

Università degli Studi di Napoli Federico II  
Scuola Politecnica e delle Scienze di Base  
**Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale**  
**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio**



TESI DI LAUREA

Caratterizzazione sperimentale e verifica della suscettibilità alla liquefazione di Pieve  
di Cento (Bologna)

Relatori:

Prof. Ing. Alessandro Flora

Prof. Ing. Stefania Lirer

Candidate:

Alessia Paparo M67/373

Marika Maggio M67/375

Correlatori

Ing. Anna Chiaradonna

ANNO ACCADEMICO 2016/2017

## Cos'è la liquefazione?



Trasformazione di un materiale granulare da uno stato solido ad uno liquido come conseguenza dell'aumento della pressione neutra dell'acqua nei pori e la riduzione delle tensioni efficaci (Marcuson, 1978)

## Fattori predisponenti

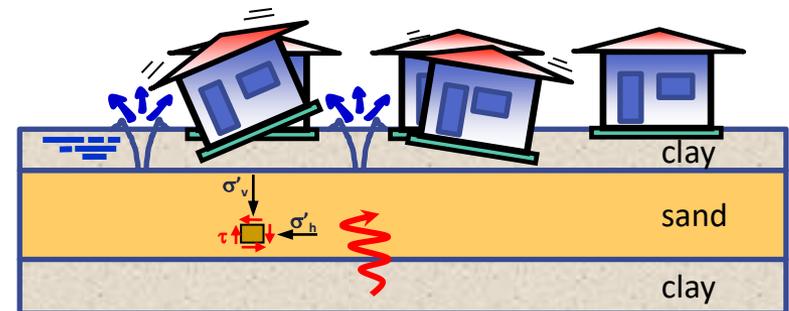
Terreno incoerente sciolto

Terreno sotto falda

Terreno superficiale

## Fattori scatenanti

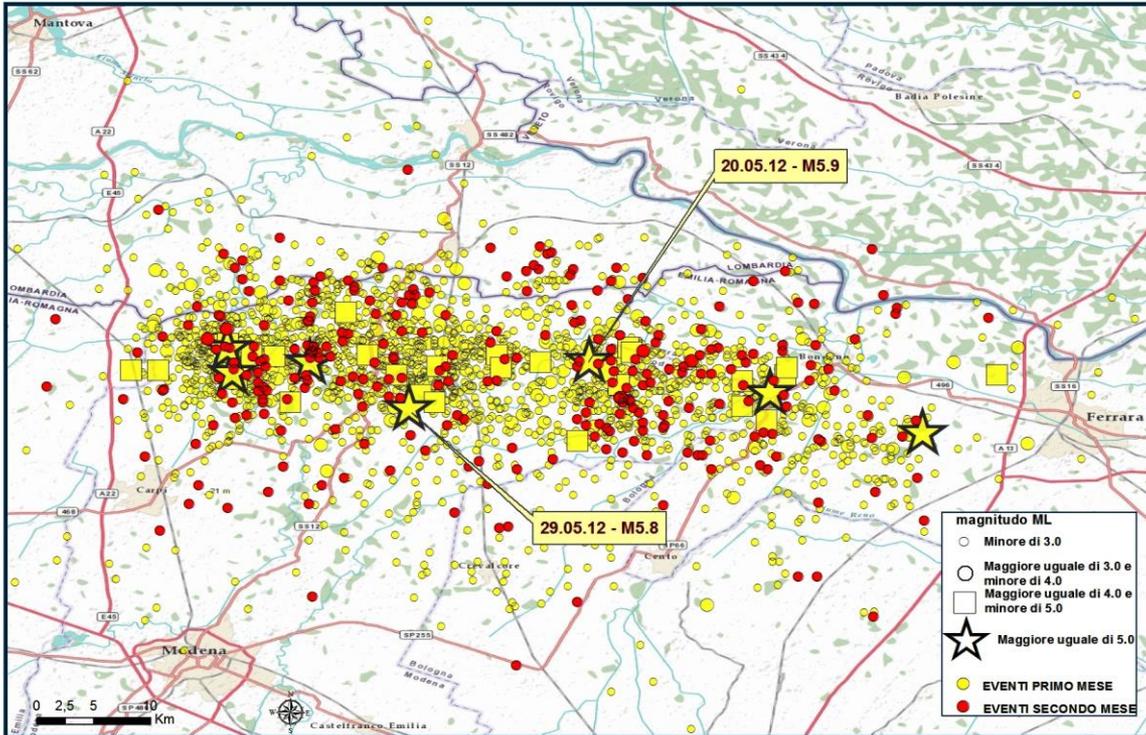
Input sismici



# Terremoti in Emilia Romagna

SEQUENZA SISMICA 20 maggio - 20 luglio

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia



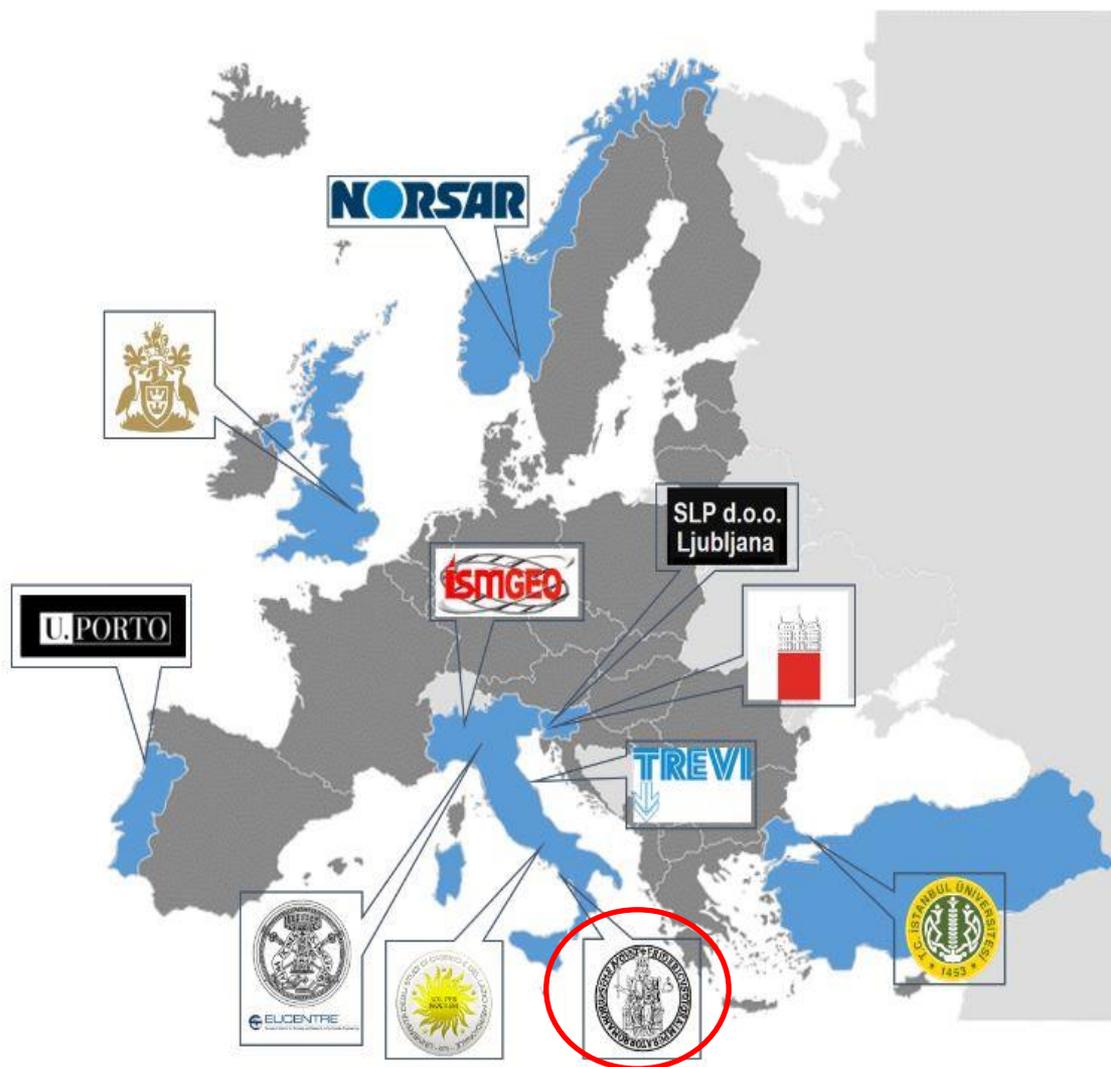
Evento sismico  $M_w=5.9$   
del 20 maggio 2012



**PROGETTO LIQUEFACT**

# CONTESTO OPERATIVO

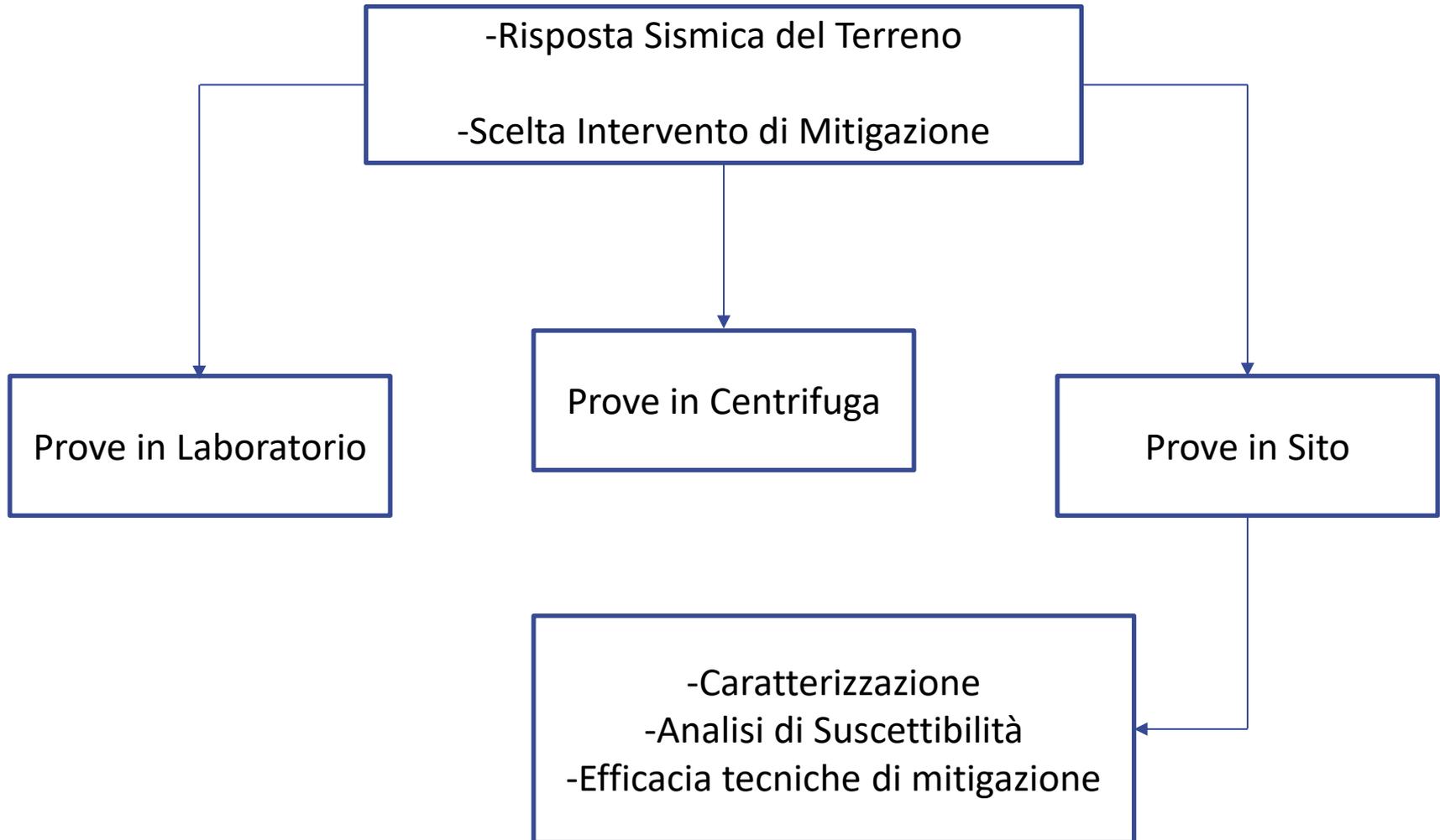
Il presente lavoro si colloca all'interno del progetto europeo LIQUEFACT ([www.liquefact.eu](http://www.liquefact.eu))



## *Principali Obiettivi:*

- Implementare una mappa di rischio da liquefazione, su scala europea;
- Sviluppare una metodologia per la valutazione locale del potenziale di liquefazione;
- Sviluppare nuove metodologie semplificate per la valutazione della vulnerabilità di strutture e infrastrutture;
- Definire tecniche di mitigazione innovative per ridurre il potenziale di liquefazione.

