

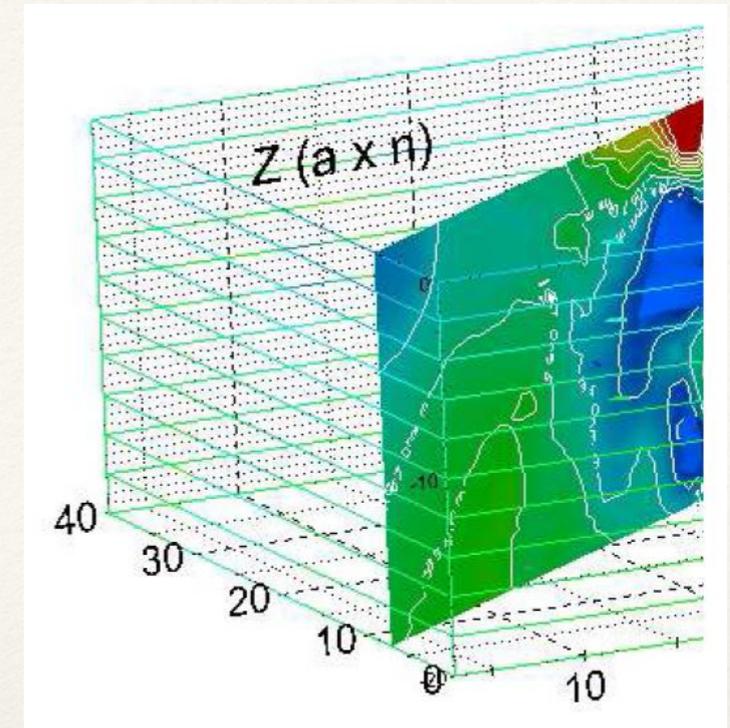
# XII Workshop di Geofisica

## III Giornata di Formazione

Fondazione Museo Civico di Rovereto

Rovereto, Sala conferenze "Fortunato Zeni"

Giovedì 3 e venerdì 4 dicembre 2015



### INDAGINI GEOFISICHE AL SERVIZIO DELLA PROGETTAZIONE GEOTECNICA

Dr. Geol. Matteo Collareda



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



Ordine dei Geologi  
TRENTINO-ALTO ADIGE  
*Geologenkammer*  
TRENTINO-SÜDTIROL



Ordine dei Geologi  
Friuli Venezia Giulia



# Perché utilizzare le indagini geofisiche?

Lo svantaggio maggiore è rappresentato dal fatto che sono **misure indirette**

(abbiamo la presunzione di “guardare” il sottosuolo stando in superficie con un dettaglio più o meno elevato)

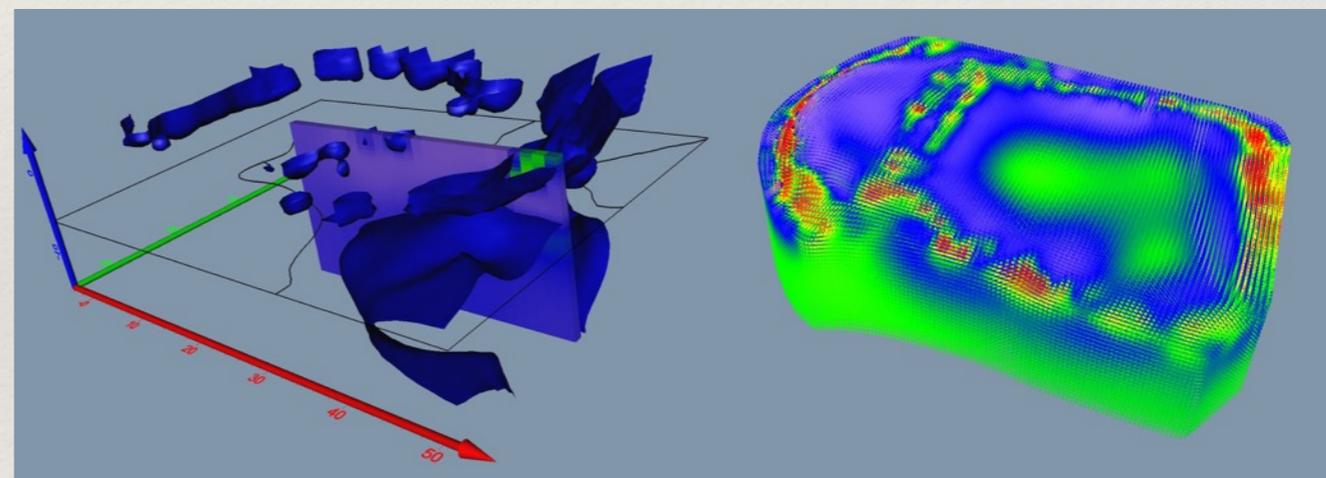
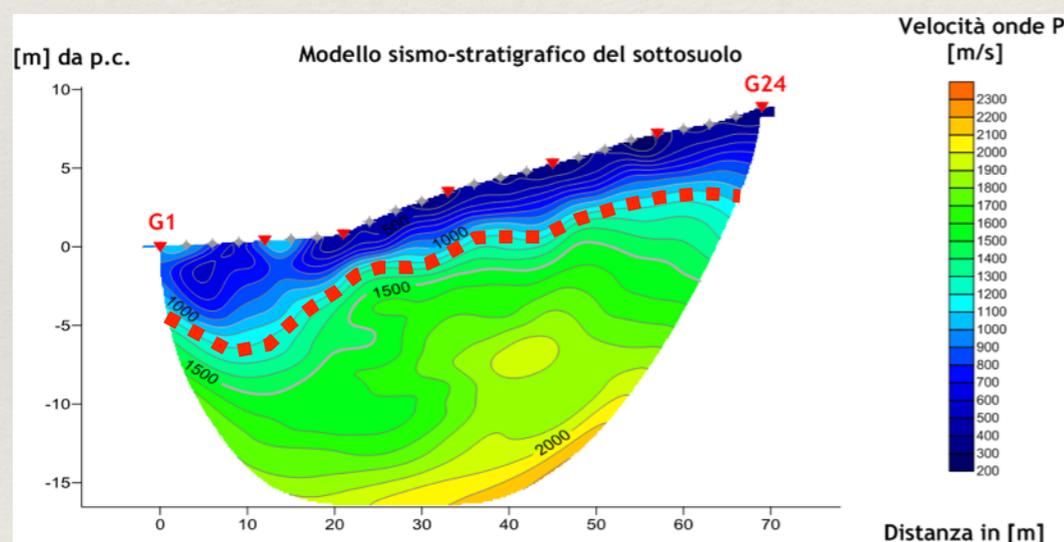


*Sondaggio geognostico*



*Indagine geofisica*

- ❖ Sono molti i vantaggi che si possono trarre dall'utilizzo delle indagini geofisiche
  - ❖ Indagini non invasive (non si necessita di nessun tipo di perforazione o quasi...)
  - ❖ Acquisizioni molto veloci (qualche minuto a circa un'ora in base alla metodologia impiegata)
  - ❖ Sono in grado d'indagare elevate profondità (da qualche metro a centinaia di metri e oltre)
  - ❖ Molto volte sono indagini lineari o areali in grado di coprire zone molto ampie a differenza delle indagini dirette che sono puntuali (sondaggio, prove penetrometriche, prove di laboratorio, ecc.)



Le indagini geofisiche misurano un parametro fisico caratteristico del terreno, in base alla metodologia impiegata. Sarà poi nella fase *post-processing* che si associa un determinato valore al *marker* che si sta ricercando



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



Ordine dei Geologi  
TRENTINO-ALTO ADIGE  
Geologenammer  
TRENTINO-SÜDTIROL



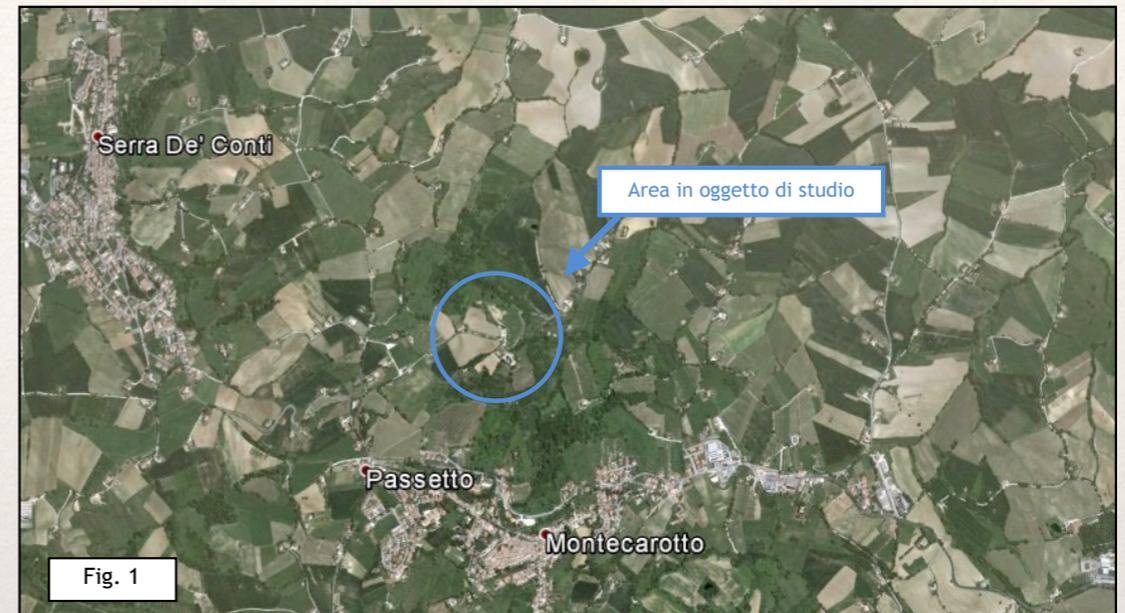
Ordine dei Geologi  
Friuli Venezia Giulia



Dr. Geol. Matteo Collareda

Verranno illustrate alcune metodologie geofisiche utilizzate in un caso concreto e, soprattutto, come sono state impiegate per effettuare un corretto dimensionamento dell'opera in progetto sia in **modalità statica** sia **dinamica**.

- ❖ Area d'indagine: Montecarotto (AN) - Marche
- ❖ Zona soggetta ad un movimento franoso. L'area di interesse è localizzata immediatamente a monte del ciglio di scarpata.
- ❖ **Individuare eventuali superfici di scivolamento di richiamo a monte della nicchia di distacco per dimensionare correttamente l'intervento di consolidamento (verifica statica) e i valori di accelerazione da utilizzare nelle verifiche sismiche (verifica dinamica)**



# Descrizione del problema e protocollo operativo

Lo scopo del lavoro è quello di individuare la presenza di superfici di scivolamento di richiamo a monte della nicchia di frana tramite **indagini geofisiche**, determinare i **valori caratteristici geotecnici dei terreni di fondazione** (prove penetrometriche, sondaggio e prove di laboratorio) ed effettuare un' **analisi avanzata di risposta sismica locale 2D** per ricavare i valori di accelerazione orizzontali attesi al sito.

## Protocollo:

- ❖ Inquadramento geologico-strutturale del sito
- ❖ Prove geognostiche:
  - Tomografie elettriche** (ricostruzione elettro-stratigrafica del sottosuolo e individuazione delle superfici di scivolamento)
  - Prove penetrometriche** (caratterizzazione geotecnica dei terreni)
  - Sondaggio a carotaggio continuo** (ricostruzione stratigrafica)
  - Prove di laboratorio** (determinazione dei parametri caratteristici dei terreni)

# Descrizione del problema e protocollo operativo

- ❖ Ricostruzione del modello geologico-geotecnico locale per condurre le verifiche di stabilità e individuazione delle probabili superfici di scivolamento teoriche → confronto con le indagini sperimentali
- ❖ Ulteriori prove:  
**Indagini sismiche** finalizzate alla ricostruzione sismo-stratigrafica di sito  
MASW- Re.Mi. e H.V.S.R.
- ❖ Analisi avanzata di risposta sismica locale (RSL) tramite modulazioni numeriche 2D alle differenze finite: individuazione dei fattori di amplificazione e spettro di risposta elastico lungo il profilo topografico



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



Ordine dei Geologi  
TRENTINO-ALTO ADIGE  
*Geologenkammer*  
TRENTINO-SÜDTIROL



Ordine dei Geologi  
Friuli Venezia Giulia



Dr. Geol. Matteo Collareda

# Inquadramento geologico dell'area

Il sito d'indagine è localizzato nel comune di Montecarotto, in provincia di Ancona, in una zona collinare dell'entroterra marchigiana.



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



Ordine dei Geologi  
TRENTINO-ALTO ADIGE  
*Geologenkammer*  
TRENTINO-SÜDTIROL



Ordine dei Geologi  
Friuli Venezia Giulia



**StudioSisma** Srl

Dr. Geol. Matteo Collareda

# Inquadramento geologico dell'area

Il sito d'indagine è localizzato nel comune di Montecarotto, in provincia di Ancona, in una zona collinare dell'entroterra marchigiana.



**REGIONE MARCHE**  
**GIUNTA REGIONALE**  
 SERVIZIO AMBIENTE E PAESAGGIO  
 Posizione di Funzione  
 Informazioni Territoriali e Beni Paesaggistici

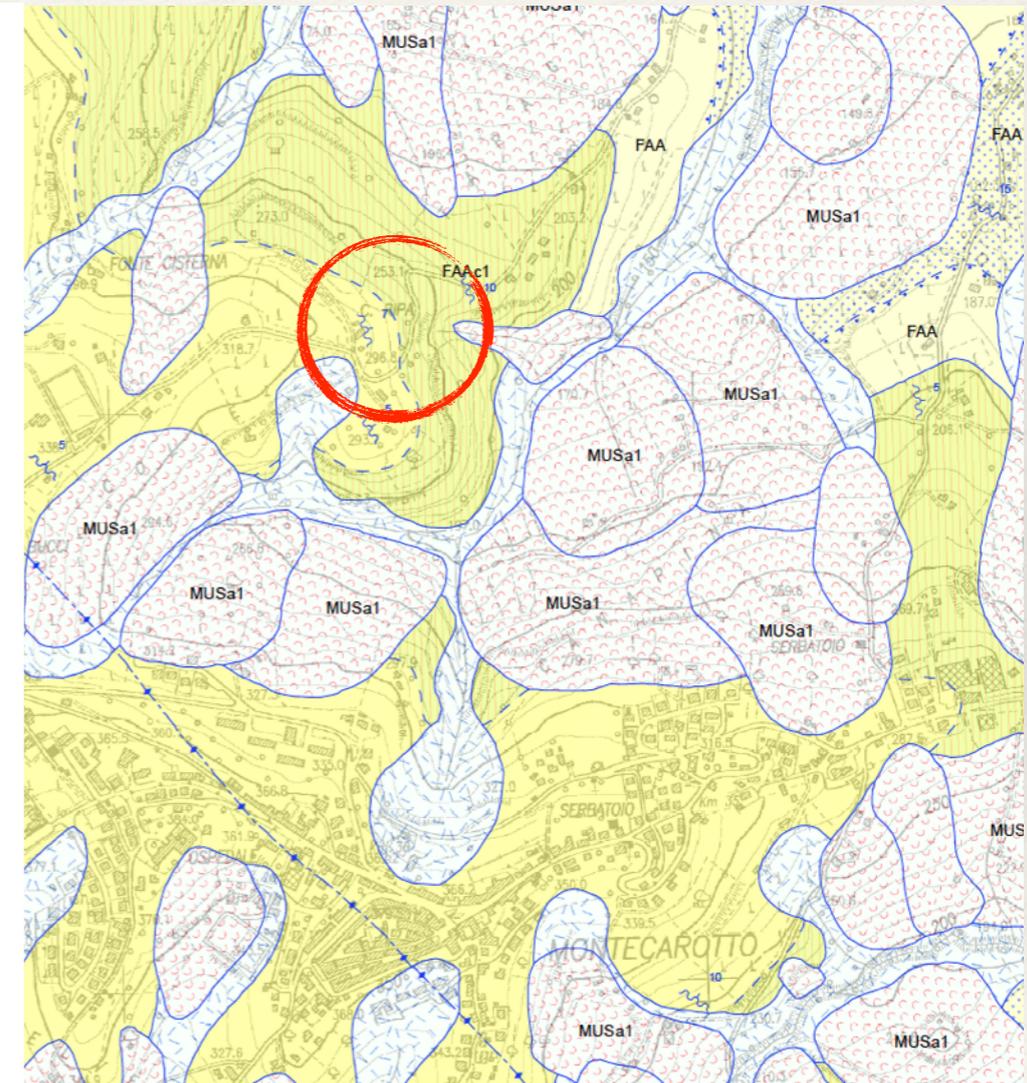
**CARTA GEOLOGICA REGIONALE**  
 EDIZIONE CTR

SCALA 1:10.000

## SUCCESSIONE UMBRO-MARCHIGIANO-ROMAGNOLA

### SUCCESSIONE PLIOCENICA

	FAA	FORMAZIONE DELLE ARGILLE AZZURRE Pliocene inferiore - Pleistocene inferiore
	FAAc1	FORMAZIONE DELLE ARGILLE AZZURRE litofacies arenitica di Rosora Pliocene inferiore - Pleistocene inferiore
	FAAb	FORMAZIONE DELLE ARGILLE AZZURRE litofacies arenaceo-conglomeratica Pliocene inferiore - Pleistocene inferiore
	FAA2	FORMAZIONE DELLE ARGILLE AZZURRE Membro delle arenarie di Borello Pliocene inferiore - medio
		Contatto stratigrafico e/o litologico
		Contatto stratigrafico inconforme
		Stratificazione contorta con valori medi di immersione ed inclinazione
		Traccia di superficie assiale di anticlinale



