

Il Monitoraggio come Strumento di Prevenzione e Mitigazione del Rischio Idrogeologico

Significato e affidabilità di misure nel sottosuolo di pressioni interstiziali e spostamenti

Lucia Simeoni

Università degli Studi di Trento
DICAM - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica

Indice

1. **Premessa: definizioni e fonti di incertezza**
2. **Affidabilità delle misure: conformità dello strumento, ridondanza e coerenza delle misure**
3. **Misura delle pressioni interstiziali sotto falda: Piezometri**
4. **Misura degli spostamenti orizzontali del sottosuolo: Inclinatori**

Trascuriamo:

Misura delle pressioni interstiziali sopra falda: tensiometri

Misura degli spostamenti verticali del sottosuolo: Estensimetri



Monitoraggio = esecuzione di **misure** e **osservazioni** ripetute nel tempo con **strumenti** adeguati

a supporto dell'

Ingegneria Geotecnica = **progettazione**
costruzione
gestione
di opere geotecniche

con la finalità di **ridurre il rischio** associato al raggiungimento della condizione di **collasso** (SLU) o alle **limitazioni d'uso** dell'opera (SLE).

2. Misura

Informazione costituita da un numero, un'incertezza ed un'unità di misura, assegnata a rappresentare un parametro in un determinato stato del sistema.

La misura di un parametro (nel particolare stato cui si riferisce) lo rappresenta mediante un'intera *fascia di valore* (2.1) che viene generalmente identificata indicandone l'elemento centrale come valore del parametro e l'*ampiezza* (2.1.1) come incertezza. Nel caso singolare della misura di un parametro evanescente si ha una *misura nulla* che rappresenta il parametro mediante un'intera *fascia di zero* (2.1.3), identificata indicando il *valore nullo* (2.2.1), che non ne costituisce necessariamente l'elemento centrale e l'*incertezza di zero* (2.3.2). Le misure non nulle si dicono *finite*.

Esempi

— *Misura della lunghezza di un'asta a facce planparallele, appoggiata su supporti definiti e libera da vincoli, effettuata a 20 ± 1 °C: $322,5 \pm 0,1$ mm*

Il parametro viene rappresentato dall'intera fascia compresa tra 322,4 e 322,6 mm, che costituisce la misura della lunghezza dell'asta: l'unità di misura è il millimetro, 322,5 mm è l'elemento centrale della fascia; $\pm 0,1$ mm è l'incertezza; la fascia viene designata indicando l'elemento centrale e l'incertezza.

— *Misura dell'emissione totale di una sorgente radioattiva: 897 ± 30 particelle alfa emesse su 4π sr in 10 s*

Il parametro viene rappresentato dall'intera fascia compresa tra 867 'eventi' e 927 'eventi' che costituisce la misura dell'emissione totale: l'unità di misura, trattandosi di una grandezza di tipo numerale, è la designazione precisa dell'evento' rivelato e contato.

— *Misura della posizione del centro dell'alesaggio sul piano della testata di un blocco motore, riferita a coordinate cartesiane: 100 ± 1 mm; 200 ± 2 mm*

Il parametro viene rappresentato dall'intera superficie rettangolare i cui vertici hanno le seguenti coordinate: (99; 198), (99; 202), (101; 202), (101; 198), la quale superficie costituisce la misura della posizione del punto in questione.

(segue)

Indica quanto la misura si avvicina al valore vero della grandezza misurata.

Sinonimo: grado di correttezza.

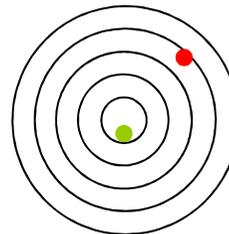
Si valuta durante la taratura mediante il confronto con un “valore vero” definito da uno strumento di accuratezza nota, verificata e accettata come standard.

L'accuratezza si esprime con “±”

± 1 mm

± % (valore vero)

± % FS (full scale)



● è più accurato di ●

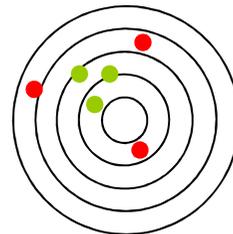
Indica quanto ciascuna misura di un campione di misure si avvicina al valore medio.

Sinonimo: riproducibilità o ripetibilità.

Si valuta eseguendo più misure.

La precisione si esprime con “±”

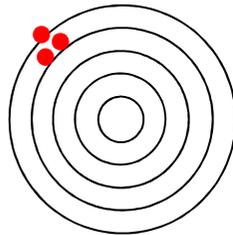
± 1 mm è peggiore di 1.0 mm è peggiore di 1.00 mm



● è più preciso di ●

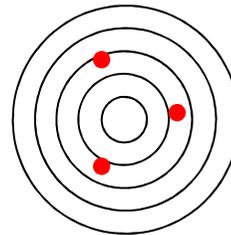
1. Definizioni:

Preciso e/o accurato?



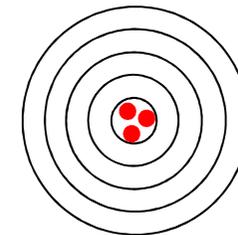
1

**Preciso, ma non
accurato
(errore sistematico)**



2

**Non preciso, ma accurato
in media (errore accidentale)**



3

Preciso e accurato

Errore (Error):

Si riferisce alla deviazione della misura dal valore vero e si distingue in:

Errore grossolano

Errore sistematico (~accuratezza)

Errore accidentale (~precisione)

1. Definizioni: Curva di taratura (Calibration curve)

Relazione tra grandezza ingegneristica e (generalmente) grandezza elettrica che minimizza l'entità dell'errore commesso (stima ai minimi quadrati).

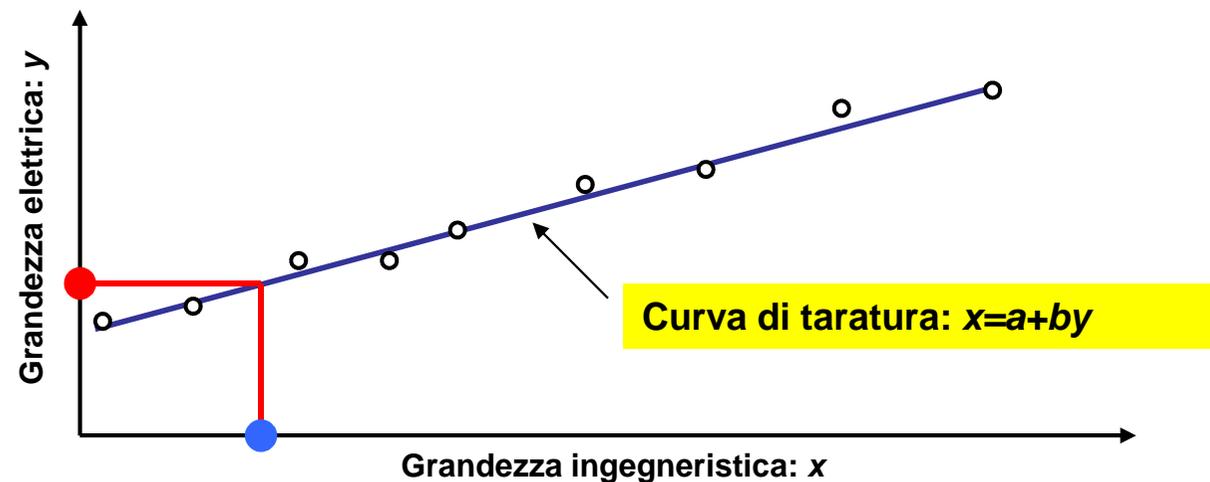
La relazione può essere:

Lineare

Polinomia (test t-Student per significatività dei coefficienti)

Esponenziale

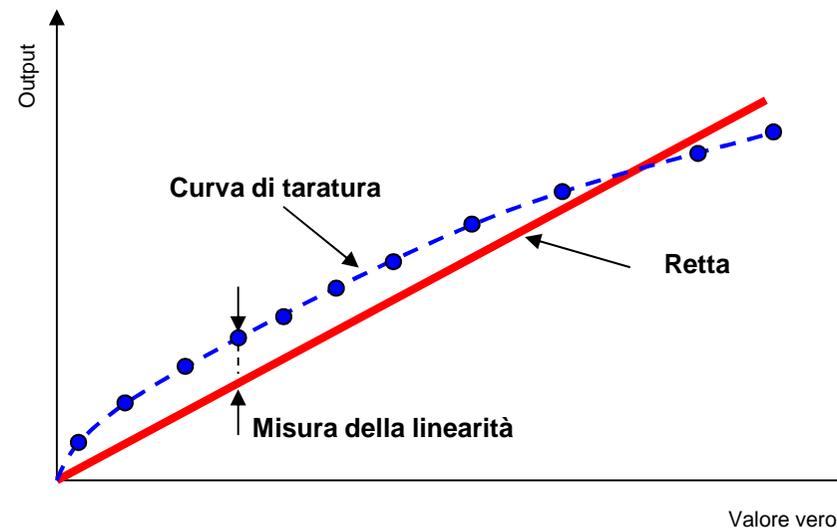
...



Uno strumento si dice lineare quando la misura (output dello strumento) è direttamente proporzionale alla quantità che si sta misurando (valore vero).

La linearità è la massima distanza tra la reale curva di taratura e la retta che descrive il comportamento lineare dello strumento.

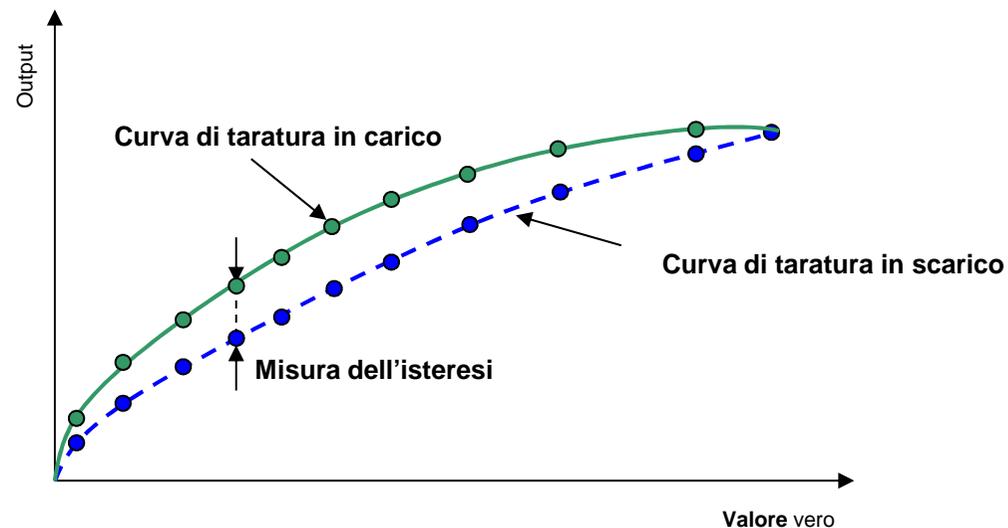
La linearità si esprime come %FS



Il comportamento di uno strumento potrebbe essere diverso se studiato in fase di incremento o decremento della grandezza che si sta misurando.

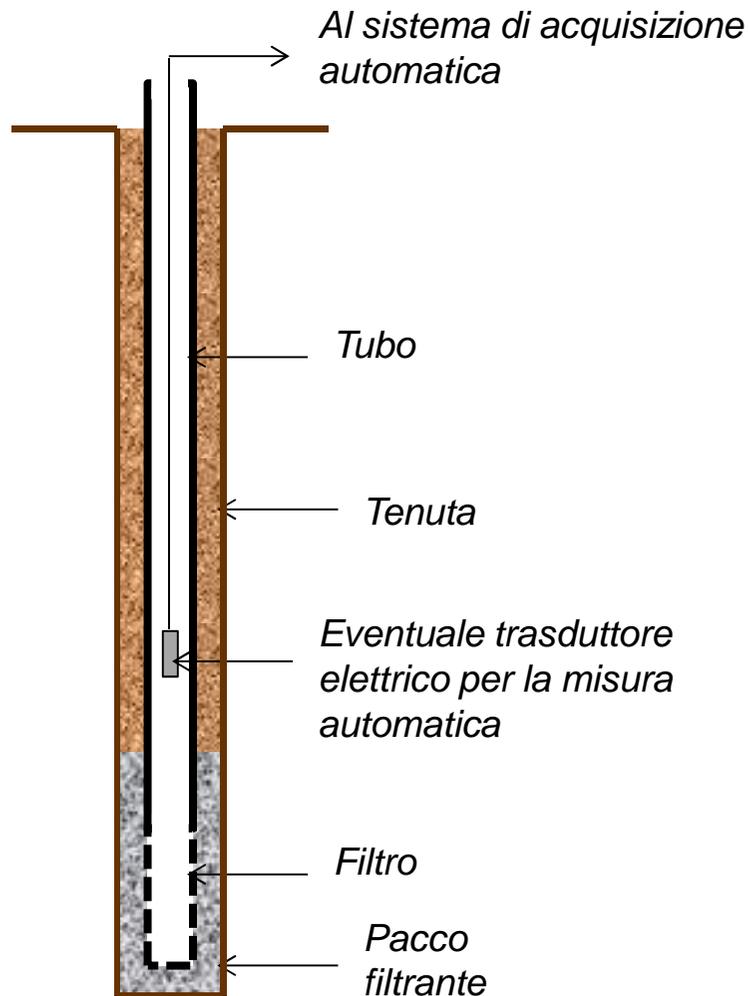
L'isteresi è la massima differenza tra la curva di taratura in carico e quella in scarico ed è importante quando lo strumento è utilizzato per misurare grandezze con variazioni cicliche.

L'isteresi si esprime come %FS

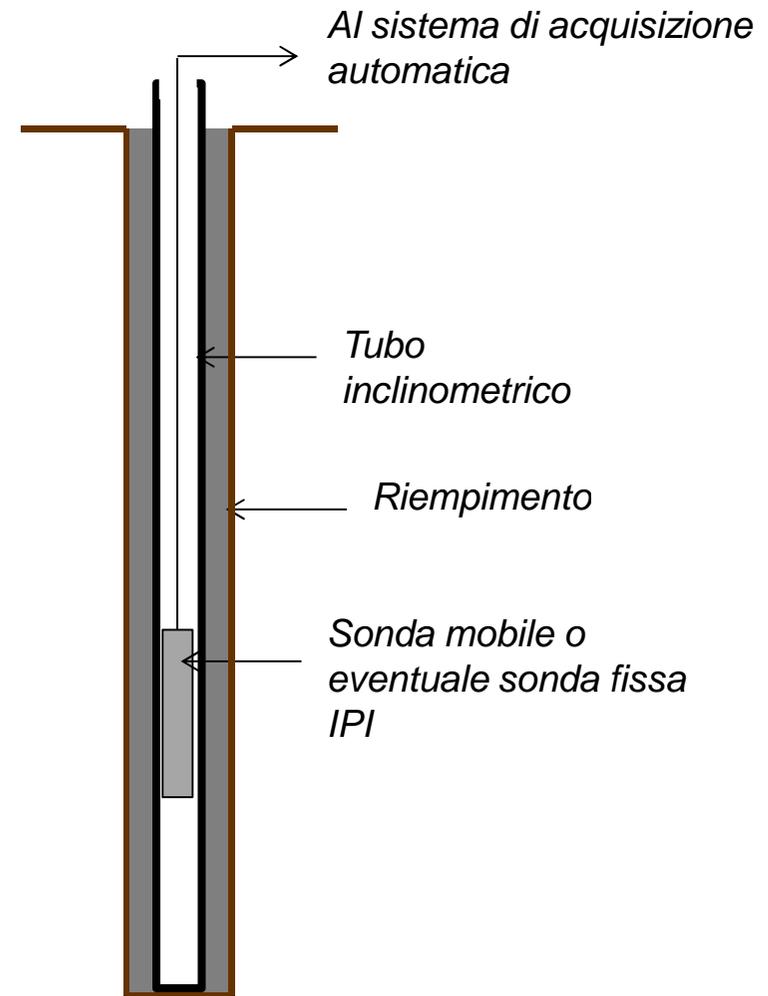


1. Fonti di incertezza: Architettura degli strumenti

PIEZOMETRO A SISTEMA APERTO

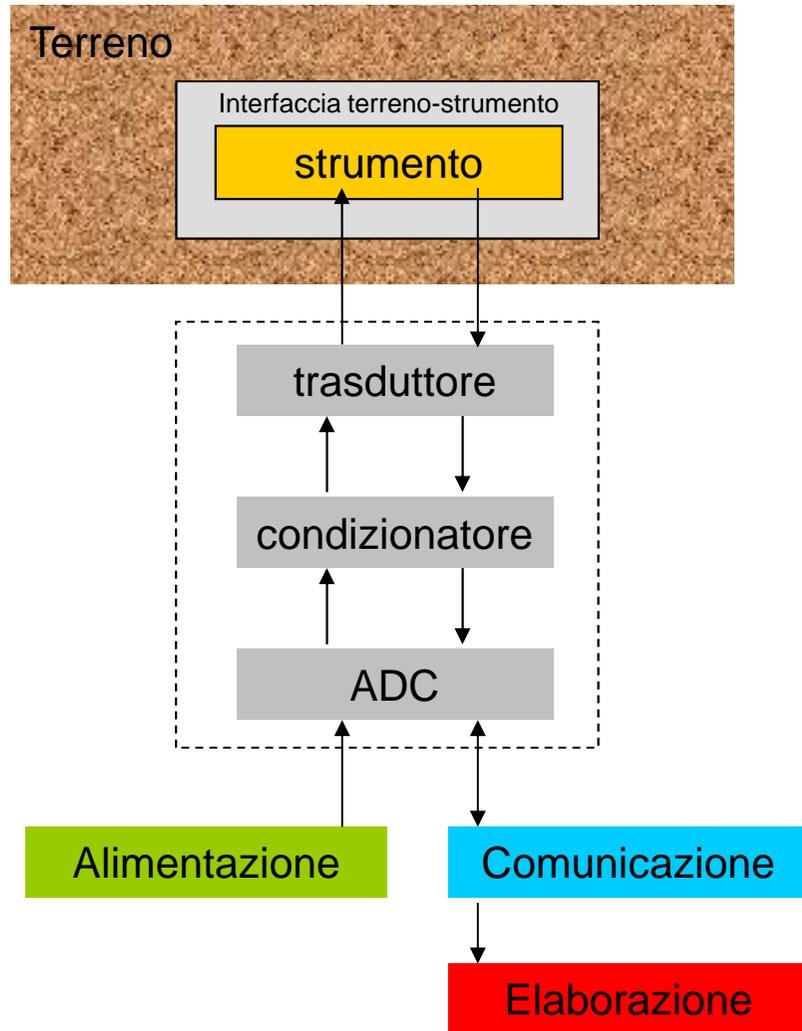


INCLINOMETRO



1. Fonti di incertezza: Architettura degli strumenti

Composizione di un sistema di monitoraggio



Incertezza della misura

Interazione terreno-strumento:
Conformità dello strumento
(modalità d'installazione). **Accuratezza**

Taratura, Conversione Analogico-Digitale,...
Effetti ambientali (temperatura,...).

Caratteristiche metrologiche:
Risoluzione, Precisione, Accuratezza della misura

Effetti ambientali (sovratensioni, temperatura, umidità, rumori, ...).
Accuratezza, Precisione

Table 7.1. Causes and Remedies of Measurement Error

Type of Error	Causes	Remedies
Gross error	Inexperience Misreading Misrecording Computational error	Care Training Duplicate readings Dual observers Checking against previous readings
Systematic error	Improper calibration Loss of calibration Hysteresis Nonlinearity	Use of correct calibration Recalibration Use of standards Use of consistent reading procedures
Conformance error	Inappropriate installation details Instrument design limitations	Select appropriate instrument Modify installation procedure Improve instrument design
Environmental error	Weather Temperature Vibration Corrosion	Record environmental changes and apply corrections Make correct choice of instrument materials
Observational error	Variation between observers	Training Use of automatic data acquisition systems
Sampling error	Variability in the measured parameter Incorrect sampling techniques	Install a sufficient number of instruments at representative locations
Random error	Noise Friction Environmental effects	Correct choice of instrument Temporary elimination of noise Multiple readings Statistical analysis
Murphy's law	If something can go wrong, it will	None—any attempt to remedy the situation will only make things worse

ACCURATEZZA

PRECISIONE



2. Affidabilità della misura: Errori fatali...

Alonso, E. E. & Gens, A. (2006). *Géotechnique* 56, No. 3, 165–183

Aznalcóllar dam failure. Part 1: Field observations and material properties

Gens, A. & Alonso, E. E. (2006). *Géotechnique* 56, No. 3, 185–201

Aznalcóllar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism

Gens, E. E. Alonso & A. (2006). *Géotechnique* 56, No. 3, 203–210

Aznalcóllar dam failure. Part 3: Dynamics of the motion

E. E. ALONSO* & A. GENS*

The paper de
southern Spai
forward and
The geology an
The results of
on the tailing
high-plasticity
is paid to the
and to the str
foundation cla
basis of the fic
ured geotechni

KEYWORDS: c
shear strength

An analysis of the conditions that led to Aznalcóllar dam failure is made in the paper. Conditions prevailing in the foundation clay at the time of failure have been established on the basis of field observations made after the failure. A stability analysis is first presented to determine the evolution of shear stresses along the failure plane. Both limit equilibrium and finite element analyses are used to back-analyse the failure and to determine tentative strength parameters along the failure plane. Three-dimensional effects introduced by the failure of the foundation clay are then examined. The failure is examined in the paper from the perspective offered by the knowledge of the strength and deformation characteristics of the clay. The significance of progressive failure is discussed in relation to other factors that played a significant role in the failure: the homogeneous nature and very low plasticity of the foundation clay and the natural bedding probably affected by some initial damage to the available strength along bedding planes.

KEYWORDS: clays; dams; plasticity; pore water pressure; shear strength

The motion of the Aznalcóllar dam slide, after the initiation of the failure, is examined in the paper. The moving mass remained essentially rigid, and Newton's second law provides the basic equation to determine the resulting dam displacement, velocity and acceleration. Resisting forces have been derived from a previous analysis of the conditions leading to failure. Pore water pressures induced by the forward motion of the dam are approximated as an undrained loading of the clay. Driving forces and their evolution in time derive from the liquefaction of tailings and the condition of constant volume of the sliding mass. A model is developed to reproduce the stable sliding motion of the dam inside the tailings lagoon. The model is able to reproduce the distance travelled by the dam. It shows a low sensitivity to the choice of the main parameters. The model computes that the slide motion lasted about 15 s and that the maximum acceleration experienced by the dam was about 0.14g.

KEYWORDS: case history; clays; dams; failure; liquefaction; pore water pressure; shear strength

Nous examinons dans cet exposé le mouvement du glissement du barrage d'Aznalcóllar au début de la rupture. La masse en mouvement est restée essentiellement rigide et la seconde loi de Newton donne l'équation élémentaire permettant de déterminer le déplacement, la vitesse et l'accélération qui en ont résulté. Les forces résistantes ont été dérivées d'une précédente analyse des conditions menant à la rupture. Les pressions d'eau interstitielle provoquées par le déplacement en avant du barrage sont représentées approximativement comme un chargement non drainé de l'argile. Les forces d'entraînement et leur évolution en temps viennent de la liquéfaction des déchets résiduels et de la condition de volume constant des déchets résiduels liquéfiés qui poussent le barrage en avant. Le 'falaise' stable laissée par le mouvement à l'intérieur du lagon de déchets résiduels confirme cette hypothèse. Le modèle est capable de bien reproduire la distance parcourue par le barrage. Il montre une faible sensibilité aux changements raisonnables des principaux paramètres. Le modèle calcule que le mouvement de glissement a duré environ 15 secondes et que l'accélération maximum subie par le barrage a été de 0.14g.

