



Prof. Aurelio Ghersi - www.dica.unict.it/users/agheresi/

SPOLETO

22-23 settembre 2017

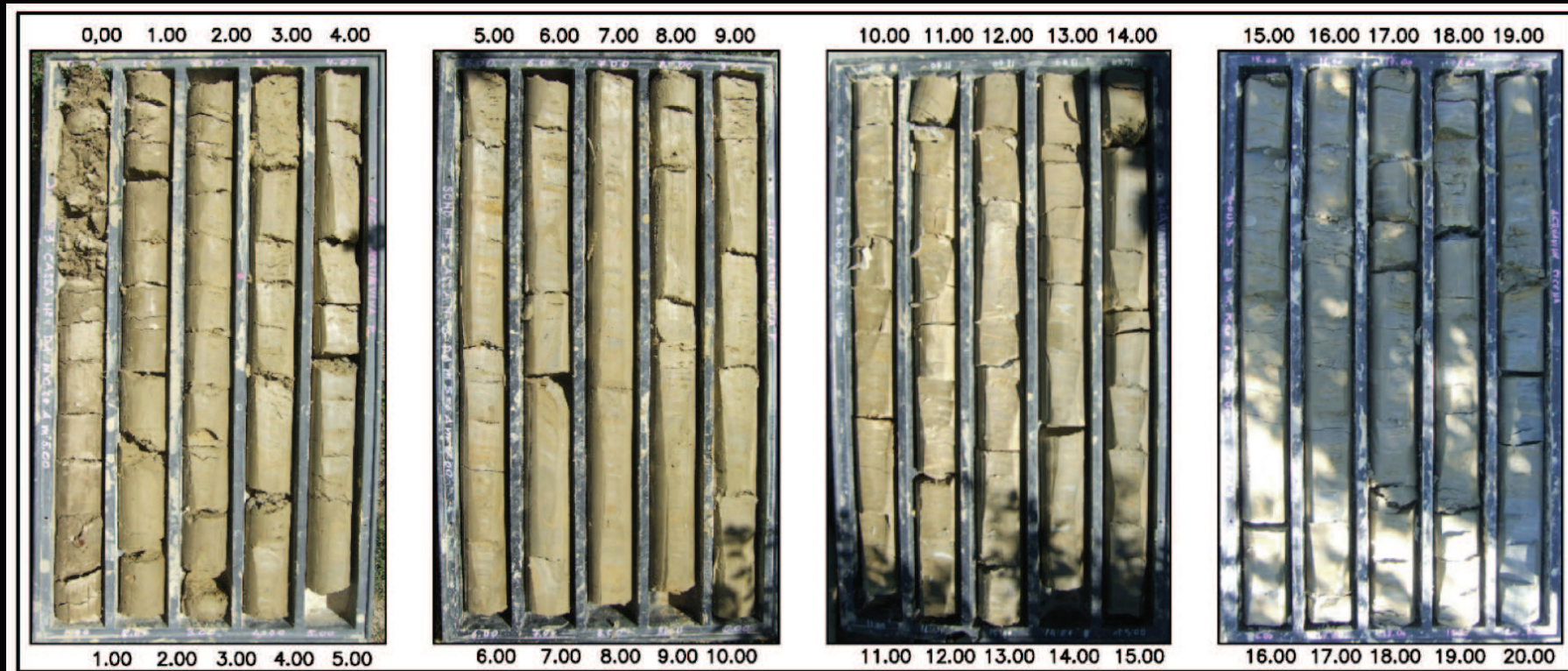


MECCANICA DELLE FRANE E METODOLOGIE DI CONSOLIDAMENTO

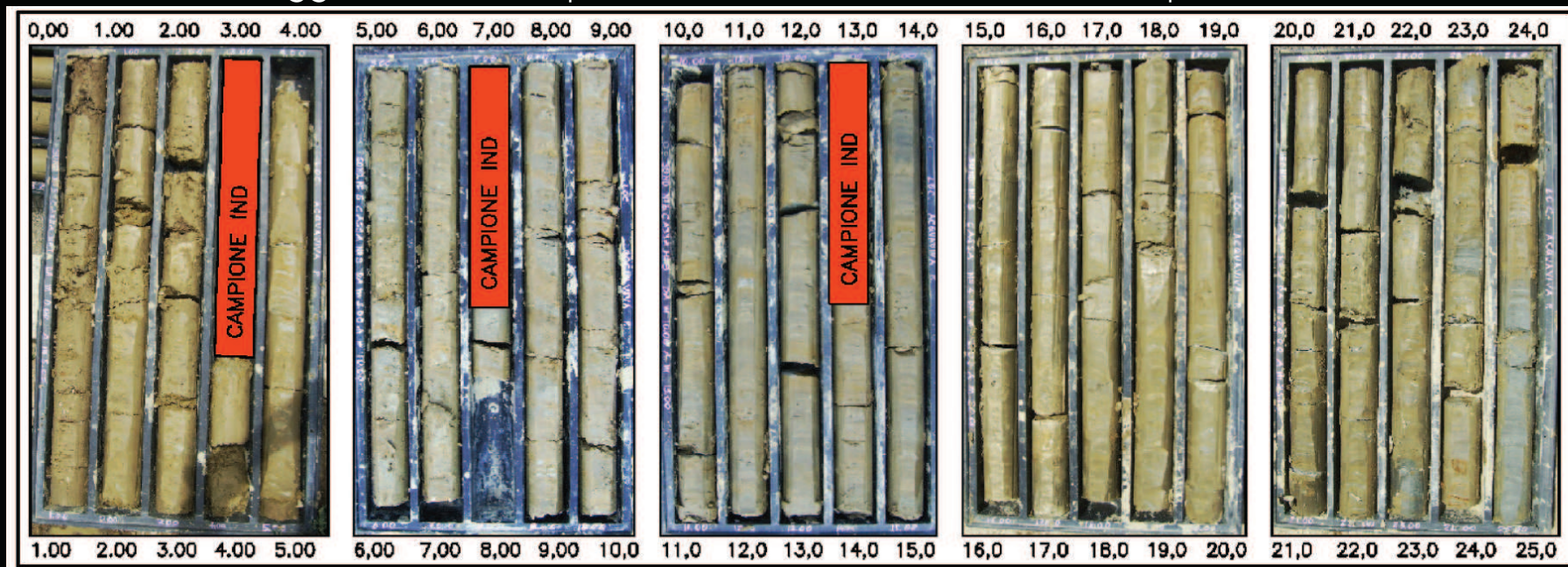
3 - Metodi di indagine e problemi connessi con l'uso delle teorie classiche