UNIVERSITÀ  
 DEGLI STUDI  
 DI PADOVA



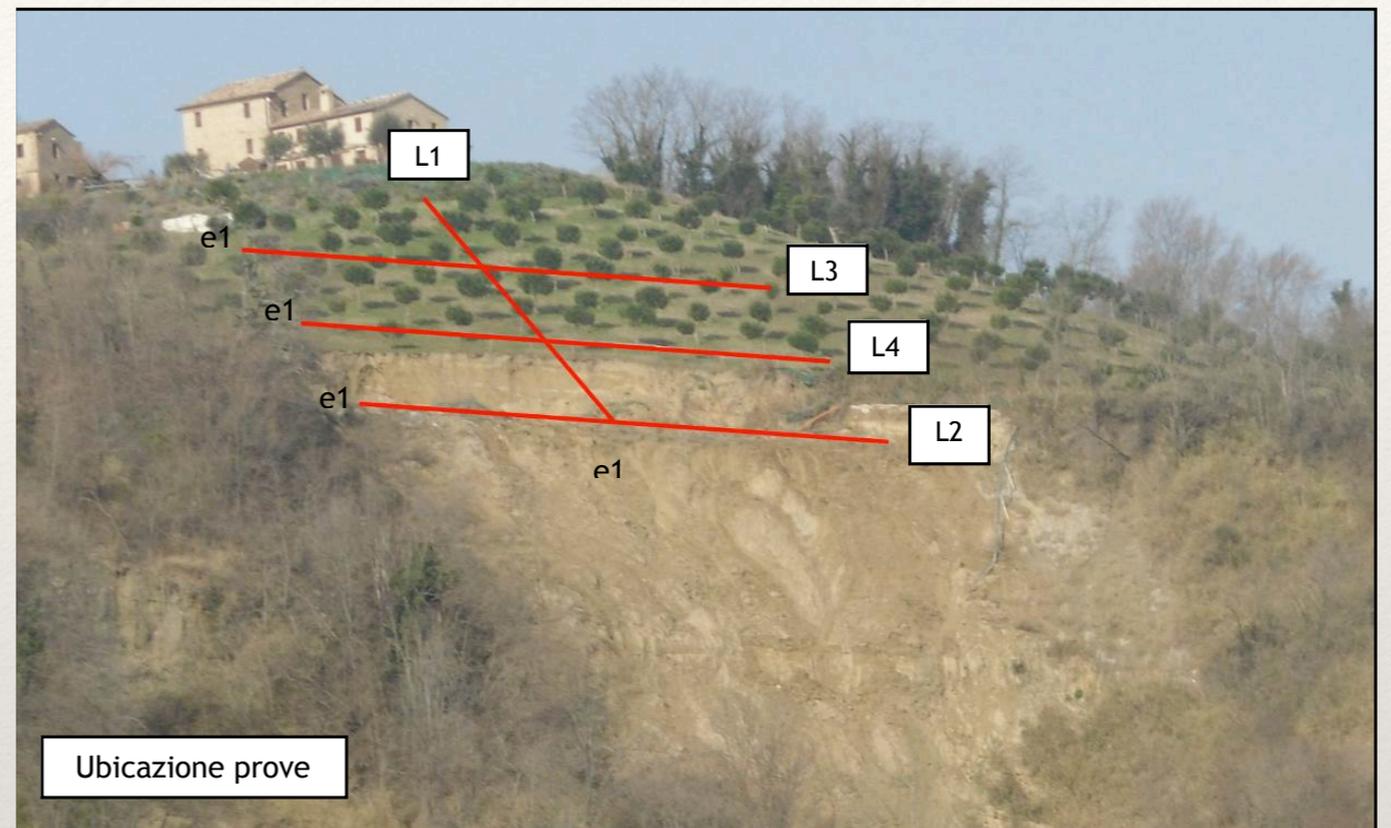
Dr. Geol. Matteo Collareda

# Indagini condotte: Tomografie elettriche

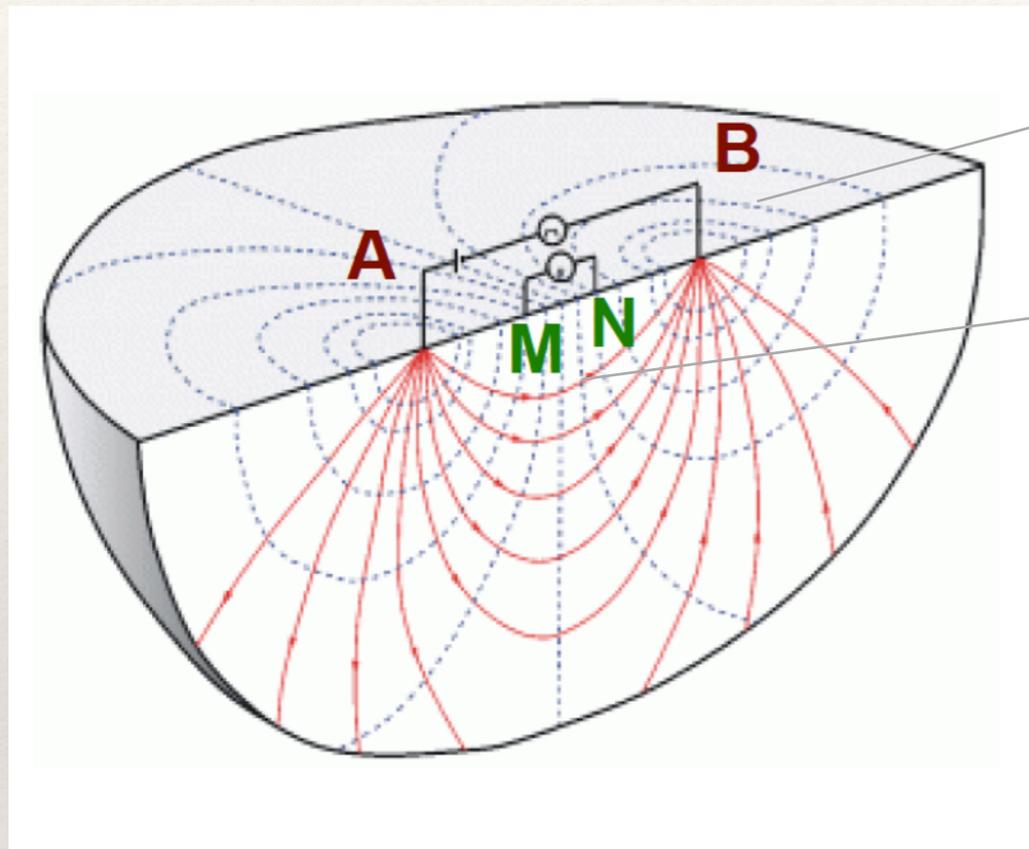
Sono stati condotti n°4 profili geoelettrici - topografici 2D ad alta risoluzione e in configurazione Wenner

Lo scopo di tali misure è la ricostruzione del modello di resistività del sottosuolo

Tale metodologia è stata scelta in virtù dell'elevato dettaglio, per la sensibilità nelle misura e possibilità di interpretare qualsiasi successione elettro-stratigrafica (sia positiva che negativa)



# Indagini condotte: Tomografie elettriche



A e B sono gli elettrodi tra cui trasmettiamo una corrente  $I$

M e N sono gli elettrodi tra cui misuriamo la differenza di potenziale  $V$

$$\text{ResApp} = K (V_m - V_n) / I$$

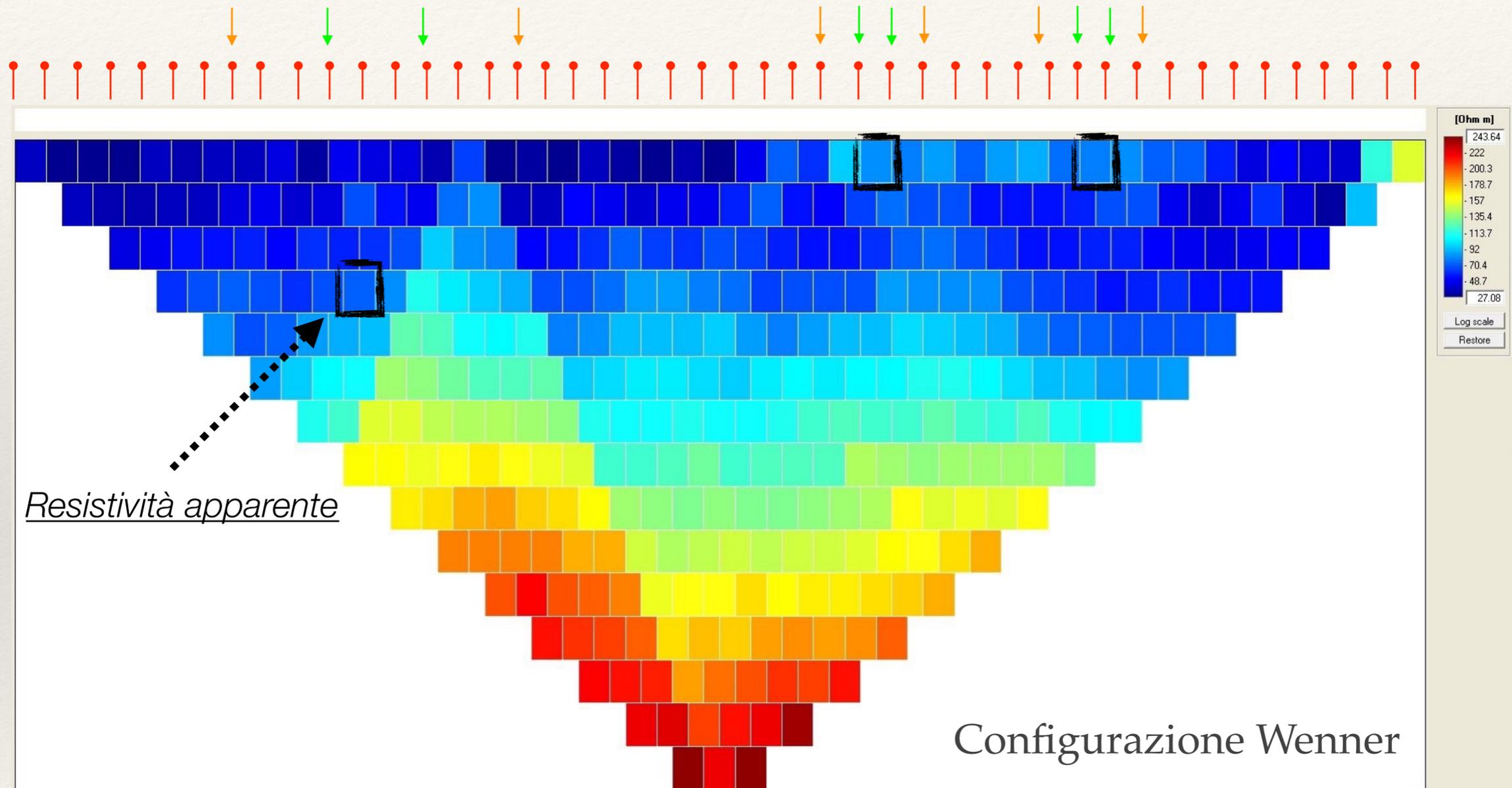
Corrente Immessa tra A e B

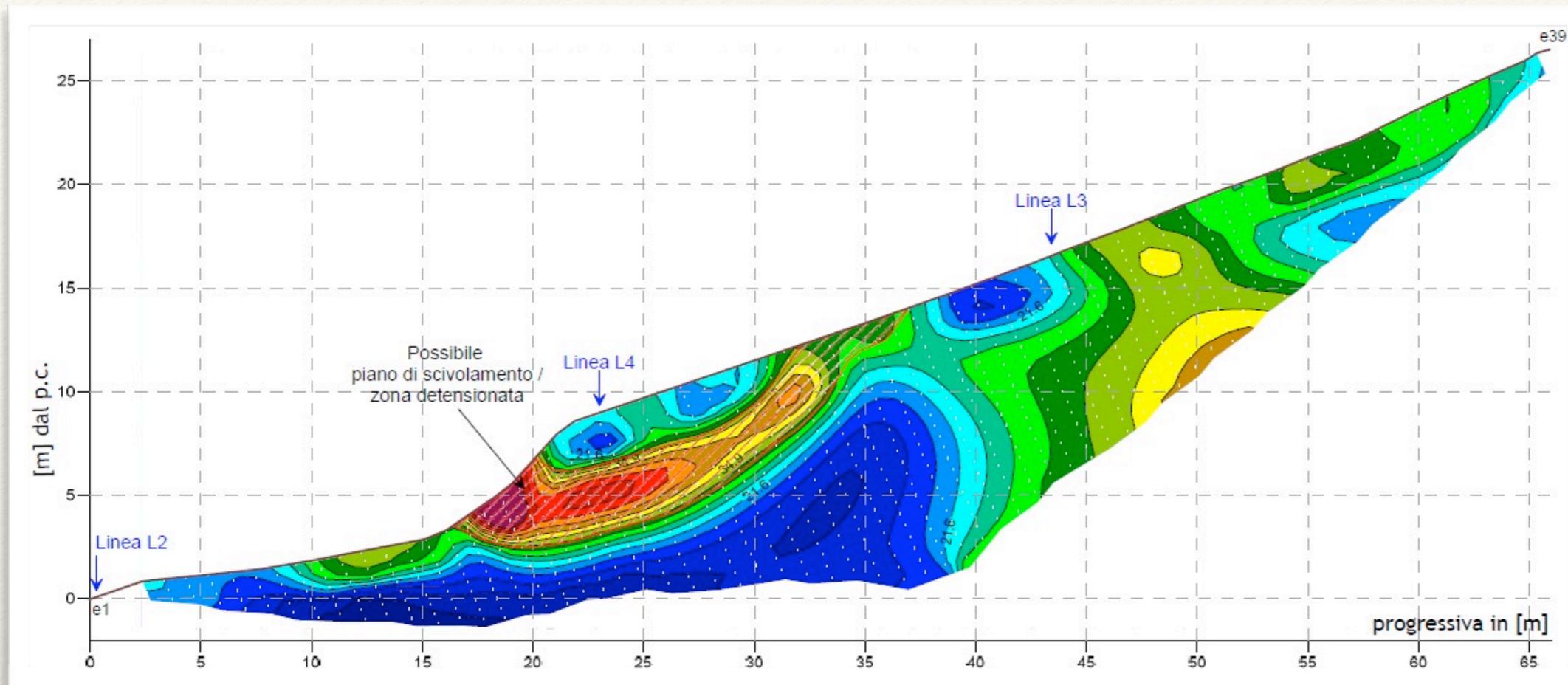
Differenza di Potenziale tra M e N

Fattore Geometrico

Dipende solo dalle coordinate degli elettrodi, cioè da come A, B, M e N sono reciprocamente disposti

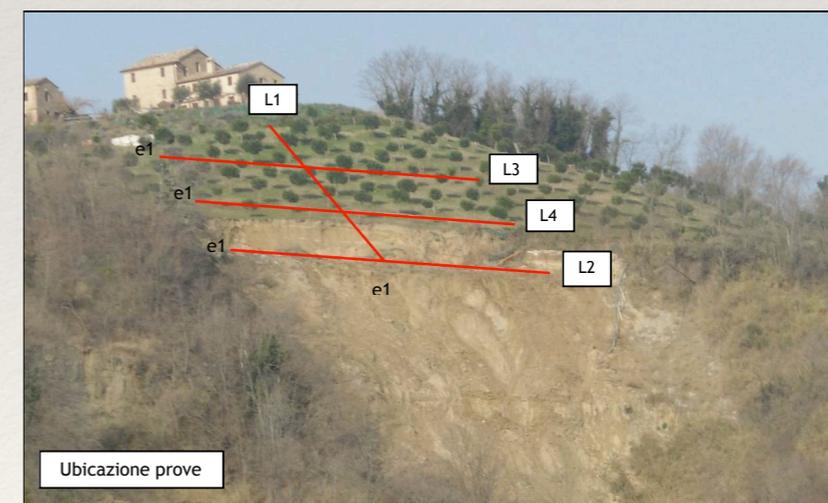
# Indagini condotte: Tomografie elettriche





LINEA L1

# Indagine tomografica di natura elettrica



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



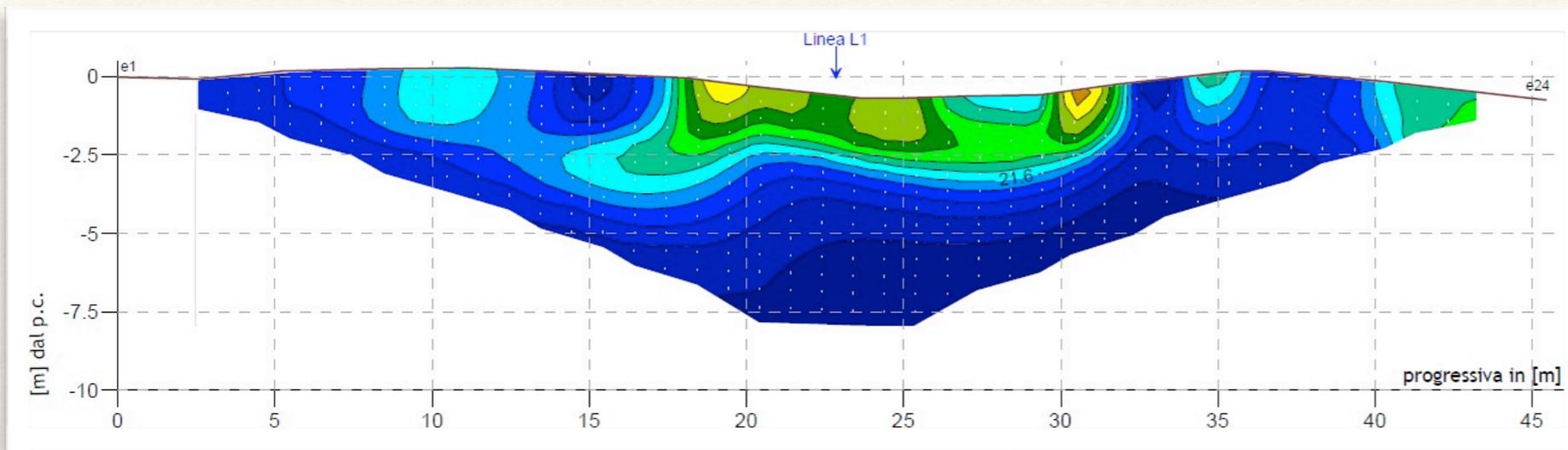
Ordine dei Geologi  
Trentino-Alto Adige  
*Geologenkammer*  
Trentino-Südtirol



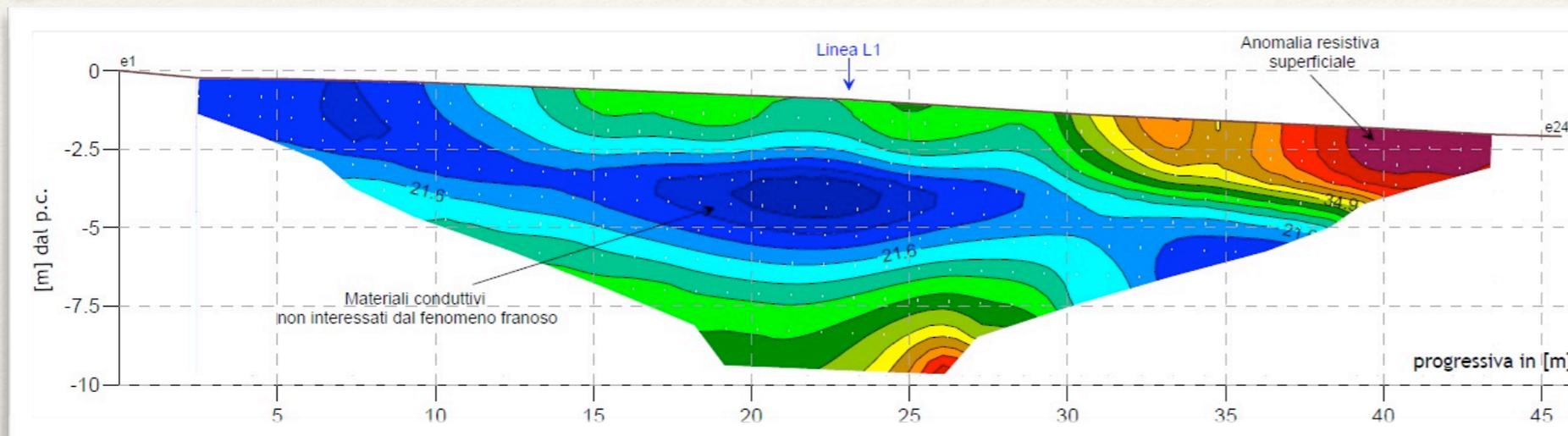
Ordine dei Geologi  
Friuli Venezia Giulia



Dr. Geol. Matteo Collareda

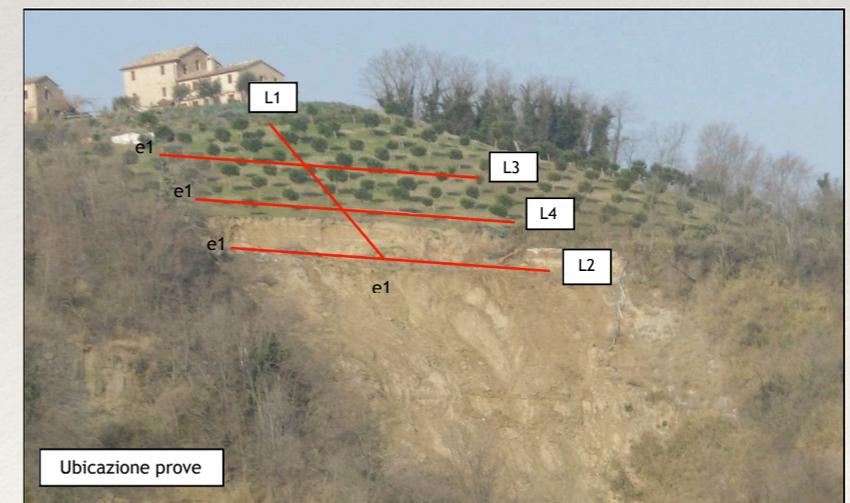


LINEA L2



LINEA L3

# Indagine tomografica di natura elettrica



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



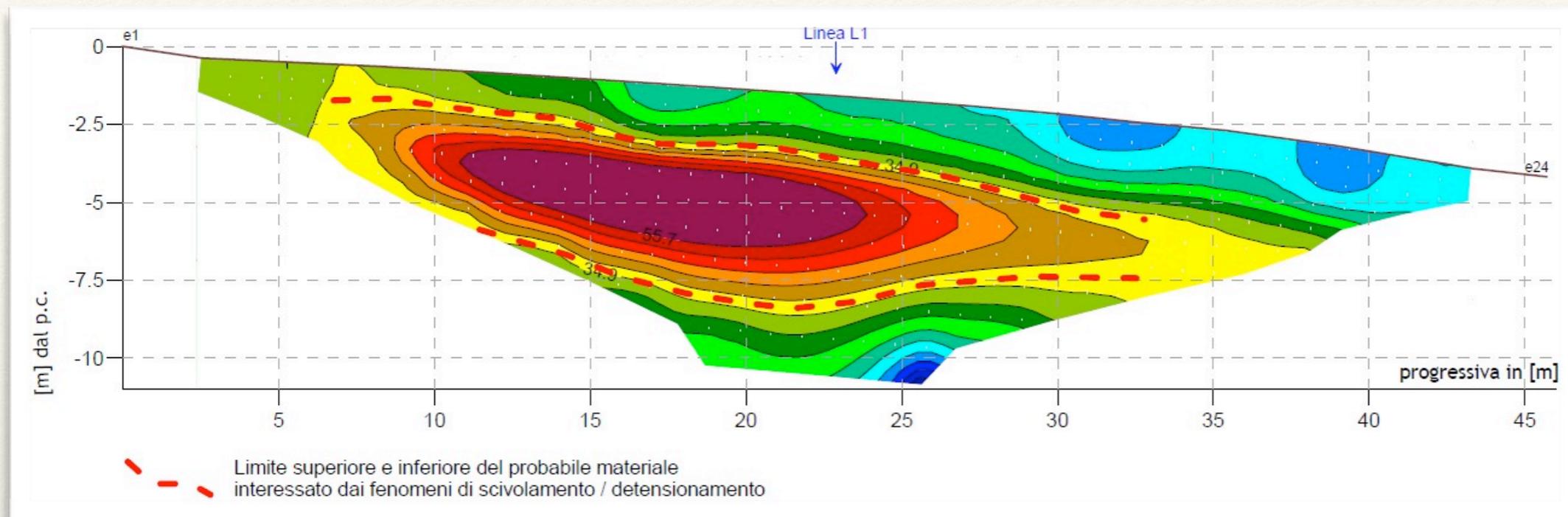
Ordine dei Geologi  
Trentino-Alto Adige  
*Geologenkammer*  
Trentino-Südtirol