2 rotture di tailings dam / all'anno!!!

www.wise-uranium.org

www.stava1985.it



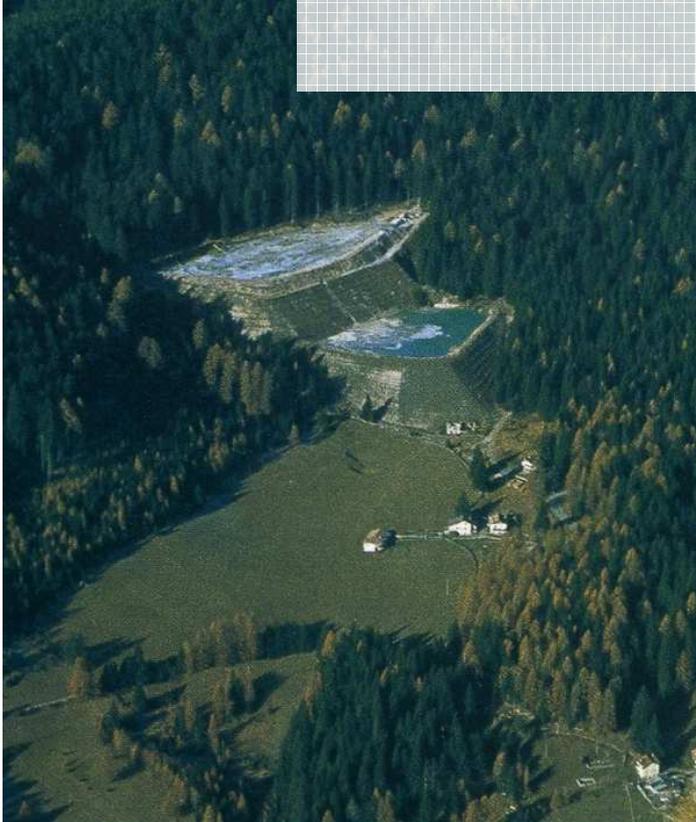
Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brasile

5 nov 2015

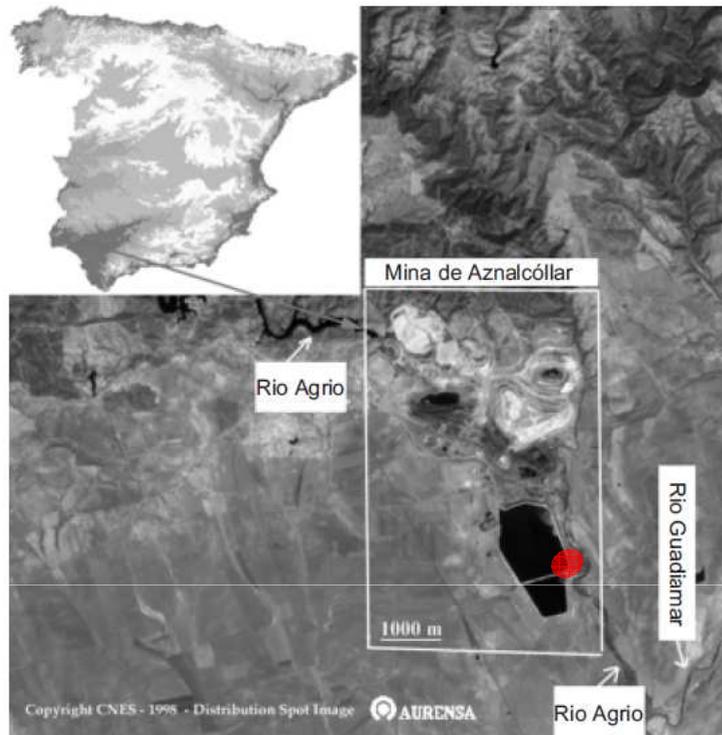


Stava, Tesero (TN)

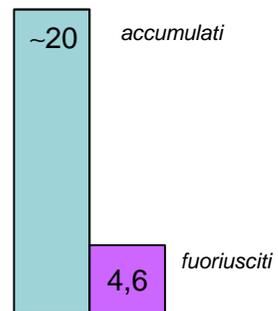
19 lug 1985



LA TAILINGS DAM DI AZNALCÓLLAR



Volume tailings
(milioni m³)



(a)



(b)

Fig. 4. Two aerial views of the breached dam a few hours after the failure: (a) view from the east; (b) detail of the breach

LA TAILINGS DAM DI AZNALCÓLLAR

1996: inizio monitoraggio

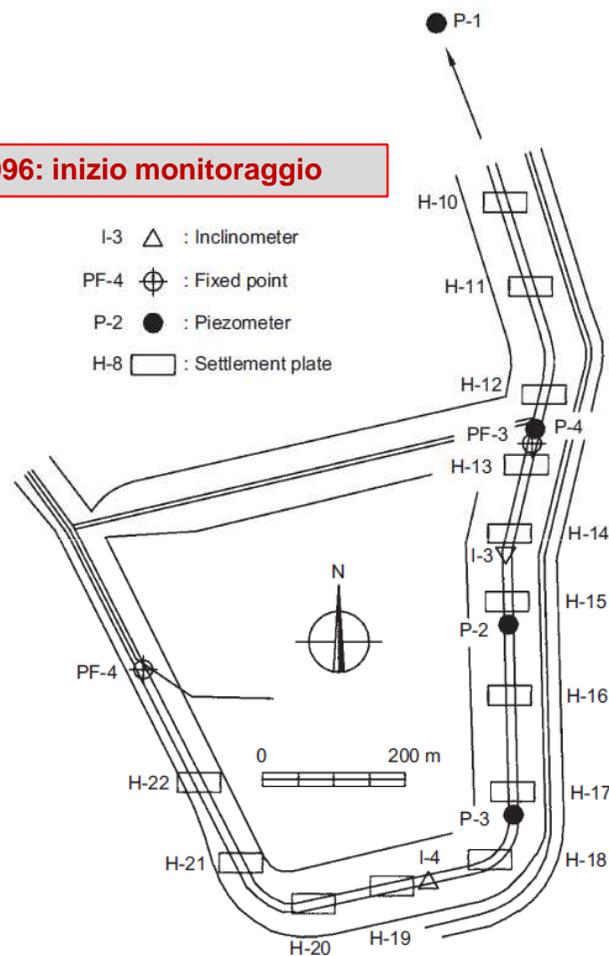
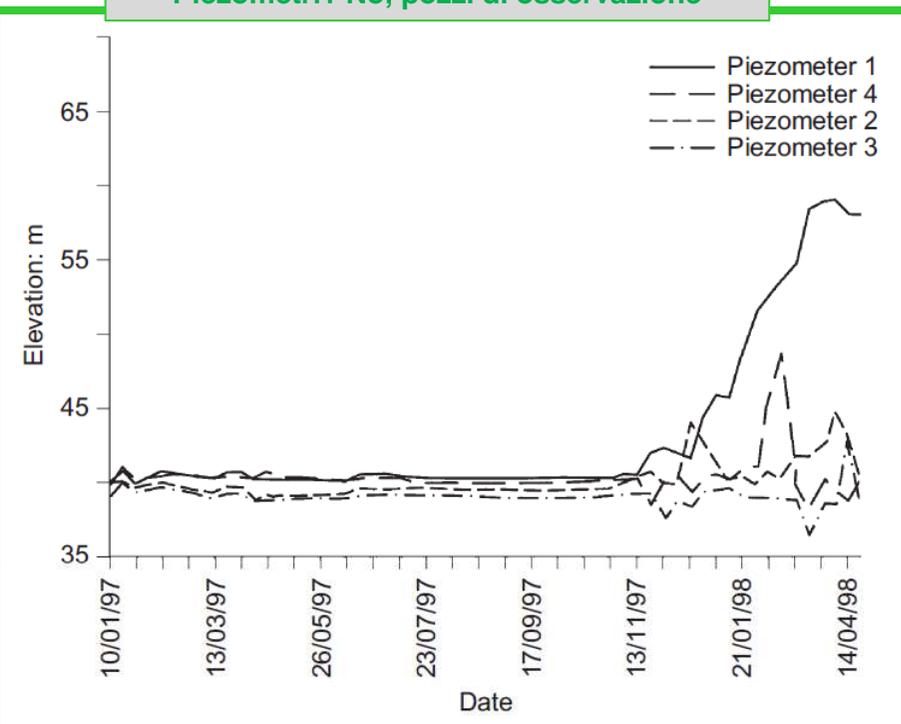


Fig. 13. Position of monitoring instruments: south-eastern side of Aznalcóllar dam

Piezometri? No, pozzi di osservazione



FIELD OBSERVATIONS PRIOR TO THE DAM FAILURE

Following the recommendations of an evaluation, in 1996, of the dam safety, a monitoring programme was set up. Fig. 13 shows, in plan view, the position of the instruments in the length of the embankment later affected by the failure. Settlement plates, **piezometers (in fact observation wells)** and a few inclinometers were located along the crest of the embankment (a few fixed points, shown as PF in Fig. 13, were used as a reference for plate levelling). Great signifi-

LA TAILINGS DAM DI AZNALCÓLLAR

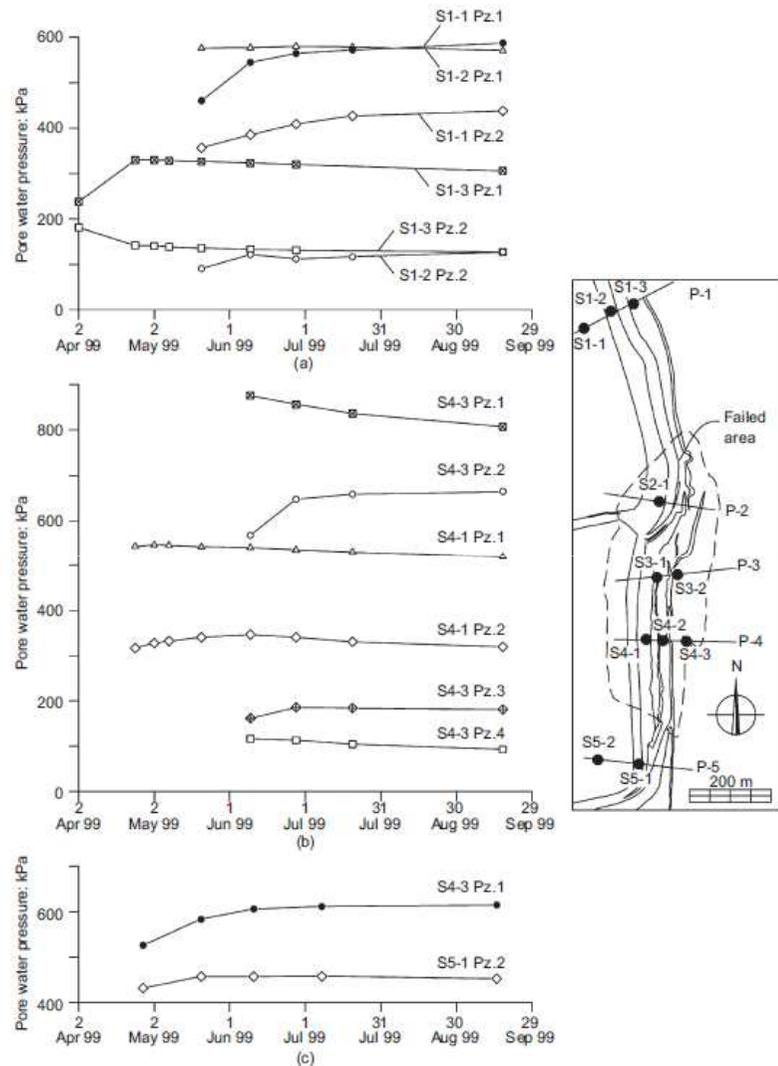


Fig.4. Evolution of pore water pressure in piezometers located at different depths in boreholes corresponding to: (a) Profile 1; (b) Profile 4; (c) Profile 5

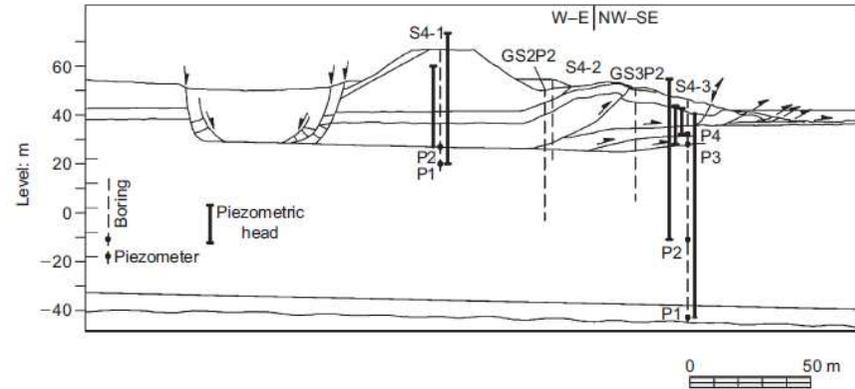


Fig. 5. Pore water pressure measured in piezometers located in Profile 4 (in borings S4-1 and S4-3). Other borings indicated helped to identify the position of sliding surfaces, shown in the plot. The graph also shows the soil profile and the geometry of the displaced dam after failure

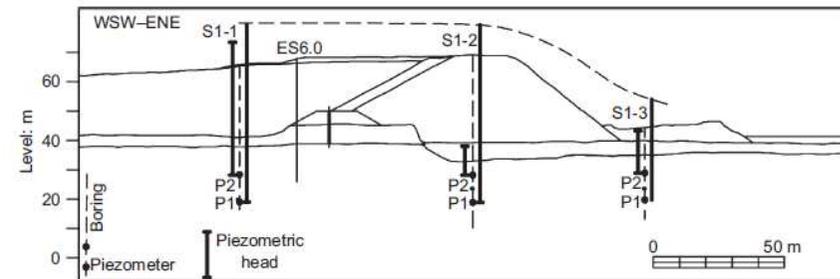
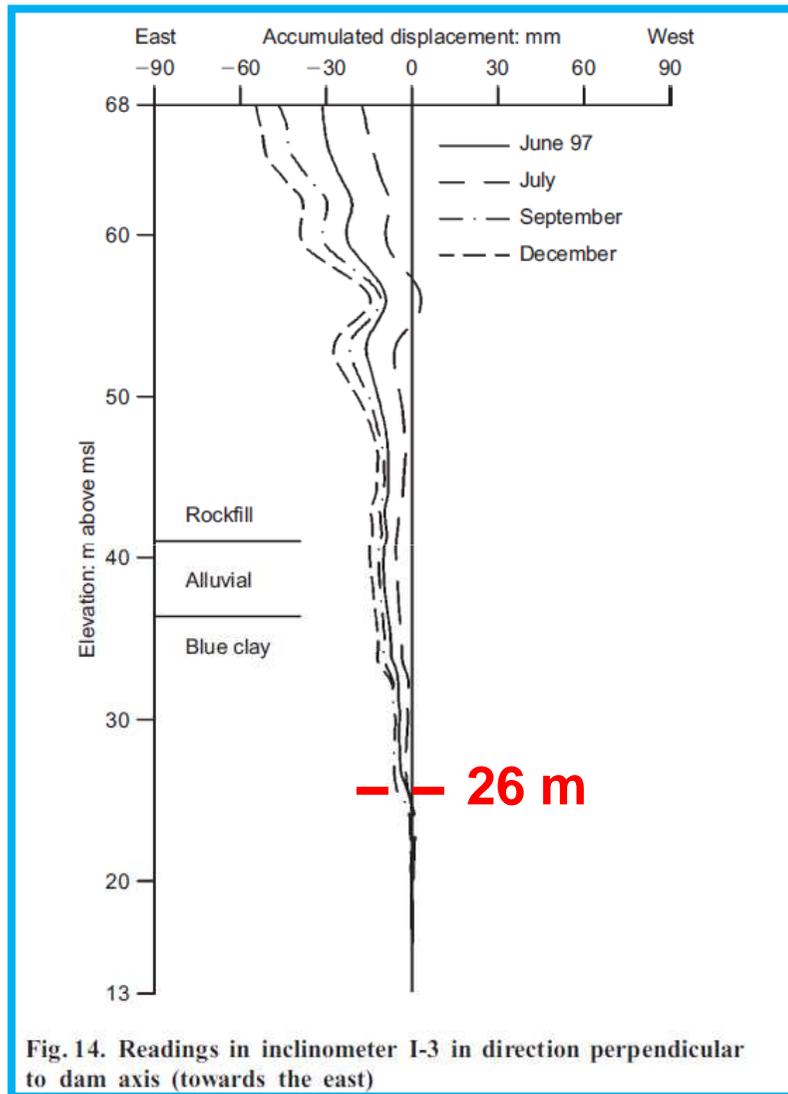


Fig. 6. Pore water pressures measured in piezometers located in borings S1-1, S1-2 and S1-3 in Profile 1 (not affected by the failure). The graph shows also the level of tailings after the failure and the soil profile

LA TAILINGS DAM DI AZNALCÓLLAR



Inclinometro I3
Nessuna interpretazione!

Inclinometer I-3 was located approximately at the centre of the section of the embankment that slid towards the river at the time of failure. A few readings were made during December 1996–December 1997. They are shown in Fig. 14. The locations of the rockfill/alluvial and alluvial/clay interfaces are shown in the figure. Unfortunately, the upper part of the inclinometer was damaged in January 1998, and no data for the months immediately preceding the failure are available. The displacements shown in Fig. 14 were not interpreted, at the time of readings, as a sign of a possible deep sliding. It was later established, after the failure, that a sliding surface developed at elevation 26 m. Six millimetres of displacements accumulated at this elevation during the year 1997. Most of the observed displacements were recorded within the rockfill embankment, which was under construction.

LA TAILINGS DAM DI AZNALCÓLLAR

LA SUPERIFICIE DI ROTTURA

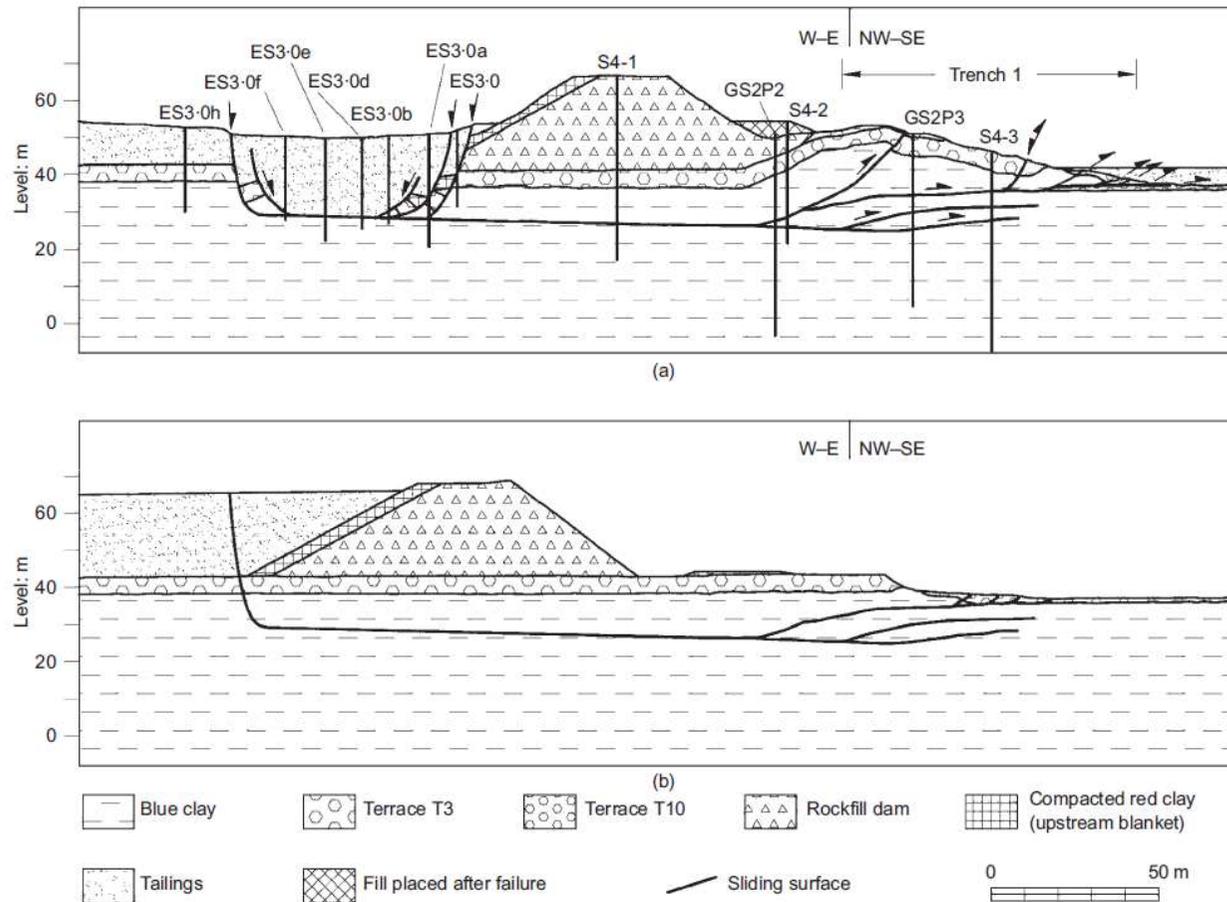
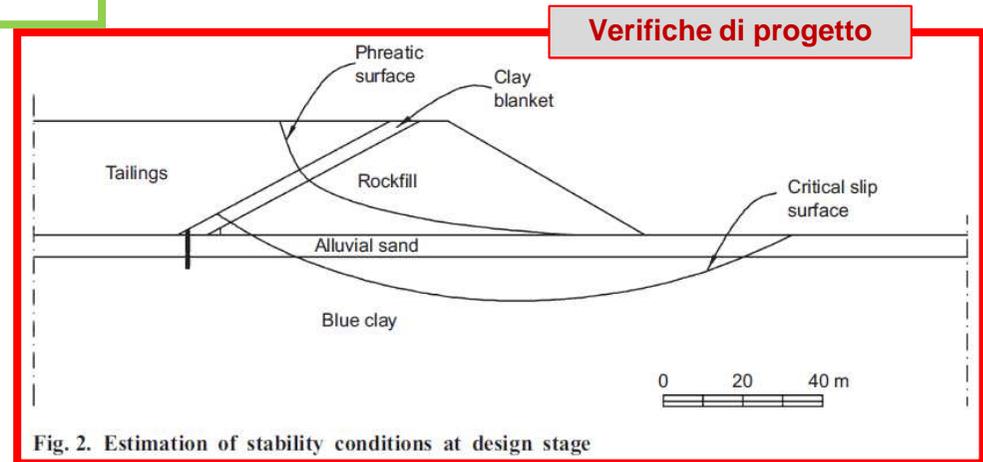
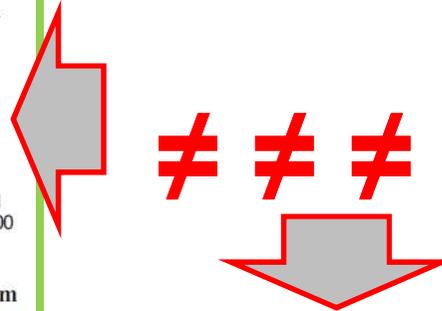
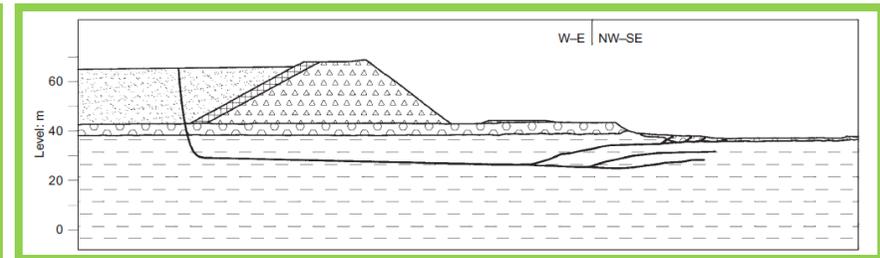
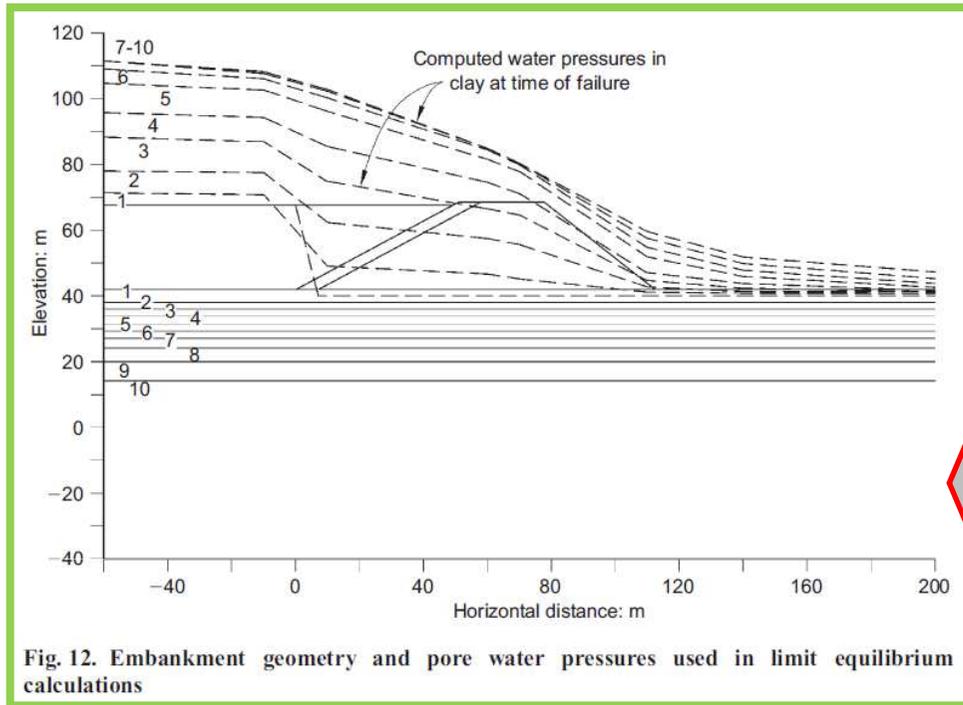


