



---

---

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE**  
Sezione geotecnica

**“VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE  
NELL'AREA PORTUALE DI GIOIA TAURO (RC) ”**

Master di I Livello in  
“Rischio Idraulico”  
A.A. 2002/2003  
Firenze, 13 giugno 2003

Johann Facciorusso



# Introduzione

- La LIQUEFAZIONE rappresenta uno dei temi più interessanti e dibattuti dell'Ingegneria Geotecnica Sismica
- La liquefazione e i fenomeni ad essa collegati sono stati responsabili durante i terremoti di moltissime vittime e danni nel mondo
- I suoi effetti devastanti hanno destato l'attenzione dei ricercatori per la prima volta durante due terremoti verificatisi nel 1964, in Alaska (Anchorage,  $M = 9.2$ ) e in Giappone (Niigata,  $M = 7.5$ )
- Questi eventi hanno prodotto esempi spettacolari di danni causati da liquefazione: rottura di pendii, collasso di ponti ed edifici, rotazione di strutture interrato, etc.
- Dal 1964 il fenomeno della liquefazione è stato studiato in maniera approfondita ed estesa acquisendo uno stato di conoscenze molto avanzato



# Concetti teorici

## Cos'è la 'LIQUEFAZIONE'

- In *sensu stretto* la 'liquefazione' è lo 'stato raggiunto dai terreni sabbiosi sciolti saturi quando perdono la loro resistenza al taglio come conseguenza di un incremento delle pressioni interstiziali'.
- In un *sensu più ampio* 'liquefazione' è un termine generale utilizzato per descrivere differenti fenomeni fisici osservati in terreni sabbiosi sciolti saturi durante l'applicazione rapida di carichi o durante un terremoto
- Tutti i fenomeni collegati alla liquefazione sono causati da un incremento di pressioni interstiziali in condizioni di carico non drenate
- Tali fenomeni possono includere grandi deformazioni del terreno, che possono essere catastrofiche, ma anche effetti minori che possono ridurre la funzionalità di edifici, lifelines, etc.

In relazione alla gravità di tali effetti, i fenomeni collegati alla liquefazione possono essere raggruppati in tre classi principali:

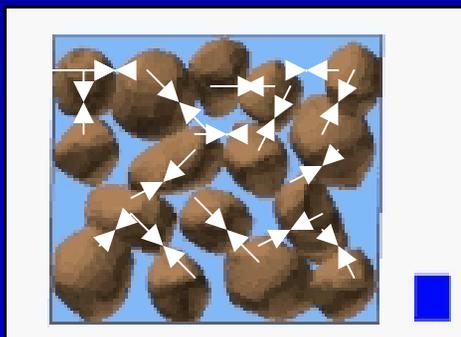
- *Fluidificazione (flow liquefaction)* ⇒ effetti più disastrosi
- *Mobilità ciclica (cyclic mobility)* ⇒ deformazioni permanenti
- *Liquefazione ciclica (cyclic liquefaction)* ⇒ nessun danno



# COMPORTAMENTO DEL TERRENO DURANTE LO SCUOTIMENTO SISMICO

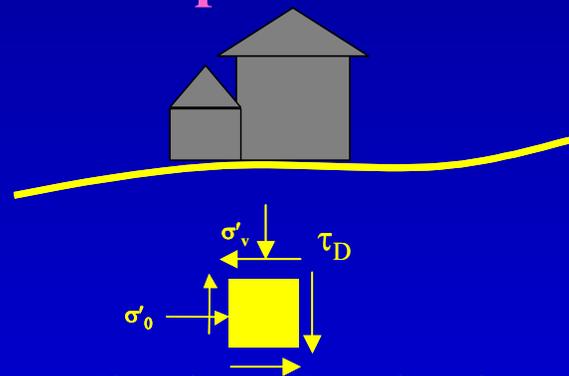
Allo scopo di comprendere il fenomeno della liquefazione è necessario definire lo stato tensionale del terreno prima del terremoto a livello di:

## Elemento di volume



- un terreno sabbioso consiste in un assemblaggio di singole particelle
- ciascuna delle quali è a contatto con un certo numero di altre particelle;
- il peso delle particelle sovrastanti determina le forze di contatto che conferiscono resistenza al terreno

## Deposito



- in un pendio o in un deposito pianeggiante sotto una costruzione, un elemento di terreno prima del terremoto è soggetto a tensioni efficaci litostatiche  $\sigma'_v$  and  $\sigma'_0$ , e a tensioni di taglio statiche  $\tau_D$
- la resistenza del terreno è dovuta alle tensioni efficaci  $\sigma'_v$  e  $\sigma'_0$ , parte di essa viene mobilitata per contrastare la resistenza al taglio statica  $\tau_D$

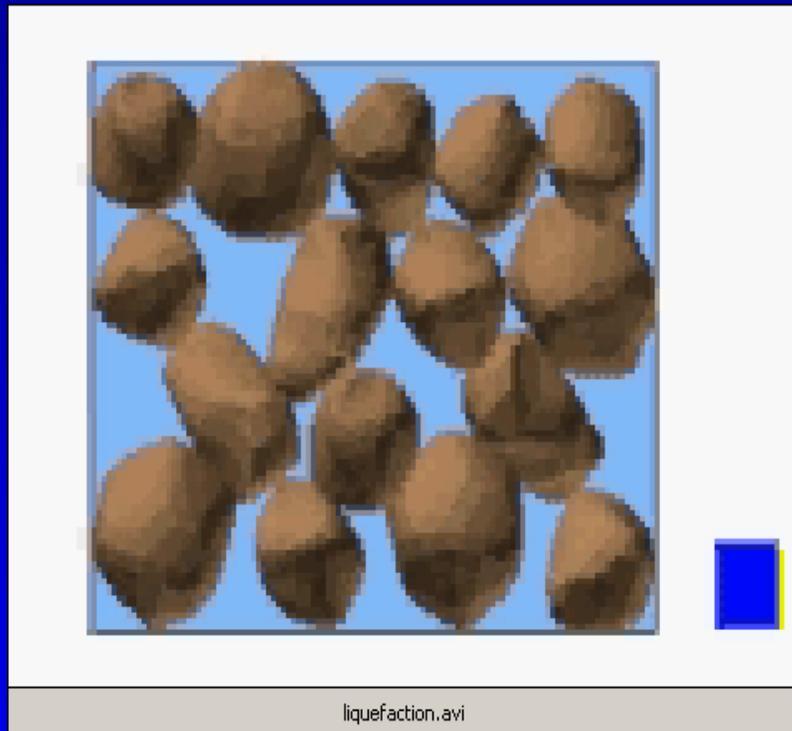


## COMPORTAMENTO DELL'ELEMENTO DI VOLUME DURANTE LO SCUOTIMENTO SISMICO

- Se lo spazio tra le particelle è completamente riempito di acqua (terreno saturo), l'acqua esercita una pressione sulle particelle che influisce sulle forze di contatto risultanti che si scambiano reciprocamente ( $\tau = c' + (\sigma - u) \cdot \text{tg } \varphi'$ )
- La continua crescita della pressione interstiziale per effetto del terremoto (carico dinamico ciclico) determina una riduzione della resistenza del terreno fino ad annullarsi

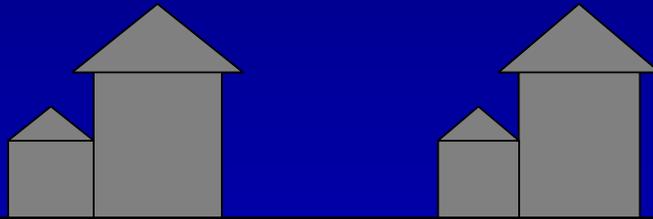
$$\tau = \sigma' \cdot \text{tg } \varphi' = (\sigma - u) \cdot \text{tg } \varphi'$$

- In terreni granulari come le sabbie, quando le tensioni efficaci si annullano, l'elemento di terreno non ha più resistenza e si comporta come un fluido riportando grandi deformazioni





# COMPORTAMENTO DI UN DEPOSITO SABBIOSO DURANTE LO SCUOTIMENTO SISMICO



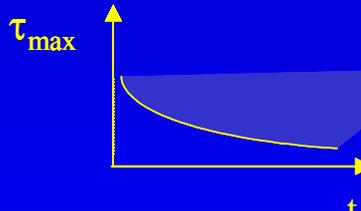
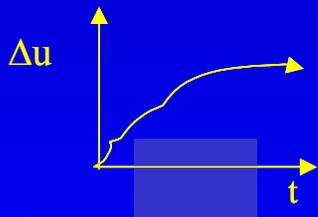
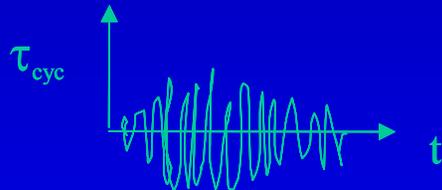
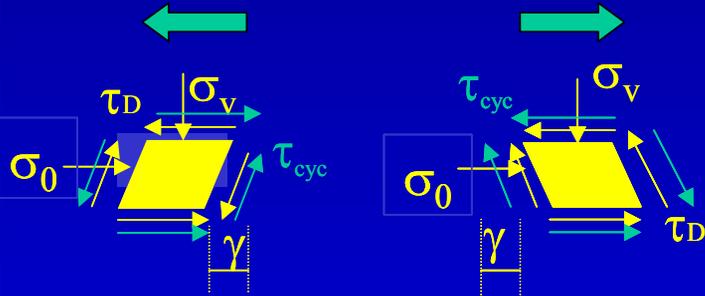
•Durante i terremoti il terreno è soggetto ad uno scuotimento orizzontale indotto dalla propagazione delle onde di taglio

•Come conseguenza l'elemento di volume è soggetto a tensioni di taglio cicliche alternate inerziali  $\tau_{cyc}$

•L'applicazione delle quali determina un addensamento nelle sabbie sciolte e l'incremento delle pressioni interstiziali

•Data la velocità con cui si verifica lo scuotimento sismico, l'incremento delle pressioni interstiziali non può essere dissipato immediatamente ed il terreno è soggetto a condizioni di carico non drenate

•Le tensioni efficaci diminuiscono e la resistenza del terreno può annullarsi. Anche se le tensioni efficaci non si annullano completamente, il terreno diventa più soffice e soggetto a grandi deformazioni.



