ALIG ASSOCIAZIONE LABORATORI DI INGEGNERIA E GEOTECNICA

GEO FLUID

# Nuove normative nel settore dei laboratori geotecnici aspetti innovativi e criticità applicative

## Metodi di indagine per la caratterizzazione geotecnica
## Si può fare tutto con le indagini geofisiche?

Stefano Aversa
Università degli studi di Napoli Parthenope

Piacenza – 5 Ottobre 2018

## Novità delle NTC 2008 in ambito geotecnico:

- Contenuti di Relazione Geotecnica
- Verifiche SLU con coefficienti parziali di sicurezza
- Valore caratteristico dei parametri geotecnici
- Fondazioni “miste” con possibilità di tenere conto del contributo della platea
- **Risposta Sismica Locale (e relative indagini)**

# Metodi di indagine per la caratterizzazione geotecnica

**Le NTC 2008 avevano imposto di tenere conto degli effetti di sito nella valutazione delle azioni sismiche sulle strutture :**

- o attraverso studi di RSL
- o facendo riferimento alle Classi di sottosuolo in casi semplici

| Classe | Litologia | $V_{S,30}$ (m/s) | $N_{SPT,30}$ | $c_{u,30}$ (kPa) |
|---|---|---|---|---|
| **A** | *Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* (con eventuale coltre di alterazione < 3m) | > 800 | - | - |
| **B** | *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti* (con spessori > 30 m e miglioramento graduale di proprietà meccaniche con la profondità) | 360-800 | > 50 | > 250 |
| **C** | *Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* (con spessori > 30 m e miglioramento graduale di proprietà meccaniche con la profondità) | 180-360 | 15-50 | 70-250 |
| **D** | *Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti* (con spessori > 30 m e miglioramento graduale di proprietà meccaniche con la profondità) | < 180 | < 15 | < 70 |
| **E** | *Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m* (su substrato con $V_S$ > 800 m/s) | < 360 | < 50 | < 250 |
| **S1** | *Depositi con uno strato > 8 m di terreni fini poco consistenti o > 3 m di torba o argille organiche* | < 100 | - | 10-20 |
| **S2** | *Terreni liquefacibili, argille sensitive o altri terreni non classificabili nelle categorie precedenti* | | | |

# Risposta Sismica Locale

La valutazione della RSL, in entrambi i casi, le NTC (2008) hanno richiesto l'esecuzione di:

- almeno un sondaggio a 30 m, per stratigrafia
- una valutazione del $V_{S30}$

**Dall'entrata in vigore delle NTC 2008 gli Uffici del Genio Civile controllano che tali accertamenti siano eseguiti!**

# Risposta Sismica Locale

A luglio 2009, poco dopo l'entrata in vigore delle NTC 2008, ho depositato al Genio Civile di Napoli un progetto di Barriere Paramassi a Coroglio ai piedi del costone di Posillipo

**Bocciato!!**

# Lettera al Presidente CSLLPP

Roma, 15 dicembre 2009

**Oggetto: Norme Tecniche sulle Costruzioni – Implicazioni sulle indagini geotecniche.**

Illustrissimo Presidente,

……

A seguito dell'entrata in vigore della norma, infatti, il ricorso alla **misura diretta della velocità di propagazione** delle onde di taglio nei primi 30 metri di profondità è divenuto più frequente e sempre più numerose sono le ditte di indagini in sito che dispongono di attrezzature e – si spera – competenze per l'esecuzione di *cross-hole e, più frequentemente, down-hole, SASW o MASW.*

**E' ben chiaro, però, che tali indagini debbano essere considerate integrative** rispetto a quelle che tradizionalmente si devono eseguire per la progettazione di tutte le strutture che interagiscono con il terreno.

# Lettera al Presidente CSLLPP (continuazione)

…….

La sola caratterizzazione del sottosuolo in termini di velocità di propagazione delle onde di taglio **non è**, infatti, **sufficiente** alla definizione del **modello geotecnico di sottosuolo** per la verifica delle opere geotecniche agli **Stati Limite di Esercizio** e, tanto meno, per quelli **Ultimi**.

**L'obbligatorietà dell'indagine geotecnica** sancita fin dal DM 08/03/88 e ribadita nel testo del DM 14/01/2008 ai punti 6.1.2 e 6.2.2 **non può**, quindi, **essere ottemperata con la sola caratterizzazione eseguita ai fini della Risposta Sismica Locale**, ma richiede anche una più ampia fase di indagini in sito e, dove possibile, di sperimentazione di laboratorio la cui **programmazione spetta al progettista che se ne assume la responsabilità** (punto 6.2.2).

…….

# Risposta Sismica Locale (NTC 2018)

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^{n} \frac{h_i}{V_{S,i}}} \quad \Rightarrow \quad V_{S,H} = \frac{H}{\sum_{i=1}^{n} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

per profondità del bedrock H < 30 m

| Classe | Litologia | $V_{S,30}$ (m/s) | $N_{SPT,30}$ | $c_{u,30}$ (kPa) |
|---|---|---|---|---|
| **A** | *Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* (con eventuale coltre di alterazione < 3m) | > 800 | [illegible] | - |
| **B** | *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti* (con ~~spessori > 30 m e~~ miglioramento graduale di proprietà meccaniche con la profondità) | 360-800 | > [illegible] | [illegible] 250 |
| **C** | *Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* (con spessori > 30 m e miglioramento graduale di proprietà meccaniche con la profondità) | 180-360 | 15[illegible] | [illegible]-250 |
| **D** | *Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti* (con spessori > 30 m e miglioramento graduale di proprietà meccaniche con la profondità) | < 180 | < 15 | < 70 |
| **E** | *Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a ~~20 m~~ 30 m* (su substrato con $V_S$ > 800 m/s) | < 360 | < [illegible] | [illegible] 250 |
| **S1** | ~~*Depositi con uno strato > 8 m di terreni fini poco consistenti o > 3 m di torba o argille organiche*~~ | < 100 | [illegible]0-20 | |
| **S2** | ~~*Terreni liquefacibili, argille sensitive o altri terreni non classificabili nelle categorie precedenti*~~ | | | |

**Specifiche analisi RSL**

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

La corretta abolizione della classificazione in base a $N_{SPT30}$ e $c_{u30}$

potrebbe scorrettamente
spingere sempre di più verso l'esecuzione di sole prove geofisiche!

**Perché non si possono eseguire solo prove geofisiche?**

S. Aversa

# Indagini Geofisiche

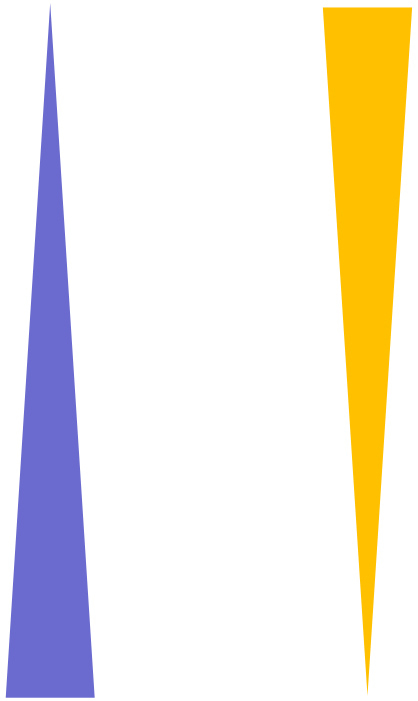
## Importanza e Limiti

# Indagini geofisiche per studi di RSL

**Scopo: stima in sito del profilo di $V_S$ (→ $G_0$)**

- **Metodi Invasivi**
  - **Prove Cross-hole**
  - **Prove Down-hole**
    - **In foro**
    - **SCPT-SDMT**

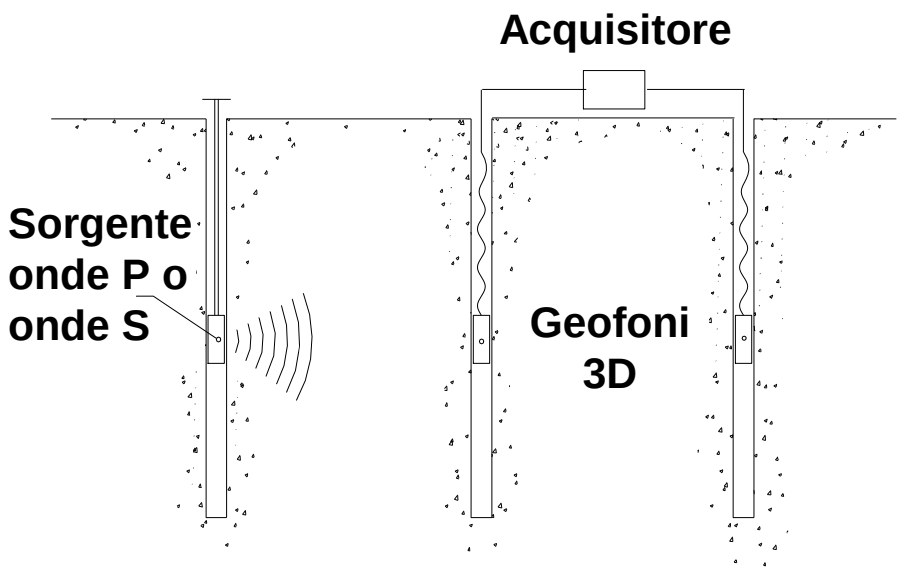
- **Metodi Non-Invasivi**
  - **Prove sismica a rifrazione (onde SH)**
  - **Analisi delle onde superficiali**
    - **Metodi attivi (SASW, MASW)**
    - **Metodi passivi (fk, SPAC, ReMi, H/V)**



# Tecniche di misura: prove in foro (invasive)

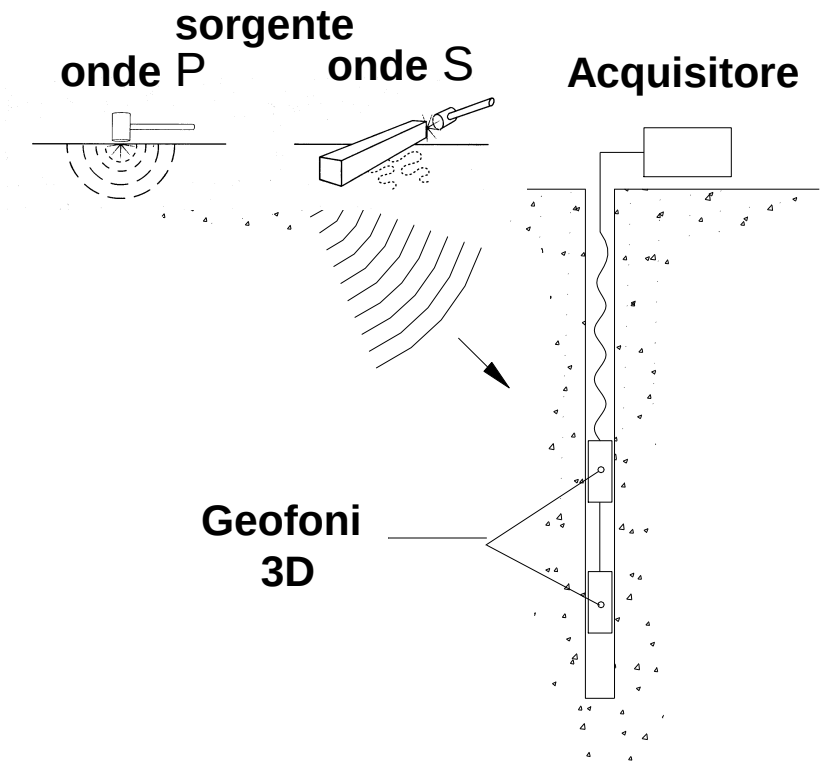
## Cross-Hole

(standard ASTM D-4428-M)