Romolo Di Francesco - www.romolodifrancesco.it

1) COMPORTAMENTO MECCANICO DEI TERRENI IN FRANA



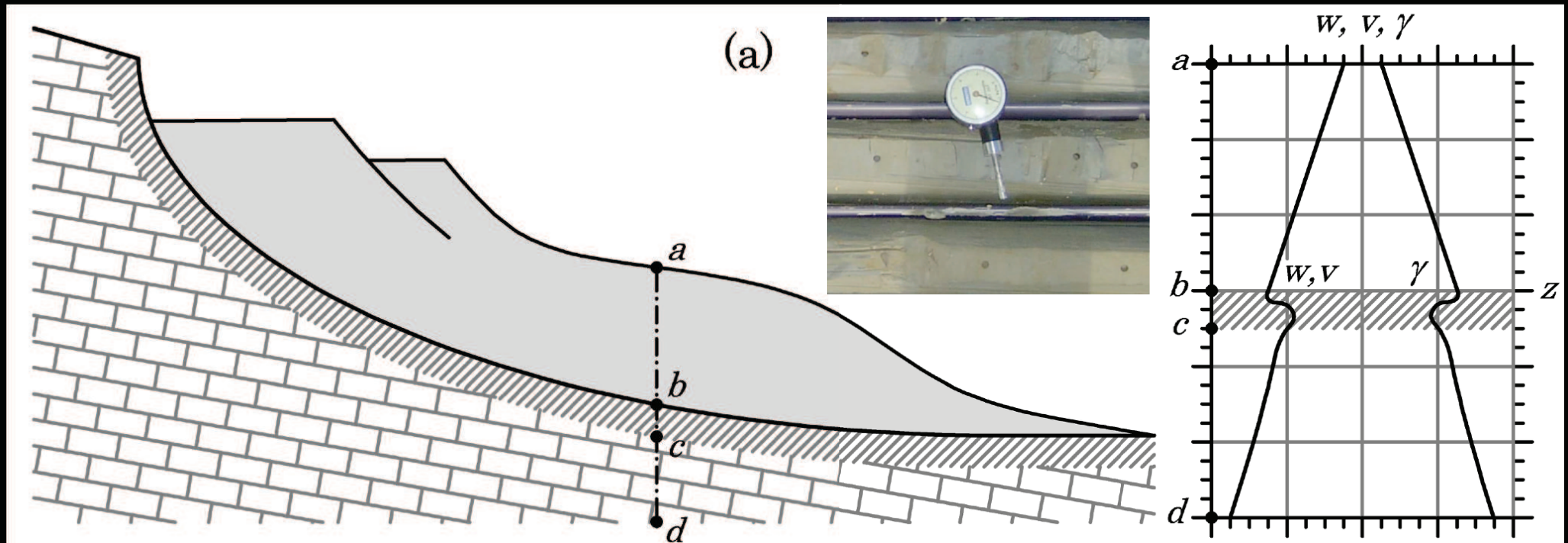
suggerimento: la superficie di rottura si trova a 7 metri di profondità