# PROGETTO EUROPEO LIQUEFACT



# TECNICHE DI MITIGAZIONE



# DESATURAZIONE: Insufflazione di bolle di aria

L'effetto delle bolle di aria può essere valutato in maniera semplificata considerando un fluido omogenizzato caratterizzato da una compressibilità maggiore di quella dell'acqua

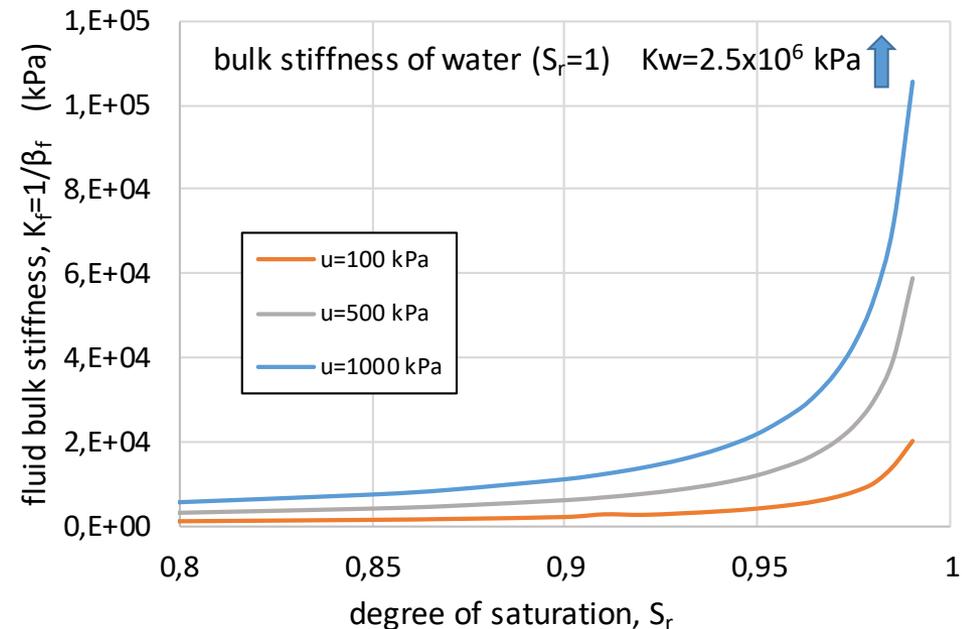
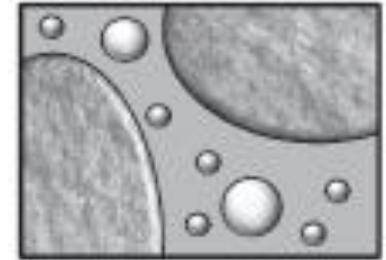
La compressibilità  $\beta_f$  del fluido equivalente può essere scritta come segue (Mihalache and Buscarnera, 2016):

$$\beta_f = \frac{1 - S_r}{u + p_a} + \beta_w \cdot S_r$$

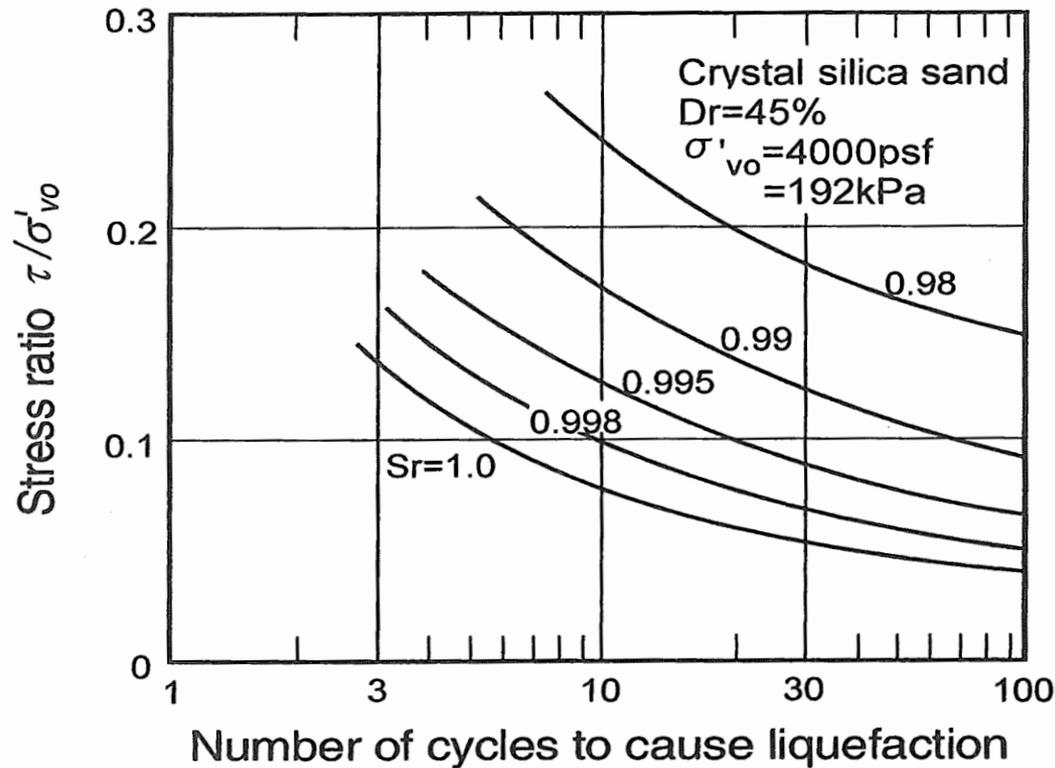
Dove:

- $S_r$  è il grado di saturazione
- $\beta_w = 4 \times 10^{-7} \text{ kPa}^{-1}$  è la compressibilità dell'acqua
- $u$  è la pressione del fluido, assumendo che  $u \approx u_a \approx u_w$  (Fredlund, 1976)

Parzialmente saturo

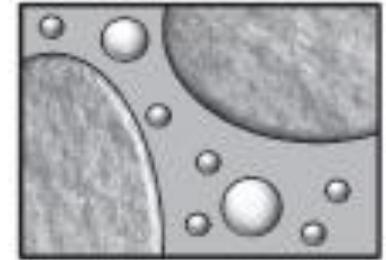


## DESATURAZIONE: Insufflazione di bolle di aria



*Martin et al. (1978)*

Parzialmente saturo



Anche una piccola riduzione del grado di saturazione di una sabbia può determinare un significativo aumento della resistenza del terreno alla liquefazione.

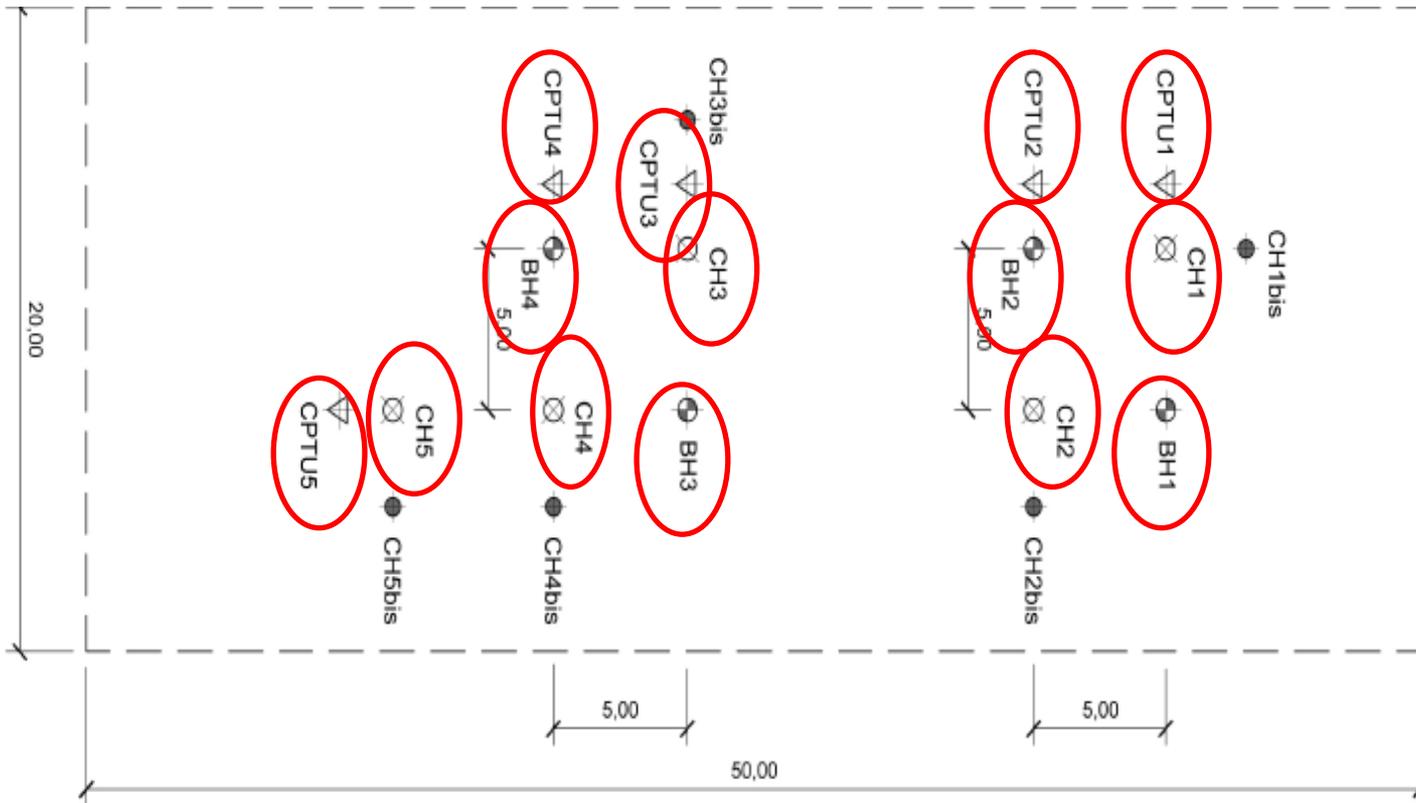
# SVILUPPO LAVORO DI TESI

1. Ricostruzione modello stratigrafico di Pieve di Cento (BO)
2. Verifica analitica alla liquefazione
3. Verifica numerica alla liquefazione
4. Conclusioni

# PIEVE DI CENTO



# PLANIMETRIA PIEVE DI CENTO



# SONDAGGI STRATIGRAFICI

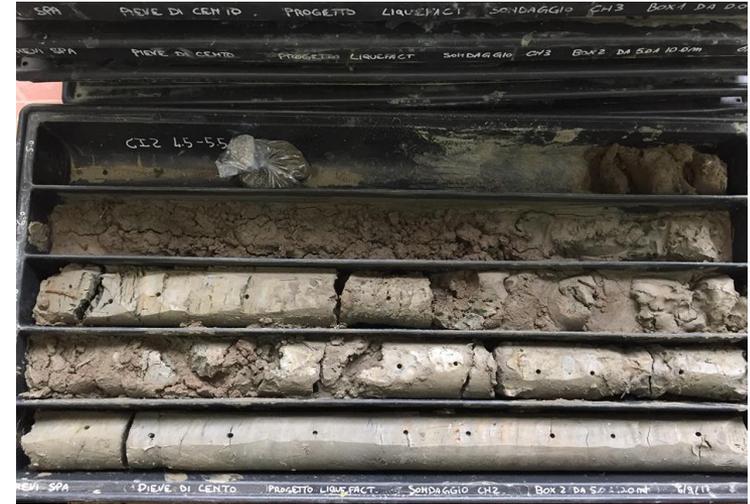
Nome sondaggio: CH2  
 Cliente: TREVI SPA  
 Progetto: Indagini geognostiche in sito  
 Località: Pieve di Cento