## Down-Hole

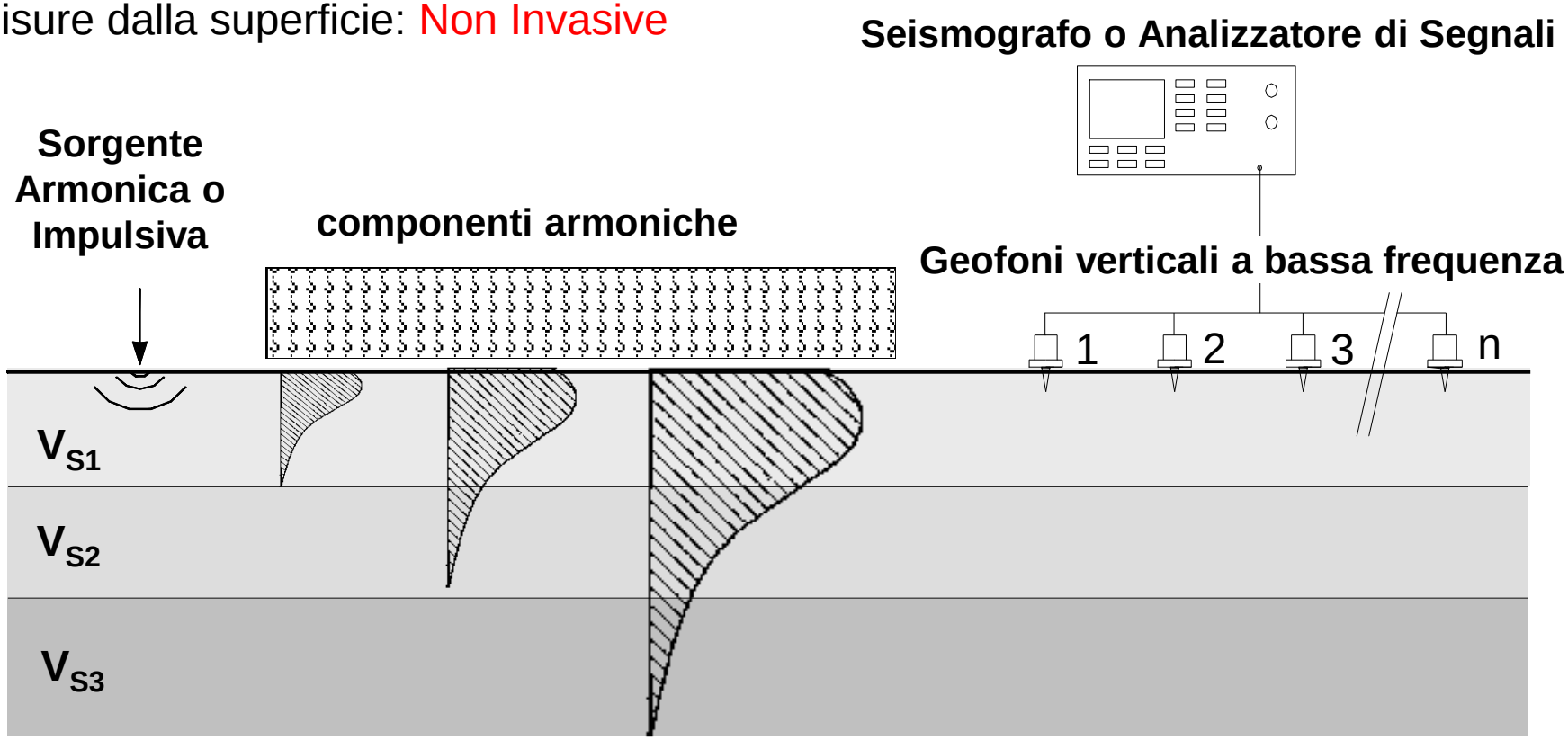
(standard ASTM D7400-07)




(Foti, 2016)

# Metodi di Analisi Spettrale delle Onde Superficiali (MASW & co.)

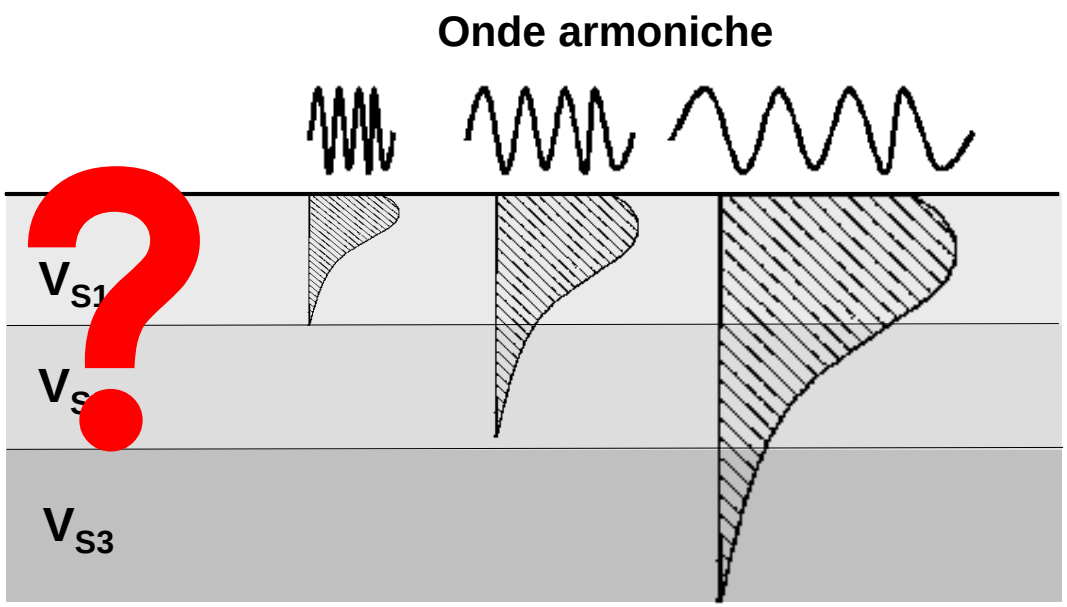
Misure dalla superficie: Non Invasive

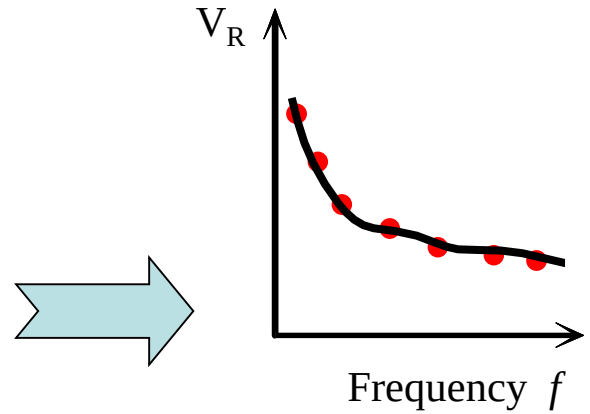



- profondità di indagine ≈ 1/2 lunghezza stendimento
- risoluzione diminuisce con la profondità (difficile individuare strati relativamente poco spessi)

(Foti, 2016)

# Analisi delle Onde Superficiali (ad es. MASW)




**Curva di Dispersione**
**Sperimentale**

**PROBLEMA INVERSO**

non unicità della soluzione

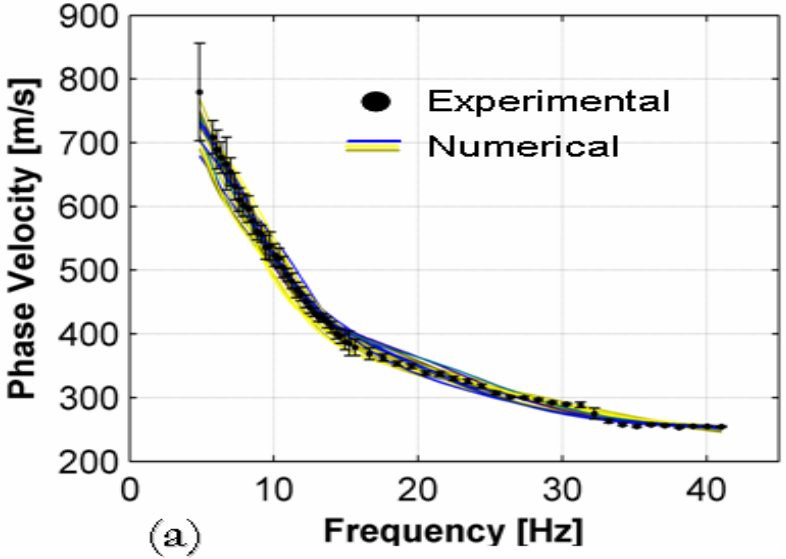
(Foti, 2016)

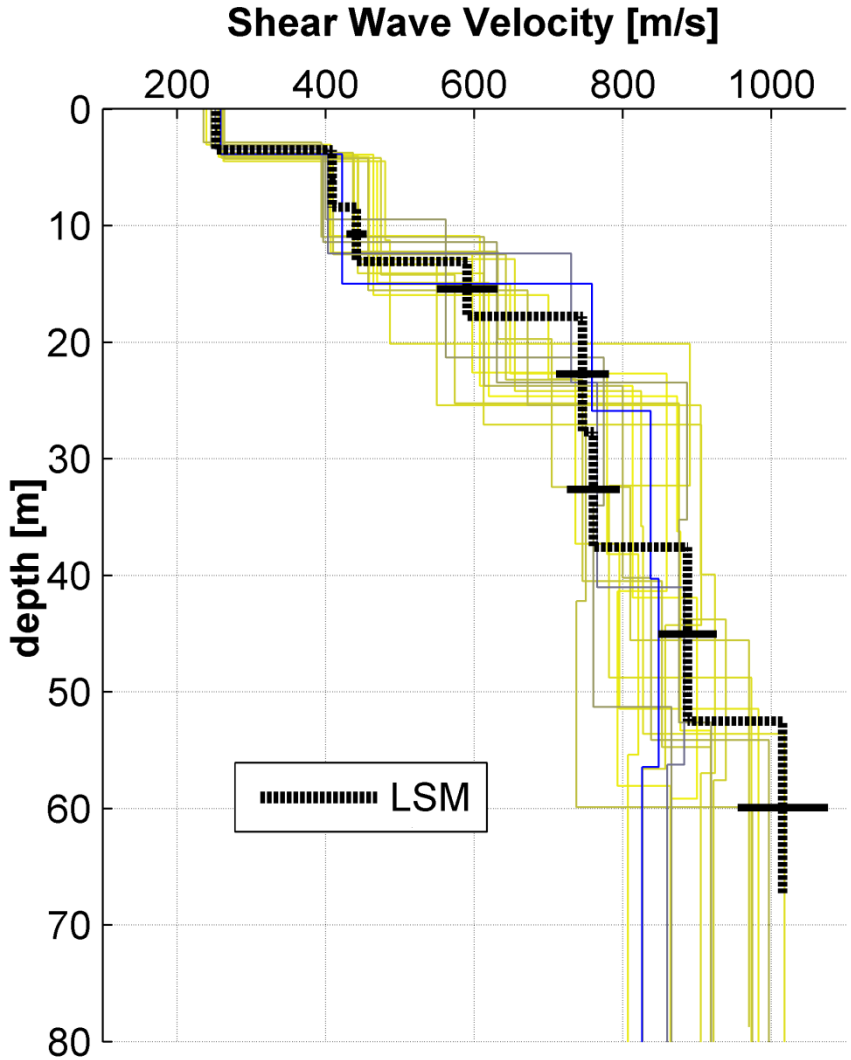
# Analisi delle Onde Superficiali (ad es. MASW)

## Non unicità della soluzione

Inversione con metodo Monte Carlo

**Profili Equivalenti**




(Foti et al., 2007)

# Confronto tra Vs30 da prove invasive e non invasive

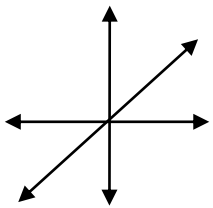
si deve osservare che:

**Non vale però nella definizione delle Vs dei vari strati**

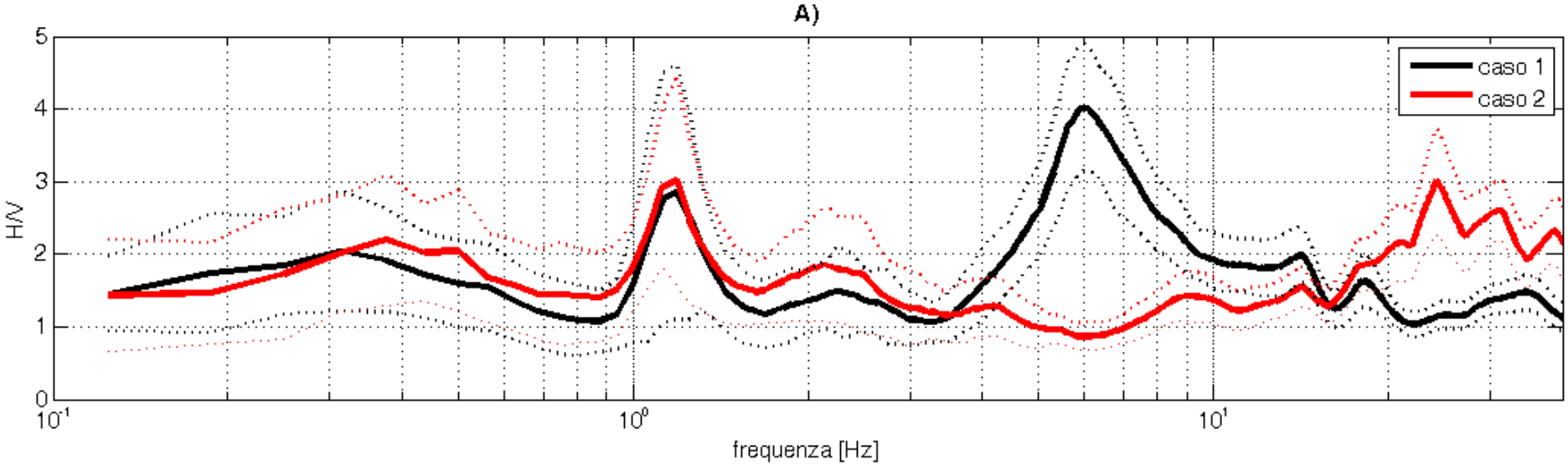
(Foti, 2016)