Fig. 17. Cross-section of slide at position of Profile 4: (a) geometry after the slide, as interpreted from borehole results and surface topography; (b) reconstruction of position of sliding surfaces before failure

LA TAILINGS DAM DI AZNALCÓLLAR

VERIFICHE DI STABILITÀ DI PROGETTO E DOPO IL CROLLO



2. Affidabilità delle misure: conformità, ridondanza e coerenza

Caratteristiche:

Conformità dello strumento:
capacità dello strumento di non alterare il valore della grandezza che sta misurando.

Ridondanza del sistema:
capacità del sistema di monitoraggio di fornire misure della stessa grandezza con strumenti diversi.

Azioni:

Valutazione e controllo della conformità mediante la progettazione delle modalità di installazione.

Analisi della ridondanza delle misure mediante il confronto di misure della stessa grandezza.

Analisi della coerenza delle misure mediante il confronto di misure di grandezze diverse a descrivere coerentemente lo stesso fenomeno.

3. Misura delle pressioni interstiziali sotto falda

Piezometri



Significato delle misura

COMPORAMENTO DEL TERRENO SOTTO FALDA

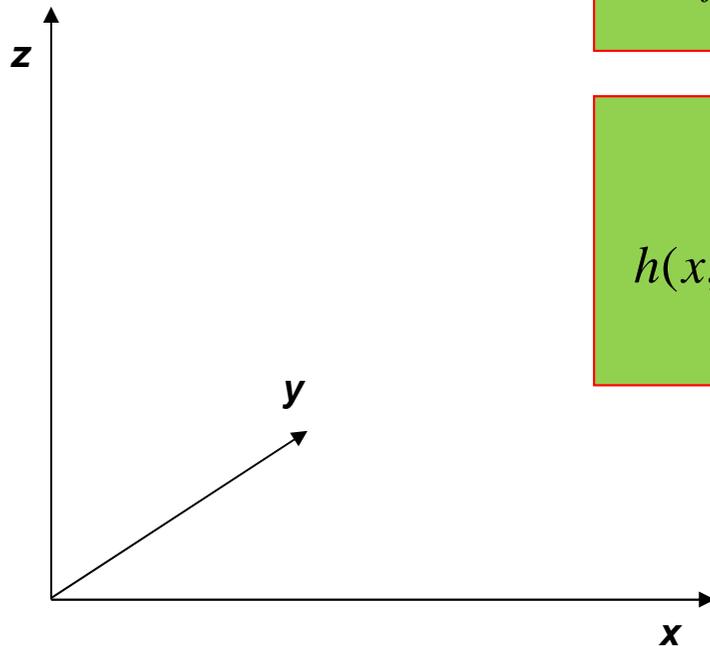
Il comportamento del terreno sotto falda dipende dalle variazioni degli sforzi efficaci:

Sforzo efficace

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u\delta_{ij} \quad \forall (x, y, z)$$

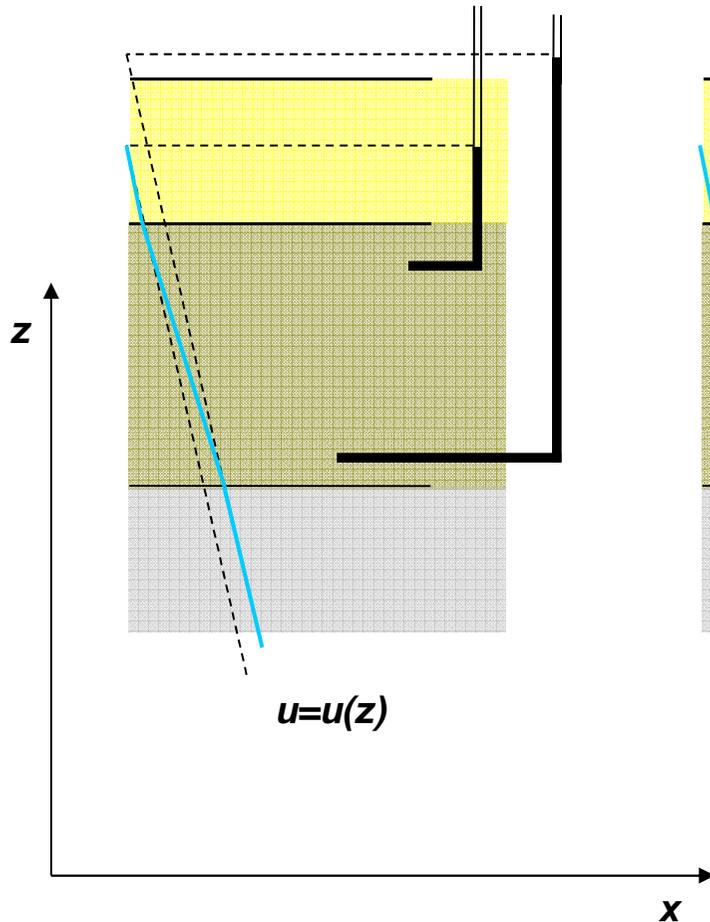
Quota piezometrica

$$h(x, y, z, t) = z + \frac{u(x, y, z, t)}{\gamma_w}$$

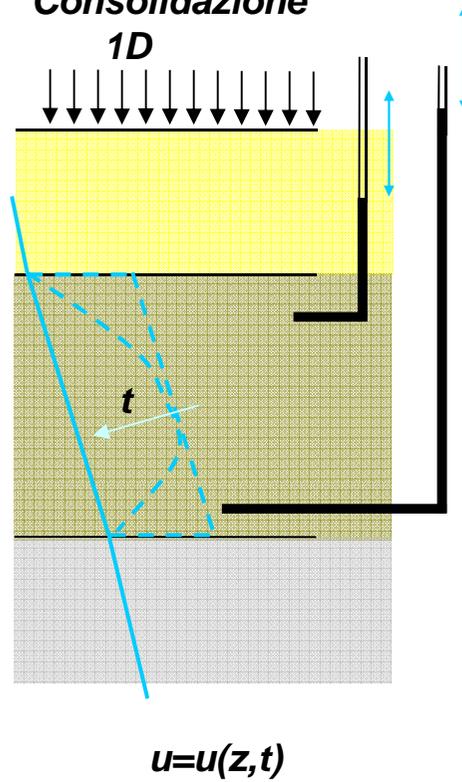


ALCUNI PROBLEMI DI FILTRAZIONE

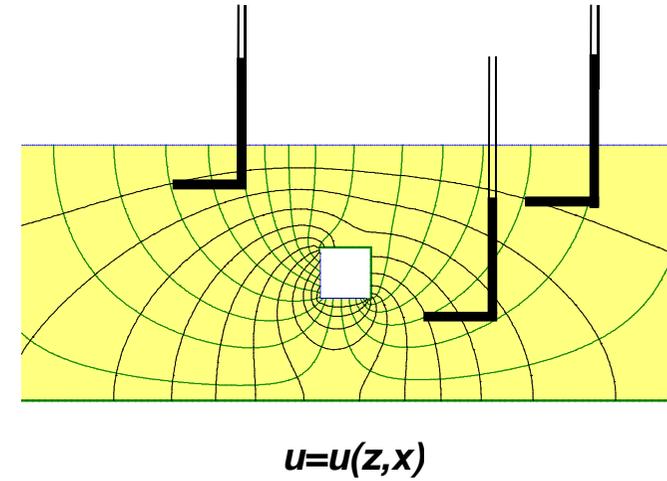
Filtrazione 1D stazionaria



Consolidazione 1D



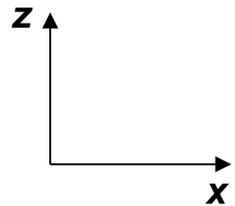
Filtrazione 2D stazionaria



Quota piezometrica

$$h(z, x, t) = z + \frac{u(z, x, t)}{\gamma_w}$$

VALORI DEL CARICO IDRAULICO E DELLA PRESSIONE INTERSTIZIALE



$$h(z, x, t) = z + \frac{u(z, x, t)}{\gamma_w}$$

Quota piezometrica:
Sistema Aperto (Piezometro)

Pressione interstiziale:
Sistema Chiuso (Cella piezometrica)

$$h_A = h_B = z_B + \frac{u_B}{\gamma_w}$$

$$u_B = 0$$

$$u_A = \gamma_w (h_A - z_A)$$

Misuro: d_A, d_B, d_C ; d_B con freatimetro

Calcolo: $z_B = d_C - d_B$
 $z_A = d_C - d_A$

$$h_A = z_A + \frac{u_A}{\gamma_w}$$

Misuro: u_A, d_A, d_C ; u_A con trasduttore

Calcolo: $z_A = d_C - d_A$

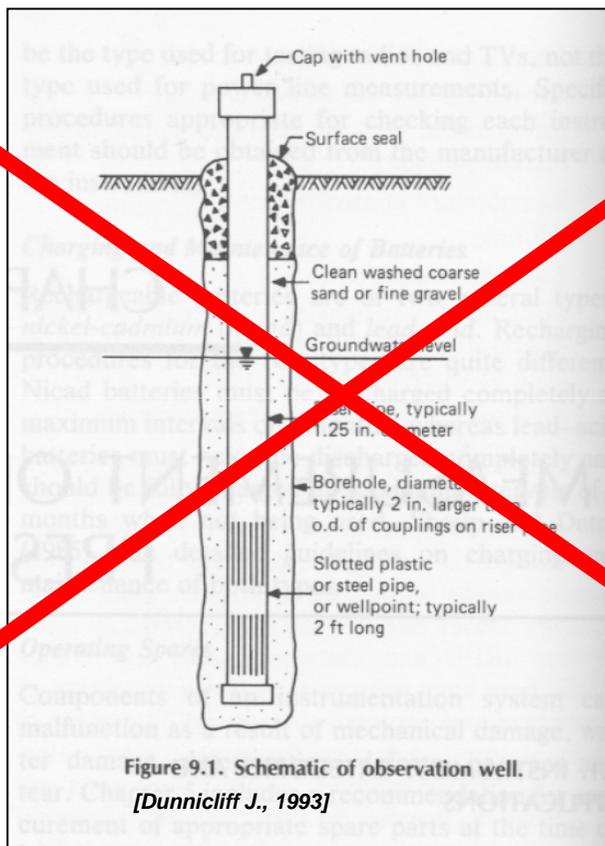
Conformità del piezometro



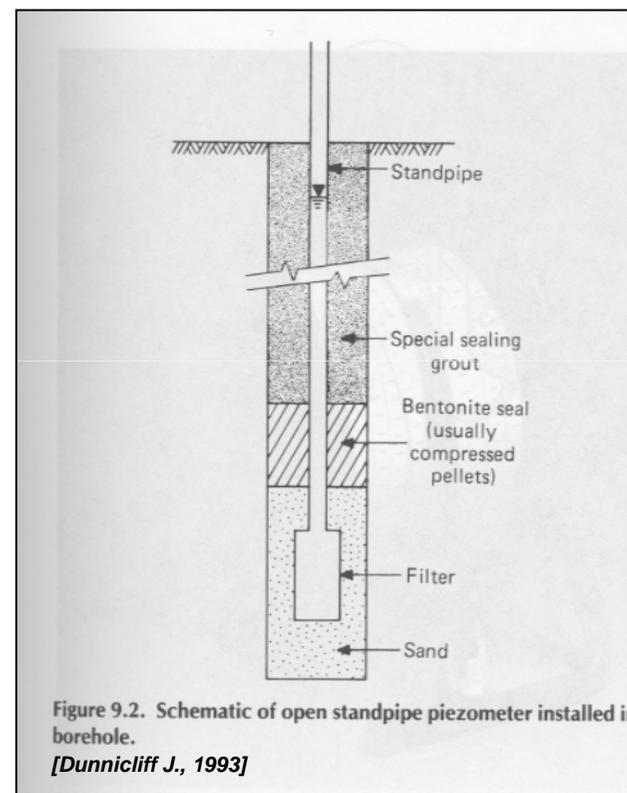
SISTEMA APERTO: PIEZOMETRI CON PUNTO DI MISURA SINGOLO

Principio di funzionamento: spostamento di volumi d'acqua

UGUAGLIANZE: foro nel terreno, elemento permeabile, tubo, terreno a grana grossa, sigillo.



E



DIFFERENZE: dimensione del tubo, volumi terreno a grana grossa e sigillo.

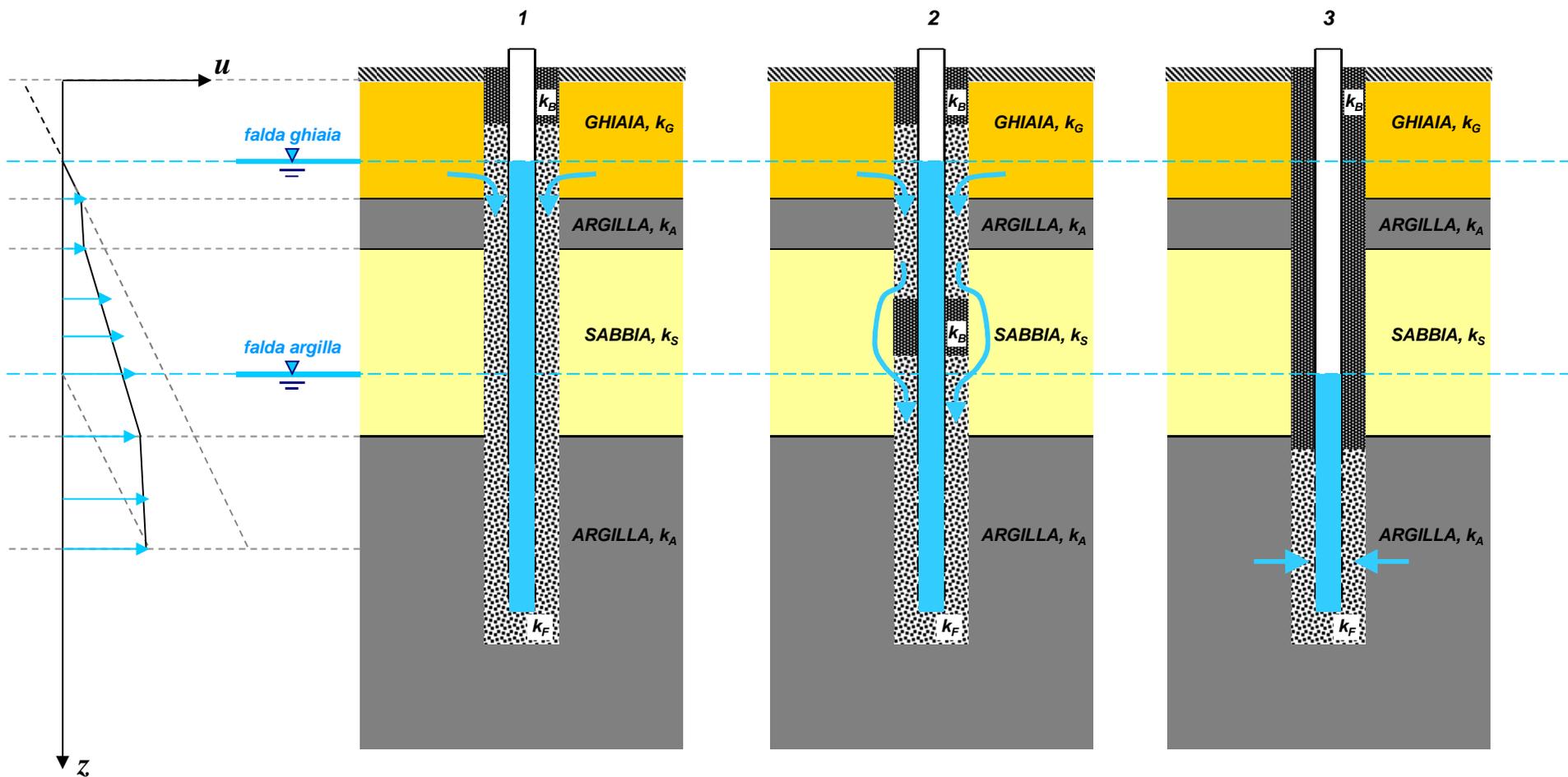
IMPORTANZA DEL SIGILLO o TENUTA

$$k_F > k_G > k_S > k_A > k_B$$

Configurazione inutile

Cortocircuito

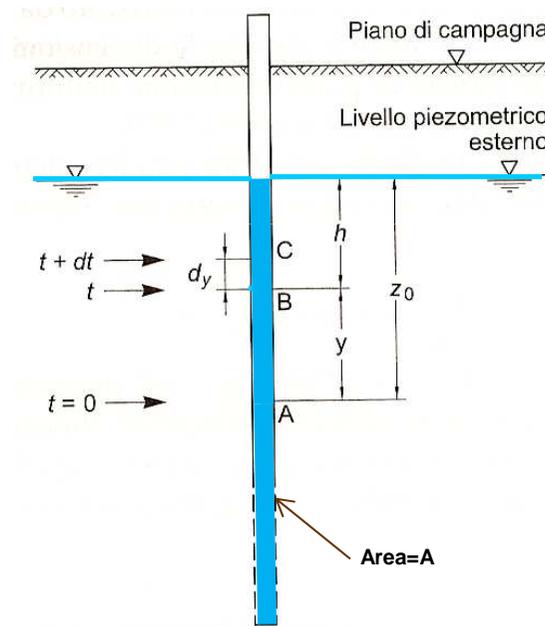
Configurazione corretta



TEMPO DI RISPOSTA (*time lag*)

Il piezometro deve misurare le variazioni di pressione interstiziale nel tempo: $u=u(t)$:

- perché è stato perturbato lo stato di equilibrio originario;
- perché variano le condizioni al contorno.