Ordine dei Geologi  
Friuli Venezia Giulia

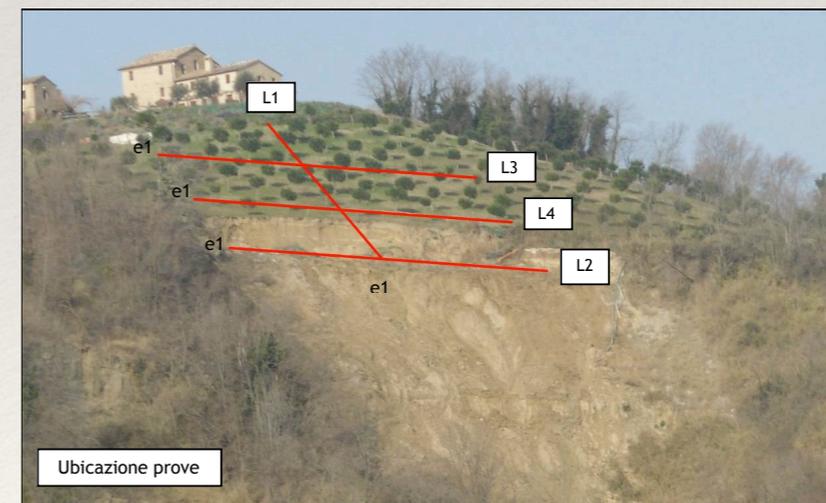


Dr. Geol. Matteo Collareda



LINEA L4

# Indagine tomografica di natura elettrica



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



Ordine dei Geologi  
TRENTINO-ALTO ADIGE  
Geologenkammer  
TRENTINO-SÜDTIROL

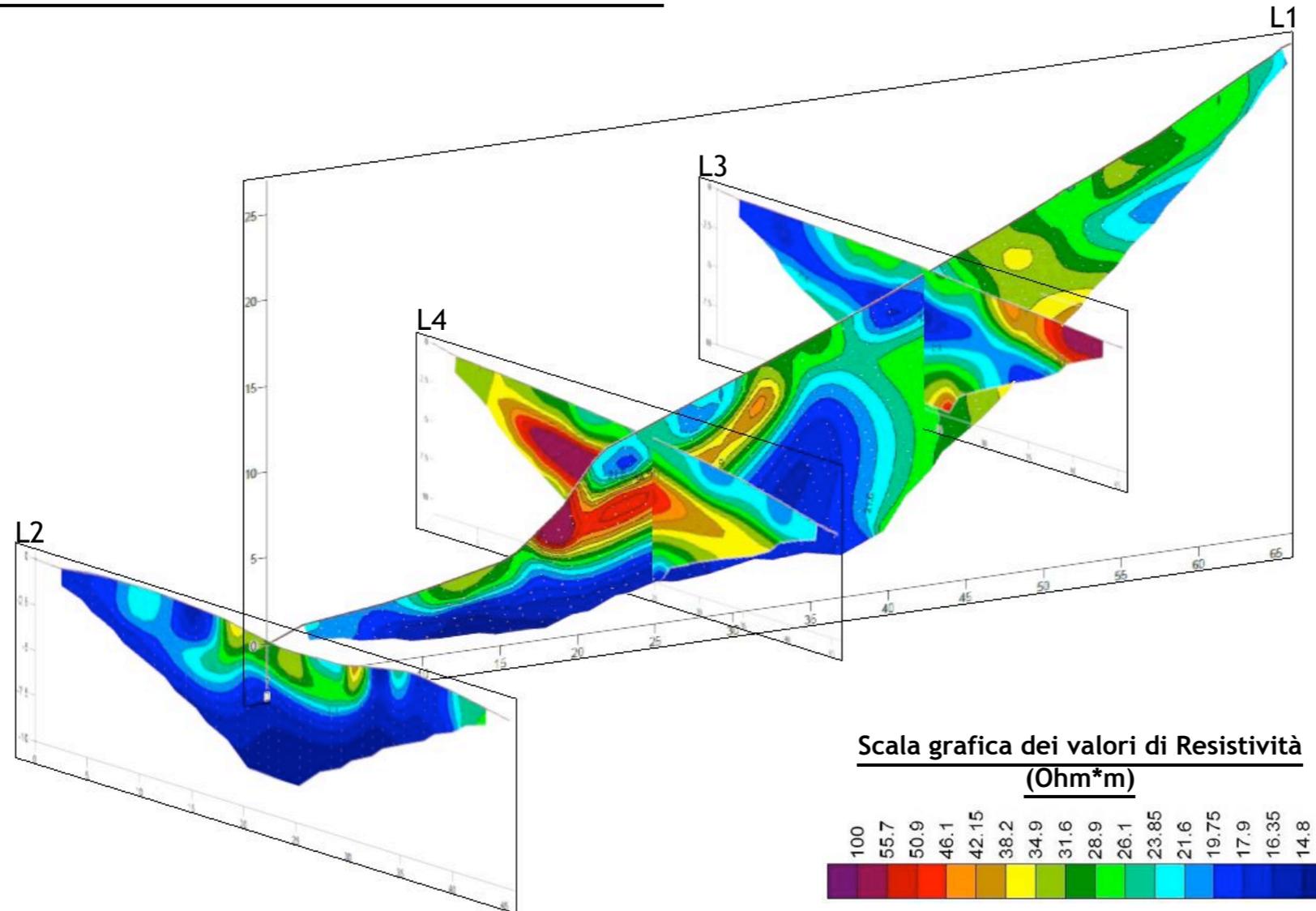


Ordine dei Geologi  
Friuli Venezia Giulia



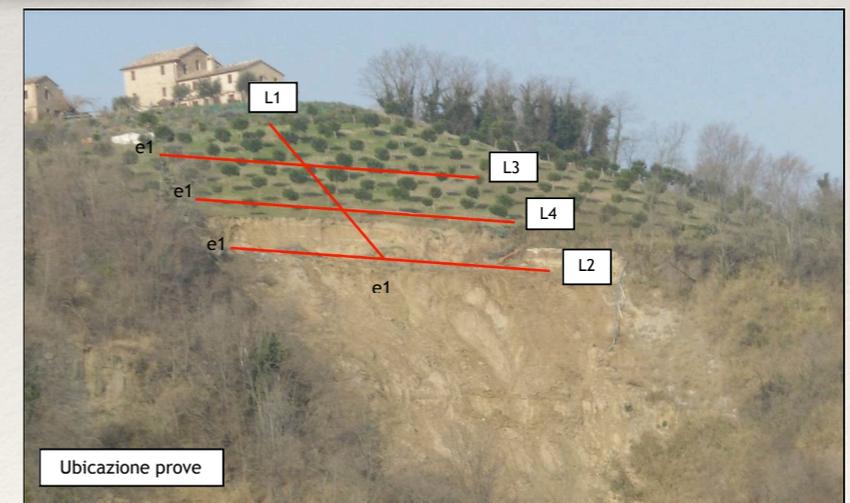
Dr. Geol. Matteo Collareda

Ricostruzione tridimensionale dei risultati ottenuti



Rappresentazione 3D

# Indagine tomografica di natura elettrica

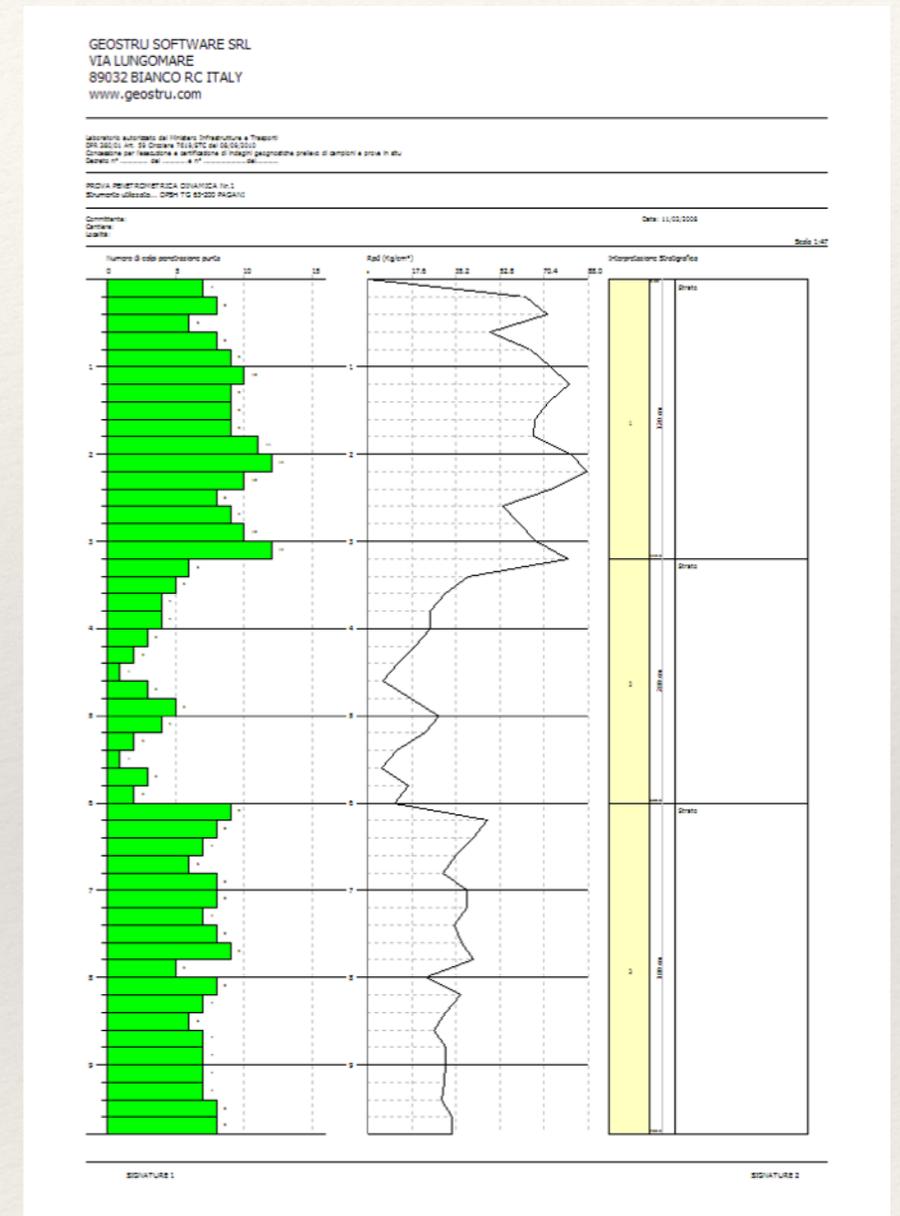
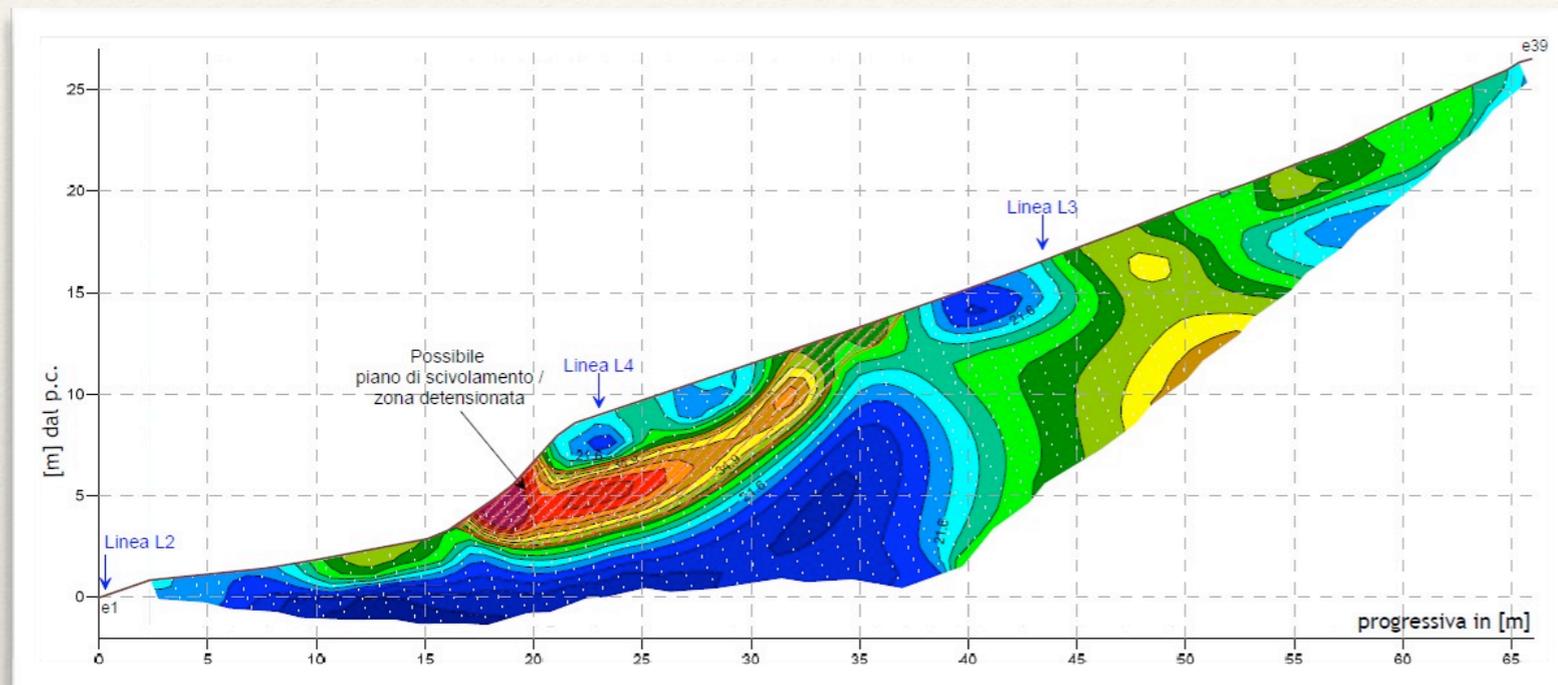


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



# Indagini geognostiche: prove dirette

## Indagini penetrometriche



## Sondaggio carotaggio continuo

- 15 m di argille azzurre in *litofaces arenacee*

## Analisi geotecniche di laboratorio

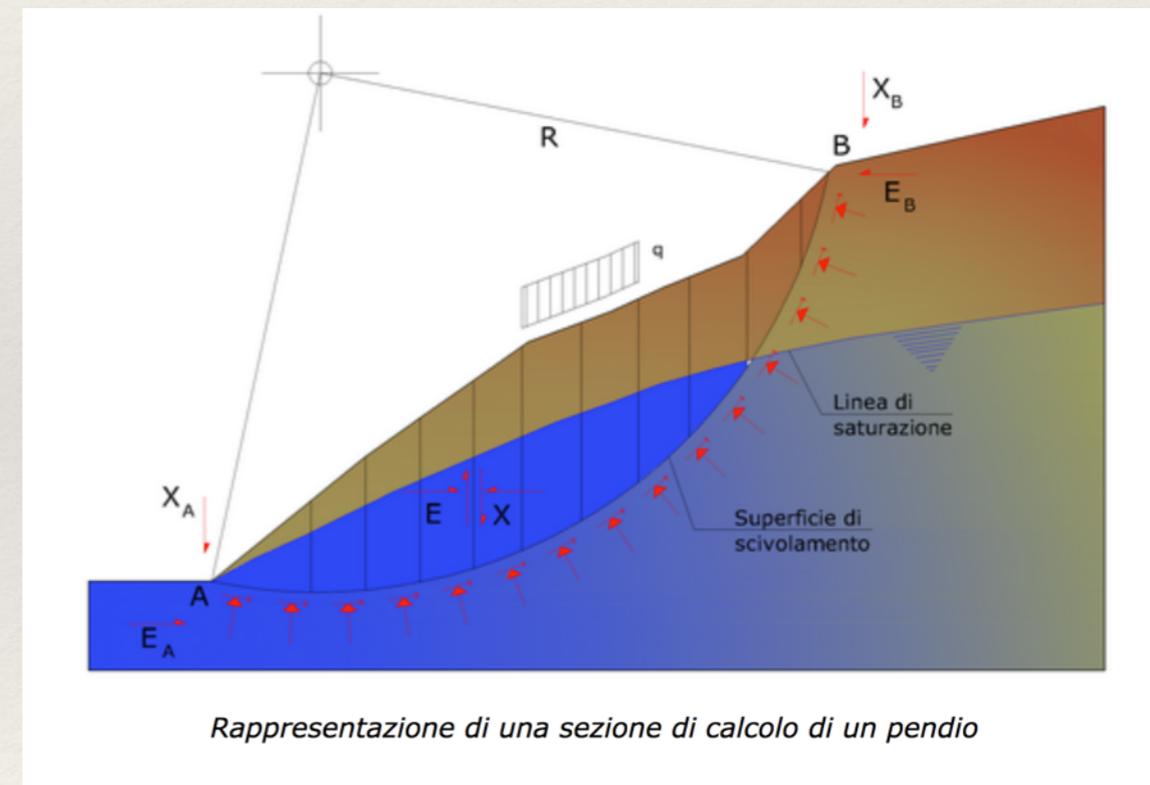
- modello costitutivo MC: angolo di attrito  $27^\circ$  - coesione 10000 Pa - peso  $1900 \text{ kg/m}^3$

# Calcolo del coefficiente di sicurezza e superfici di “Shear Strain Increments” mediante soluzioni numeriche

Si è utilizzata una modulazione numerica avanzata per stimare il fattore di sicurezza ma, soprattutto, per individuare le superfici di maggior sforzo di taglio. Successivamente si sono confrontati i risultati ottenuti con le misure sperimentali condotte di tipo elettrico.

## Approccio tradizionale

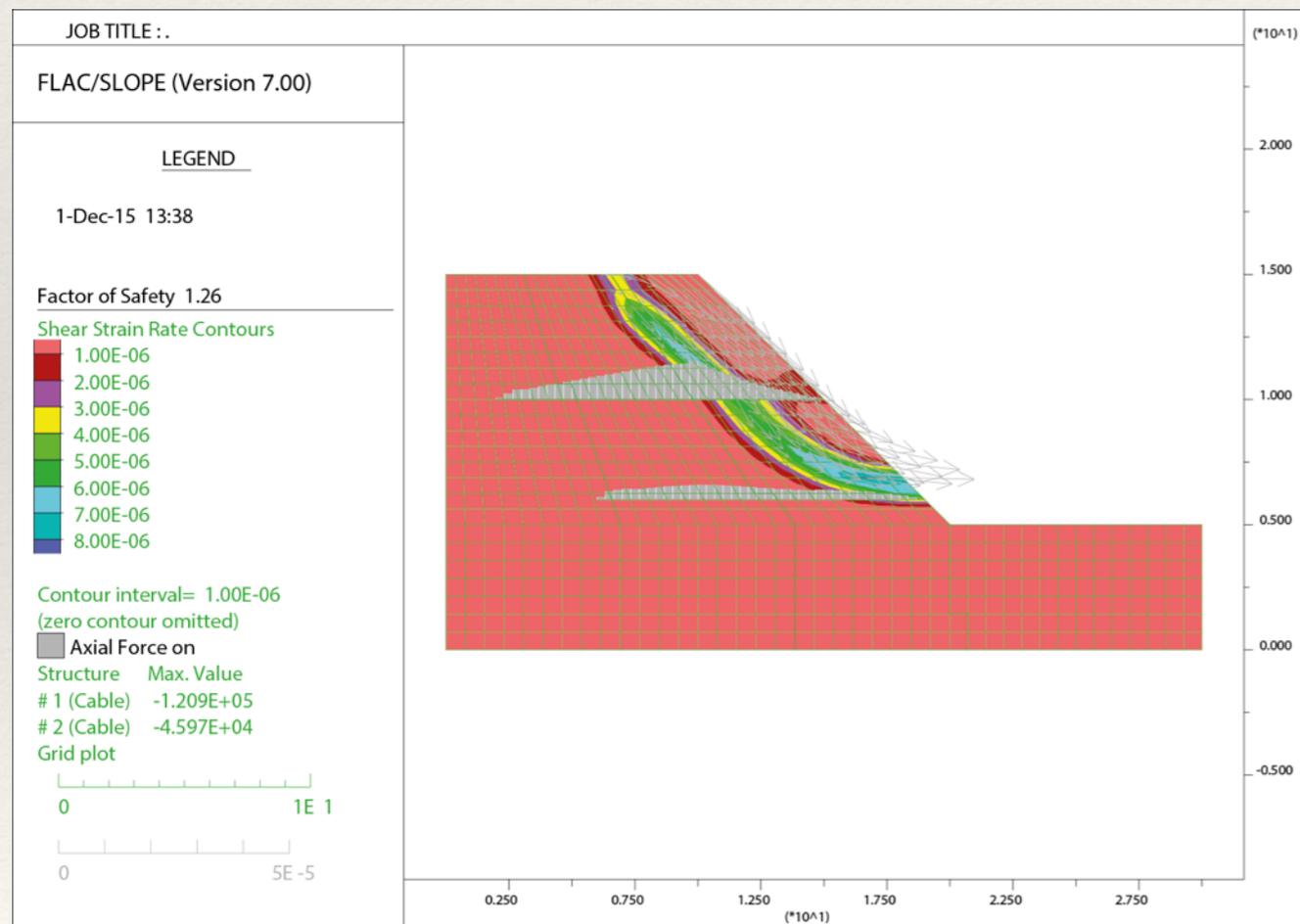
Vi sono molti programmi all’ “equilibrio limite” per determinare il coefficiente di sicurezza. Sono molto veloci ed usano uno schema approssimato – per lo più il “metodo dei conchi” – che richiede un certo numero di ipotesi (ad esempio l’ubicazione e l’angolo delle forze di interfaccia fra i conchi). Si prova con diverse superfici di scorrimento, e si sceglie quella che dà il coefficiente di sicurezza più basso. L’equilibrio è soddisfatto solo sulle superfici di scorrimento “idealizzate”.