# Rapporto spettrale H/V (HVSR)

Misure di rumore (sensore 3 componenti)



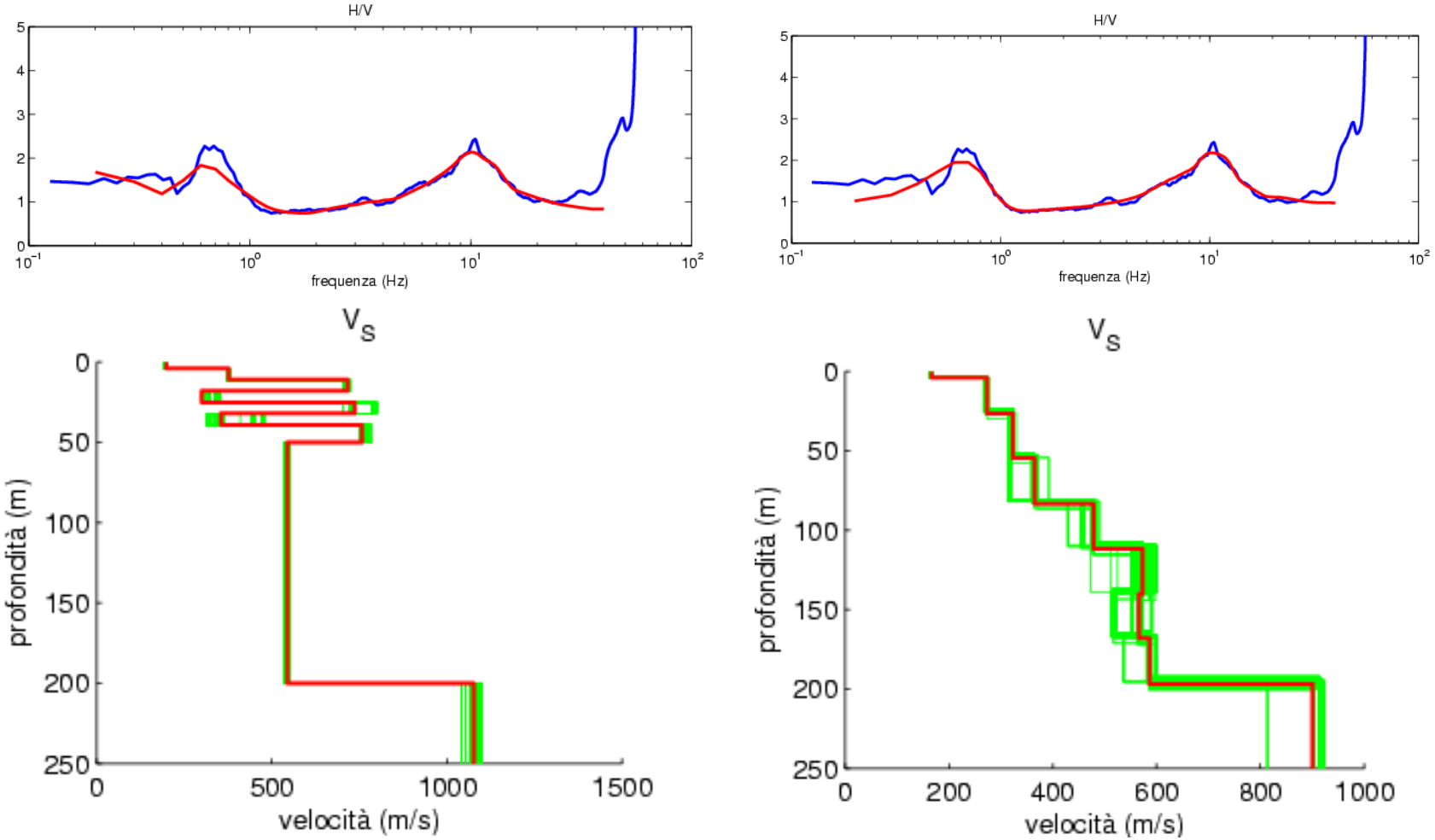
Rapporto in frequenza tra componente verticale e componente orizzontale




(Foti, 2016)

# Inversione H/V

Ricostruzione del campo d'onda associato ad una data stratigrafia. Tuttavia queste interpretazioni presentano una marcata molteplicità di soluzioni. Per esempio, ad una stessa curva HVSR possono corrispondere diversi possibili profili di velocità




(Albarello, 2011)

(Foti, 2016)

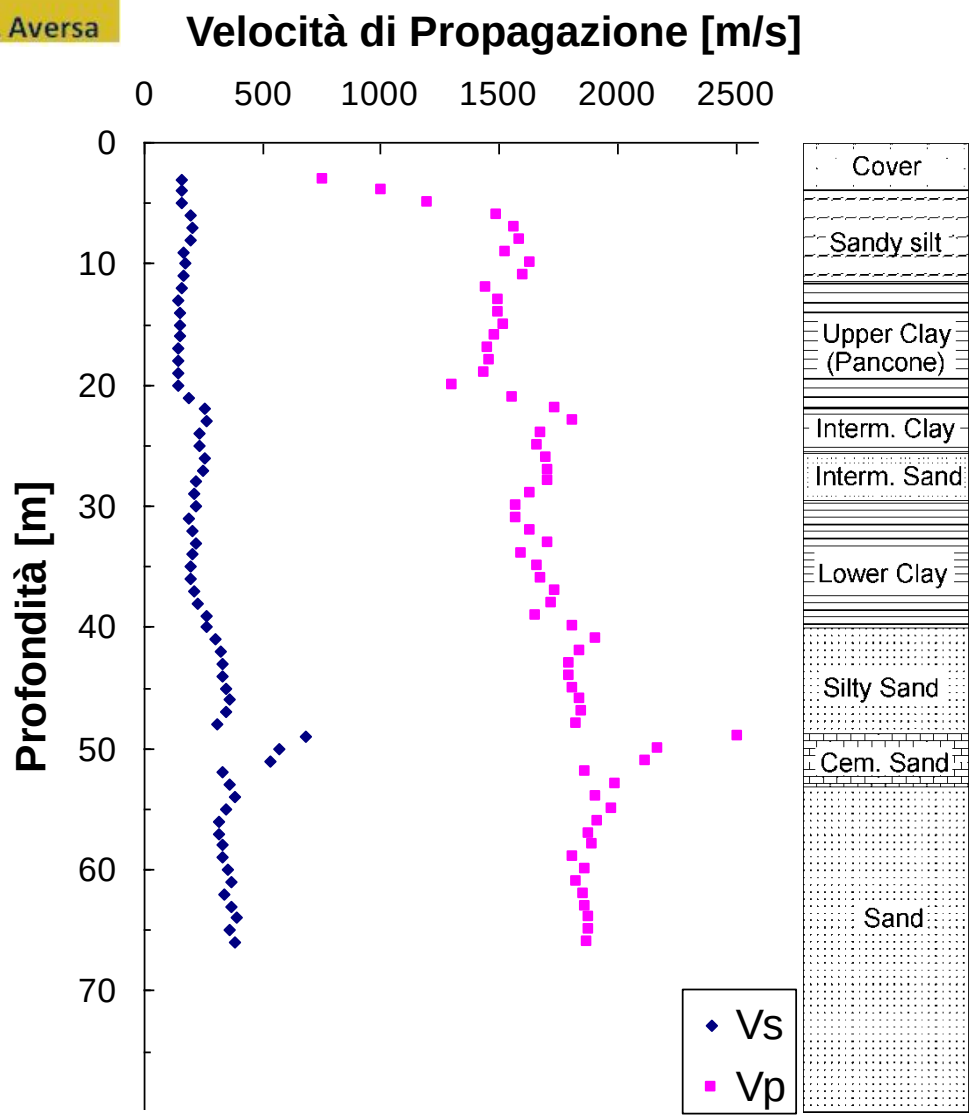
# Commenti prove H/V

- Utili per:
  - Valutazione frequenza di risonanza
  - Informazioni aggiuntive per vincolare inversione SWM
  - Valutazione delle variazioni laterali
  - Validazione del modello geotecnico-sismico
  - Studi a scala territoriale

- Poco affidabili per:
  - Valutazione del profilo di $V_S$
  - Valutazione della $V_{S,30}$

(Foti, 2016)

# Prove Cross-Hole (Pisa)




Le prove Geofisiche permettono al più di determinare:

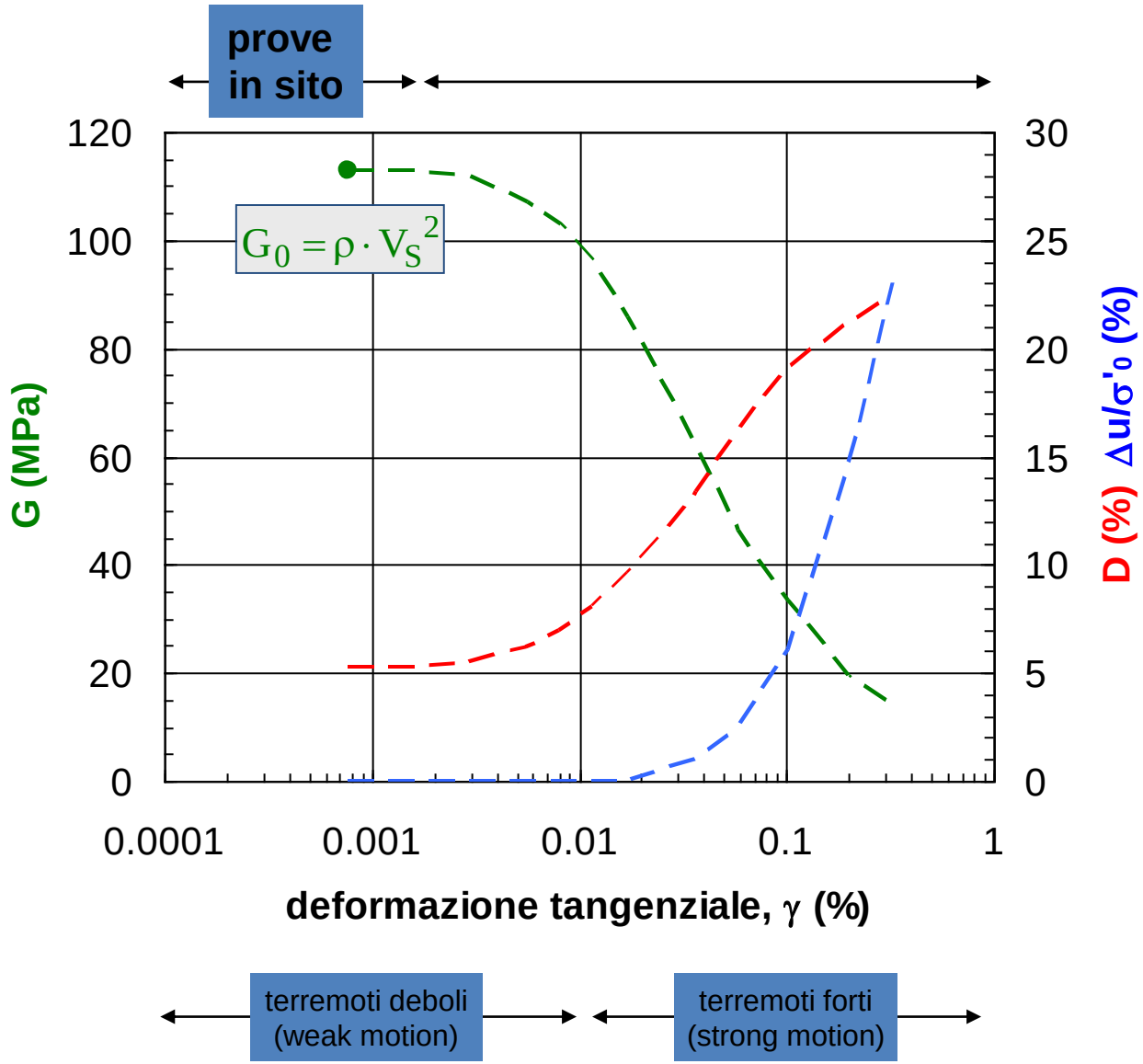
- profili di $V_S$
- talvolta, $V_P$ (quasi inutili sotto falda)
- da questi, $G_0$ e $E_{ed0}$

$$G_0 = \rho \cdot V_S^2$$

- stratigrafia, più prerequisito che risultato!