[Lancellotta R., 1993]

$$A \cdot dy = q \cdot dt$$

$$q = F \cdot k \cdot h = F \cdot k \cdot (z_0 - y)$$

F = coefficiente di ingresso;

*scheletro solido
indeformabile

$$\frac{dy}{z_0 - y} = \frac{F \cdot k \cdot dt}{A}$$

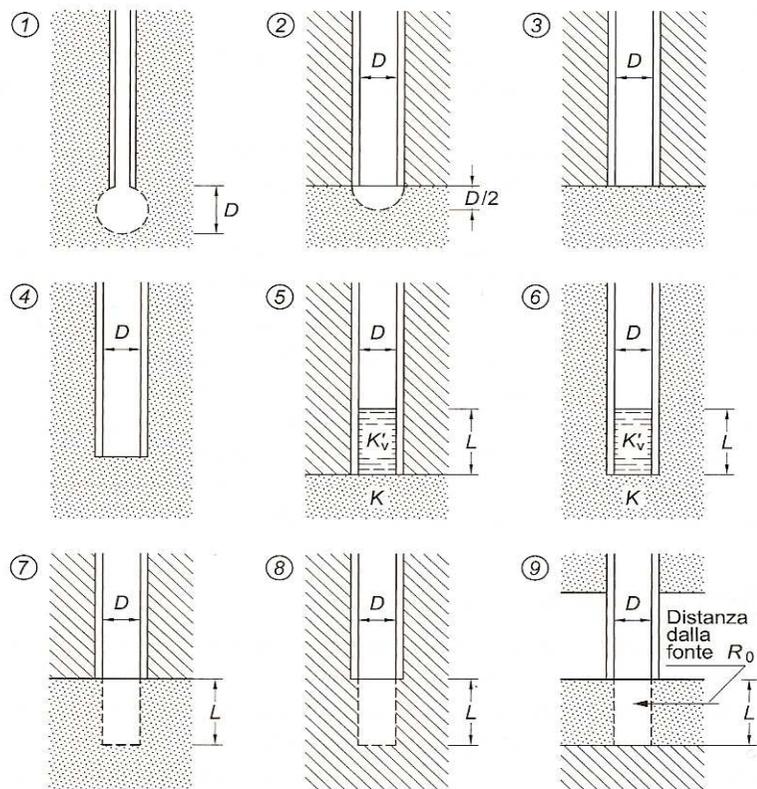
$$\frac{h}{z_0} = e^{-\frac{F \cdot k \cdot t}{A}}$$

$$h \rightarrow 0 \left(\frac{y}{z_0} \rightarrow 1 \right) \text{ per } t \rightarrow +\infty$$

$$\frac{y}{z_0} = 0.95 \text{ per } t_{95} = -\frac{A}{F \cdot k} \ln 0.05$$

t_{95} = tempo di risposta

COEFFICIENTI DI INGRESSO



[Hvorslev M.J., 1951; Wilkinson, 1968]

Caso	Espressione di F	
	Terreno isotropo $k_h/k_v=1$	Terreno anisotropo* $m^2=k_h/k_v$
1. Filtro sferico in terreno uniforme	$2\pi D$	$\frac{2\pi D}{\ln(m + \sqrt{1+m^2})} (k_h)$
2. Filtro emisferico al confine con uno strato confinato	πD	$\frac{\pi D}{\ln(m + \sqrt{1+m^2})} (k_h)$
3. Fondo filtrante piano al confine con uno strato confinato	$2D$	$\frac{2D}{m} (k_m)$
4. Fondo filtrante piano in terreno uniforme	$2.75D$	$\frac{2.75D}{m} (k_m)$
5. Tubo riempito parzialmente al confine con uno strato confinato	$\frac{2D}{1 + \frac{8Lk_h}{\pi Dk_v}}$	$\frac{2D}{m + \frac{8Lk_m}{\pi Dk_v}} (k_m)$
6. Tubo riempito parzialmente in terreno uniforme	$\frac{2.75D}{1 + \frac{11Lk_h}{\pi Dk_v}}$	$\frac{2.75D}{m + \frac{11Lk_m}{\pi Dk_v}} (k_m)$
7. Filtro cilindrico al confine con uno strato confinato	$\frac{2\pi L}{\ln\left[\frac{2L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{2L}{D}\right)^2}\right]}$	$\frac{2\pi L}{\ln\left[\frac{2mL}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{2mL}{D}\right)^2}\right]} (k_h)$
8. Filtro cilindrico in terreno uniforme	$\frac{3\pi L}{\ln\left[\frac{1.5L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{1.5L}{D}\right)^2}\right]}$	$\frac{3\pi L}{\ln\left[\frac{m1.5L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{m1.5L}{D}\right)^2}\right]} (k_h)$
9. Filtro cilindrico attraverso uno strato confinato	$\frac{2\pi L}{\ln\frac{R_0}{R}}$	$\frac{2\pi L}{\ln\frac{R_0}{R}} (k_h)$

* Tra parentesi tonde il valore di k che deve essere utilizzato

$$k_m = \sqrt{k_v \cdot k_h}$$

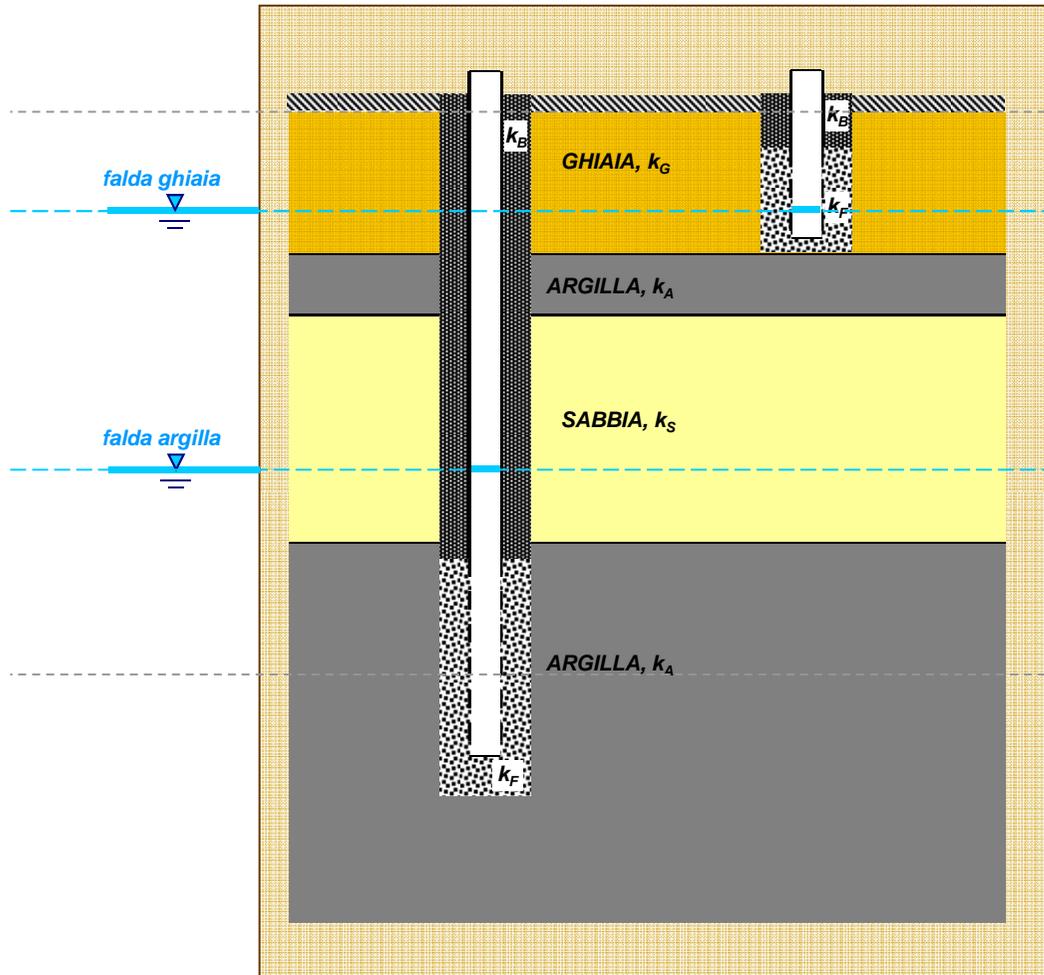


CONFRONTO TRA I TEMPI DI RISPOSTA

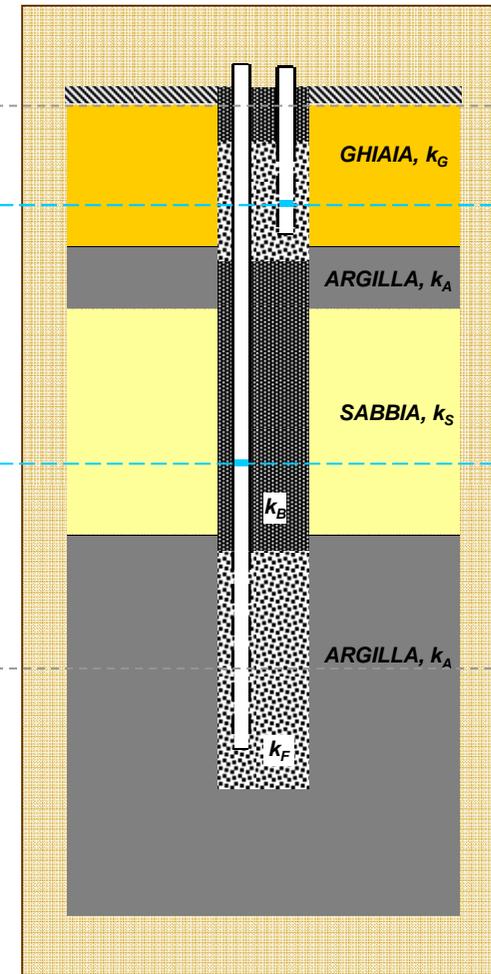
	Tubo singolo		Doppio tubo		Tubo singolo	
	t_{95} (min)					
	k (cm/s)	$d_1=2.54$ cm	$d_2=1.6$ cm	$d_3=5.0$ cm		
Sabbie	1.00E-02	0.1	0.1	0.4		
	1.00E-03	0.9	0.7	3.5		
	1.00E-04	9.1	7.2	35.4		
Limi	1.00E-05	91.3	72.5	353.9		
	1.00E-06	913.3 =15 ore	724.8 =12 ore	3539.0 =59 ore		
Argille	1.00E-07	9133.0	7247.9	35390.3		
	1.00E-08	91329.6	72479.3	353902.8		
	1.00E-09	913295.6 =634 giorni	724792.9 =503 giorni	3539027.7 =2458 giorni		

PIEZOMETRI A SISTEMA APERTO CON PIÙ PUNTI DI MISURA

Un foro per punto di misura



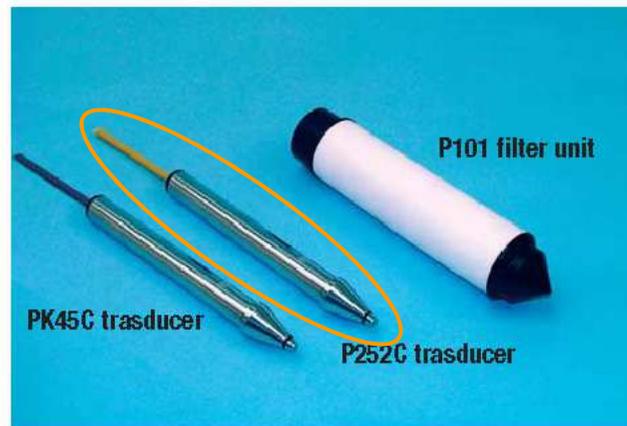
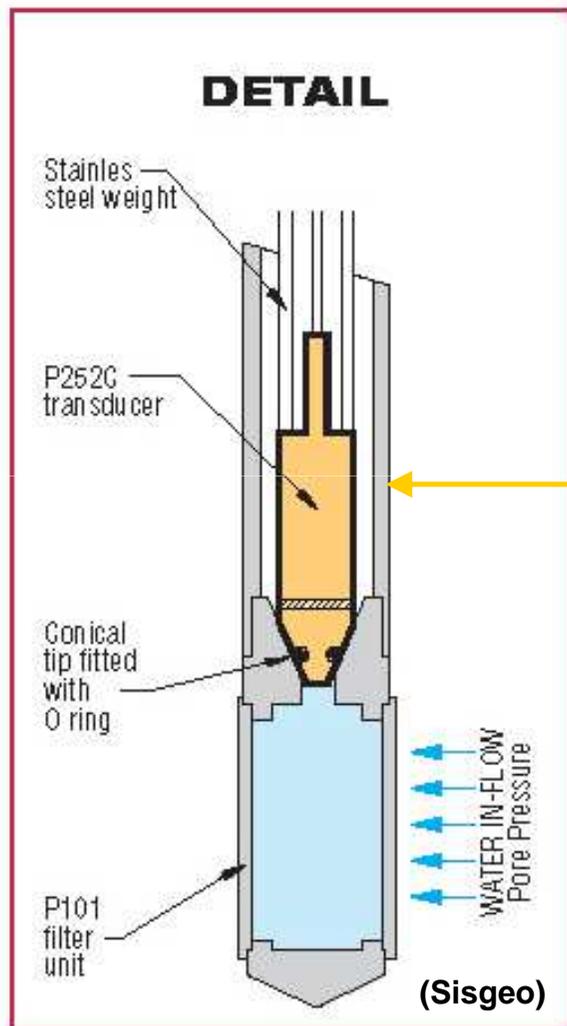
Foro unico



OPPURE

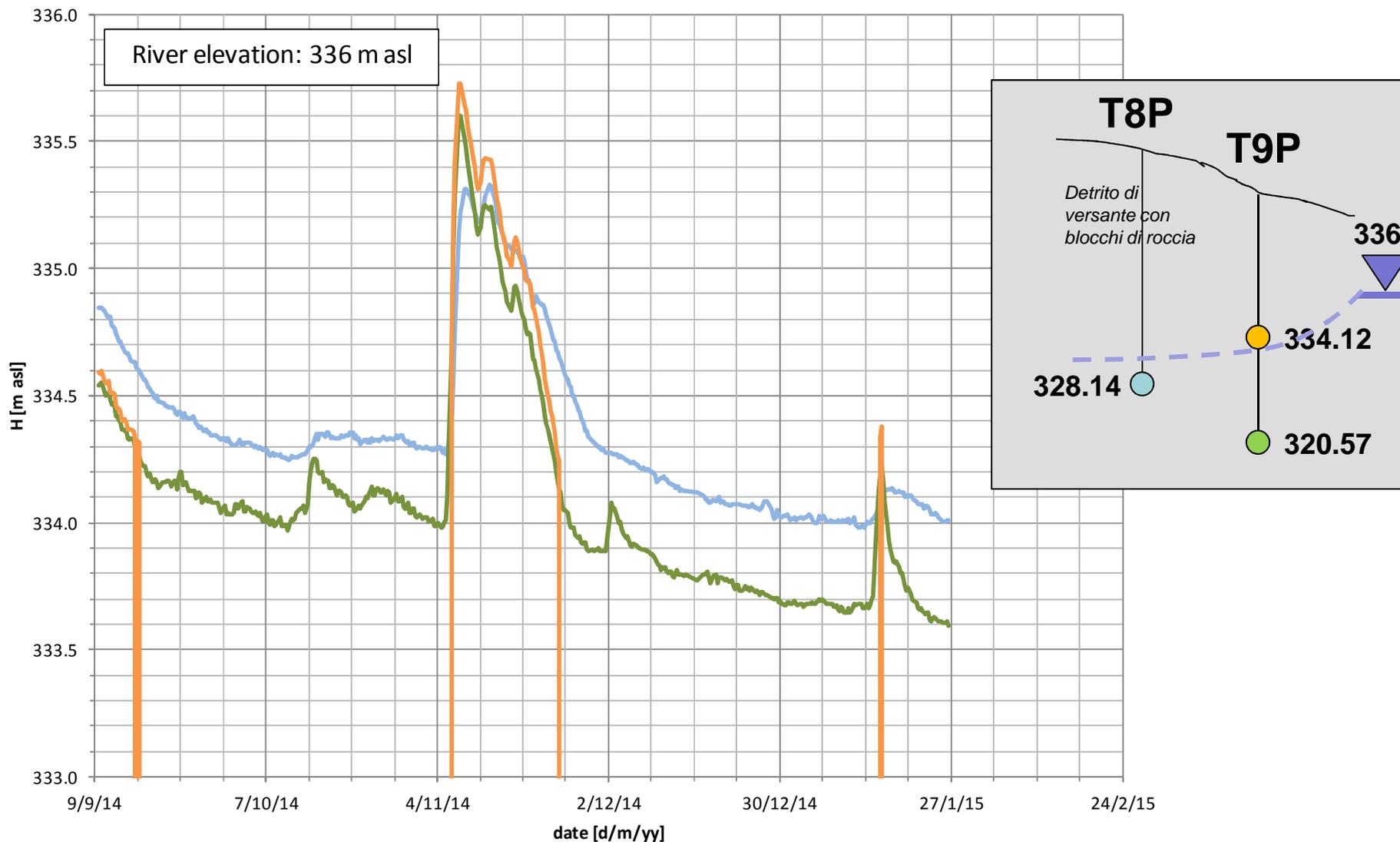
ATTENZIONE: permeabilità diverse -> tempi di risposta diversi!!!!!!

PIEZOMETRO A SISTEMA CHIUSO VERIFICABILE



1. Eliminazione dei tempi di risposta -> misure confrontabili per i diversi tipi di terreno;
2. Rimozione trasduttore per taratura periodica;
3. Rimozione trasduttore per misure manuali (ridondanza);
4. Filtro ad elevata porosità (40 mm, no problemi di saturazione).

IL PIEZOMETRO "P101+P252C" (Sisgeo): esempio di misure



PIEZOMETRO A SISTEMA CHIUSO: CELLE PIEZOMETRICHE

Misurano direttamente la pressione (*assoluta o relativa*) mediante un trasduttore

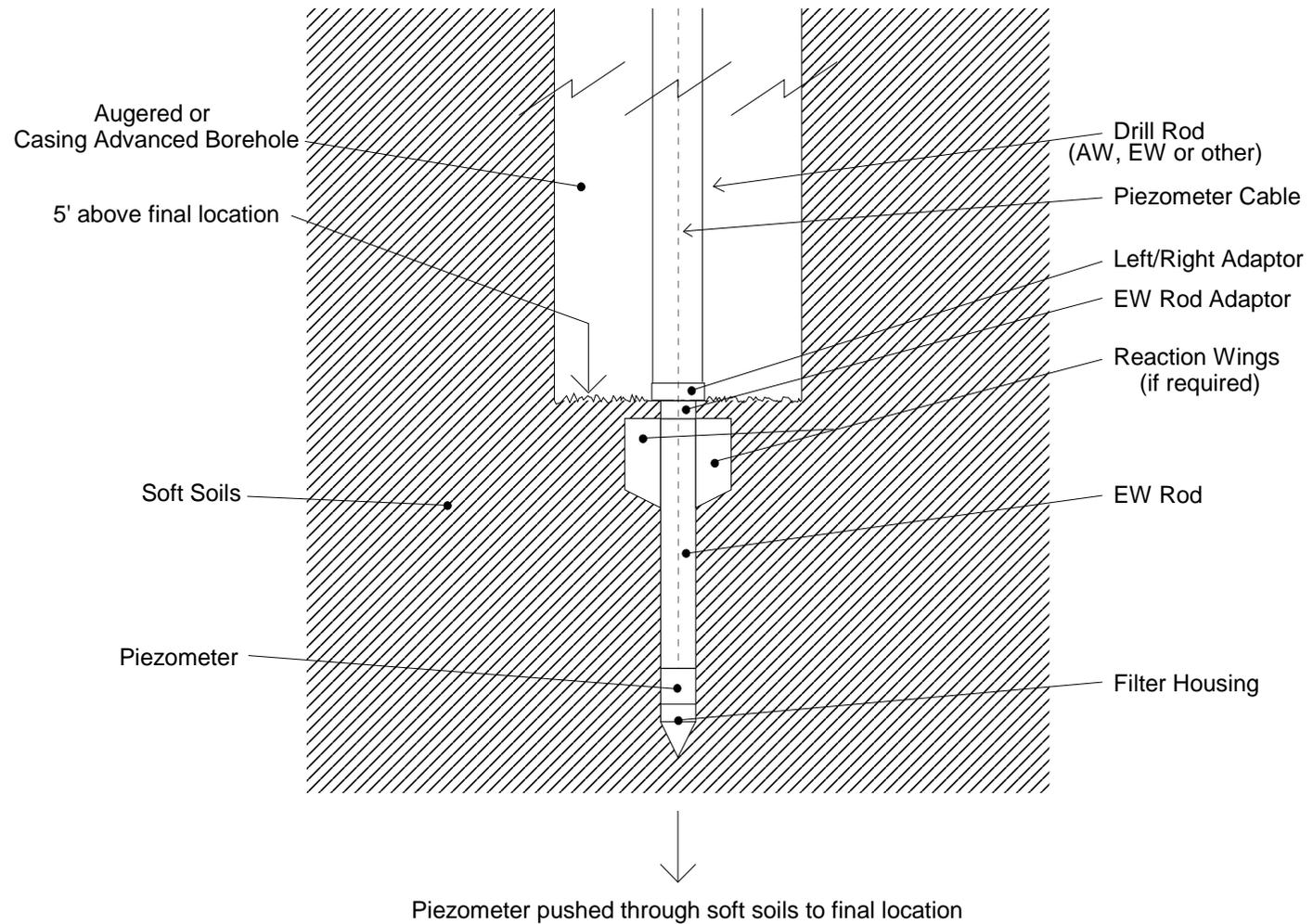
Possibilità di misurare automaticamente e in tempo reale.



CELLA PIEZOMETRICA

Installazione per infissione:

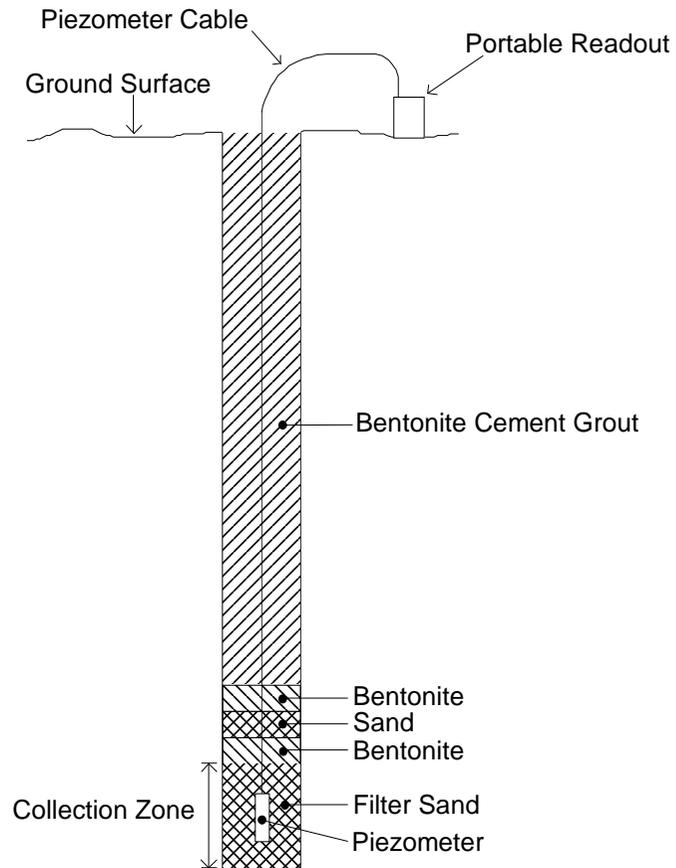
[Geokon]



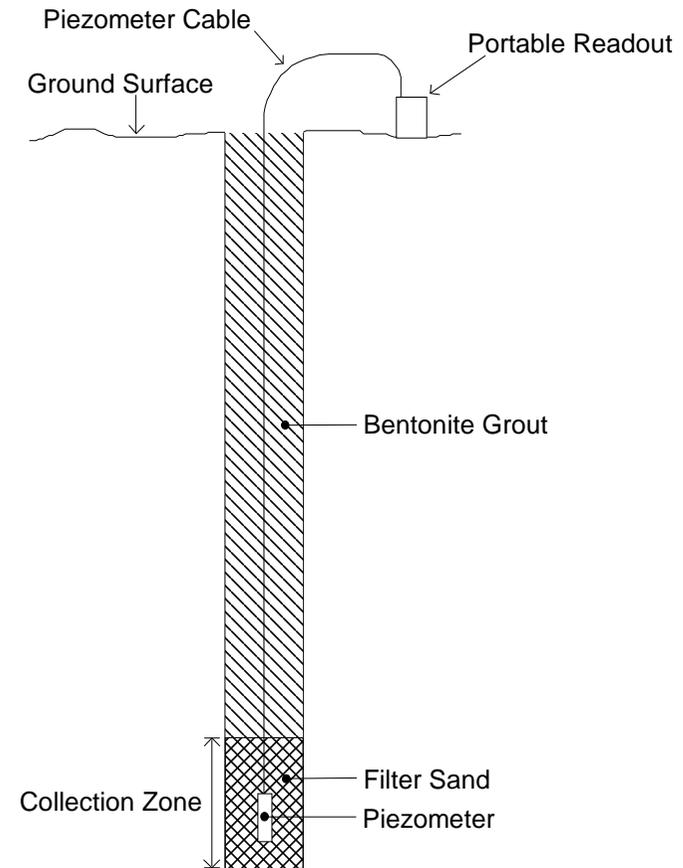
CELLA PIEZOMETRICA

Installazione in foro:

[Geokon]



Installation A

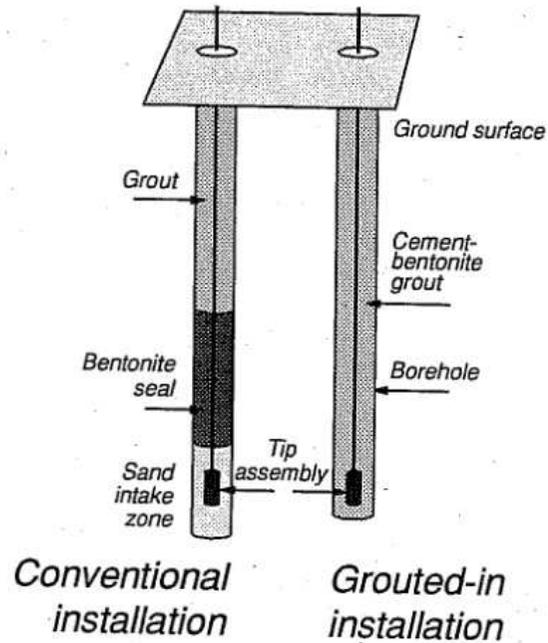


Installation B

CELLA PIEZOMETRICA

Installazione per piezometro fully-grouted:

Fig. 1. Two installation methods for piezometers in boreholes.