# Calcolo del coefficiente di sicurezza e superfici di “Shear Strain Increments” mediante soluzioni numeriche

Si è utilizzata una modulazione numerica avanzata per stimare il fattore di sicurezza ma, soprattutto, per individuare le superfici di maggior sforzo di taglio. Successivamente si sono confrontati i risultati ottenuti con le misure sperimentali condotte di tipo elettrico.

## Approccio mediante moderazione numerica



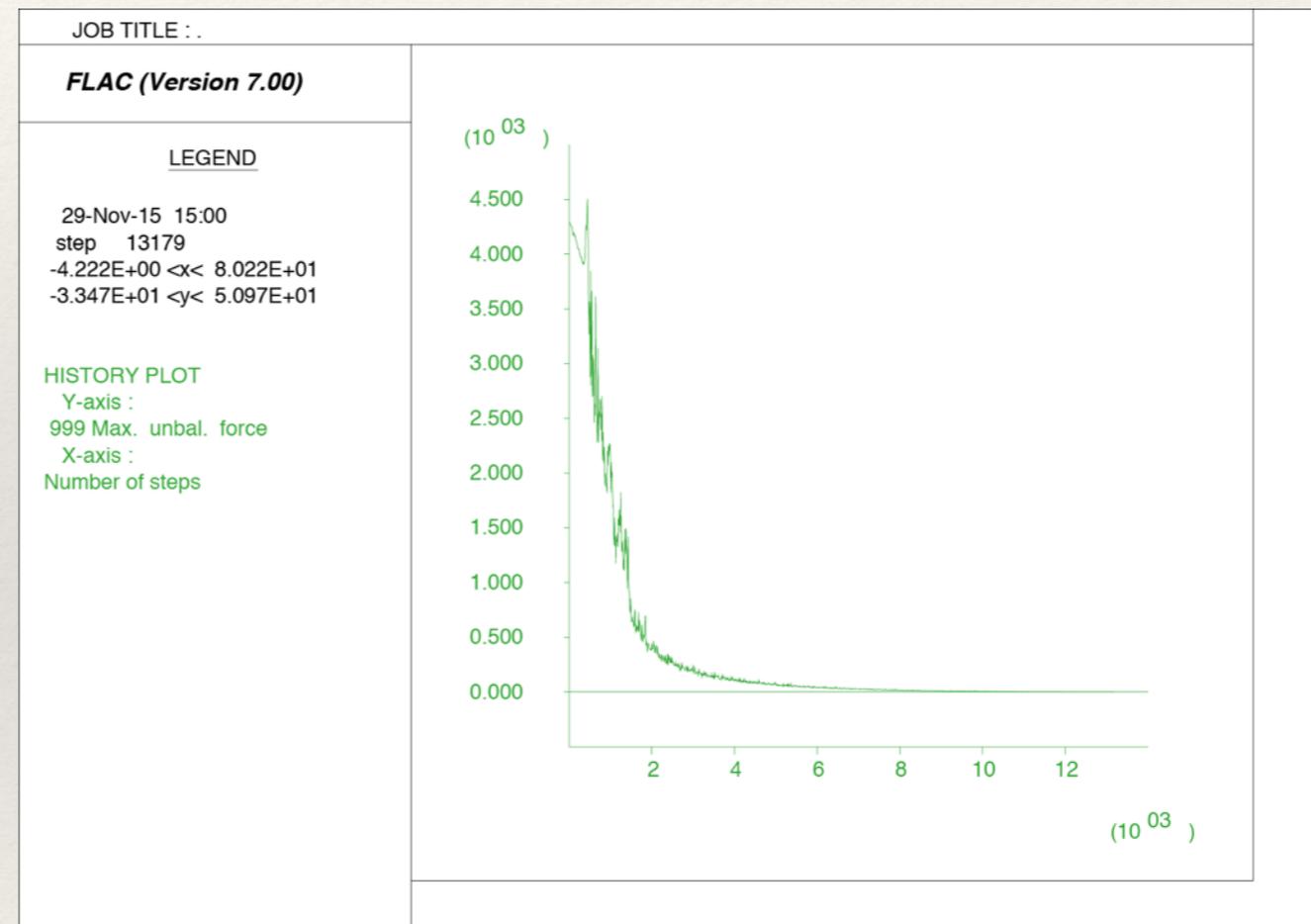
Programmi alle differenze finite invece forniscono una soluzione "completa" delle equazioni accoppiate deformazioni / spostamenti, di equilibrio e costitutive. Dato un insieme di proprietà, il sistema può risultare stabile o instabile. Effettuando una serie di simulazioni, con diversi insiemi di proprietà, e' possibile trovare il **coefficiente di sicurezza** che corrisponde al punto di stabilità limite. Quest'ultimo approccio è molto più lento, ma molto più generale. Solo negli ultimi anni è di fatto divenuto un'alternativa praticabile al metodo dell'equilibrio limite, grazie alla maggiore velocità dei computer.

# Calcolo del coefficiente di sicurezza e superfici di “Shear Strain Increments” mediante soluzioni numeriche

	Soluzione Numerica	Equilibrio Limite
<b>Equilibrio</b>	E' soddisfatto ovunque	E' soddisfatto solo per oggetti specifici (conci)
<b>Sforzi</b>	Calcolabili in qualunque punto tramite le equazioni di campo	Calcolati in modo approssimato sulle superfici dei conci
<b>Deformazioni</b>	Sono parte della soluzione	Non vengono considerate
<b>Collasso</b>	La condizione di scorrimento è soddisfatta ovunque; la superficie di scorrimento si sviluppa automaticamente in base alle condizioni	Il collasso può verificarsi solo su certe superfici predefinite; la condizione di scorrimento non è verificata altrove
<b>Cinematica</b>	I meccanismi che si sviluppano soddisfano i vincoli cinematici	Non si considera la cinematica. I meccanismi possono non essere attivabili

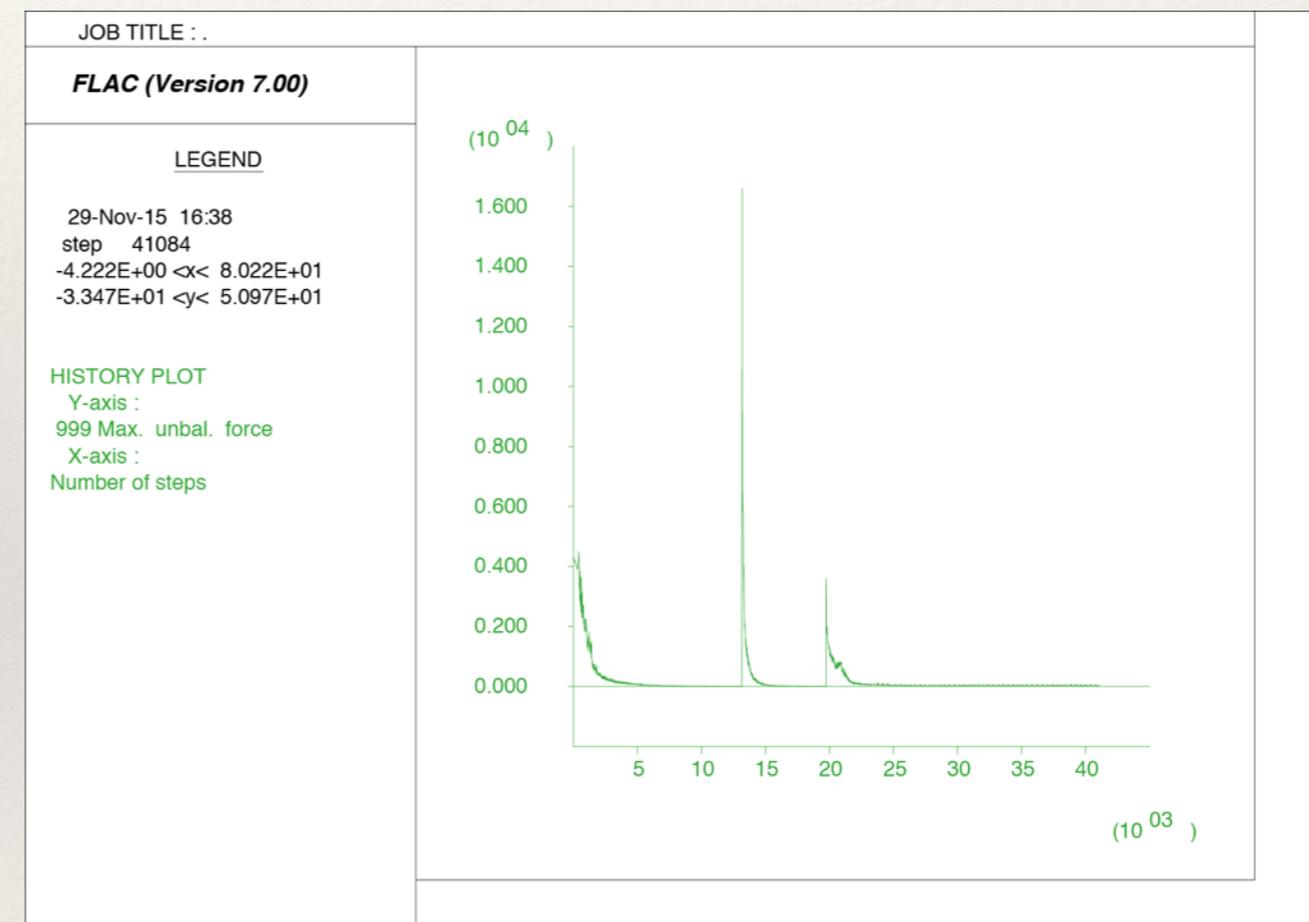
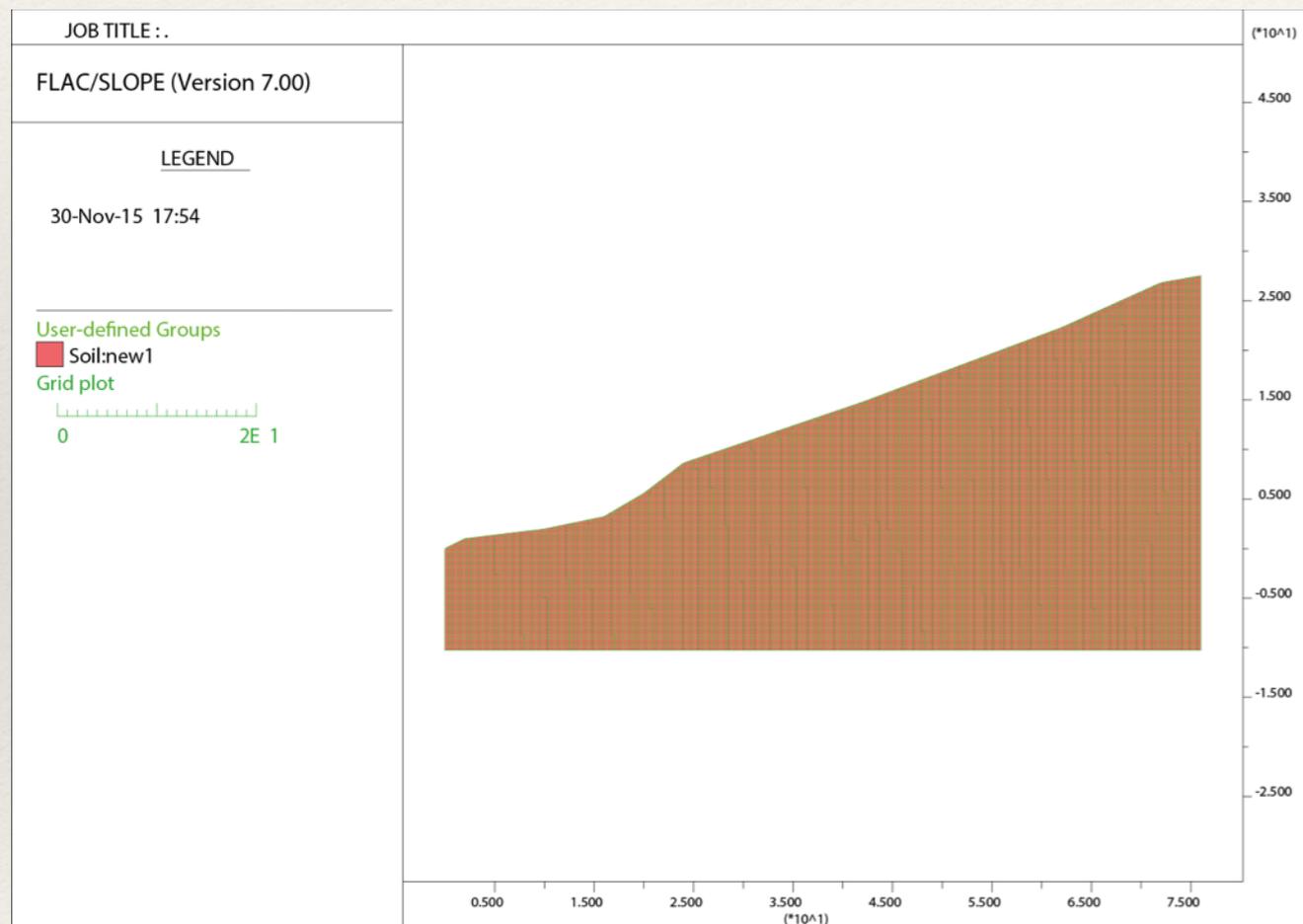
# Calcolo del coefficiente di sicurezza e superfici di “Shear Strain Increments” mediante soluzioni numeriche

**F.L.A.C. - ITASCA** (numerical modeling code static and dynamic for advanced geotechnical analysis of soil, rock, and structural support in two dimensions)

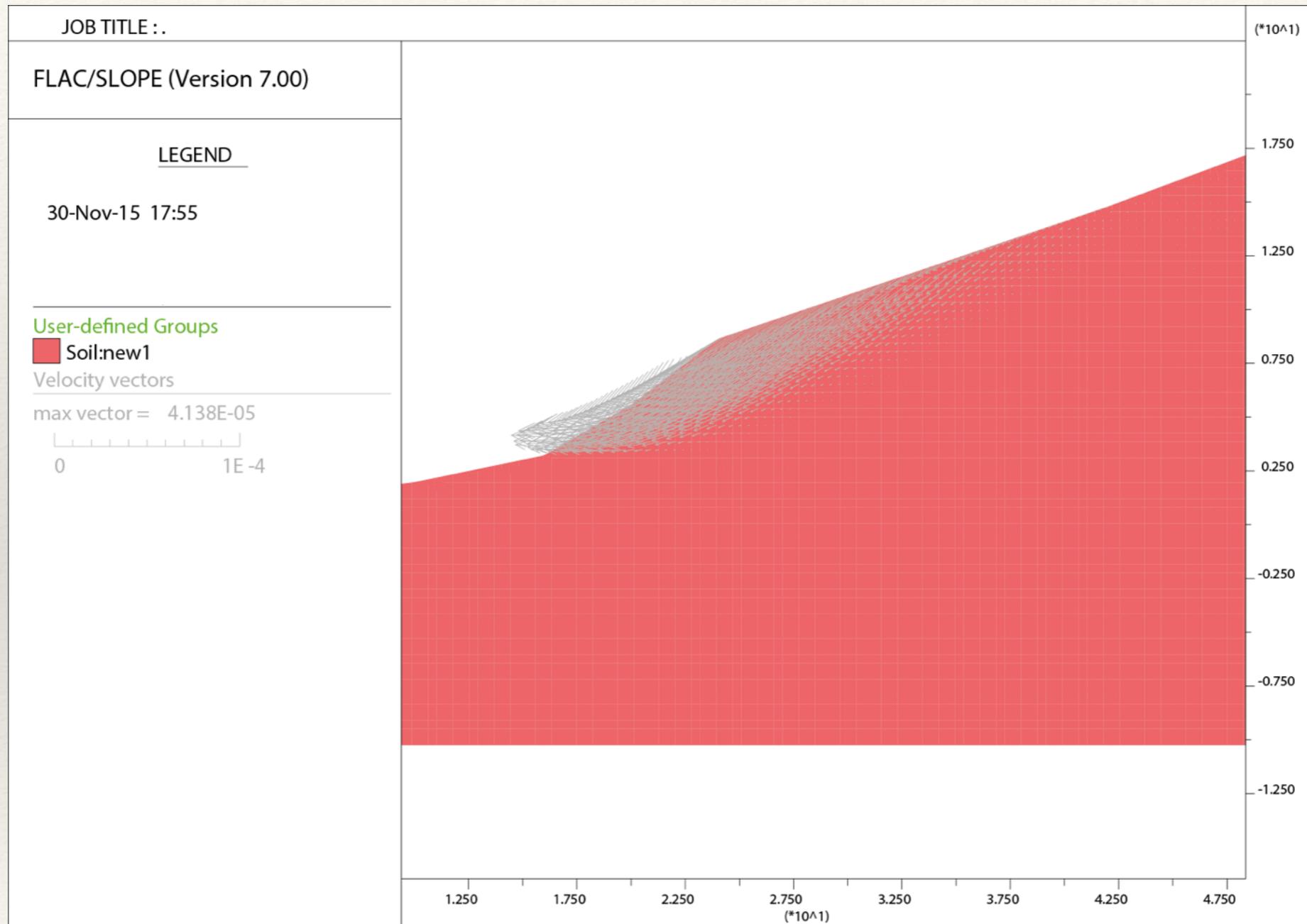


# Calcolo del coefficiente di sicurezza e superfici di “Shear Strain Increments” mediante soluzioni numeriche

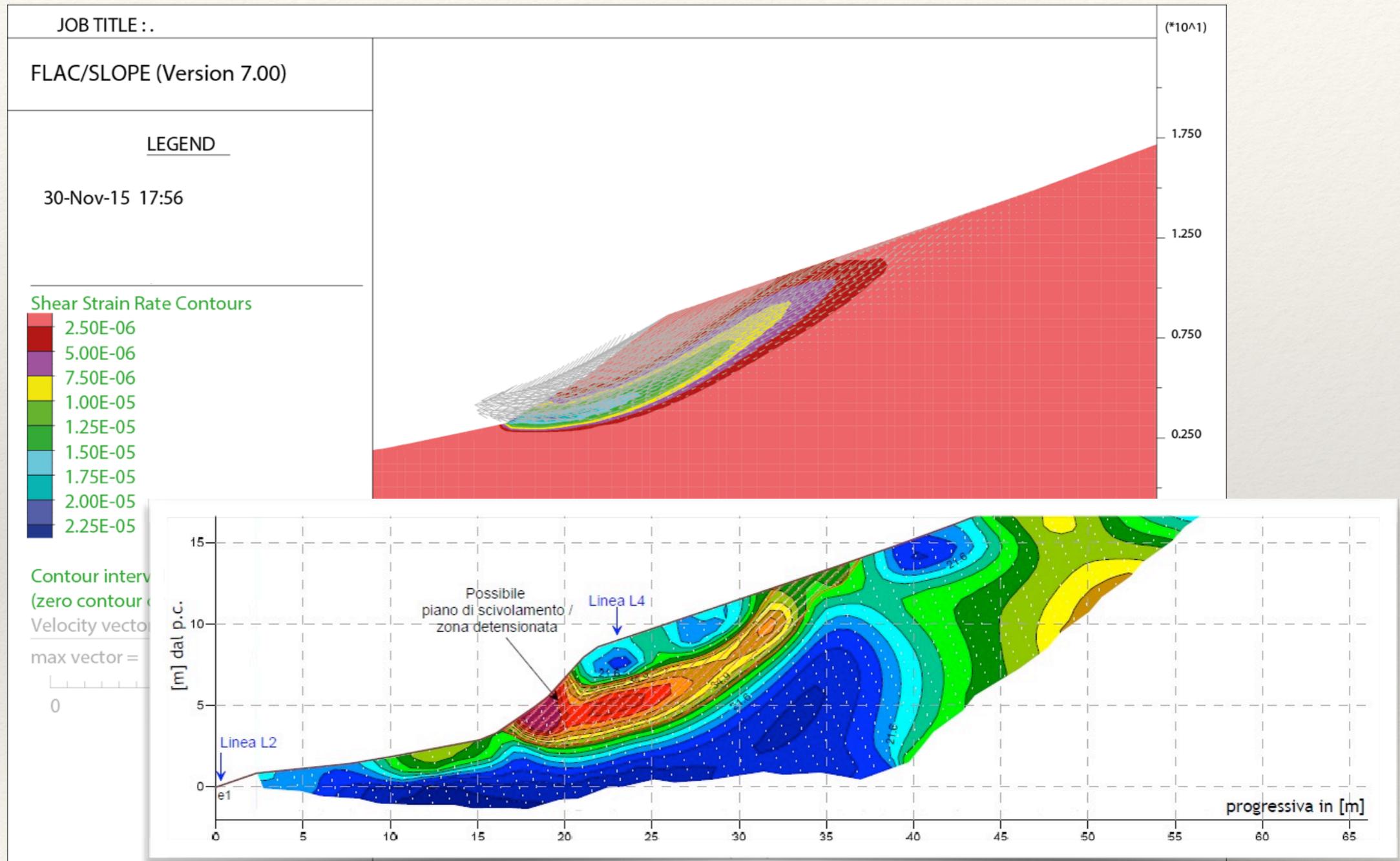
**F.L.A.C. - ITASCA** (numerical modeling code static and dynamic for advanced geotechnical analysis of soil, rock, and structural support in two dimensions)