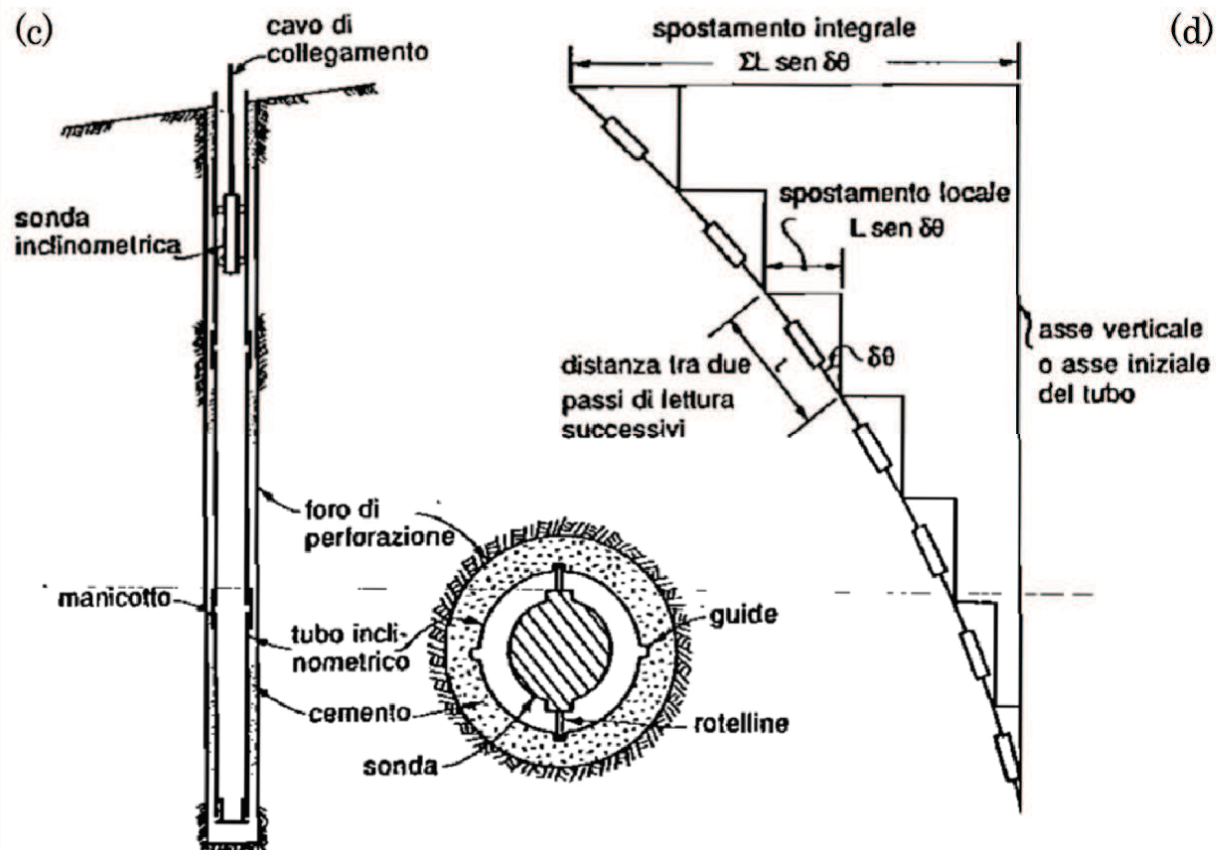
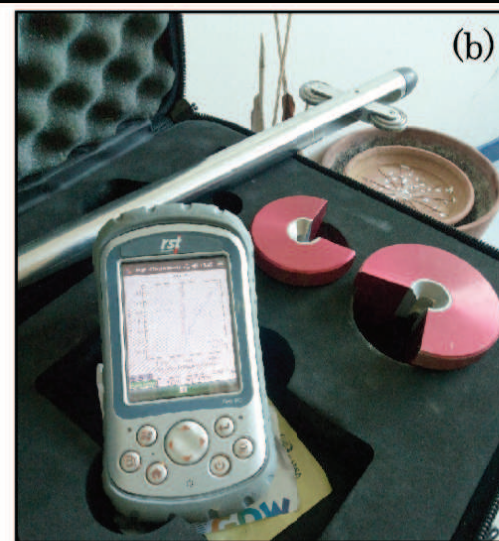
1) COMPORTAMENTO MECCANICO DEI TERRENI IN FRANA

In sintesi:

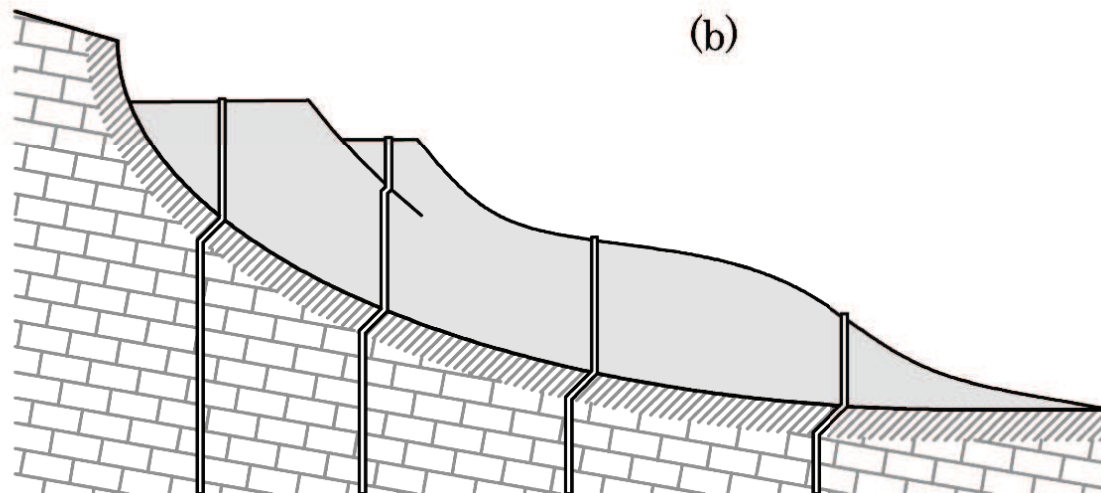
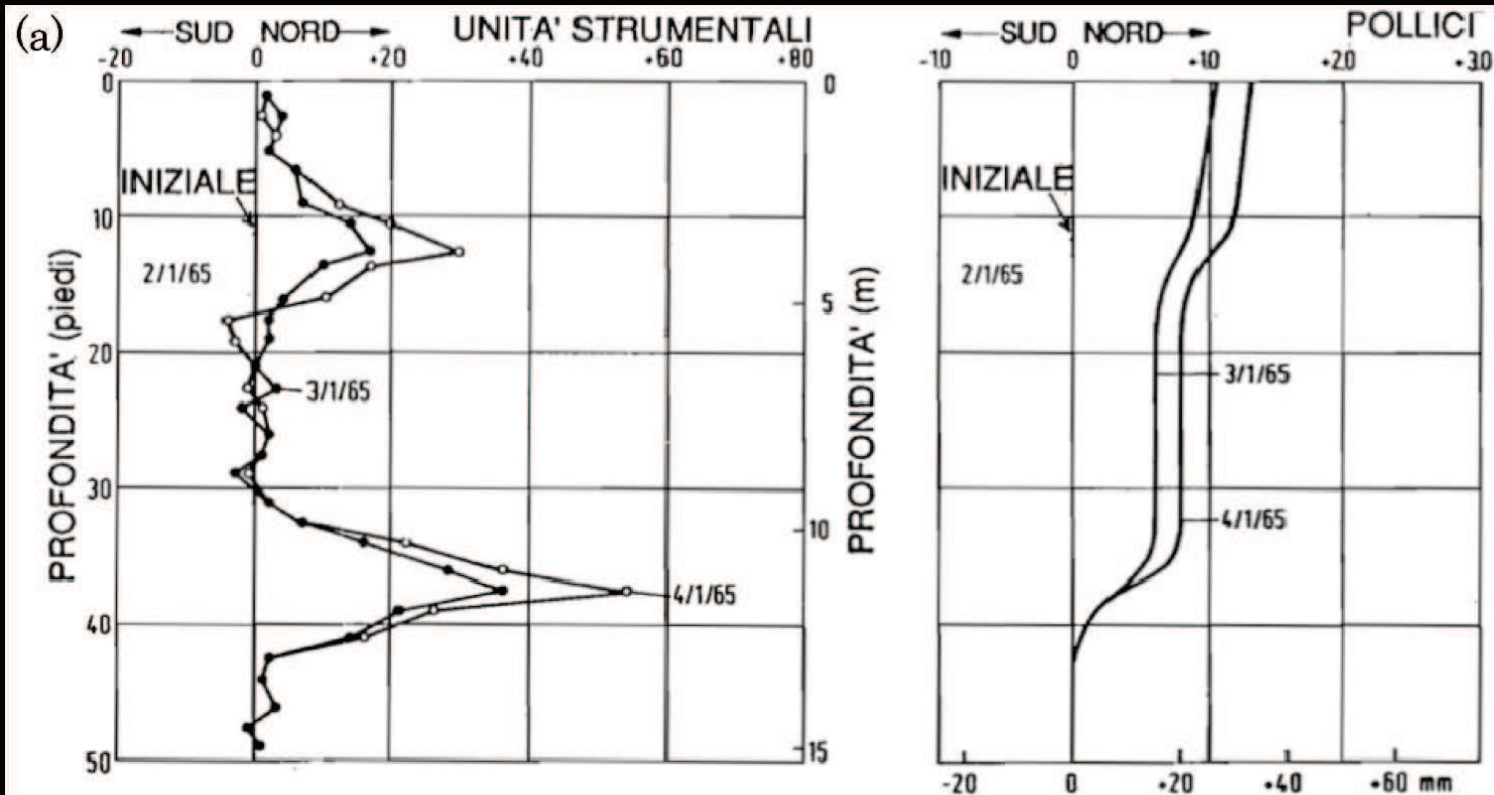
- 1) il contenuto d'acqua aumenta a rottura, ossia i terreni lungo la superficie di rottura e scivolamento vanno a suzione;
- 2) a rottura il grado di saturazione può raggiungere il 100%, il che spiega le venute d'acqua nelle trincee esplorative che superano la profondità della superficie di scivolamento (oltre al fatto che le stesse costituiscono una superficie preferenziale di drenaggio);
- 3) la porosità, che tende a diminuire con la profondità secondo una legge all'incirca lineare, aumenta a rottura;
- 4) il peso di volume, che tende ad aumentare con la profondità secondo una legge all'incirca lineare; diminuisce a rottura per effetto del punto precedente;
- 5) a rottura i limiti di Atterberg subiscono una significativa variazione.