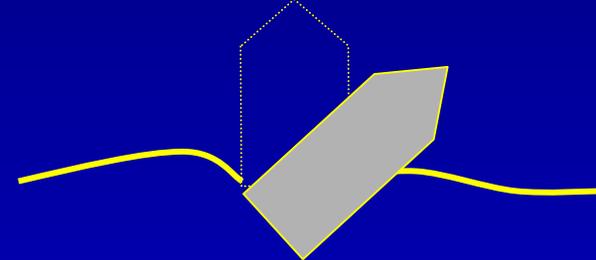


## EFFETTI DELLA PERDITA DI RESISTENZA AL TAGLIO DEI TERRENI

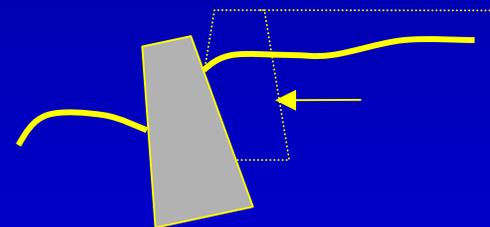
• A liquefazione avvenuta, la capacità di un terreno a supportare fondazioni di edifici, ponti, costruzioni industriali ed altre opere ingegneristiche è fortemente ridotta causandone la **rotazione o il crollo**

• I terreni liquefatti esercitano anche elevate pressioni su opere di sostegno e possono determinarne la **rotazione e/o la traslazione**; tali movimenti possono causare il cedimento del terreno sostenuto con conseguente distruzione di tutte le strutture presenti in superficie

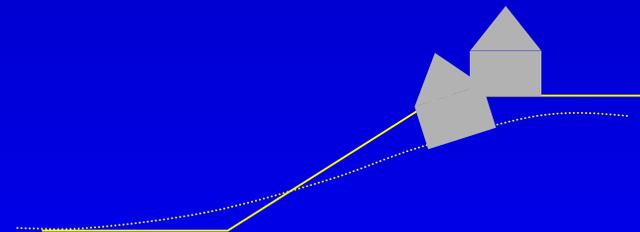
• L'incremento delle pressioni interstiziali può anche causare l'**attivazione di frane** e il collasso di dighe, terrapieni, etc.



Rotazione di un edificio



Rotazione e spostamento laterale di un muro



Frana



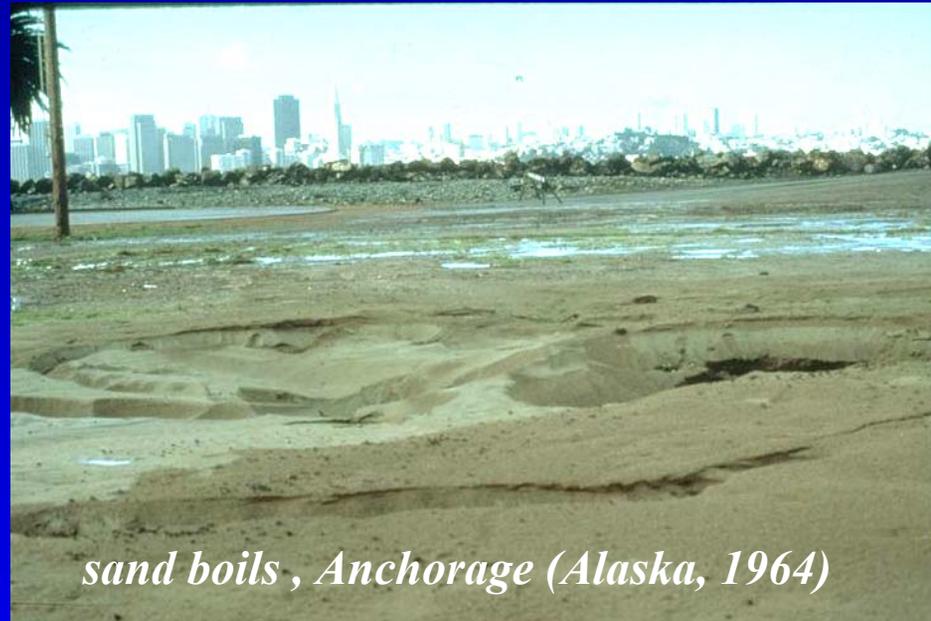
## FENOMENI CONNESSI ALLA LIQUEFAZIONE

In relazione alla loro fenomenologia ed agli effetti visibili, le manifestazioni della liquefazione possono essere così classificate:

### 1. **venute di acqua e sabbia** (*sand boils, volcanoes, vents*)



*sand volcano , Loma Prieta (California, 1989)*



*sand boils , Anchorage (Alaska, 1964)*



# FENOMENI CONNESSI ALLA LIQUEFAZIONE

## 2. perdita di capacità portante



*Kocaeli, Turchia (1999)*



*Niigata, Giappone (1964)*

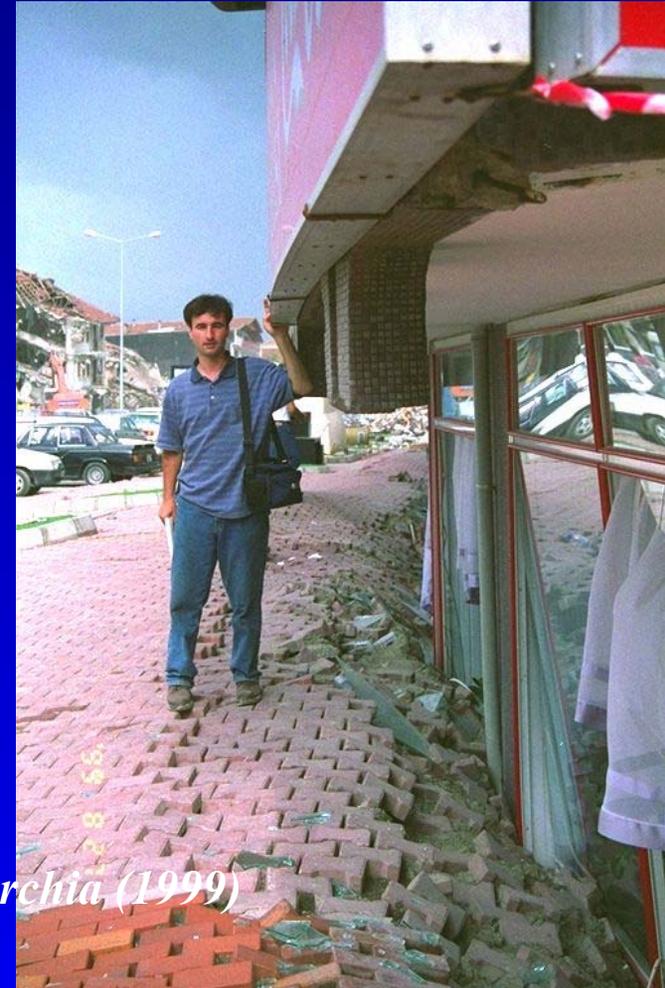


## FENOMENI CONNESSI ALLA LIQUEFAZIONE

### 3. cedimenti del terreno



*Kocaeli, Turchia, (1999)*





## FENOMENI CONNESSI ALLA LIQUEFAZIONE

### 4. movimenti orizzontali (*lateral spread*)



*Kobe, Giappone (1995)*



*Loma Prieta (California, 1989)*



## FENOMENI CONNESSI ALLA LIQUEFAZIONE

### 5. crepe nel terreno



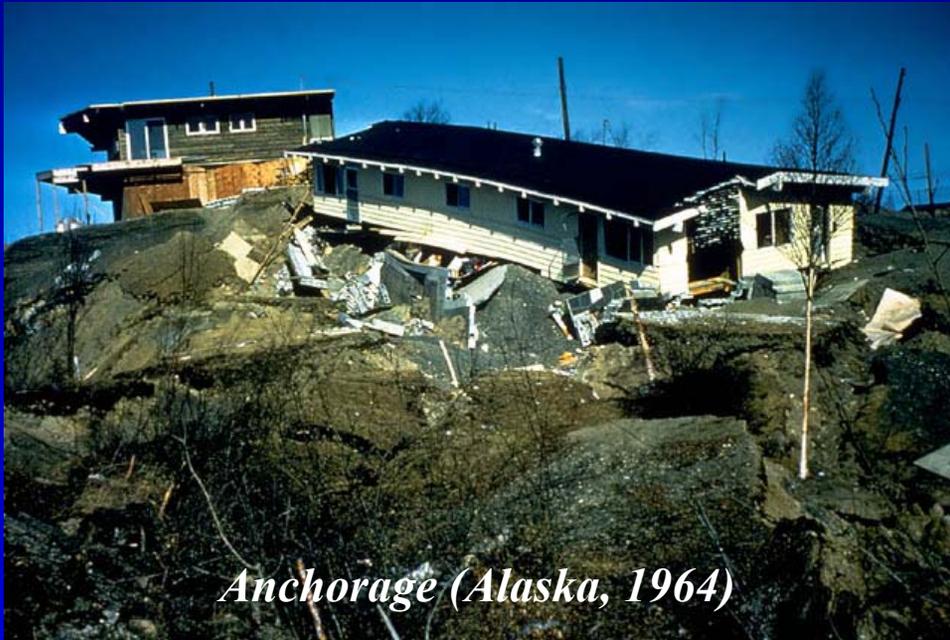
*Kocaeli, Turchia (1999)*





## FENOMENI CONNESSI ALLA LIQUEFAZIONE

### 6. rottura di pendio





## FENOMENI CONNESSI ALLA LIQUEFAZIONE

### 7. affondamento di edifici



turnover.mpeg



*Kocaeli, Turchia (1999)*

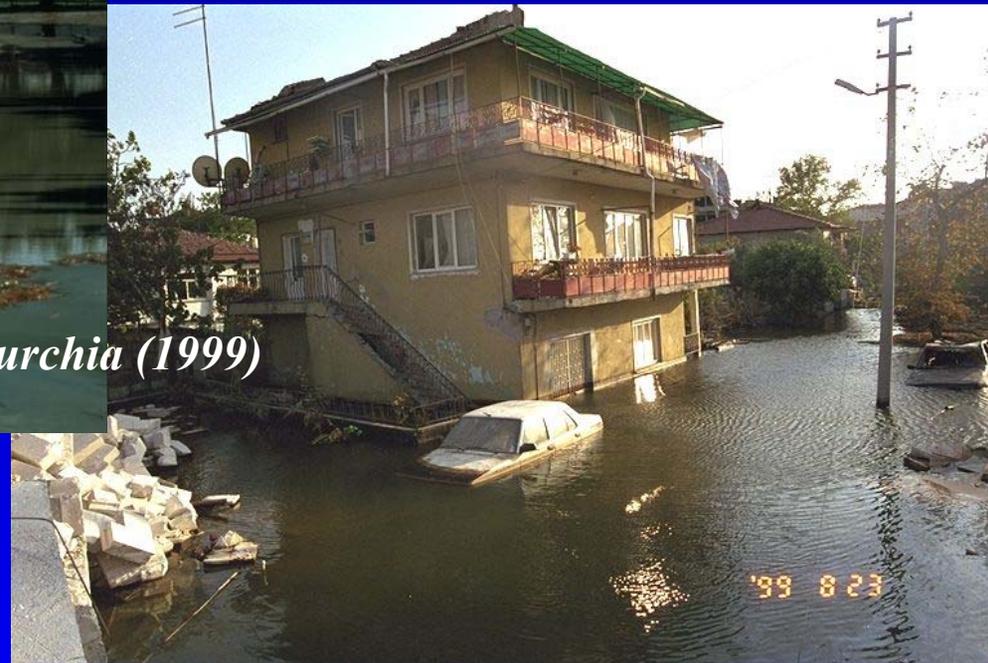


# FENOMENI CONNESSI ALLA LIQUEFAZIONE

## 8. formazione di laghi



*Kocaeli, Turchia (1999)*





## “CYCLIC STRESS APPROACH”

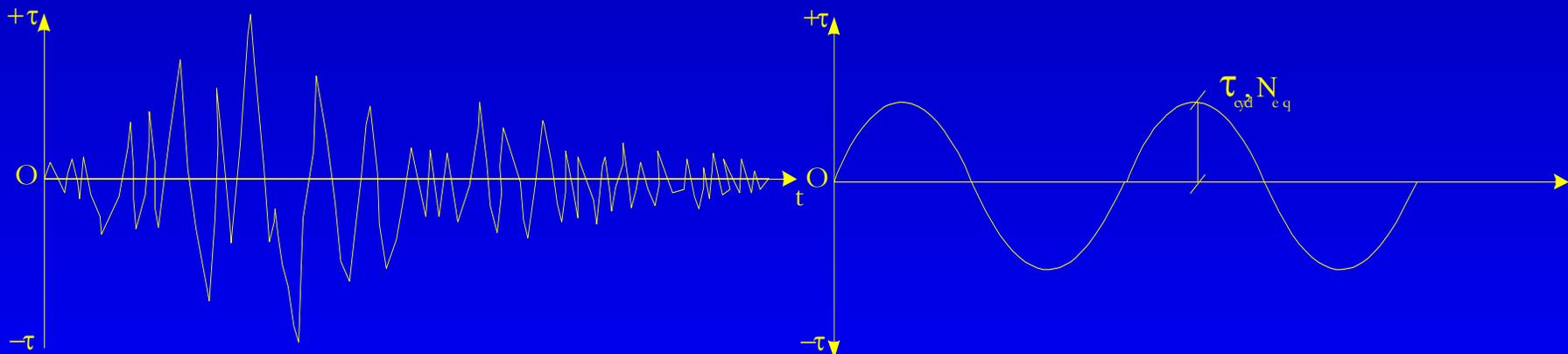
Uno degli approcci più comunemente seguiti per determinare il **rischio di liquefazione** consiste nel confrontare, in termini di **fattore di sicurezza, FSL**, la resistenza alla liquefazione del terreno ed il carico indotto dal terremoto, entrambi espressi in termini di rapporto di tensione di taglio ciclica, rispettivamente **rapporto di resistenza ciclica (Cyclic Resistance Ratio)** e **rapporto di sforzo ciclico (Cyclic Shear Ratio)**:

$$FSL = \frac{\text{Resistenza alla liquefazione del terreno}}{\text{Carico indotto dal sisma}} = \frac{CRR}{CSR}$$



## CARATTERIZZAZIONE DEL CARICO SISMICO

1. Il carico sismico che agisce su un terreno durante un terremoto è espresso in termini di tensioni di taglio cicliche indotte dal sisma.
2. L'inizio del fenomeno della liquefazione è legato all'entità dell'incremento della pressione interstiziale raggiunto, che dipende a sua volta dall'ampiezza e dal numero di cicli della storia temporale delle tensioni di taglio indotte (quindi la magnitudo e la durata dell'evento).
3. La storia temporale delle tensioni di taglio indotte da un terremoto è generalmente irregolare e non periodica, e viene perciò convertita in una **serie equivalente di  $N_{eq}$  cicli uniformi della stessa ampiezza,  $\tau_{cyc}$** , che produrrebbe un incremento della pressione interstiziale equivalente a quello prodotto dalla serie irregolare.





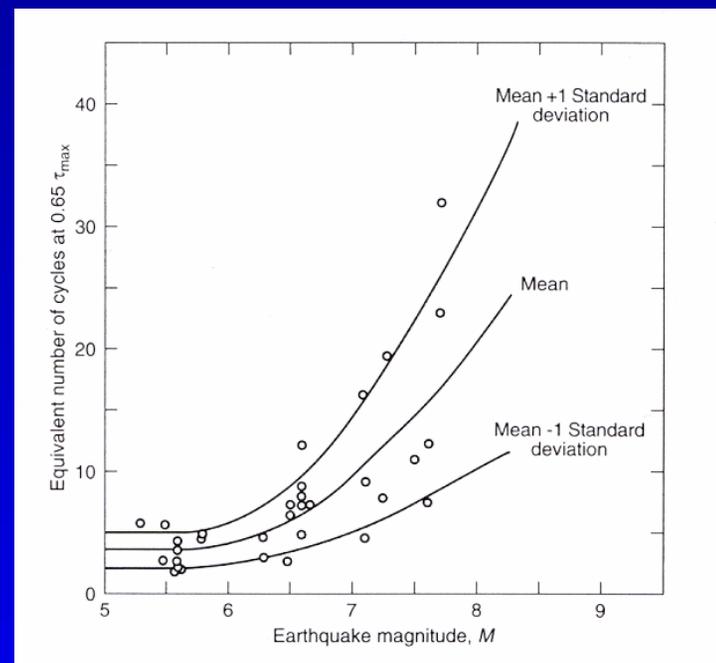
## CARATTERIZZAZIONE DEL CARICO SISMICO

Il carico sismico è definito attraverso l'ampiezza,  $\tau_{cyc}$ , e il numero di cicli,  $N_{eq}$ , della serie di cicli di sforzo di uguale ampiezza equivalente alla storia temporale effettiva degli sforzi di taglio indotti dal sisma (cioè che produce lo stesso incremento di pressione interstiziale).

$N_{eq}$  è legato alla durata dell'evento, quindi alla magnitudo, attraverso correlazioni empiriche (Seed et al., 1975).