(Foti, 2016)

# Considerazioni su parametri ricavabili da indagini geofisiche



# Indagini geofisiche per studi di RSL

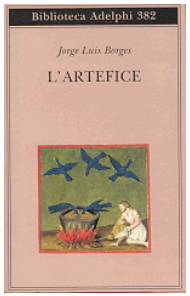
Quindi, la sola indagine geofisica non permette di determinare:

- stratigrafia
- informazioni su regime pressioni interstiziali
- caratteristiche fisiche (solo alcune con tecniche particolari)
- permeabilità
- stato e storia tensionale in sito
- caratteristiche di resistenza
- parametri di rigidezza differenti da $G_0$

# “Progettazione” delle indagini geotecniche e Modello Geotecnico di Sottosuolo

## Piccola digressione sul concetto di Modello

# Modello




## Del rigore della scienza

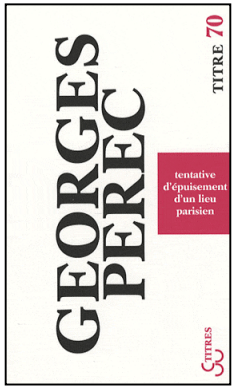
*... In quell'impero, l'arte della cartografia giunse ad una tal perfezione che la mappa di una sola provincia occupava tutta una città, e la mappa dell'impero tutta una provincia. Col tempo, queste mappe smisurate non bastarono più. I collegi dei cartografi fecero una mappa dell'impero che aveva l'immensità dell'impero e coincideva perfettamente con esso.*

*Meno dedite allo studio della cartografia, le generazioni successive compresero che quella vasta Mappa era inutile e non senza empietà la abbandonarono alle inclemenze del sole e degli inverni.*

*Nei deserti dell'Ovest rimangono lacere rovine della mappa, abitate da animali e mendichi; in tutto il paese non vi è altra reliquia delle discipline geografiche.*

(Suarez Miranda, Viaggi di uomini prudenti, libro quarto, cap. XLV, Lérida, 1658)

# Modello

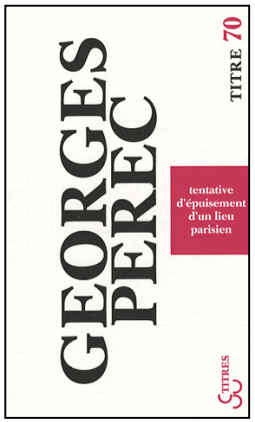



## Tentativo di esaurimento di un luogo parigino

*"…Passa un uomo: spinge a braccia un carretto, rosso. Passa un 70. Un signore guarda la vetrina di Laffont. Davanti a «La Demeure» c'è una signora che aspetta, in piedi vicino ad una panchina. In mezzo alla strada, un signore controlla se arrivano dei taxi ( non ci sono più taxi alla fermata dei taxi ). Passa un 86. Passa un 96. Passa un fattorino di « Tonygencyl »…"*

Le indagini devono essere mirate.
Non devono descrivere tutto, indistintamente!

# Modello



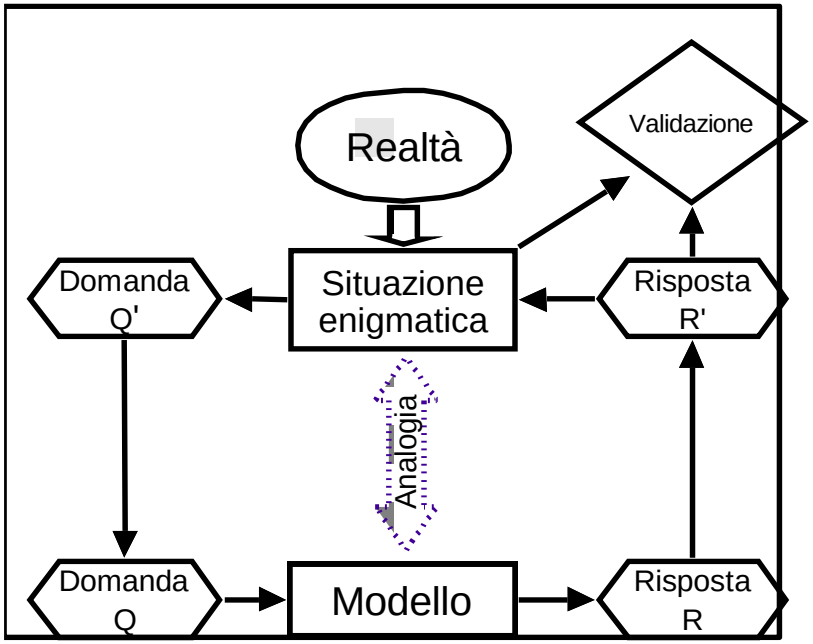
Un modello non può contenere tutta la realtà,

ma solo alcune <u>specifiche</u> informazioni
tenendo conto dello <u>specifico</u> problema in esame
sulla base di uno <u>specifico</u> progetto di selezione

La prima qualità delle indagini è nella validità
del progetto della campagna di indagini

S. Aversa

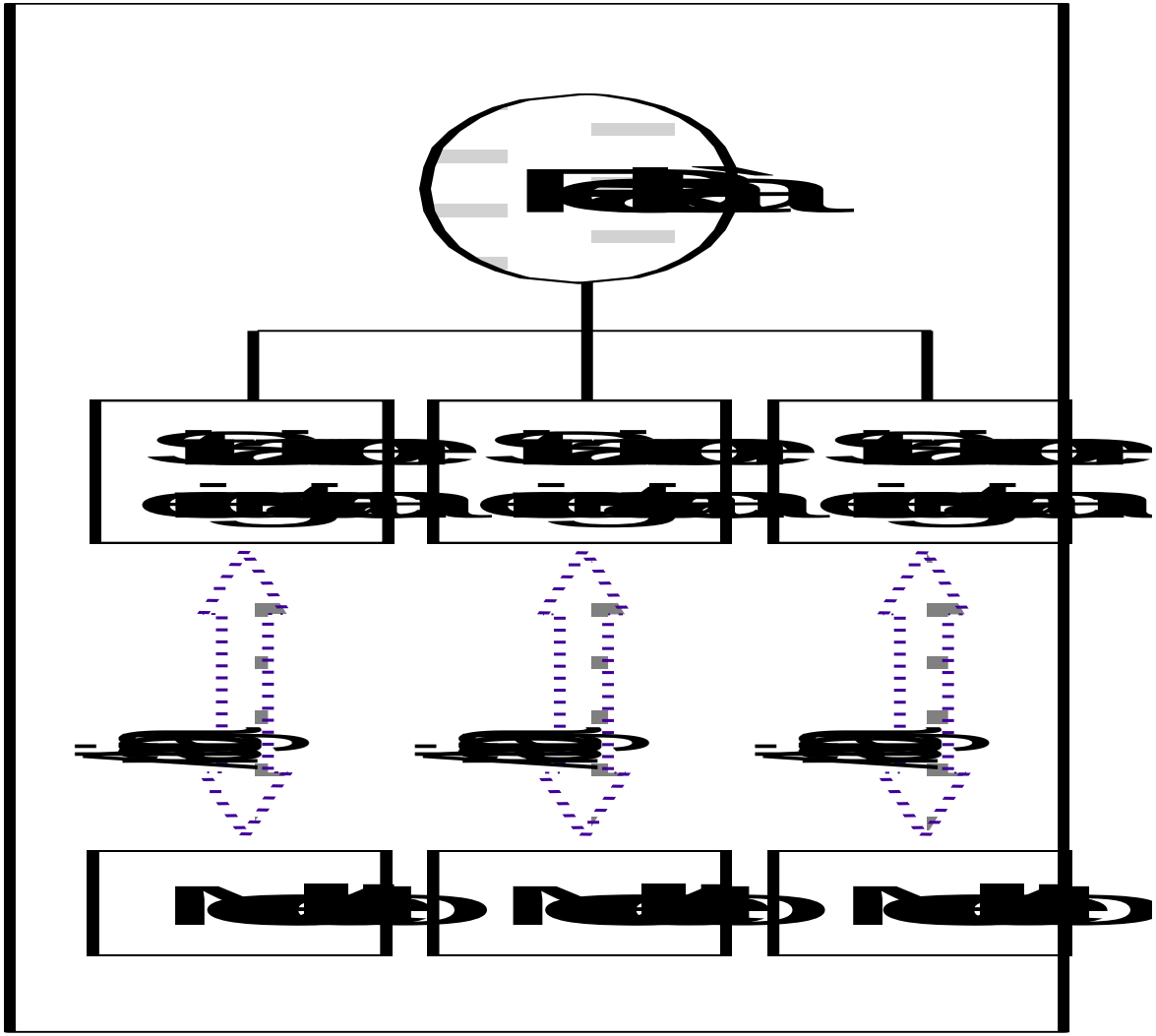
# Modellazione




(Giulio Giorello)

S. Aversa

# Modellazione



S. Aversa

# Modellazione

La realtà ammette (anzi, richiede) diversi modelli

Questo è vero anche per il **Modello Geotecnico di Sottosuolo**

È più opportuno parlare di **Modelli Geotecnici di Sottosuolo**

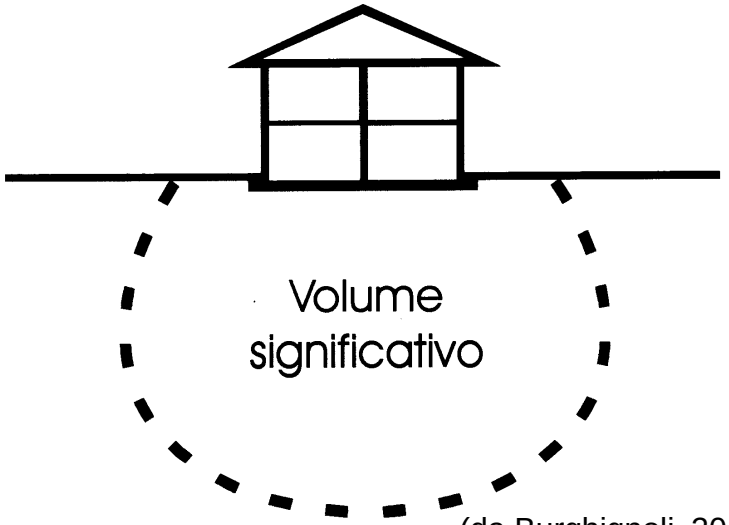
# Modello Geotecnico di Sottosuolo

Il Modello Geotecnico di Sottosuolo è il prodotto finale di un insieme di elaborazioni che, sulla base:

1. delle caratteristiche tipologiche e prestazionali del manufatto da realizzare
2. degli stati limite da esaminare e degli strumenti di calcolo che si intende adoperare
3. dei risultati di specifiche indagini e prove geotecniche

giunge a definire e a caratterizzare in termini fisici e meccanici un sistema strutturale – il **volume significativo di terreno** – connesso con un altro sistema strutturale, quello costituito dal manufatto.

È in generale necessario individuare più di un modello geotecnico, in ragione del tipo di opera (fondazione, opera di sostegno, ..) e dello stato limite considerato.




(da Burghignoli, 2018)

# Presentazione di alcuni paragrafi delle NTC (2018)

+

# Esegesi degli stessi

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

## 6.1.2 PRESCRIZIONI GENERALI

Le scelte progettuali devono tener conto delle prestazioni attese delle opere, dei caratteri geologici del sito e delle condizioni ambientali. I risultati dello studio rivolto alla caratterizzazione e modellazione geologica, dedotti da specifiche indagini, devono essere esposti in una specifica relazione geologica di cui al § 6.2.1.

Le analisi di progetto devono essere basate su modelli geotecnici dedotti da specifiche indagini definite dal progettista in base alla tipologia dell'opera o dell'intervento e alle previste modalità esecutive. Le scelte progettuali, il programma e i risultati delle indagini, la caratterizzazione e la modellazione geotecnica di cui al § 6.2.2, unitamente alle analisi per il dimensionamento geotecnico delle opere e alla descrizione delle fasi e modalità costruttive devono essere illustrati in una specifica relazione geotecnica.