1. Ceramic filter (0.25 μm) screwed underwater



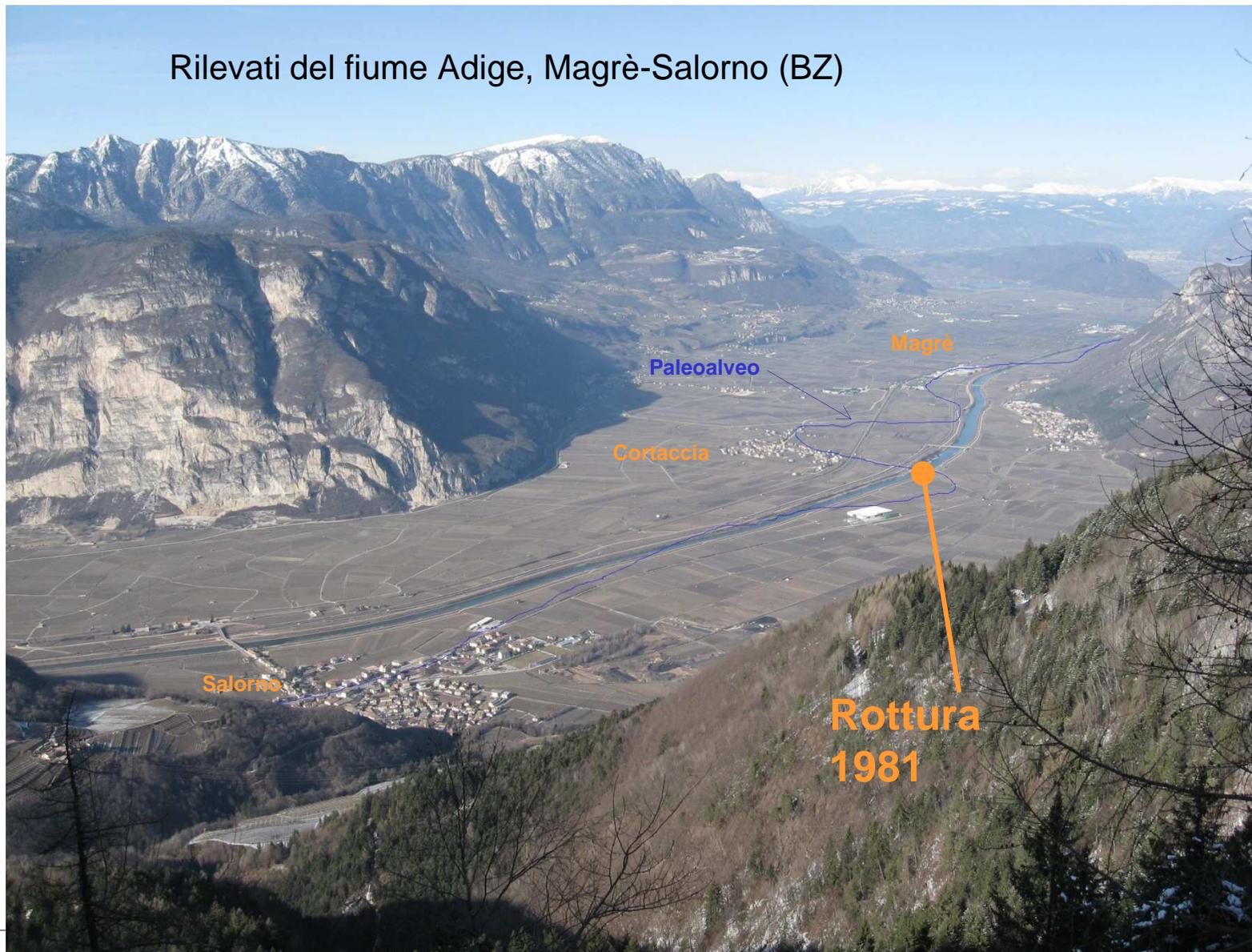
2. Transducer fastened upside-down



(Simeoni et al., 2011)

INSTALLAZIONE FULLY-GOUTED

Rilevati del fiume Adige, Magrè-Salorno (BZ)



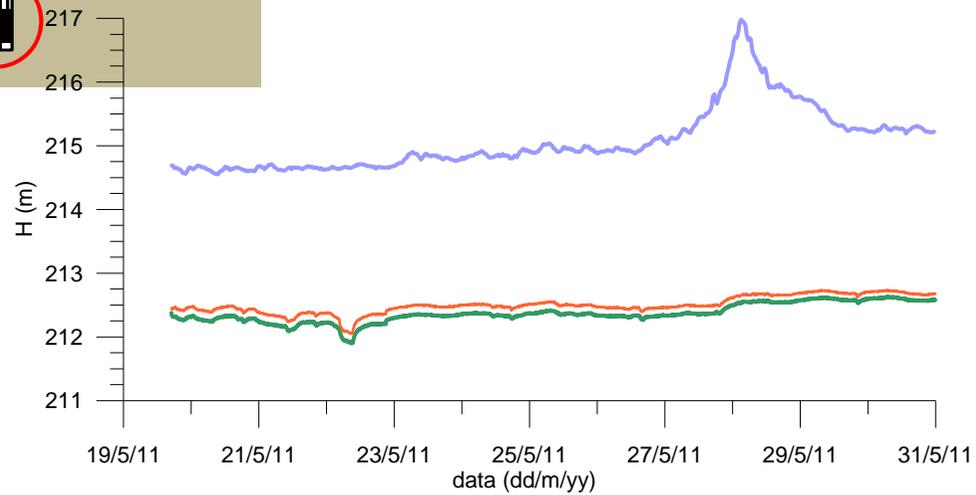
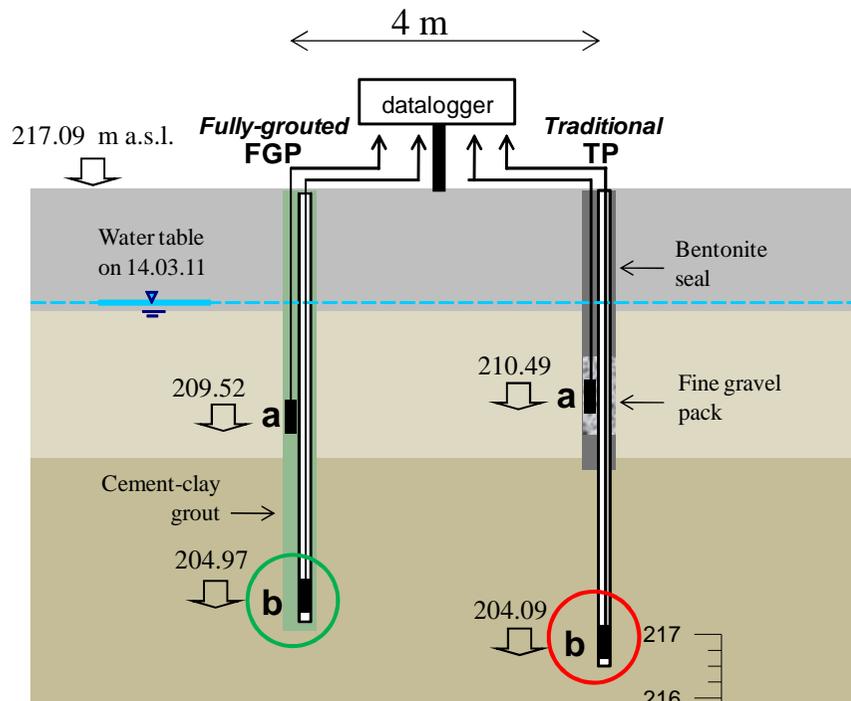
INSTALLAZIONE FULLY-GOUTED

Rilevati del fiume Adige, Salorno (BZ)



INSTALLAZIONE FULLY-GOUTED

Test site @ Eгна (BZ)



Inclinometri



Significato della misura

SISTEMA INCLINOMETRICO



1. MOBILE

2. FISSO

ESECUZIONE DELLE MISURE

<p>ROTELLA A-</p> 				
<p>MISURE</p>	<p>A1, B1</p>	<p>A3, B3</p>	<p>A2, B2</p>	<p>A4, B4</p>



RELAZIONI TRIGONOMETRICHE: METODO SEMPLIFICATO

$$B = K \operatorname{sen} \alpha_x$$

$$A = K \operatorname{sen} \alpha_y$$

K = costante strumentale (da taratura)

MN = passo carrelli = 500 mm

$$x = OP = NP \operatorname{sen} \alpha_x$$

$$y = OQ = NQ \operatorname{sen} \alpha_y$$

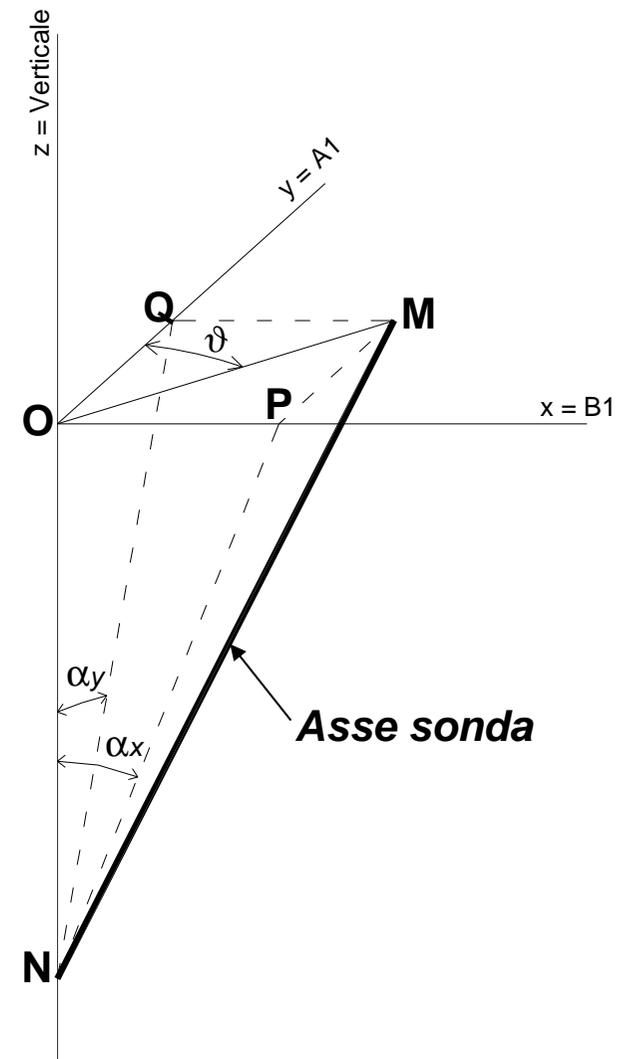
Semplificazione

Per piccole inclinazioni:

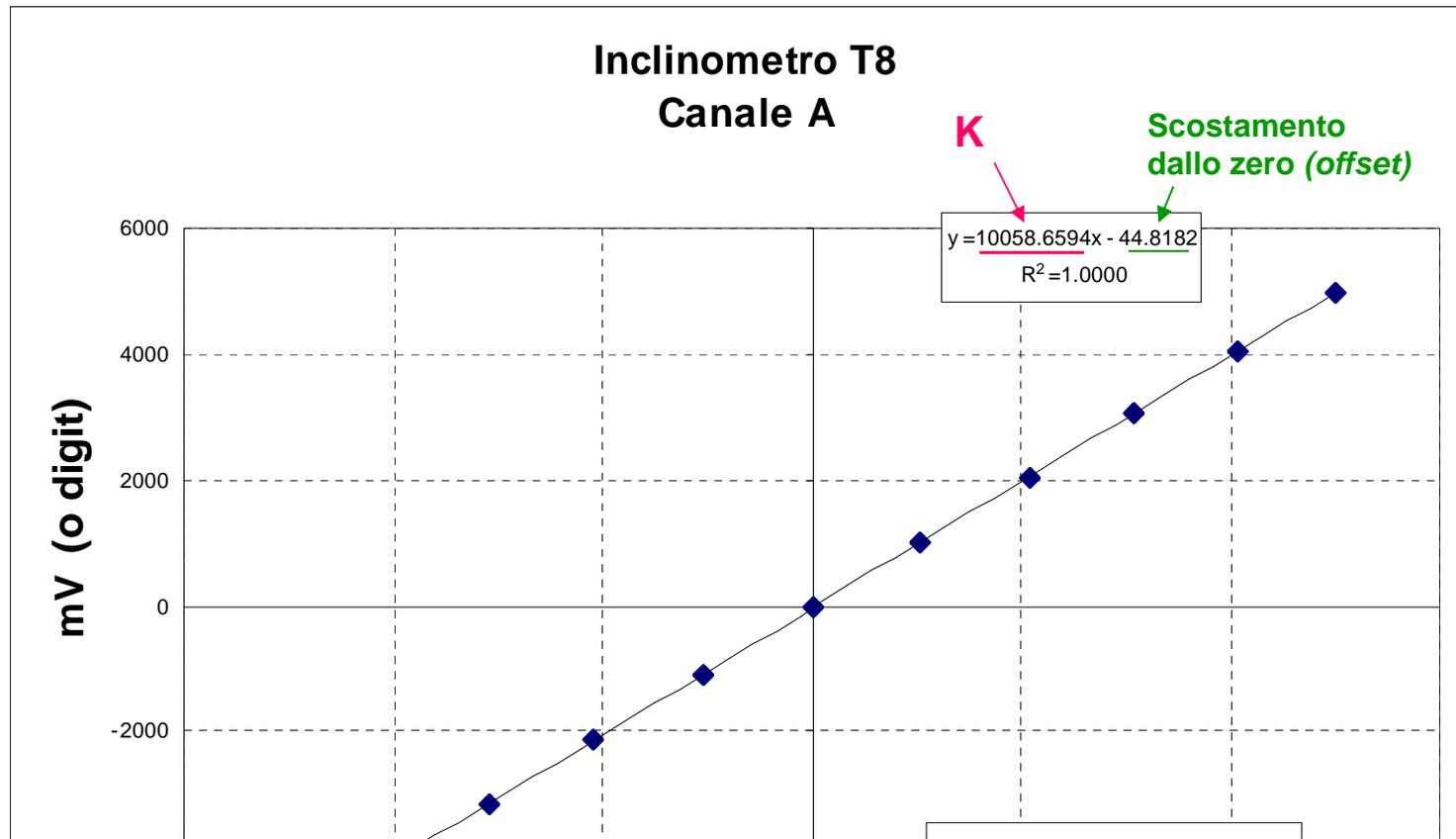
$$NP = NQ \cong MN = 500 \text{ mm}$$

$$x = OP = - MN \cdot B/K \text{ (- per convenzione)}$$

$$y = OQ = - MN \cdot A/K \text{ (- per convenzione)}$$



COSTANTE K: TARATURA DI UN SENSORE INCLINOMETRICO



- **Sonda mobile:** verifica periodica di K
- **Sonda fissa:** assenza di deriva per long-term monitoring

L'importanza delle semisomme (checksum)

STIMA DELLE GRANDEZZE A E B

A_r = valore vero della misura

$$A_1 = A_r + \varepsilon_{A_1}^s + \varepsilon_{A_1}^a$$

$$A_3 = -A_r + \varepsilon_{A_3}^s + \varepsilon_{A_3}^a$$

$\varepsilon_{A_i}^s$ = errore sistematico

$\varepsilon_{A_i}^a$ = errore aleatorio

$$A = \frac{A_1 - A_3}{2} = A_r + \frac{\varepsilon_{A_1}^s - \varepsilon_{A_3}^s}{2} + \frac{\varepsilon_{A_1}^a - \varepsilon_{A_3}^a}{2}$$

$$\varepsilon_{A_1}^s - \varepsilon_{A_3}^s = 0^*$$

$$A = A_r + \frac{\varepsilon_{A_1}^a - \varepsilon_{A_3}^a}{2} = A_r + \varepsilon_A^a$$

$$\varepsilon_A^a = N(0, \sigma_A^2)$$

B_r = valore vero della misura

$$B_1 = B_r + \varepsilon_{B_1}^s + \varepsilon_{B_1}^a$$

$$B_3 = -B_r + \varepsilon_{B_3}^s + \varepsilon_{B_3}^a$$

$\varepsilon_{B_i}^s$ = errore sistematico

$\varepsilon_{B_i}^a$ = errore aleatorio

$$B = \frac{B_1 - B_3}{2} = B_r + \frac{\varepsilon_{B_1}^s - \varepsilon_{B_3}^s}{2} + \frac{\varepsilon_{B_1}^a - \varepsilon_{B_3}^a}{2}$$

$$\varepsilon_{B_1}^s - \varepsilon_{B_3}^s = 0^*$$

$$B = B_r + \frac{\varepsilon_{B_1}^a - \varepsilon_{B_3}^a}{2} = B_r + \varepsilon_B^a$$

$$\varepsilon_B^a = N(0, \sigma_B^2)$$

* : assumo che l'errore sistematico rimanga costante nelle due serie di misure 1 e 3



ACCURATEZZA DELLE GRANDEZZE A E B

$$A = Ar + \varepsilon_A^a$$

$$\varepsilon_A^a = N(0, \sigma_A^2)$$

$$A = N(Ar, \sigma_A^2)$$

$$B = Br + \varepsilon_B^a$$

$$\varepsilon_B^a = N(0, \sigma_B^2)$$

$$B = N(Br, \sigma_B^2)$$

Generalmente $\sigma_A^2 < \sigma_B^2$.

Per questo si cerca di far coincidere il piano A del tubo inclinometrico con la direzione attesa dello spostamento.



SEMISOMME DI CONTROLLO (CHECKSUM)

$$S_A = \frac{A1 + A3}{2} = \frac{Ar - Ar}{2} + \frac{\varepsilon_{A1}^s + \varepsilon_{A3}^s}{2} + \frac{\varepsilon_{A1}^a + \varepsilon_{A3}^a}{2}$$

$$\varepsilon_{A1}^s = \varepsilon_{A3}^s$$

$$S_A = \varepsilon_A^s + \varepsilon_A^a$$

$$S_B = \frac{B1 + B3}{2} = \frac{Br - Br}{2} + \frac{\varepsilon_{B1}^s + \varepsilon_{B3}^s}{2} + \frac{\varepsilon_{B1}^a + \varepsilon_{B3}^a}{2}$$

$$\varepsilon_{B1}^s = \varepsilon_{B3}^s$$

$$S_B = \varepsilon_B^s + \varepsilon_B^a$$

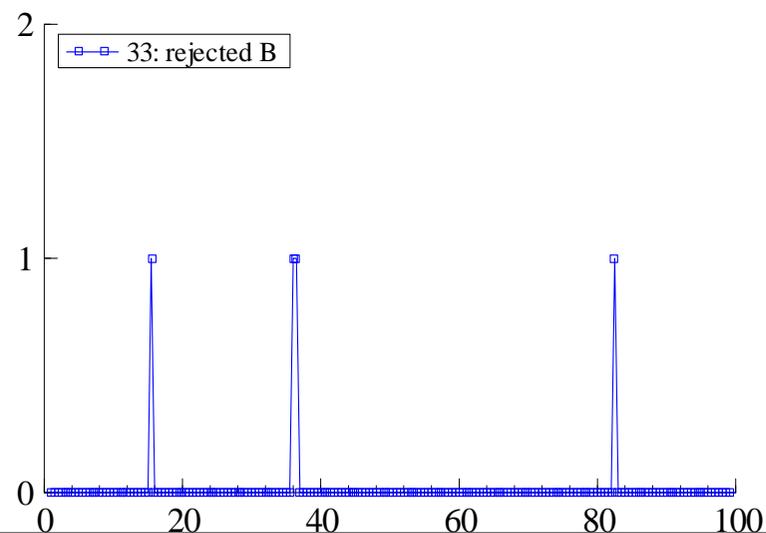
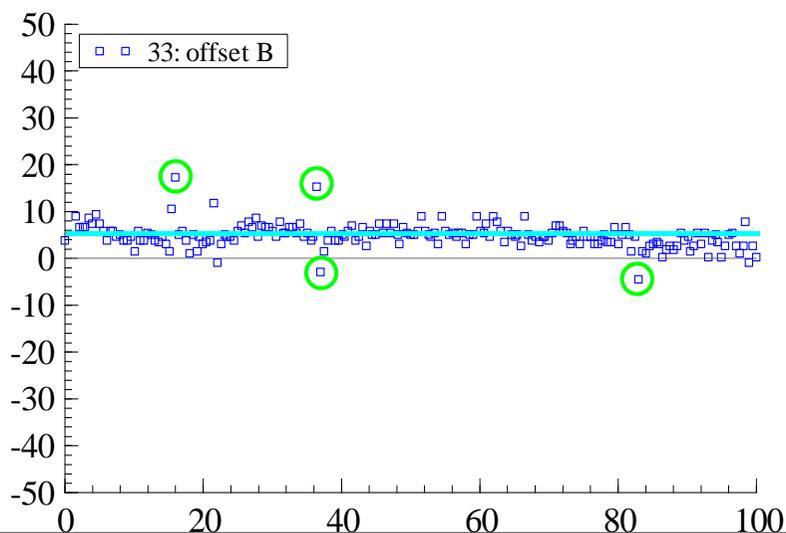
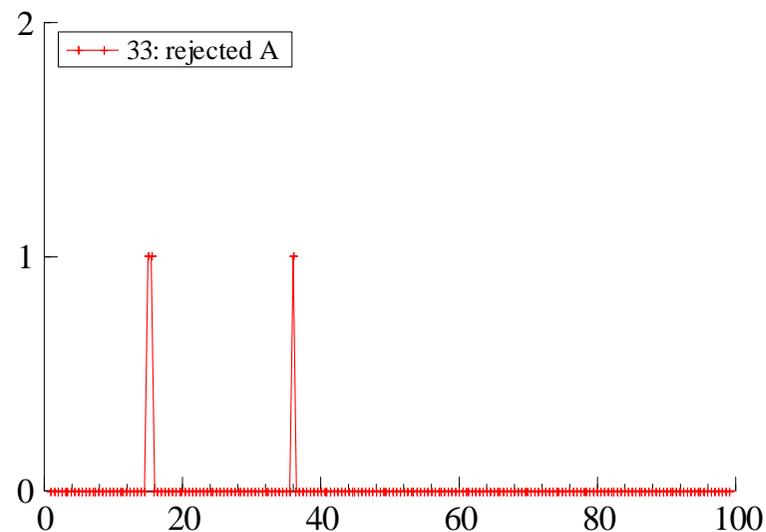
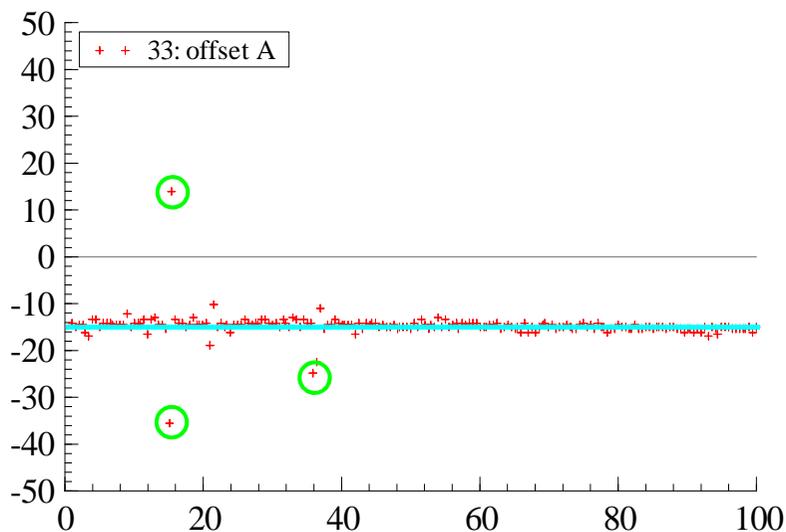
$$\varepsilon_A^a = N(0, \sigma_A^2)$$