$\tau_{cyc}$  viene generalmente assunto uguale al 65% del picco della storia temporale delle tensioni di taglio indotte,  $\tau_{max}$

$$\tau_{cyc} = 0.65 \tau_{max}$$





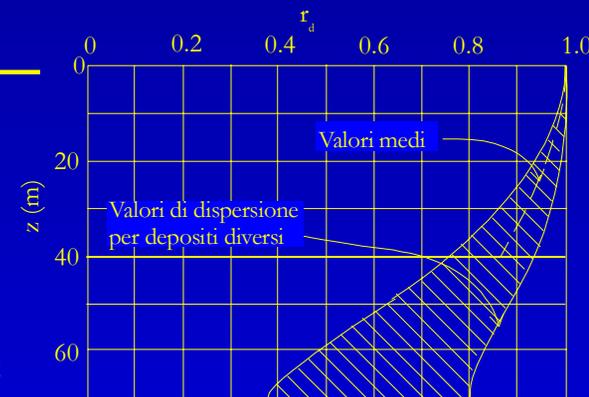
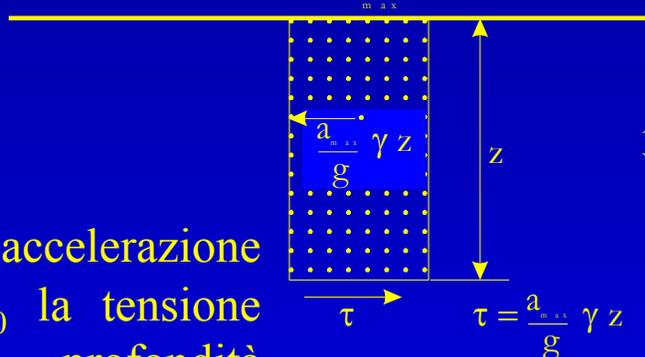
## CARATTERIZZAZIONE DEL CARICO SISMICO

Il valore di  $\tau_{max}$ , variabile secondo la verticale considerata, e, per la stessa verticale, variabile con la profondità, può essere ottenuto:

- dalla storia temporale delle tensioni di taglio predette, per mezzo di un' **analisi della risposta sismica locale**;
- da procedure semplificate (Seed and Idriss, 1971), da cui:

$$\tau_{max} = \frac{a_{max}}{g} \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d$$

dove  $a_{max}$  è la massima accelerazione attesa in superficie e  $\sigma_{v0}$  la tensione verticale totale alla profondità considerata



La tensione di taglio ciclica,  $\tau_{cyc}$ , normalizzata rispetto alla tensione verticale efficace,  $\sigma'_{v0}$ , è chiamata:

**rapporto di sforzo di taglio ciclico equivalente (CSR)**

$$\frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

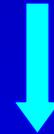


# CARATTERIZZAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA LIQUEFAZIONE

“La **resistenza alla liquefazione** di un elemento di terreno dipende da quanto lo stato iniziale del terreno è vicino allo stato di rottura dovuto alla liquefazione e dalla intensità del carico richiesto per condurre il terreno dallo stato iniziale a quello di rottura”.

Secondo questo tipo di approccio la resistenza alla liquefazione viene determinata senza fare distinzione tra i fenomeni connessi alla liquefazione, e utilizzando diversi metodi:

1. metodi basati sui risultati delle **prove di laboratorio** (prova di taglio semplice ciclica, prova triassiale ciclica);
2. metodi basati sulle **prove in sito e sulle osservazioni dei fenomeni di liquefazione** durante terremoti passati.



Tali metodi usano “**case histories**” per caratterizzare la resistenza alla liquefazione dei terreni danneggiati in termini di parametri misurati in sito



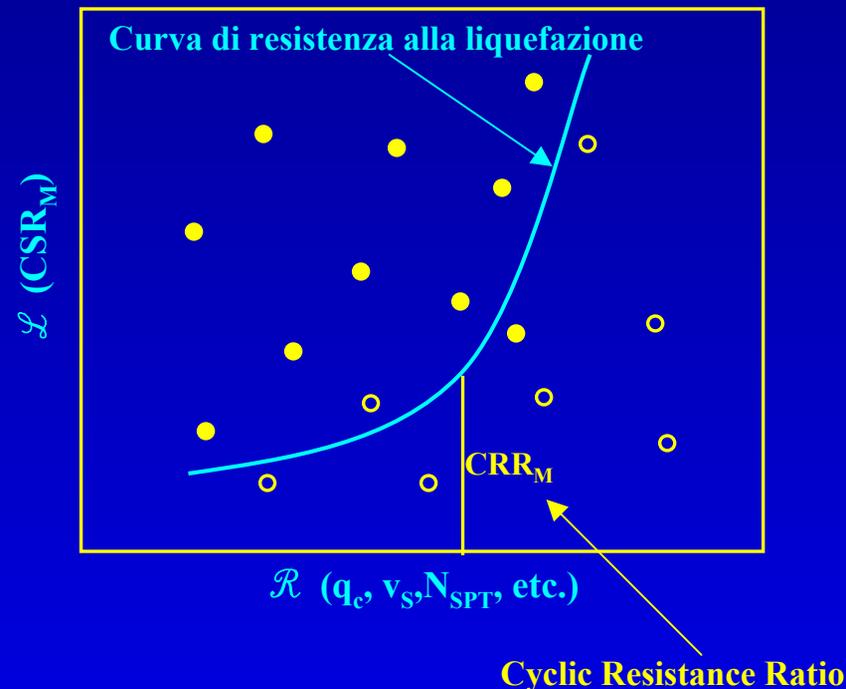
# CARATTERIZZAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA LIQUEFAZIONE

Il parametro di carico sismico,  $L$ , relativo a terremoti passati della stessa magnitudo,  $M$ , che hanno colpito i siti esaminati ed espresso in termini di rapporto di sforzo ciclico equivalente,  $CSR_M$ , è confrontato col parametro di resistenza alla liquefazione,  $\mathcal{R}$ , espresso in termini di un parametro misurato in sito ( $N_{SPT}$  da prove SPT, resistenza alla punta da prove CPT, velocità delle onde di taglio,  $V_s$ , da prove down-hole, etc.).

Generalmente tali grafici sono riferiti a:

1. terremoti di magnitudo 7.5 ( $M = 7.5$ )
2. terreni simili (come distribuzione granulometrica, contenuto di fine, etc.)
3. parametri misurati in sito e normalizzati rispetto alla tensione efficace verticale (per poterli confrontare con CSR)

- Liquefazione osservata
- Liquefazione non osservata





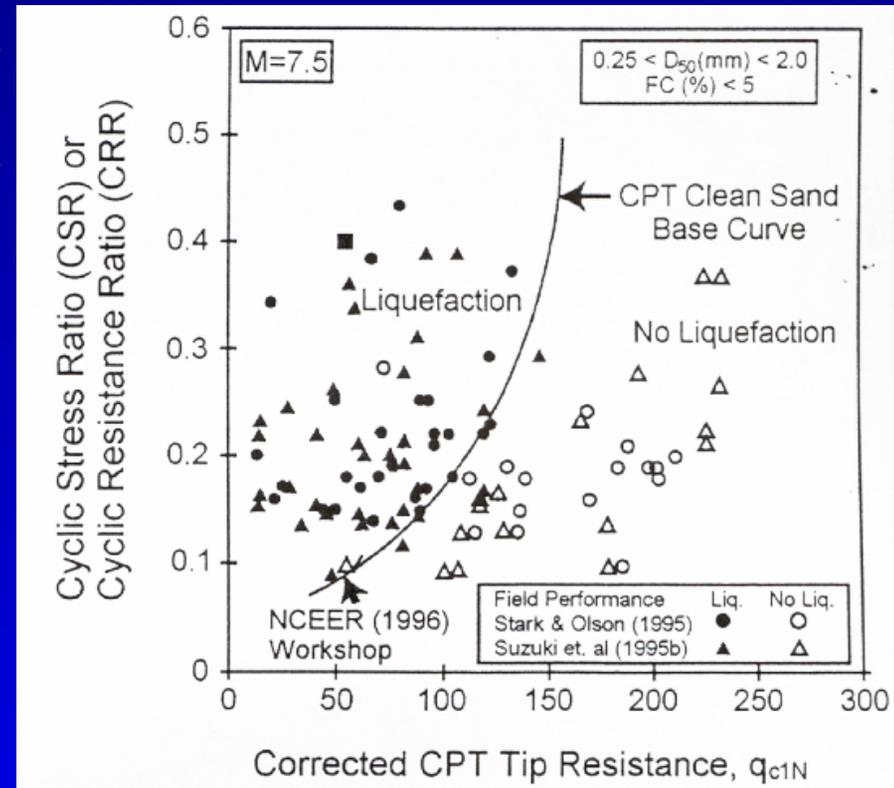
## METODO DI ROBERTSON AND WRIDE (1997)

È un metodo basato su prove CPT, dove la resistenza alla punta,  $q_c$ , normalizzata rispetto alla tensione efficace verticale,  $q_{c1n}$ , e misurata da prove CPT in siti precedentemente colpiti da terremoti di magnitudo 7.5 e caratterizzati dallo stesso tipo di terreno (sabbie pulite),  $(q_{c1n})_{cs}$ , viene confrontata col rapporto di sforzo ciclico equivalente,  $CSR_{7.5}$ , corrispondente ai terremoti considerati.

La linea di confine tra i casi di liquefazione e di non liquefazione, è data da:

$$CRR_{7.5} = 0.833 \cdot \left( \frac{(q_{c1n})_{cs}}{1000} \right) + 0.05 \quad \text{con } (q_{c1n})_{cs} < 50$$

$$CRR_{7.5} = 93 \cdot \left( \frac{(q_{c1n})_{cs}}{1000} \right)^3 + 0.08 \quad \text{con } 50 < (q_{c1n})_{cs} < 160 \quad \longrightarrow \text{if } (q_{c1n})_{cs} > 160 \text{ terreno non liquef.}$$





Il metodo di Robertson and Wride consente anche di classificare il terreno per mezzo di due fattori adimensionali,  $F$  and  $Q$ , e un **indice di classificazione,  $I_c$** :

$$F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} \times 100 \quad Q = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$$

$$I_c = \sqrt{(\log F + 1.22)^2 + (\log q_{c1n} - 3.47)^2}$$

L'indice  $I_c$  è usato per determinare:

1. la resistenza di punta normalizzata:

$$q_{c1N} = \left( \frac{q_c}{p_a} \right) \cdot \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad \text{dove } p_a = 1 \text{ atm e } n = f(I_c) \text{ da procedura iterativa}$$

2. la resistenza di punta normalizzata per sabbie pulite:

$$(q_{c1n})_{cs} = K_c q_{c1n} \quad \text{dove } K_c = f(I_c)$$

3. per classificare il terreno ed escludere dall'analisi del rischio di liquefazione tutti gli strati non suscettibili a liquefazione da un punto di vista litologico ( $I_c > 2.6$ )