# Calcolo del coefficiente di sicurezza e superfici di “Shear Strain Increments” mediante soluzioni numeriche



# Calcolo del coefficiente di sicurezza e superfici di “Shear Strain Increments” mediante soluzioni numeriche

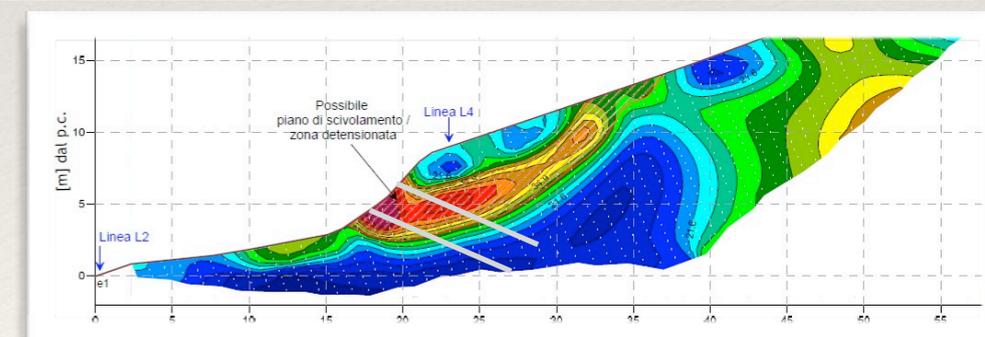
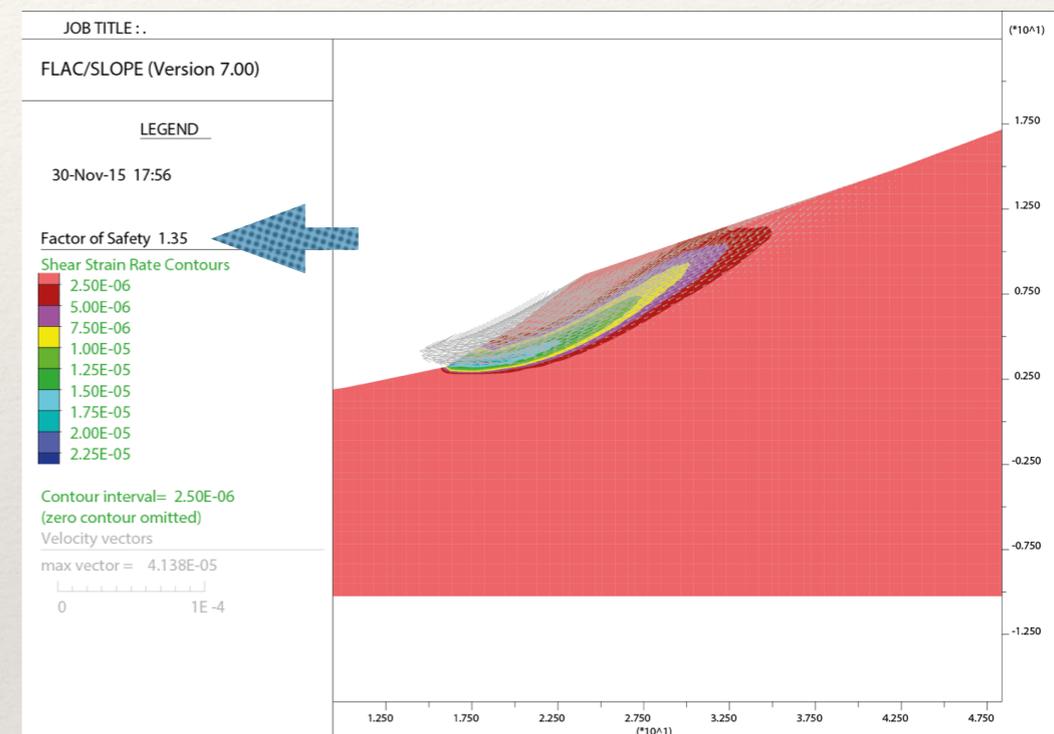


# Calcolo del coefficiente di sicurezza e superfici di “Shear Strain Increments” mediante soluzioni numeriche

## Considerazioni

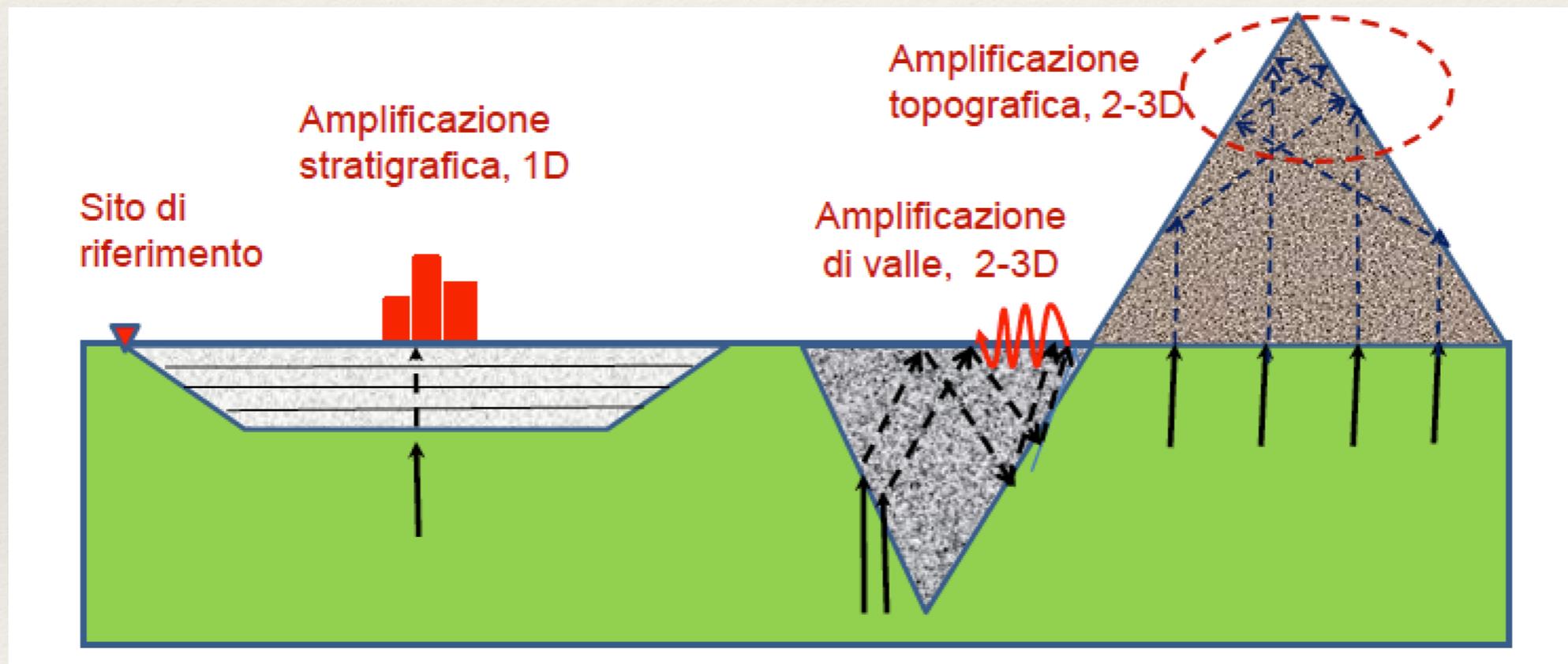
- ▶ il modello numerico conferma pienamente il modello geo-elettrico
- ▶ entrambi localizzano esattamente gli sforzi di taglio massimi
- ▶ il modello numerico restituisce una situazione stabile con FOS di 1,35
- ▶ le indagini elettriche rilevano esattamente la presenza di deformazione
- ▶ parametri geotecnici del terreno non esatti o poco rappresentativi
- ▶ corretto dimensionamento delle opere di recupero grazie alle indagini elettriche

se non fossero state fatte le indagini elettriche si sarebbe sottovalutata la situazione a discapito di una sicurezza progettuale?



# Studio di Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

Valutazione degli **effetti di sito** per una corretta progettazione sismica dell'intervento: modifiche che il moto sismico subisce nell'attraversare i depositi e gli ammassi rocciosi superficiali rispetto al moto che si avrebbe su suolo roccioso rigido affiorante con topografia orizzontale



# Studio di Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

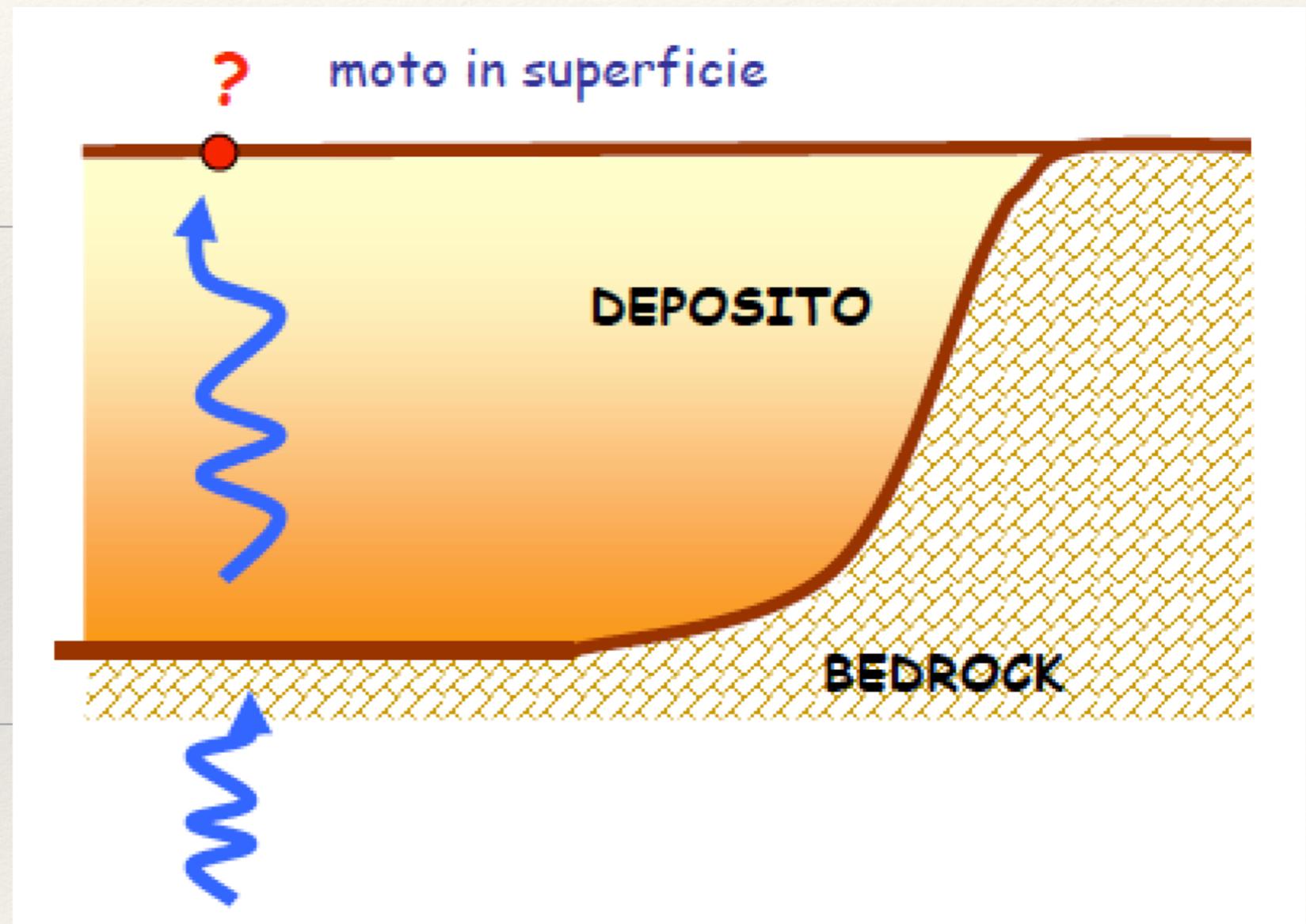
Per fare questo ci sono vari metodi

Metodi empirici

Metodi approssimati

Metodi sperimentali

Metodi numerici



# Studio di Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

L'analisi della RSL viene condotta sviluppando tre fasi principali

- **Definizione del modello geologico e geotecnico del sottosuolo** (geometrie del deposito, caratteristiche geotecniche come Vs, peso unità di volume, Bulk , Shear, coff. di Poisson e il modello costitutivo)
- **Definizione dell'input sismico** (strong motion - weak motion al basamento o accelerogrammi compatibili con lo spettro di risposta su roccia attesa al sito e derivante da studi probabilistici, deterministici o da normativa)
- **Scelta del codice di calcolo** (estrema conoscenza da parte dell'operatore)



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



Ordine dei Geologi  
TRENTINO-ALTO ADIGE  
*Geologenkammer*  
TRENTINO-SÜDTIROL



Ordine dei Geologi  
Friuli Venezia Giulia



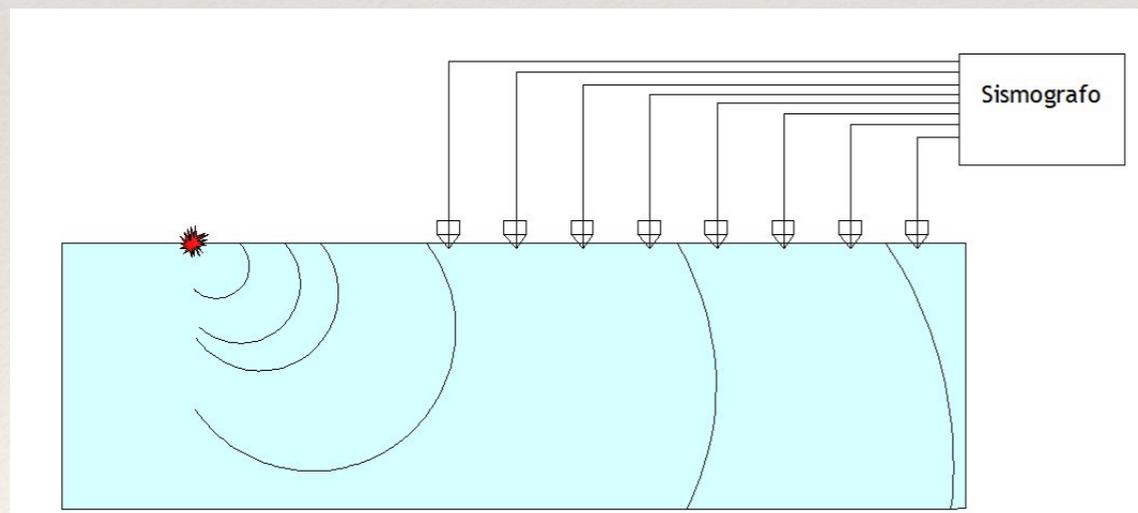
Dr. Geol. Matteo Collareda

# Definizione del modello sismo-stratigrafico a supporto dello studio di Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

In corrispondenza dell'area d'indagine si sono condotte alcune misure sismiche finalizzate a ricostruire l'assetto sismo-stratigrafico locale per lo studio di risposta sismica locale 2D  
Sono state condotte misure sismiche attive/passive di tipo M.A.S.W., Re.Mi. e HVSR

## INDAGINE SISMICA MASW (onde di superficie)

La metodologia MASW prevede l'analisi delle onde superficiali (si studiano le modalità di propagazione delle onde di Rayleigh e di Love) tramite un array lineare e con sorgente nota posizionata esternamente allo stendimento

