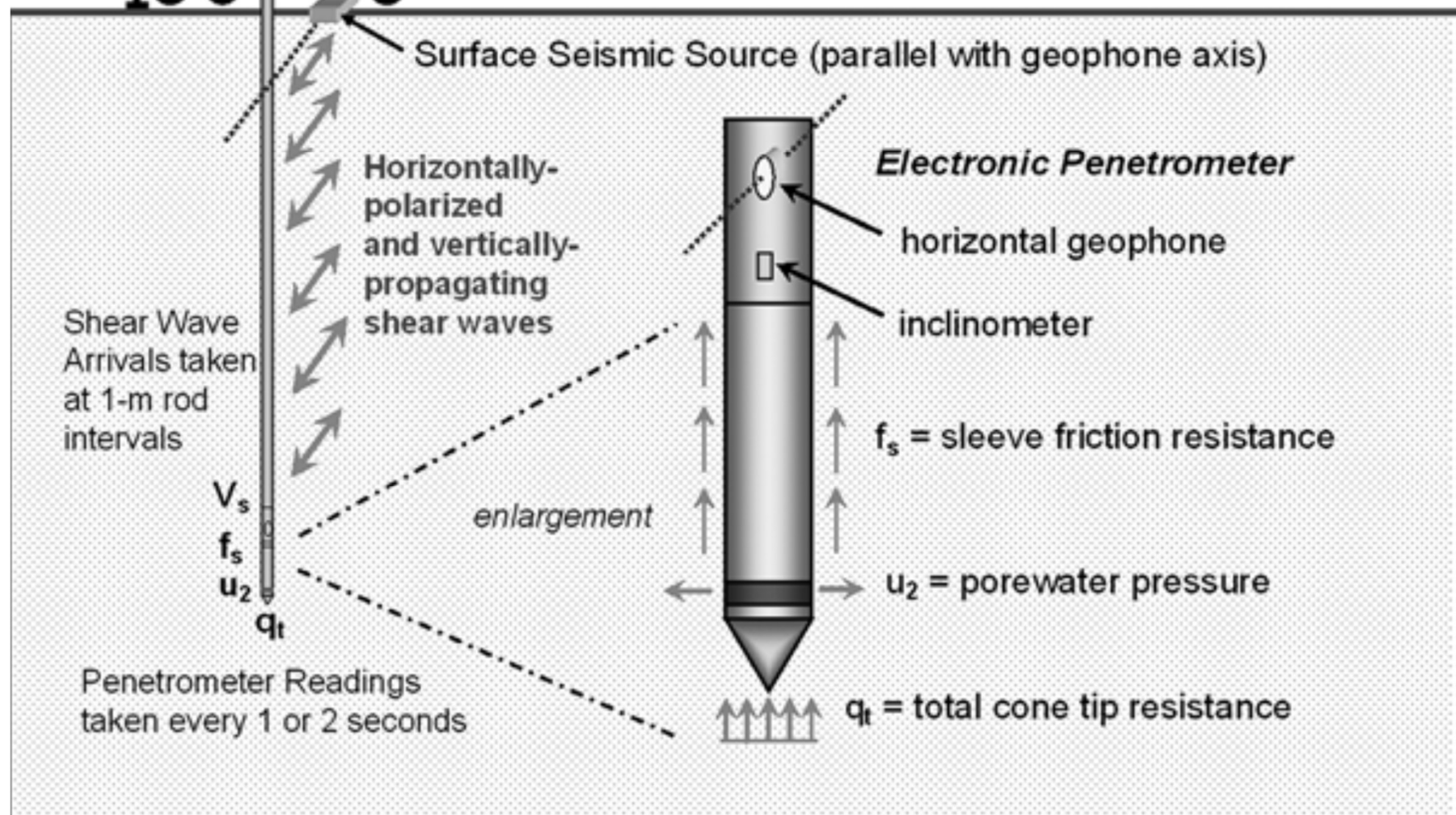
Particolare della punta con il manicotto



Cone Truck

Seismic Cone Penetration Test (SCPT)

ASTM D 5778 and ASTM STP 1213



GEOFONI O ACCELEROMETRI

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g$$

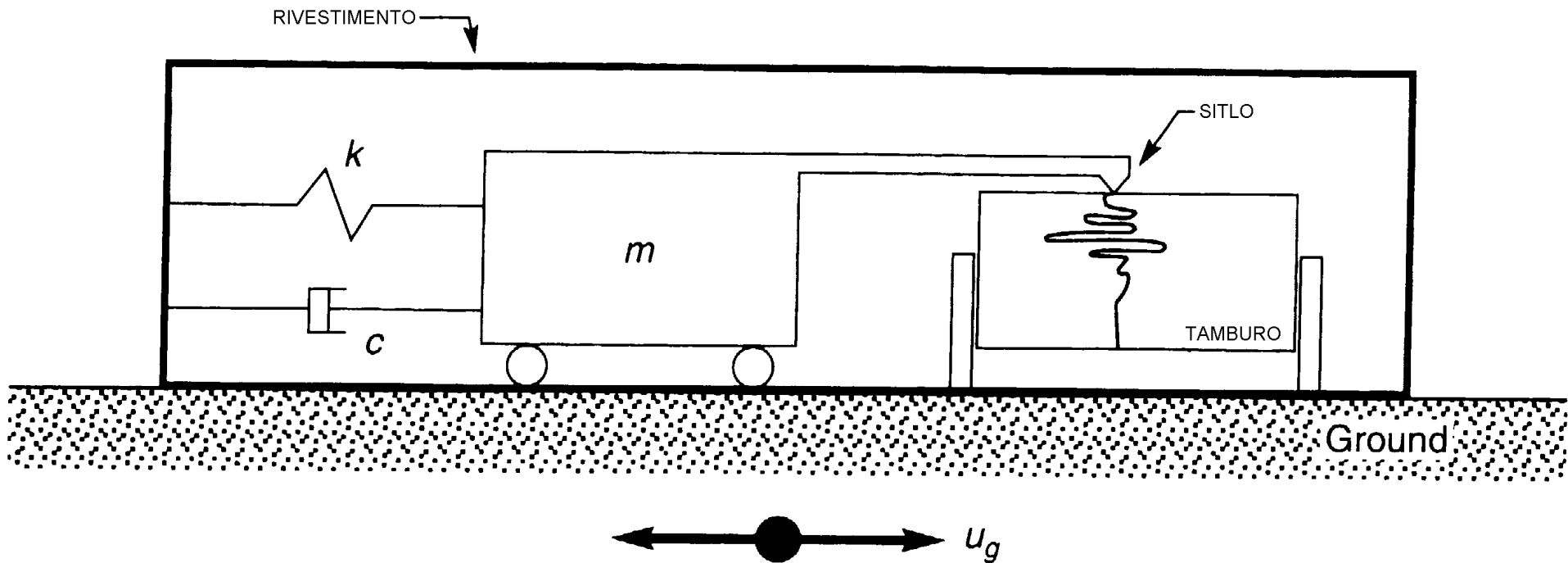
$$\beta = \omega_g / \omega_n$$

$$\omega_n = \sqrt{k/m}$$

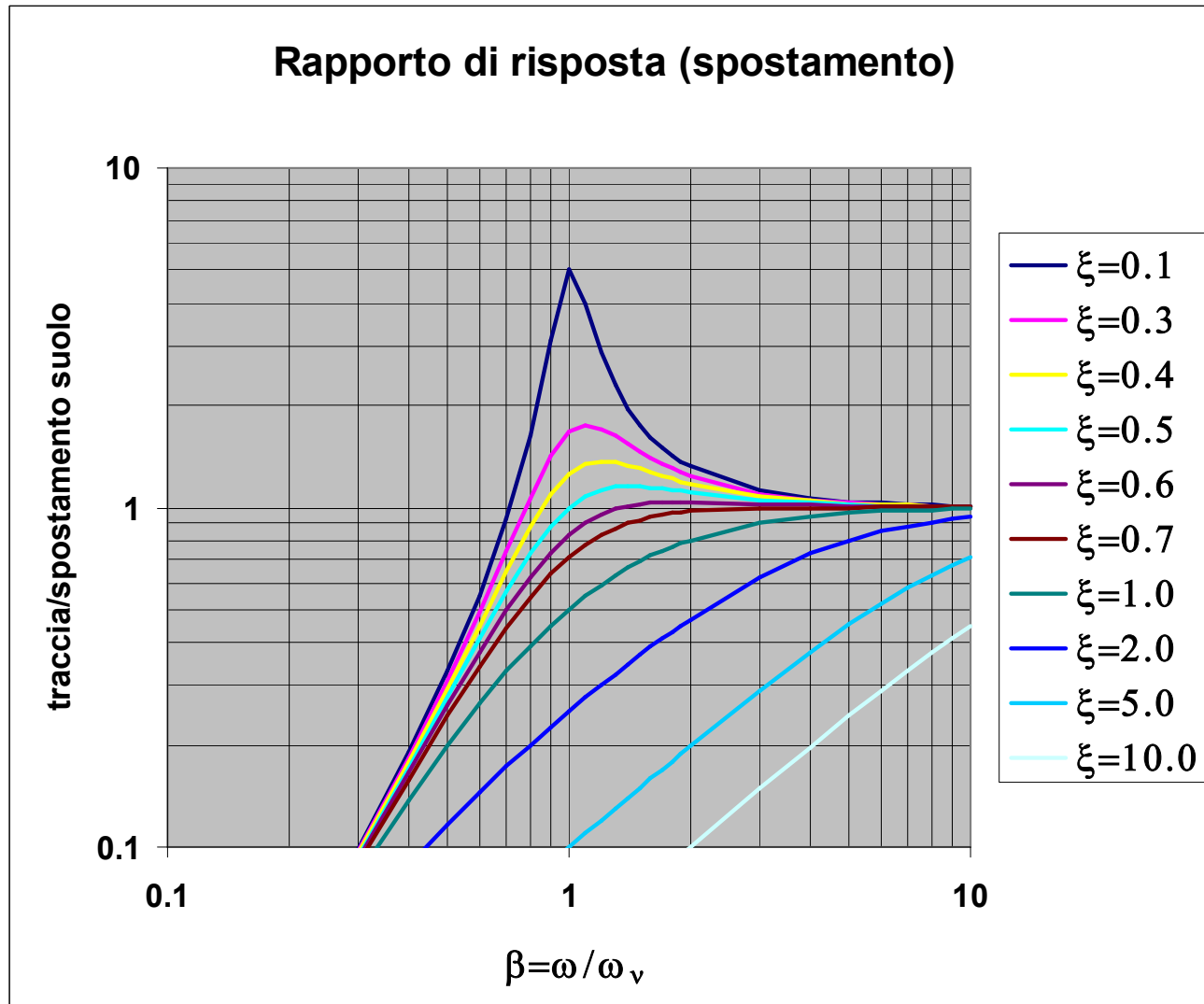
$$\xi = c / 2\sqrt{km}$$

$$\frac{|u|}{|u_g|} = \frac{\beta^2}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$

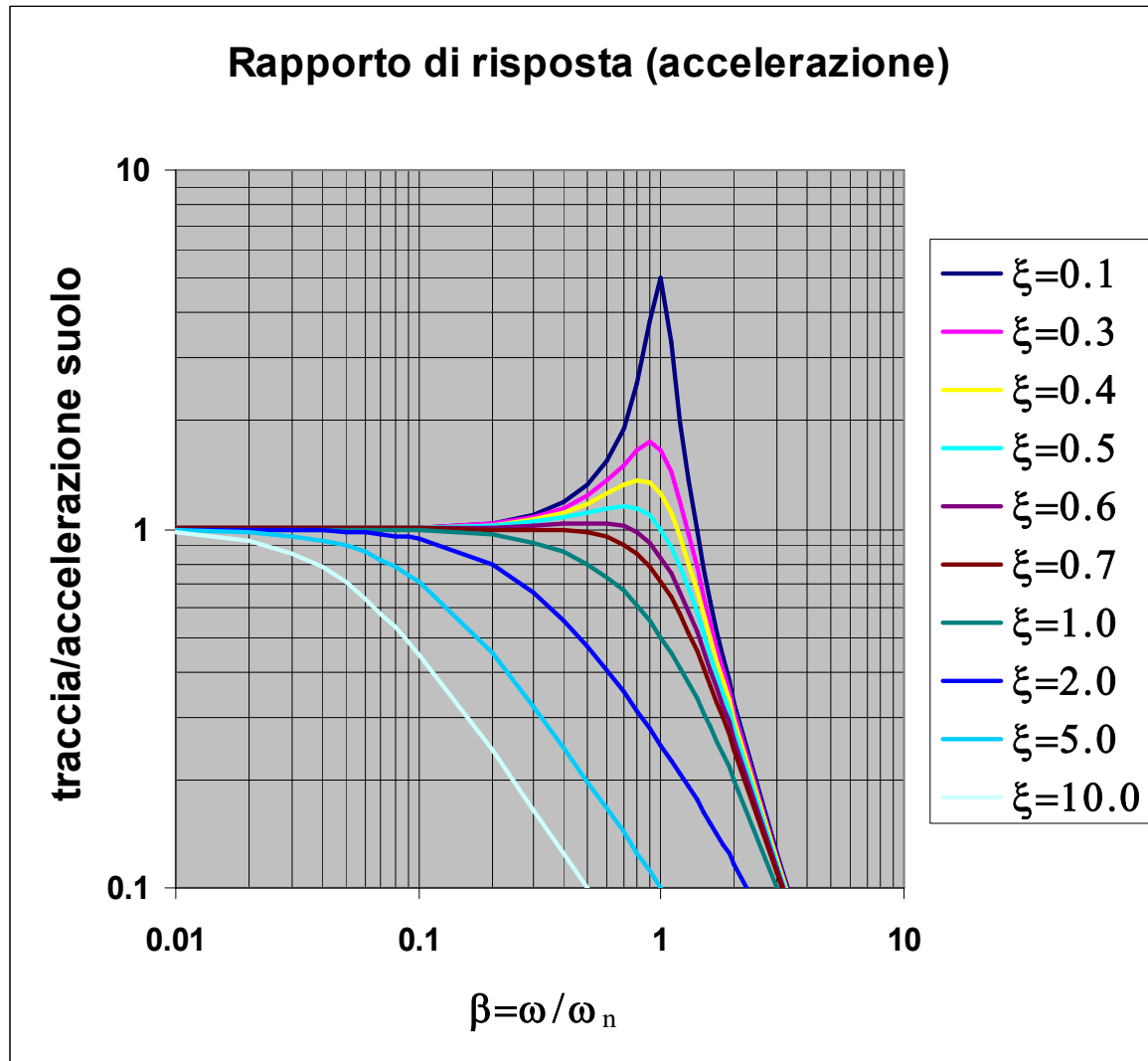
$$\frac{|u|}{|\ddot{u}_g|} = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$



RAPPORTO SPOSTAMENTO STRUMENTO – SPOSTAMENTO AL SUOLO



RAPPORTO SPOSTAMENTO STRUMENTO – ACCELERAZIONE AL SUOLO



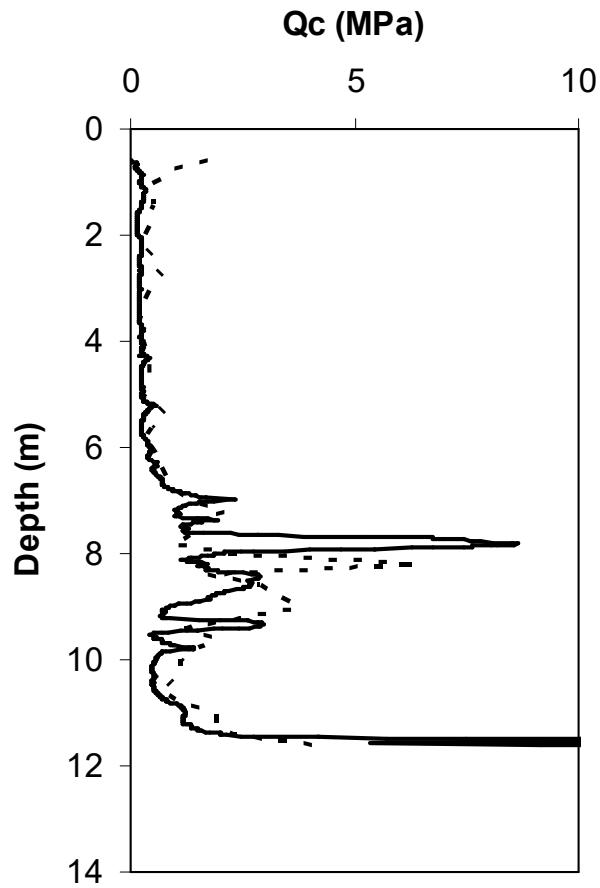
MODALITA' E MISURE

- INFIGGERE IL CONO NEL TERRENO ALLA VELOCITA' DI 20 mm/s
 - ARGILLE (NON DRENATE)
 - SABBIE (DRENATE)
- CPT (q_c , f_s) – OGNI 20 cm (ASTM D3441)
- CPTu (q_c , f_s , i , u) – OGNI 1-2 cm (ASTM D5778)
 - Posizione filtro
- SCPTu (q_c , f_s , i , u , t_s , t_p)

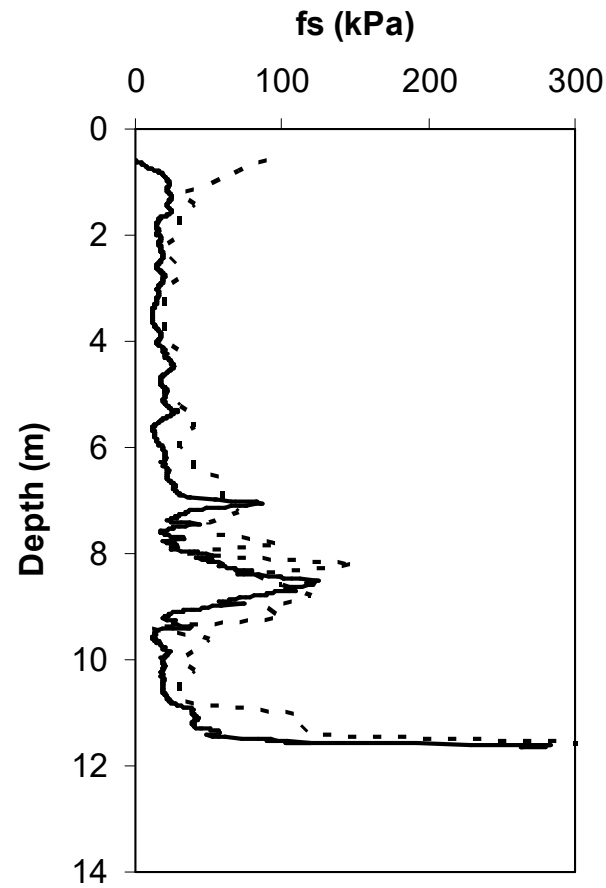
qc ed fs da CPT e CPTU coincidono?

- $q_c(\text{CPT}) < q_c(\text{CPTe} - \text{CPTU})$
 - Sabbie dense (effetto forma)
- $q_c(\text{CPT}) > q_c(\text{CPTe} - \text{CPTU})$
 - Sabbie sciolte e argille (attrito laterale)
- $f_s(\text{CPT}) > f_s(\text{CPTe} - \text{CPTU})$

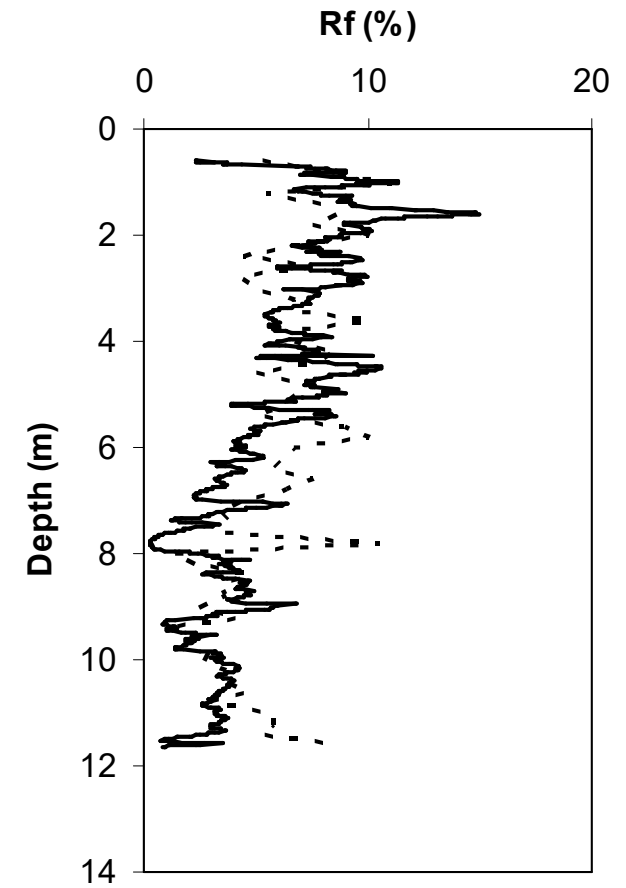
CONFRONTO CPT - CPTU



— CPTu - - - - CPT

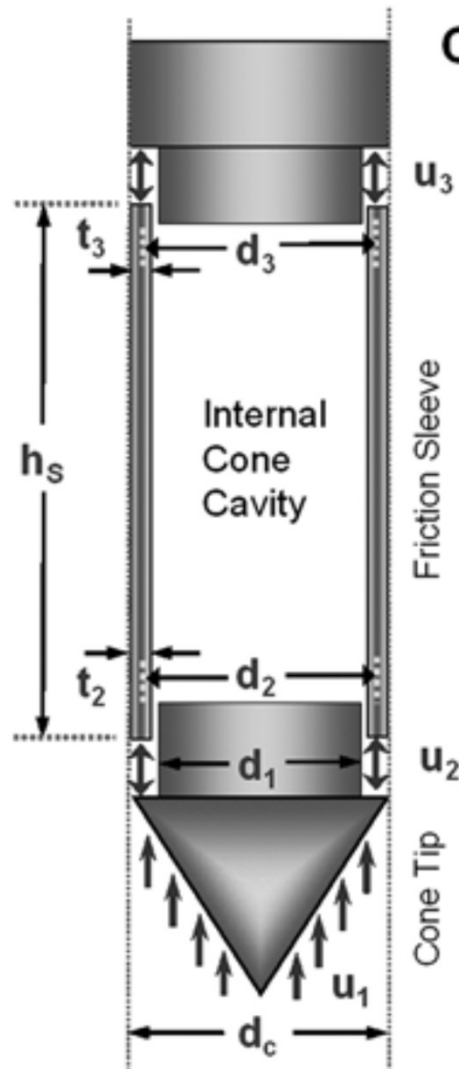


— CPTu - - - - CPT



— CPTu - - - - CPT

RESISTENZA ALLA PUNTA E ATTRITO LATERALE TOTALI



Corrections for Tip and Sleeve Readings

- d_j = diameter geometry (as shown)
- t_j = thickness of friction sleeve
- u_i = measured porewater pressure
- q_c = measured cone tip resistance
- f_s = measured sleeve friction
- q_t = total cone tip resistance
- f_t = total sleeve resistance
- a_n = tip net area ratio from triaxial test
- b_n = sleeve net ratio from triaxial test
- h_s = height of sleeve

Sleeve Friction:

$$f_t = f_s - (\pi d_2 t_2 u_2 + \pi d_3 t_3 u_3) / (\pi d_c h_s)$$

$$f_t \approx f_s - b_n u_2$$

Tip Resistance:

$$q_t = q_c + (1 - a_n) u_2$$

PROFONDITA' DI INFLUENZA

- Quale spessore si può individuare?
- Sabbie sciolte/sabbie dense 4d prima, 10d dopo
- Sabbie dense/sabbie sciolte, 18d prima, 1.7d dopo
- Sabbie/argille soffici 10d prima, 1.7d dopo
- Argille soffici/sabbie 1.7d prima, 6d dopo

INTERPRETAZIONE – PROFILO STRATIGRAFICO

- Begemann (1965)
- Schmertmann (1978)
- Searle (1979)

- Douglas e Olsen (1981)

- Robertson e Campanella (1986)
- Robertson (1990)
- Eslami e Fellenius (1997)