Eastng: m                      Sistema perforazione: Carotaggio continuo                      Data esecuzione: 9/6/2017  
 Northing: m                      Diam. min. (mm): 101                      Sondatore: Botto M.  
 Quota: m s.l.m.                      Diam. max. (mm): 152                      Geologo: V. Scazzosi  
 Profondità: 10 m                      Sonda perforatrice: GM 600 C                      Allestimento: Tubo cieco 3"

Scala (m)	Quota (m s.l.m.)	Profondità (m p.c.)	Litologia	Stratigrafia	Spessore (m)	Manovre (m)	RQD (%)	SPT (INCLINO) Pura sfera	Campioni Geotecnici (m)	Tipo carotaggio	Carotiere (m)	Menard Test (m)	Dilatometric Test (m)	Lugeon Test (m)	Leffranc Test (m)	Edificio Adossato
0		0		Sabbia fine limosa a tratti debolmente argillosa nocciola, poco addensata e lievemente umida da 0,80 m	1,2		0 50 100									
1		1,2		Sabbia medio fine debolmente limosa nocciola da sciolta a poco addensata ed umida. Bagnata da 1,80 m. Si osservano svariati orizzonti addensati di spessore millimetrico	1,25											
2																

Spt: 0



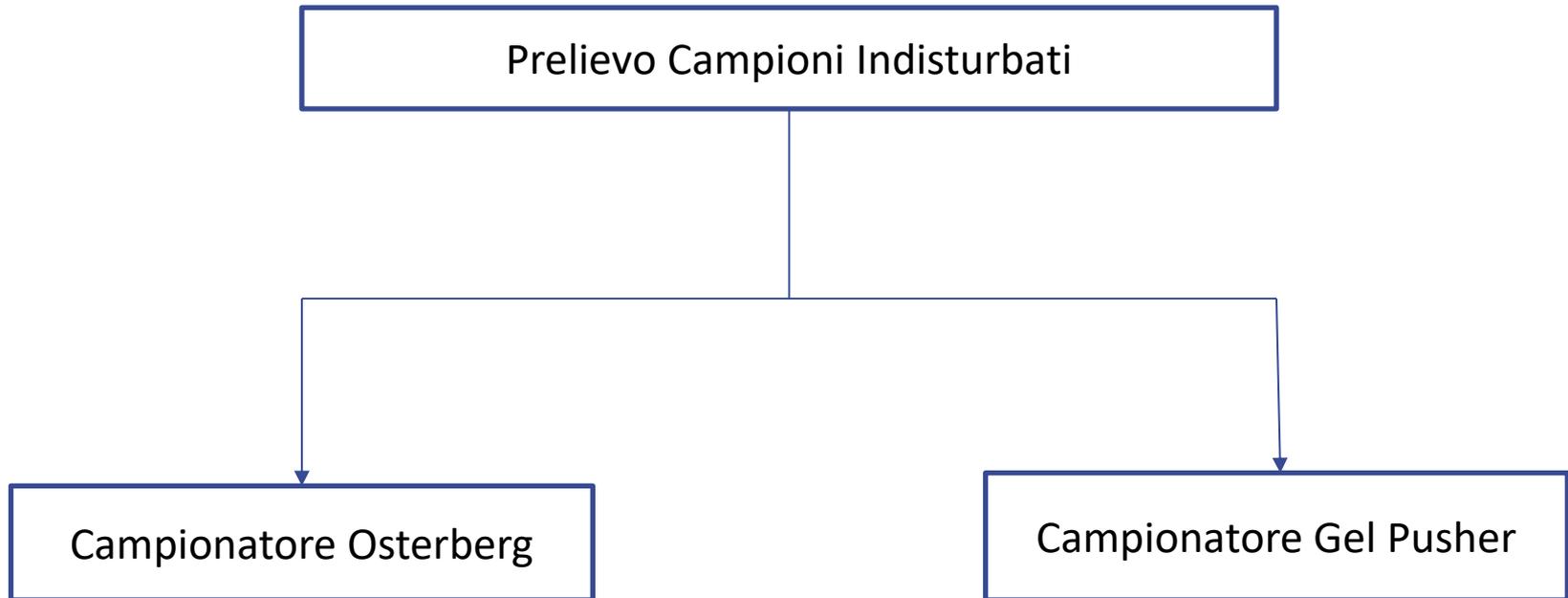
Relazione Geologica

Cassette Catalogatrici

Prima ricostruzione del modello stratigrafico

Ricostruzione modello stratigrafico

# CAMPIONI INDISTURBATI



Campioni (OST)	Profondità
CH1 bis	2-2,5 m
CH2	3-3,5 m
CH1 bis	3,5-4 m

Campioni (GP)	Profondità
CH3	3,5-4,5 m
CH2	4,5-5,5 m
CH4	5-6 m

# CAMPIONATORE GEL PUSHER

## Cos'è il Gel Pusher?

Campionatore innovativo, realizzato in Giappone, che consente di prelevare campioni indisturbati nei terreni a grana grossa



## Quali sono i vantaggi?

- Basse vibrazioni e basso impatto sul campione durante il prelievo
- Riduzione dell'attrito durante la penetrazione per effetto del gel polimerico
- Prevenzione della caduta del campione



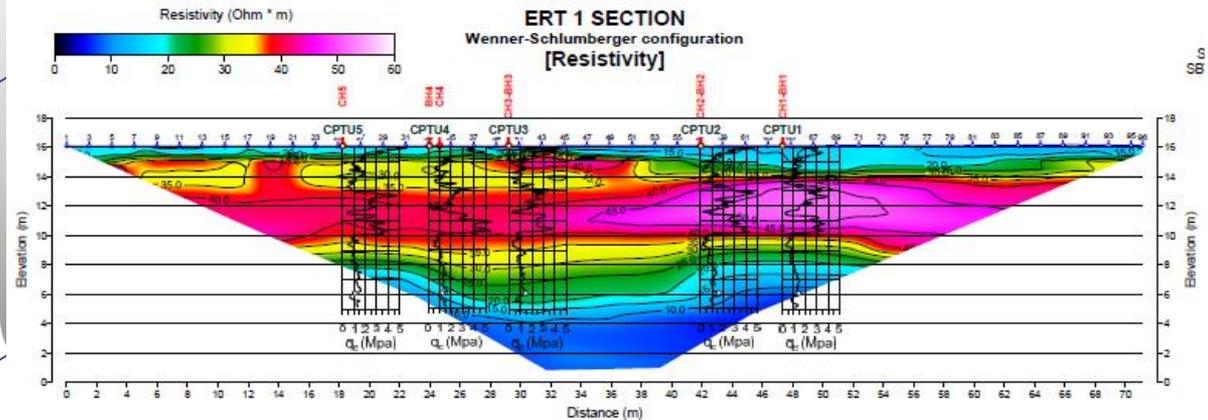
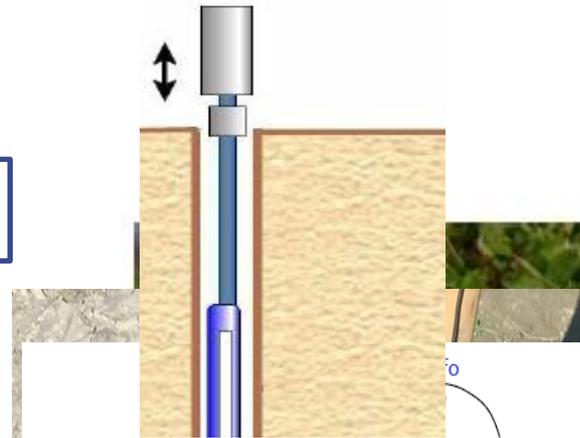
# CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEL SITO

## Prove Penetrometriche

- Cone Penetration Test (CPT)
- Cone Penetration Test con misura delle pressioni neutre (CPTU)
- Standard Penetration Test (SPT)

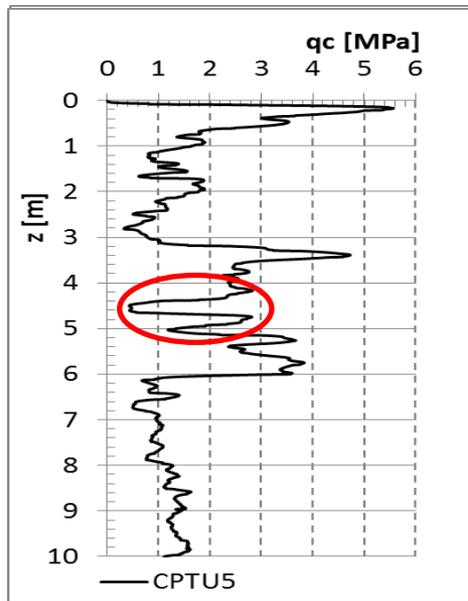
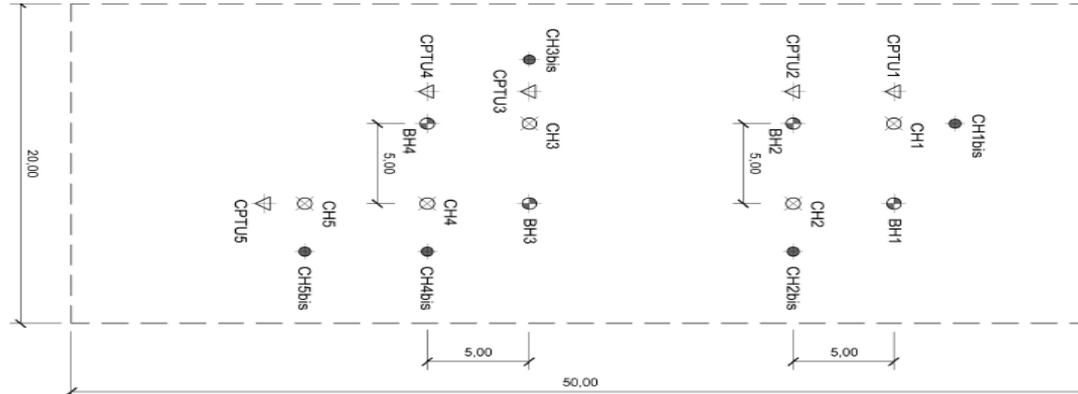
## Prove Geosismiche

- Down-Hole (DH)