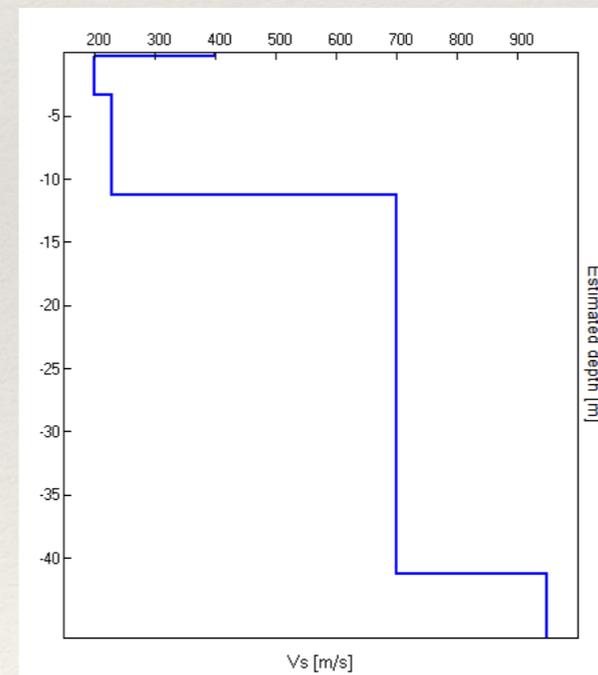
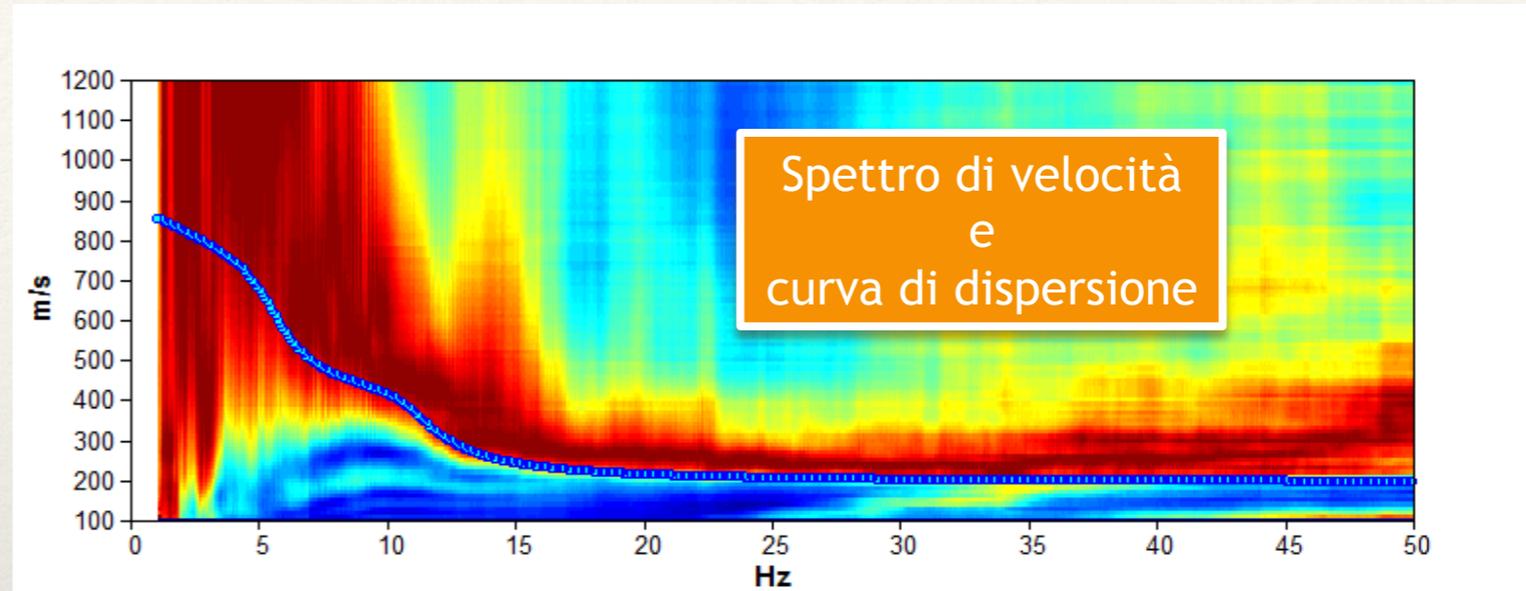
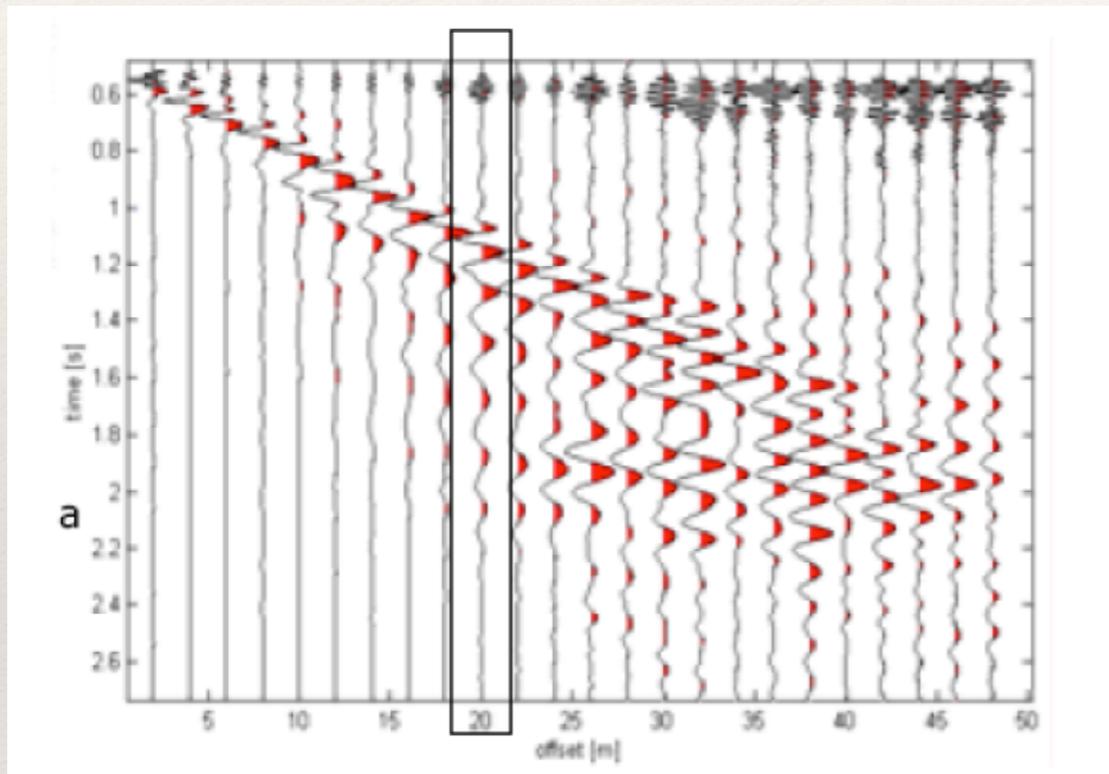


- Una caratteristica importante dell'onda di Rayleigh è che la profondità di penetrazione dipende dalla lunghezza d'onda della perturbazione.
- All'aumentare della lunghezza d'onda  $\lambda$ , aumenta la profondità d'indagine.

$$\lambda = v / f$$

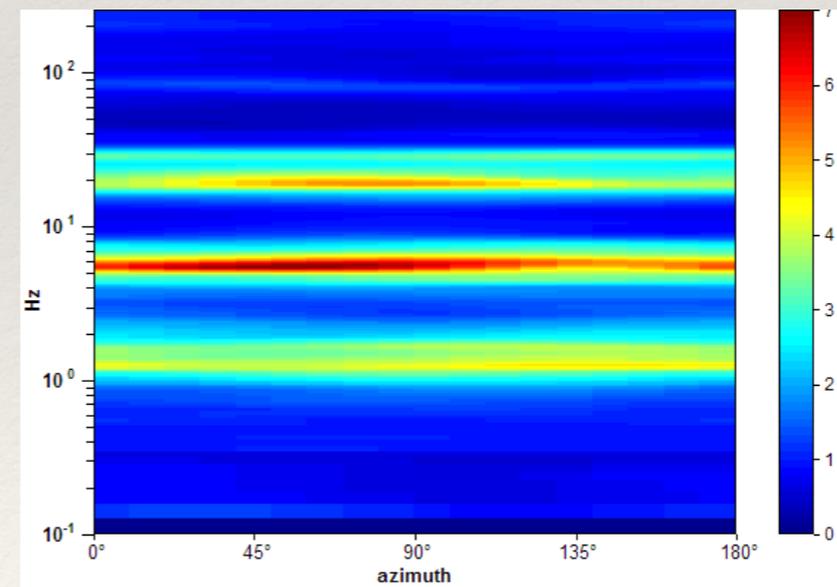
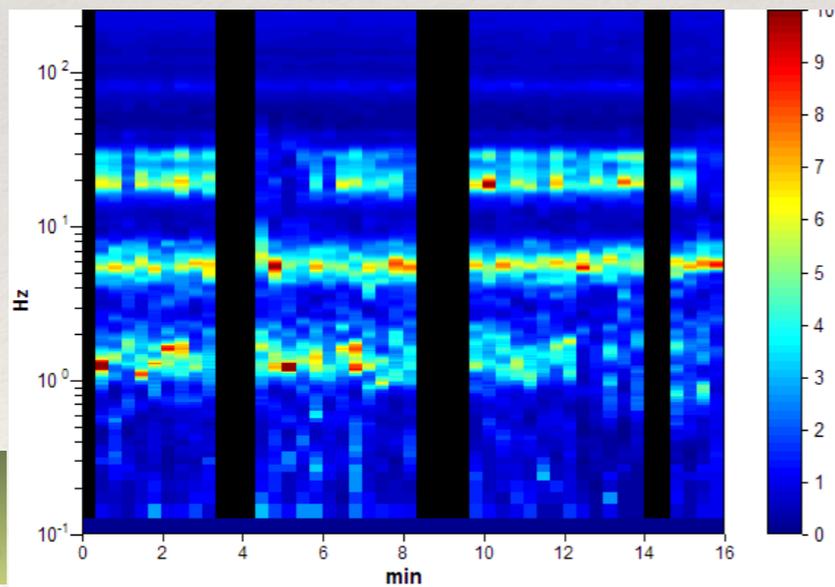
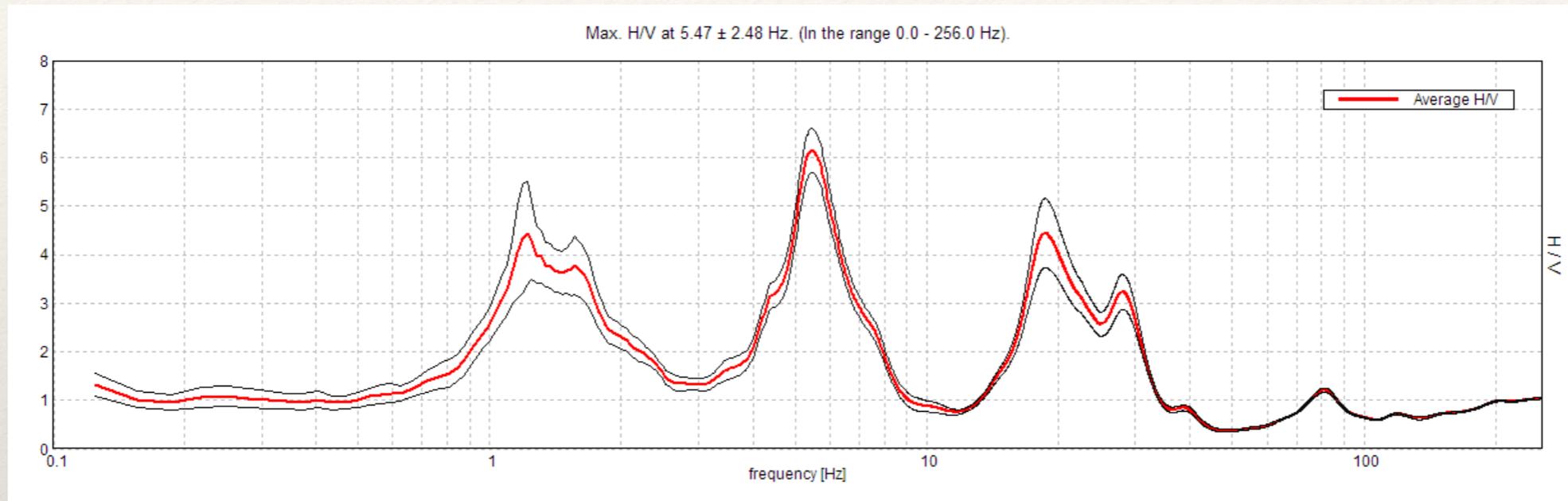
# Definizione del modello sismo-stratigrafico a supporto dello studio di Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

Fenomeno della dispersione



# Definizione del modello sismo-stratigrafico a supporto dello studio di Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

## INDAGINE SISMICA HVSR (frequenza di risonanza)



Stabilità

Direzionalità



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



Ordine dei Geologi  
Trentino-Alto Adige  
*Geologenkammer*  
Trentino-Südtirol



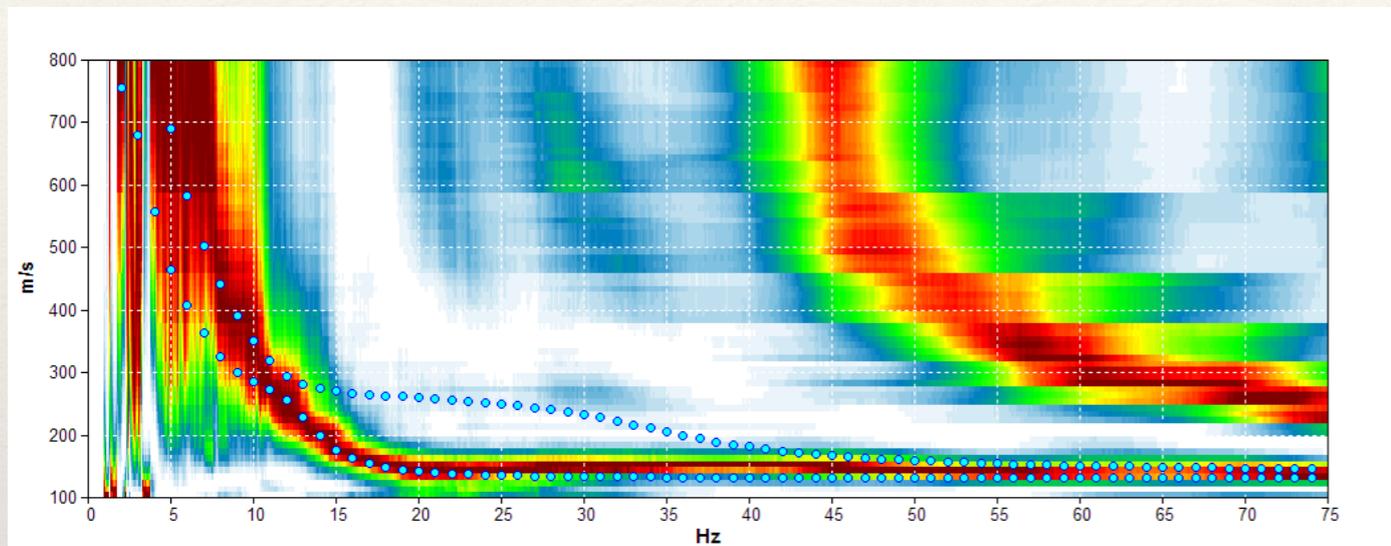
Ordine dei Geologi  
Friuli Venezia Giulia



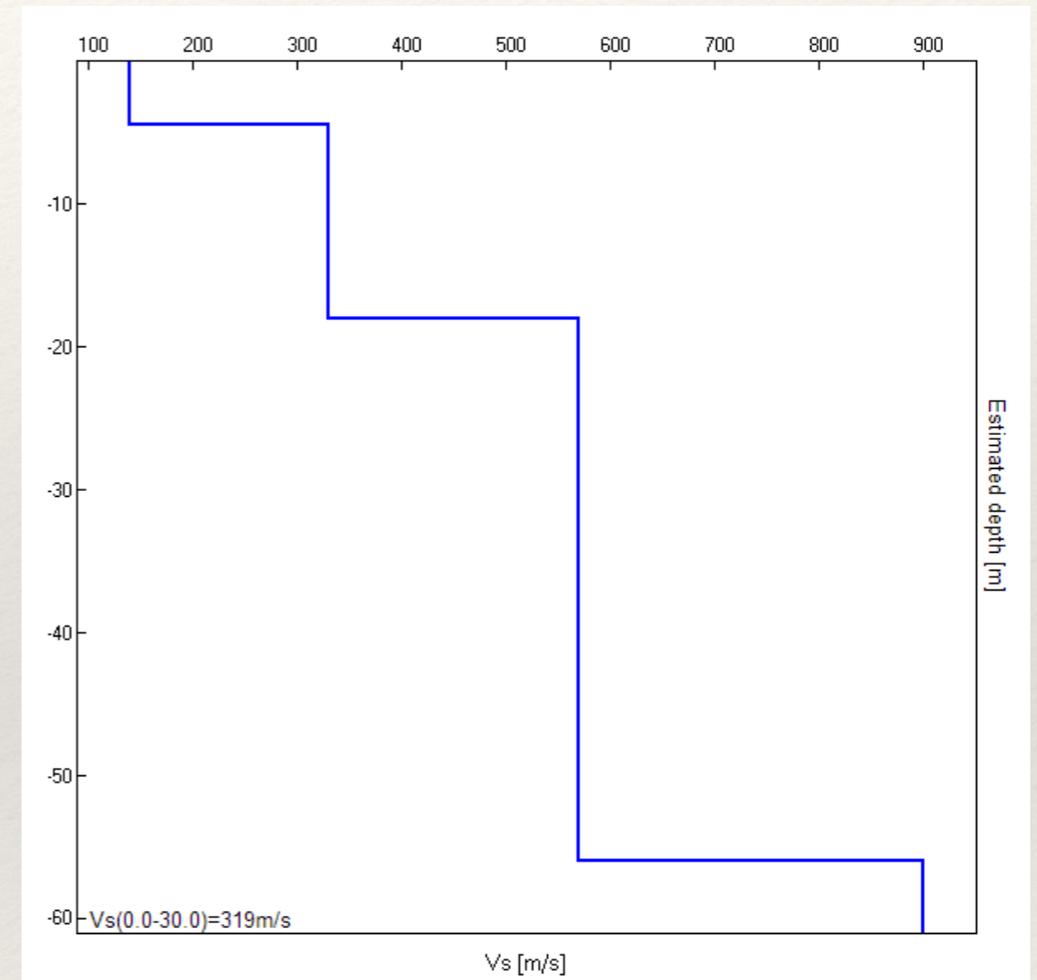
Dr. Geol. Matteo Collareda

# Definizione del modello sismo-stratigrafico a supporto dello studio di Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

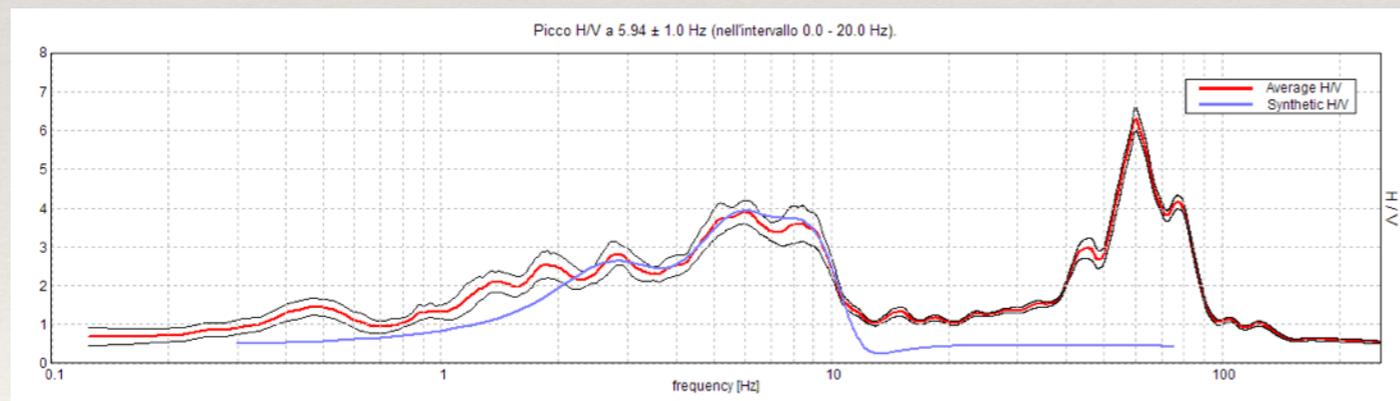
## Risultati ottenuti a Montecarotto



Misura sismica MASW - REMI



Modello sismo stratigrafico (Vs)



Misura sismica HVSR

# Definizione dell'input sismico a supporto dello studio di Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

Lo studio della risposta sismica locale per definire la “spinta sismica” da applicare alle strutture o ai sistemi geotecnici in progetto richiede che l'azione sismica sia rappresentata mediante accelerogrammi che possono essere:

## **Artificiali**

generati mediante algoritmi stocastici (accelerogramma artificiale spettro compatibile)

## **Sintetici**

generati mediante simulazione numerica del processo di rottura e del fenomeno di propagazione delle onde sismiche

## **Naturali (reali)**

registrazioni accelerometriche di eventi sismici

# Scelta del codice di calcolo a supporto dello studio di Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

Il contesto geologico-strutturale, l'assetto morfologico in cui si sviluppa l'intervento in progetto nonché i risultati ottenuti dalle prove condotte ci hanno spinto a condurre una modulazione numerica bidimensionale di Risposta Sismica Locale

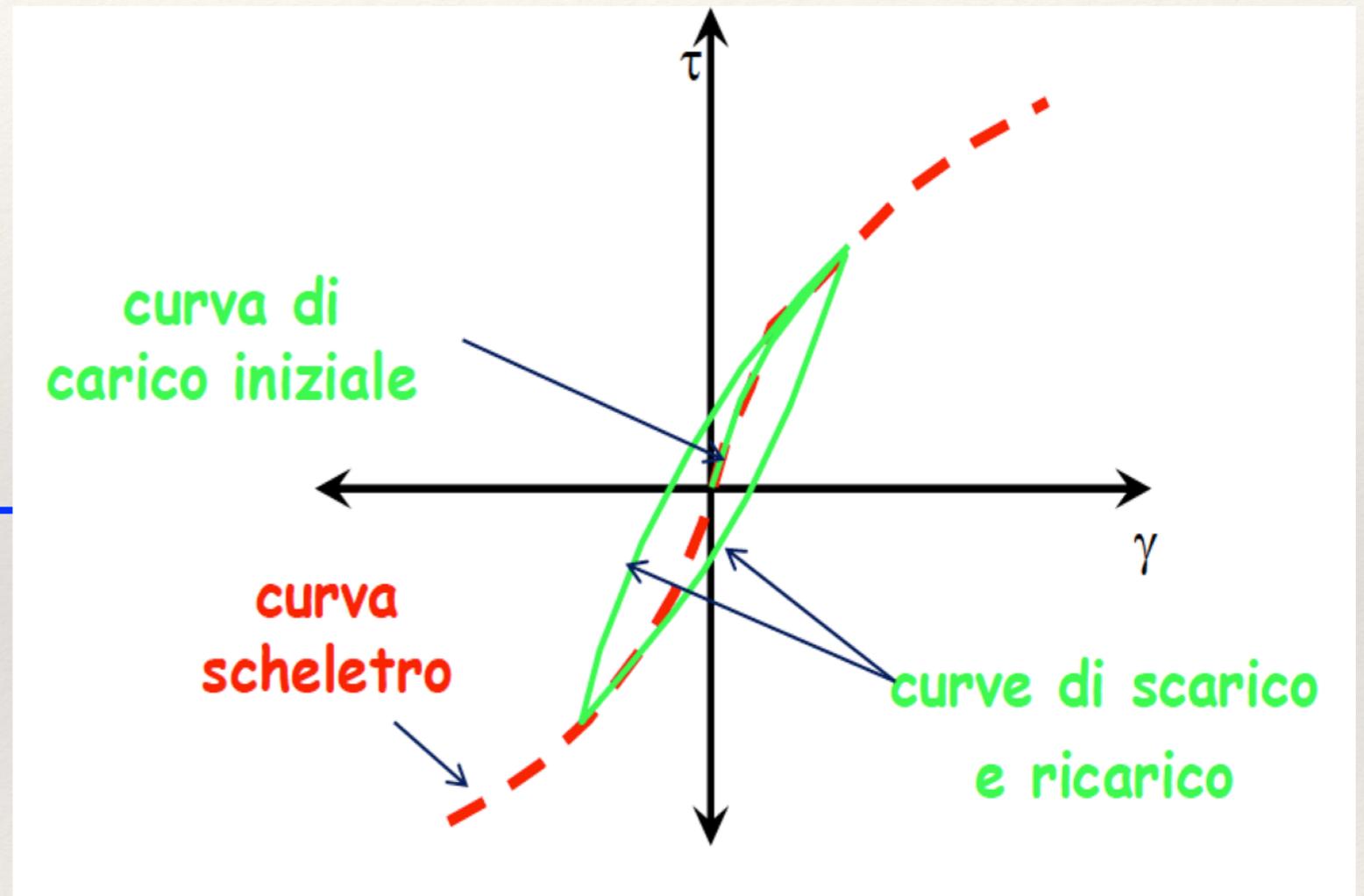
La tecnica di risoluzione numerica adoperata è stata quella alle differenze finite (FDM) implementata nel codice di calcolo FLAC 7.0 (Itasca, 2011), operante nel dominio del tempo. Il codice effettua un'analisi lagrangiana del continuo risolto mediante uno schema di avanzamento temporale di tipo esplicito.