$$\varepsilon_B^a = N(0, \sigma_B^2)$$

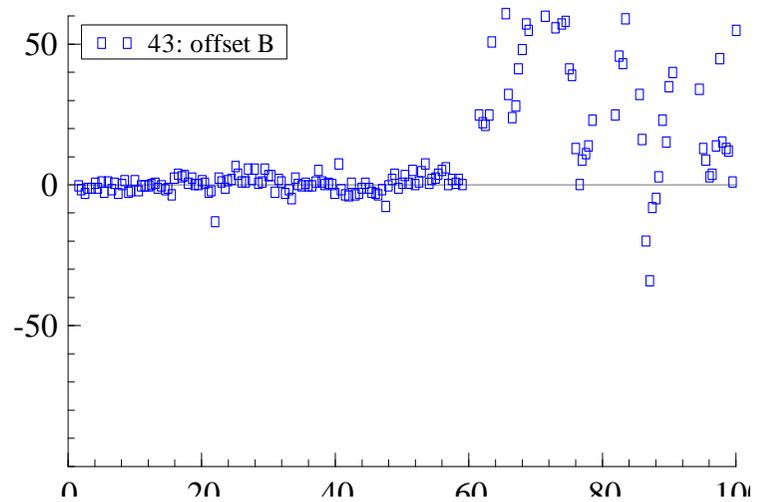
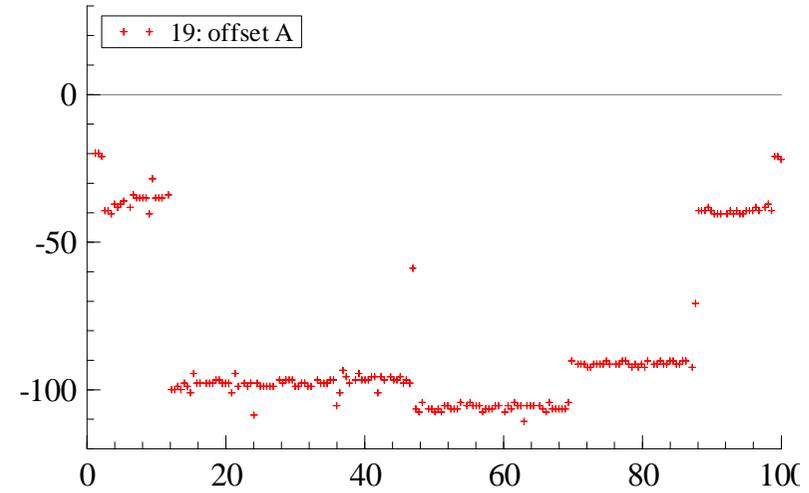
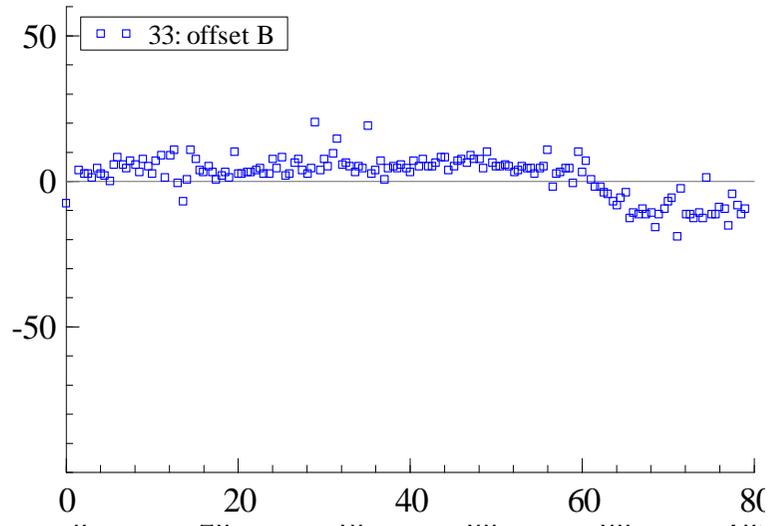
In assenza di altri errori la semisomma rappresenta una stima dello scostamento dallo zero (*offset*)

Lo scostamento dallo zero è una stima dell'errore sistematico

RAPPRESENTAZIONE DELLE SEMISOMME E MISURE SOSPETTE



RIGETTO "MANUALE"





Come utilizzo le misure di sonda fissa?

Con le sonde fisse ho serie temporali di valori A1 e B1

Nell'istante $t=i$:

A_{r_i} = valore vero della misura

B_{r_i} = valore vero della misura

$$A_i = A1_i = A_{r_i} + \varepsilon_{A1i}^s + \varepsilon_{A1i}^a$$

$$B_i = B1_i = B_{r_i} + \varepsilon_{B1i}^s + \varepsilon_{B1i}^a$$

ε_{A1i}^s = errore sistematico

ε_{B1i}^s = errore sistematico

ε_{A1i}^a = errore aleatorio

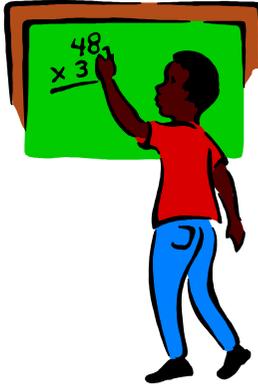
ε_{B1i}^a = errore aleatorio

$$\varepsilon_{A1(i+1)}^s - \varepsilon_{A1i}^s = 0^*$$

$$\varepsilon_{B1(i+1)}^s - \varepsilon_{B1i}^s = 0^*$$

*** : assumo che l'errore sistematico rimanga costante nel tempo**

→ stabilità dei sensori (NO DERIVA!)



Calcolo delle deviazioni dalla verticale



Determinazione puntuale della deviazione dalla verticale

Per ciascuna coppia di misura acquisita alla profondità j :

$$x_j = -MN \cdot B_j/K$$

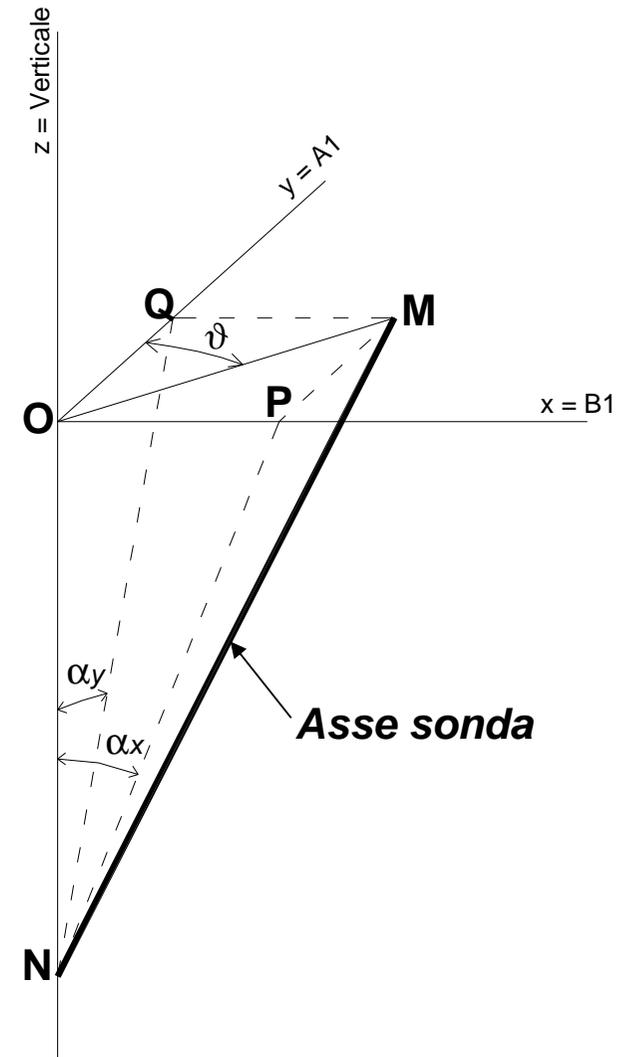
$$y_j = -MN \cdot A_j/K$$

MN = passo carrelli = 500 mm

K = costante strumentale (da taratura)

$$OM_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2}$$

$$\vartheta_j = 2 \operatorname{atan} \left(\frac{x_j}{OM_j + y_j} \right)$$



Determinazione integrale della deviazione dalla verticale

Si ipotizza che la base del tubo inclinometrico, di lunghezza L, sia fissa.

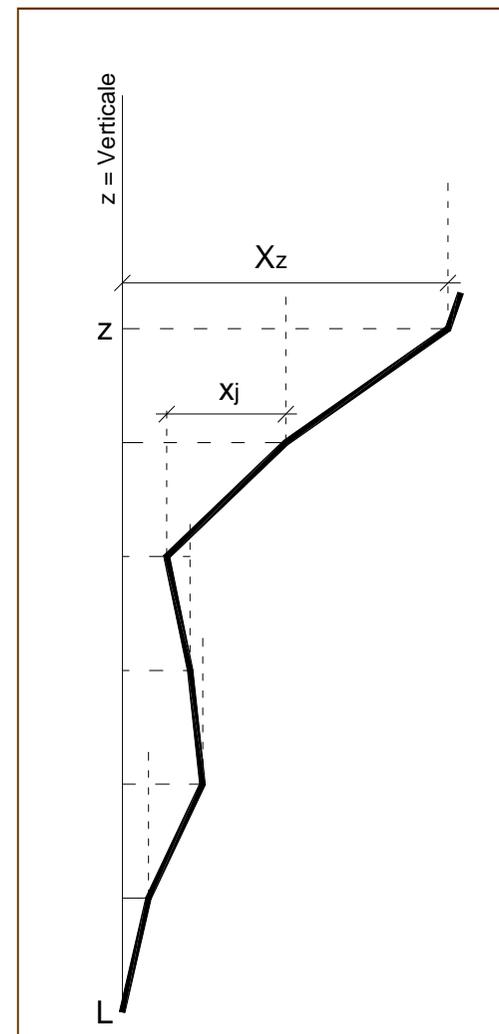
Alla profondità z:

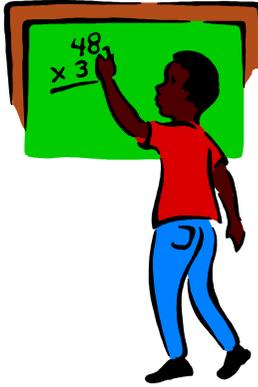
$$X_z = \sum_{j=L}^z x_j$$

$$Y_z = \sum_{j=L}^z y_j$$

$$OM_z = \sqrt{X_z^2 + Y_z^2}$$

$$\Theta_z = 2 \operatorname{atan} \left(\frac{X_z}{OM_z + Y_z} \right)$$

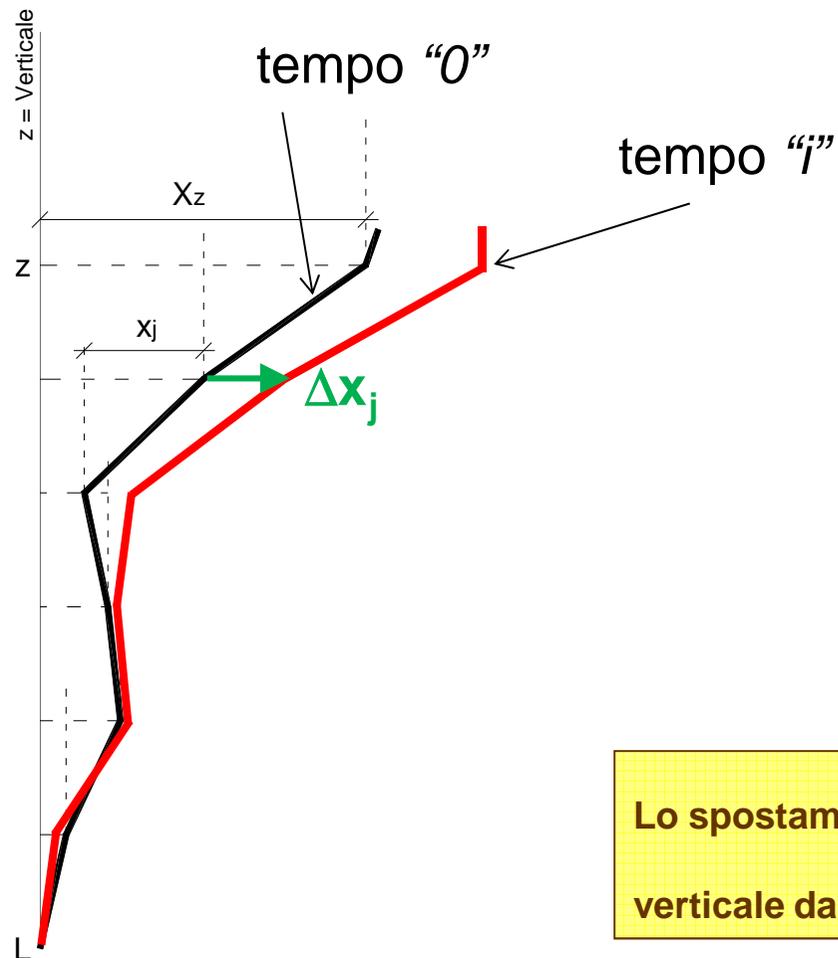




Calcolo degli spostamenti



CALCOLO DEGLI SPOSTAMENTI



Lo spostamento è la variazione di deviazione dalla verticale dal tempo "0" al tempo "j"

Determinazione degli spostamenti orizzontali

Si determinano calcolando le variazioni della deviazione dalla verticale tra la lettura i -esima e la lettura di zero (o una qualsiasi lettura k precedente).

Elaborazione puntuale:

$$\Delta x_j|_0^i = -MN \cdot (B_j^i - B_j^0)/K$$

$$\Delta y_j|_0^i = -MN \cdot (A_j^i - A_j^0)/K$$

$$d_j|_0^i = \sqrt{(\Delta x_j|_0^i)^2 + (\Delta y_j|_0^i)^2}$$

$$\vartheta_j|_0^i = 2 \operatorname{atan} \left(\frac{\Delta x_j|_0^i}{d_j|_0^i + \Delta y_j|_0^i} \right)$$

Elaborazione integrale:

$$\Delta X_z|_0^i = \sum_{j=L}^z \Delta x_j|_0^i$$

$$\Delta Y_z|_0^i = \sum_{j=L}^z \Delta y_j|_0^i$$

$$D_z|_0^i = \sqrt{(\Delta X_z|_0^i)^2 + (\Delta Y_z|_0^i)^2}$$

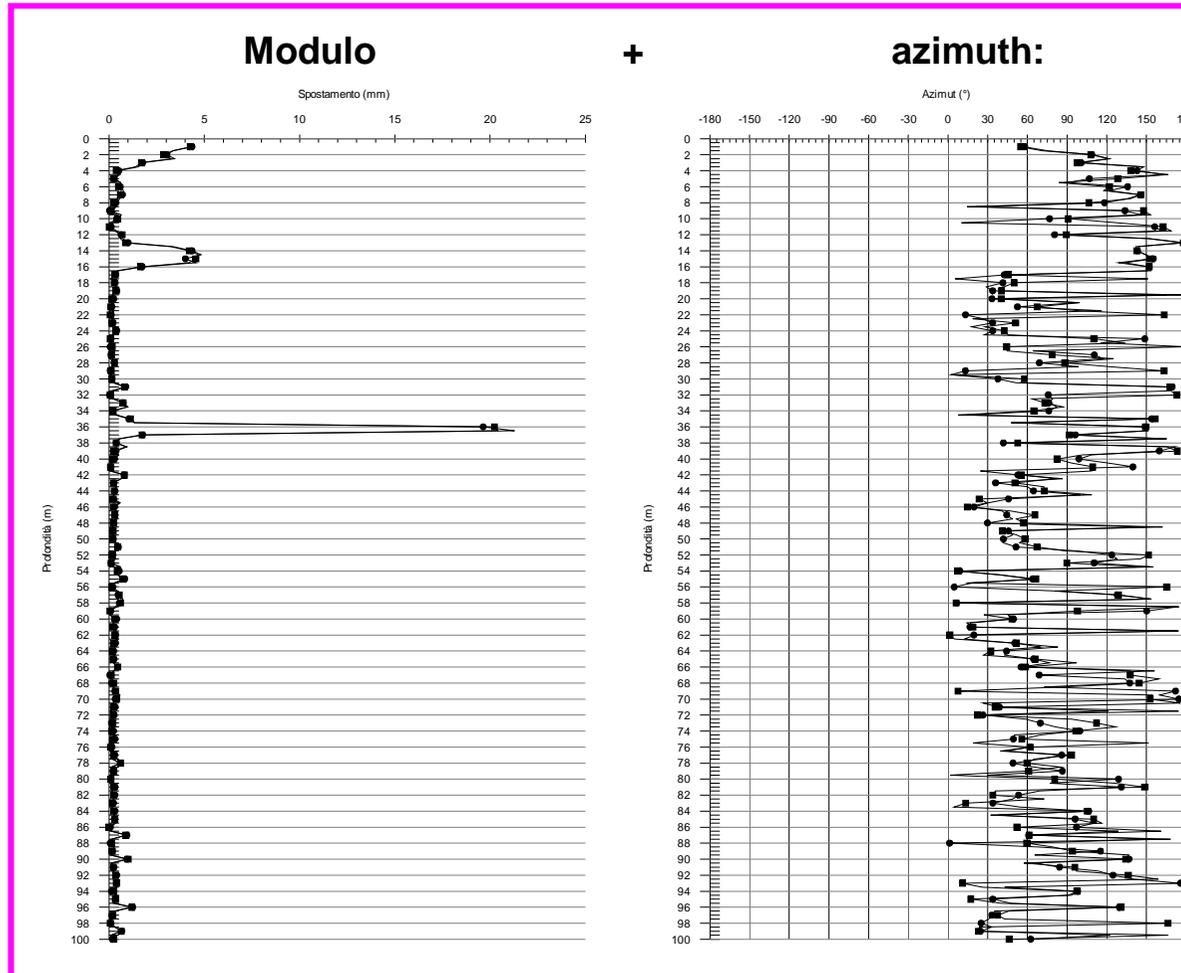
$$\Theta_z|_0^i = 2 \operatorname{atan} \left(\frac{\Delta X_z|_0^i}{D_z|_0^i + \Delta Y_z|_0^i} \right)$$

L'azimuth dello spostamento deve essere corretto per tener conto della spiratura delle guide del tubo inclinometrico e dell'azimuth rispetto al Nord della guida di riferimento A1.

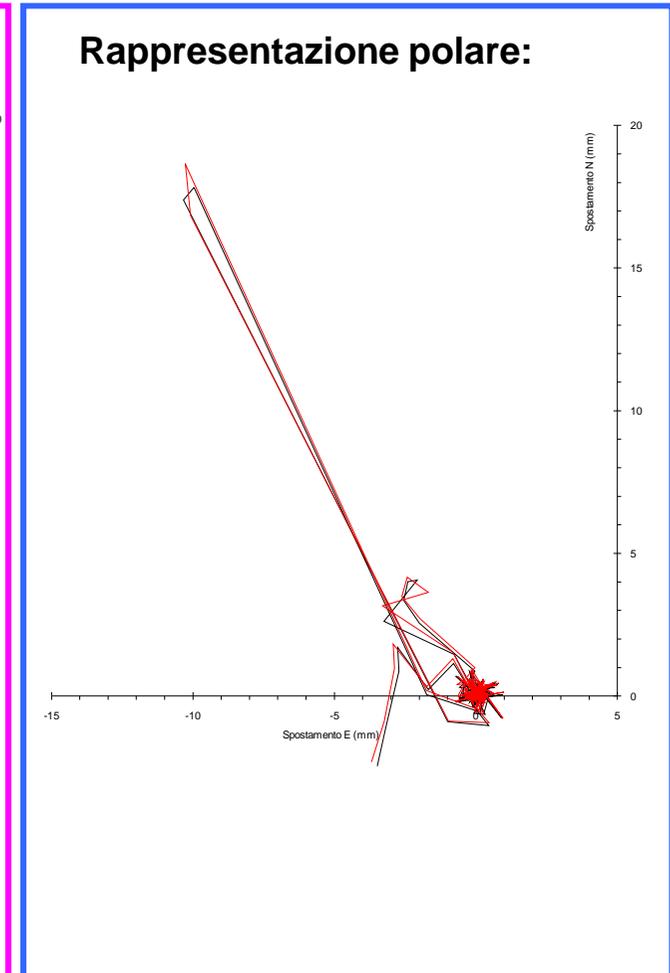
Rappresentazione dei risultati. Spostamenti puntuali.

Si deve scegliere una modalità di rappresentazione che indichi il vettore spostamento, in termini di modulo, direzione e verso.