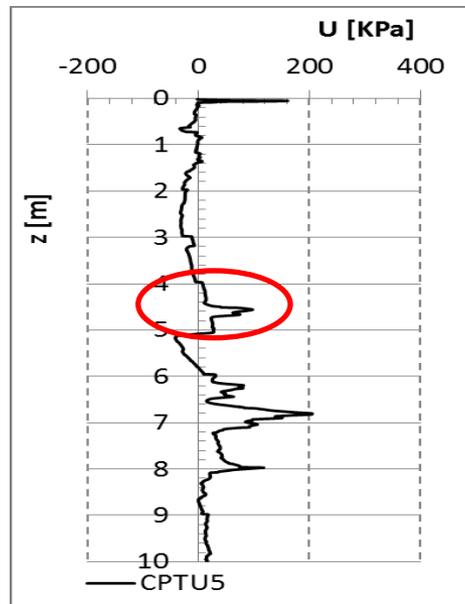


## Prove Geoelettriche

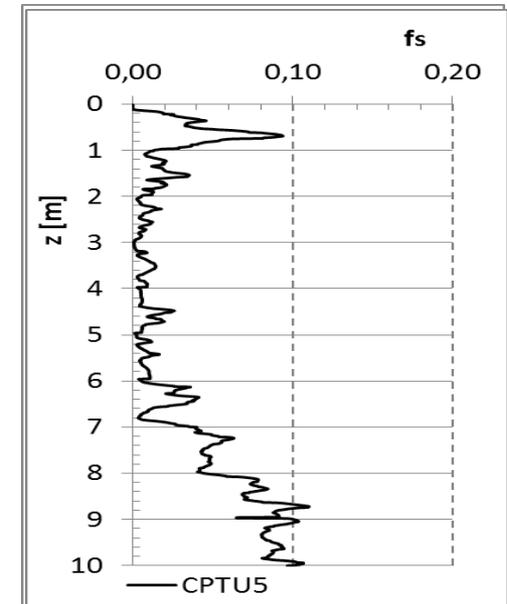
# RISULTATI PROVA CPTU



qc=resistenza alla punta



U=pressione neutra

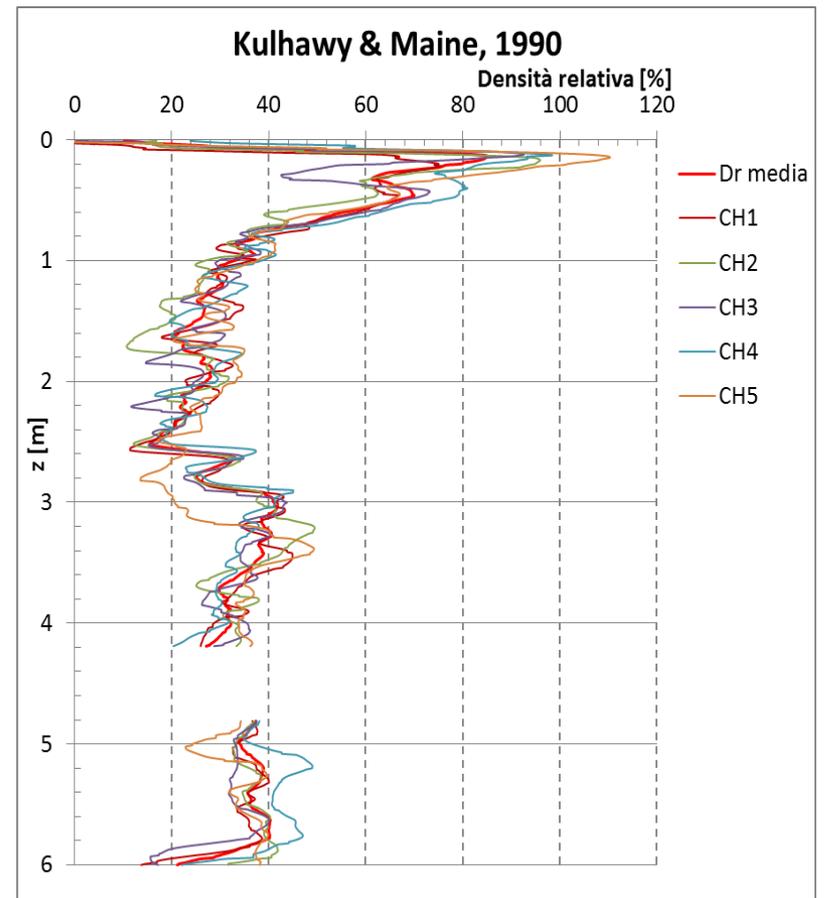
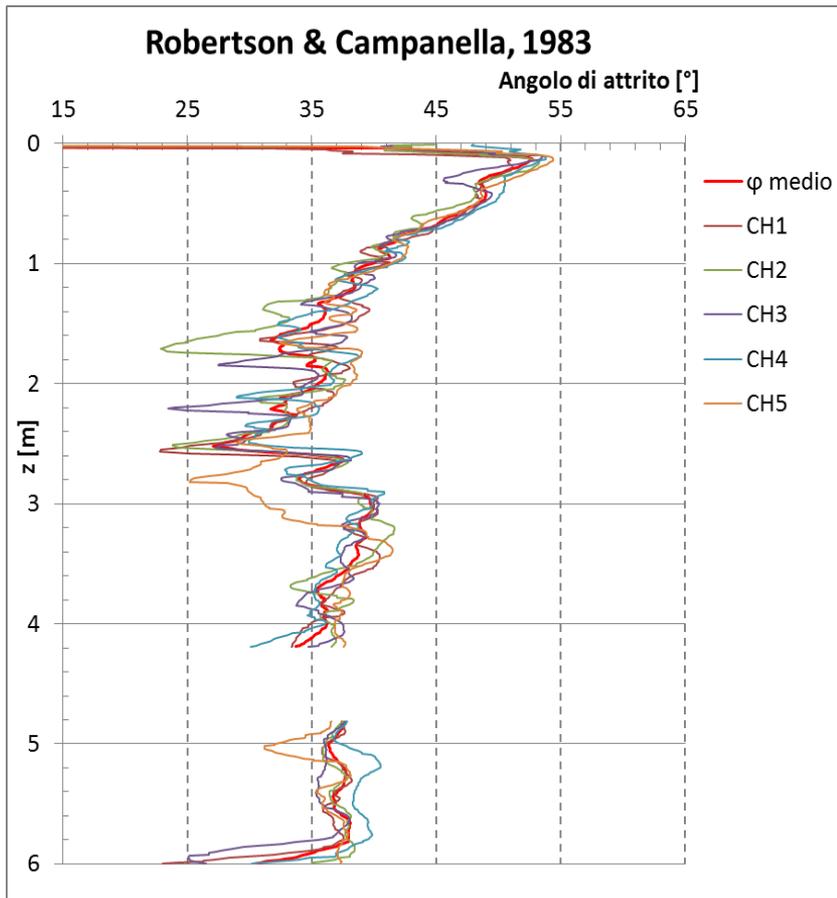


fs=attrito laterale

# DETERMINAZIONE PARAMETRI CARATTERISTICI DEL TERRENO

$$\phi' = \arctan \left[ 0.1 + 0.38 \cdot \ln \left( \frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \right) \right]$$

$$D_r = \left[ \frac{q_{cl}}{305} \right]^{0.5}$$

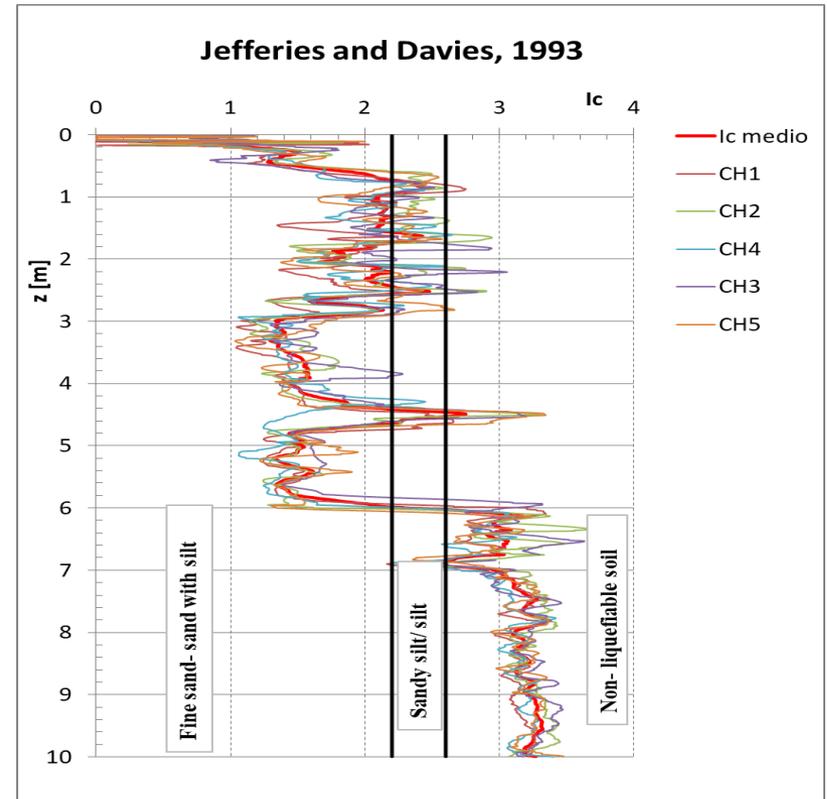
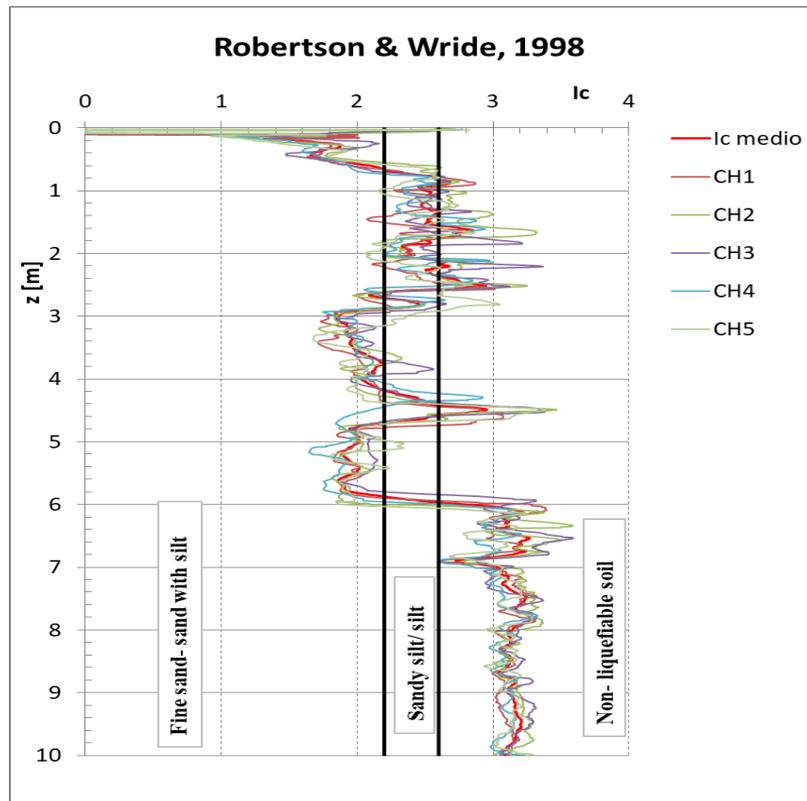


Ricostruzione modello stratigrafico

# DETERMINAZIONE PARAMETRI CARATTERISTICI DEL TERRENO

$$I_c = \left[ (3.47 - \log(Q)) ^2 + (1.22 + \log(F)) ^2 \right]^{0.5}$$

$$I_c = \sqrt{ [3 - \log_{10} \{ Q_t (1 - B_q) + 1 \} ]^2 + [1.5 + 1.3 (\log_{10} F_R)]^2 }$$



Soil behaviour type	I <sub>c</sub>
Fine sand - sand with silt	1.8 – 2.2
Sandy silt / silt	2.2 – 2.6
Non-liquefiable soil <sup>1</sup>	> 2.6

<sup>1</sup>Plastic silt or clayey soil

# DENSITA' RELATIVA ANALITICA E SPERIMENTALE

Densità Relativa

Analitica

Dr [%]

38.3

32.5

Z=3.3 m

Z=5.0 m

Sperimentale  
(Gel Pusher)

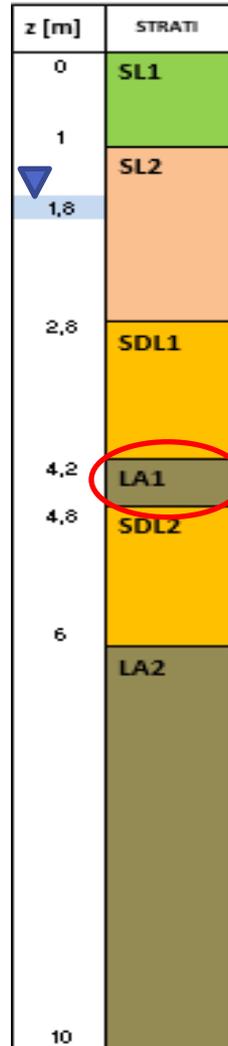
Dr [%]

38.2

33.7

# STRATIGRAFIA PIEVE DI CENTO

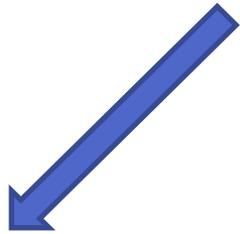
- Relazione Geologica
- Prove di Laboratorio
- Cassette Catalogatrici
- Prove Penetrometriche
- Prove Goelettriche
- Prove Geosismiche



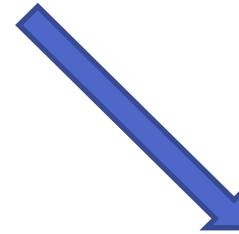
?