CRITERI

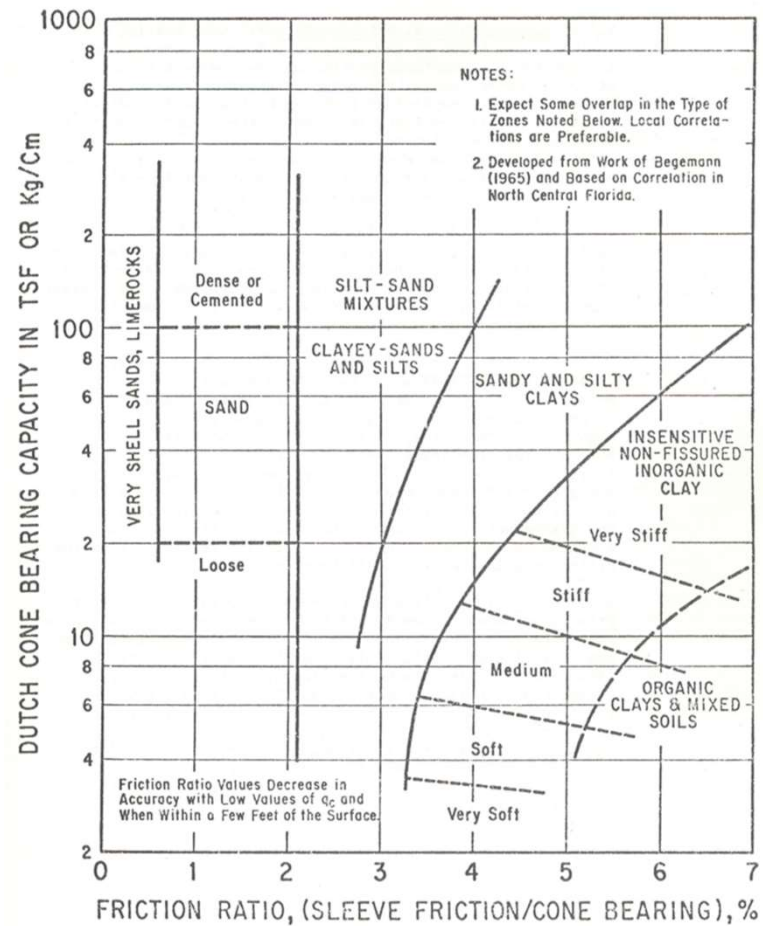
$$q_c = N_{\gamma q} \cdot \sigma'_{vo}$$

$$f_s = K \cdot \tan \delta \cdot \sigma'_{vo}$$

$$q_c = N_c \cdot C_u + \sigma_{vo}$$

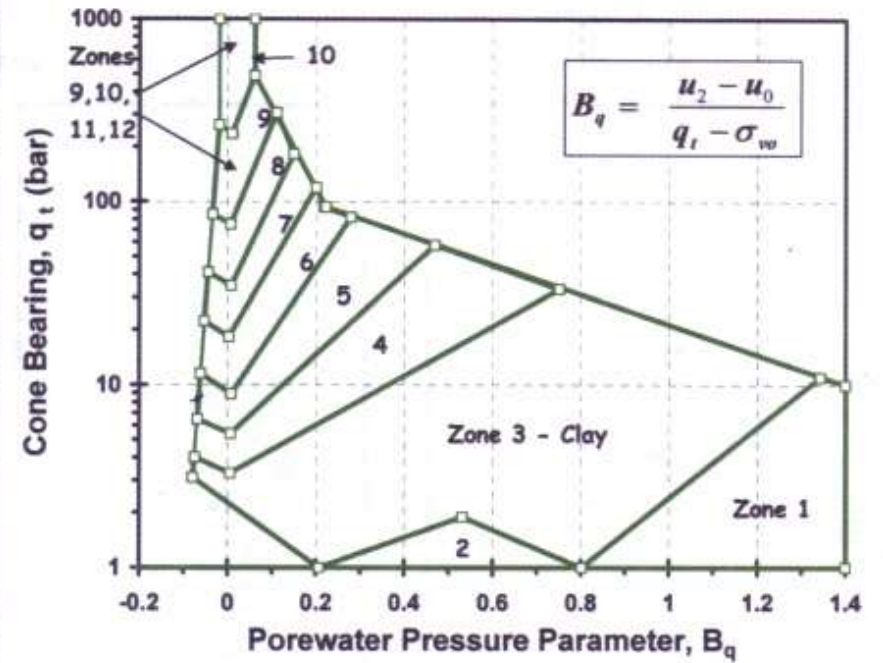
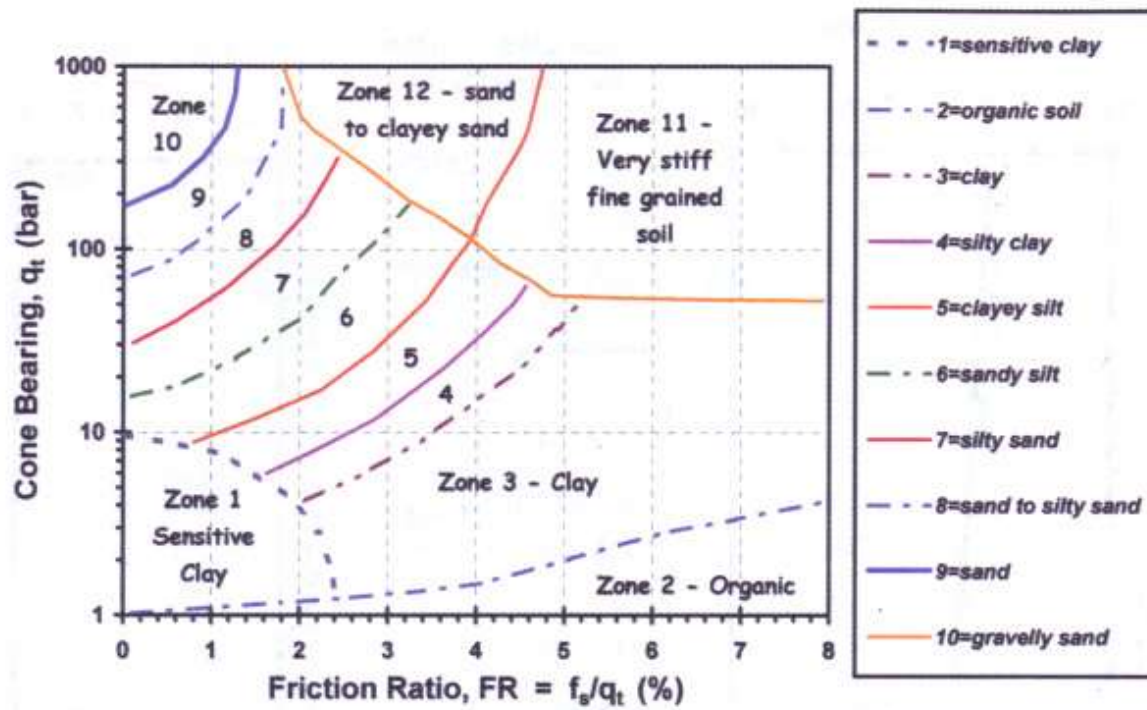
$$f_s = \alpha \cdot C_u$$

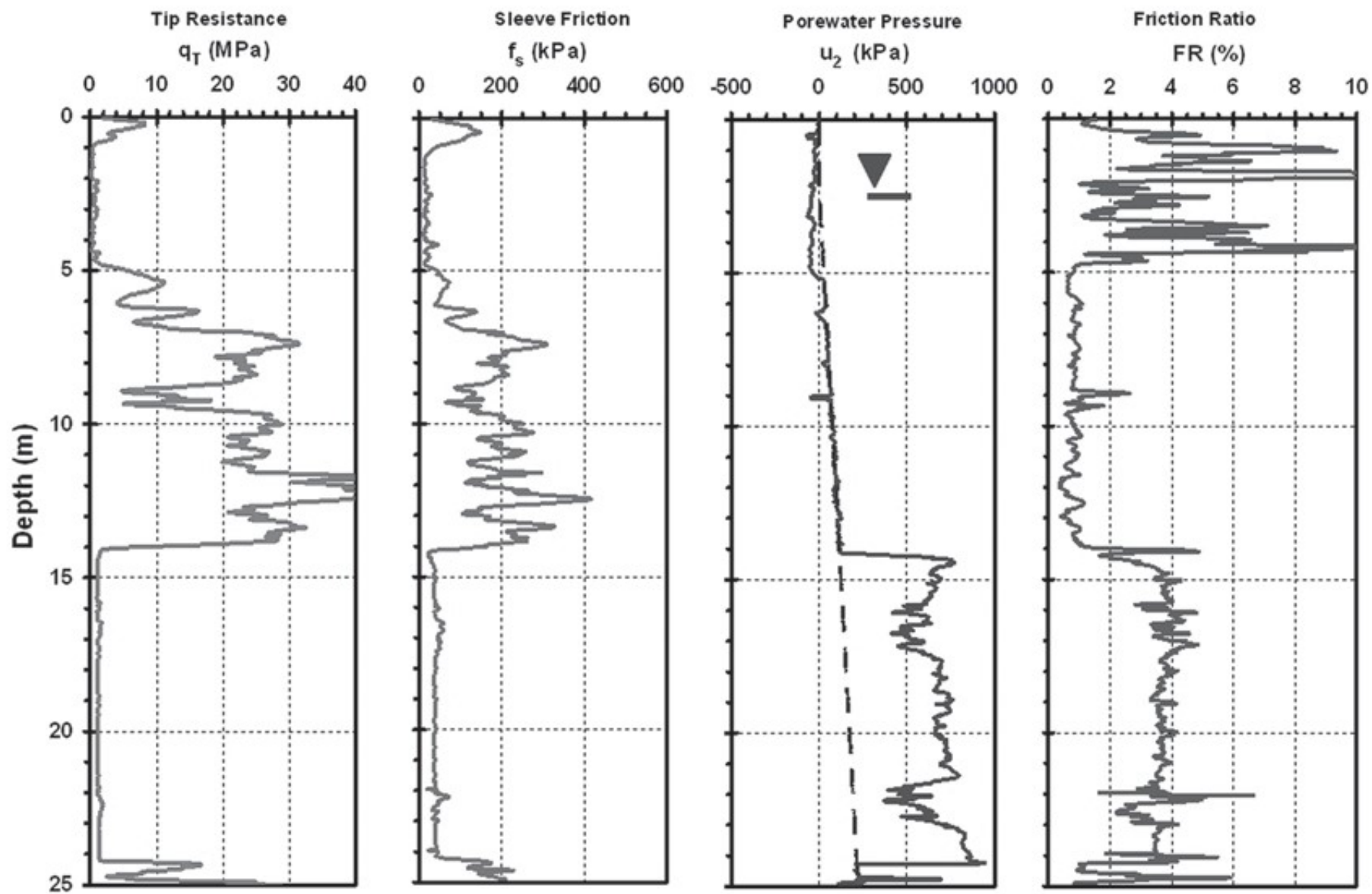
SCHMERTMANN 1978



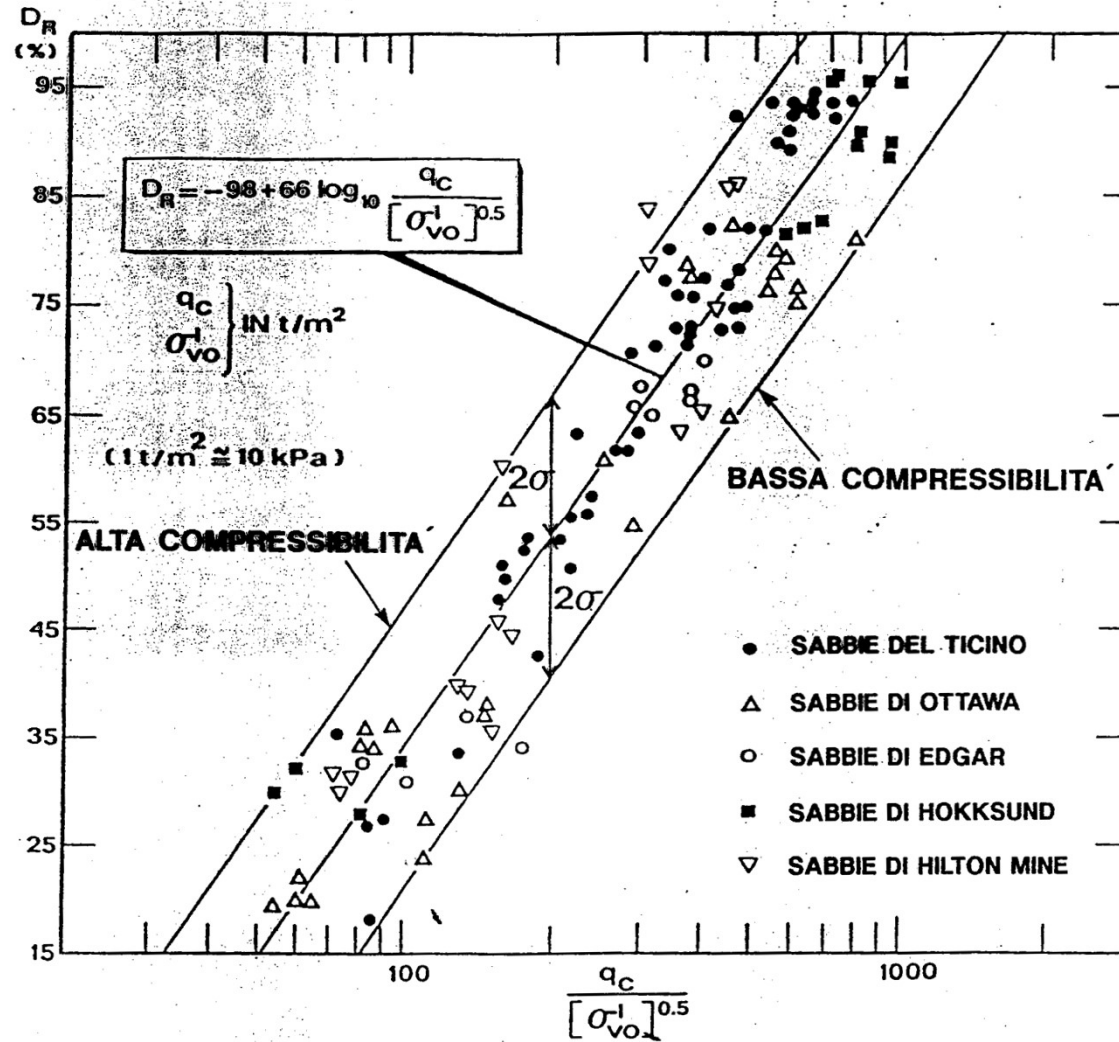
GUIDE FOR ESTIMATING SOIL TYPE FROM DUTCH FRICTION - CONE RATIO (BEGEMANN MECHANICAL TIP)

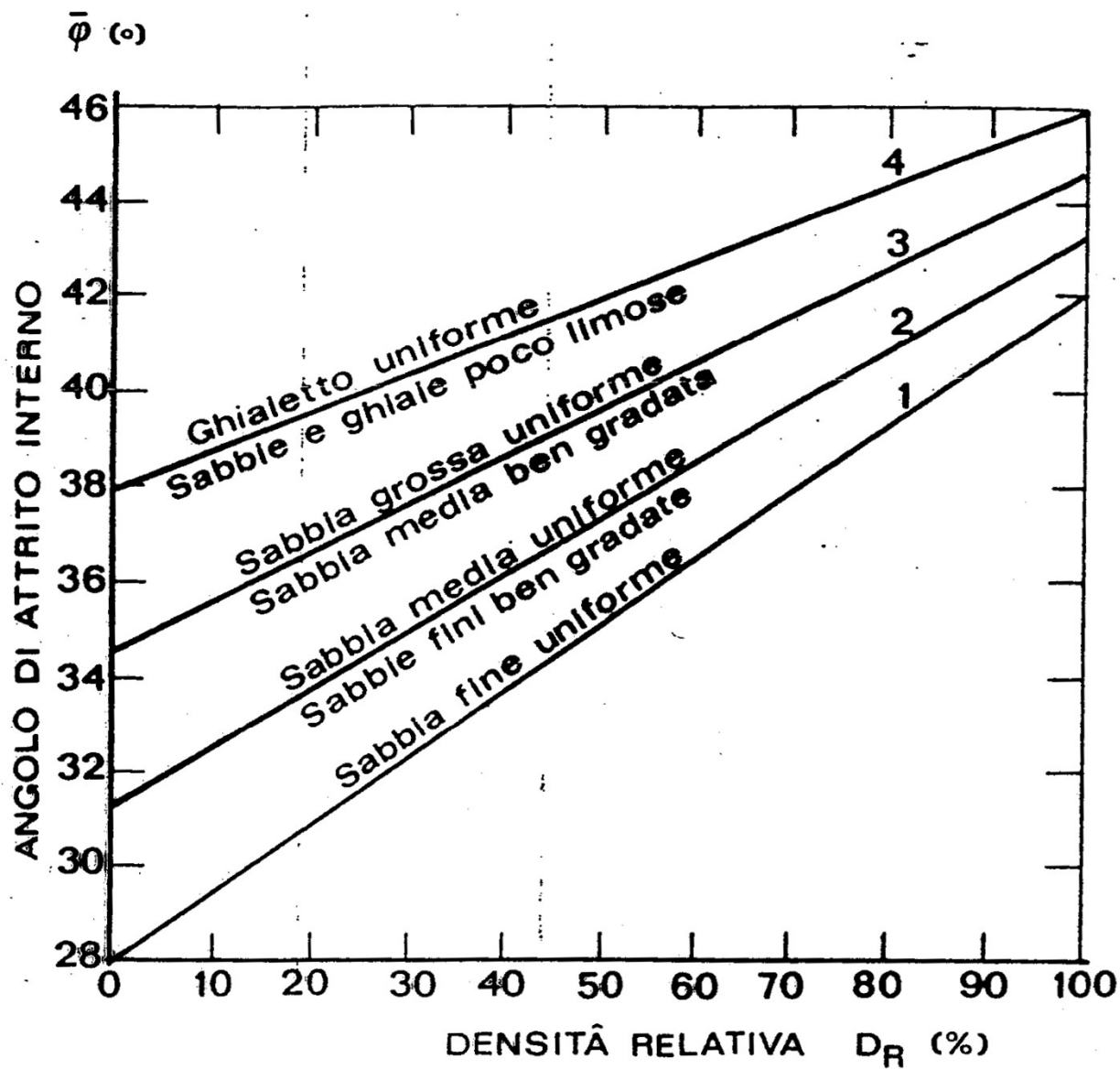
ROBERTSON & CAMPANELLA (1986) ROBERTSON 1990





PARAMETRI GEOTECCNICI

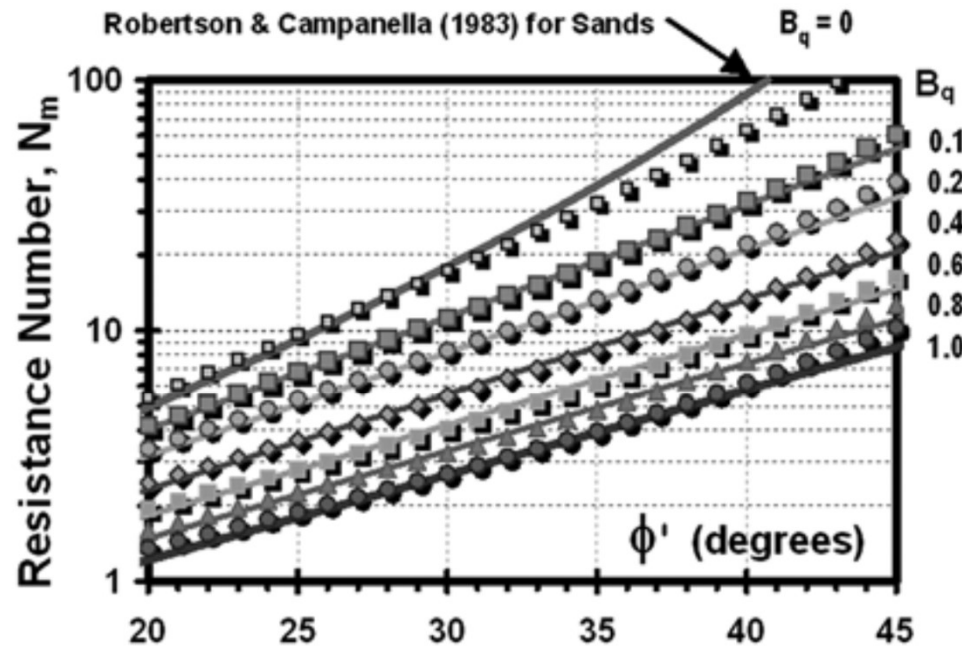




1. $\bar{\phi} = 28.0 + 0.140 D_R$
2. $\bar{\phi} = 31.5 + 0.115 D_R$
3. $\bar{\phi} = 34.5 + 0.100 D_R$
4. $\bar{\phi} = 38.0 + 0.080 D_R$

Correlazione $\bar{\phi} = f(D_R, GR)$ secondo Schmertmann (1977)

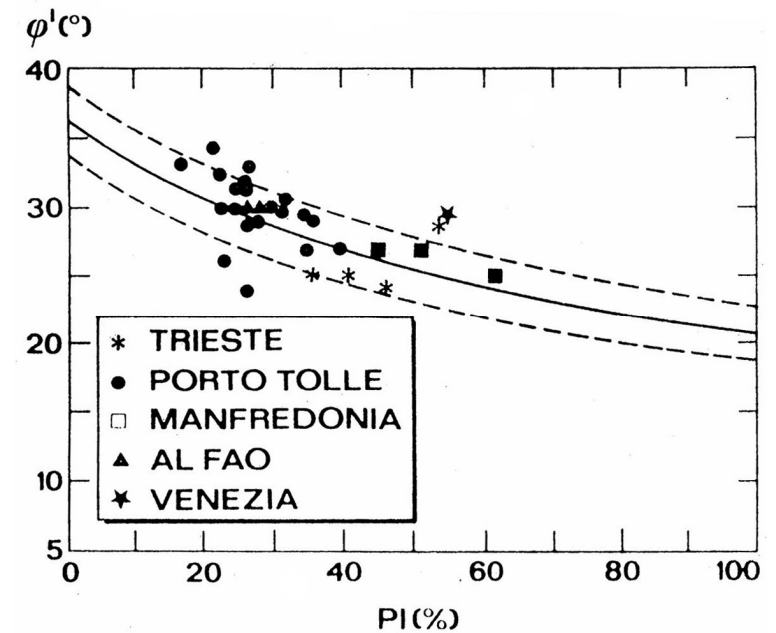
ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO ARGILLE



Approx: $\phi' \approx 29.5^\circ B_q^{0.121} [0.256 + 0.336 \cdot B_q + \log Q]$

Notes for NTNU Method:

1. Define Cone Resistance Number: $N_m = (q_t - \sigma_{vo}) / (\sigma_{vo}' + a')$
2. Attraction: $a' = c' \cot \phi'$ where ϕ' = effective friction angle and c' = effective cohesion intercept.
3. For case where $a' = c' = 0$:
 $N_M = Q = (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma_{vo}'$
4. Define Porewater Pressure Parameter: $B_q = \Delta u_2 / (q_t - \sigma_{vo})$
5. Approximate Expression
Given for Ranges: $0.1 < B_q < 1.0$
and $20^\circ < \phi' < 45^\circ$



ESEMPI DI INTERPRETAZIONE

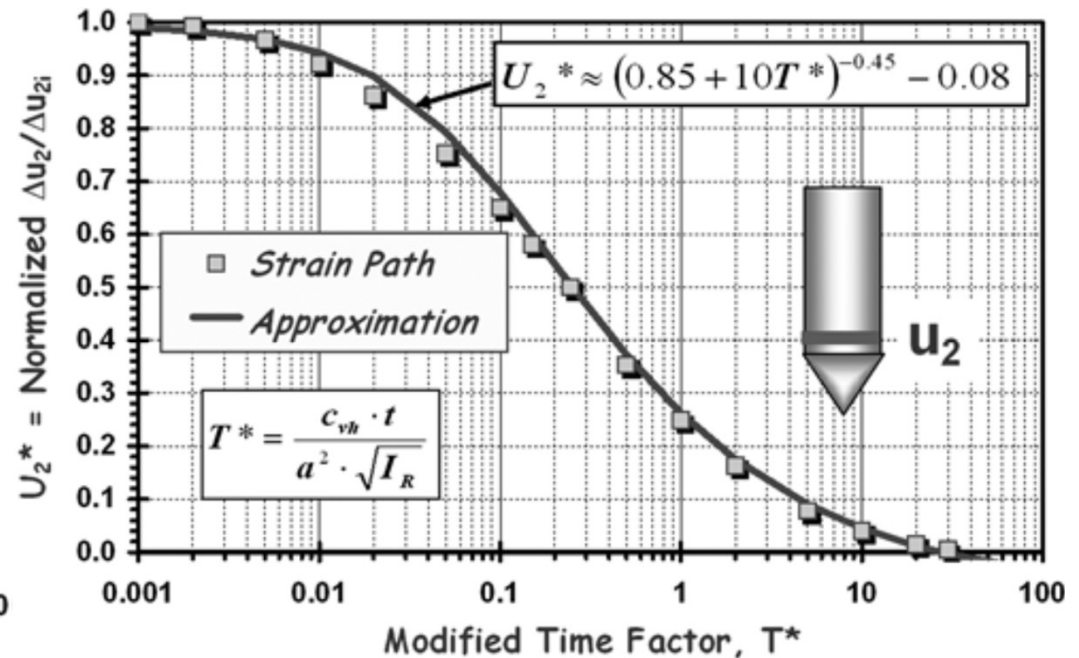
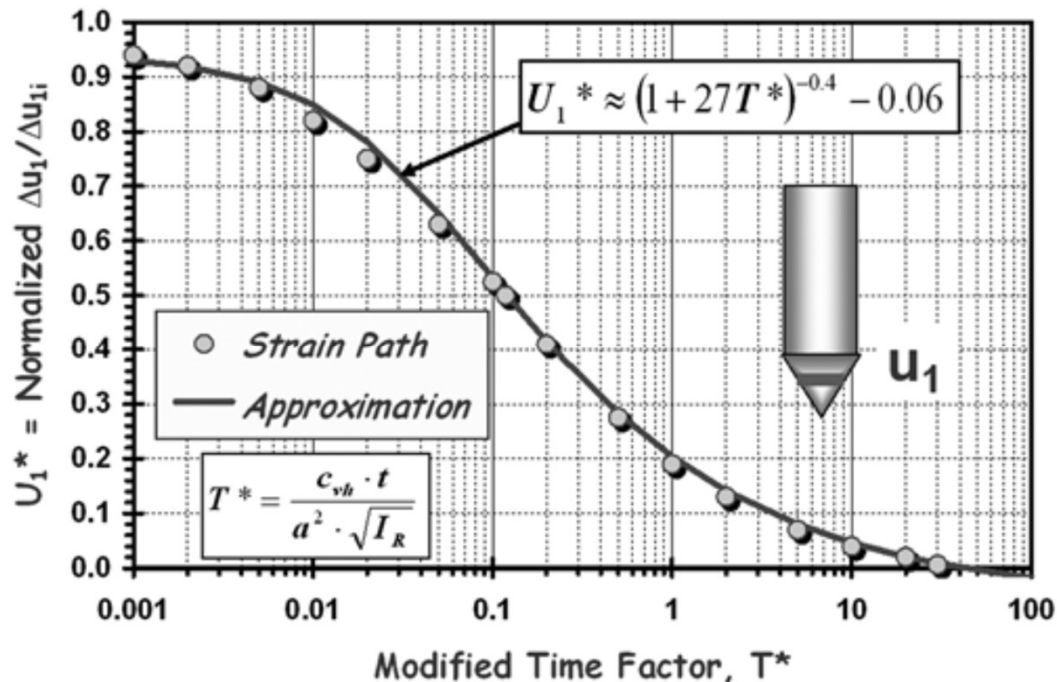
PROFILO