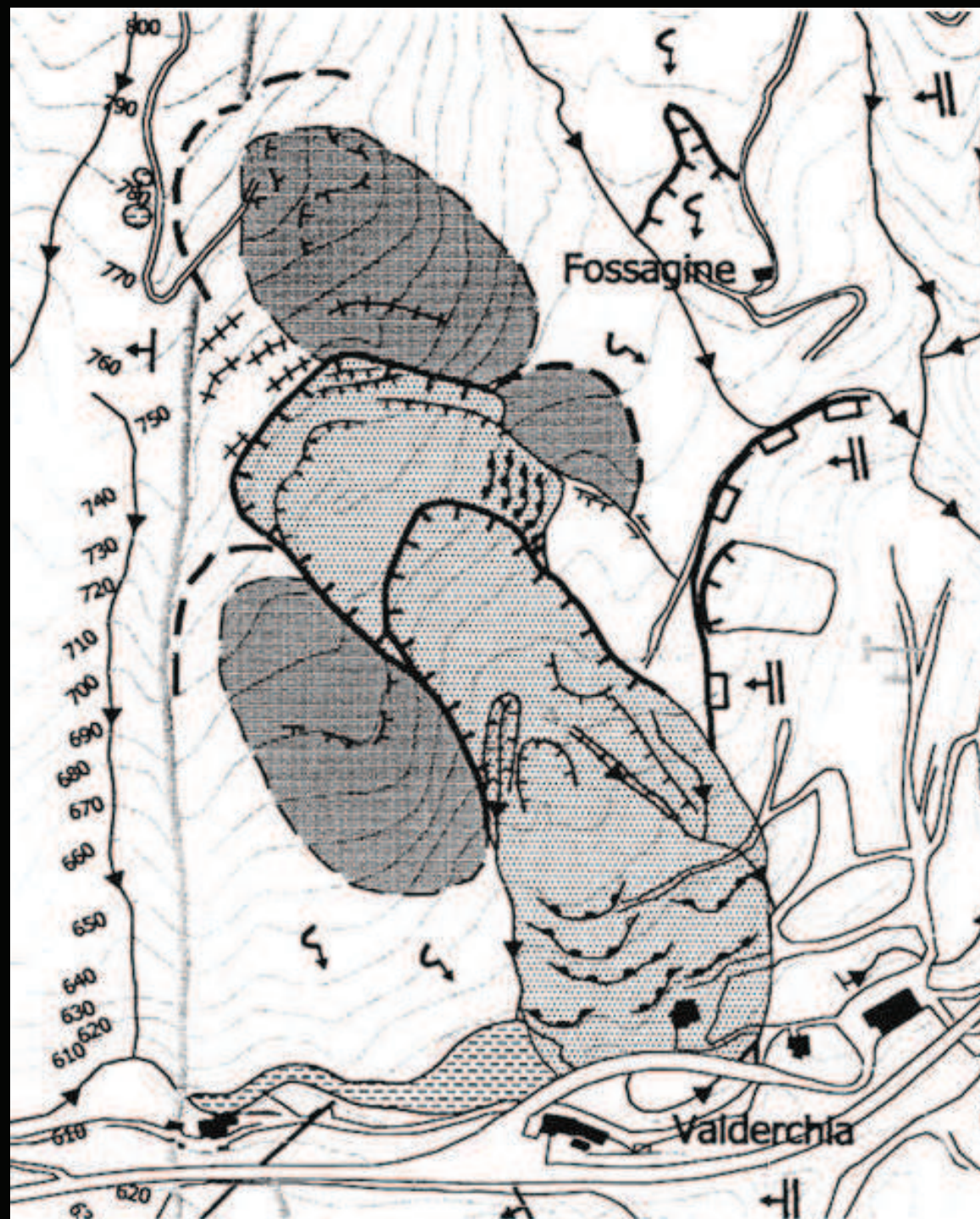
2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: il metodo inclinometrico