S. Aversa

## 6.1.2 PRESCRIZIONI GENERALI

Si richiede di:

- tener conto dei caratteri geologici del sito
- effettuare uno studio geologico *ad hoc*, riportando i risultati in una specifica **Relazione Geologica**

- effettuare le analisi di progetto utilizzando modelli geotecnici basati su indagini geotecniche definite dal progettista
- riportare scelte progettuali, indagini e calcoli geotecnici nella **Relazione Geotecnica**

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

## 6.2 ARTICOLAZIONE DEL PROGETTO

Il progetto delle opere e degli interventi si articola nelle seguenti fasi:

1. caratterizzazione e modellazione geologica del sito;
2. scelta del tipo di opera o di intervento e programmazione delle indagini geotecniche;
3. caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce presenti nel volume significativo e definizione dei modelli geotecnici di sottosuolo (cfr. § 3.2.2);
4. definizione delle fasi e delle modalità costruttive;
5. verifiche della sicurezza e delle prestazioni;
6. programmazione delle attività di controllo e monitoraggio.

Si fissa una sequenza logica!

A tutela delle competenze e delle professionalità
del consulente geologo e del progettista

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

## 6.2.1 CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOLOGICA DEL SITO

Il modello geologico di riferimento è la ricostruzione concettuale della storia evolutiva dell'area di studio, attraverso la descrizione delle peculiarità genetiche dei diversi terreni presenti, delle dinamiche dei diversi termini litologici, dei rapporti di giustapposizione reciproca, delle vicende tettoniche subite e dell'azione dei diversi agenti morfogenetici.

La caratterizzazione e **la modellazione geologica del sito deve comprendere la ricostruzione dei caratteri litologici, stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici** e, più in generale, di pericolosità geologica del territorio, descritti e sintetizzati dal **modello geologico di riferimento**.

Modellazione Geologica

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

## 6.2.1 CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOLOGICA DEL SITO

In funzione del tipo di opera, di intervento e della complessità del contesto geologico nel quale si inserisce l'opera, **specifiche indagini saranno finalizzate alla documentata ricostruzione del modello geologico**. Il modello geologico deve essere sviluppato in modo da **costituire elemento di riferimento per il progettista per inquadrare i problemi geotecnici e per definire il programma delle indagini geotecniche**

La caratterizzazione e la modellazione geologica del sito devono essere esaurientemente esposte e commentate in una **relazione geologica, che è parte integrante del progetto**. Tale relazione comprende, sulla base di specifici rilievi ed indagini, la identificazione delle formazioni presenti nel sito, lo studio dei tipi litologici, della struttura del sottosuolo e dei caratteri fisici degli ammassi, definisce il modello geologico del sottosuolo, illustra e caratterizza gli aspetti stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici, nonché i conseguenti livelli delle pericolosità geologiche.

Ruolo degli indagini per gli studi geologici

Relazione geologica: parte integrante del progetto

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

## 6.2.1 CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOLOGICA DEL SITO

Finalità della Modellazione Geologica

Possibilità di eseguire specifiche indagini

Metodi e risultati in Relazione Geologica

Il Modello Geologico deve essere di riferimento al progettista per la definizione del programma delle indagini geotecniche

Ruolo degli studi geologici

Chiaro ruolo delle indagini a supporto degli studi geologici

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

S. Aversa

## 6.2.2 INDAGINI, CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOTECNICA

Le **indagini geotecniche** devono essere programmate in funzione del tipo di opera e/o di intervento, devono riguardare il volume significativo e, **in presenza di azioni sismiche, devono essere conformi a quanto prescritto ai § 3.2.2 e 7.11.2**.

…….

Le **indagini devono permettere la definizione dei modelli geotecnici di sottosuolo necessari alla progettazione**. Della definizione del piano delle indagini, della caratterizzazione e della modellazione geotecnica **è responsabile il progettista**.

Ai fini dell'analisi quantitativa di uno specifico problema, per **modello geotecnico di sottosuolo si intende uno schema rappresentativo del volume significativo di terreno**, suddiviso in unità omogenee sotto il profilo fisico-meccanico, che devono essere caratterizzate con riferimento allo **specifico problema geotecnico**. Nel modello geotecnico di sottosuolo devono essere definiti il regime delle pressioni interstiziali e i valori caratteristici dei parametri geotecnici.

Programmazione e interpretazione delle indagini geotecniche, anche quelle geofisiche per RSL, sono responsabilità del progettista

Le indagini geotecniche devono tenere conto dei manufatti e delle modalità costruttive per la definizione dei Modelli Geotecnici di Sottosuolo

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

## 6.2.2 INDAGINI, CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOTECNICA

……..

Le **prove di laboratorio, sulle terre e sulle rocce, devono essere eseguite e certificate dai laboratori di prova di cui all'art. 59 del DPR 6 giugno 2001, n. 380**. I laboratori su indicati fanno parte dell'elenco depositato presso il Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Nel caso di costruzioni o di interventi di modesta rilevanza, che ricadano in zone ben conosciute dal punto di vista geotecnico, la progettazione può essere basata su preesistenti indagini e prove documentate, ferma restando la piena responsabilità del progettista su ipotesi e scelte progettuali.

Prove di laboratorio eseguite da laboratori certificati

Possibilità di non eseguire prove **solo** per opere modeste e in zone conosciute, sotto la responsabilità del progettista

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

Perché non è possibile prescindere dalla conoscenza del manufatto da progettare e delle modalità e fasi costruttive nella caratterizzazione geotecnica dei terreni e nella definizione dei Modelli Geotecnici di Sottosuolo?

## I Risposta

Una prima risposta risiede proprio nella definizione stessa di Modello

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

Perché non è possibile prescindere dalla conoscenza del manufatto da progettare e delle modalità e fasi costruttive nella caratterizzazione geotecnica dei terreni e nella definizione dei Modelli Geotecnici di Sottosuolo?

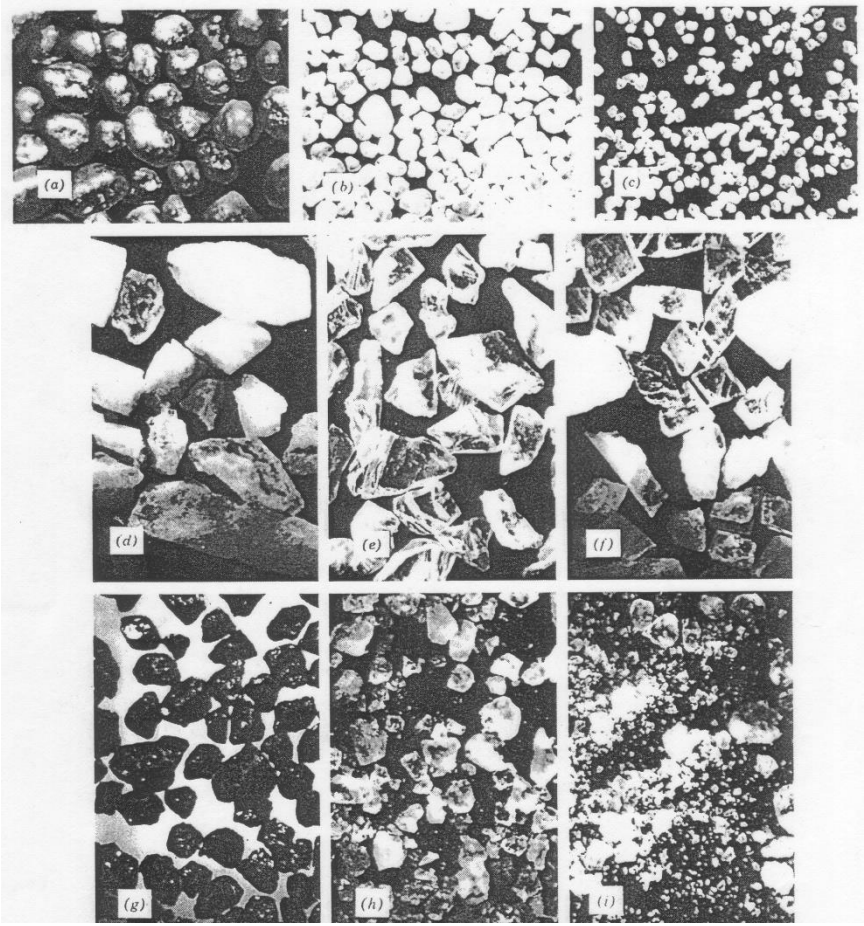
## II Risposta

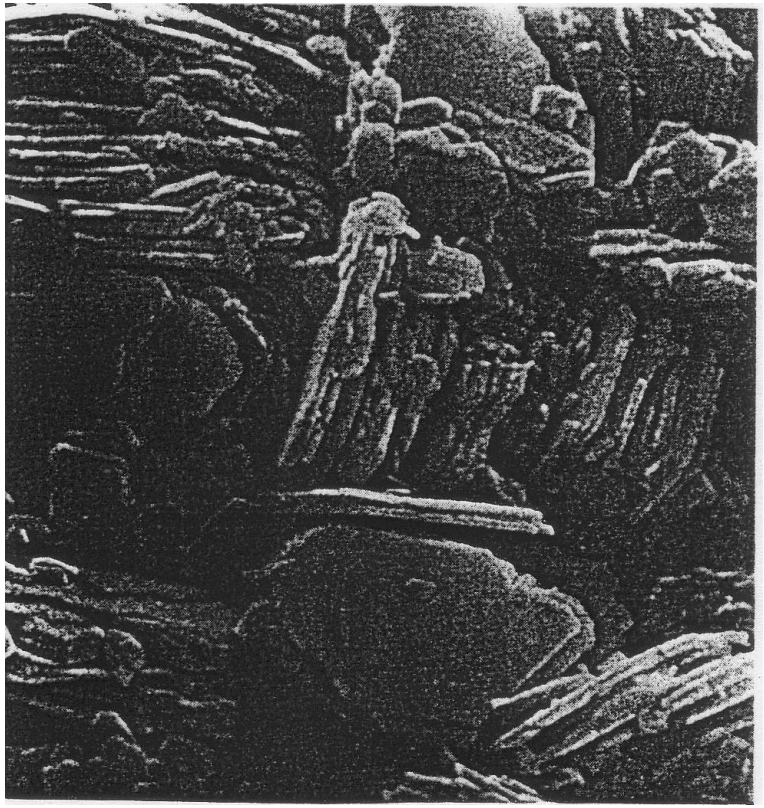
Complessità del comportamento meccanico dei terreni

(da Burghignoli, 2018)

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

## Costituzione e struttura delle terre



# IL PRINCIPIO DELLE TENSIONI EFFICACI

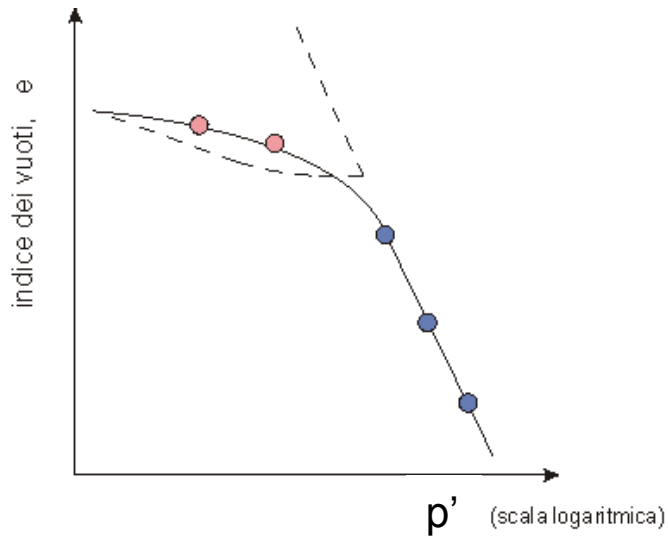
1. Le tensioni in ogni punto di una sezione attraverso una massa di terra possono essere calcolate dalle tensioni totali $\sigma_1$, $\sigma_2$ e $\sigma_3$ che agiscono in quel punto. Se i pori della terra sono pieni d'acqua ad una pressione u, le tensioni principali totali si dividono in due parti. Una parte, u, agisce nell'acqua e nella fase solida, con uguale intensità in ogni direzione. Le differenze $\sigma_1 - u$, $\sigma_2 - u$ e $\sigma_3 - u$ rappresentano un incremento rispetto alla pressione interstiziale ed hanno la loro sede esclusivamente nella fase solida della terra. Questa frazione della tensione totale normale sarà chiamata tensione efficace.