PARAMETRI

DISSIPAZIONI

Prove di dissipazione

- $T_{50}^* = 0.118$
- $T_{50}^* = 0.245$
- $C_{vh} = T^* 50 a c^2 (I_r)^{0.5} / t_{50} \quad C_{vh} = K D' / \gamma w$



LIQUEFAZIONE 1

- $FS_L = \frac{CRR \cdot MSF}{CSR}$
- $CSR = 0.65 \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \frac{a_g}{g} r_d$
- $r_d = 1.0 - 0.00765 \cdot z \quad z \leq 9.15 \text{ m}$
- $r_d = 1.174 - 0.00267 \cdot z \quad z \leq 23.0 \text{ m}$
- $CRR = 0.833 \cdot \frac{q_{c1N,cs}}{1000} + 0.05 \quad \text{se } q_{c1N,cs} < 50$
- $CRR = 93 \left[\frac{q_{c1N,cs}}{1000} \right]^3 + 0.08 \quad \text{se } 50 < q_{c1N,cs} < 160$
- $q_{c1N} = \frac{q_c}{p_{atm}} \cdot \left(\frac{p_{atm}}{\sigma'_{vo}} \right)^n$
- $q_{c1N,cs} = K_C \cdot q_{c1N}$
- $K_C = 1.0 \quad \text{se } I_C \leq 1.64$
- $K_C = -0.403 \cdot I_C^4 + 5.581 \cdot I_C^3 - 21.63 \cdot I_C^2 + 33.75 \cdot I_C - 17.88 \quad \text{se } I_C > 1.64$
- $I_C = [(3.47 - \log_{10} Q)^2 + (1.22 + \log_{10} F)^2]^{0.5}$
- $Q = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{p_{atm}} \left(\frac{p_{atm}}{\sigma'_{vo}} \right)^n$
- $F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{vo}} 100$

LIQUEFAZIONE 2

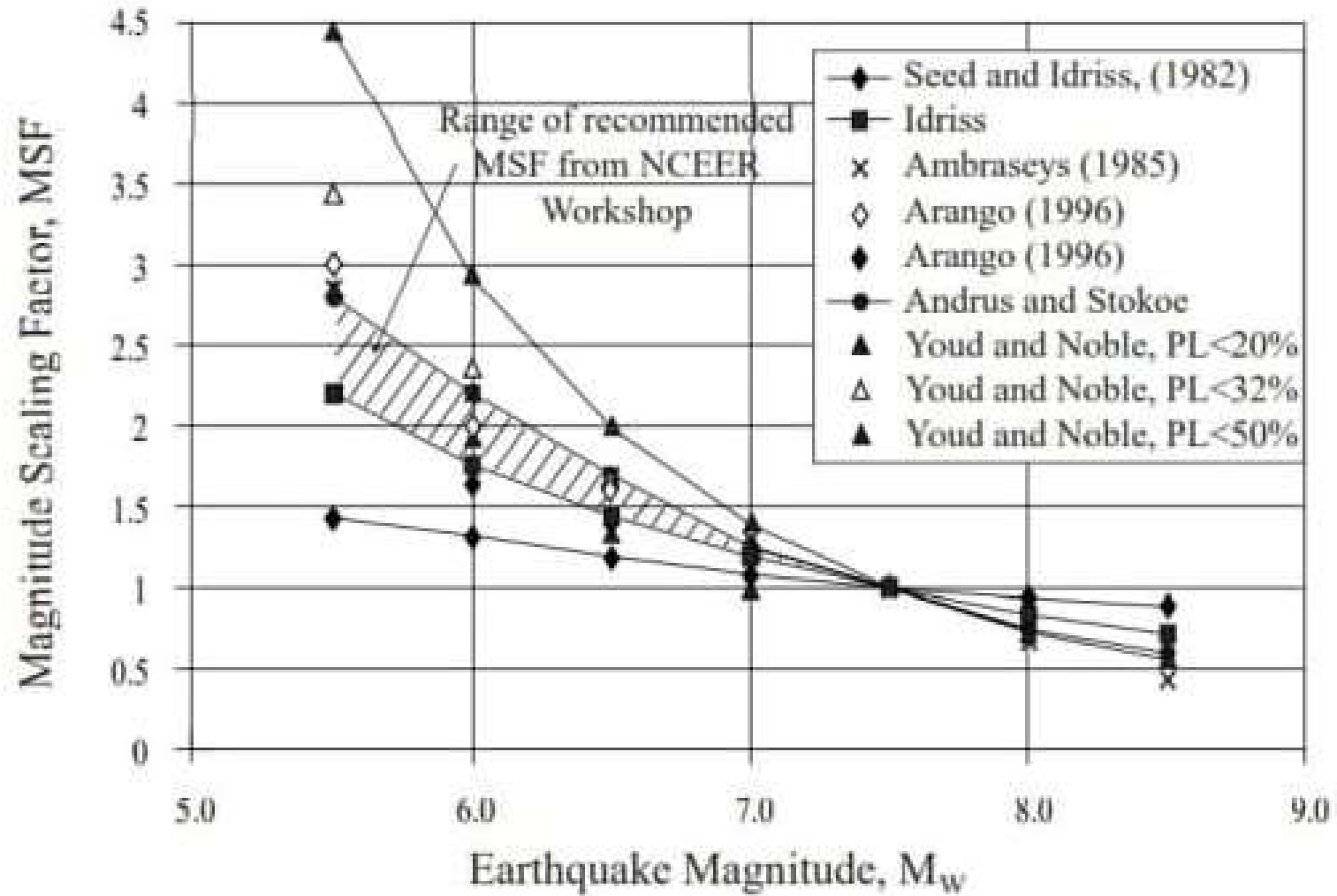
- $LPI = \int_0^{20m} F_1 \cdot W(z) dz$
- $F_1 = 1 - FS_L$ per $FS_L \leq 1$
- $F_1 = 0$ per $FS_L > 1$;
- $W(z) = 10 - 0.5z$;

LPI	Rischio di liquefazione
0	nullo
0 - 5	basso
5 - 15	alto
>15	molto alto

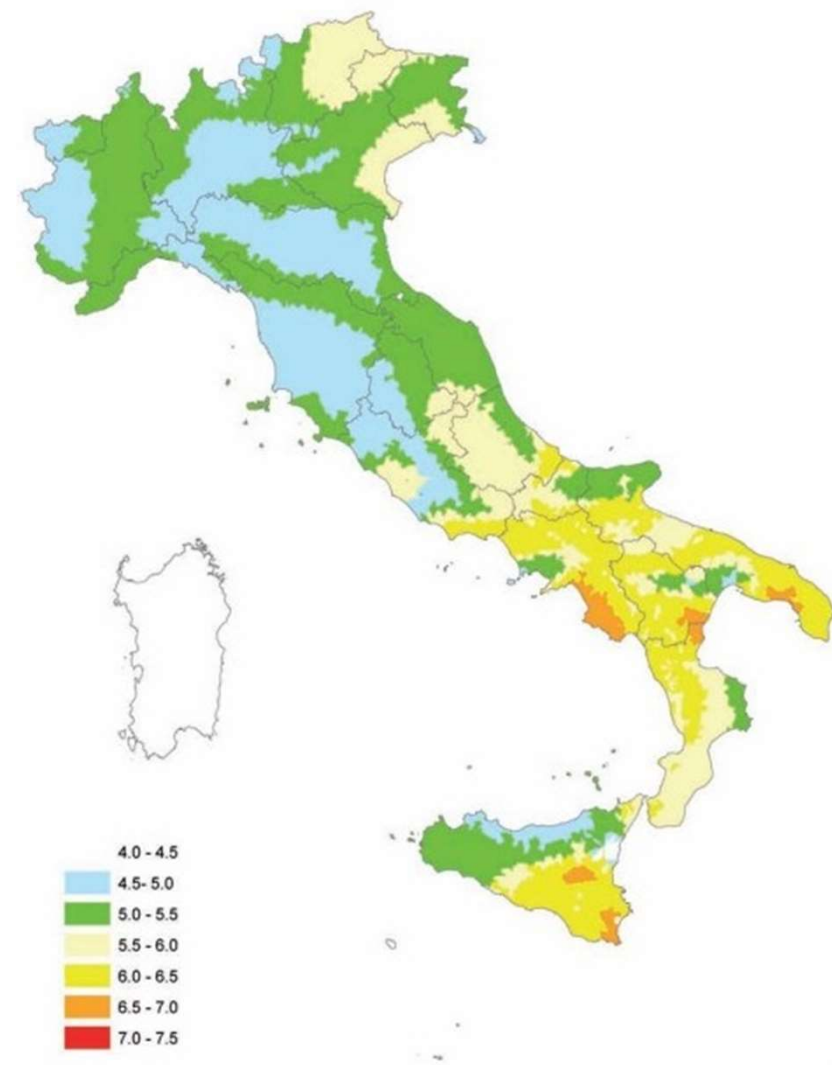
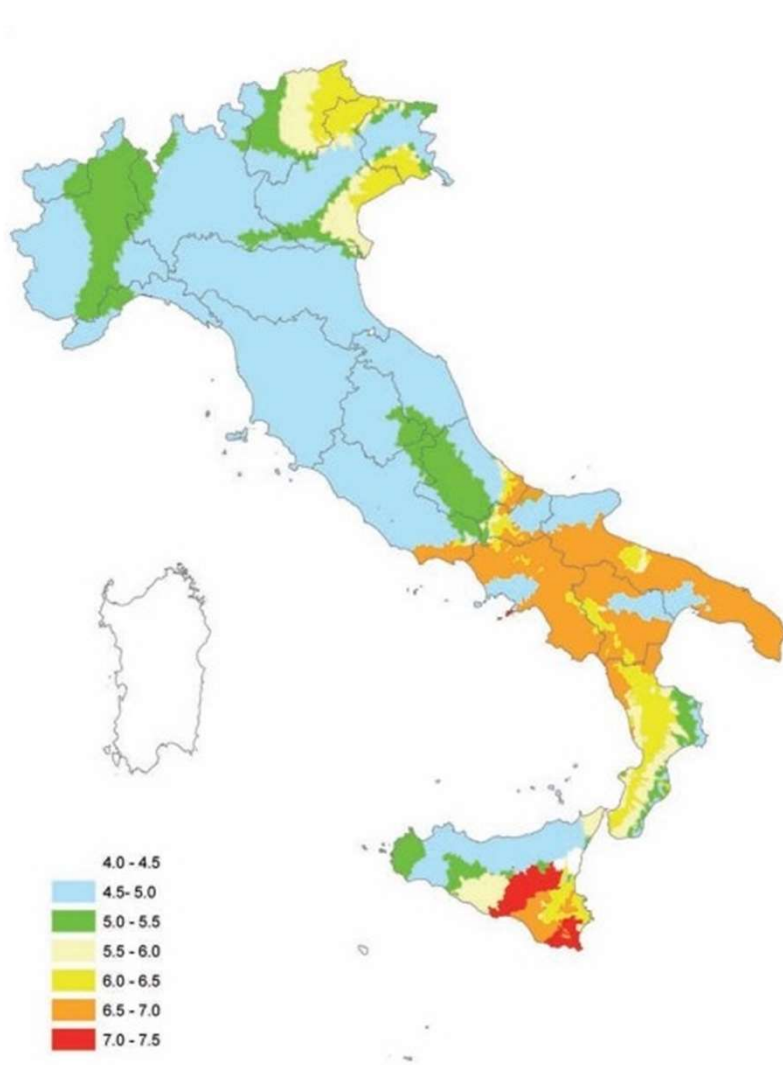
LIQUEFAZIONE 3

- ROBERTSON E WRIDE (1998, CRR)
- LIAO E WHITMAN (1986, rd)
- IWASAKI ET AL. (1978, LPI)
- YOUNG ET AL. (2001, MSF)
- SPALLAROSSA E BARANI (2007, Mw)
- RSL/NORMATIVA (ag)

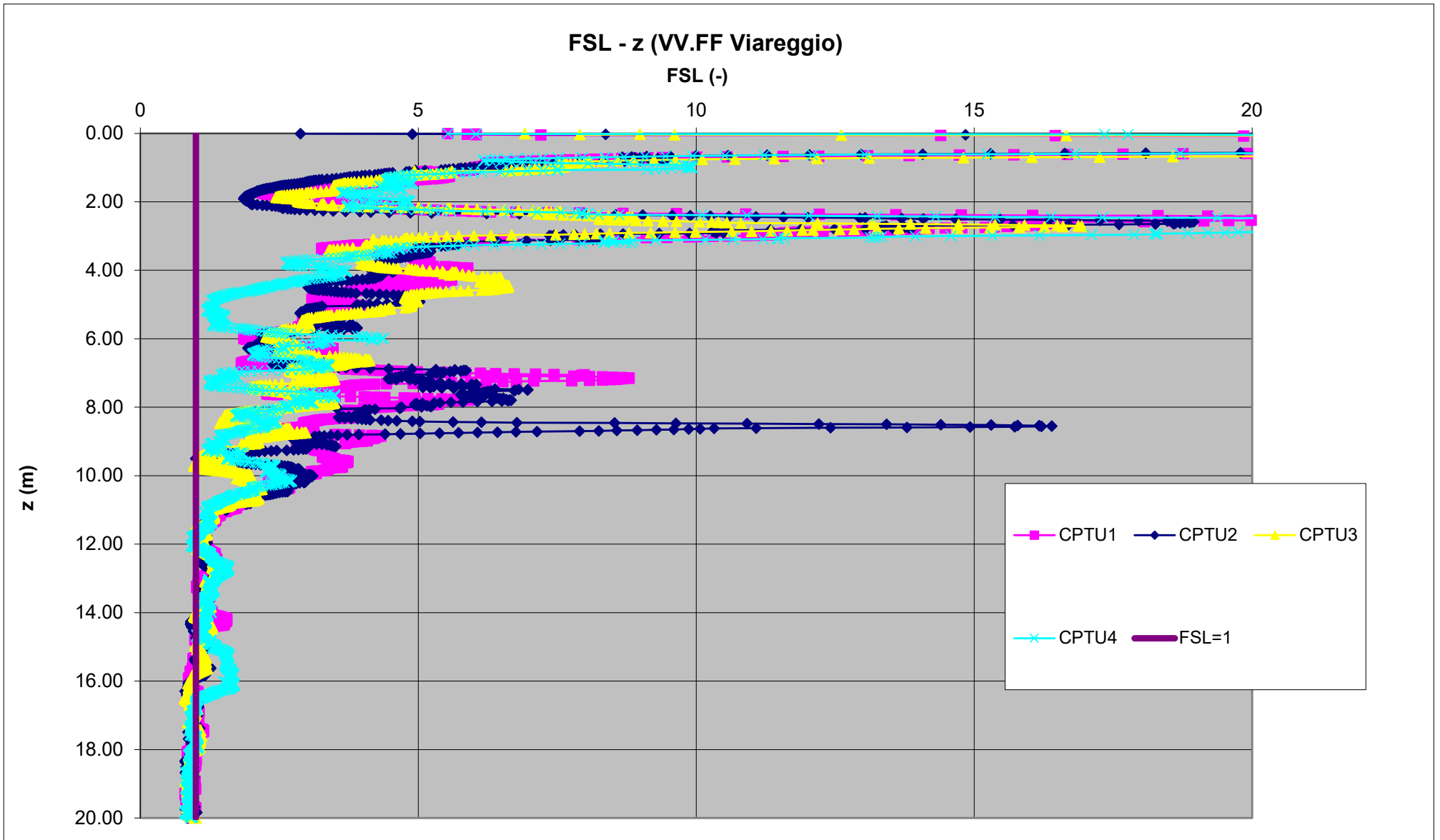
MSF



MAGNITUDO

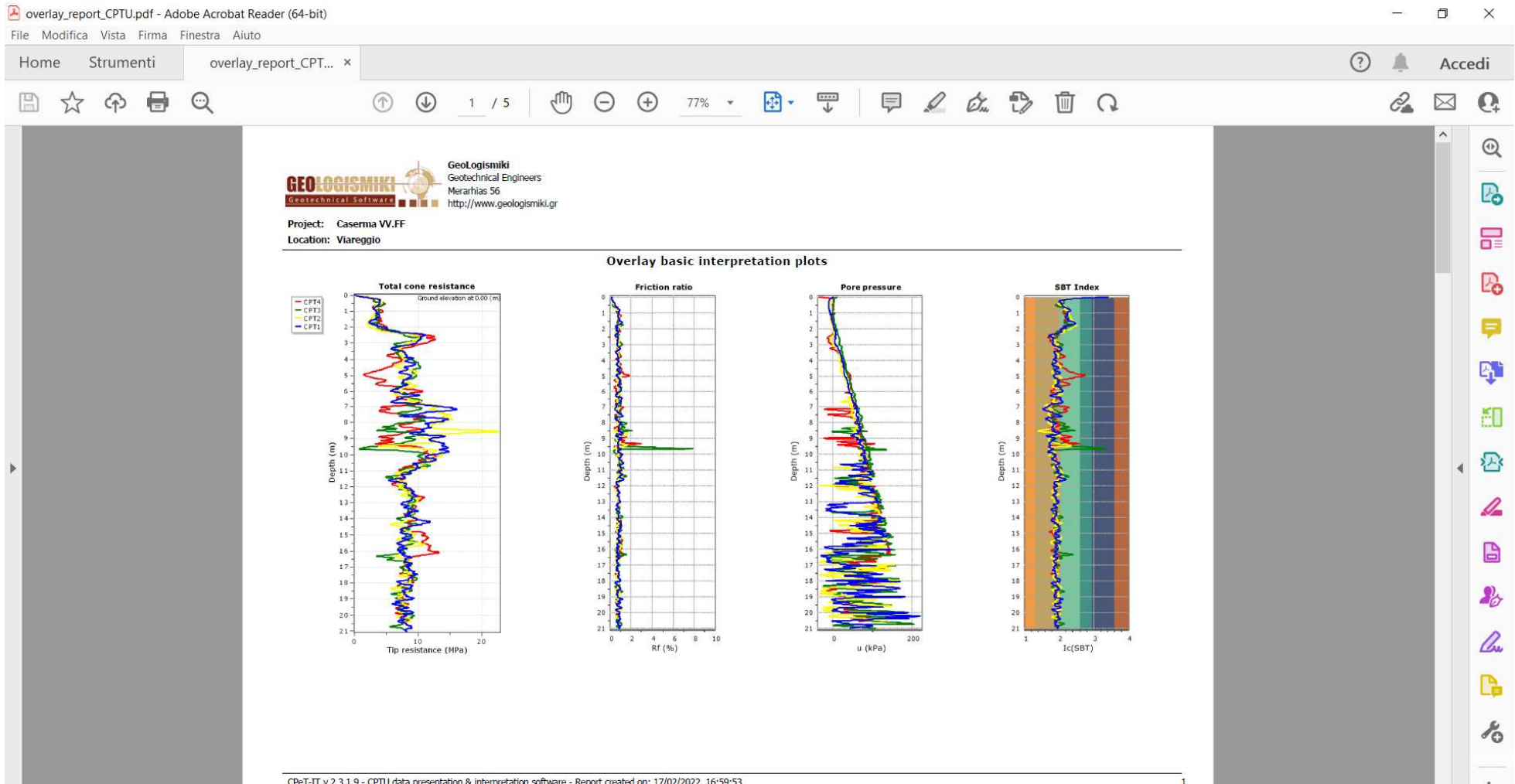


VV.FF. VIAREGGIO



VV.FF. VIAREGGIO

CPTU	LPI
1	0.243
2	0.394
3	0.341
4	0.238



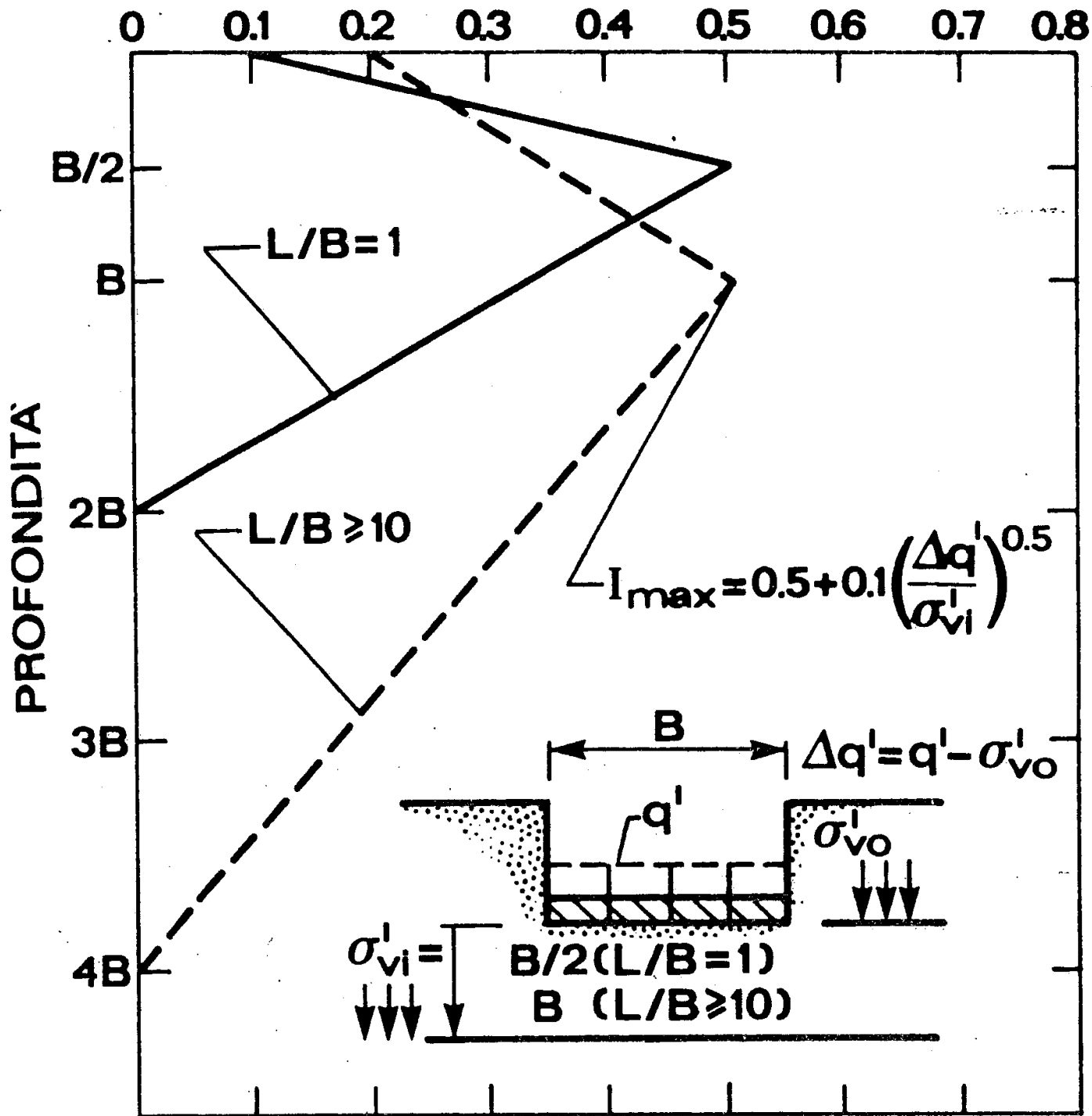
CEDIMENTO IN SABBIA

Schmertmann

$$s = C_1 C_2 \Delta q' \sum_0^H \frac{I_z \Delta z}{E'}$$

- $\Delta q'$ = pressione efficace netta
- σ'_{v0} = tensione verticale efficace agente alla quota di imposta della fondazione
- C_1 = coefficiente di approfondimento $(1 - 0.5 \sigma'_{v0} / \Delta q')$
- C_2 = cedimento secondario $(1 + 0.2 \log t / 0.1)$
- E' = 2.5-3.5 q c (quadrate – nastriformi)