Soluzione 1

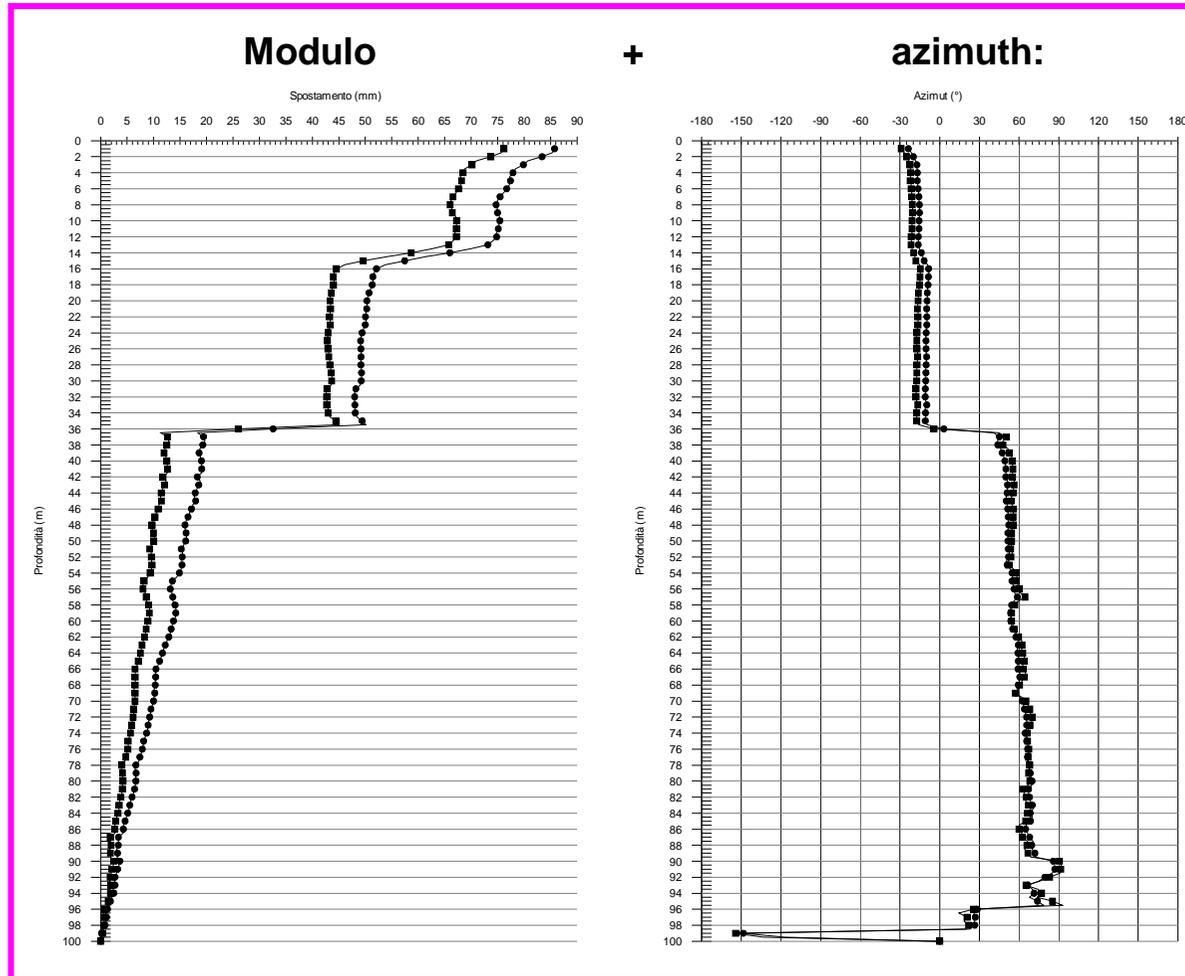


Soluzione 2

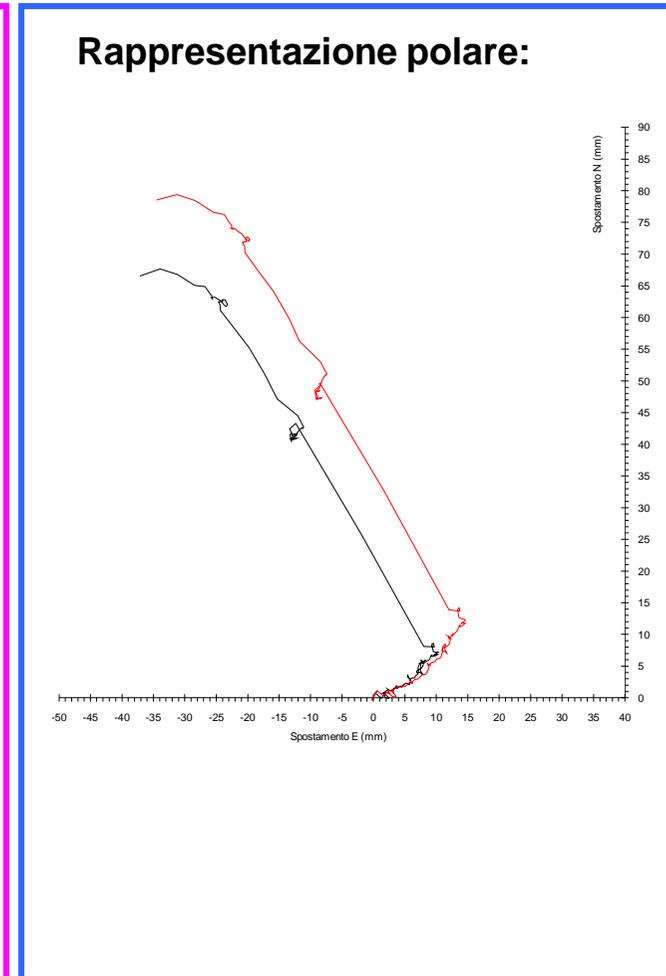


Rappresentazione dei risultati. Spostamenti integrali.

Soluzione 1



Soluzione 2

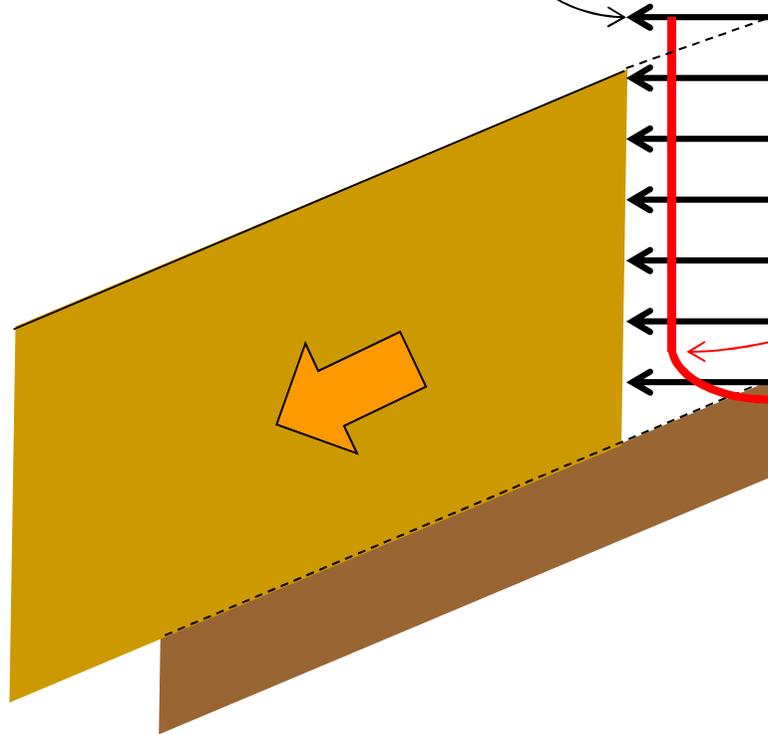


Conformità dell'inclinometro



CONFORMITÀ

Spostamento orizz. reale

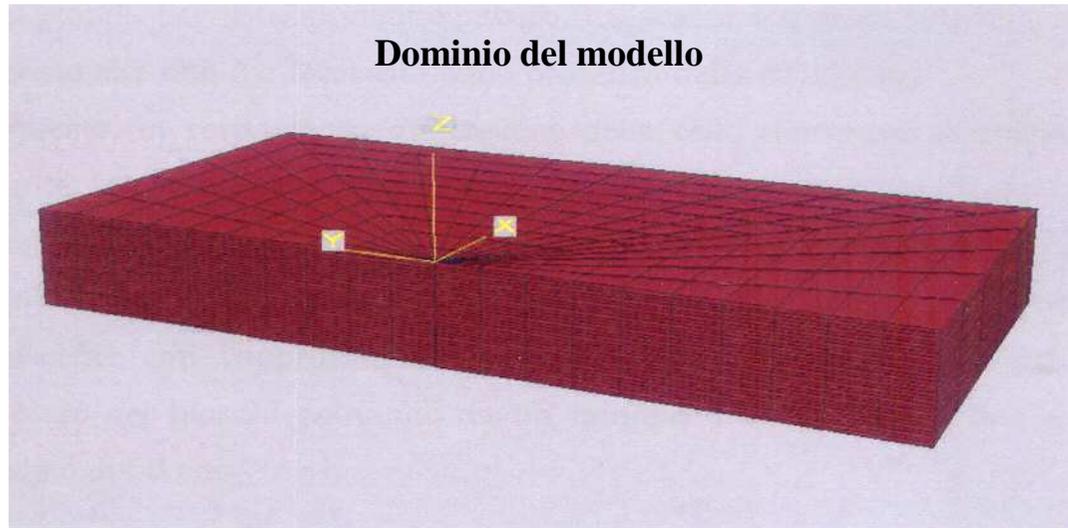


Spostamento orizz. misurato

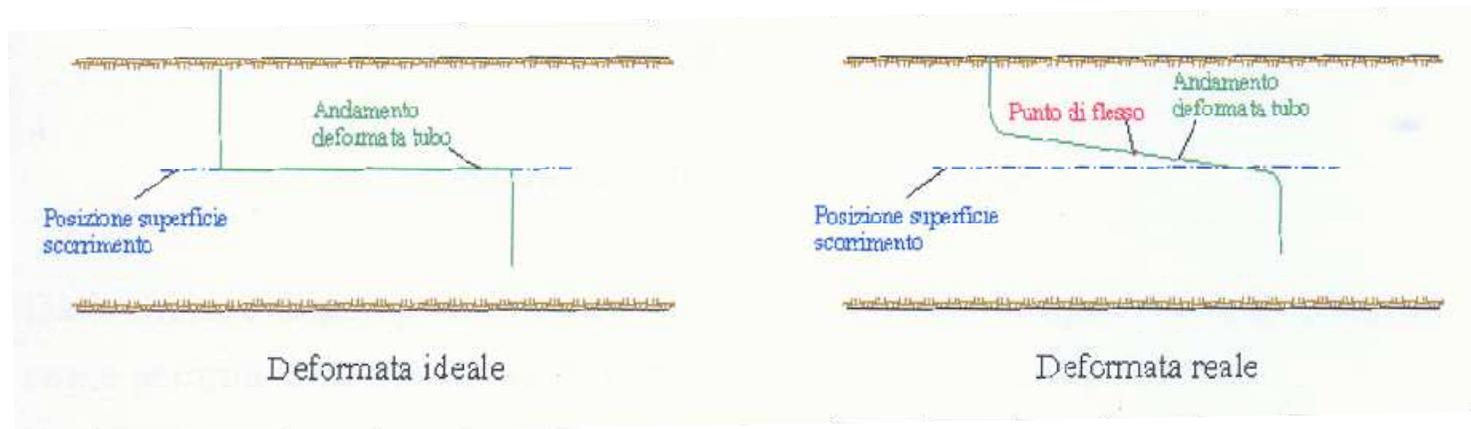
Idealmente, lo strumento di misura non dovrebbe alterare il valore della grandezza che sta misurando.

Se ciò avviene, si dice che lo strumento ha una scarsa conformità.

CONFORMITÀ



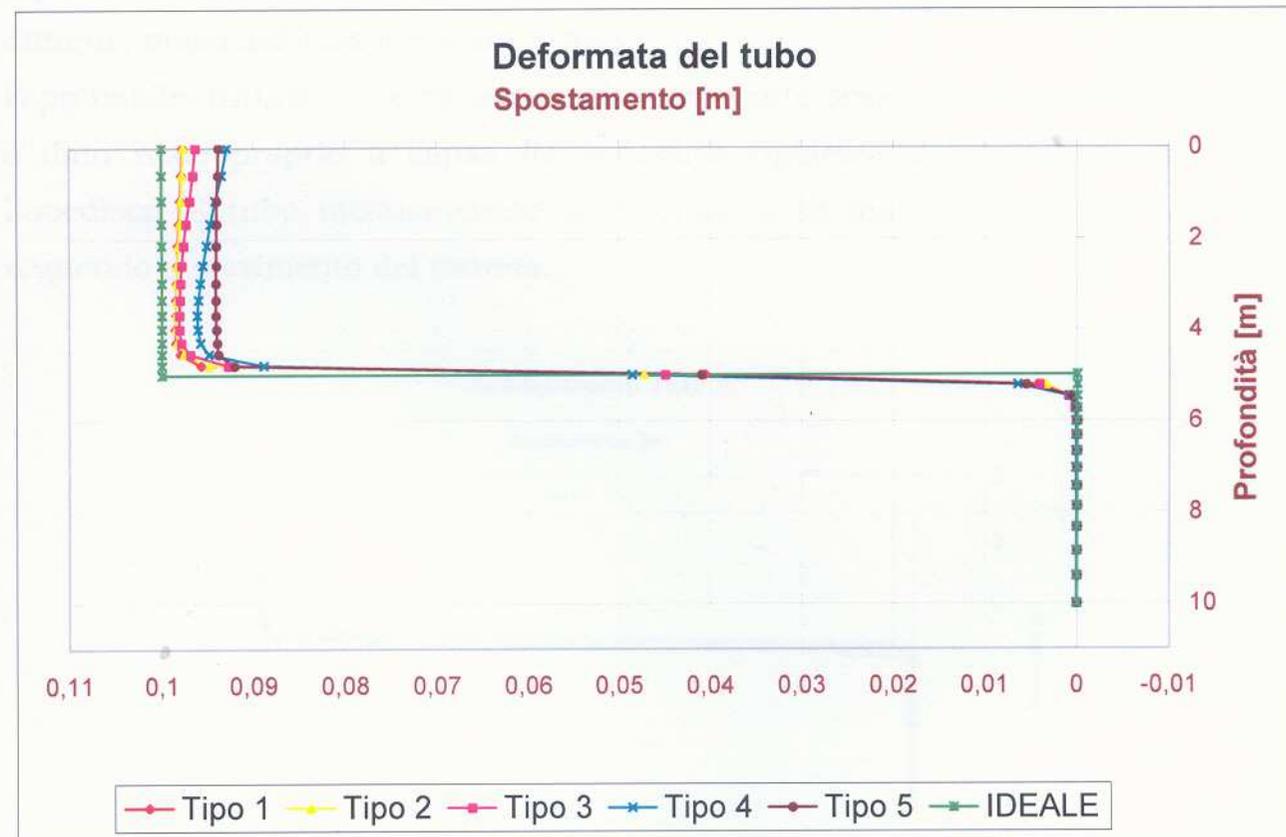
Deformazione del tubo inclinometrico



CONFORMITÀ

TIPO DI RIEMPIMENTO

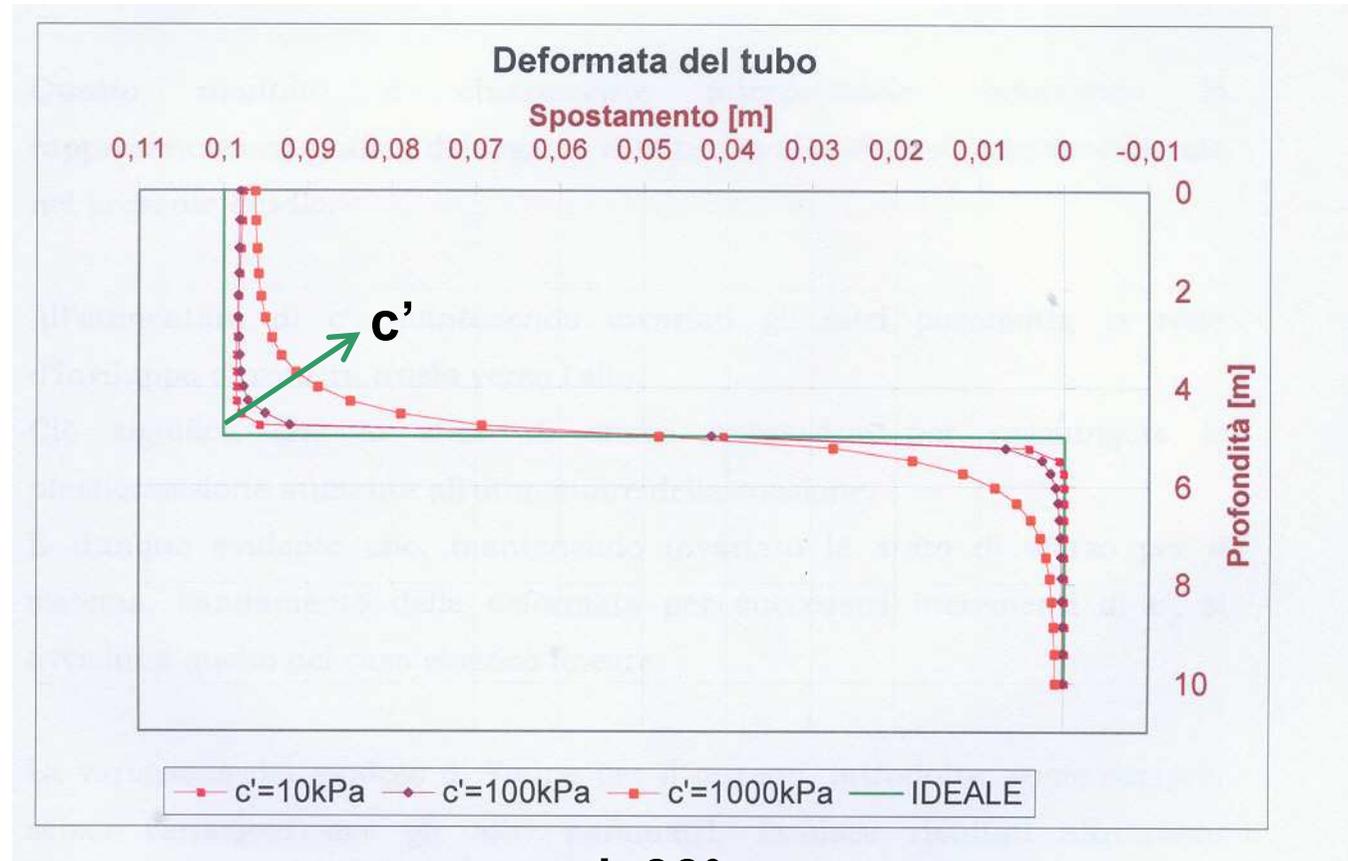
Tipo	E [Pa]
1	2.79 E+07
2	5.81 E+07
3	2.66 E+08
4	8.66 E+08
5	1.00 E+08 (sabbia)



CONFORMITÀ

EFFETTI DELLA RESISTENZA DEL TERRENO

Apparente incremento
dello spessore della
zona di scorrimento



$$\varphi' = 30^\circ$$

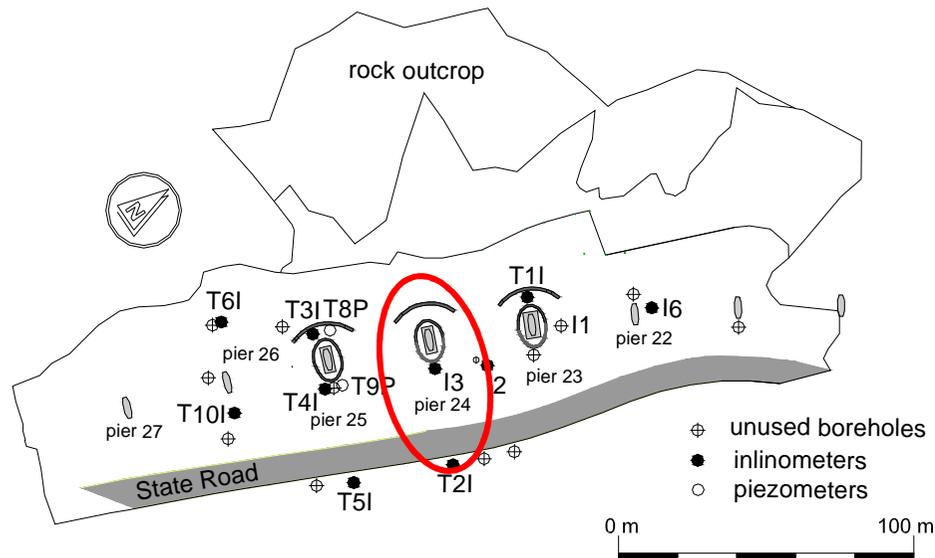
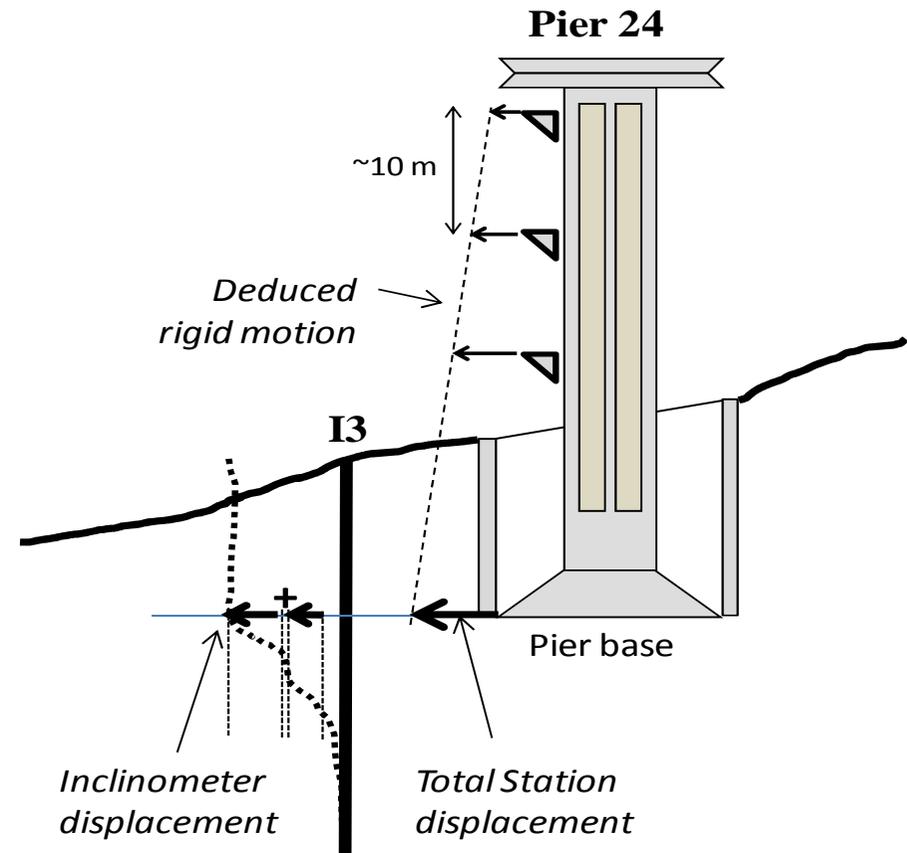
Ridondanza di misure inclinometriche

RIDONDANZA: INCLINOMETRI MOBILI- STAZIONE TOTALE

MONITORAGGIO FRANA V70 IN VALLE DELL'ISARCO (BZ)