$I_c < 1.31$

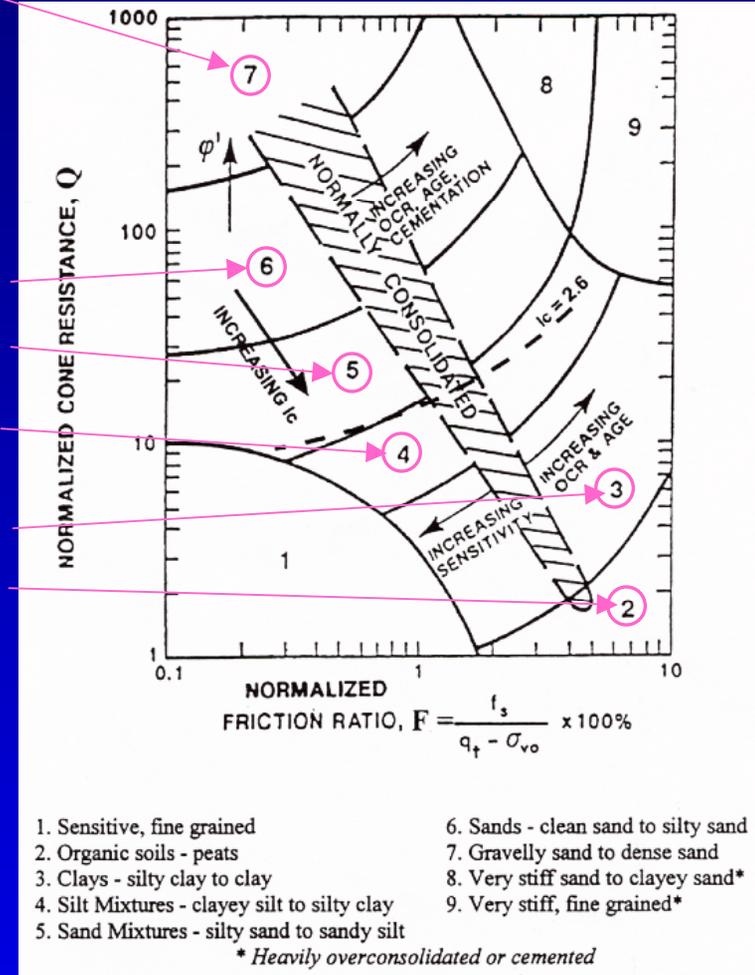
$1.31 < I_c < 2.05$

$2.05 < I_c < 2.60$

$2.60 < I_c < 2.95$

$2.95 < I_c < 3.60$

$I_c > 3.60$





## CALCOLO DEL FATTORE DI SICUREZZA (FSL)

1.  $CRR_{7.5}$  viene così calcolato per ciascuna verticale investigata e a ciascuna profondità per la quale è disponibile la misura in sito del parametro considerato, ed attribuito allo strato corrispondente.

Alcuni di questi strati possono essere esclusi a priori nei seguenti casi:

- ✓ strati al di sopra del livello di falda;
  - ✓ strati a profondità maggiore di 20 m  
(dove i fenomeni di liquefazione possono essere considerati trascurabili)
  - ✓ strati non suscettibili a liquefazione da un punto di vista meccanico ( $(q_{c1n})_{cs} > 160$ );
  - ✓ strati non suscettibili a liquefazione da un punto di vista litologico ( $I_c > 2.6$ ).
2. Per i medesimi strati viene calcolato il valore di CSR corrispondente al massimo evento atteso di magnitudo  $M$  (con un certo periodo di ritorno).
  3. Viene determinata la resistenza del terreno corrispondente alla magnitudo  $M$ ,  $CRR_M$ , moltiplicando,  $CRR_{7.5}$ , determinato da correlazioni empiriche secondo il metodo prescelto, per un fattore di scala,  $MSF$ .
  4. Il fattore di sicurezza contro la liquefazione è così:

$$FSL = \frac{CRR}{CSR} = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot MSF$$



## CALCOLO DELL'INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

FSL indica per ciascun strato investigato se il fenomeno della liquefazione può verificarsi (maggiore o minore di uno) e l'intensità del fenomeno (moto più grande di uno o vicino ad uno), ma gli effetti del fenomeno della liquefazione in un dato sito sono la risultante dei contributi di tutti gli strati sottostanti, perciò è necessario definire per ciascun profilo esplorato un parametro finale e cumulativo della liquefazione, detto **indice del potenziale di liquefazione** (Iwasaki et al., 1978):

$$P_L = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) \cdot dz \quad \text{con} \quad \begin{cases} F(z) = 0 & \text{per FSL} > 1 \\ F(z) = 1 - \text{FSL} & \text{per FSL} \leq 1 \end{cases} \quad w(z) = 10 - 10 \cdot \left( \frac{z}{20} \right)$$

Sulla base di tale indice vengono definite 4 classi di **rischio di liquefazione**:

$P_L$	Liquefaction risk
$P_L < 1$	Very low
$1 < P_L \leq 5$	low
$5 < P_L \leq 15$	High
$P_L > 15$	Very high



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE

Sezione geotecnica

# Applicazione

## “VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE NELL’AREA PORTUALE DI GIOIA TAURO ”



## INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

*“GIOIA TAURO, di origini molto antiche, è sempre stata una piccola città dedita ad attività di pesca con la sua massima crescita ed espansione commerciale ai tempi della “Magna Grecia” e durante la dominazione spagnola del XVI secolo.*

*Al giorno d’oggi Gioia Tauro è diventata un centro di particolare interesse da un punto di vista economico in quanto ospita uno dei più importanti e grandi porti commerciali dell’Europa meridionale”.*





## INQUADRAMENTO SISMOLOGICO

Gioia Tauro e l'area circostante sono state colpite in passato da numerosi eventi sismici con intensità macrosismica superiore a VIII MCS, e sono stati osservati numerosi fenomeni attribuibili alla liquefazione, specialmente durante l'evento del 1783 che ha completamente distrutto la città.

### Manifestazioni di liquefazione durante l'evento del 1783

#### Oppido



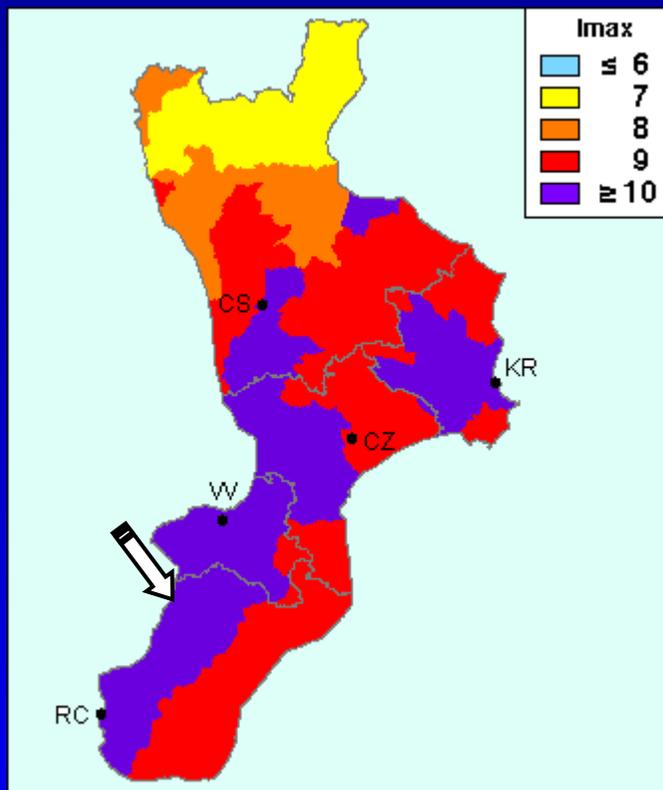
#### Rosarno





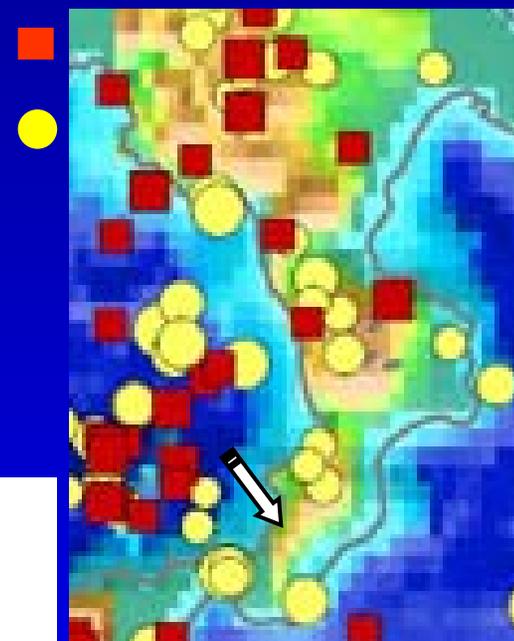
# INQUADRAMENTO SISMOLOGICO

## Mappa delle massime intensità macrosismiche osservate ( $I_{max}$ )

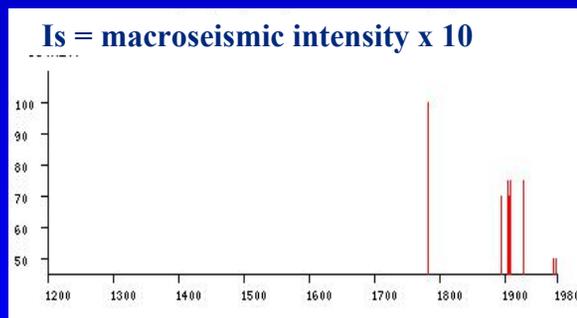


## Mappa degli epicentri osservati ( $M > 4$ )

Dati strumentali (1964-1992)  
Dati macrosismici (from 1900)