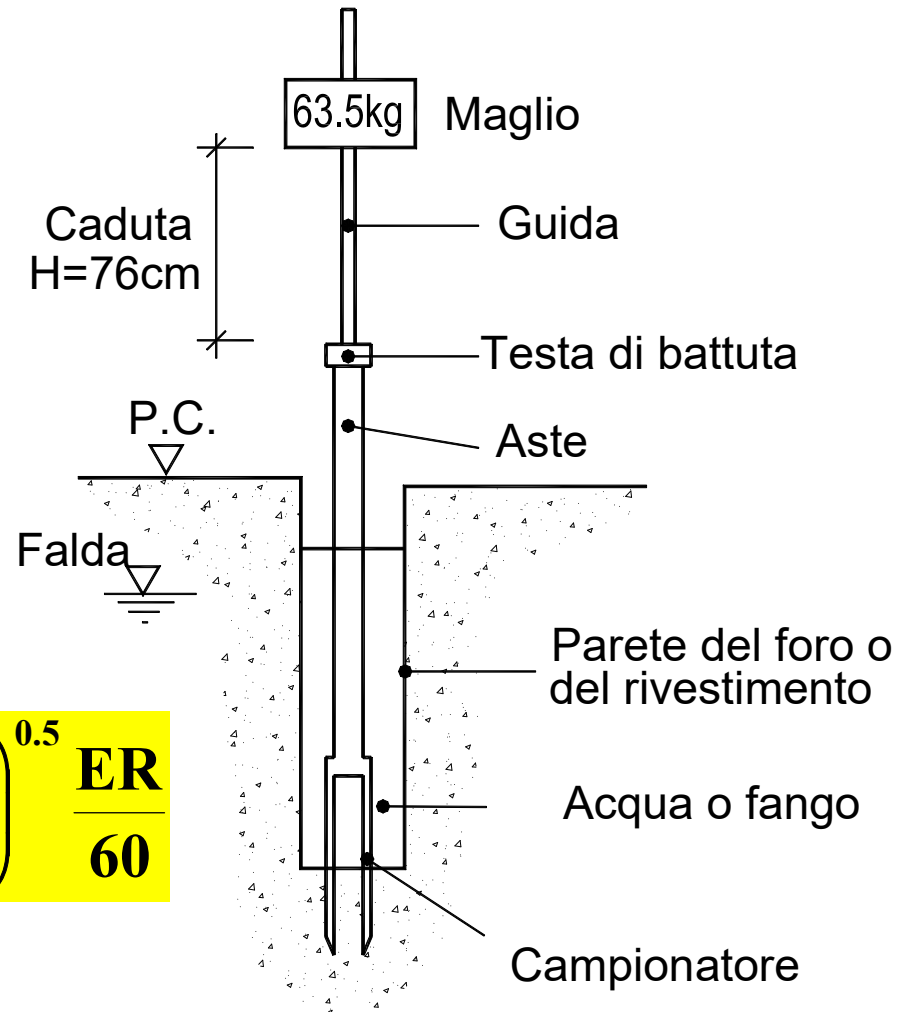
FATTORE D'INFLUENZA I_z



ESEMPIO VV.FF

CARATTERISTICHE ATTREZZATURA

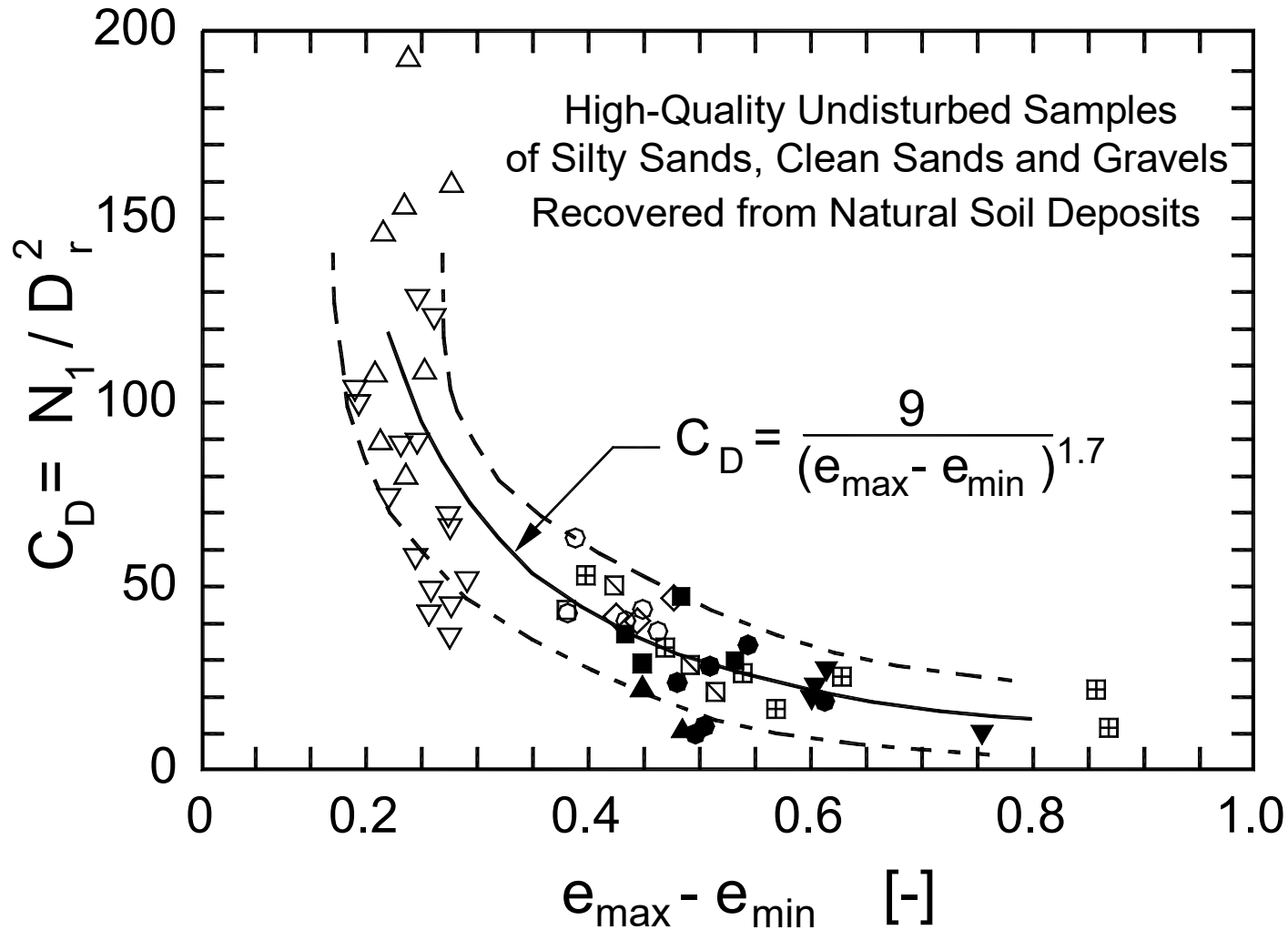
$$(N_1)_{60} = N_{spt} \left(\frac{98.1}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5} \frac{ER}{60}$$



DETERMINAZIONE DI $(N_1)_{60}$

- $(N_1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S$
- $C_N = (p_a / \sigma'_{vo})^{0.5}$
- $C_E =$ Rendimento energetico
- $C_B = 1.0 - 1.05 - 1.15$ ($\Phi = 65 - 115; 150; 200$)
- $C_R = 0.75 - 0.8 - 0.85 - 0.95 - 1.0$ (L = meno di 3 m; 3-4; 4-6; 6-10; 10-30)
- $C_S = 1.0 - 1.3$ (Campionatore standard –
Campionatore sprovvisto di porta-campione)

$N_1 / D_r^2 - (e_{\max} - e_{\min})$ (Cubrinovski e Ishihara 1999).



Parametri di resistenza sabbie

- Cubrinowski e Ishihara propongono la seguente procedura:
- - conoscendo il diametro mediano d_{50} delle particelle che compongono il terreno, si calcola l'ampiezza dell'intervallo $e_{max} - e_{min} = 0,23 + 0,06/d_{50}$;
- - si entra nel grafico (slide precedente) con l'ascissa appena calcolata e si deduce il corrispondente valore dell'ordinata CD;
- - essendo $CD = N_1 / D_r^2$, con N_1 numero rappresentativo del risultato delle prove SPT normalizzato rispetto alla pressione di 1 atmosfera (100 kPa) con rendimento teorico della macchina al 78%, si ricava la densità relativa.
- Alternativamente Skempton (1986) suggerisce $(N_1)60 / D_r^2 = A$, dove A nel caso di terreni NC vale:
 - - per sabbie fini: 35 per sabbie di laboratorio, 40 per manufatti recenti, 55 per i depositi naturali;
 - - per sabbie medie: 60;
 - - per sabbie grosse e ghiaietto: 65.

RESISTENZA ALLA LIQUEFAZIONE

- $$\mathbf{CRR_{7.5} = 1/[34 - (N_1)_{60cs}] + (N_1)_{60cs} / 135 + 50/[10(N_1)_{60cs} + 45]^2 - 1/200}$$

- $$\mathbf{(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta (N_1)_{60}}$$

$\alpha = 0$ $\beta = 1.0$ **FC \leq 5 %**

$\alpha = \mathbf{\exp(1.76 - 190/FC^2)}$

$\beta = (0.99 + \mathbf{FC^{1.5}/1000})$ **5 % < FC < 35 %**

$\alpha = 5.0$ $\beta = 1.2$ **FC > 35 %**

FATTORE DI SICUREZZA

- $FS = (CRR_{7.5} / CSR) MSF$
- $MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56}$
- **Mw = Magnitudo di momento** = $\log(M_o) / 1.5 - 10.7$
- $M_o =$ Momento sismico = μAD_{av}

CEDIMENTO IN SABBIA

BURLAND E BURBRIDGE

$$s = f_s f_H f_t \left[\sigma'_{v0} B^{0.7} \frac{I_c}{3} + (q' - \sigma'_{v0}) B^{0.7} I_c \right]$$

q' = pressione efficace lorda, espressa in kPa

σ'_{v0} = tensione efficace agente alla quota di imposta della fondazione in kPa

B = larghezza della fondazione in m

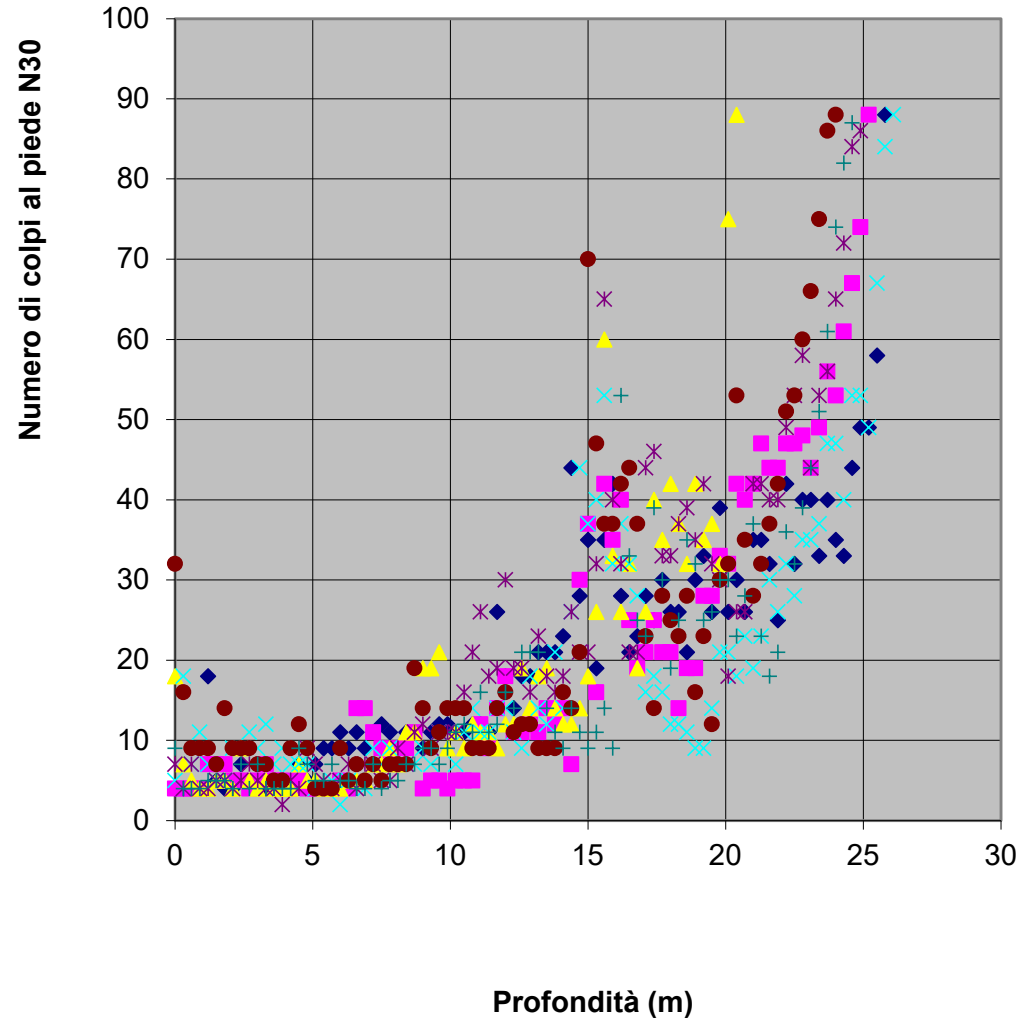
$$I_c = \frac{(1.706 \pm SD)}{N_{AV}^{1.4}}$$

$$f_H = \frac{H}{z_i} \left(2 - \frac{H}{z_i} \right) \quad f_s = \left(\frac{1.25 L/B}{L/B + 0.25} \right)^2 \quad f_t = \left(1 + R_3 + R \log \frac{t}{3} \right)$$

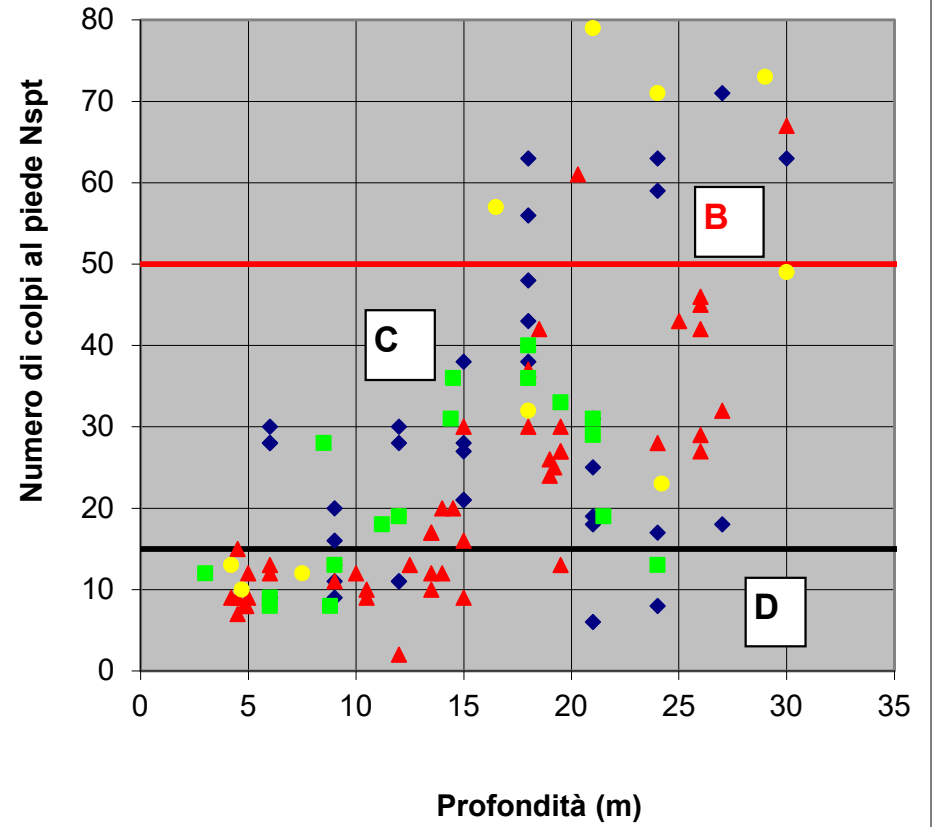
t = tempo espresso in anni $R_3 = 0.3 - 0.7$ $R = 0.2 - 0.8$

ESEMPIO EMPOLI

Prove DPSH



Prove SPT

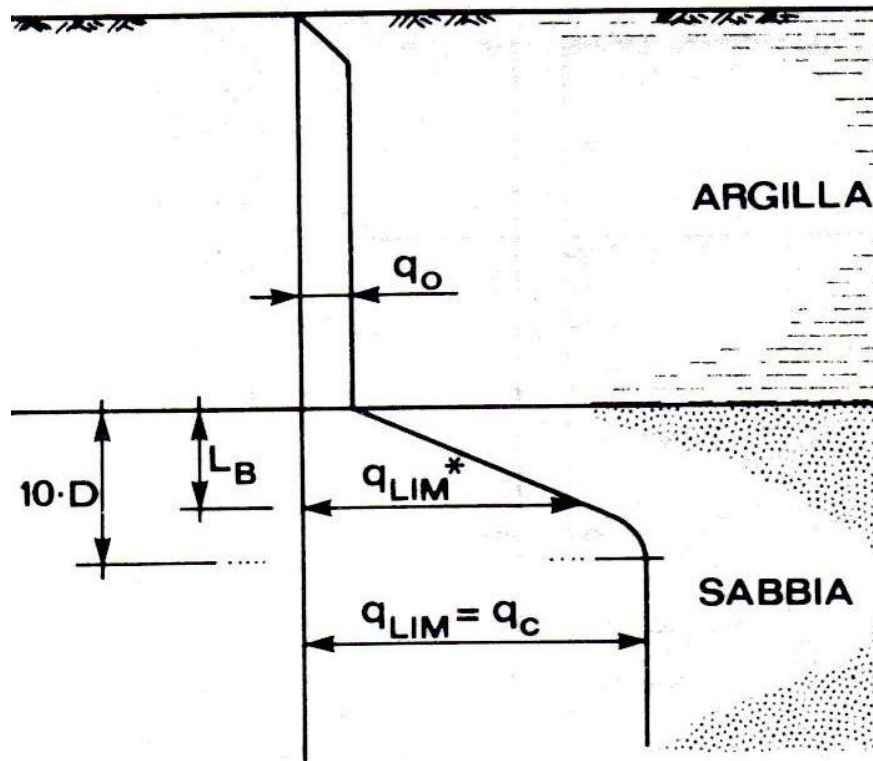


Carico limite fondazioni profonde

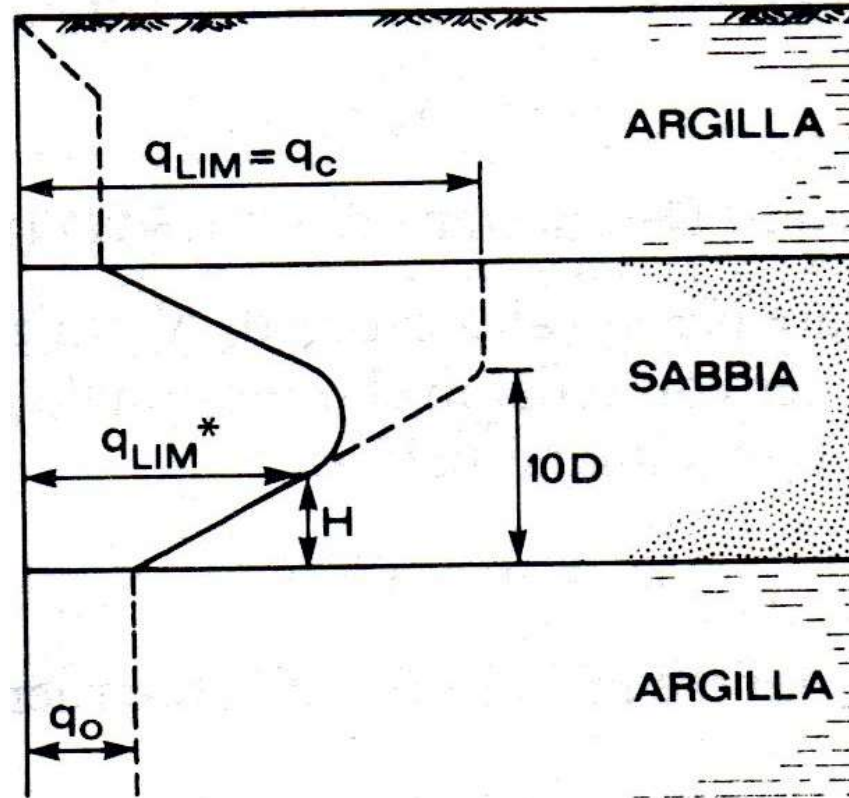
- Carichi verticali
 - Uso diretto CPT SPT
 - Formule statiche
- Carichi trasversali
 - Parametri (drenate o non drenate)

Uso diretto CPT pali infissi in terreni granulari (1)

- Meyerhof (1976)
 - $L > Z_c$ $q_{lim} = q_c$ terreni omogenei
 - Terreno stratificato, penetrazione almeno $10D$
 - $q_{lim} \cong q_c \cdot L_b / (10D)$ se penetrazione $< 10D$
- $Z_c/D = 7 - 10 - 14 - 16 - 20$
- $D_r = (0-20) - (20-40) - (40-60) - (60-80) - (80-100)$
- $q_c = 300 - 400 N_{spt}$ (kPa)



$$* q_{LIM} = q_o + (q_c - q_o) \cdot \frac{L_B}{10 \cdot D}$$



$$* q_{LIM} = q_o + (q_c - q_o) \frac{H}{10 \cdot D}$$

Uso diretto CPT pali infissi in terreni granulari (2)

- Meyerhof (1976)
 - $f_s = 2N_{spt}$ (kPa) (≤ 120 kPa)
- De Beer (1985)
 - $f_s = q_c/200$ $q_c \geq 20$ Mpa
 - $f_s = q_c/150$ $q_c \leq 10$ Mpa

Uso diretto CPT pali trivellati in terreni granulari

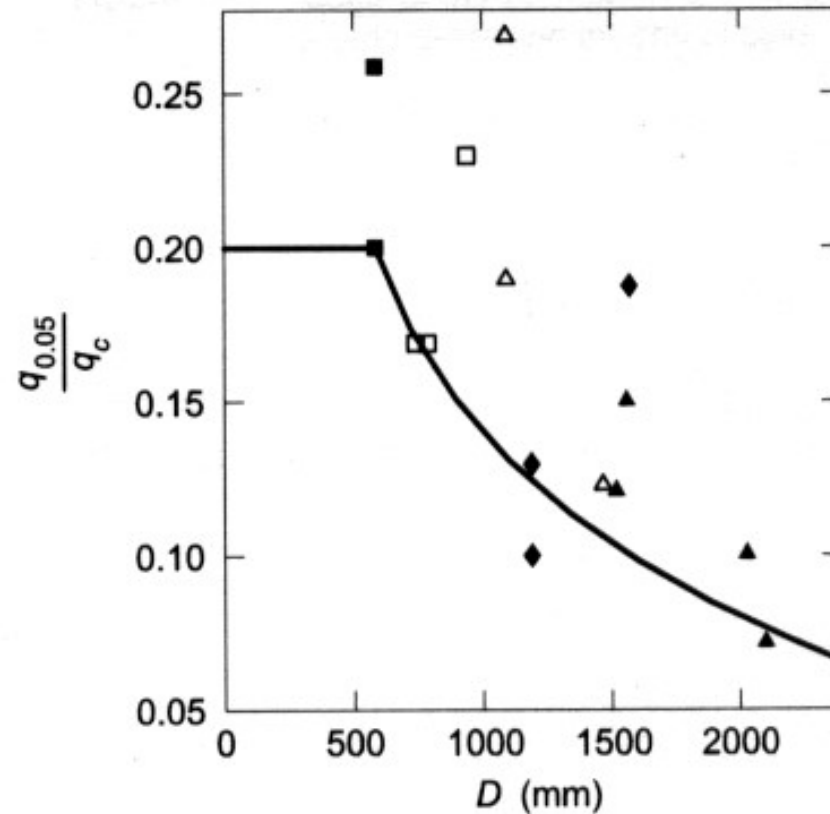
- Cedimento relativo (0.05 – 0.10 – 0.25 - ∞)
- $Q(\text{trivellato})/Q(\text{infisso})$ (0.15/0.21 – 0.3/0.5 - 0.5/0.7 – 1.0)

CARICO LIMITE

Pali di grande diametro

$$q_c = N_q \cdot \sigma'_{v0}$$

**$q_{0.05}$ carico unitario
alla punta per un
cedimento di 0.05d**



Jamiolkowski e Lancellotta, 1988

CARICO LIMITE

Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

Tipo di formazione del micropalo:

- Radice – IGU – iniezione unica**
- Tubfix – IRS – iniezione ripetuta**

Metodo basato su prove pressiometriche o SPT

CARICO LIMITE

Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

$$Q_{\text{lim}} = P + S = P + \pi \cdot d_s \cdot L_s \cdot s$$

$$P = 0.15 \cdot S \quad (\text{o trascurata})$$

$$d_s = \alpha \cdot d$$

CARICO LIMITE

Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

Terreno	Valori di α		Quantità minima di miscela consigliata
	IRS	IGU	
Ghiaia	1,8	1,3 - 1,4	$1,5 V_s$
Ghiaia sabbiosa	1,6 - 1,8	1,2 - 1,4	$1,5 V_s$
Sabbia ghiaiosa	1,5 - 1,6	1,2 - 1,3	$1,5 V_s$
Sabbia grossa	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	$1,5 V_s$
Sabbia media	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	$1,5 V_s$
Sabbia fine	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	$1,5 V_s$
Sabbia limosa	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	IRS: $(1,5 - 2)V_s$; IGU: $1,5 V_s$
Limo	1,4 - 1,6	1,1 - 1,2	IRS: $2V_s$; IGU: $1,5V_s$
Argilla	1,8 - 2,0	1,2	IRS: $(2,5 - 3)V_s$; IGU: $(1,5-2)V_s$
Marne	1,8	1,1 - 1,2	$(1,5 - 2)V_s$ per strati compatti
Calcari marnosi	1,8	1,1 - 1,2	$(2 - 6)V_s$ o più per strati fratturati
Calcari alterati o fratturati	1,8	1,1 - 1,2	
Roccia alterata e/o fratturata	1,2	1,1	$(1,1-1,5)V_s$ per strati poco fratturati $2V_s$ o più per strati fratturati