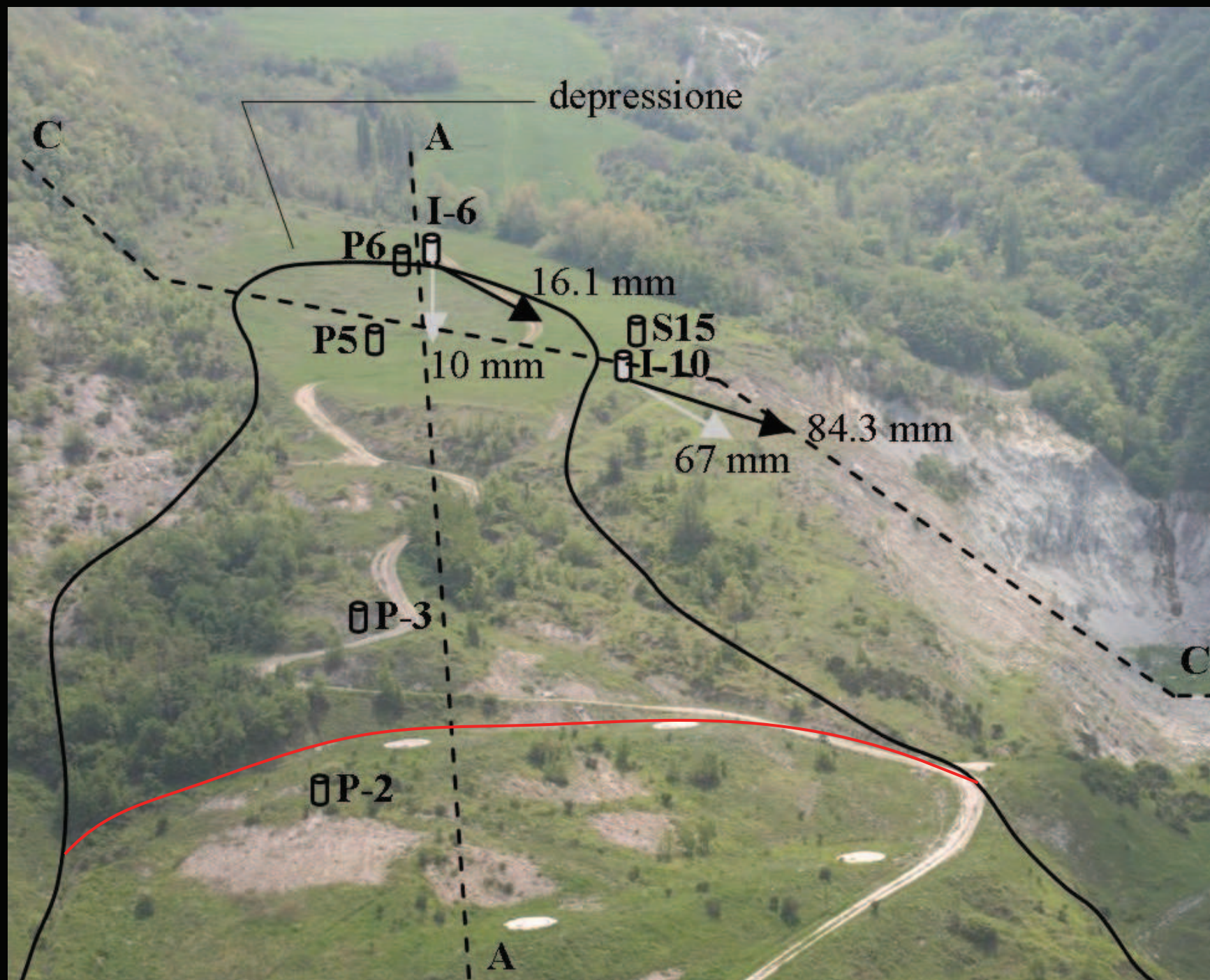
2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: il metodo inclinometrico