## Ricorrenza sismica a Gioia tauro

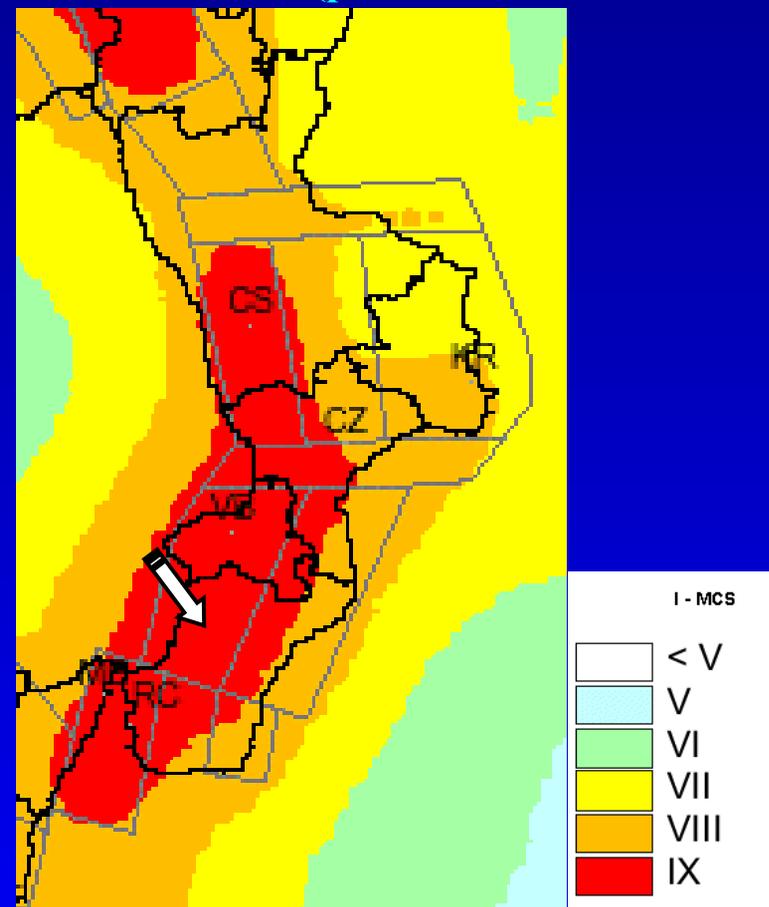
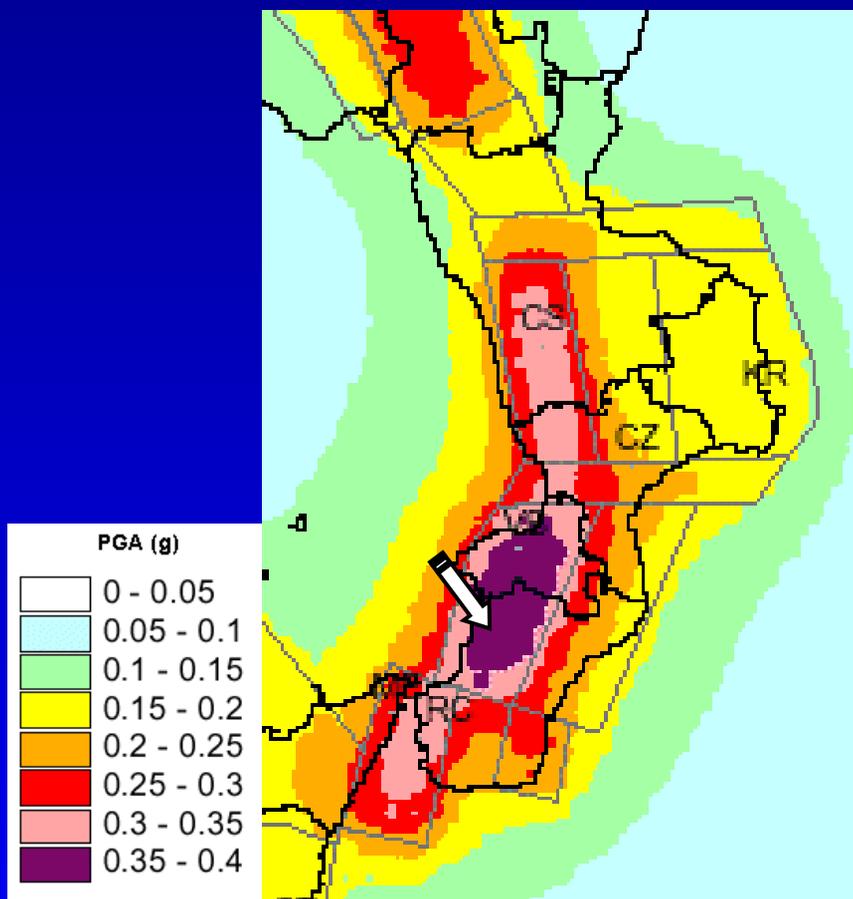




# INQUADRAMENTO SISMOLOGICO

Mappa dei valori di  
PGA (g) predetti  
(periodo di ritorno di 475 anni)

Mappa delle  
intensità MCS predette  
(periodo di ritorno di 475 anni)

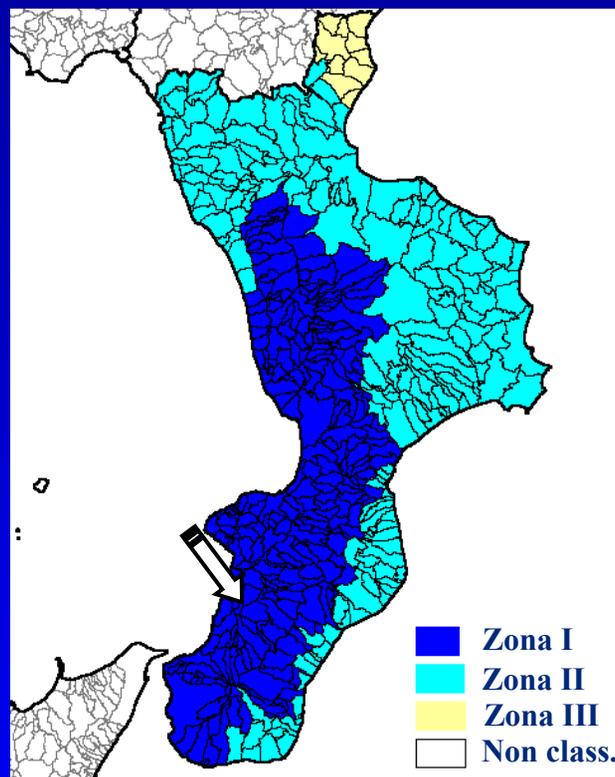




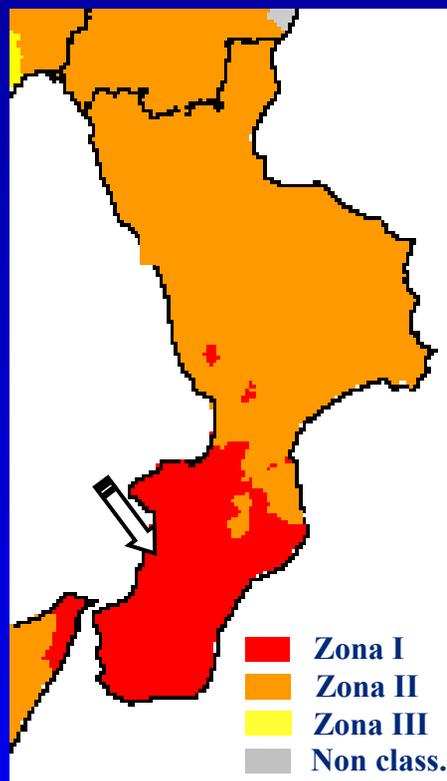
# INQUADRAMENTO SISMOLOGICO

## Zone sismiche

(in vigore, 1984)



(proposte, 1997)



Gioia Tauro ricade all'interno della 1<sup>a</sup> zona sismica (la più alta). È stato stimato un evento atteso massimo (con un periodo di ritorno di 475 anni) di **magnitudo 7.3** e con un picco di accelerazione massimo (alla superficie), **PGA, di 0.45 g**