CARICO LIMITE

Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

Determinazione della resistenza unitaria, s

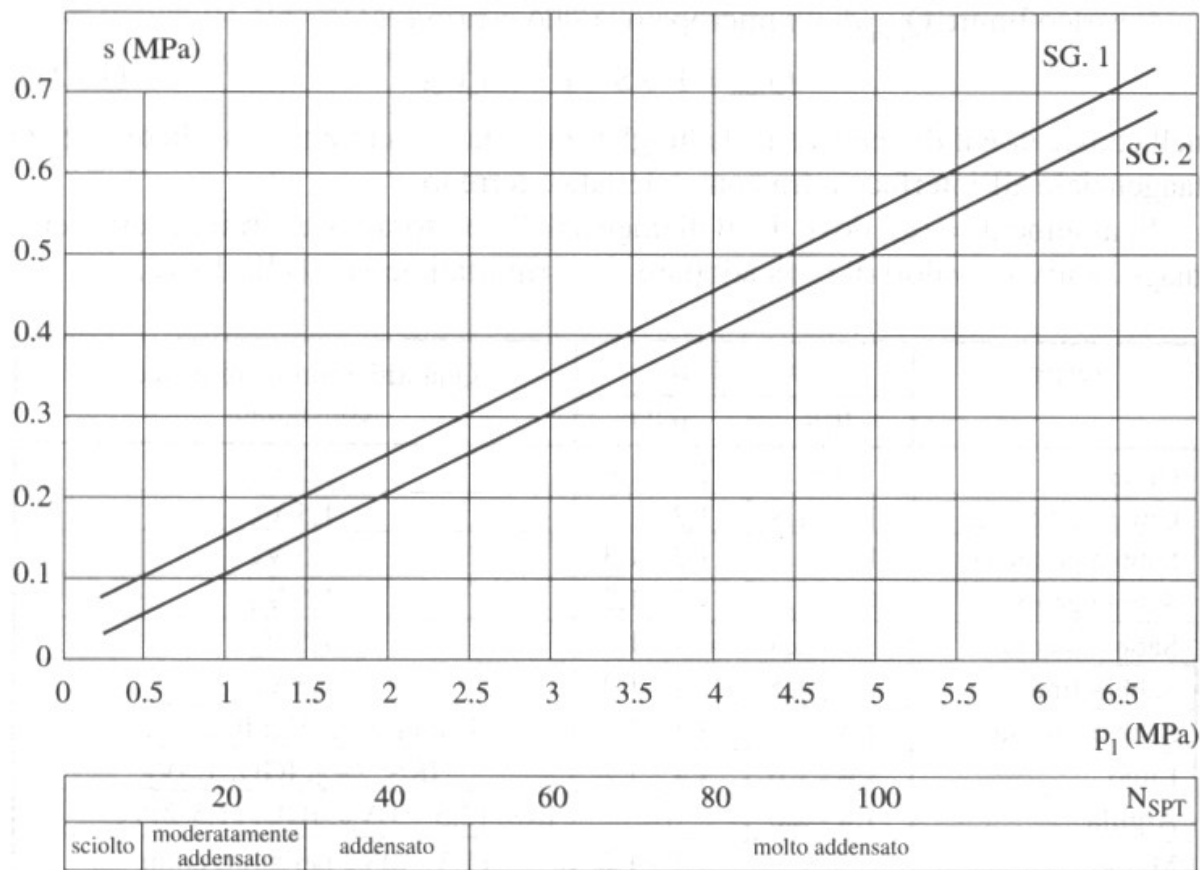
Terreno	Tipo di iniezione	
	IRS	IGU
Da ghiaia a sabbia limosa	SG1	SG2
Limo e argilla	AL1	AL2
Marna, calcare marnoso, calcare tenero fratturato	MC1	MC2
Roccia alterata e/o fratturata	$\geq R1$	$\geq R2$

CARICO LIMITE

Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

Sabbie limose
-
Ghiaie

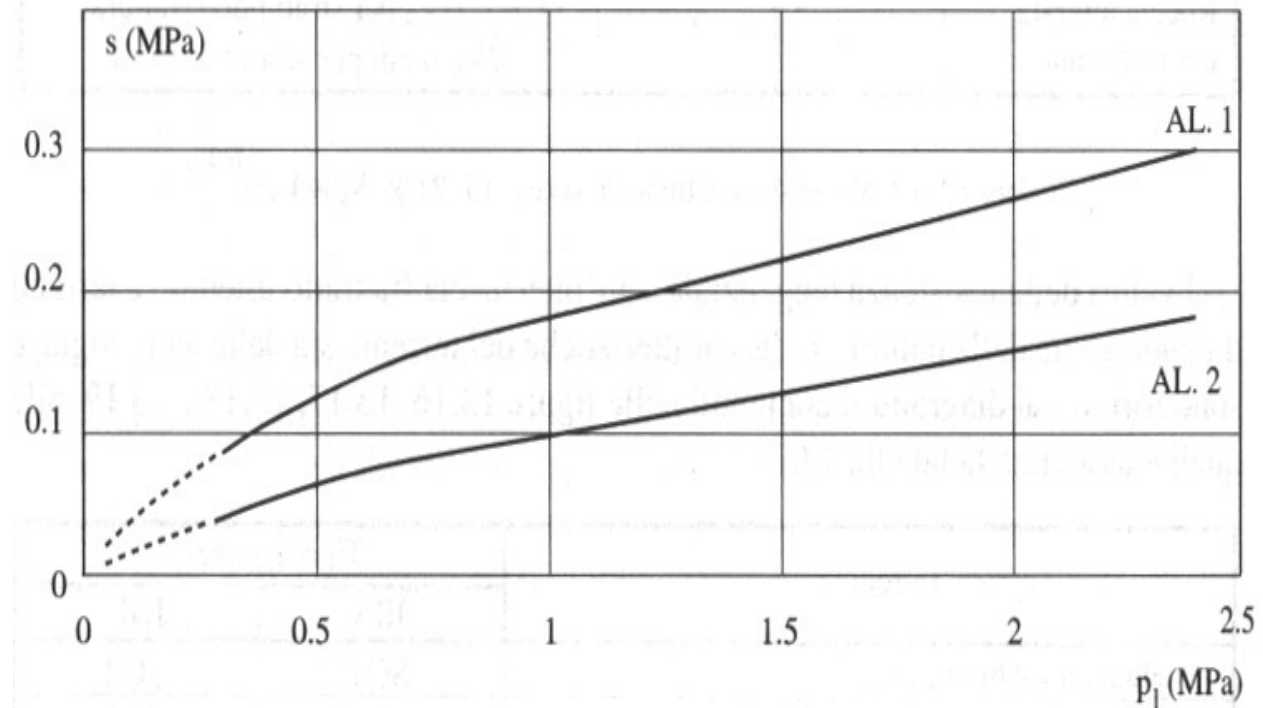


CARICO LIMITE

Micropali

Approccio di Bustamante e Doix (1985)

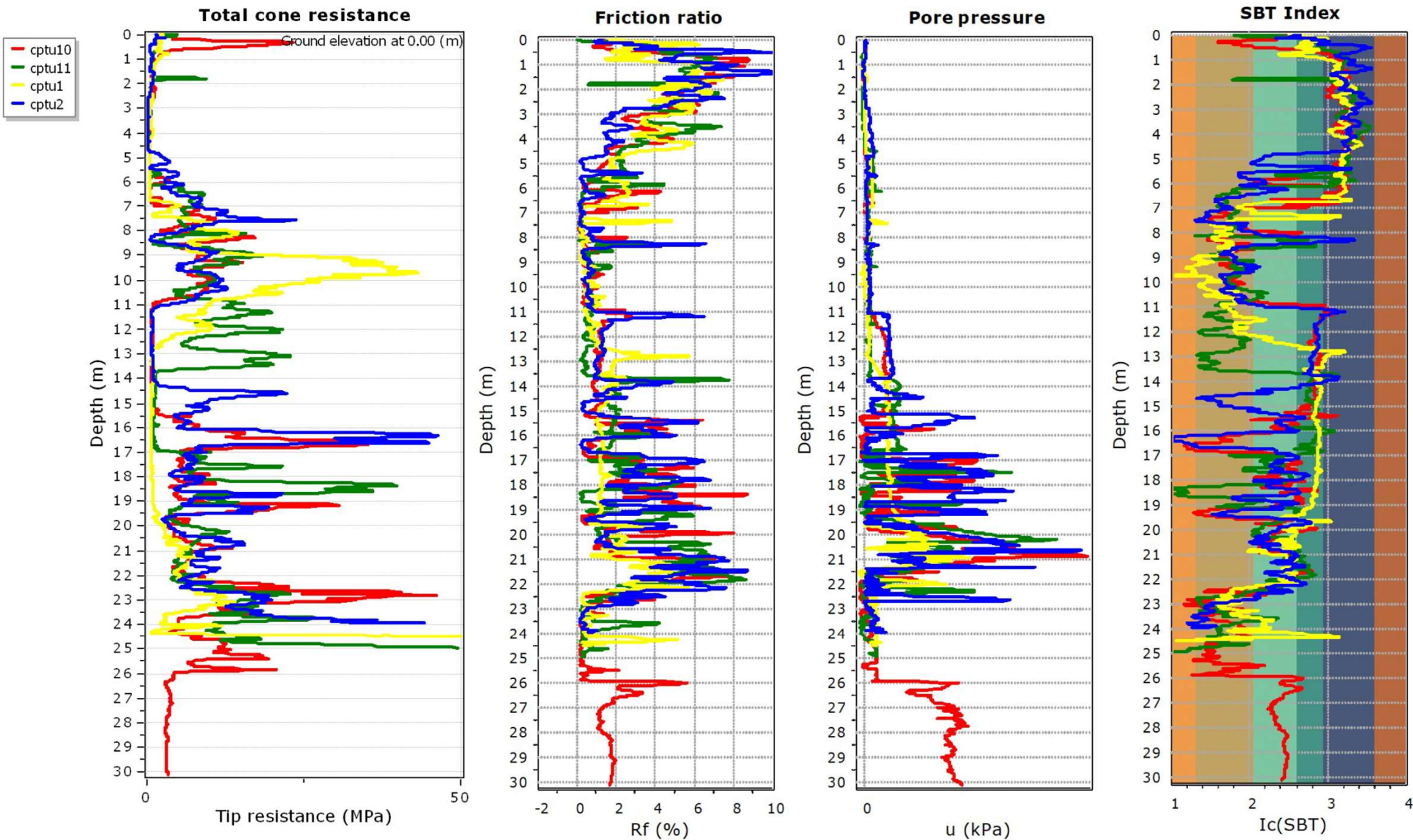
Argille
-
limi



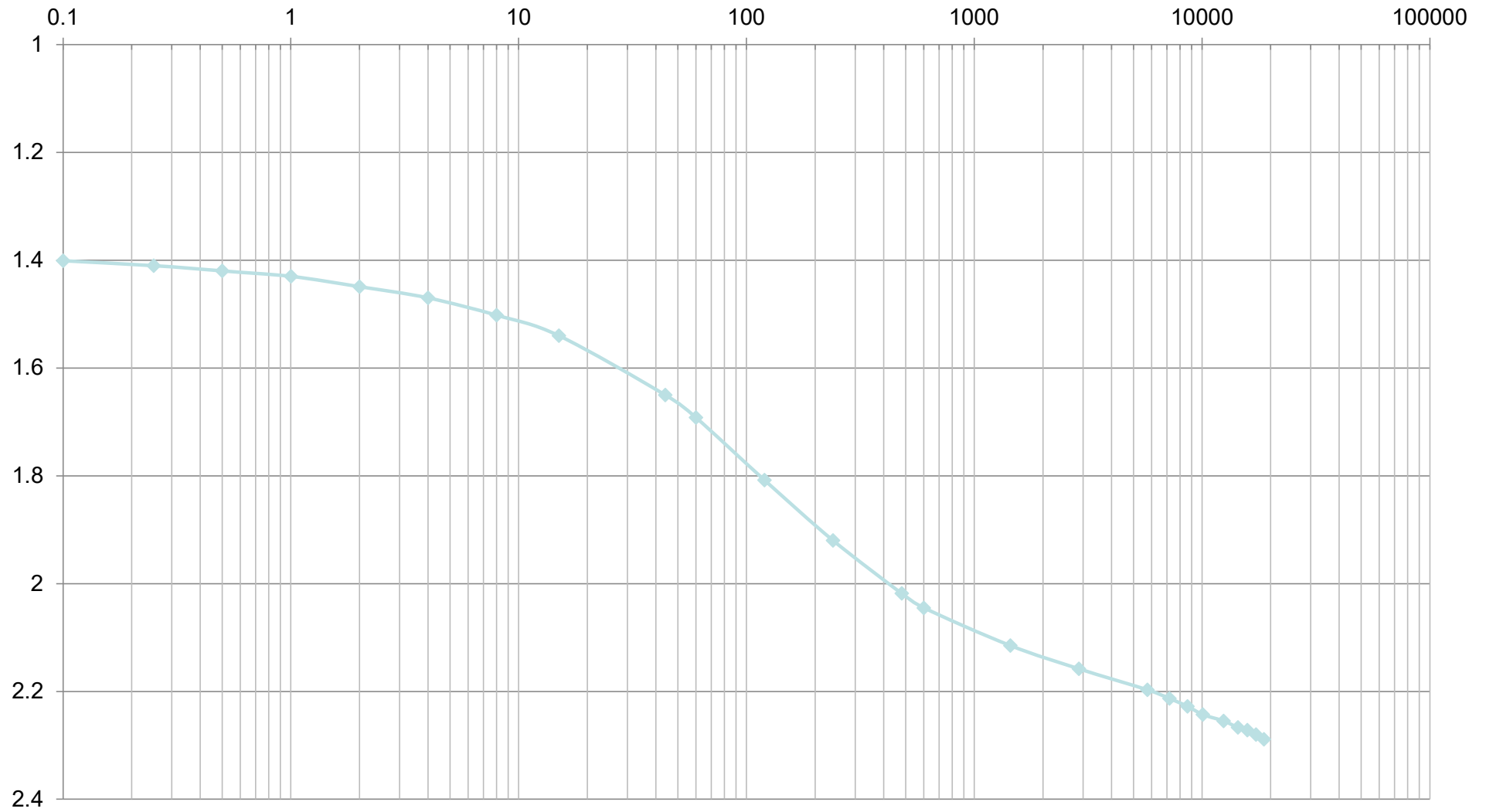
4		8	15	30	N_{SPT}
molle	moderat. consistente	consistente	molto consistente		dura

ESEMPIO

MICROPALI



CREEP



MISURE DI V_s V_p

SCPTU

- SCOPO
 - Profilo velocità
 - Categoria sottosuolo (spettro di risposta)
 - RSL

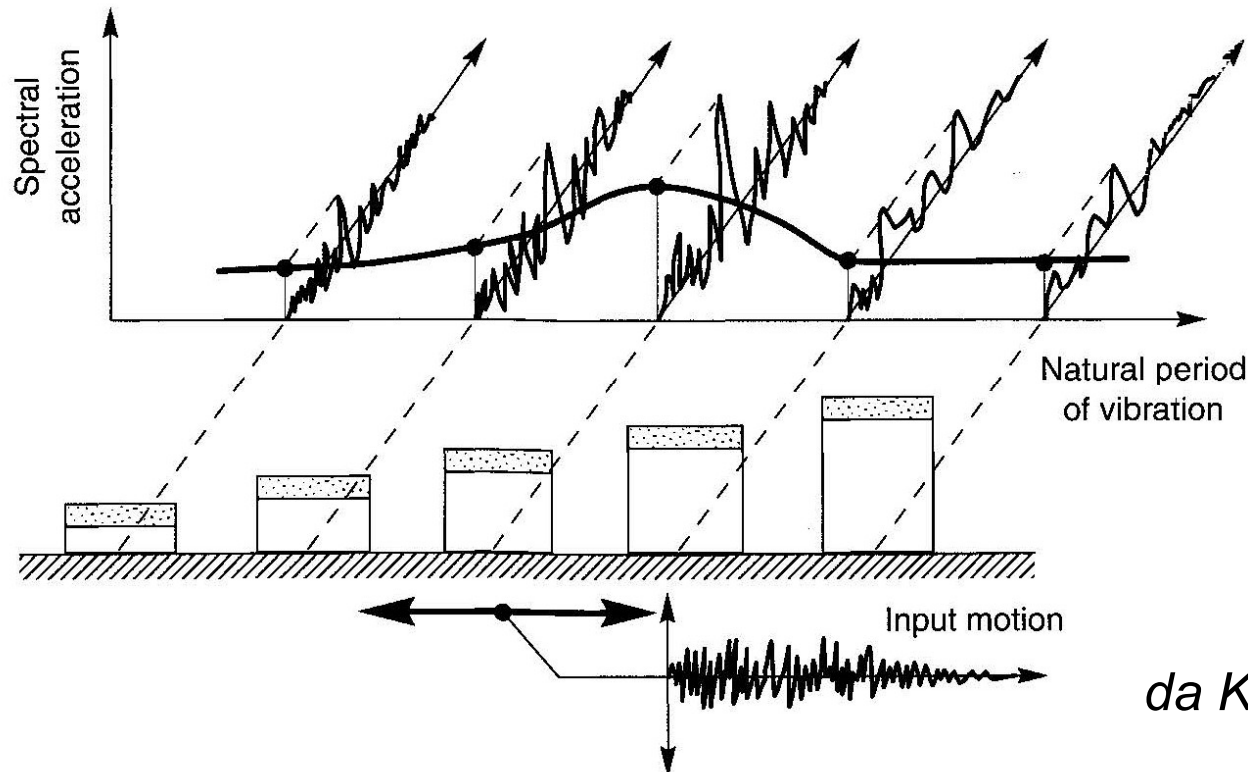
Spettro di Risposta

Spettro di risposta dell'oscillatore semplice:

Legge di variazione della massima ampiezza (accelerazione, velocità o spostamento) del moto prodotto da un segnale sismico $u(t)$ alla base di un oscillatore semplice

- Fissato smorzamento ξ
- Periodo proprio T variabile

$$T = \frac{1}{f_n} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$



da Kramer (1996)

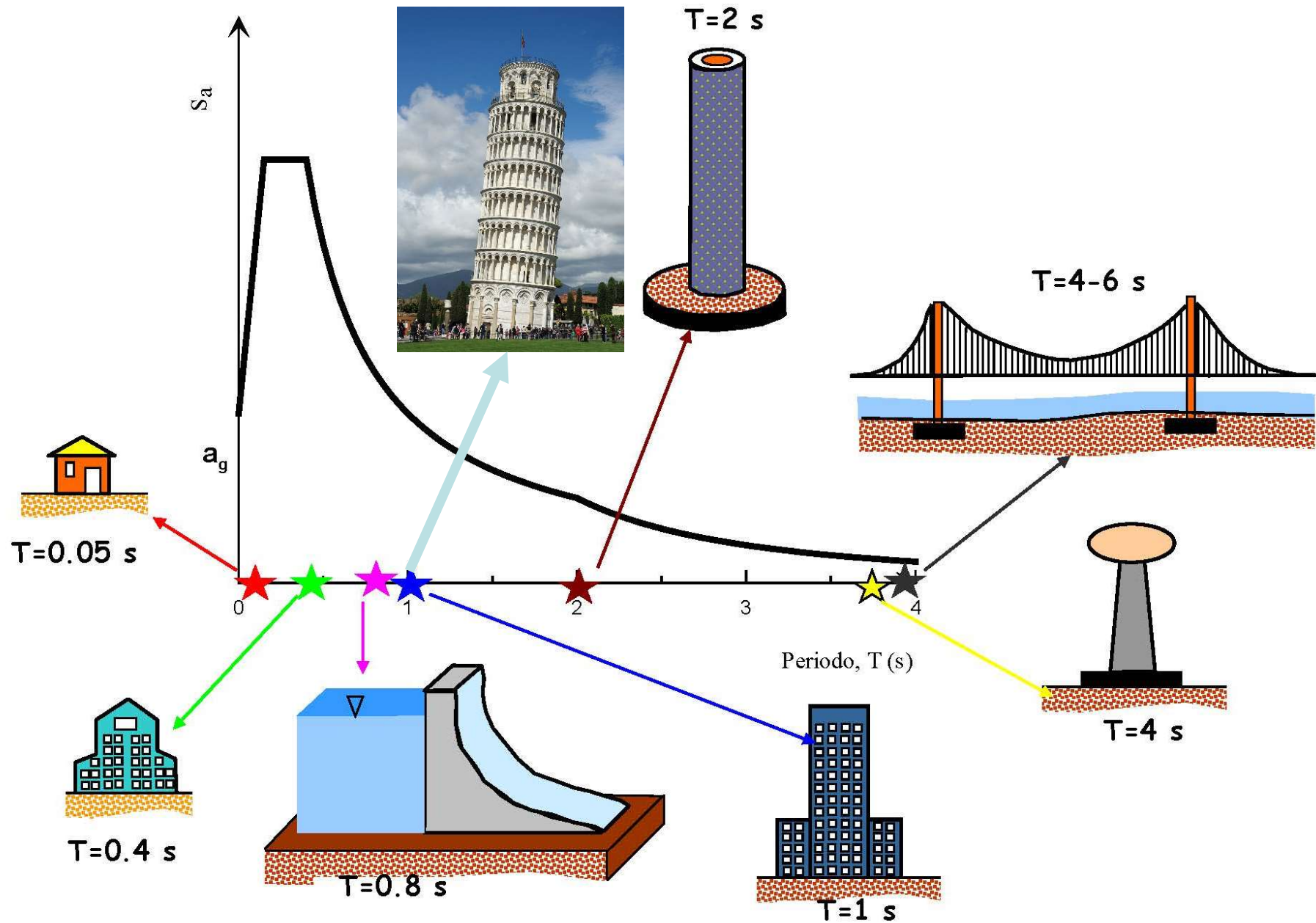
Regola del pollice per un edificio: $T = 0.1 N_{piani}$ Edificio di altezza H (NTC 2008): $T = 0.05 H^{3/4}$

Lo spettro di risposta è il più comune strumento di analisi sismica in quanto l'accelerazione spettrale $S_a(t)$, moltiplicata per la massa m , corrisponde alla massima sollecitazione orizzontale agente su un sistema (ad es. struttura) per effetto di un moto sismico $u(t)$ alla base

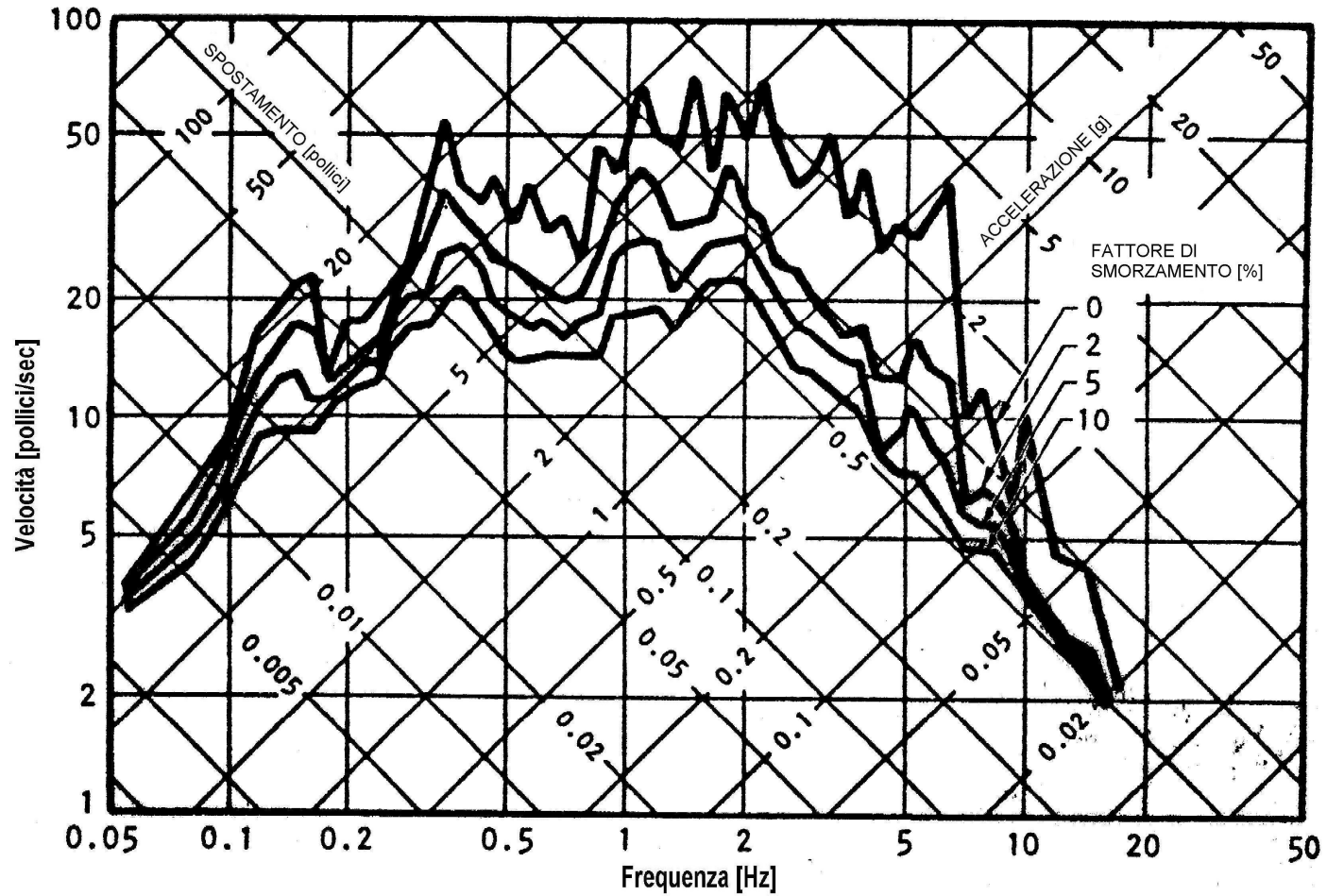
Nelle analisi pseudo-statiche si assume: $F_h = mS_a = mg \frac{S_a}{g} = k_h W$ $k_h = \frac{S_a}{g}$