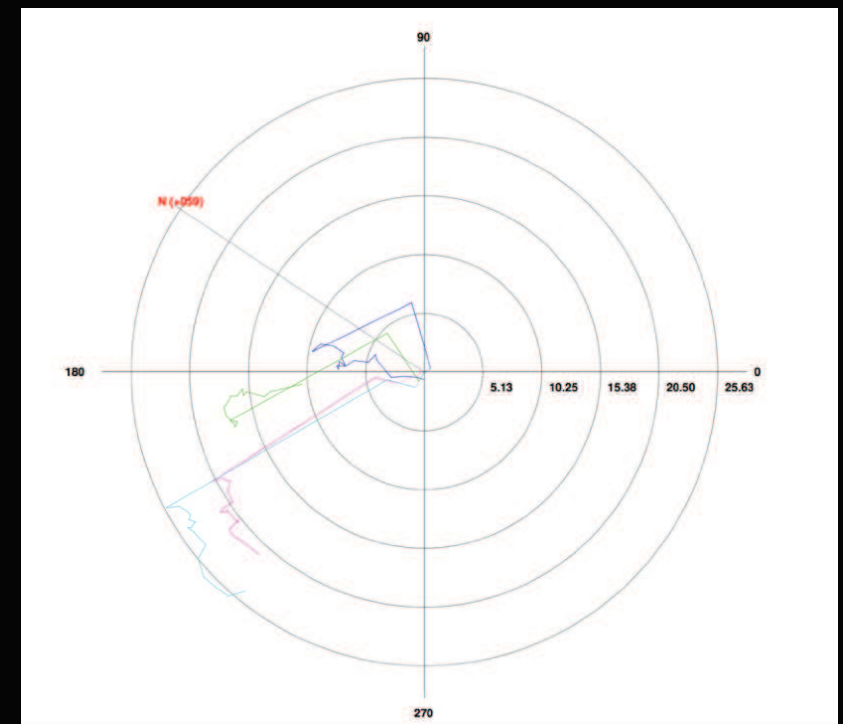
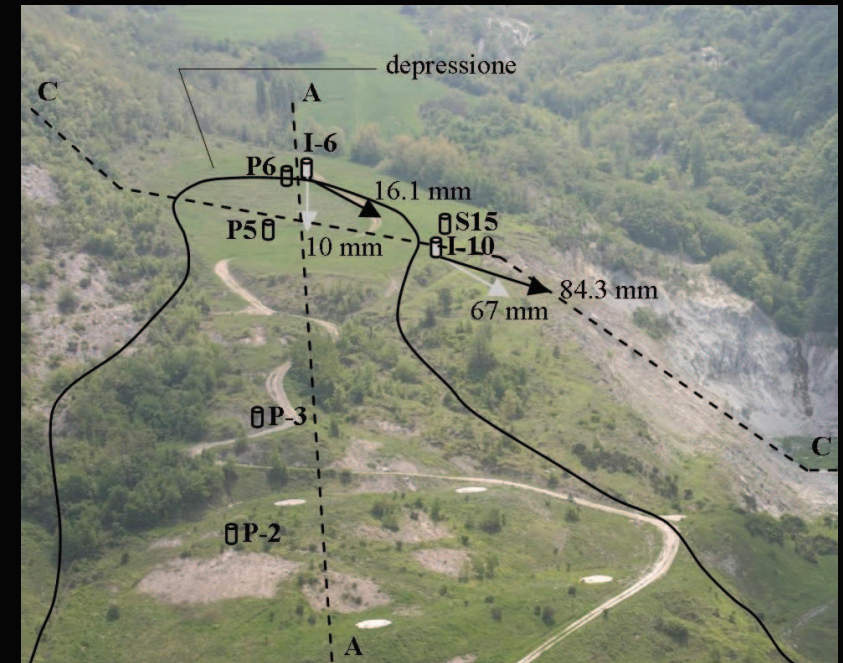
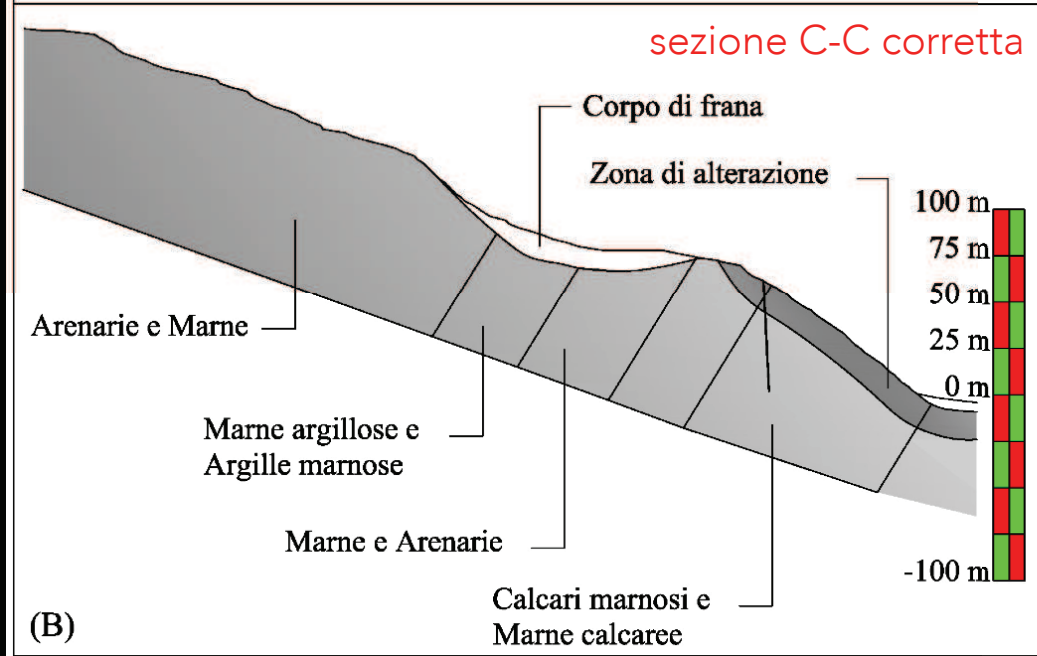
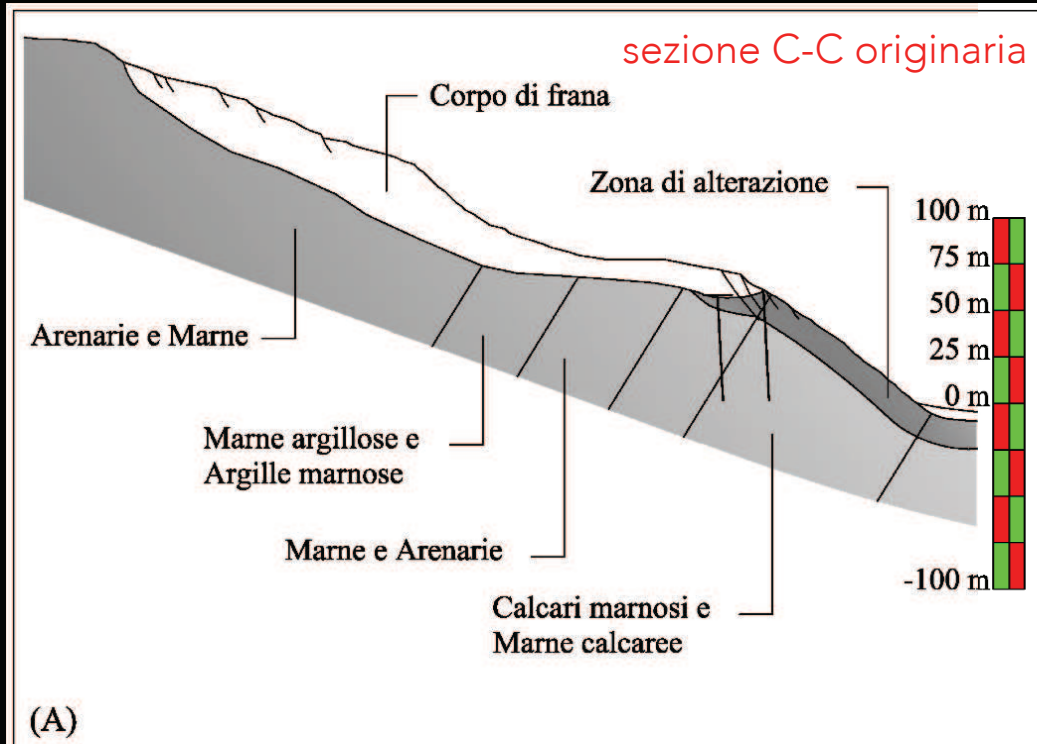
2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: il metodo inclinometrico