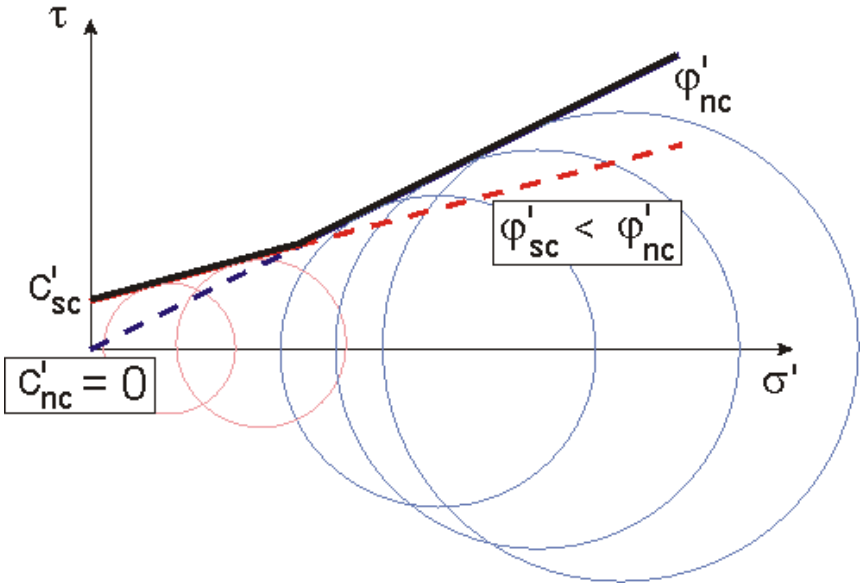
$$\sigma' = \sigma - u$$

2. Tutti gli effetti misurabili di una variazione dello stato di tensione, come la compressione, la distorsione e la variazione di resistenza al taglio sono dovuti esclusivamente a variazioni delle tensioni efficaci.

S. Aversa

# Effetti della storia delle tensioni

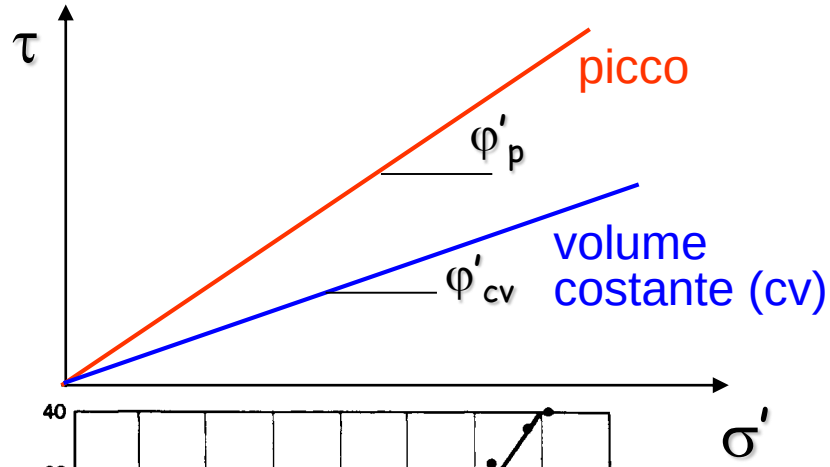


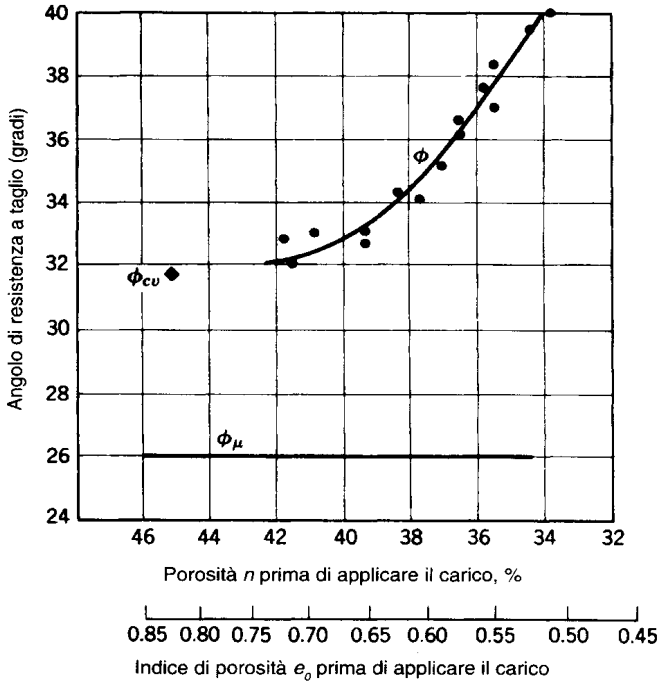



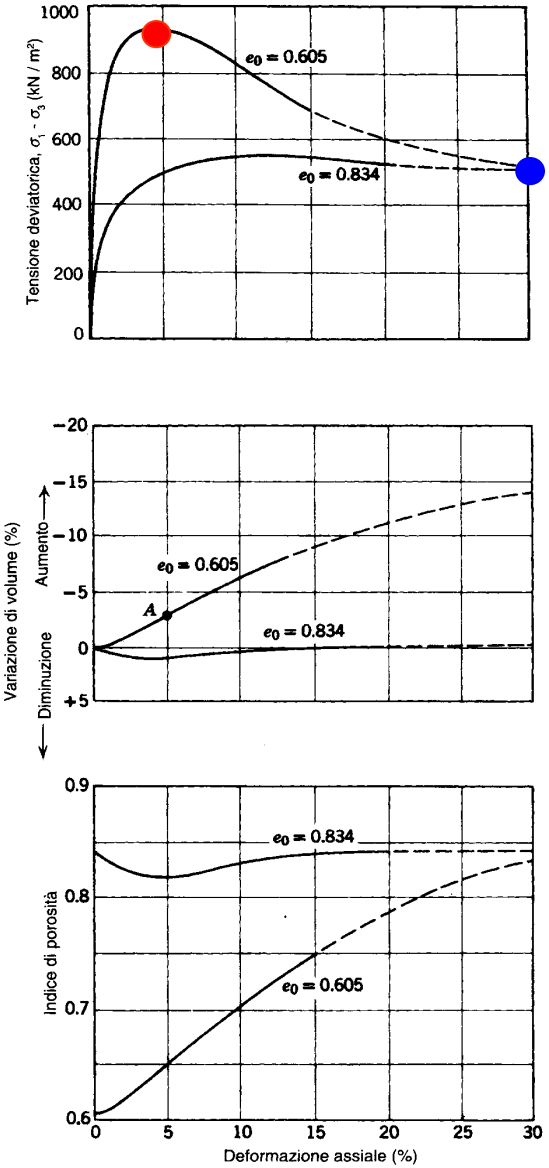
# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

S. Aversa

## Comportamento a rottura di una sabbia

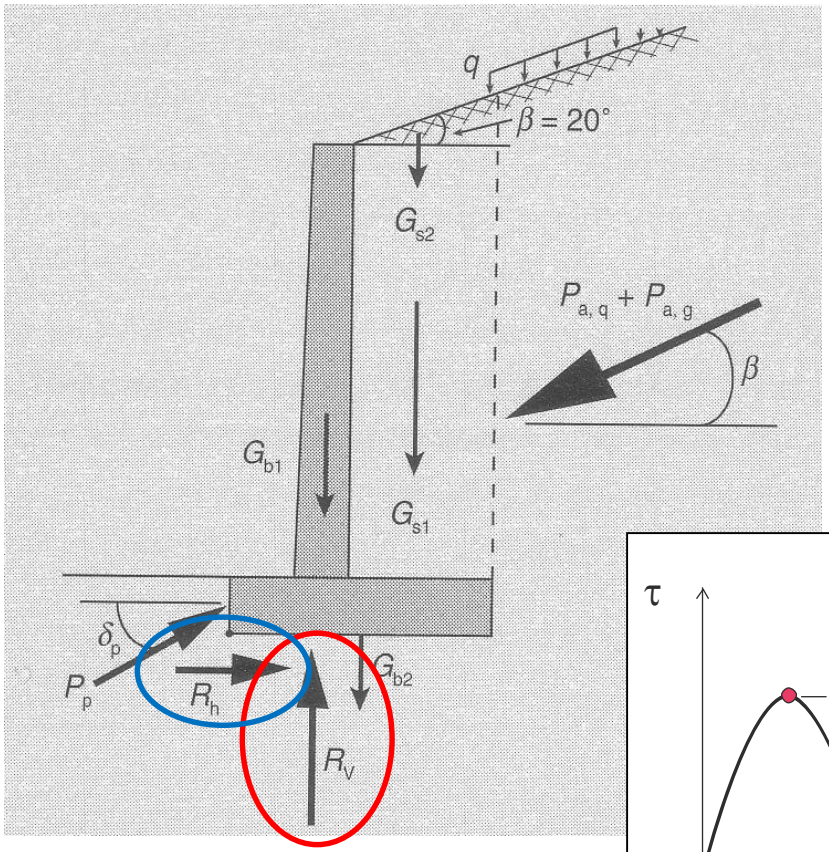


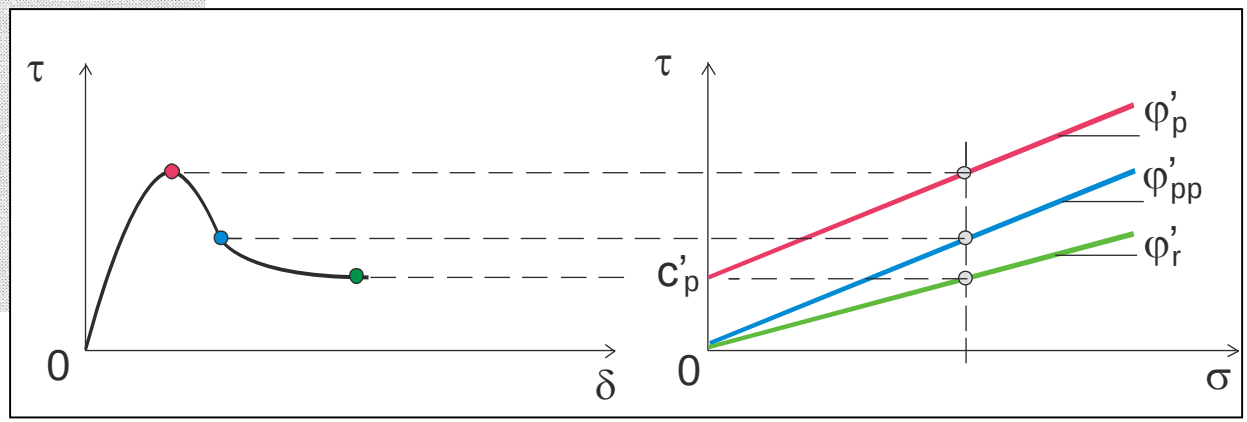



# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

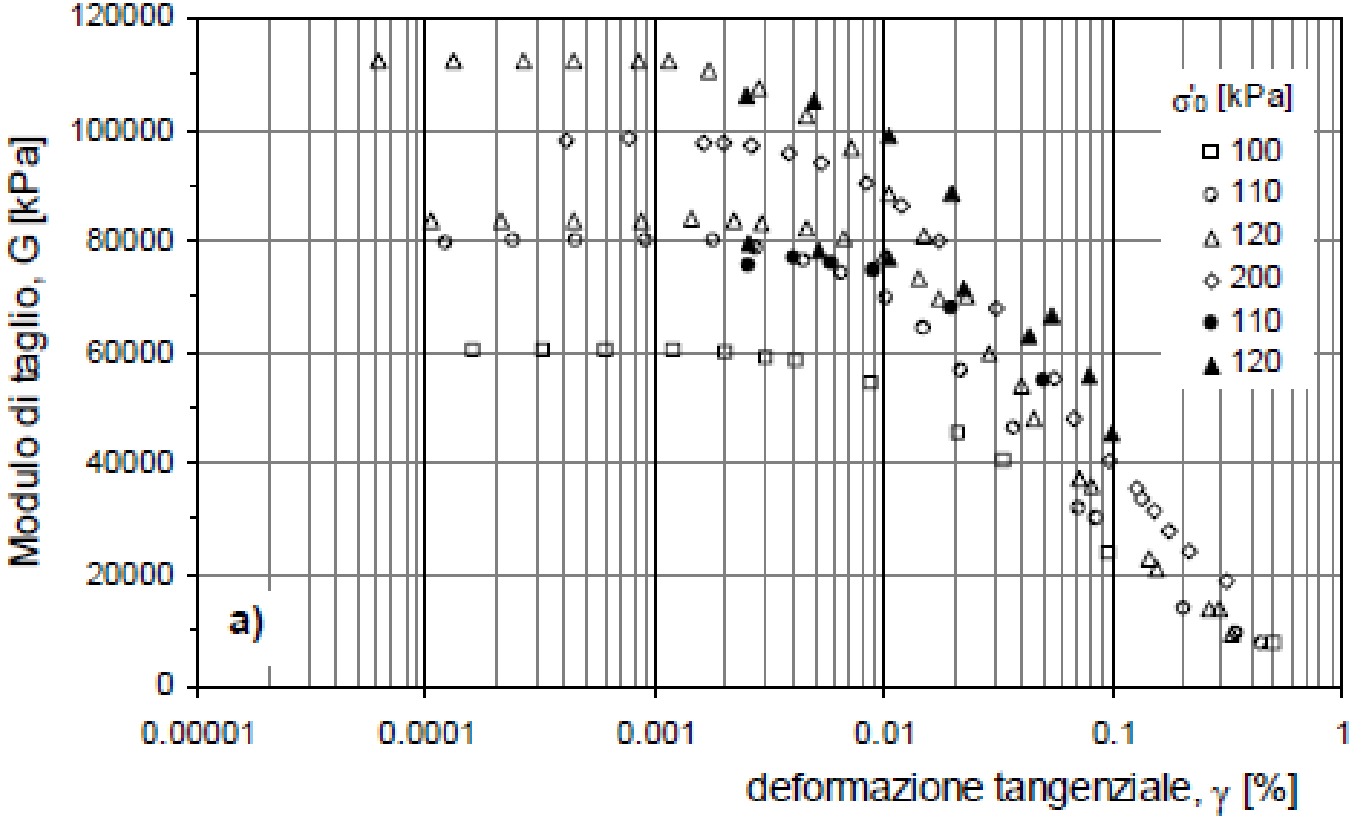
## Valori rappresentativi dei parametri geotecnici



# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

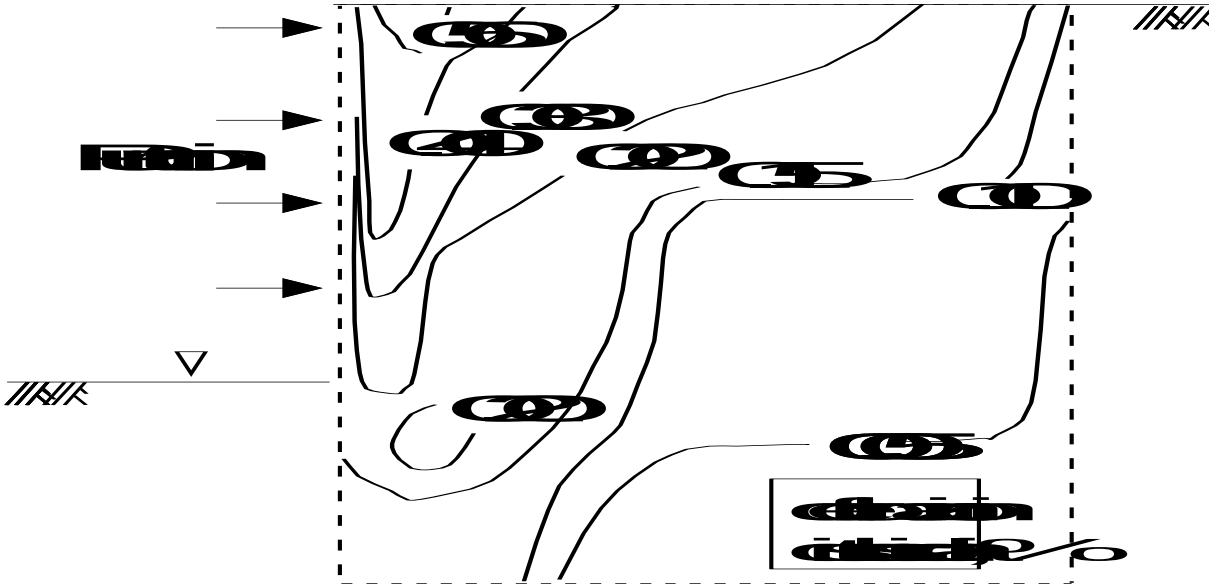
## Rigidezza a taglio dei terreni




Forte non linearità del comportamento del terreno

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

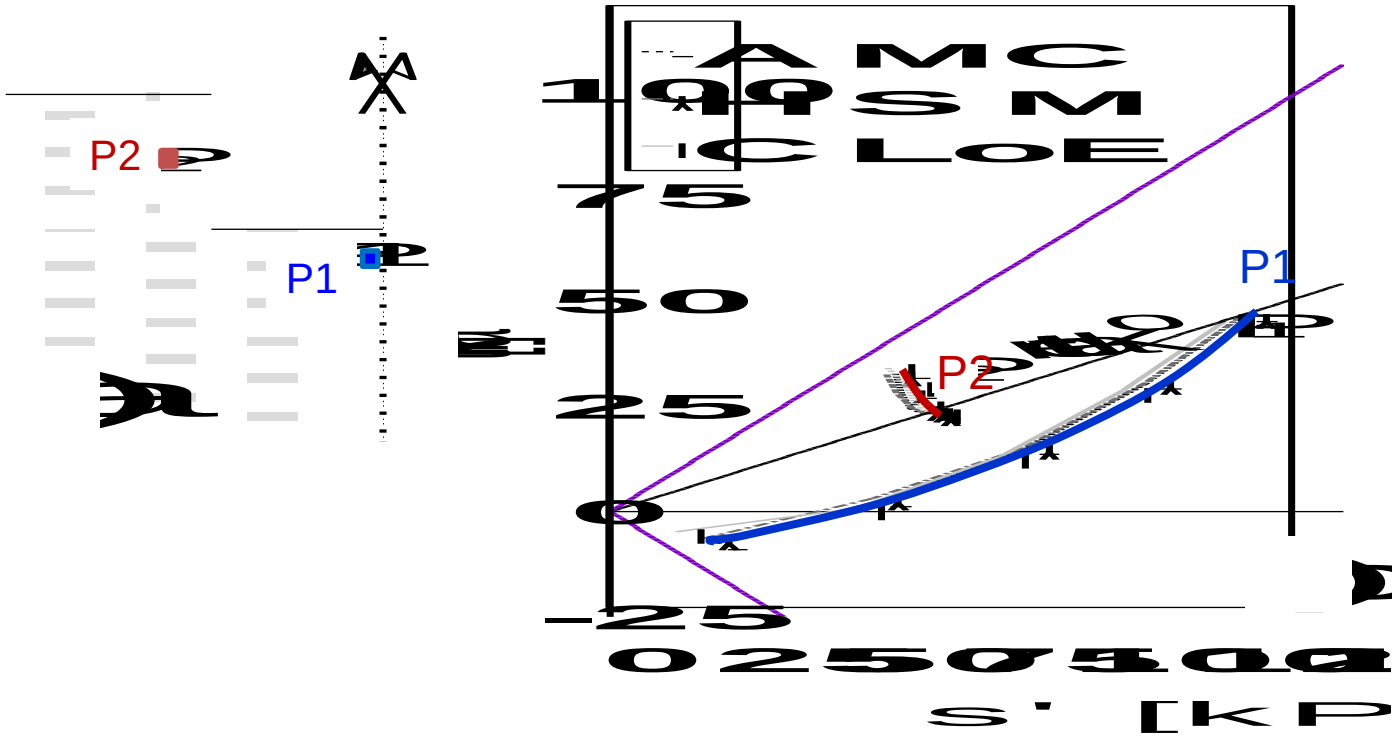
## Deformazioni distorsionali a tergo di una paratia



Quale Modulo elastico?

Ha senso un modello elastico perfettamente plastico?

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)




Riduzione della tensione media a monte e a valle

Rigidezza differente in scarico ed in carico

Modellazione funzione dell’opera

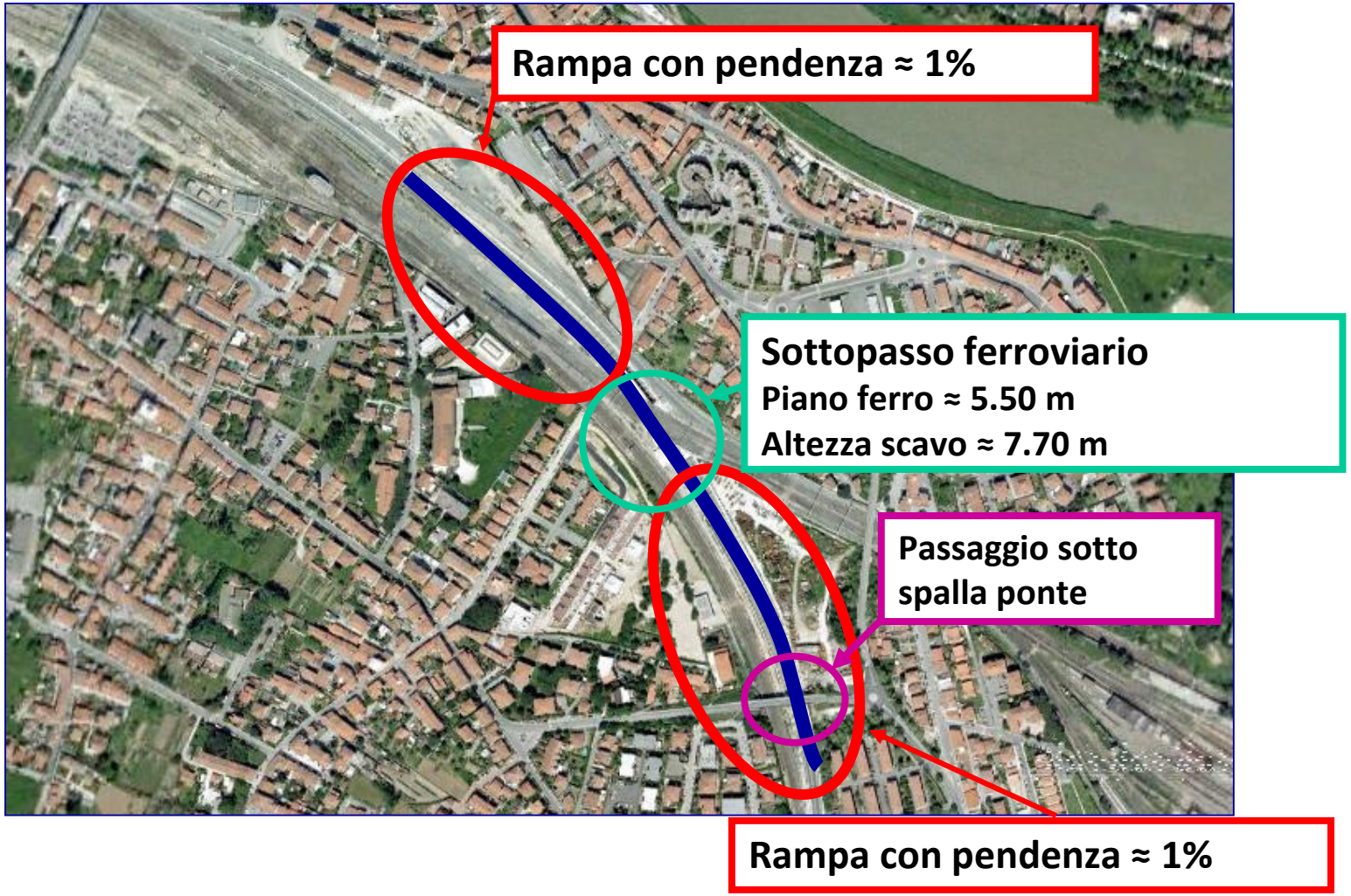
# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

Un esempio!