Amplificazione (o De-Amplificazione) del Moto Sismico

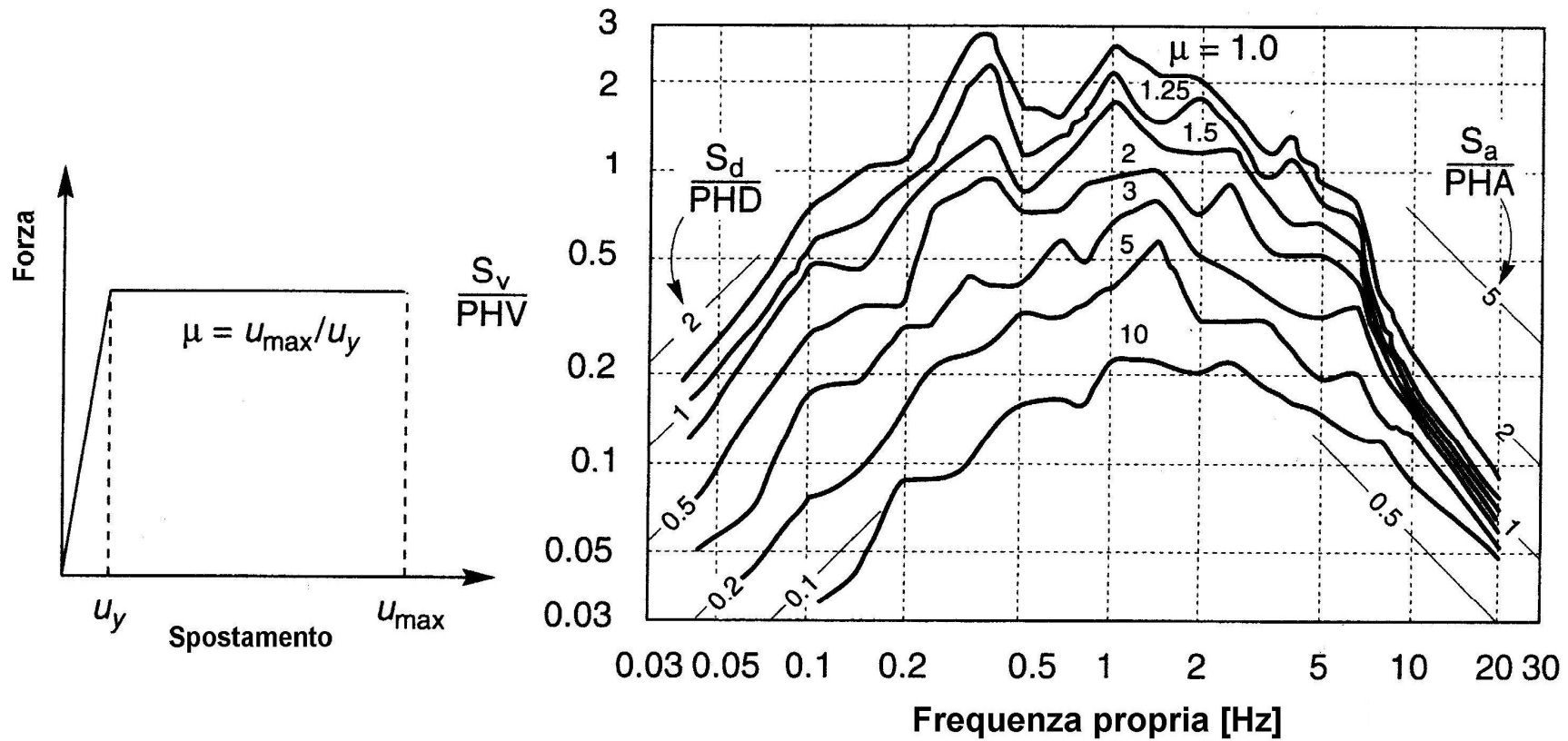
PERIODO FONDAMENTALE DI DIVERSE STRUTTURE



RAPPRESENTAZIONE DELLO SPETTRO DI RISPOSTA: SCALA TRI-LOG



SPETTRO DI RISPOSTA ANELASTICO



Azione Sismica (NTC 2018)

Gli approcci semplificati sono applicabili solo nel caso di depositi appartenenti ad una delle categorie di sottosuolo semplificate previste dalle norme tecniche

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

h_i spessore dell'i-esimo strato;
 $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio
 N numero di strati;
 H profondità del substrato,
 non inferiore a 800 m/s.

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Approcci Semplificati per Valutare gli Effetti Topografici e Stratigrafici (NTC 2018 ed Eurocodice 8-1)

Questi effetti sono tenuti in conto mediante opportune modifiche allo spettro di risposta elastico orizzontale su roccia

$$S = S_S \cdot S_T$$

S_S = coefficiente di amplificazione stratigrafica

S_T = coefficiente di amplificazione topografica (1.0 – 1.2 – 1.4)

Tab. 3.2.IV – Espressioni di S_S e di C_C

Categoria sottosuolo	S_S	C_C
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Approccio Semplificato (NTC 2018 ed Eurocodice 8-1)

CASTELNUOVO DI GARFAGNANA

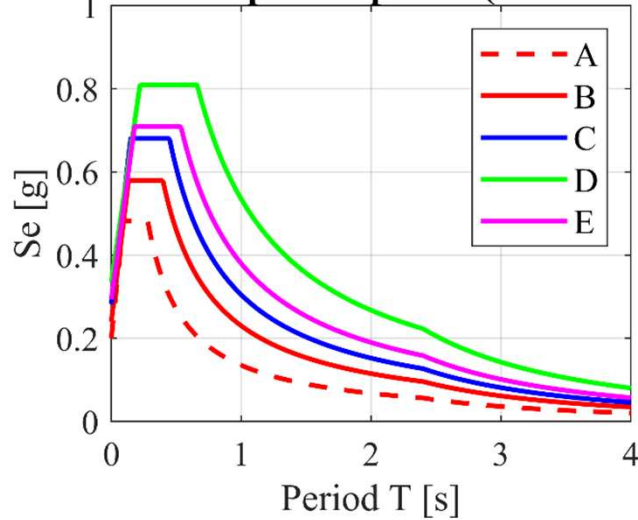
$Tr = 475$ anni

$a_g = 0.200$ [g]

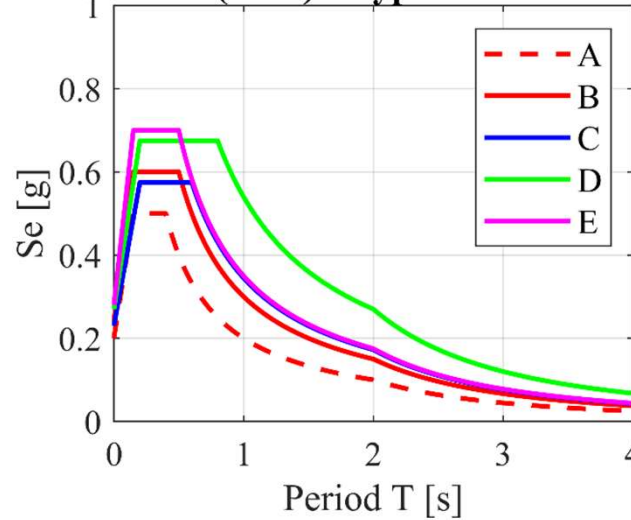
$F_0 = 2.410$

$Tc^* = 0.280$ s

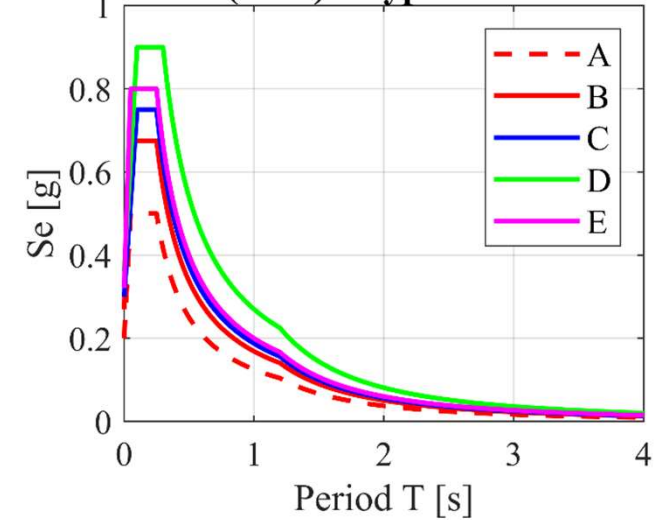
Elastic Response Spectra (NTC 2018)



EC8 (2004) - Type 1 - $M > 5.5$



EC8 (2004) - Type 2 - $M < 5.5$



REGGIO CALABRIA

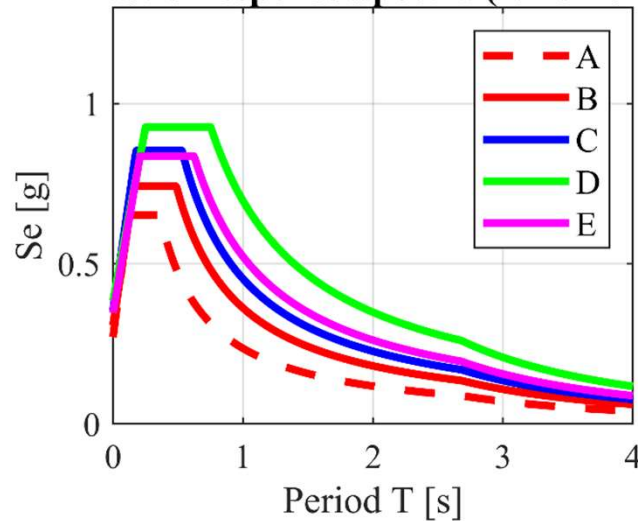
$Tr = 475$ anni

$a_g = 0.270$ [g]

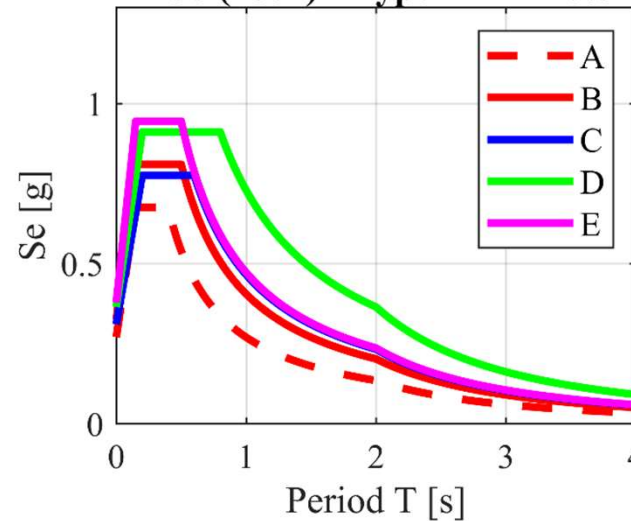
$F_0 = 2.414$

$Tc^* = 0.362$ s

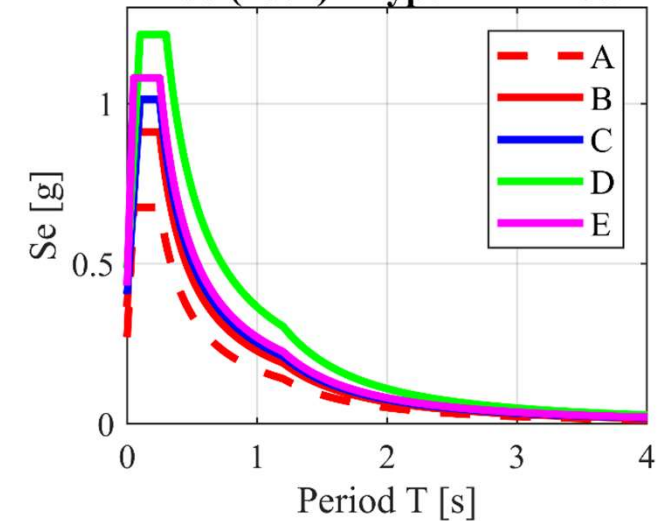
Elastic Response Spectra (NTC 2018)

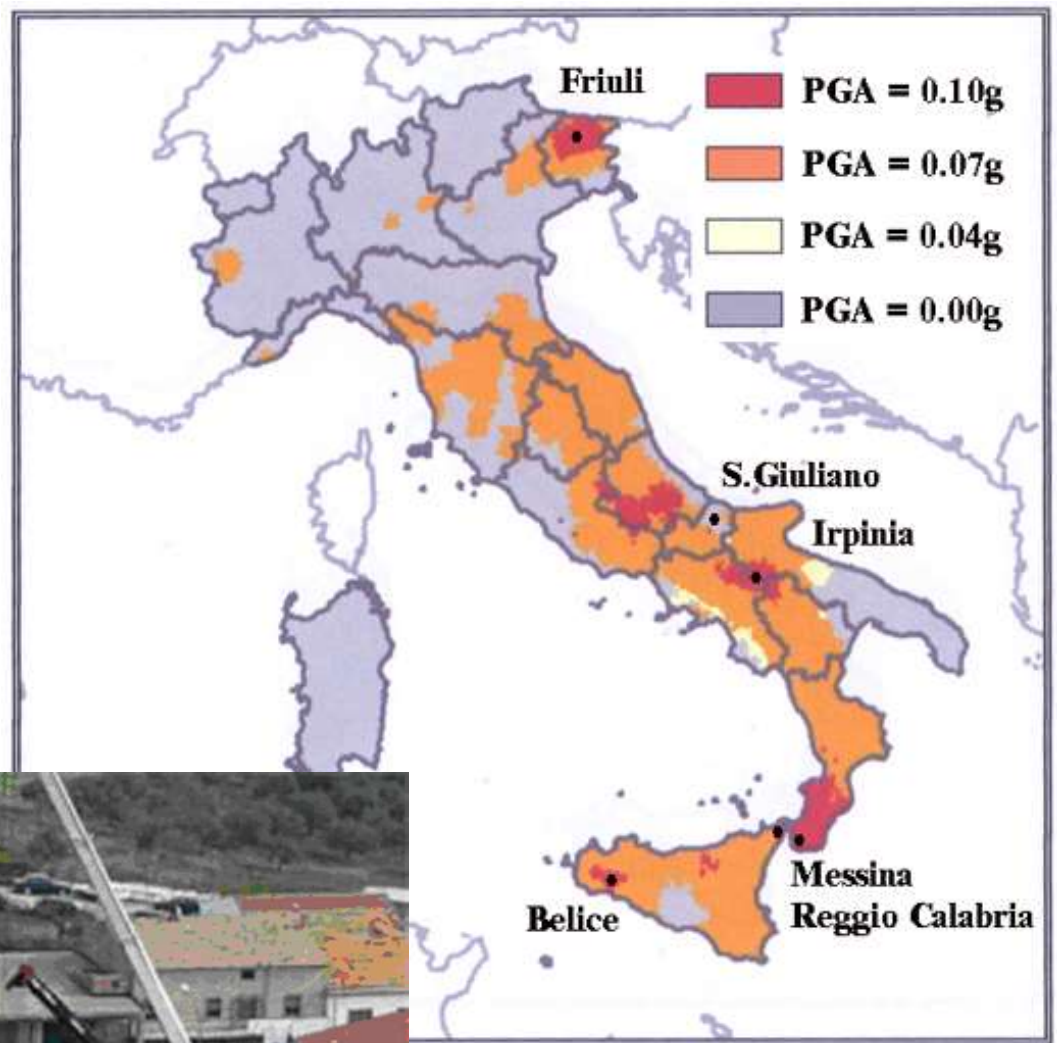
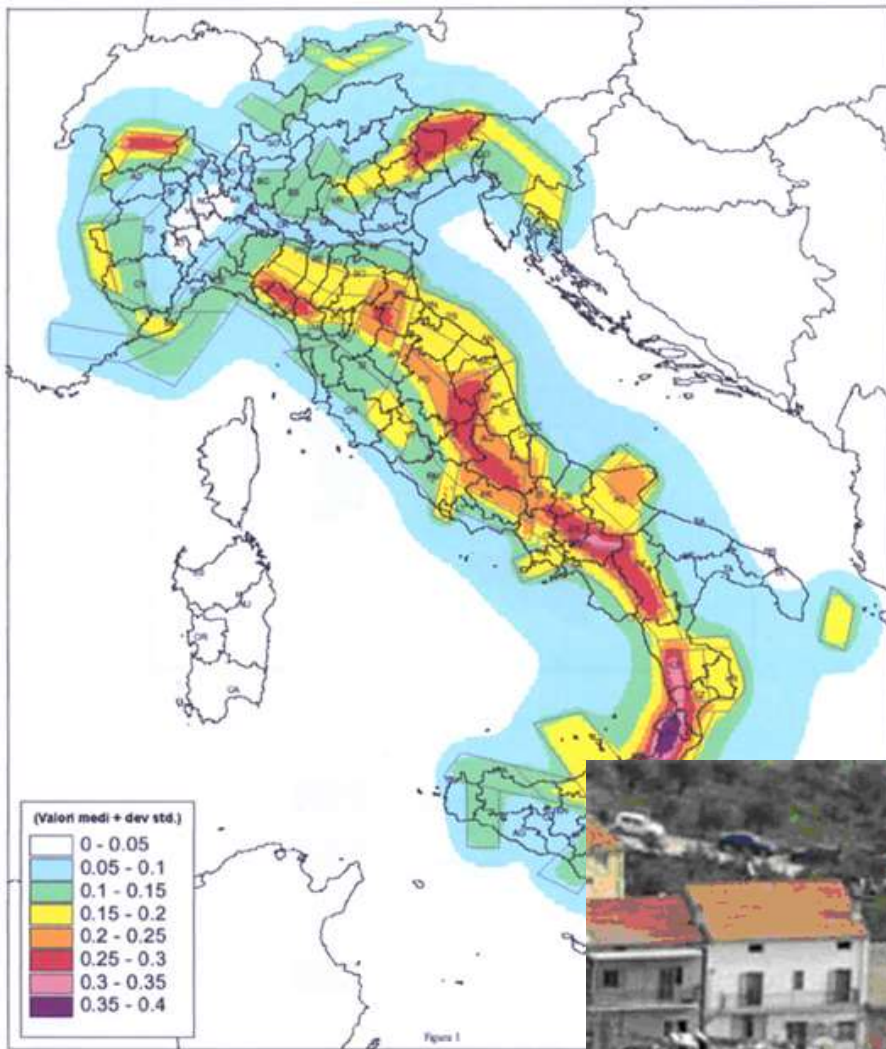


EC8 (2004) - Type 1 - $M > 5.5$



EC8 (2004) - Type 2 - $M < 5.5$



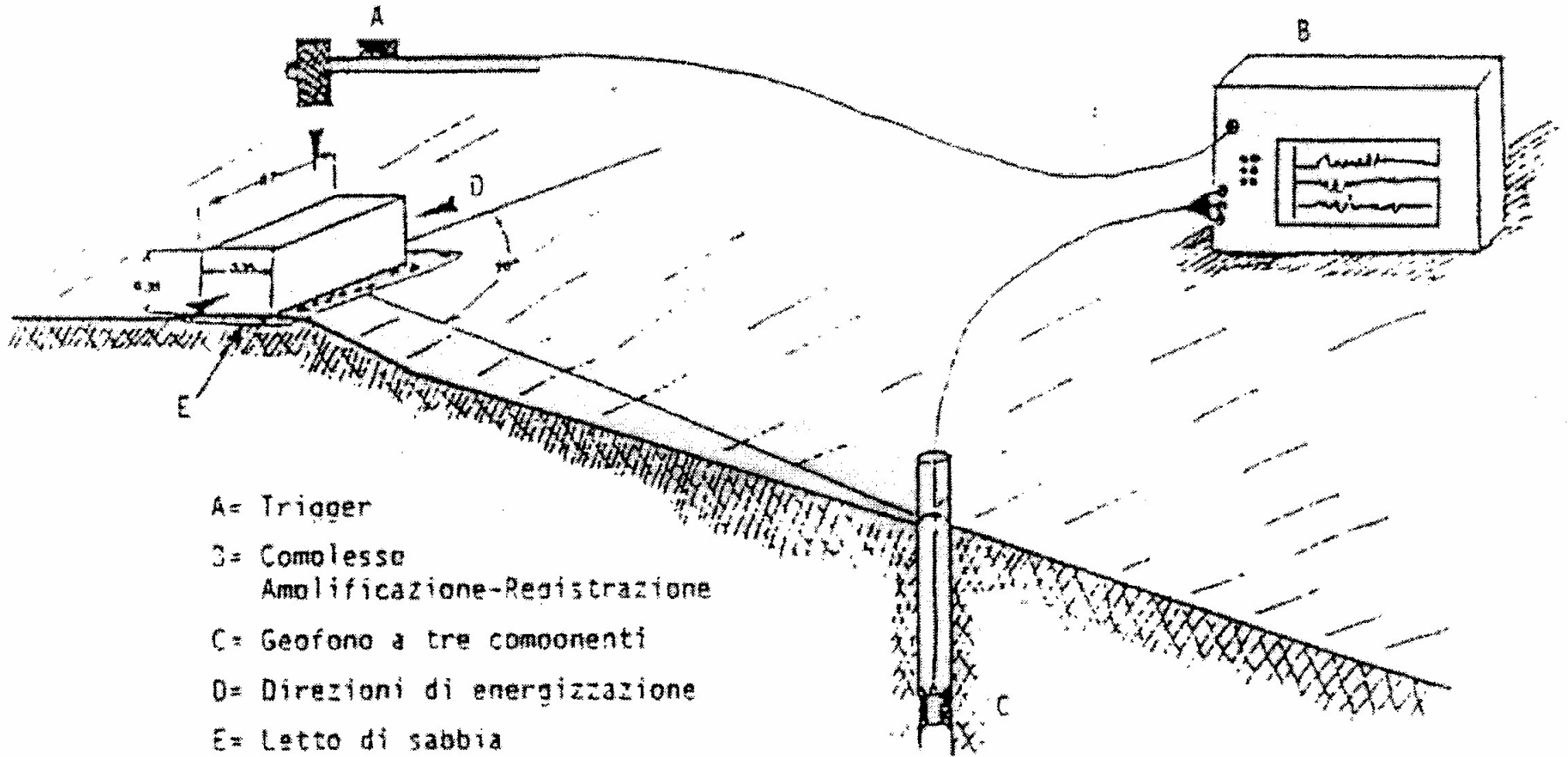


TECNICHE DI MISURA E CAMPO DI APPLICAZIONE

TECNICHE DISPONIBILI E CAMPO DI APPLICAZIONE

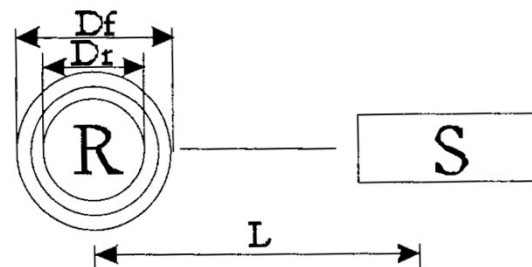
- METODI IN FORO
 - CH, DH
 - SCPT, SDMT
- METODI DI SUPERFICIE
 - RIFRAZIONE (SH)
 - RIFLESSIONE (SH)
 - MASW