Nome	$\gamma$ [KN/m <sup>3</sup> ]	Dr [%]	$\phi$ [°]	cu [Mpa]	G0 [Mpa]
Sabbia limosa (crosta)		50	42	-	40
Sabbia limosa	16-18,9	25	35	-	25
Sabbia deb.Limosa	18,9	35	35	-	25
Limo argilloso	18,9	-	-	0,041	14
Sabbia deb.Limosa	18,9	35	35	-	28
Limo argilloso	18,9	-	-	0,047-0,07	38

# VERIFICA A LIQUEFAZIONE



ANALITICA



NUMERICA

## VERIFICA ANALITICA A LIQUEFAZIONE

Analisi puntuale:

$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$

CRR= Rapporto di resistenza ciclica  $\frac{\tau_f}{\sigma'}$

CSR= Rapporto di sollecitazione ciclica  $\frac{\tau_{media}}{\sigma'}$

**FS  $\geq$  1**



***NO LIQUEFAZIONE***

**FS < 1**



***SI LIQUEFAZIONE!!***

# CALCOLO DELLA CSR

Analisi pseudo-statica

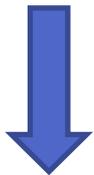
$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$

$$(CSR)_{M=7.5} = \frac{\tau_{eq}}{\sigma'} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d$$

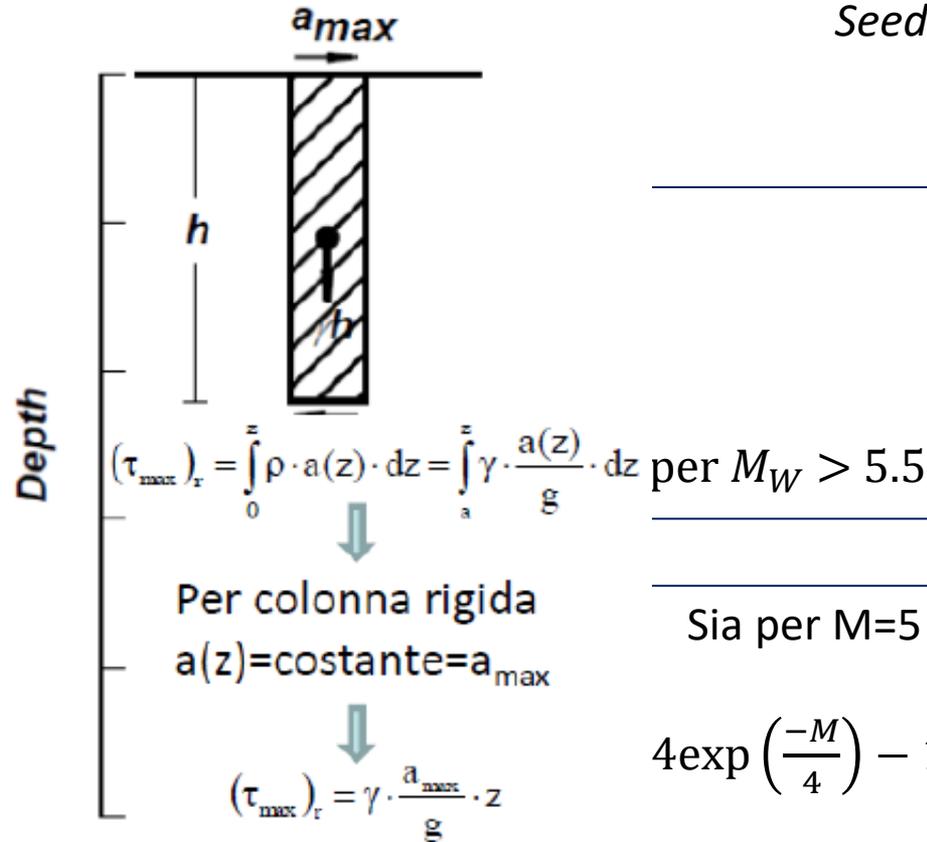
Seed & Idriss, 1971

$$r_d = 1 - 0.015z$$

**M ≠ 7.5**



Magnitude Scaling Factor  
**MSF**



Sia per M=5 che per M=7

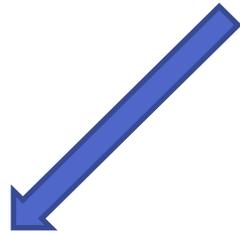
$$4 \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 1.325]$$

$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{z}{180}\right)^0 \leq 2.2$$

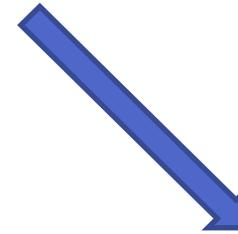
Boulanger e Idriss, 2014/2015

$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$

## CALCOLO DELLA CRR



Robertson & Wride, 1997



Chen et al, 2008

# Relazione di *Robertson & Wride, 1997*

$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$

$$\text{if } 50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160, \quad CRR = 93 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.08$$

[8b]

$$\text{if } (q_{c1N})_{cs} < 50, \quad CRR = 0.833 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.05$$

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c q_{c1N}$$

**Dove:**  $K = 1$  for  $I_c < 1.64$  (4a)

$$I_c = \left[ \begin{aligned} &3.1 \\ &= 1 + 80.06(I_c - 1.64)(q_{c1N})^{-1.2194} \end{aligned} \right] \text{ for } 1.64 \leq I_c \leq 2.38$$

(4b)

$$Q = \left( \frac{q_c}{P_a} \right) \left( \frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_{vc}} \right) = 1 + 59.24(q_{c1N})^{-1.2194} \text{ for } I_c > 2.38$$

(4c)

$$F = \left( \frac{f_s}{q_c - \sigma_{vc}} \right) \cdot 100\%$$

## Relazione di *Chen et al, 2008*

$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$

$$CRR = 0.05 + \exp \left[ A + B \times (q_{t1N}/100)^C \right]$$

$$A = I_c \cdot (q_{t1N}/100) - 10.455$$

$$B = 0.669 \cdot I_c^3 - 5.55 \cdot I_c + 12.993$$

$$C = 0.284 - 0.0214 \cdot I_c^2$$

**Dove:**

$$I_c = \sqrt{\left[ 3 - \log_{10} \{ Q_t (1 - B_q) + 1 \} \right]^2 + \left[ 1.5 + 1.3 (\log_{10} F_R) \right]^2}$$

$$B_q = \Delta u / q_u$$

Jefferies and Davies, 1993.

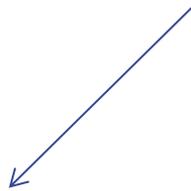
La definizione di FS è puntuale



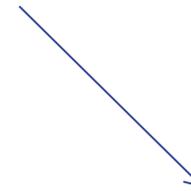
Il banco di terreno liquefa?



## INDICI DI LIQUEFAZIONE



Liquefaction Potential Index IPL



Liquefaction Severity Index LS



Liquefaction Severity Number LSN

# Liquefaction Potential Index IPL

*Iwasaki et al*

$$IPL = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

F(z)= potenziale di liquefazione

1-FS se FS<1

0 se FS≥1

w(z)= funzione di pesi = 10-0.5z

IL	RISCHIO DI LIQUEFAZIONE
IL = 0	MOLTO BASSO
0<IL≤ 2	BASSO
2<IL≤5	MODERATO
5<IL≤15	ALTO
15<IL	MOLTO ALTO

Sonmez, 2003

# Liquefaction Severity Index LS

*Juang et al, 2003*

$$L_S = \int_0^{20} P_L(z)W(z)dz$$

$w(z)$ = funzione di pesi =  $10-0.5z$

$$P_L = \frac{1}{1 + (F_L/0.96)^{4.5}} \quad \text{for } F_L \leq 1.411$$

$$P_L(z) = 0 \quad \text{for } F_L > 1.411$$

$L_S$	Description
$85 \leq L_S < 100$	Very high
$65 \leq L_S < 85$	High
$35 \leq L_S < 65$	Moderate
$15 \leq L_S < 35$	Low
$0 < L_S < 15$	Very low
$L_S = 0$	Non-liquefied

## Liquefaction Severity Number LSN

*Tonkin e Taylor, 2013*

$$\text{LSN} = 1000 \int_0^H \frac{\varepsilon_v}{z} dz$$

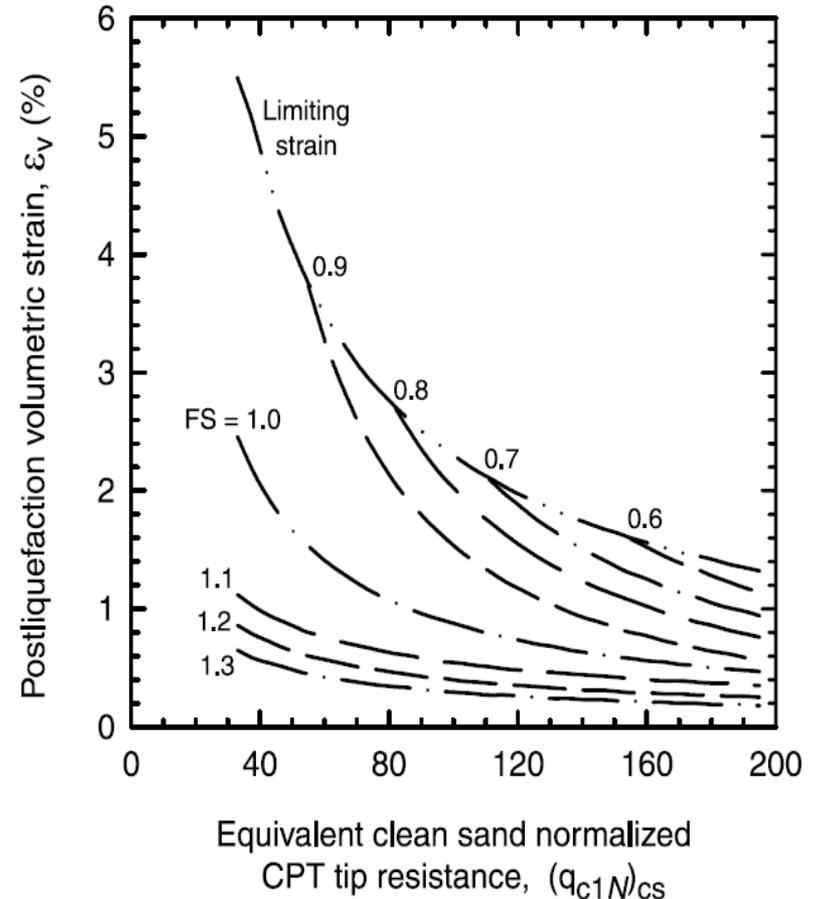
**0<LSN<10** : assenza di liquefazione/ minime manifestazioni di liquefazione.

**10<LSN<20**: minime manifestazioni di liquefazione e presenza di “sand boils”.

**20<LSN<30**: da moderate ad intense manifestazioni di liquefazione e probabili cedimenti.

**30<LSN<40**: intense manifestazioni di liquefazione, danni alla superficie del terreno e gravi cedimenti delle strutture.