**due finalità**

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

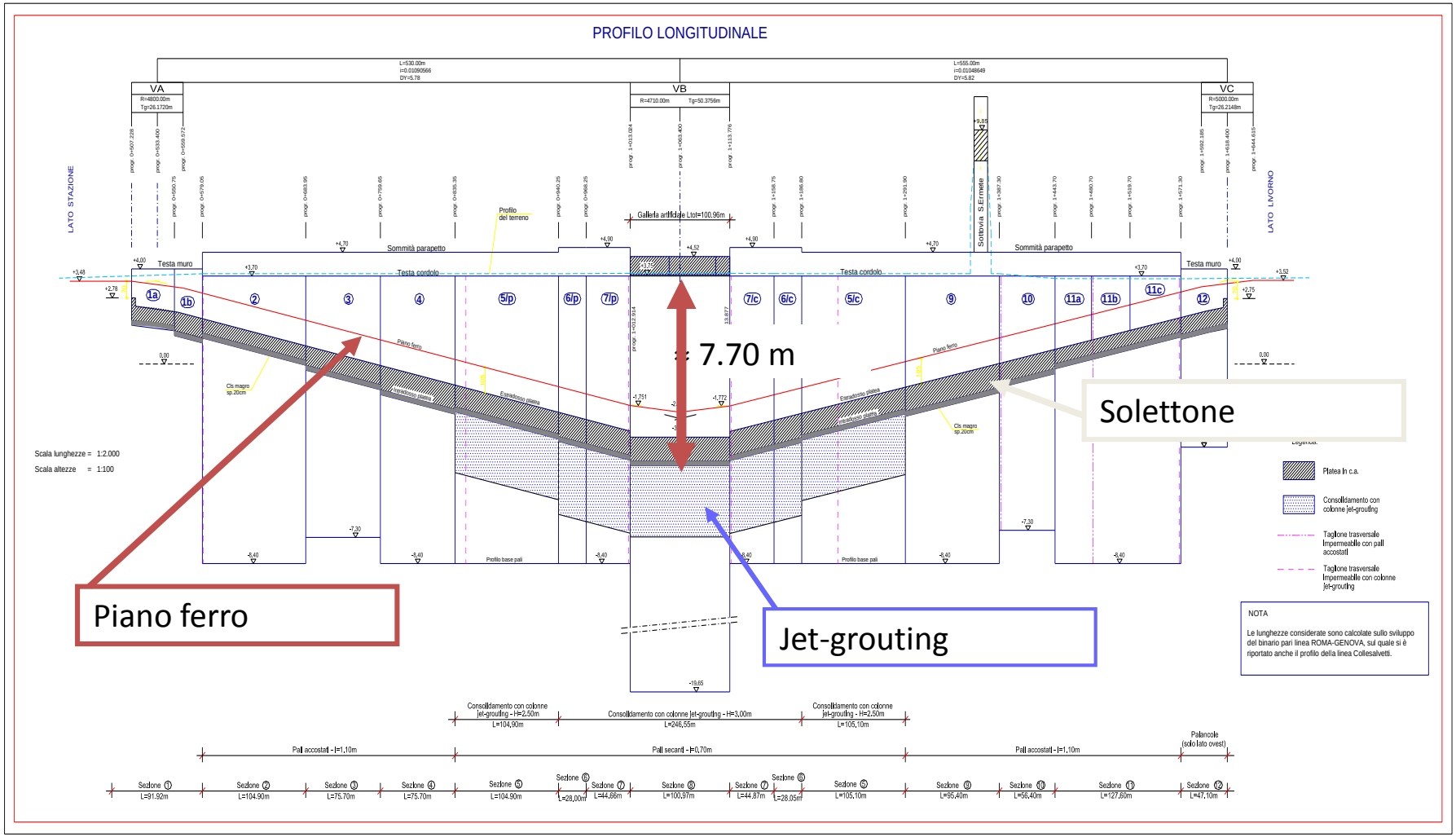
## Sottopasso ferroviario di Pisa



# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

S. Aversa

## Sottopasso ferroviario di Pisa



# Sottopasso ferroviario di Pisa

## Opere da realizzare

- **Scavo tra paratie libere**
- **Scavo tra paratie puntonate in testa**
- **Sottopasso ferroviario**
- **Attraversamento sotto spalla di un cavalcaferrovia**

# Sottopasso ferroviario di Pisa

## Conoscenze pregresse sul sottosuolo

- **Terreni costituiti da:**
  - **alternanze sabbie e limi saturi**
  - **argilla molle (Pancone)**
  - **sabbie**
  - **argille limose**
- **superficie libera della falda ≈ a piano campagna**

S. Aversa

# Stati limite da considerare e relativi parametri geotecnici

| Problematica | Stato limite | Parametri e dati necessari |
|---|---|---|
| Instabilità delle paratie | SLU | CND: stratigrafia, $\gamma$, $c_u$, $\varphi'$ (per i terreni a grana grossa) |
| | | CD: stratigrafia, $\gamma$, c', $\varphi'$, andamento falda idrica |
| Sifonamento | SLU | CD: stratigrafia, $\gamma$, condizioni della falda idrica |
| Instabilità fondo scavo | SLU | CND: stratigrafia, $\gamma$, $c_u$ |
| "Stappamento" fondo scavo | SLU | CND: stratigrafia, $\gamma$, condizioni della falda idrica |
| Galleggiamento | SLU | Condizioni di falda ed, eventualmente, caratteristiche di resistenza dei terreni |
| Spostamenti paratia | SLS | CND e CD: stratigrafia, $\gamma$, c', $\varphi'$, $k_o$, parametri di deformabilità a piccoli livelli di deformazione, condizioni iniziali della falda idrica, coefficiente di permeabilità dei terreni |
| Sollecitazioni nella paratia e nelle altre parti strutturali | SLS | CND e CD: vedi sopra |
| Infiltrazioni d'acqua | SLS | Stratigrafia, permeabilità e condizioni iniziali della falda idrica |
| Carico limite fondazioni | SLU | CND: stratigrafia, $c_u$, $\gamma$<br>CD: stratigrafia, c', $\varphi'$, $\gamma$ |

S. Aversa

# Sottopasso ferroviario di Pisa

## Variazioni richieste da NTC (2008) e confermate da NTC (2018)

| Problematica | Stato limite | Parametri e dati necessari |
|---|---|---|
| Azione sismica (RSL) | | Stratigrafia fino a 30 m, Vs, parametri di rigidezza |
| Verifica strutturale SLU di paratia | SLU | CND e CD: stratigrafia, $\gamma$, c', $\varphi$', $k_o$, parametri di deformabilità a piccoli livelli di deformazione, condizioni iniziali della falda idrica, coefficiente di permeabilità dei terreni |

S. Aversa

# Sottopasso ferroviario di Pisa

## Indagini

- **finalizzate a definire i modelli geotecnici del sottosuolo**
- **richiedenti in sintesi:**

1. **stratigrafia del sottosuolo**
2. **condizioni della falda e delle sue variazioni stagionali**
3. **stato tensionale in sito e della storia tensionale**
4. **coefficienti di permeabilità**
5. **resistenza in condizioni sia drenate sia non drenate**
6. **parametri per modellazione costitutiva**

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

## Indagini eseguite nel progetto esecutivo

- 10 sondaggi a carotaggio continuo sino a 25 m dal p.c.
- 5 sondaggi a distruzione di nucleo sino a 8 - 15 m dal p.c.
- 45 prove penetrometriche
- 8 prove penetrometriche CPT
- 12 prove di permeabilità tipo Lefranc

- 40 prove di taglio diretto (TD)
- 1 prova triassiale non consolidata non drenata (TX-UU)
- 2 prove di compressione uniassiale (ELL)
- 4 prove di compressione edometrica (Edo)

# Sottopasso ferroviario di Pisa

## Limitazione delle indagini eseguite nel progetto esecutivo

- verticali investigate non diffuse lungo l'opera
- poche informazioni sullo stato della falda idrica
- prove TD non particolarmente idonee e mal eseguite
- una sola prova TX-UU
- numero ridotto di prove edometriche
- nessuna informazione su stato tensionale in sito
- carenza di parametri di rigidezza dei terreni

# Sottopasso ferroviario di Pisa

## Indagini integrative

- **programmate da nuovo progettista sulla base degli SL**
- **finalizzate a definire i modelli geotecnici del sottosuolo**
- **richiedenti in sintesi:**

1. **stratigrafia del sottosuolo;**
2. **condizioni della falda e delle sue variazioni stagionali;**
3. **stato tensionale in sito e della storia tensionale;**
4. **coefficienti di permeabilità;**
5. **resistenza in condizioni sia drenate sia non drenate;**
6. **parametri per modellazione costitutiva (Hardening-Soil di Plaxis)**

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

## Indagini integrative

- 3 sondaggi a carotaggio continuo fino a 25-35 m p.c.
- installazione di tre piezometri tipo Casagrande
- 3 prove CPTU, con prove di dissipazione
- 2 prove dilatometriche con DMT
- 3 prove di permeabilità tipo Lefranc
- 1 prova cross-hole

- 10 determinazione di caratteristiche fisiche generali
- 7 prove di compressione edometrica (EDO)
- 9 prove di compressione triassiale TX-CIU
- 2 prove di compressione triassiale TX-UU

**Eseguite da ditte di fiducia del progettista**

**Sufficienti anche per progettazione NTC (2008-2018)**

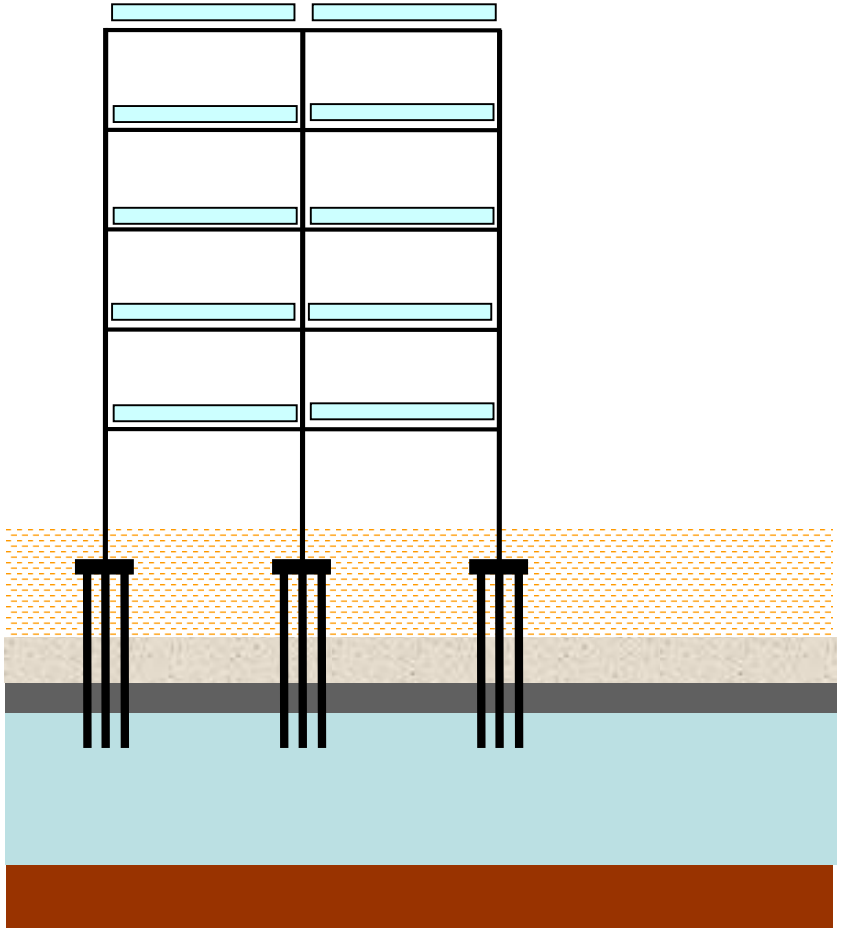
# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)

Le indagini sarebbero state diverse per:

- Altri tipi di opere
- Altri approcci progettuali
- Altri Modelli costitutivi
- **Altri progettisti**

**In ogni caso, non sarebbe stato possibile eseguire solo indagini geofisiche!**

# Modello Geotecnico di Sottosuolo in NTC (2018)



## Indagini Geotecniche per progettazione di un edificio

Per verifiche SLU e SLE:

- sondaggi
- prove penetrometriche
- altre prove in sito
- piezometri
- prelievo dei campioni (se possibile)
- determinazione proprietà fisiche
    - prove edometriche
    - prove triassiali

e

- prove geofisiche per RSL

# Risposta Sismica Locale

In sintesi:

- studi di RSL responsabilità del progettista
- indagini per RSL responsabilità del progettista
- indagini per RSL parte del più ampio programma di indagini
- indagini per RSL non sono le uniche indagini
- categorie di sottosuolo = modo semplificato di studi di RSL
- diversa affidabilità delle diverse tecniche di indagine

# Responsabilità del progettista

La programmazione delle indagini geotecniche:

- non dovrebbe essere affidata a soggetti terzi
- non dovrebbe essere effettuata dal Committente prima di assegnare l'incarico professionale al progettista

Le prove dovrebbero essere eseguite da ditte di fiducia del progettista

Le prove per RSL non esauriscono le indagini geotecniche

Non esistono prove "miracolose" che fanno tutto senza "buchi"

# Costi delle indagini e delle prove (1/2)

Le indagini hanno dei costi minimi al di sotto dei quali non è possibile realizzarle

- La qualità del progetto dipende fortemente dalla qualità delle indagini
- La sicurezza dell’opera dipende dalla numerosità e dalla qualità delle indagini

# Costi delle indagini e delle prove (2/2)

- Il costo delle indagini, anche in campagne molto significative, è sempre modesto se confrontato al valore delle opere
- Le indagini dovrebbero essere considerate alla stregua degli oneri per la sicurezza
- I loro costi non dovrebbero essere soggetti a ribasso
- Non è corretto affidare incarichi professionali di consulenza (geologica o geotecnica) comprensivi degli oneri di indagini

# Antica tradizione da combattere tutti insieme!

PISA.JPG