Schema della prova Down Hole

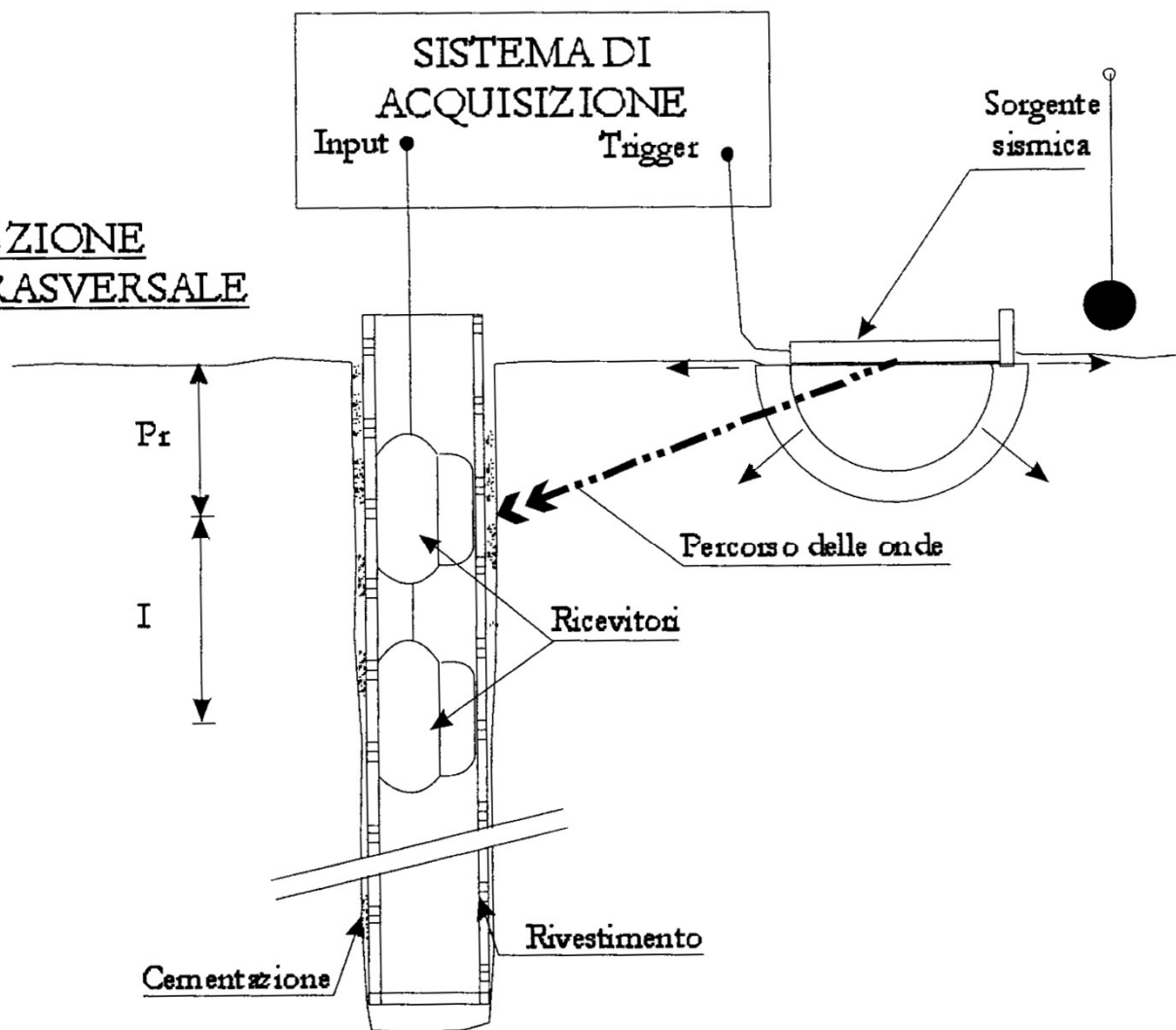


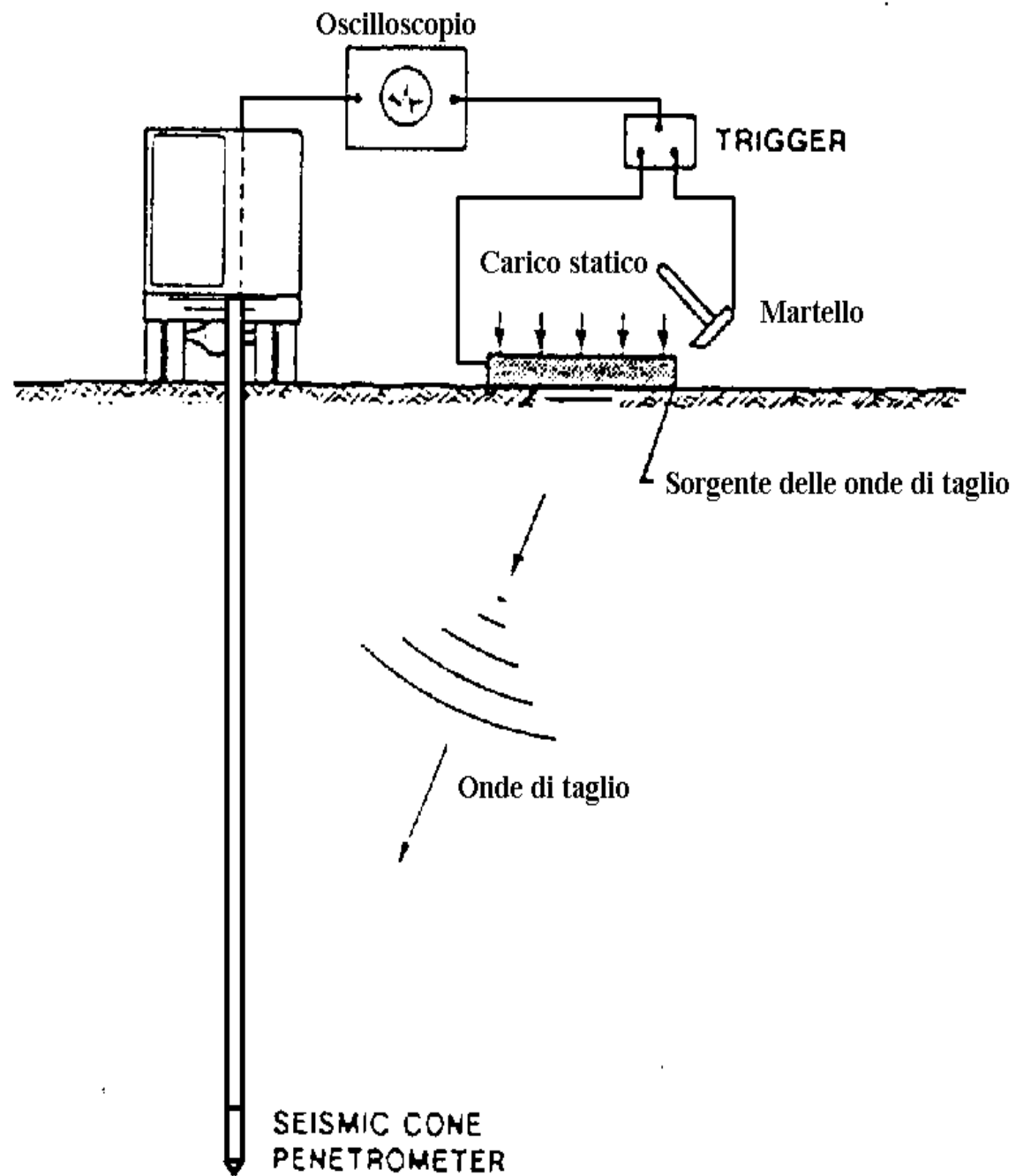
PROVE GEOFISICHE IN FORO

PLANIMETRIA



SEZIONE TRASVERSALE





INTERPRETAZIONE

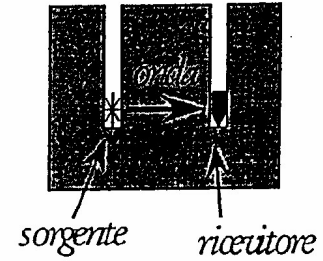
METODI DISPONIBILI

- VELOCITA' DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE DI VOLUME
 - INDIVIDUANDO IL PRIMO ARRIVO (P – S)
 - SINGOLO RICEVITORE (FORME D'ONDA, DROMOCRONE, TEMPI DI ARRIVO CORRETTI, PSEUDO-INTERVAL)
 - INVERSIONE BATTUTA (CROSS-OVER)
 - DUE RICEVITORI, PICCO-PICCO (TRUE INTERVAL)
 - MISURE RIPETUTE (STACKED) PER MIGLIORARE IL RAPPORTO SEGNALE/RUMORE
 - CROSS-CORRELAZIONE
 - Due ricevitori
 - Geologismiki, CPT PaGE (www.ing.unipi.it/geotecnica)

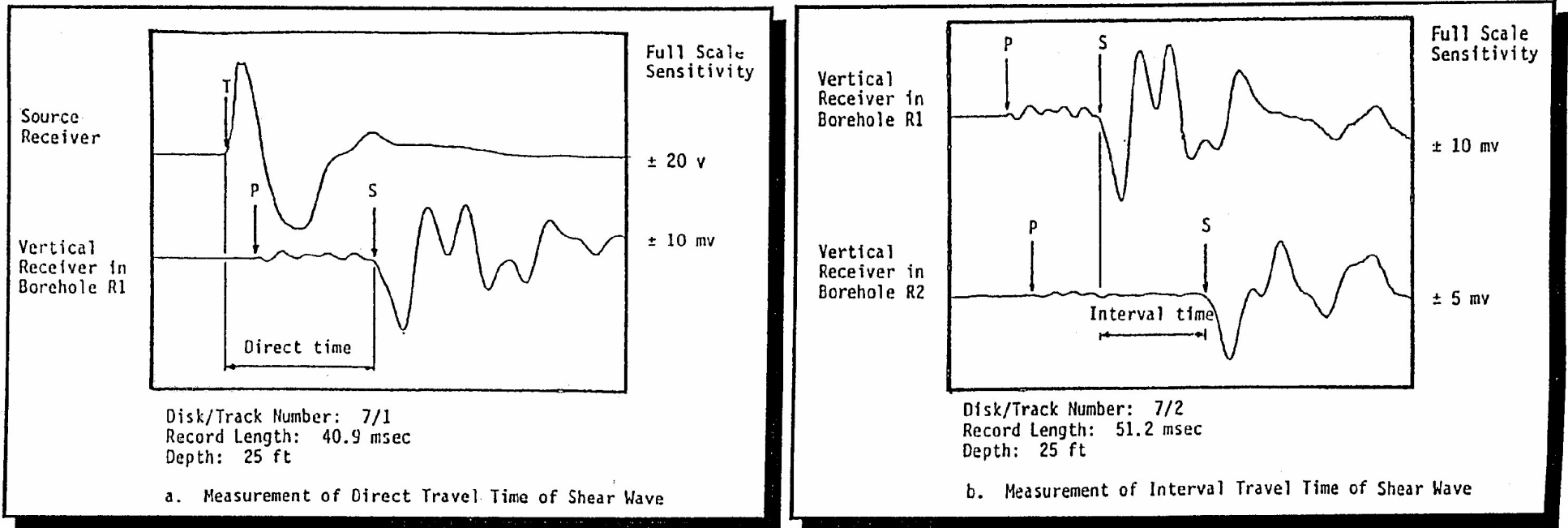


Indagini Geofisiche

Prove Invasive \Rightarrow Cross-Hole Test \Rightarrow



• Interpretazione

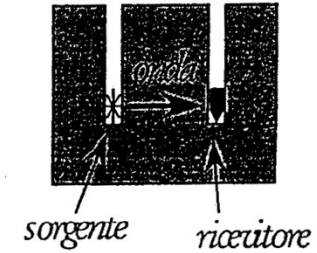


(da Stokoe, 1992)

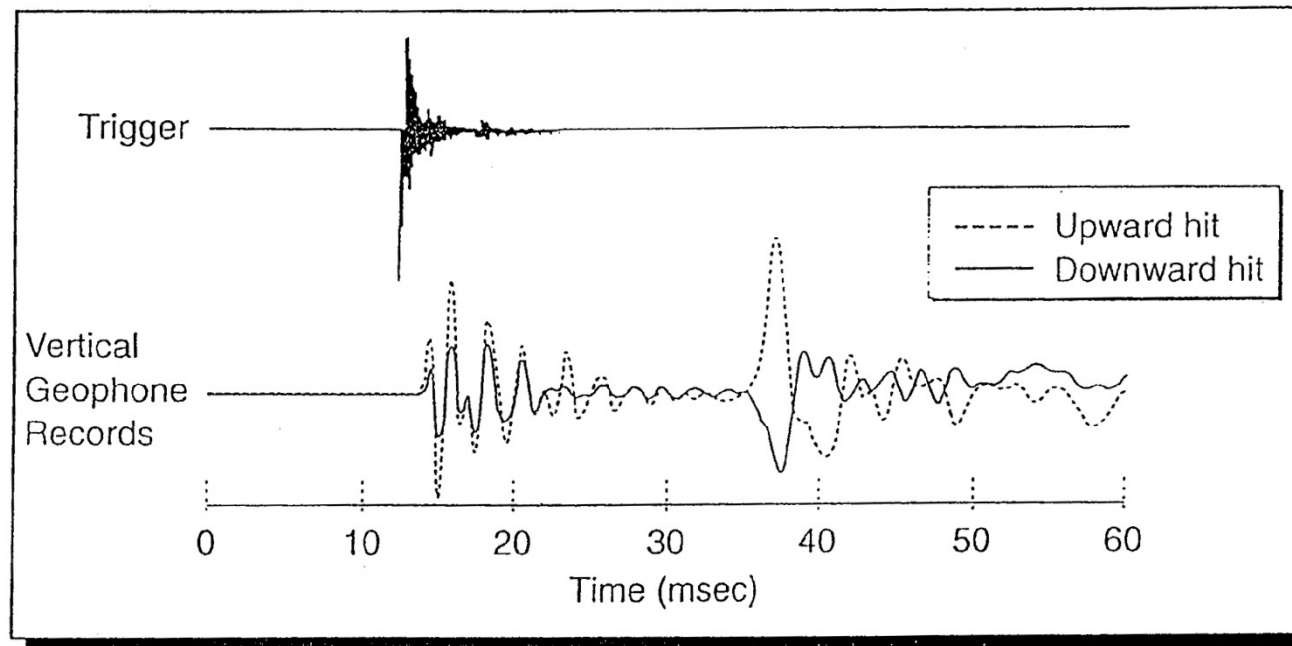


Indagini Geofisiche

Prove Invasive ⇒ *Cross-Hole Test* ⇒



• Interpretazione



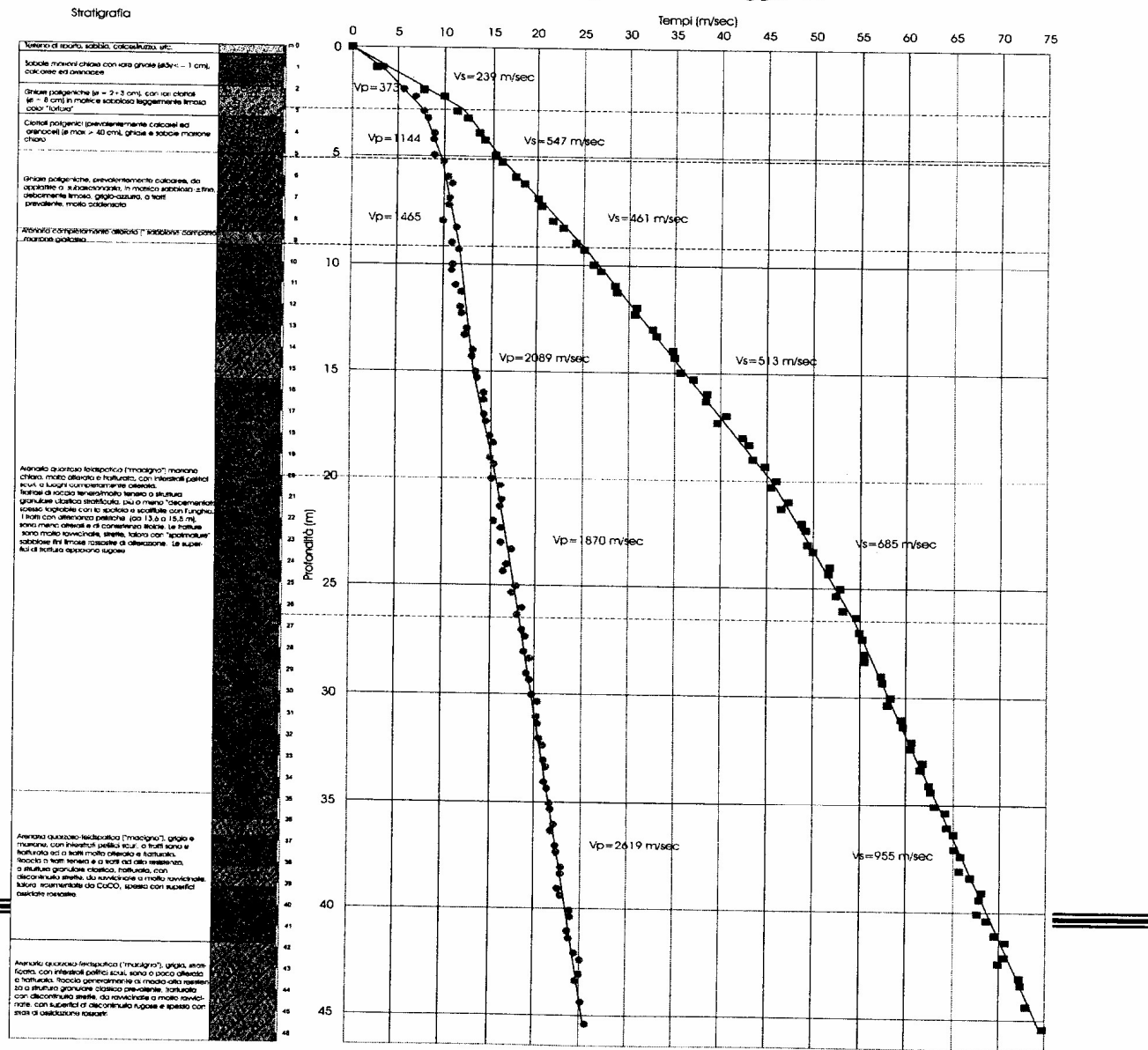
(da Kramer, 1996)

PROVE GEOFISICHE IN FORO



PROGETTO V.E.I.
SUBPROGETTO GARFAGEO

DOWNHOLE - Tempi di percorrenza corretti
Comune di Castelnuovo di Garfagnana - Sondaggio S1



ELASTICITA' ISOTROPA

PROPAGATION VELOCITIES

$$V_s = d/t_s \quad V_p = d/t_p \quad V_R = f(\omega) = \lambda f$$

ELASTIC PARAMETERS

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad M_0 = \rho V_p^2 \quad V_R / V_s \cong (0.862 + 1.14\nu) / (1 + \nu)$$

$$\nu = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2 (V_p^2 - V_s^2)$$

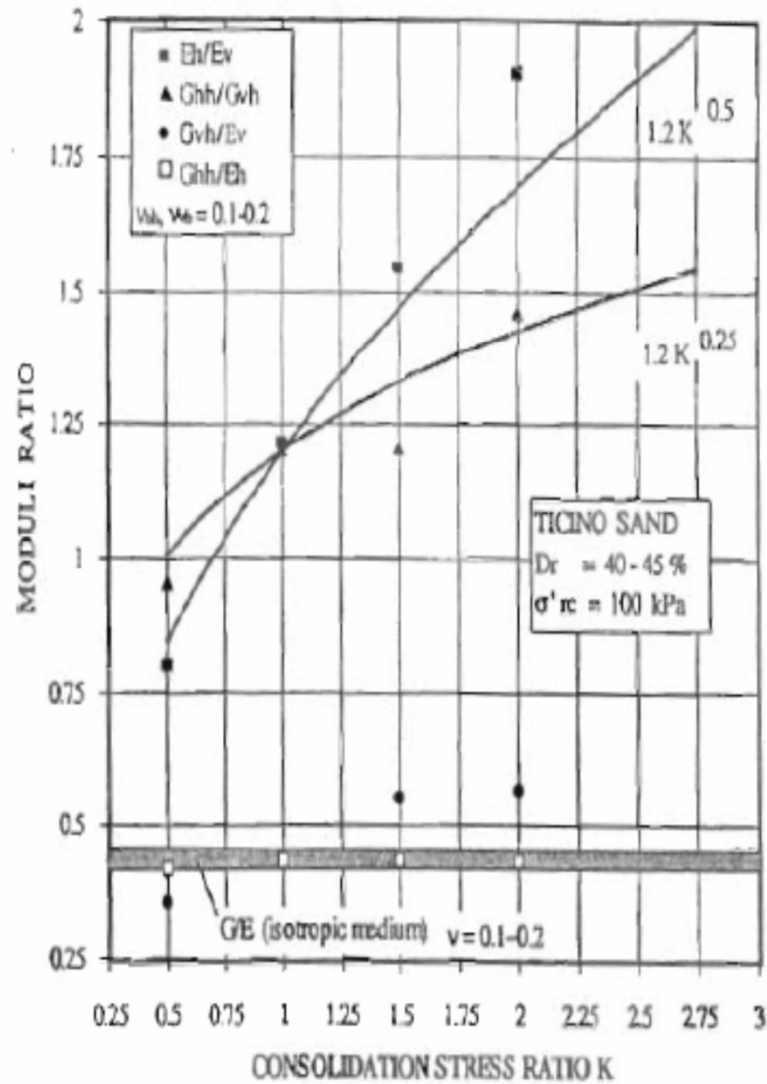
$$\gamma = \frac{u_s}{V_s}$$

DIPENDENZA DELLA VELOCITA' DALLO STATO TENSIONALE

$$V_s = C_s \sqrt{[F(e)(\sigma_a')^{na} (\sigma_b')^{nb} (\sigma_c')^{nc}]}$$

$$V_p = C_p \sqrt{[F(e)(\sigma_a')^{na} (\sigma_b')^{nb} (\sigma_c')^{nc}]}$$

ANISOTROPIA DELLA RIGIDEZZA A PICCOLE DEFORMAZIONI



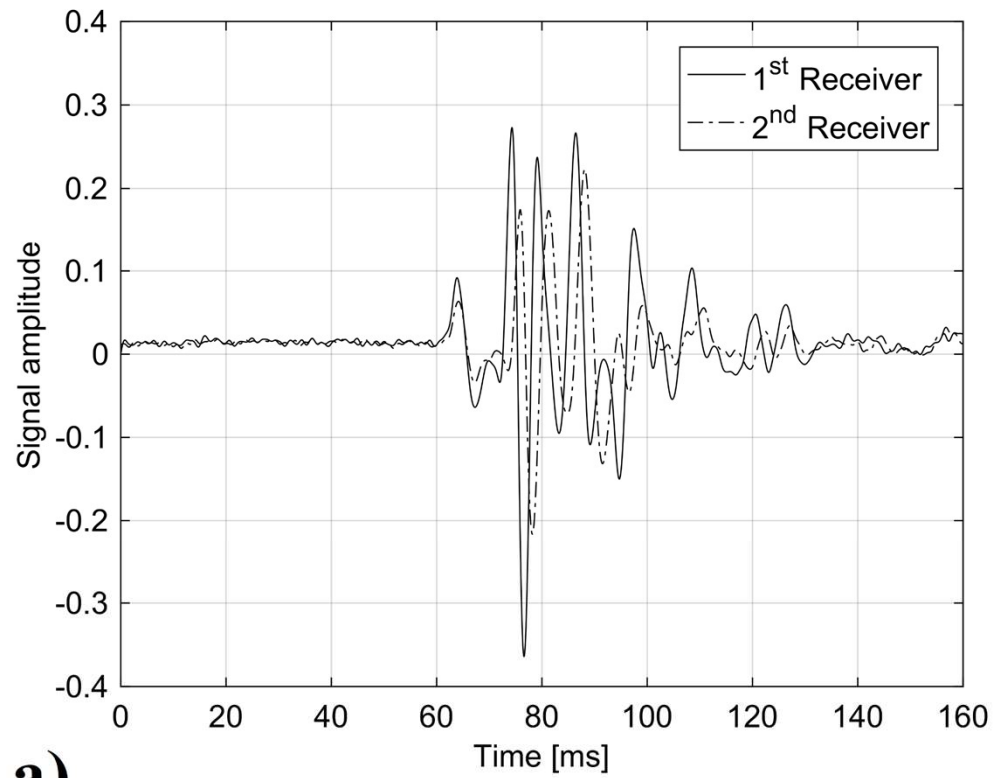
- E_v = Young's modulus in the vertical direction
- E_h = Young's modulus in the horizontal direction
- ν_{vh} = Poisson's ratio for effect of the vertical stress on the horizontal strain
- ν_{hh} = Poisson's ratio for effect of the horizontal stress on complementary horizontal strain
- G_{vh} = shear modulus referred to the vertical plane.