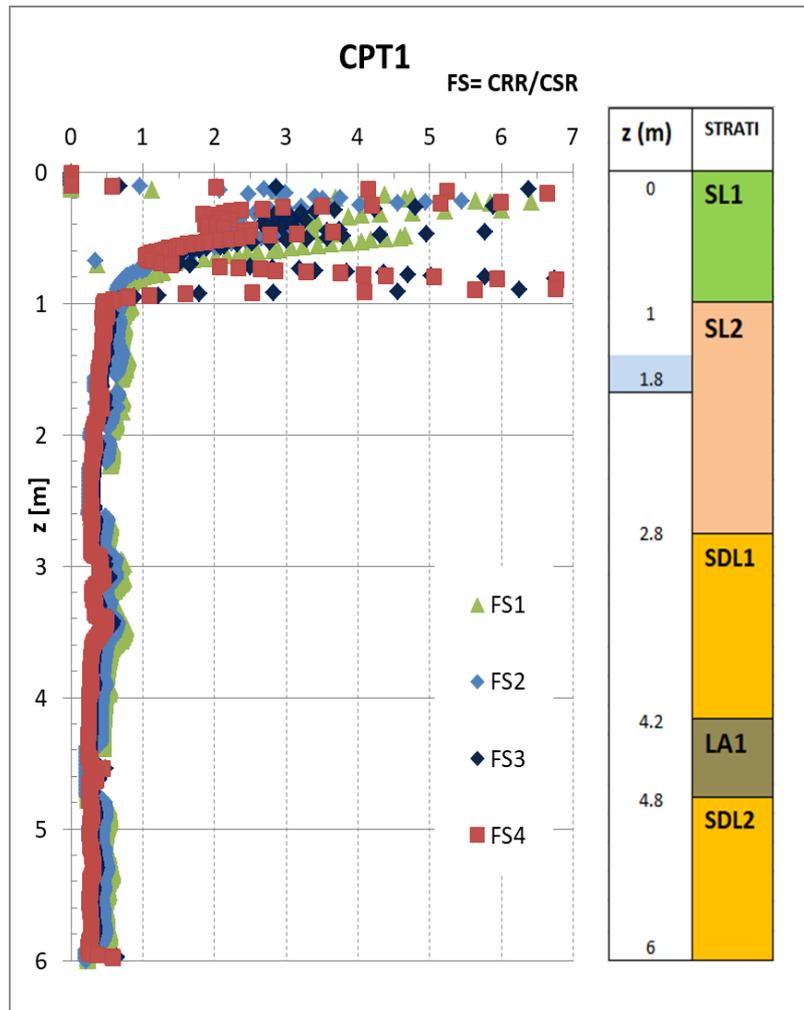
**LSN>50**: danni gravi e manifestazioni della liquefazione molto diffusi sulla superficie



Zhang et al, 2002

# Calcolo FS

$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$



$$FS1 = \frac{CRR (Robertson\&Wride)}{CSR (Seed\&Idriss)} \quad M=5$$

$$FS2 = \frac{CRR (Robertson\&Wride)}{CSR (Seed\&Idriss)} \quad M=7$$

$$FS3 = \frac{CRR (Chen\ et\ al)}{CSR (Seed\&Idriss)} \quad M=5$$

$$FS4 = \frac{CRR (Chen\ et\ al)}{CSR (Seed\&Idriss)} \quad M=7$$

## Calcolo Indici di Liquefazione

INDICI DI LIQUEFAZIONE	CPT1	CPT2	CPT3	CPT4	CPT5	MEDIO
IPL (M=5)	27.29	24.25	24.22	26.78	23.97	25.30
IPL (M=7)	29.03	26.11	26.15	26.15	26.15	26.72
LSN	34.49	35.69	34.08	34.74	33.83	34.57
LSI (M=5)	42.76	39.64	39.90	43.91	40.49	41.34
LSI (M=7)	43.52	40.77	41.17	45.02	41.51	42.40

**$IPL > 15$**



Rischio di liquefazione MOLTO ALTO

**$30 < LSN < 40$**

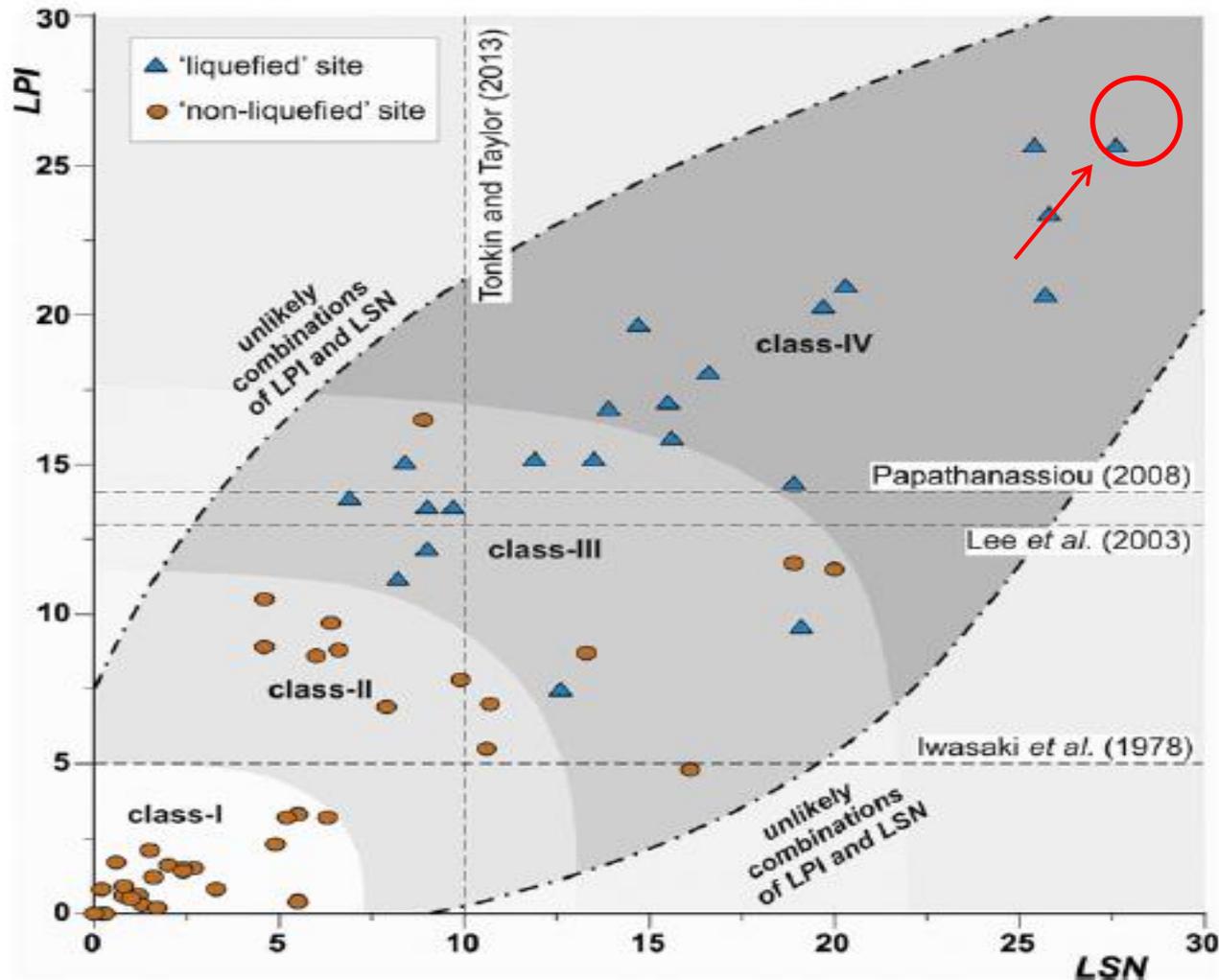


Intense manifestazioni di liquefazione, danni alla superficie del terreno e gravi cedimenti delle strutture.

**$35 < LSI < 65$**



Rischio di liquefazione MODERATO



**LIQUEFAZIONE  
MOLTO PROBABILE**

Diagramma relativo a siti dell'Emilia Romagna (Sant'Agostino, San Carlo e Mirandola) investigati post liquefazione (Papathanassiou et al, 2012; Emergeo WG,2013)

# Su quali strati di terreno intervenire?

**SL2**



**SDL1**

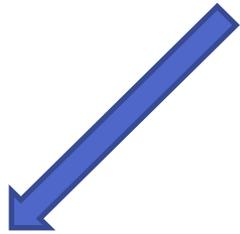


**SDL2**

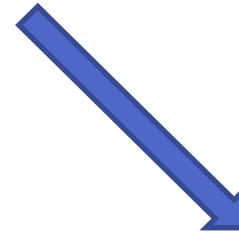


z (m)	STRATI
0	SL1
1	SL2
1.8	
2.8	SDL1
4.2	LA1
4.8	SDL2
6	

# VERIFICA A LIQUEFAZIONE



ANALITICA



NUMERICA

# VERIFICA NUMERICA A LIQUEFAZIONE



**CODICE DI CALCOLO**



Analisi di risposta sismica locale

## **Cos'è l' analisi di Risposta sismica locale?**

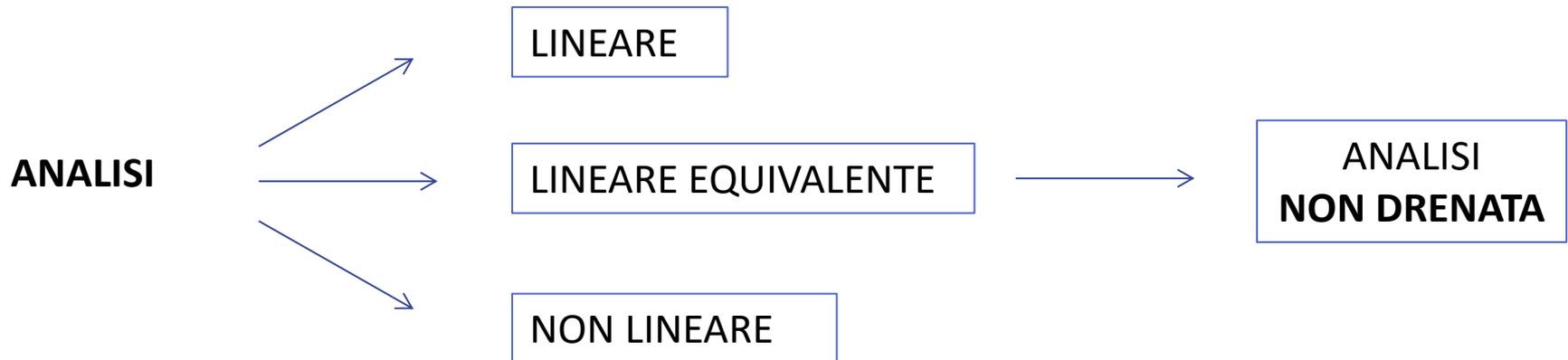
È lo studio della risposta del terreno a una determinata sollecitazione sismica, finalizzato alla previsione del moto sismico atteso in superficie in termini di ampiezza, contenuto in frequenza, tensioni e deformazioni.

# CODICE DI CALCOLO DEEPSOIL

**DEEPSOIL v7.0** ideato dal Department of Civil and Environmental Engineering  
University of Illinois at Urbana-Champaign, (Youssef M. A. Hashash)

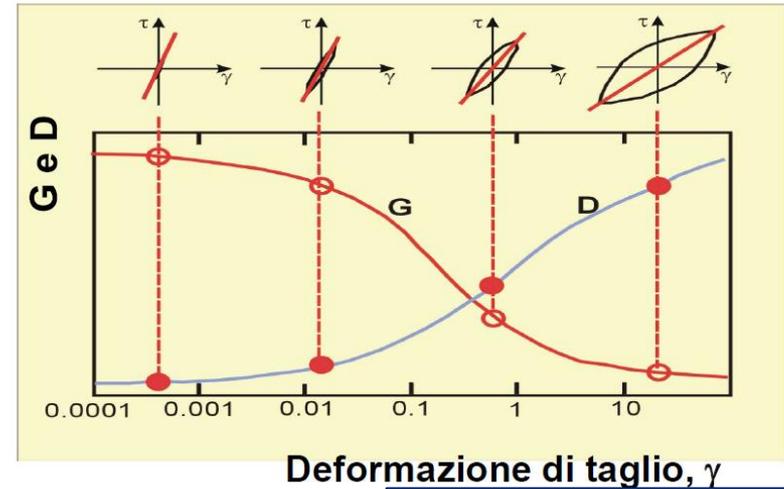


## ANALISI MONODIMENSIONALE



## DATI DI INPUT CODICE DI CALCOLO

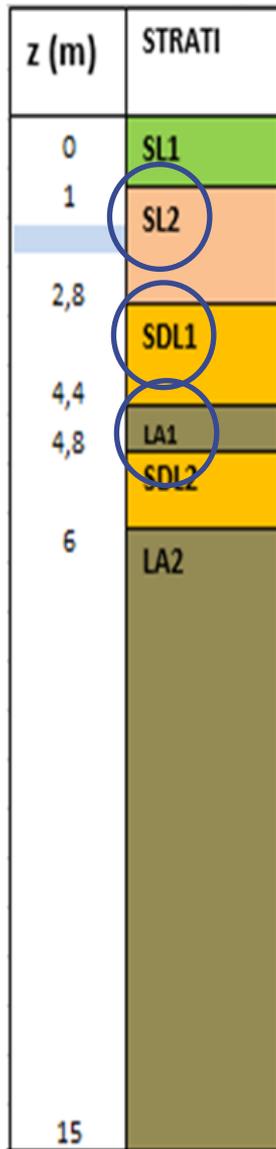
- Nome Layer
- Spessore dello strato
- Peso dell'unità di volume  $\gamma$
- Velocità delle onde di taglio  $V_s$
- Parametri del modello costitutivo MKZ  $\tau = \tau(\gamma)$
- Parametri della curva di decadimento riferita allo smorzamento (Non Masing Rules)
- Parametri del modello di sovrappressioni interstiziali