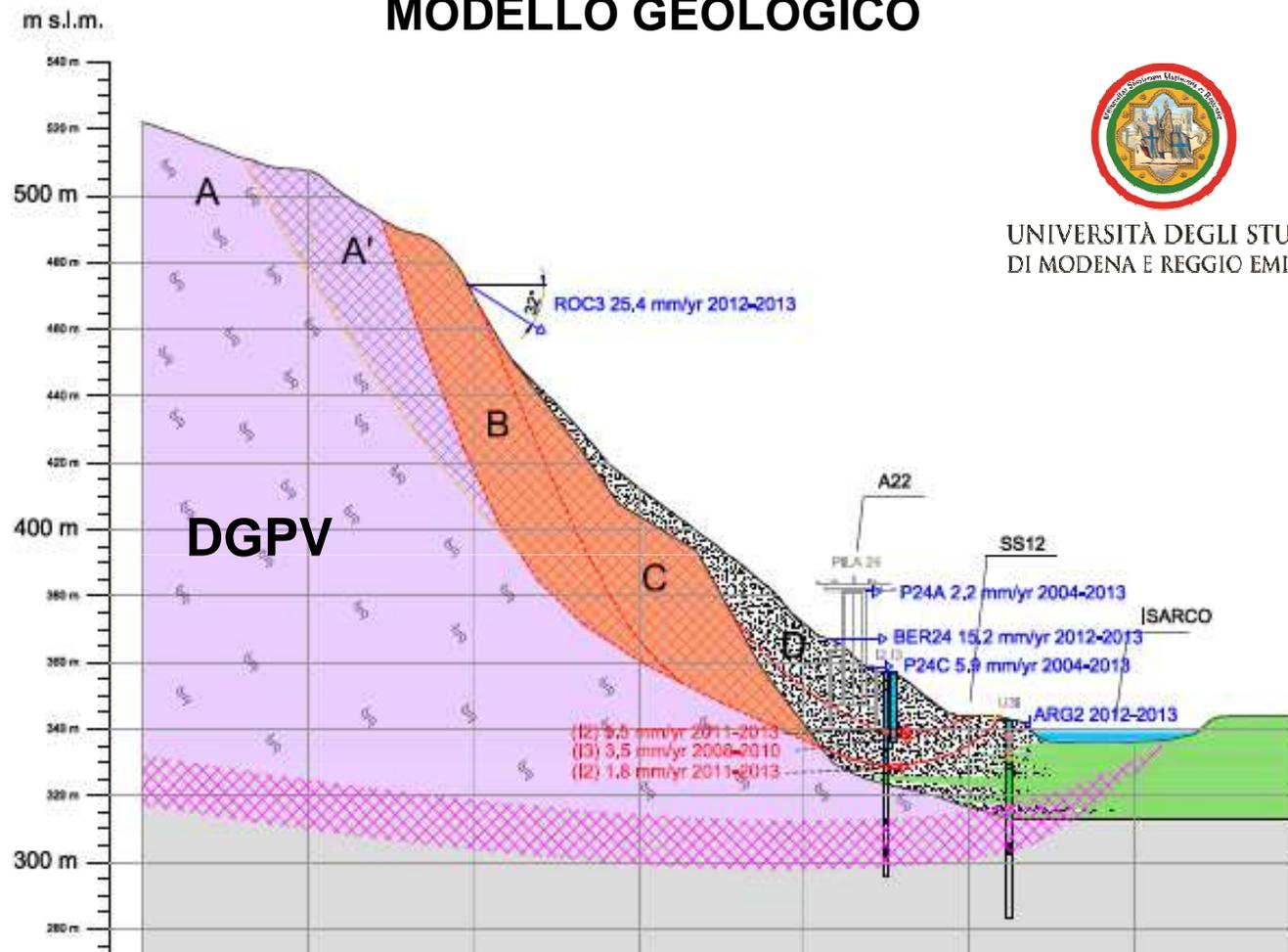


RIDONDANZA: INCLINOMETRI MOBILI- STAZIONE TOTALE



RIDONDANZA: INCLINOMETRI MOBILI- STAZIONE TOTALE

MODELLO GEOLOGICO



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI MODENA E REGGIO EMILIA

Quale unità di frana è responsabile dei movimenti delle pile del viadotto autostradale?



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI TRENTO

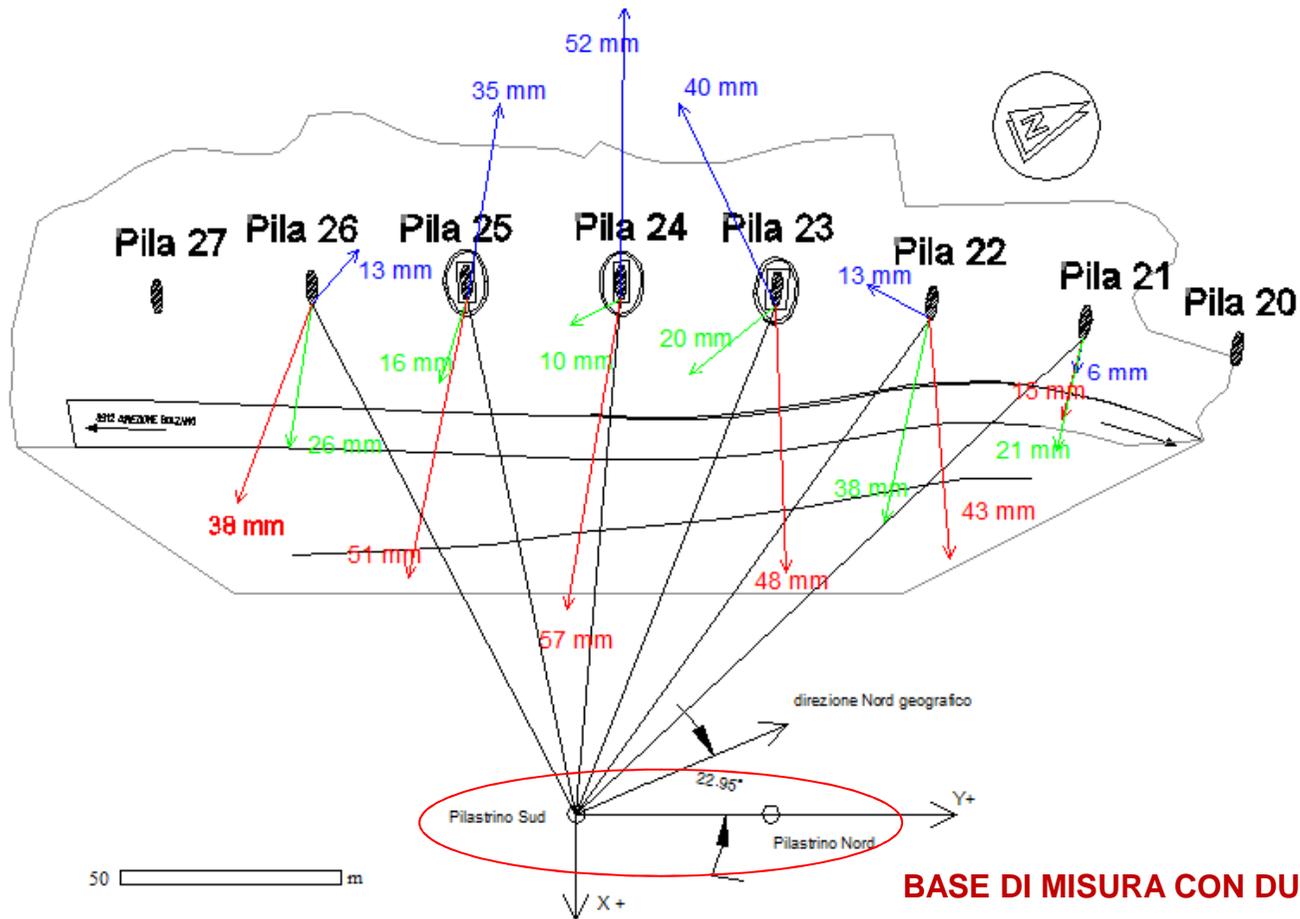
Jesi, 10 giugno 2016

Ing. Lucia Simeoni, Ph.D.
lucia.simeoni@unitn.it

76/80

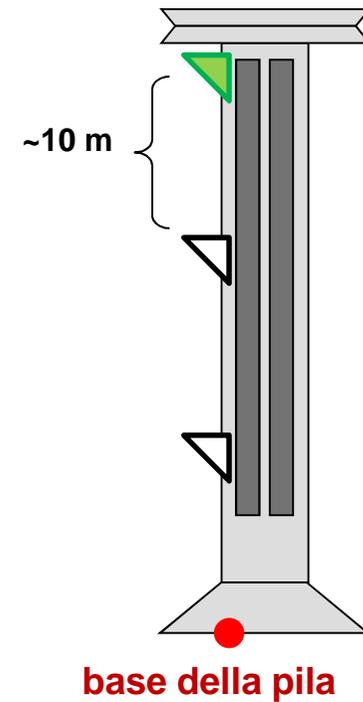
RIDONDANZA: MISURE DI STAZIONE TOTALE

SPOSTAMENTI ASSOLUTI BASE DELLE
SPOSTAMENTI ASSOLUTI TESTA DELLE
SPOSTAMENTO RELATIVO TESTA-BASE



BASE DI MISURA CON DUE PILASTRINI

3 mire ottiche



RIDONDANZA: MISURE INCLINOMETRICHE SU 4 GUIDE

✓ MISURA RIDONDANTE PERCHE' EFFETTUATA SU 4 GUIDE

✓ DIFFERENZE TRA LE DIVERSE ELABORAZIONI

✓ ERRORE SISTEMATICO

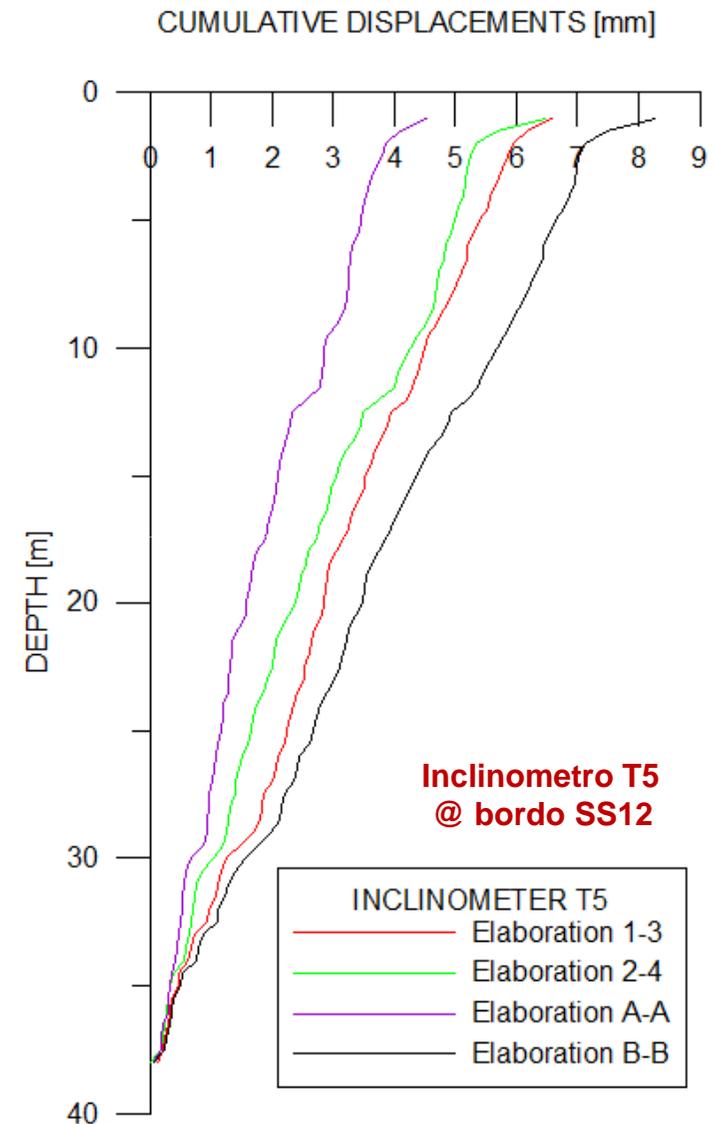
NON RICONDUCE AD ERRORI SISTEMATICI TRADIZIONALI QUALI:

- ROTAZIONE DEI PIANI CONTENENTI GLI ASSI DELLA SONDA
- VARIAZIONE DELLA COSTANTE DI TARATURA DELLA SONDA
- SCOSTAMENTO DALLO ZERO
- ROTAZIONE DEI PIANI CONTENENTI LE GUIDE

✓ NON ESPRIMIBILE CON RELAZIONI EMPIRICHE

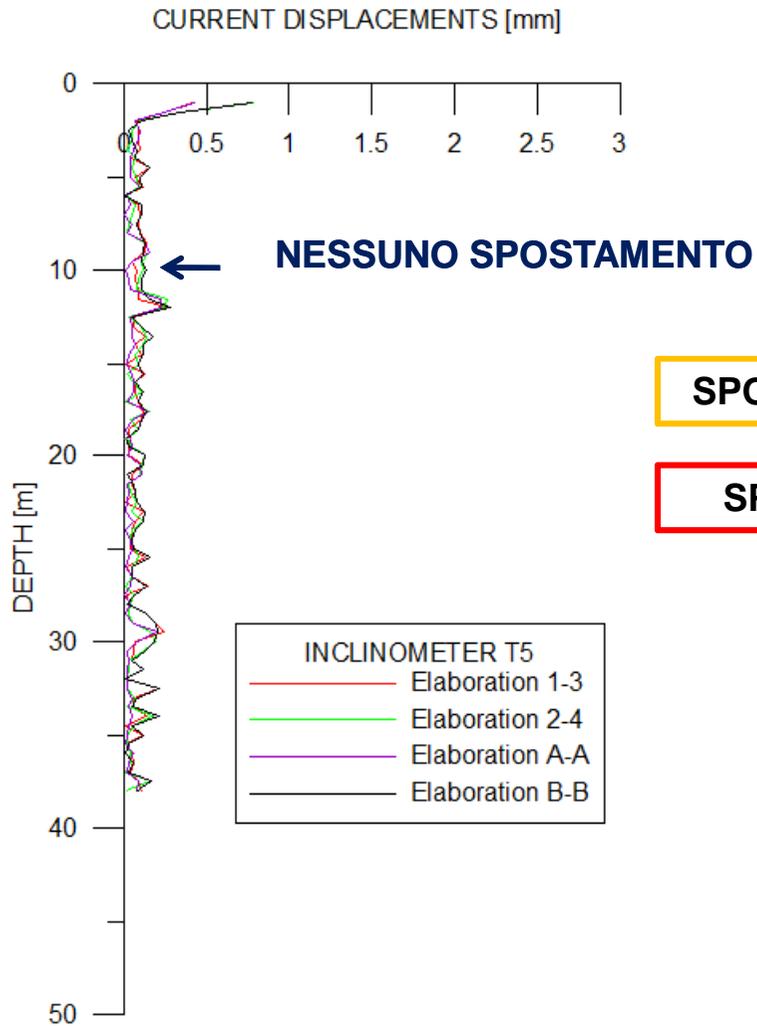


INTEGRAZIONE SU INTERVALLI

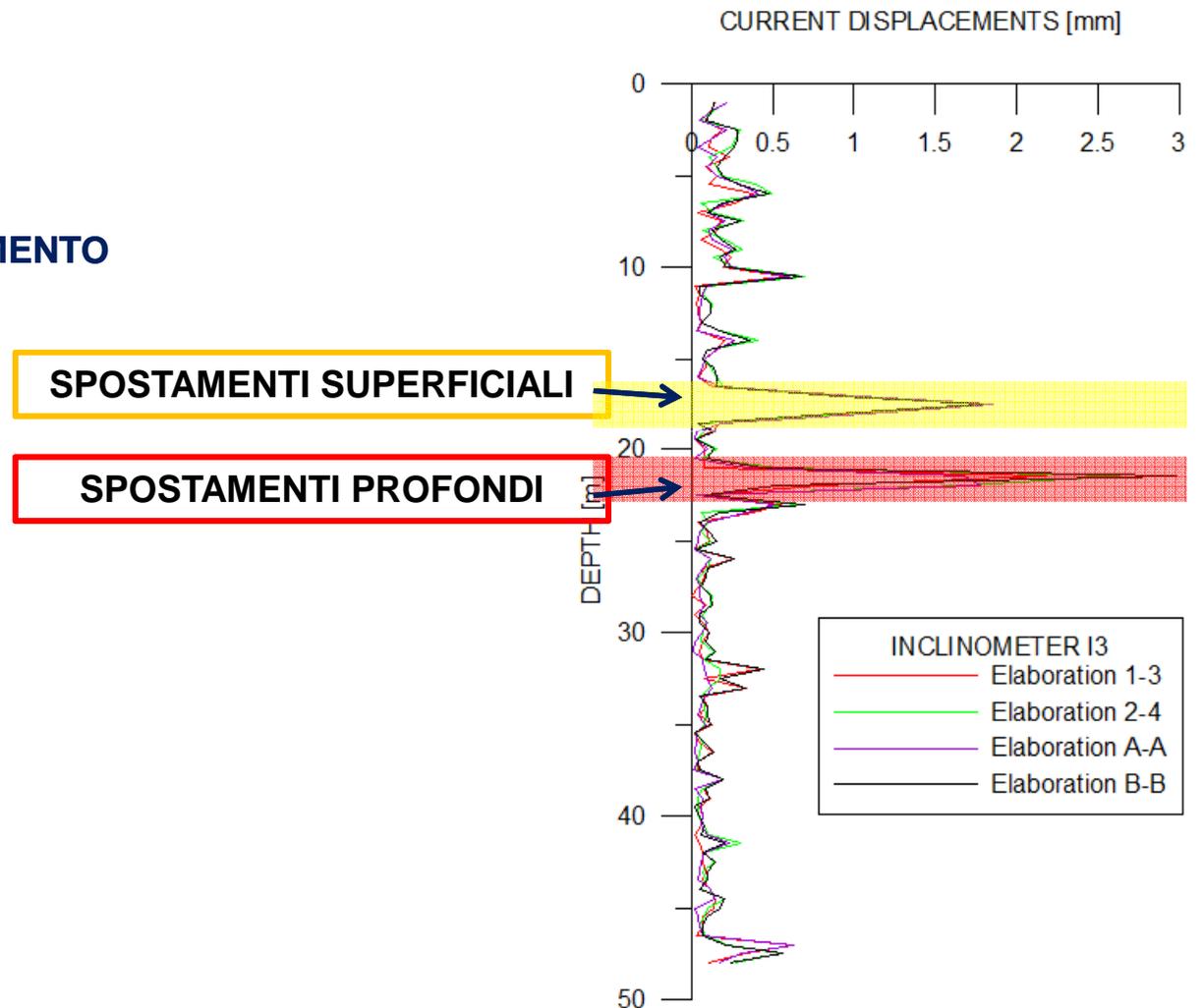


RIDONANZA: INTEGRAZIONE A INTERVALLI

Inclinometro T5 @ bordo SS12



Inclinometro I3 @ pila centrale 24



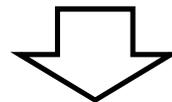
RIDONDANZA: INCLINOMETRI MOBILI- STAZIONE TOTALE

VELOCITA' DEGLI SPOSTAMENTI NEL PERIODO 2009-2010

INCLINOMETRI	PILA	velocità terreno [mm/anno]	velocità base pile [mm/anno]
I6	22	7	8
T1	23	8	9
I2	23/24	6	-
I3	24	8	10
T4	25	7	9
T3	25	10	9
T6	26	9	7

**OTTIMA
RIDONDANZA:
DATI AFFIDABILI**

**6-10 mm/anno per entrambi
+ Azimuth intorno a 110° N orario per entrambi**



UN CINEMATISMO PIÙ PROFONDO, SE ESISTE, HA VELOCITÀ TRASCURABILE



GRAZIE

per l'attenzione!

Bibliografia monitoraggio e misure

ALONSO E.E. & Gens A. (2006) - Aznalcollar dam failure. Part 1: Field observations and material properties. *Géotechnique* 56, No. 3, pp. 165-183.

Gens A. & Alonso E.E. (2006) - Aznalcollar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanics. *Géotechnique* 56, No. 3, pp. 185-201.

DUNNICLIFF J. (1988, 1993) – “Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance”, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 577.

UNI 4546:1984. Misure e misurazioni. Termini e definizioni fondamentali.



Bibliografia misure pressioni interstiziali

LANCELLOTTA R. (1993) – “Geotecnica”, Zanichelli, 2° ed., pp. 555.

SIMEONI L., DE POLO F., CALONI G. & PEZZETTI G. (2011) – Field performance of Fully grouted piezometers, Proc. of the 8th International Symposium on Field Measurement in Geomechanics FMGM11, Berlin, 12-15 September 2011.

VAUGHAN P.R. (1969) - A note on sealing piezometers in boreholes, Géotechnique, Vol. 19, No. 3, pp. 405-413.

Tesi di laurea Università di Trento:

Gheno T. – “Prova in sito di un piezometro Fully-Grouted”, a.a. 2010-2011.

Turrin P. - “Tempi di risposta dei piezometri fully-grouted”, a.a. 2005-06.

Zanolini S. – “Piezometri fully –grouted: sperimentazione in sito e analisi della conformità”, a.a. 2010-2011.

Normativa:

UNI EN ISO 22282-1 (2012). Indagini e prove geotecniche. Prove idrauliche nel sottosuolo. Parte 1- regole generali.

UNI ENV 1997-2 (2007) Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Progettazione assistita con prove in sito.

UNI EN ISO 22475-1 (2007) Indagini e prove geotecniche. Metodi di campionamento e misurazioni sull'acqua del sottosuolo. Parte 1: principi tecnici per l'esecuzione. Versione Italiana di maggio 2008.



Bibliografia misure spostamenti

- COOPER M.R. (2000) – Presentation of Monitoring Data for Unstable Slopes, Proc. of the 8th Symposium on Landslides, Cardiff, 26-30 June 2000, pp. 311-316.
- MIKKELSEN P.E. (2003) - “Advances in inclinometer data analysis”, 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Oslo, Norway, 15-18 September 2003, pp. 555-567.
- SIMEONI L. & BENCIOLINI G.B. (2007) – Complementarietà tra i monitoraggi inclinometrico e topografico per l’analisi di stabilità di un versante”. Atti del XXIII Convegno Nazionale di Geotecnica, Padova, 16-18 maggio 2007, pp. 639-646.
- SIMEONI L. & BOSCO g. (2011) - Influenza del procedimento di cementazione dei tubi inclinometrici sulle misure. Atti del XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica, Napoli, 22-24 Giugno 2011, vol. 2, pp. 791-798.
- SIMEONI L. & MONGIOVI’ L. (2007) – Inclinometer monitoring of the Castelrotto landslide in Italy. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 6, June 2007, pp. 653-666.

Tesi di laurea Università di Trento:

Ganarin F. - “Effetti del tipo di tubo sugli errori delle misure inclinometriche”, a.a. 2006-07.

Maturi F. - “Programma per la valutazione degli spostamenti e dei relativi errori nelle misure inclinometriche”, a.a. 2005-06.

Pellizzaro E. - “Effetti dell’errore sistematico sulle misure inclinometriche”, a.a. 2004-05.