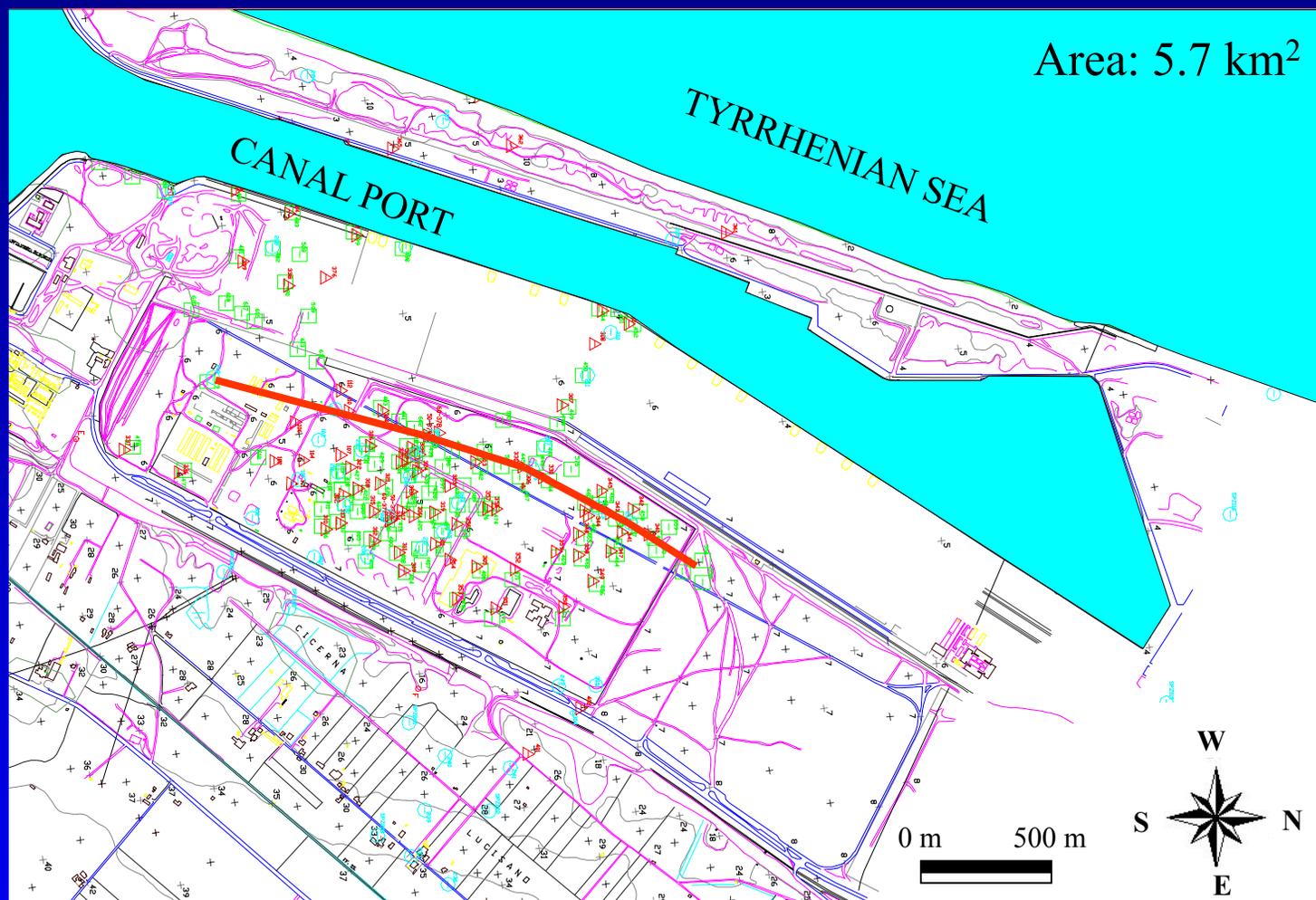


## ZOOM SULL'AREA PORTUALE DI GIOIA TAURO





# INQUADRAMENTO GEOLOGICO



Area: 5.7 km<sup>2</sup>

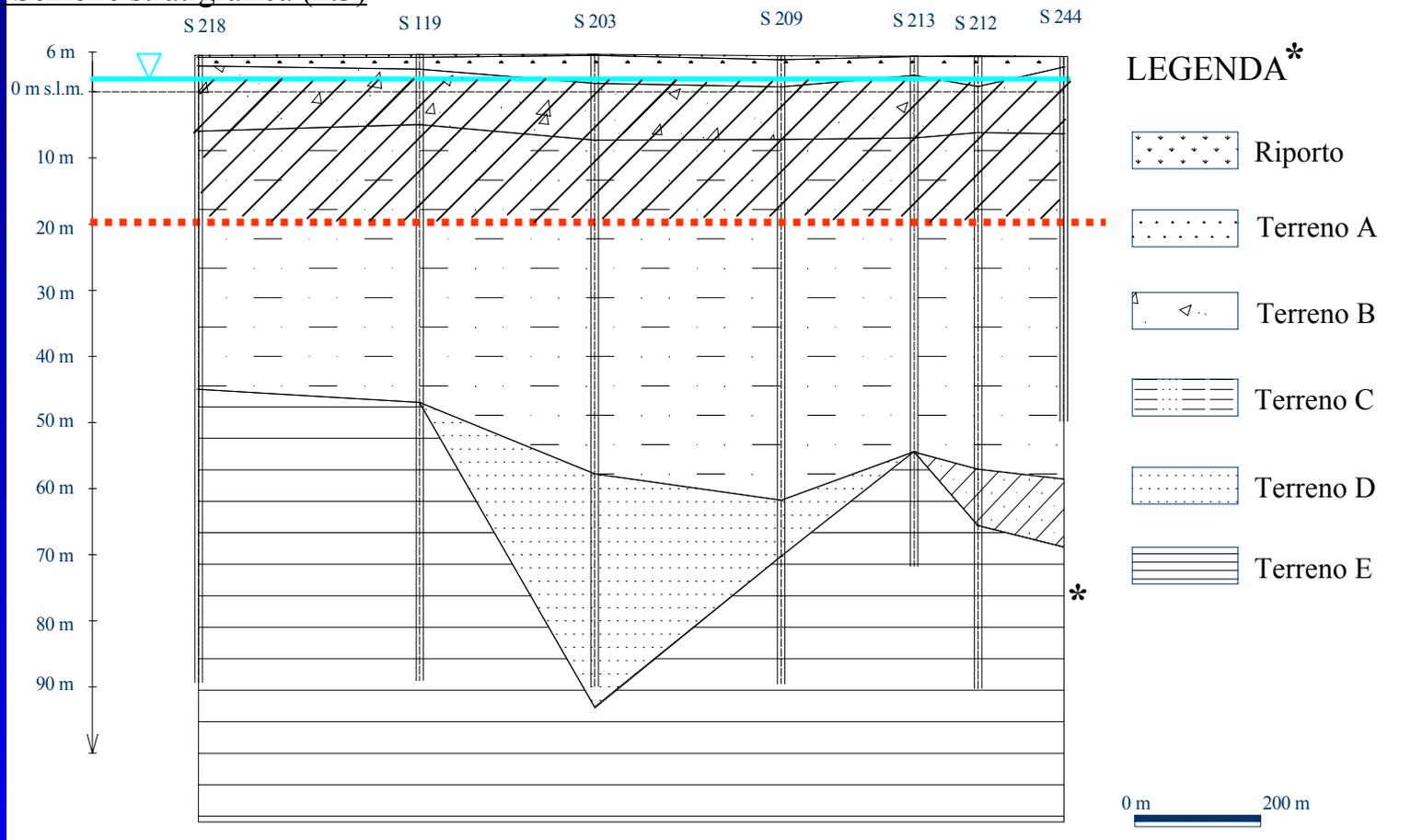
## LEGENDA

-  Prove CPT
-  Prove SPT in sondaggio
-  Prove SPT
-  Sezione n.3
-  Terreno di riporto



# INQUADRAMENTO GEOLOGICO

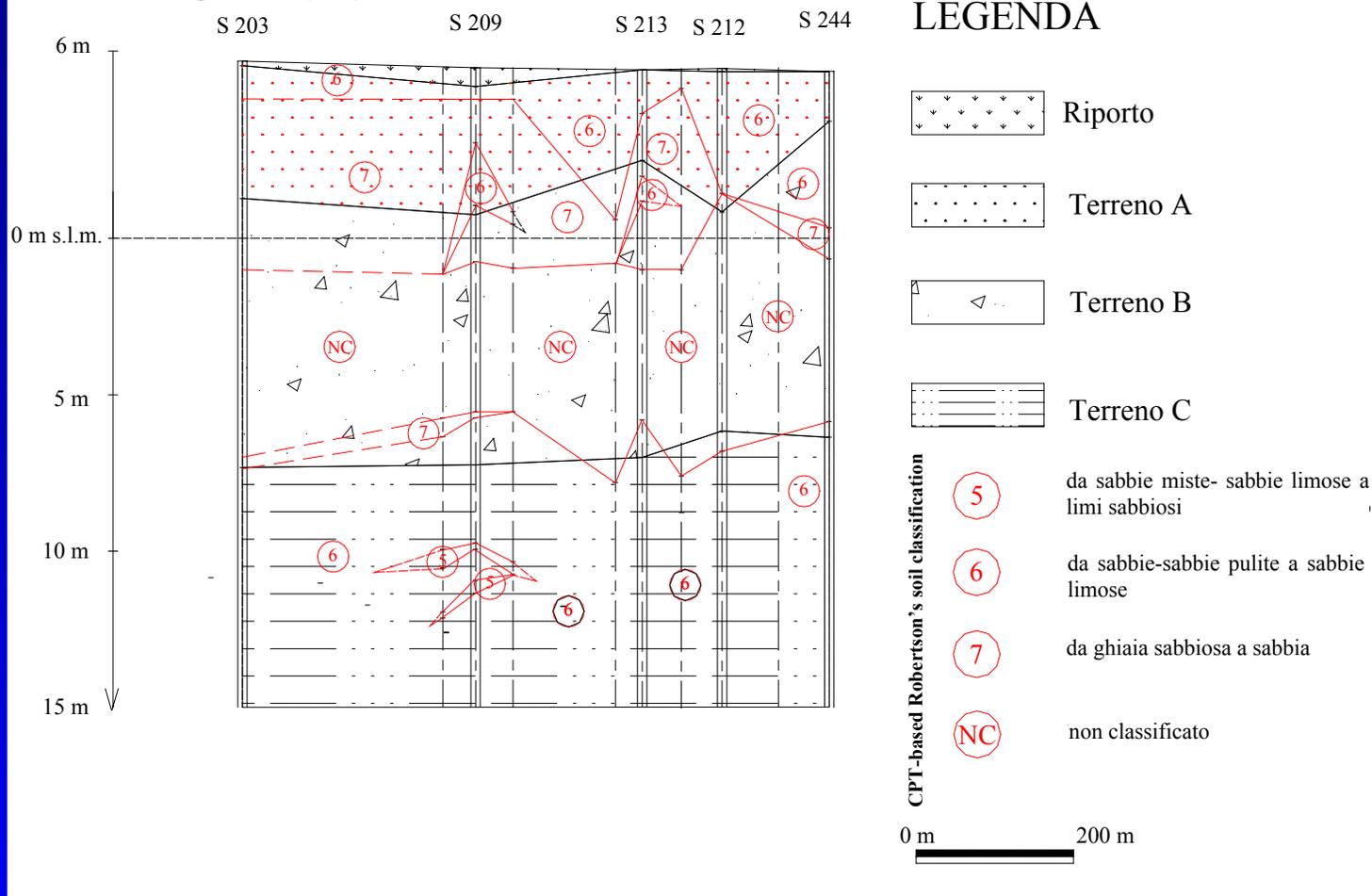
Sezione stratigrafica (n.3)





# INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Sezione stratigrafica (n.3)





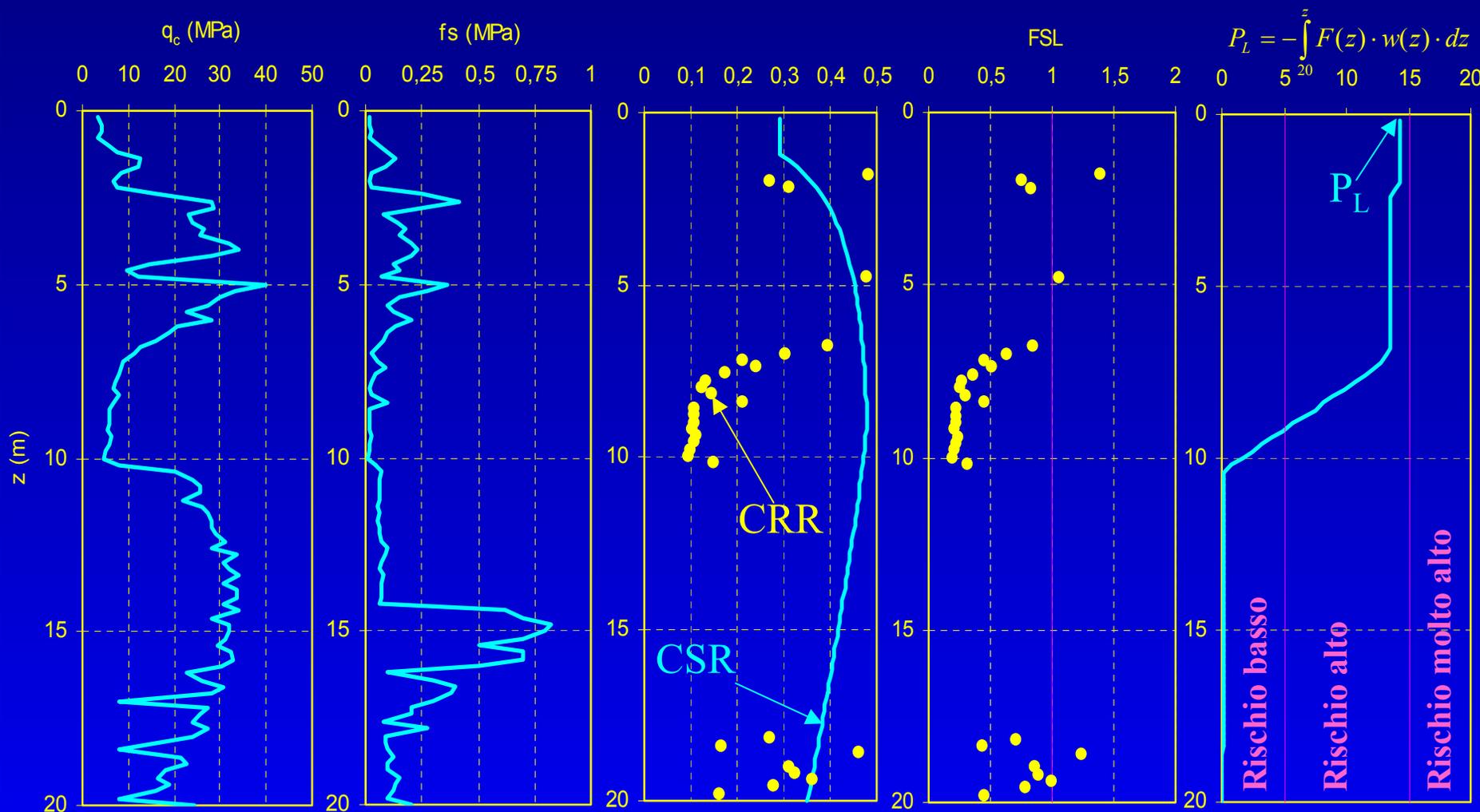
## VALUTAZIONE DELL'INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

1. L'elevata sismicità di quest'area rende la pericolosità sismica **molto alta**.
2. La presenza di uno dei più importanti porti commerciali dell'Europa Meridionale, da un punto di vista strutturale, le proprietà litologiche e fisiche dei terreni, da un punto di vista geotecnico, determinano una **elevata vulnerabilità**.
3. Quindi il rischio di liquefazione è considerato **molto alto** ed una **zonazione del rischio di liquefazione** è opportuna.

Questa è la ragione per cui negli anni passati quest'area è stata oggetto di estese indagini geologiche, geotecniche e sismologiche.

Il numero delle prove utilizzate per condurre questa ricerca è:

- 54 sondaggi (con profondità massima investigata tra 16.95 m e 91.30 m)
- prove di laboratorio
- 115 prove CPT meccaniche
- 121 prove SPT





## INTERPOLAZIONE SPAZIALE DEI VALORI CALCOLATI DI $P_L$

I valori di  $P_L$  così calcolati dalle prove CPT per ciascuna verticale esplorata sono stati interpolati usando:

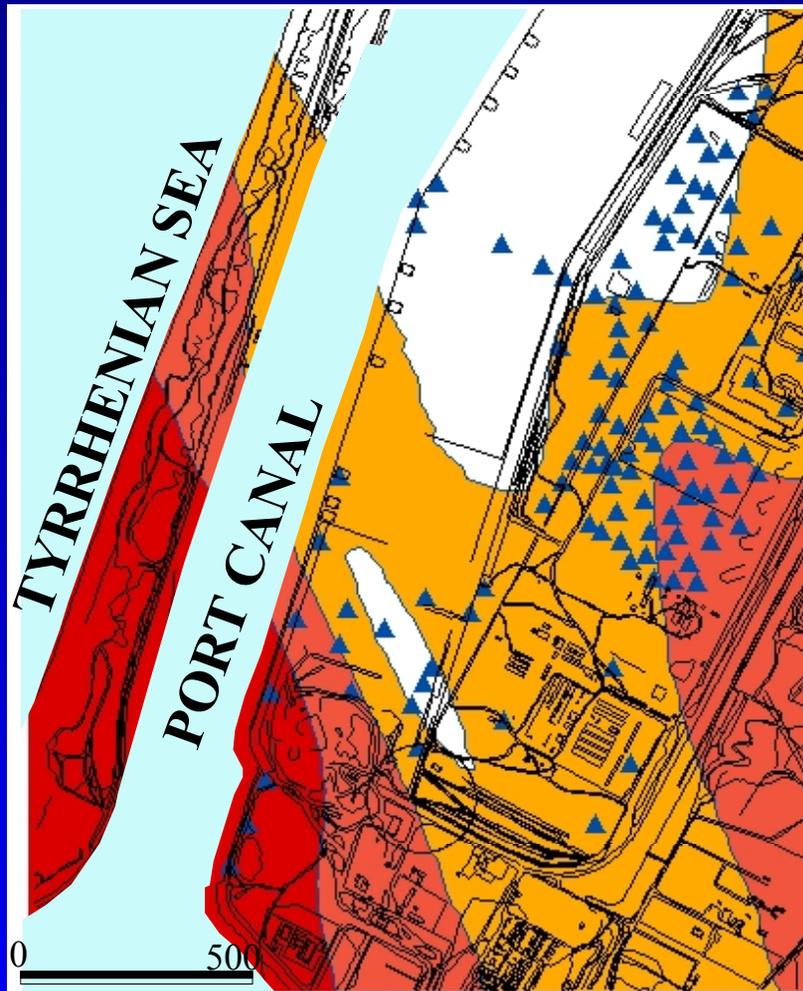
- **METODI DETERMINISTICI** (distanza inversa pesata)
- **METODI GEOSTATISTICI** (kriging)

I secondi sono generalmente preferiti poiché:

1. il parametro stimato viene calcolato considerando la variabilità spaziale dell'intero data-set;
2. forniscono delle stime migliori specialmente quando i punti di misura non sono equispazialmente distribuiti nell'area in esame;
3. consentono di stimare il valore più probabile e il corrispondente errore in termini di deviazione standard per valutare l'affidabilità del metodo.



# MAPPA DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE (valori predetti)



## Legend

-  CPT Tests
-  Liquefaction risk very low ( $0 < P_L < 1$ )
-  Liquefaction risk low ( $1 < P_L < 5$ )
-  Liquefaction risk high ( $5 < P_L < 15$ )
-  Liquefaction risk very high ( $P_L > 15$ )



## MAPPA DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE (errori)



### Legenda

-  CPT Tests
-   $3.0 < E_{std} < 3.4$
-   $3.4 < E_{std} < 3.6$
-   $3.6 < E_{std} < 3.8$
-   $3.8 < E_{std} < 4.0$
-   $4.0 < E_{std} < 5.0$

\*Estd = standard error

Mean predicted error = 0.12

Mean standardised error = 0.04355



## *Riferimenti*

“Geotechnical Earthquake Engineering” - Steven L. Kramer – Prentice-Hall

[www.liquefaction.com](http://www.liquefaction.com)

<http://nisee.berkeley.edu/>