$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \beta \left( \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s}$$

$$r_u = \frac{2}{\pi} \arcsin \left( \frac{D}{D_{ru=1.0}} \right)^{\left( \frac{1}{2\beta} \right)}$$

## CASI ANALIZZATI



**Caso Zero:** Modello stratigrafico di base

**Caso Uno:** Modifica spessore strato LA1

**Caso Due:** Incremento Resistenza SL2 e SDL1  
ASSENZA LA1

LA1= 3,8-4,8 m

LA1= 4,2-4,8m

ASSENZA LA1

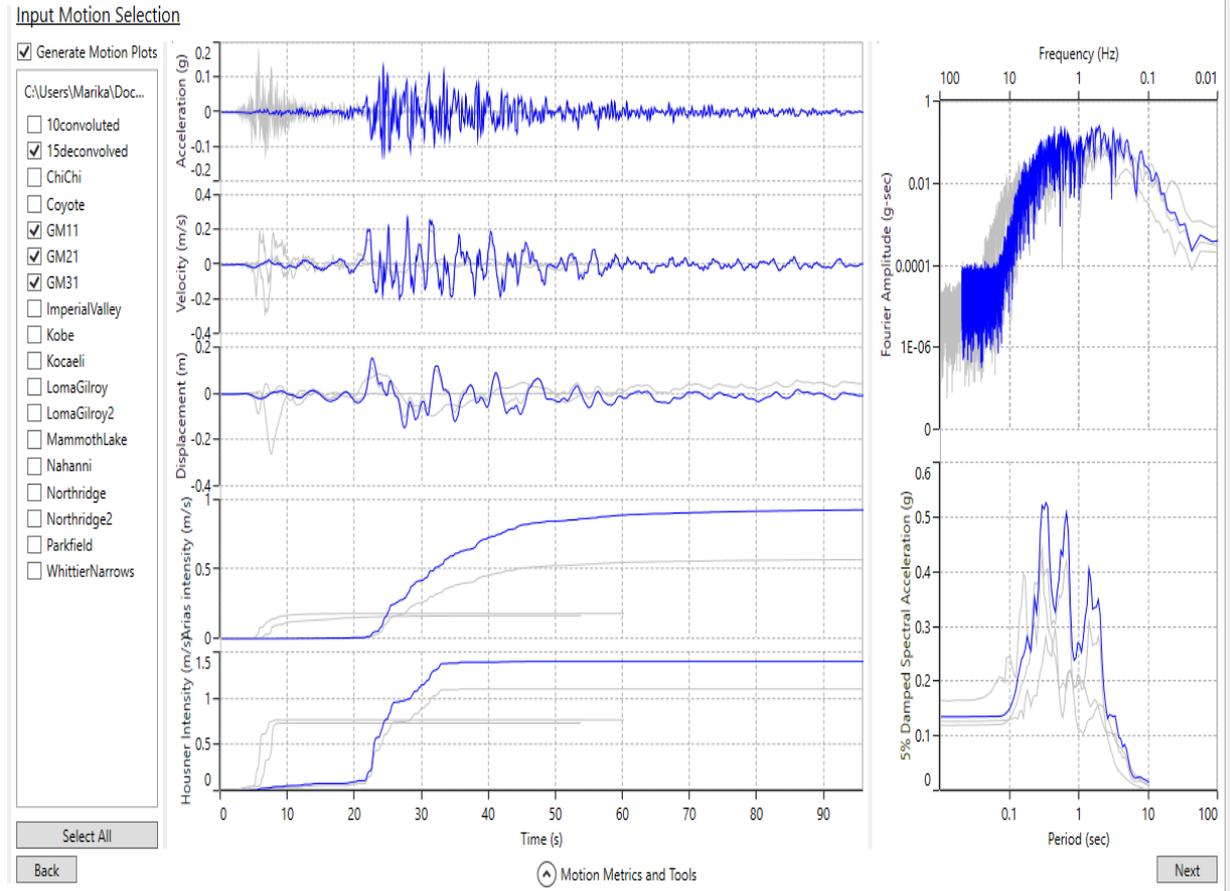
# INPUT SISMICI

**GM11:** Evento sismico con  $T=475$  anni e  $M_w=5.74$

**GM21:** Evento sismico con  $T=975$  anni e  $M_w=6.90$

**GM31:** Evento sismico con  $T=2475$  anni e  $M_w=6.90$

**Deconvoluto15:**  
Evento sismico  
registrato in Emilia nel 2012



# CASO ZERO

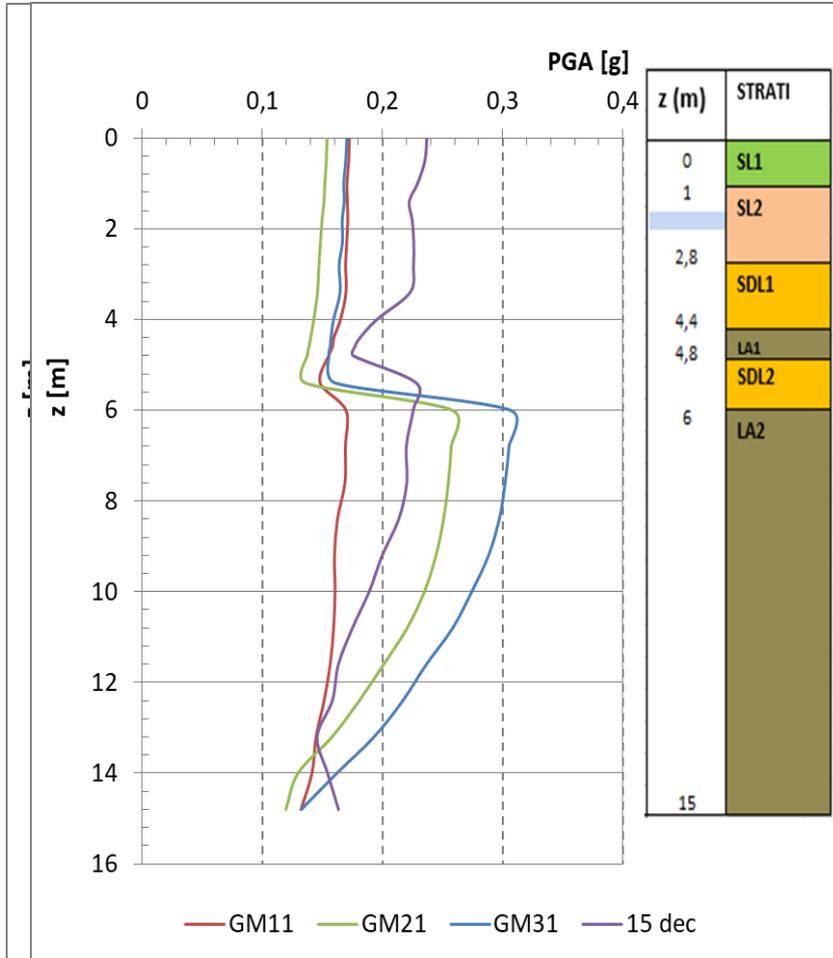


Diagramma delle PGA in funzione della profondità

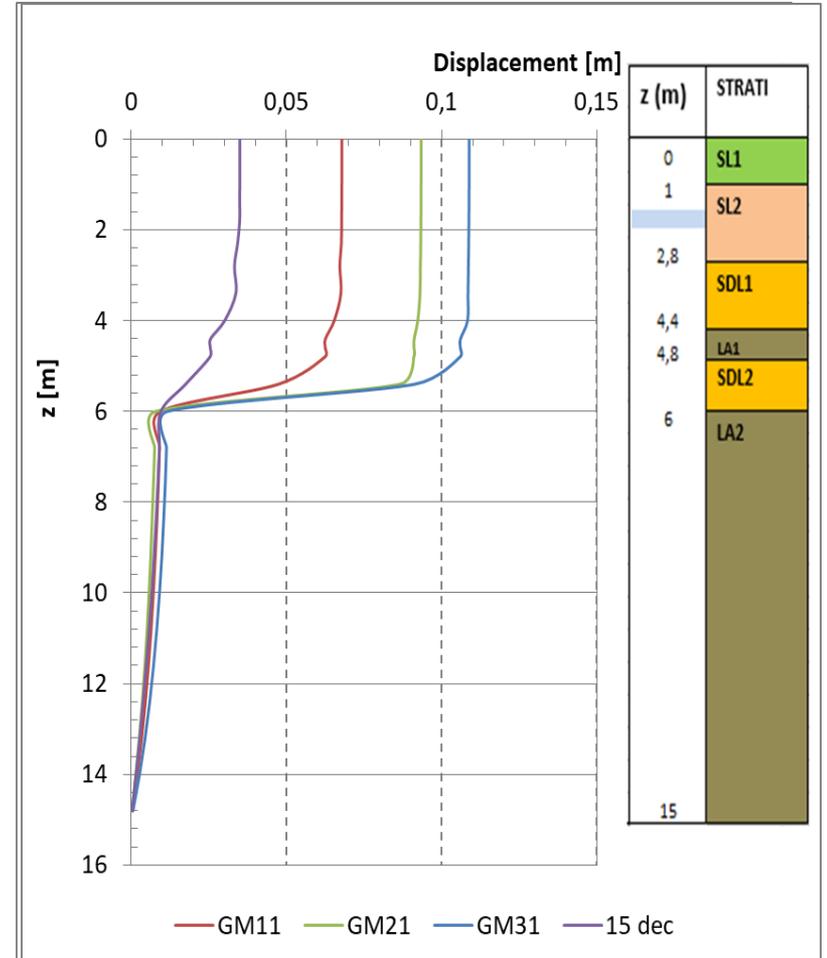
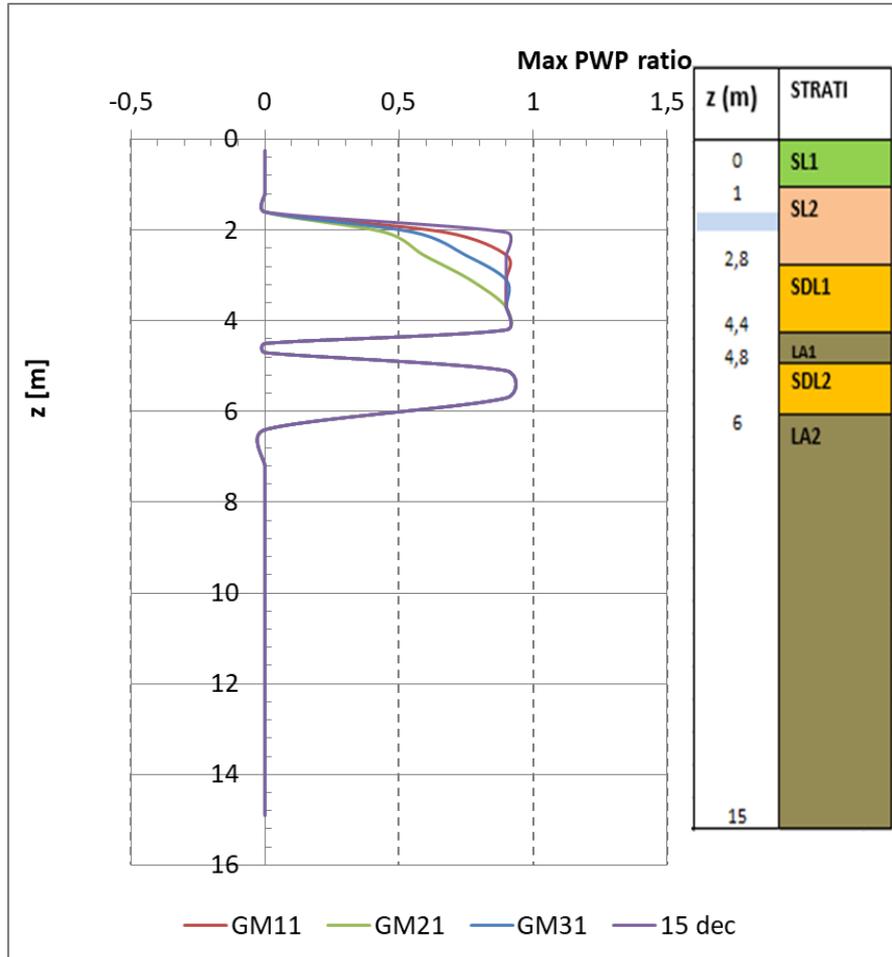
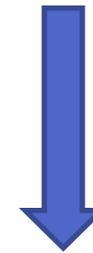