Inoltre, il codice di calcolo permette di modellizzare sia le onde di volume sia quelle di superficie e permette di impostare l'inclinazione della sorgente proveniente sia dall'interno che dall'esterno del modello.

# Scelta del codice di calcolo a supporto dello studio di Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

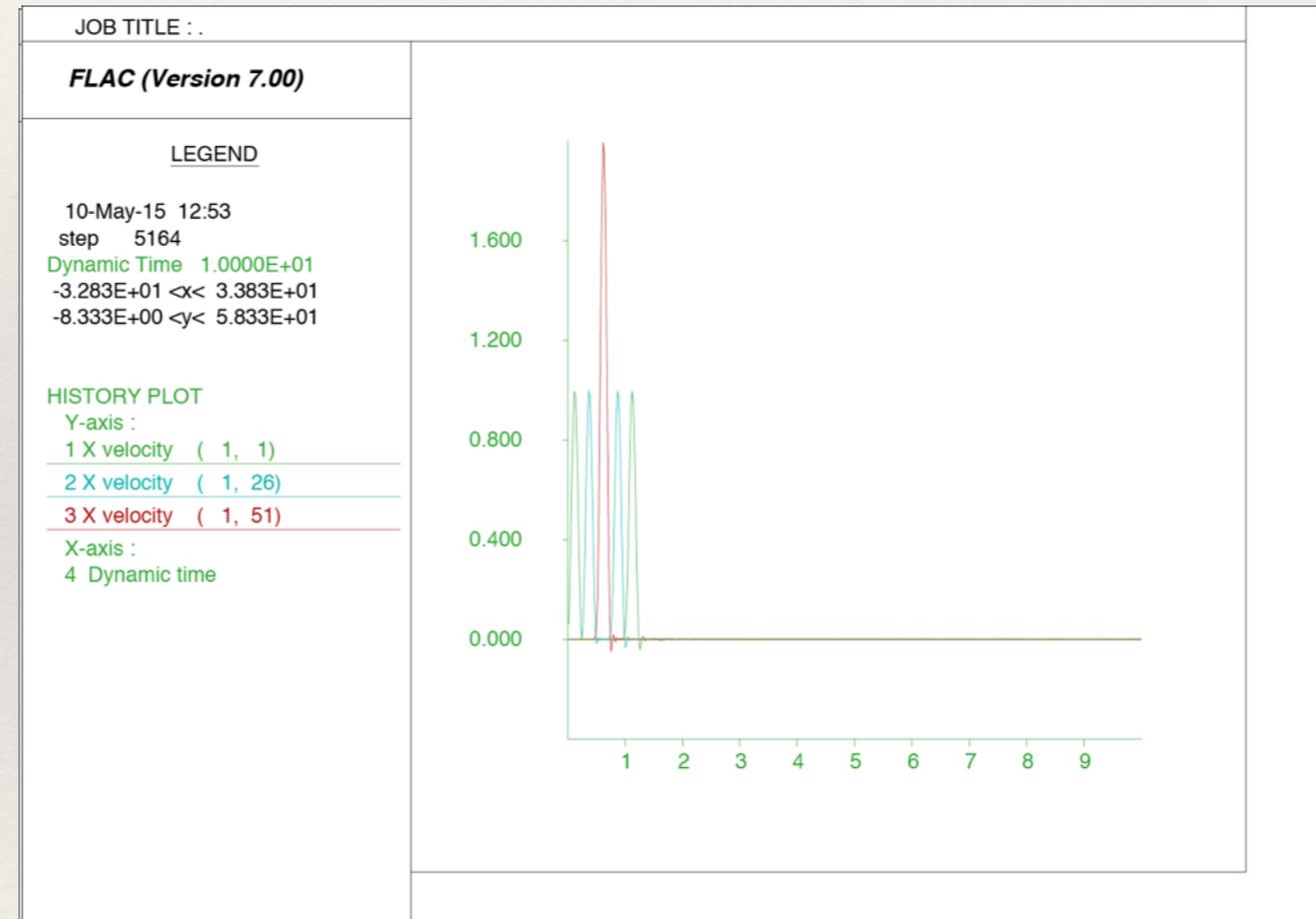
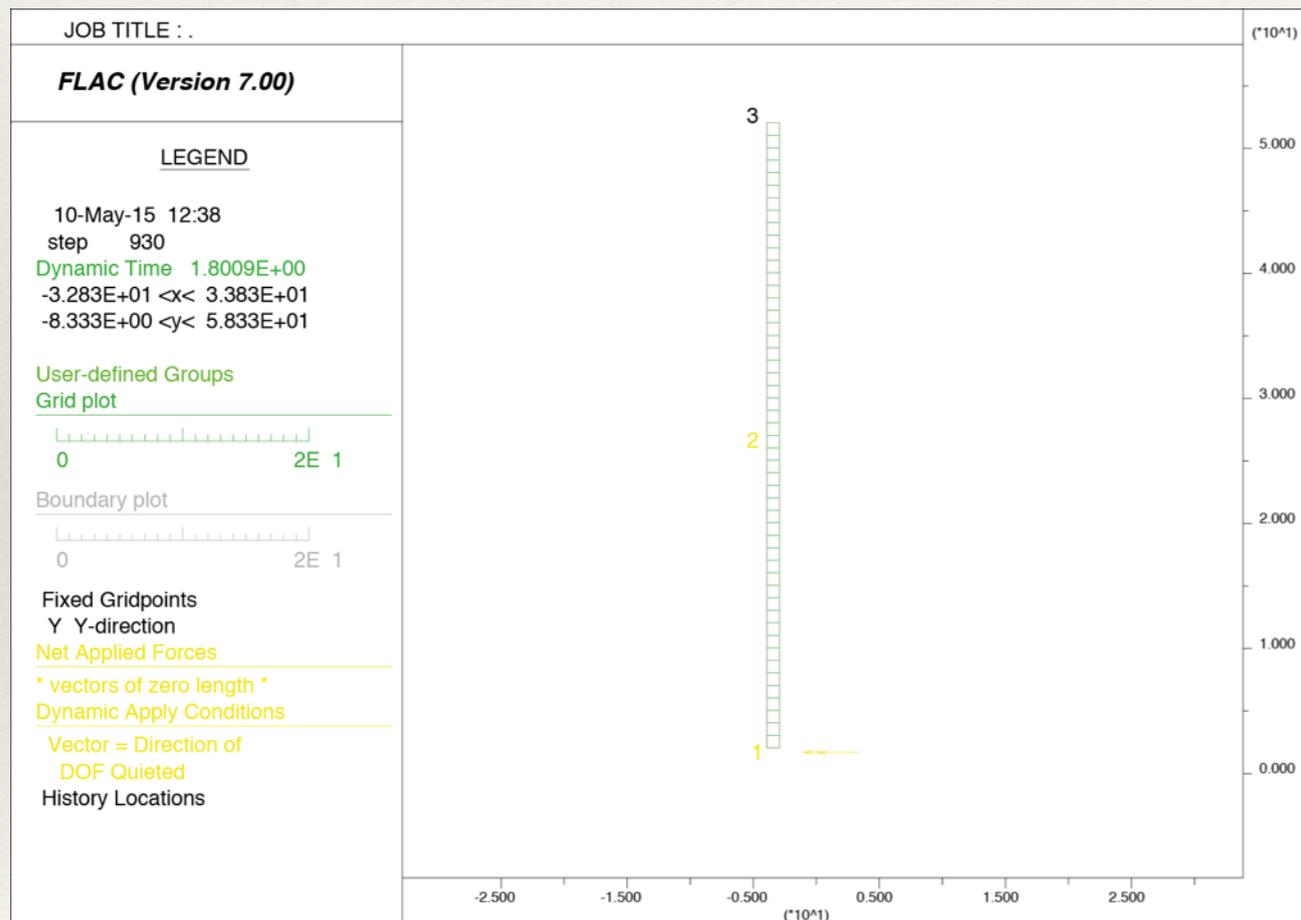
## Comportamento del materiale

- Comportamento elastico
- Comportamento lineare equivalente
- Comportamento non lineare



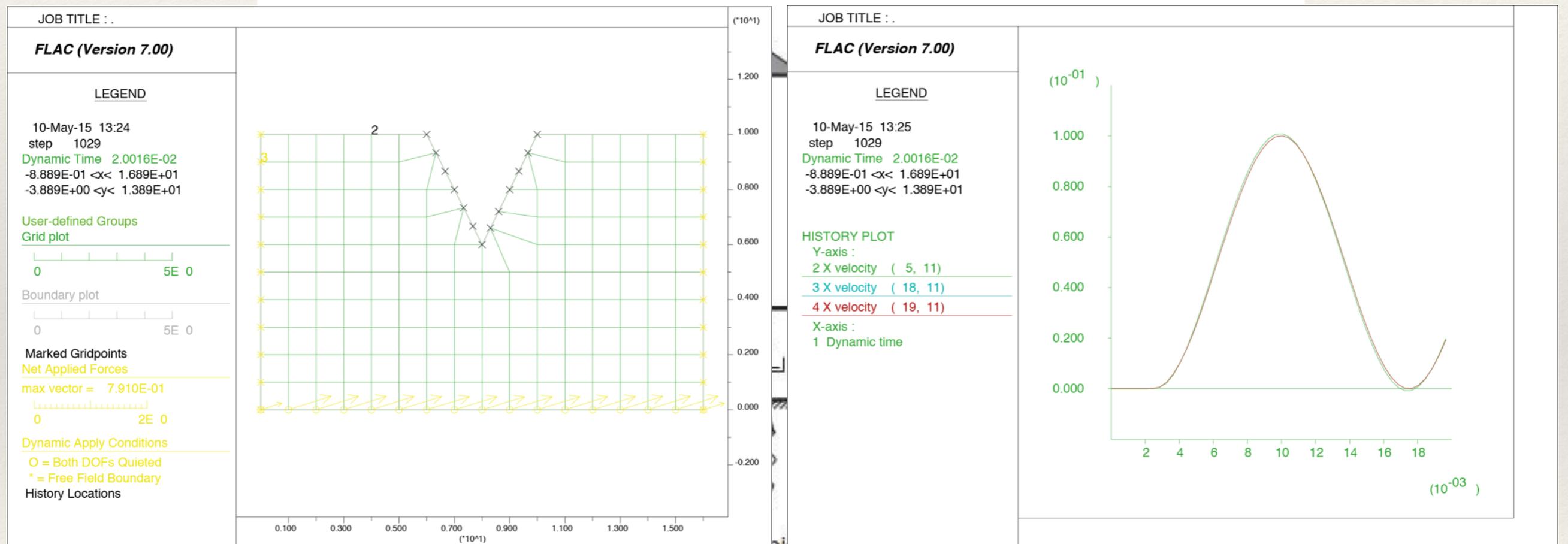
# Scelta del codice di calcolo a supporto dello studio di Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

Utilizzo di smorzatori viscosi alla base del modello permettono di dissipare le onde riflesse dalla superficie



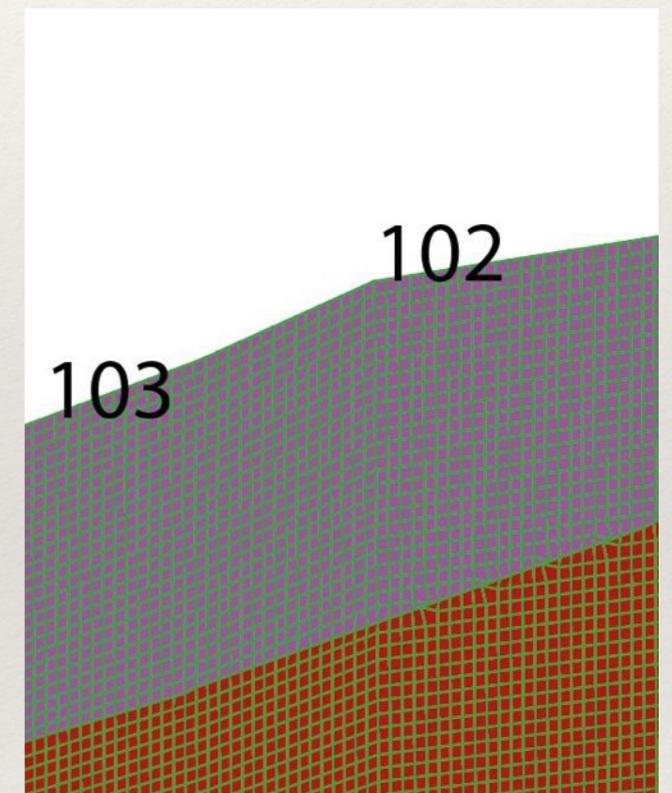
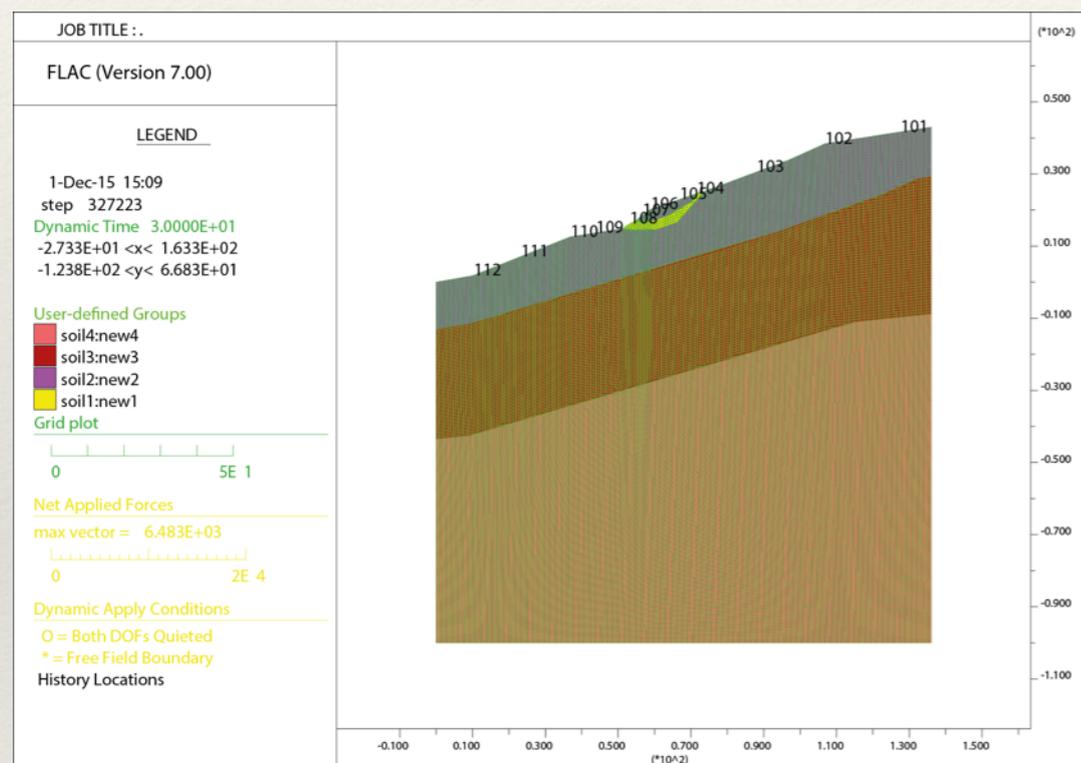
# Scelta del codice di calcolo a supporto dello studio di Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

L'utilizzo di frontiere laterali assorbenti permette di ricreare, in moto accurato, il comportamento dinamico dei terreni



# Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

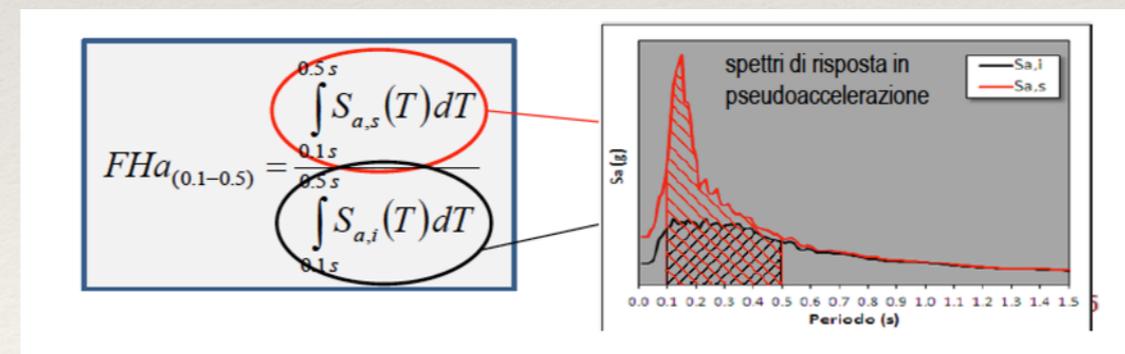
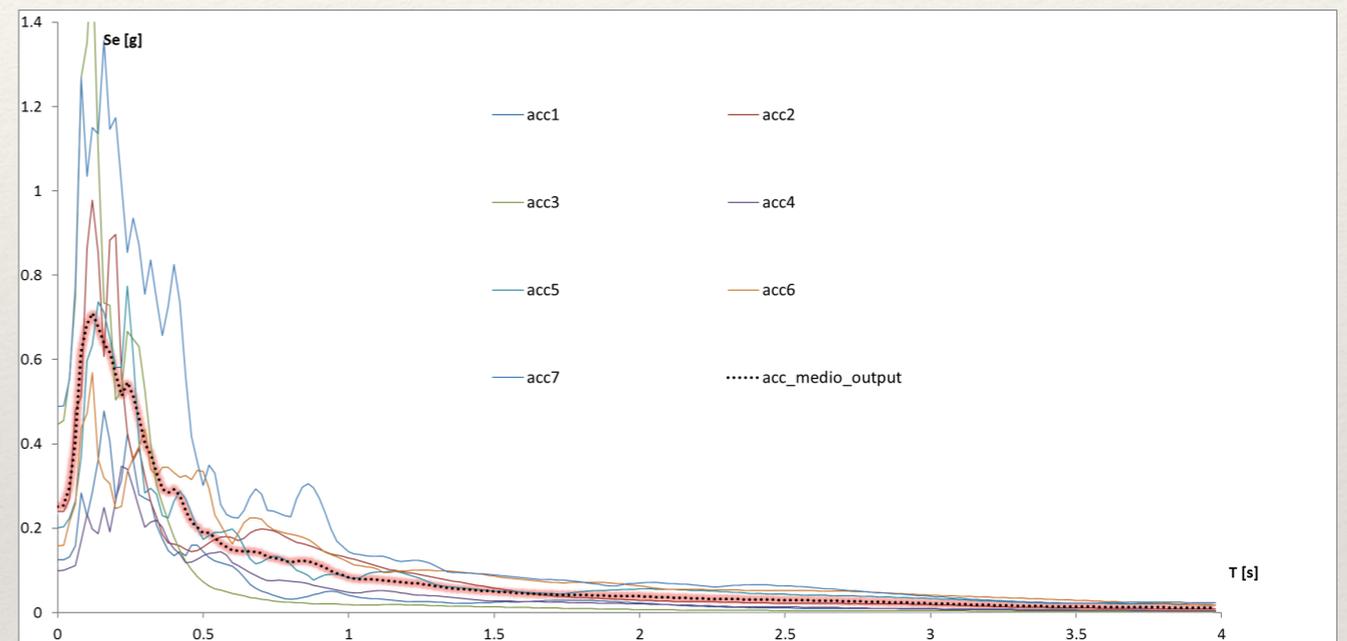
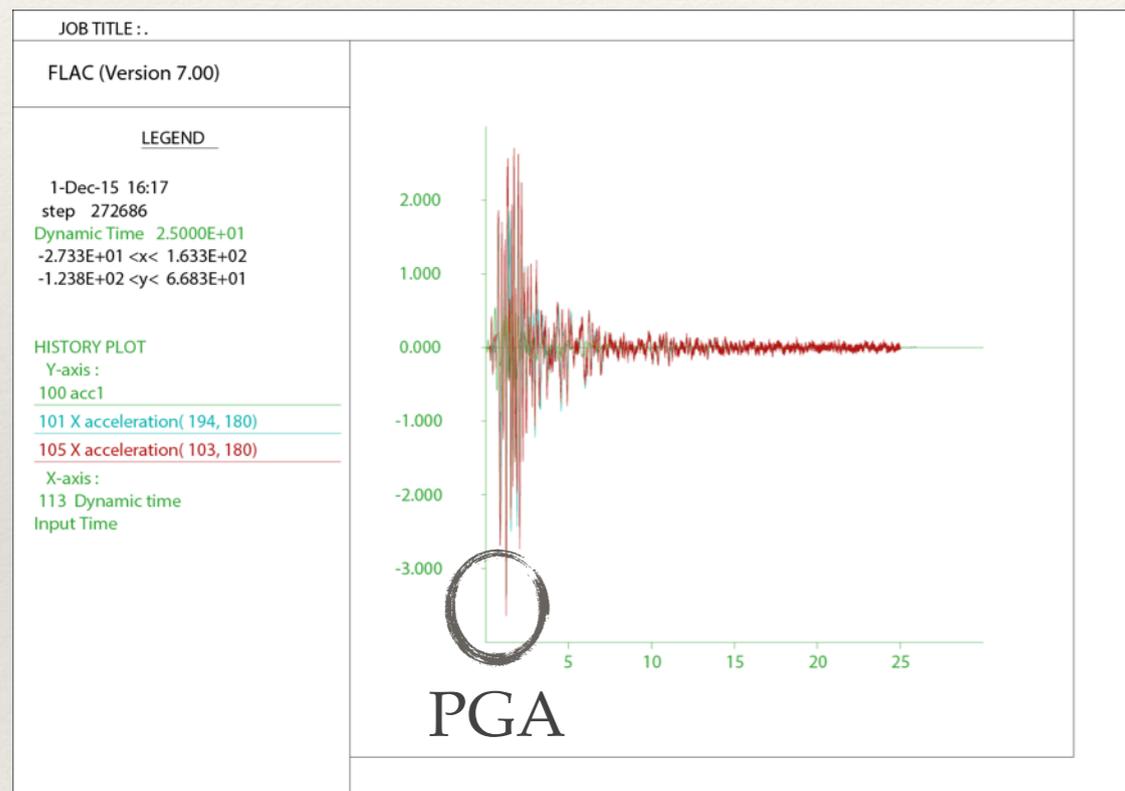
F.L.A.C. - ITASCA (numerical modeling code static and dynamic for advanced geotechnical analysis of soil, rock, and structural support in two dimensions)



- ★ Valori di rigidità ( $V_s$ ) ricavate da indagini condotte
- ★  $G/G_0$  e  $D/D_0$  da curve bibliografiche con verifiche di sensibilità alla RAYLEIGH
- ★ Assetto stratigrafico da misure geofisiche condotte

# Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

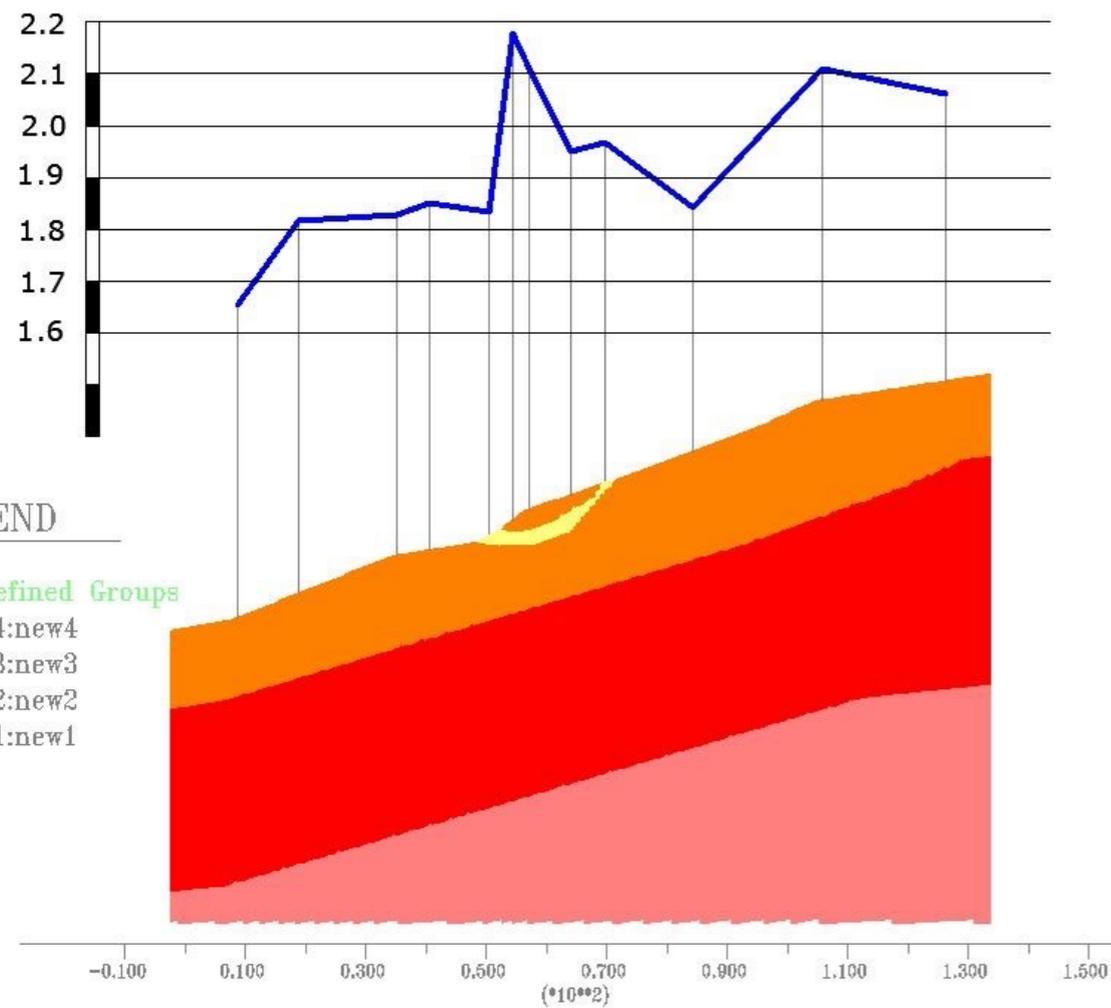
Al fine di riprodurre tutte le possibili condizioni di che si possono presentare in un determinato sito è consigliabile eseguire almeno 3 (meglio 7) simulazioni con altrettanti accelerogrammi



# Risposta Sismica Locale 2D (RSL)

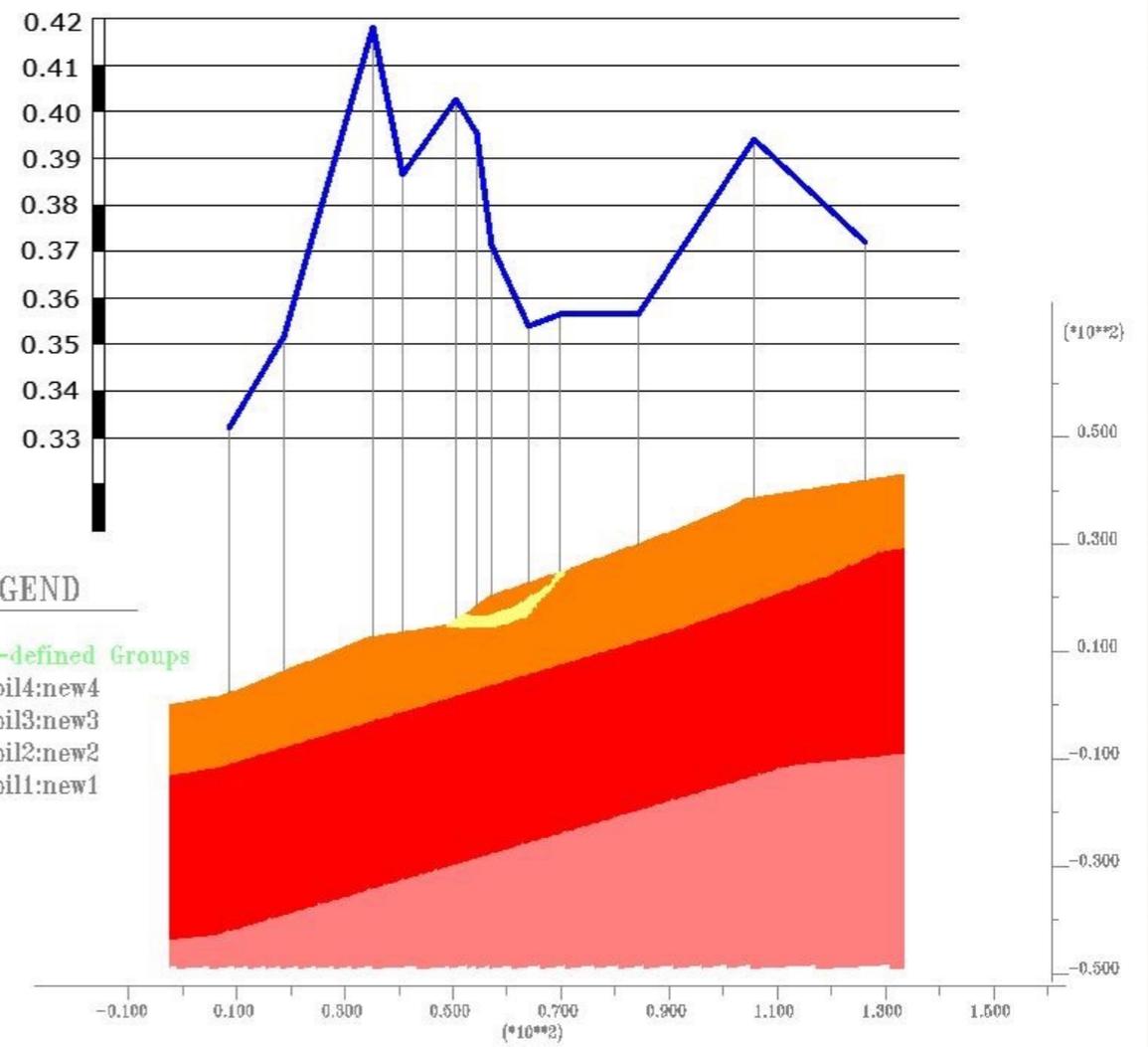
FLAC (Version 7.00) Modello Lineare equivalente

FHa(0,1 - 0,5)s

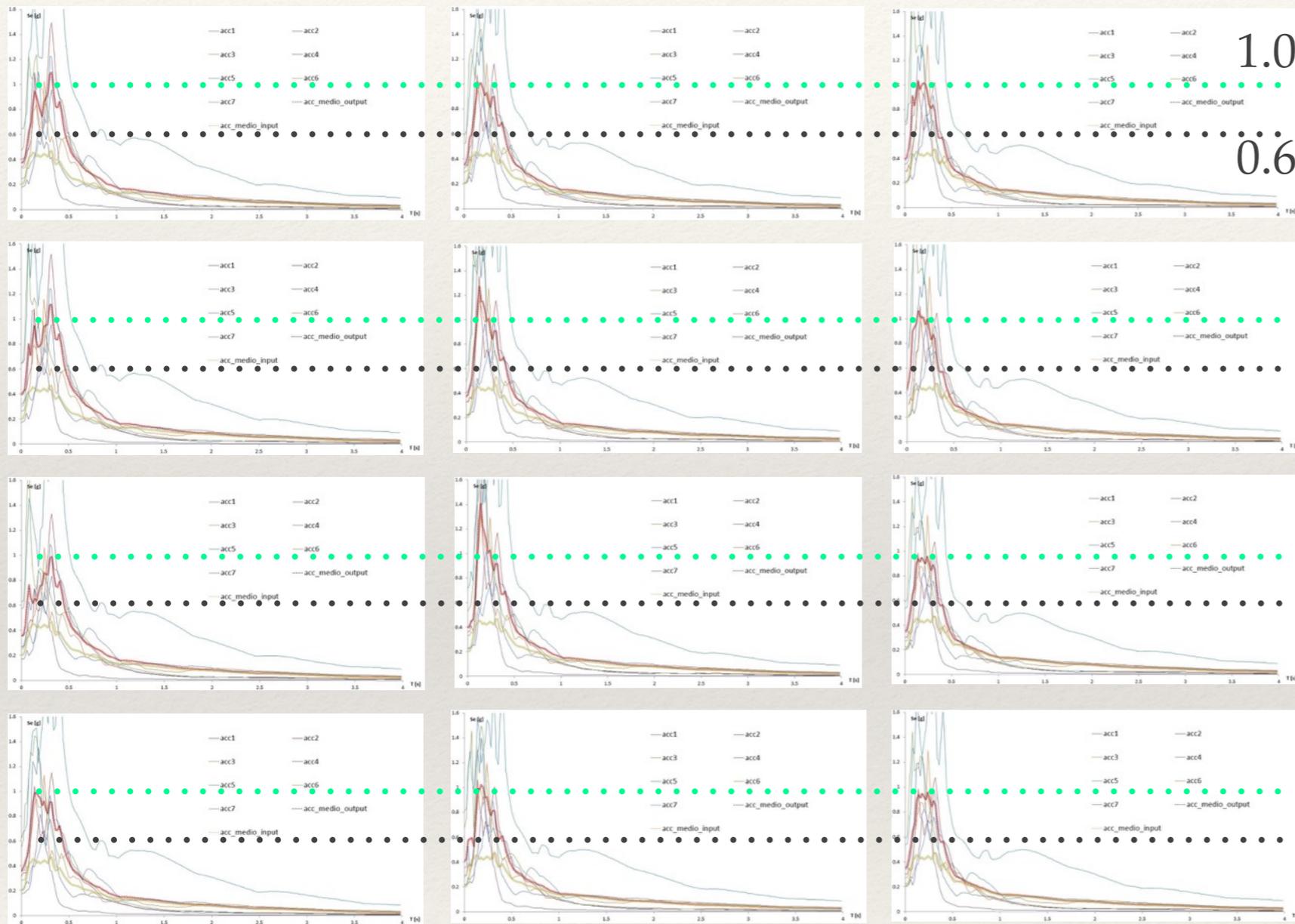


FLAC (Version 7.00) Modello Lineare equivalente

PGA



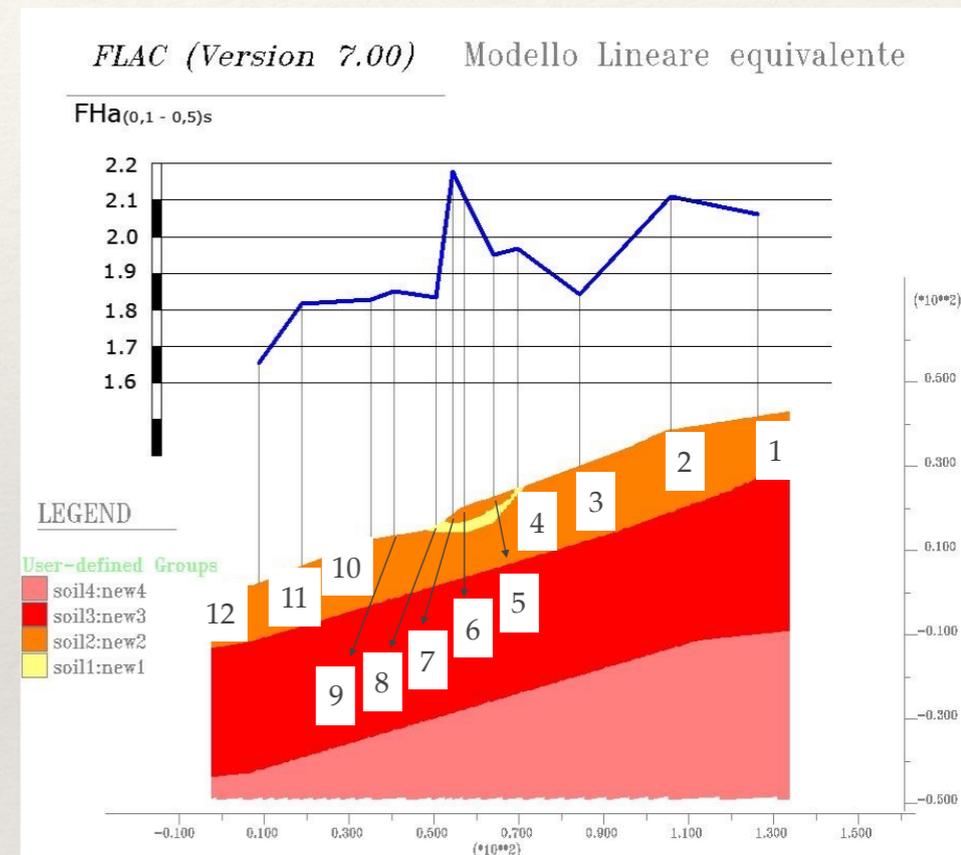
# Risposta Sismica Locale 2D (RSL)



101-104

105-108

109-112



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



Ordine dei Geologi  
Trentino-Alto Adige  
Geologenkammer  
Trentino-Südtirol



Ordine dei Geologi  
Friuli Venezia Giulia



Dr. Geol. Matteo Collareda

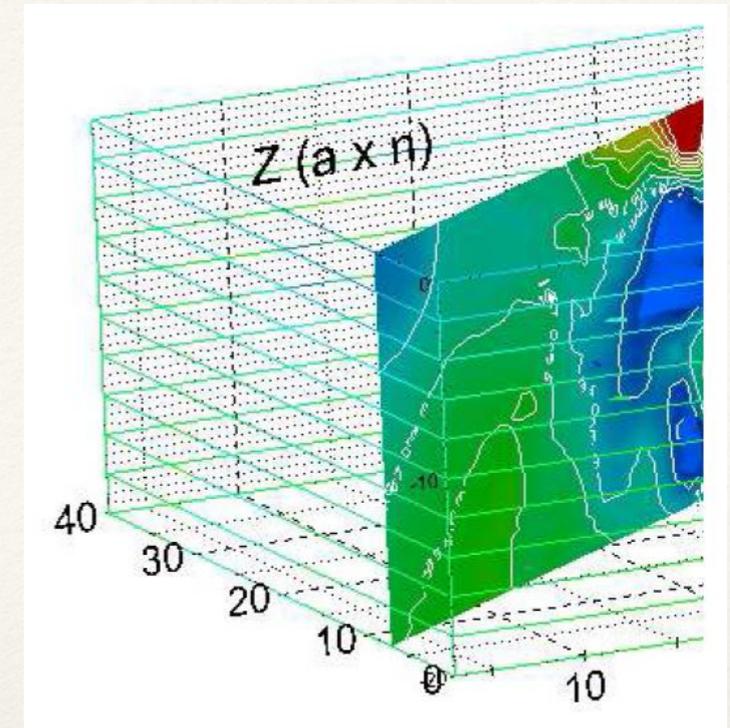
# XII Workshop di Geofisica

## III Giornata di Formazione

Fondazione Museo Civico di Rovereto

Rovereto, Sala conferenze "Fortunato Zeni"

Giovedì 3 e venerdì 4 dicembre 2015



INDAGINI GEOFISICHE AL SERVIZIO  
DELLA PROGETTAZIONE GEOTECNICA

Dr. Geol. Matteo Collareda

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!!!



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



Ordine dei Geologi  
TRENTINO-ALTO ADIGE  
*Geologenkammer*  
TRENTINO-SÜDTIROL



Ordine dei Geologi  
Friuli Venezia Giulia