ESEMPI DI MISURE

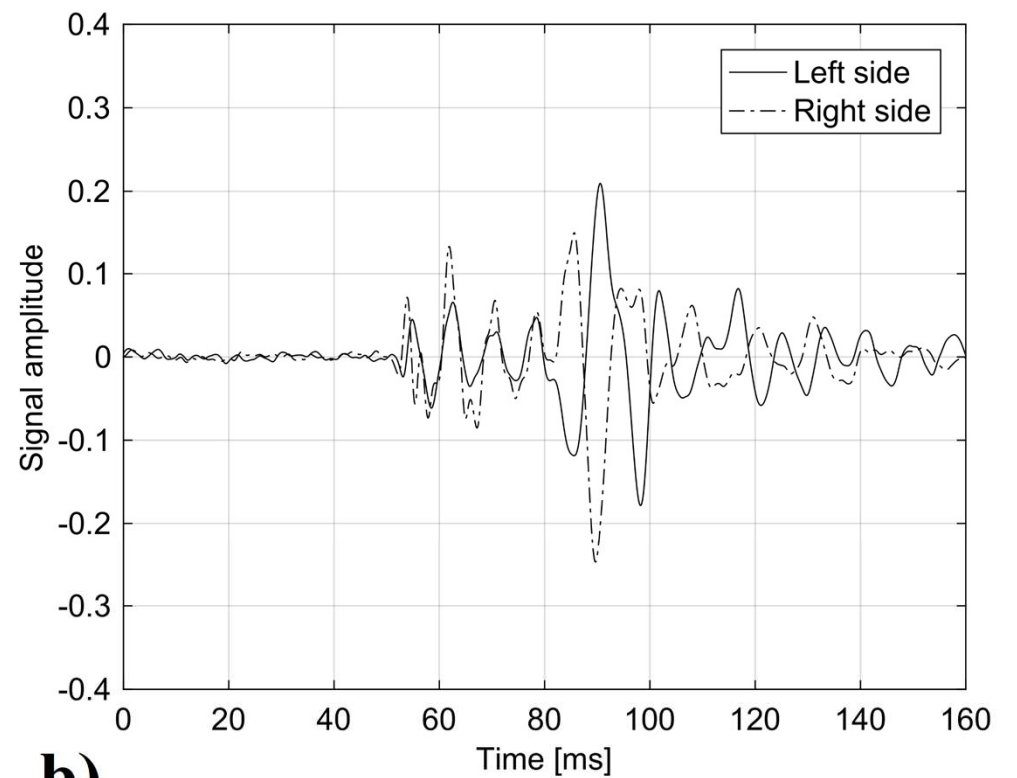
SITI

- **CAMPUS UNIVERSITA' DI PAVIA**
 - S-CPTu attrezzato con due accelerometri a 0.5 m (velocità di campionamento 0.033 ms)
 - Prova DH
 - La prova S-CPTu è stata interrotta a 16 m per la presenza di uno strato rigido a grana grossa
 - L'interpretazione è stata fatta col metodo della cross-correlazione e true-interval
 - Il rapporto segnale rumore a 14 m era molto basso e le misure delle onde P non interpretabili

ESEMPI DI MISURE PAVIA

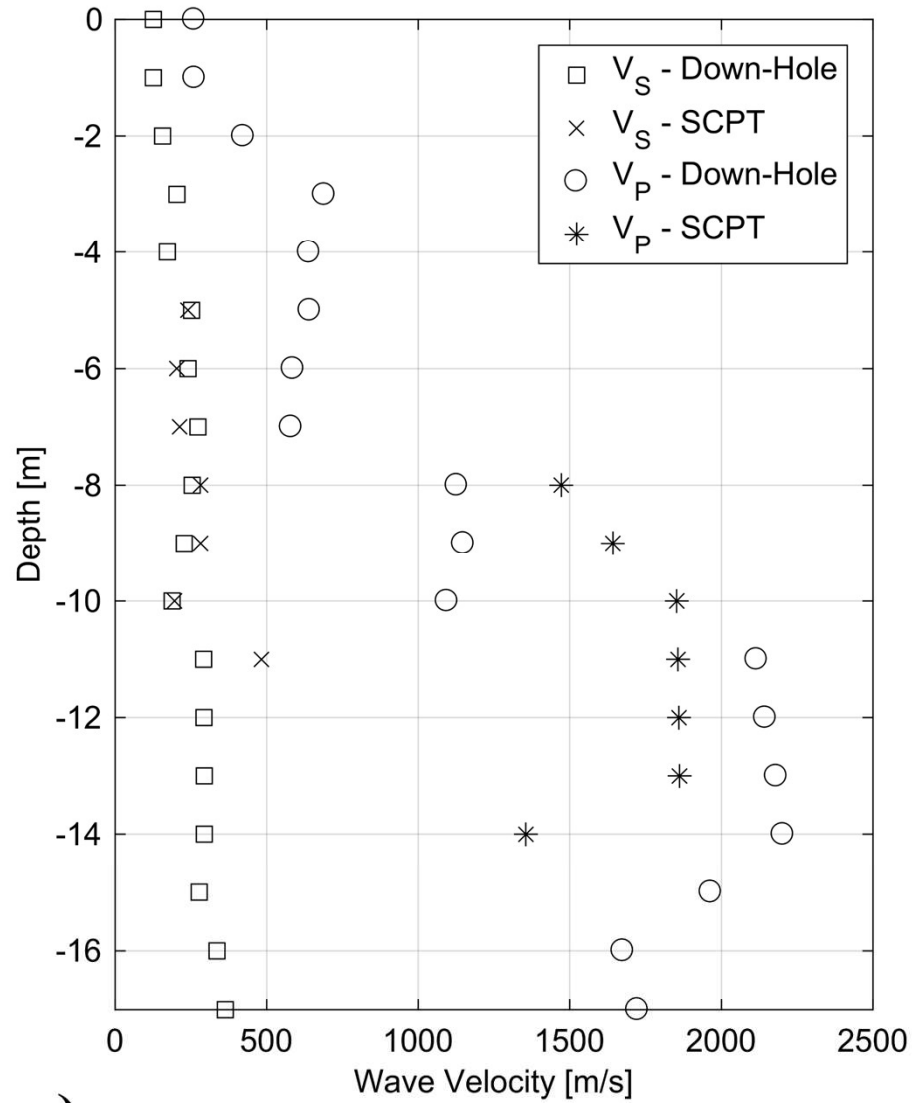


a)

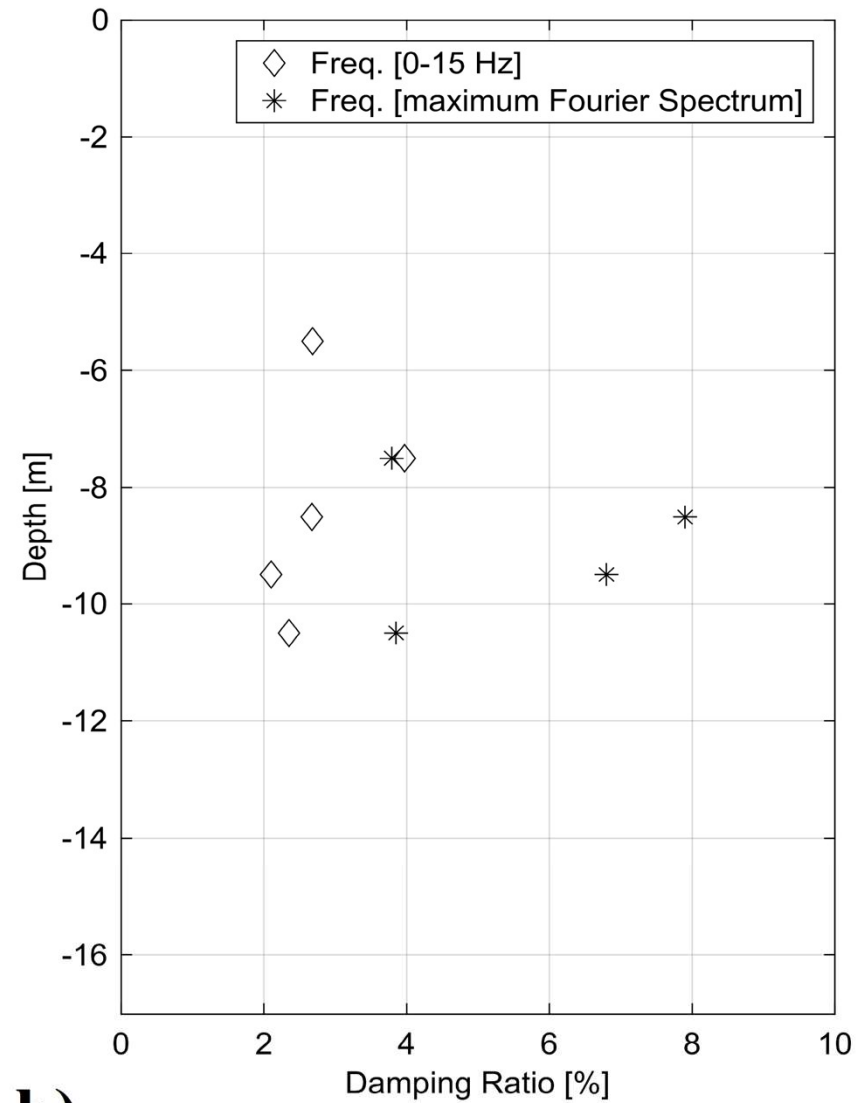


b)

CONFRONTO DH – SCPT



a)

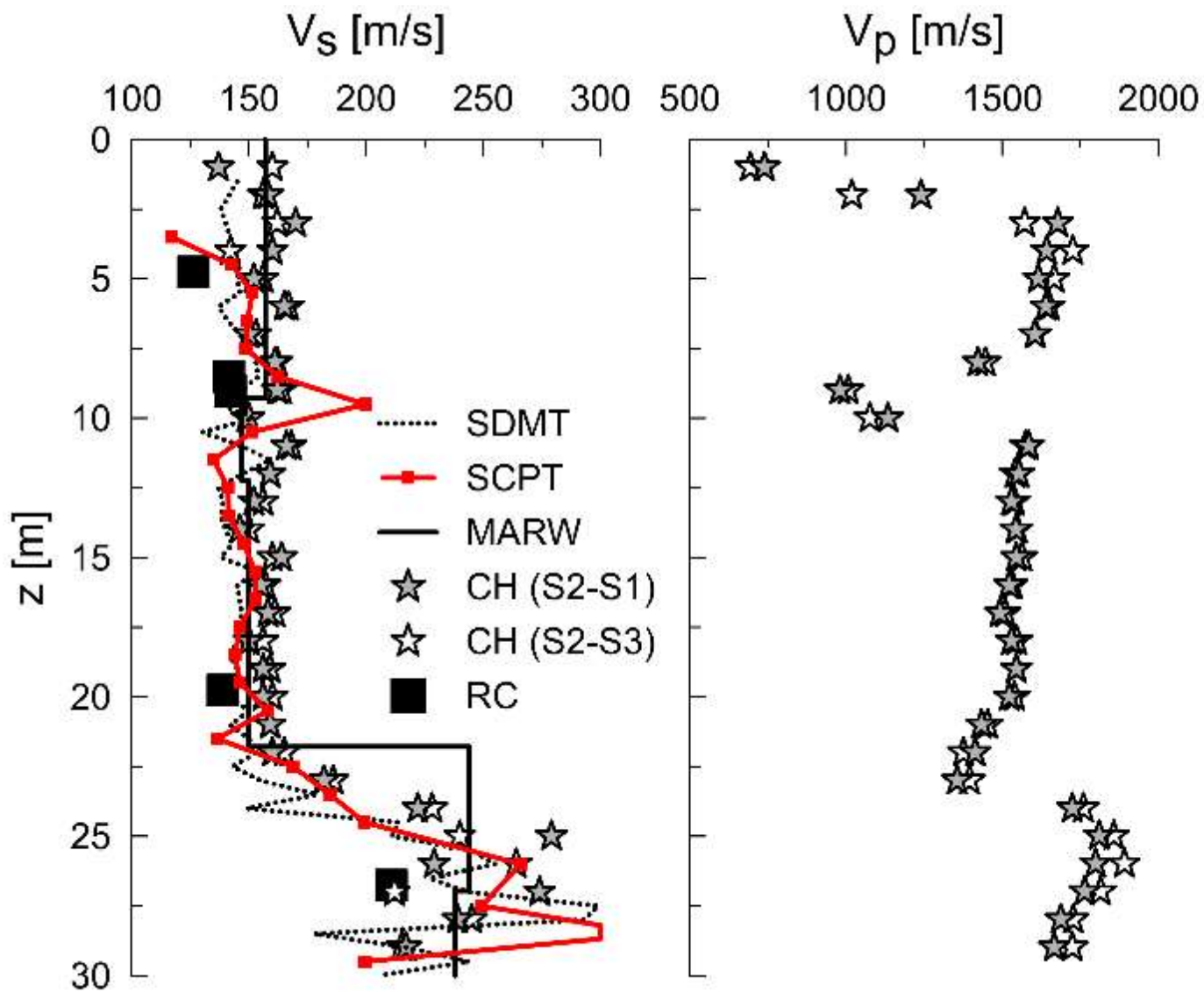


b)

SITI

- **CAMPUS UNIVERSITA' DI PISA (BIOLOGIA)**
 - S-CPTu attrezzato con due accelerometri a 0.5 m (velocità di campionamento 0.033 ms)
 - Prova CH e sismica a riflessione (MARW)
 - La prova S-CPTu ha raggiunto la profondità di 30 m
 - L'interpretazione è stata fatta col metodo della cross-correlazione e true-interval
 - Non è stato possibile ottenere misure significative delle onde P dalla S-CPTu

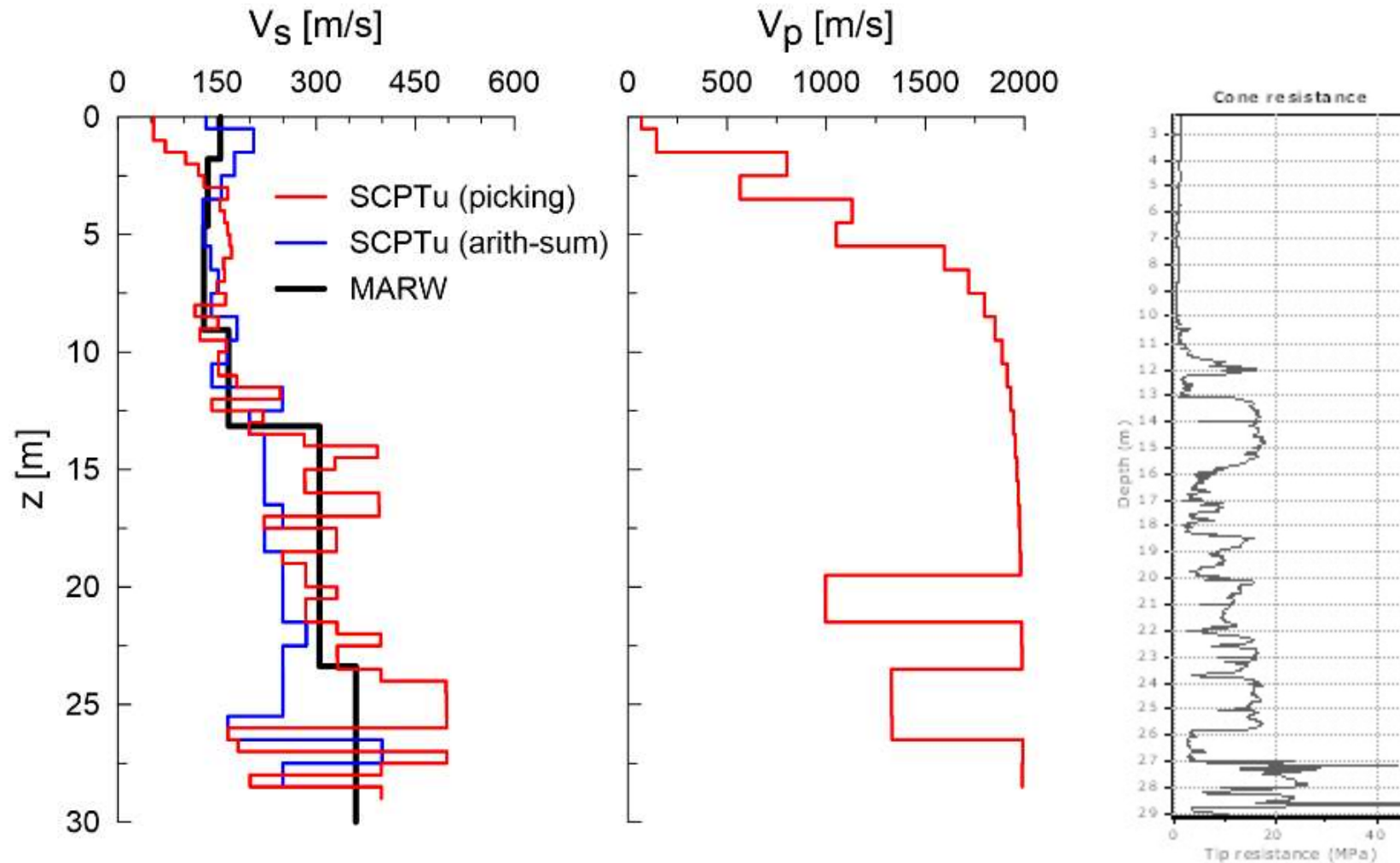
CONFRONTO PISA



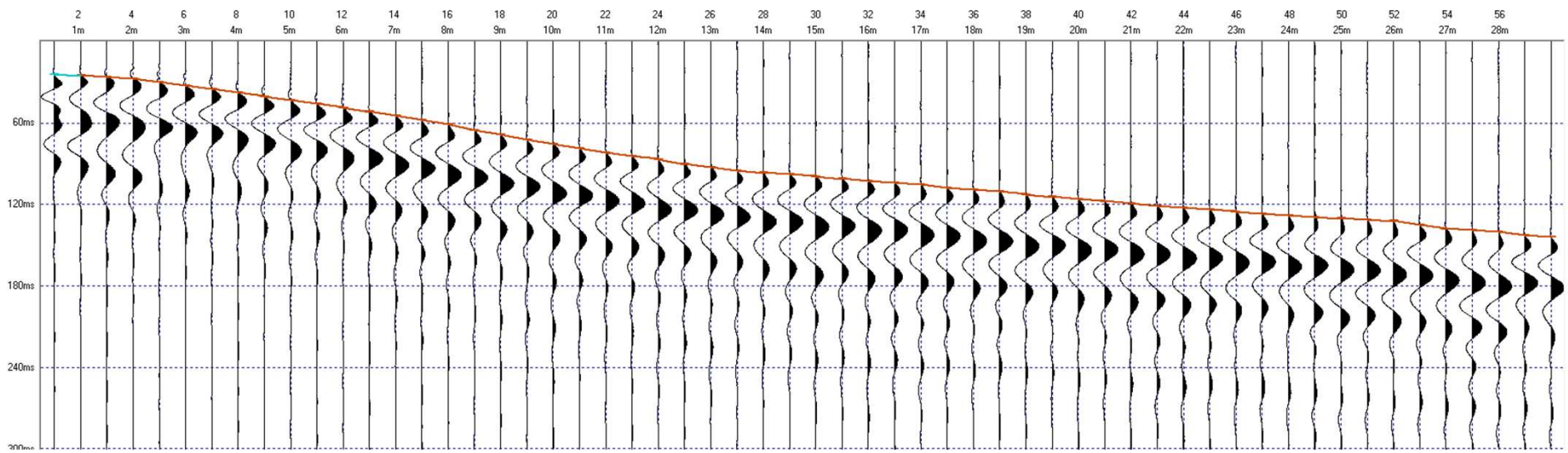
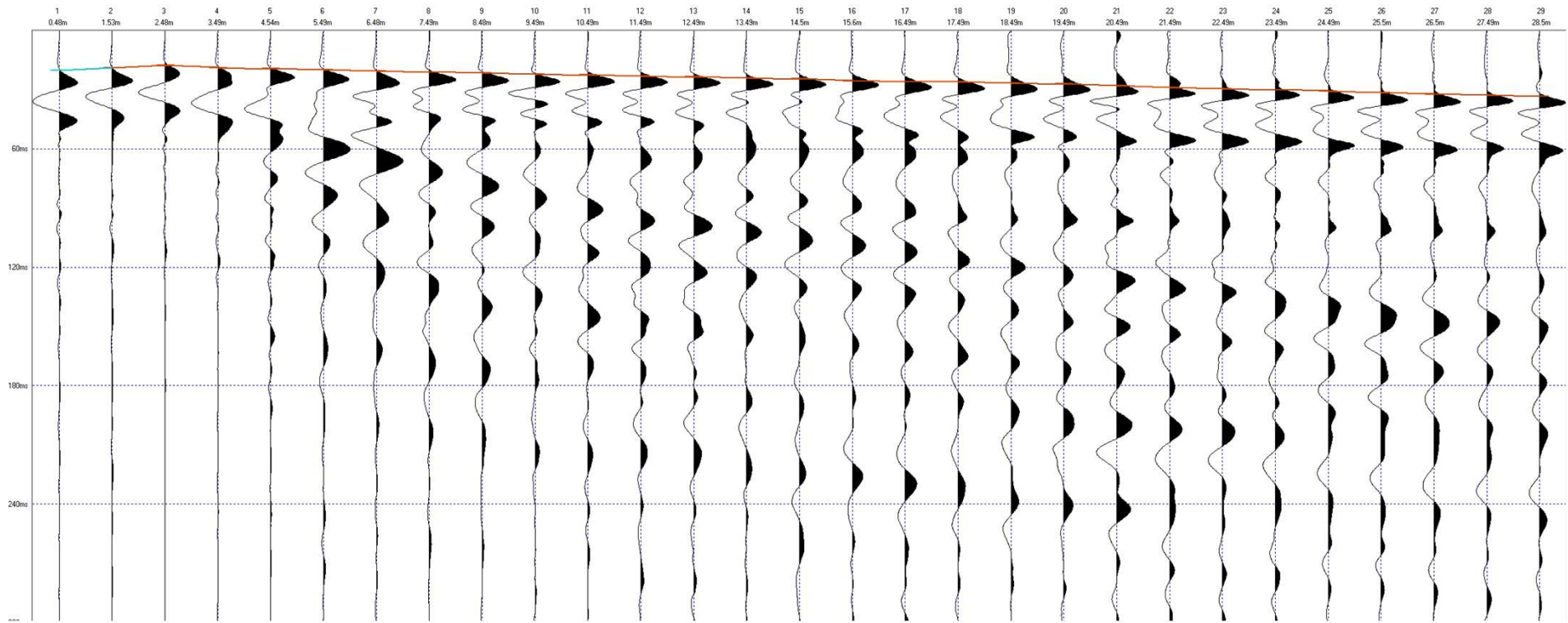
SITI

- CASTEL SAN GIOVANNI (PIACENZA)
 - S-CPTu attrezzato con due geofoni a 0.5 m (velocità di campionamento 0.25 ms, rapporto segnale rumore superiore alla coppia accelerometrica)
 - Sismica a riflessione (MARW)
 - La prova S-CPTu ha raggiunto la profondità di 29 m (raggiunto il limite strumentale per strato di ghiaia)
 - L'interpretazione è stata fatta col metodo della cross-correlazione e true-interval per onde S
 - Onde P interpretate col manual picking e true interval

CONFRONTO CASTEL SAN GIOVANNI



Forme d'onda e dromocrone onde P



- Meisina C., Ozturk Kardogan P. S., Boni R., Stacul S., Castaldini D., Fontana D., Lugli S., Bordoni M., Lo Presti D. (2021). *Development and Use of a Minicone for Liquefaction Risk Evaluation in Layered Soil Deposits*. JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, vol. 147, 04020169, ISSN: 1090-0241, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002457
- Stacul S., Magalotti A., Baglione M., Meisina C., Lo Presti D. (2020). *Implementation and Use of a Mechanical Cone Penetration Test Database for Liquefaction Hazard Assessment of the Coastal Area of The Tuscany Region*. GEOSCIENCES, vol. 10, 128, ISSN: 2076-3263, doi: 10.3390/geosciences10040128
- Lo Presti D., Squeglia N., Cosanti B. (2018). *Evaluating degree of Compaction of Levees Using Cone Penetration Testing*. JOURNAL OF GEOENGINEERING, vol. 13, p. 121-134, ISSN: 1990-8326, doi: 10.6310/jog.201809_13(3).4
- Diego Lo Presti, Stefano Stacul, Claudia Meisina, Massimiliano Bordoni, Marco Bittelli (2018). *Preliminary Validation of a Novel Method for the Assessment of Effective Stress State in Partially Saturated Soils by Cone Penetration Tests*. GEOSCIENCES, vol. 8, p. 1-13, ISSN: 2076-3263, doi: 10.3390/geosciences8010030
- Lo Presti, Diego Carlo, Giusti, Ilaria, Cosanti, Barbara, Squeglia, Nunziante, Pagani, Ermanno (2016). *Interpretation of CPTu in “unusual” soils*. RIVISTA ITALIANA DI GEOTECNICA, vol. 4, p. 25-44, ISSN: 0557-1405

- Lo Presti D, Meisina C, Squeglia N (2009). *Applicabilita' di prove penetrometriche statiche nella ricostruzione del profilo stratigrafico*. RIVISTA ITALIANA DI GEOTECNICA, vol. XLIII, p. 9-33, ISSN: 0557-1405
- Lo Presti, Diego Carlo, Stacul, Stefano, Giusti, Ilaria, Claudia, Meisina, Maria Giuseppina Persichillo, Edoardo, Pagani, Massimiliano, Siviero, Ervis, Uruci, Ermanno, Pagani (2017). *Use in Practice of Seismic Tests According to Eurocodes*. IN: (A CURA DI): GEZIM HASKO NERITAN SHKODRANI OLTON MARKIO DRITAN PROFKA ERION BUCACI, 2017 ICCE, INTERNATIONAL CONFERENCE OF CIVIL ENGINEERING. p. 2-24, Tirana:VASSI, ISBN: 9789928442925, Tirana, 12 - 14 Ottobre 2017
- Anders Lindgård, Aleksander Gundersen, Tom Lunne, Jean-Sebastien L'Heureux, Kristoffer Kåsin, Norges Geotekniske Institutt (NGI). Eigil Haugen, Statens vegvesen. Arnfinn Emdal, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Martin Carlson, Geotech. Ard Veldhuijzen, Geomil. Ervis Uruci, Pagani Ermanno, (2018) *Effect of Cone Type on Measured Cptu Results from Tiller Flotten Quick Clay Test Site*. PROC. CPT18, DELFT 21-22 JUNE 2018, pp: 38.1-38.15
- S. Stacul, D. Lo Presti, N. Nenci, F. Fiera, M. Perini, D. Marchetti, E. Pagani (2022), *Capability of Seismic CPTu and DMT in Assessing Propagation Velocity of Body Waves a Comparative Study*, Cone Penetration Testing 2022 – Gottardi & Tonni (eds) © 2022 Copyright the Author(s), ISBN 978-1-032-31259-0 Open Access: www.taylorfrancis.com, CC BY-NC-ND 4.0 license. DOI: 10.1201/9781003308829-105