Diagramma degli spostamenti in funzione della profondità

# CASO ZERO



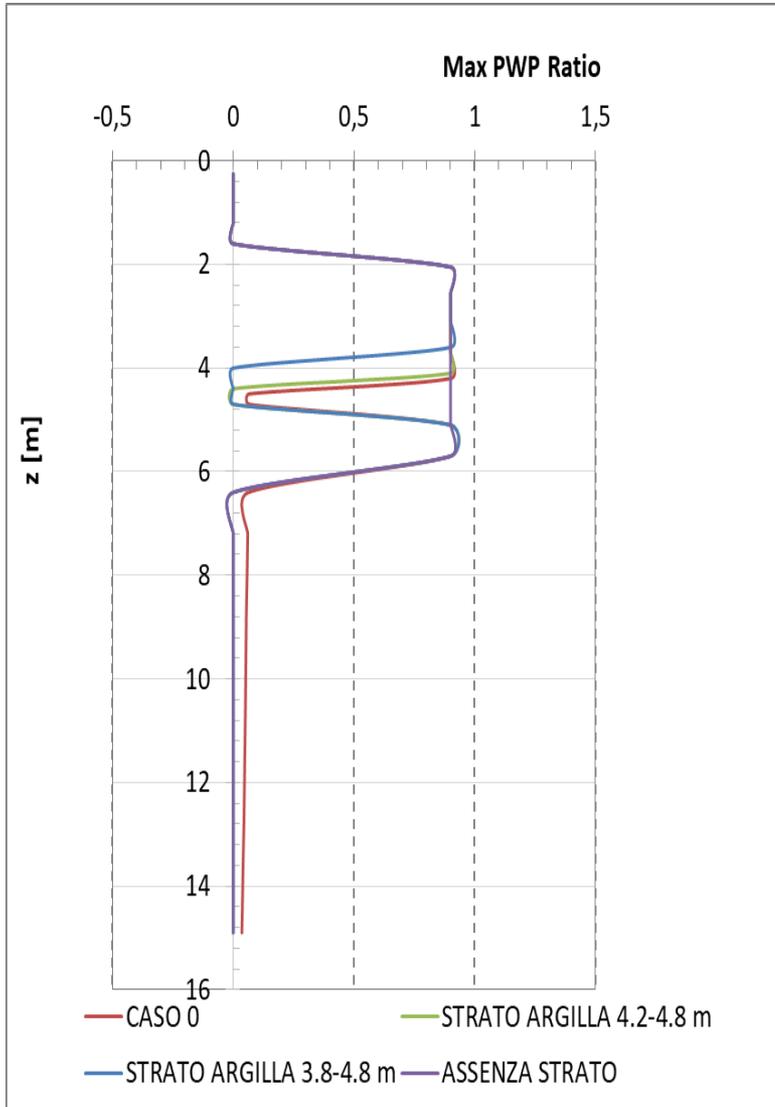
$$\text{Max PWP Ratio} = \frac{\Delta u}{\sigma'_v} = 0.9$$



**LIQUEFAZIONE**

Diagramma delle pressioni neutre con la profondità

# CASO UNO

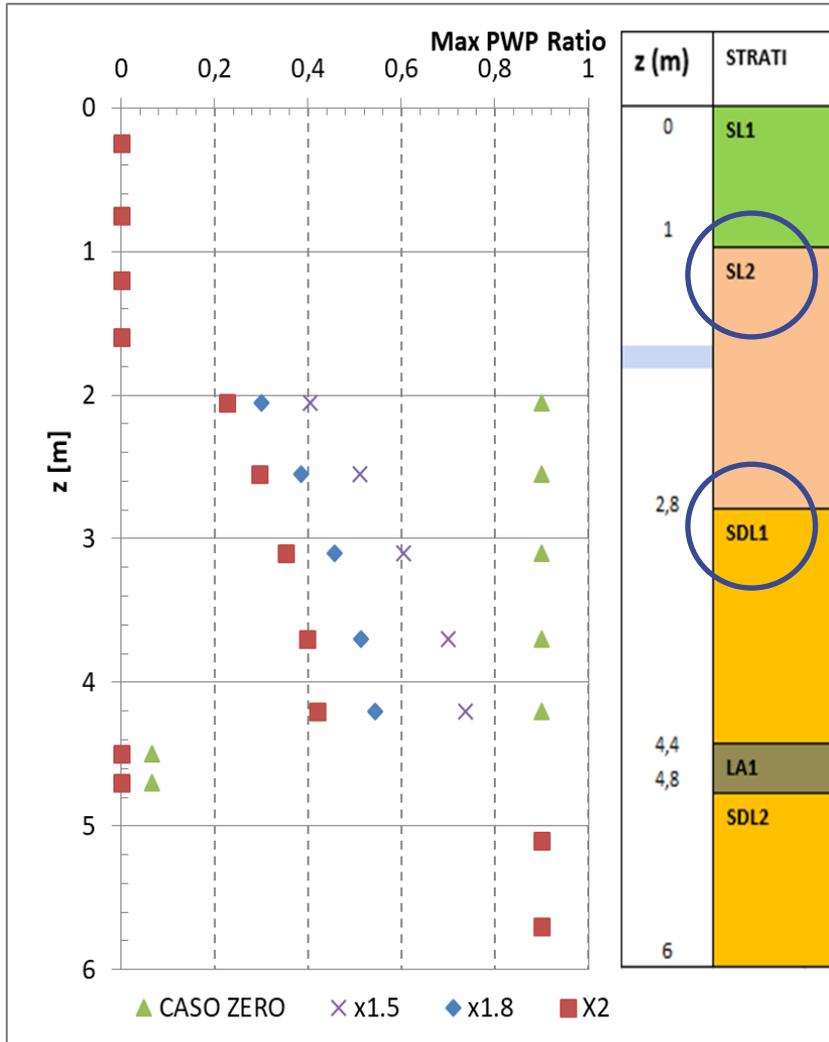


z (m)	STRATI
0	SL1
1	SL2
2,8	SDL1
4,8	SDL2
6	LA2
15	

z (m)	STRATI
0	SL1
1	SL2
2,8	SDL1
4,2	LA1
4,8	SDL2
6	LA2
15	

z (m)	STRATI
0	SL1
1	SL2
2,8	SDL1
3,8	LA1
4,8	SDL2
6	LA2
15	

# CASO DUE



$$\text{Max PWP Ratio} = \frac{\Delta u}{\sigma'_v} < 0.9$$



Nella pratica l'incremento di resistenza lo si ottiene mediamente un intervento di **DESATURAZIONE**

# ANALISI NUMERICA



Modifica dell'intervento di  
**CONSOLIDAMENTO**

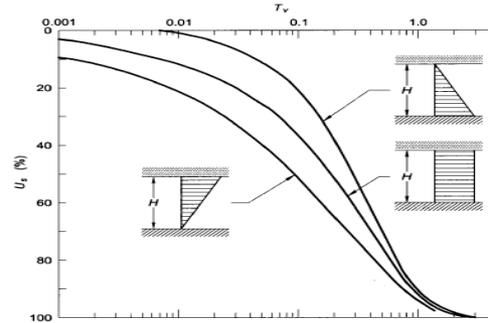


z (m)	STRATI
0	SL1
1	SL2
1.8	
2.8	SDL1
4.2	LA1
4.8	SDL2
6	

# CEDIMENTI SUPERFICIALI

- $$w_{ed} = \frac{1}{Eed} \int_0^H \Delta\sigma'_z dz = \frac{1}{Eed} \int_0^H \Delta u dz$$
- $$t = \frac{T_{90} H^2}{c_v}$$

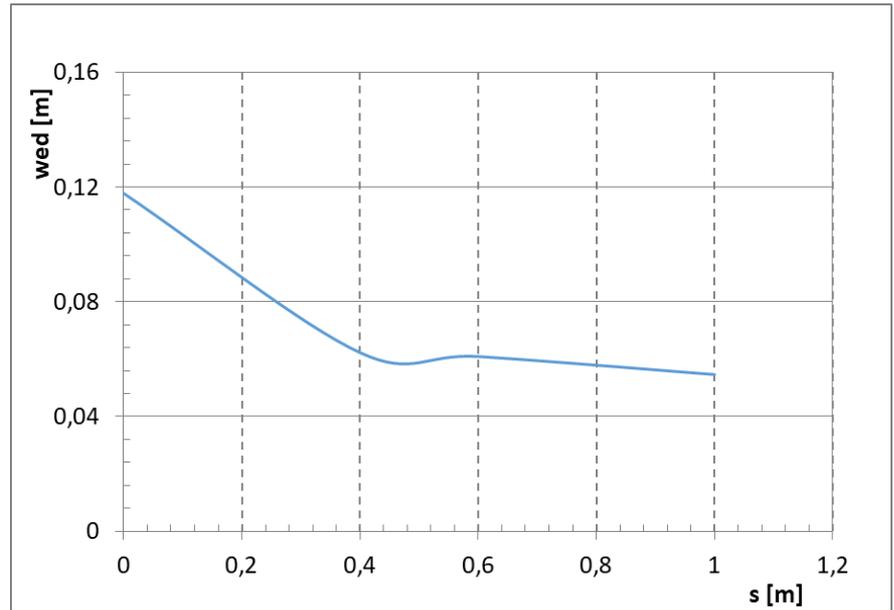
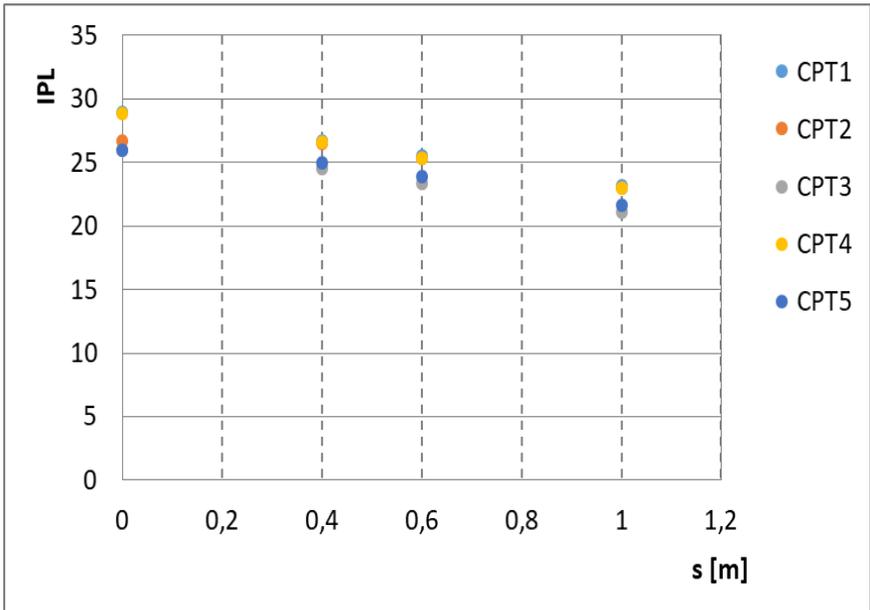
**$T_{90}=0,82$**



	CASO 0	ARGILLA 4,2-4,8 m	ARGILLA 3,8-4,8 m	ASSENZA ARGILLA
k [m/s]	1,93E-04	1,94E-04	1,96E-04	1,90E-04
H [m]	2,60	2,40	2,00	4,20
cv[m^2/s]	6,13E-05	6,21E-05	6,89E-05	5,84E-05

	CASO 0	ARGILLA 4,2-4,8 m	ARGILLA 3,8-4,8 m	ASSENZA ARGILLA
$w_{ed}$ [m]	0,064	0,063	0,05	0,12
t [s]	90453	76066	47623	247788
t [h]	25,1	21,1	13,2	68,8

# Quanto è attendibile l'indice di Iwasaki?



Andamer  
dello

## In funzione dello spessore dello strato di argilla LA1:

- l'indice di IWASAKI varia tra 21 e 29 (**Rischio elevato di liquefazione**)
- il cedimento varia tra 0.05 e 0,12 m

dello

# CONCLUSIONI

In definitiva, il lavoro di tesi ha consentito di:

- Confermare il verificarsi della liquefazione
- Restringere il campo di intervento di consolidamento del terreno
- Verificare la scarsa attendibilità degli indici analitici utilizzati.