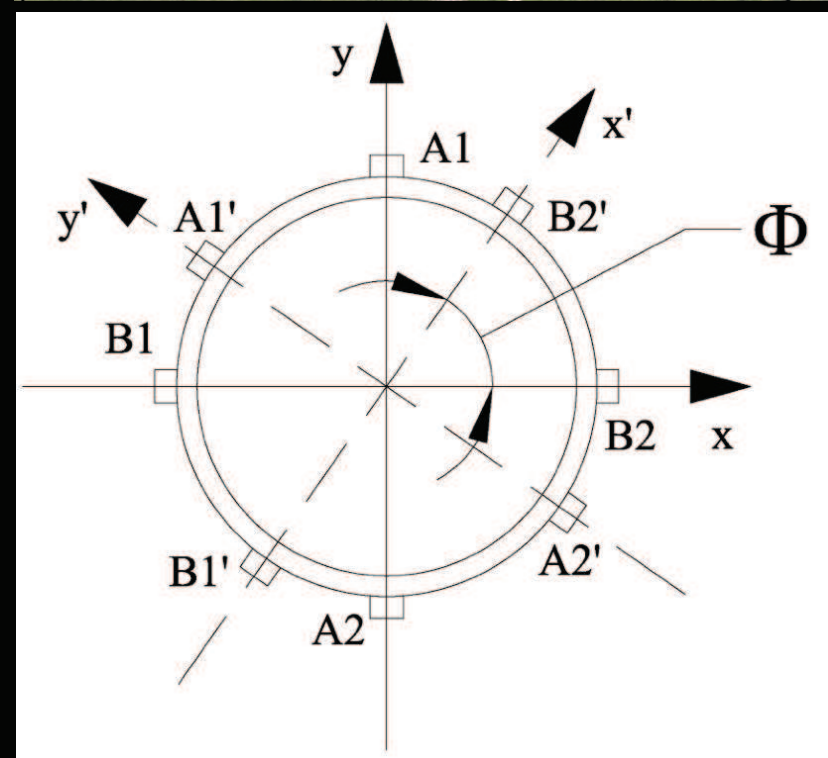
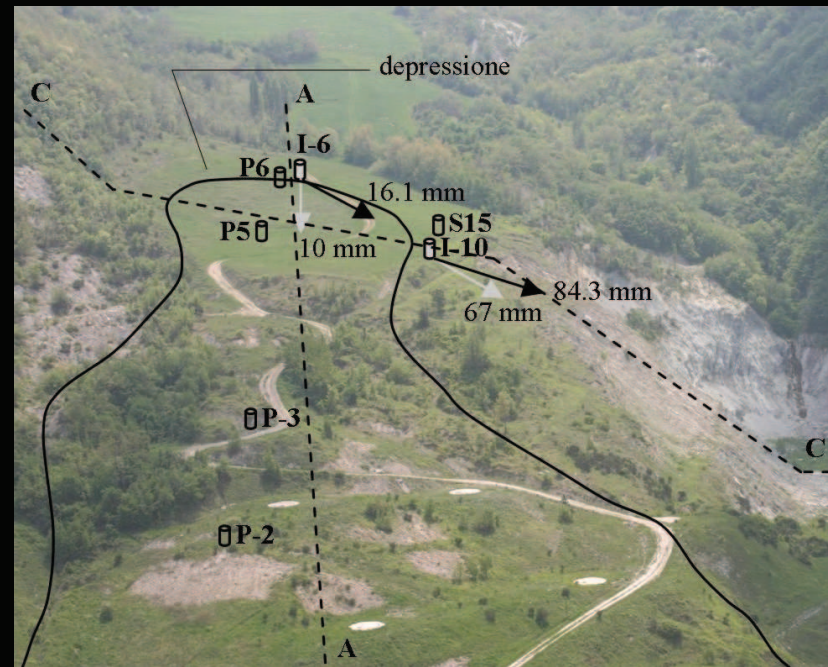
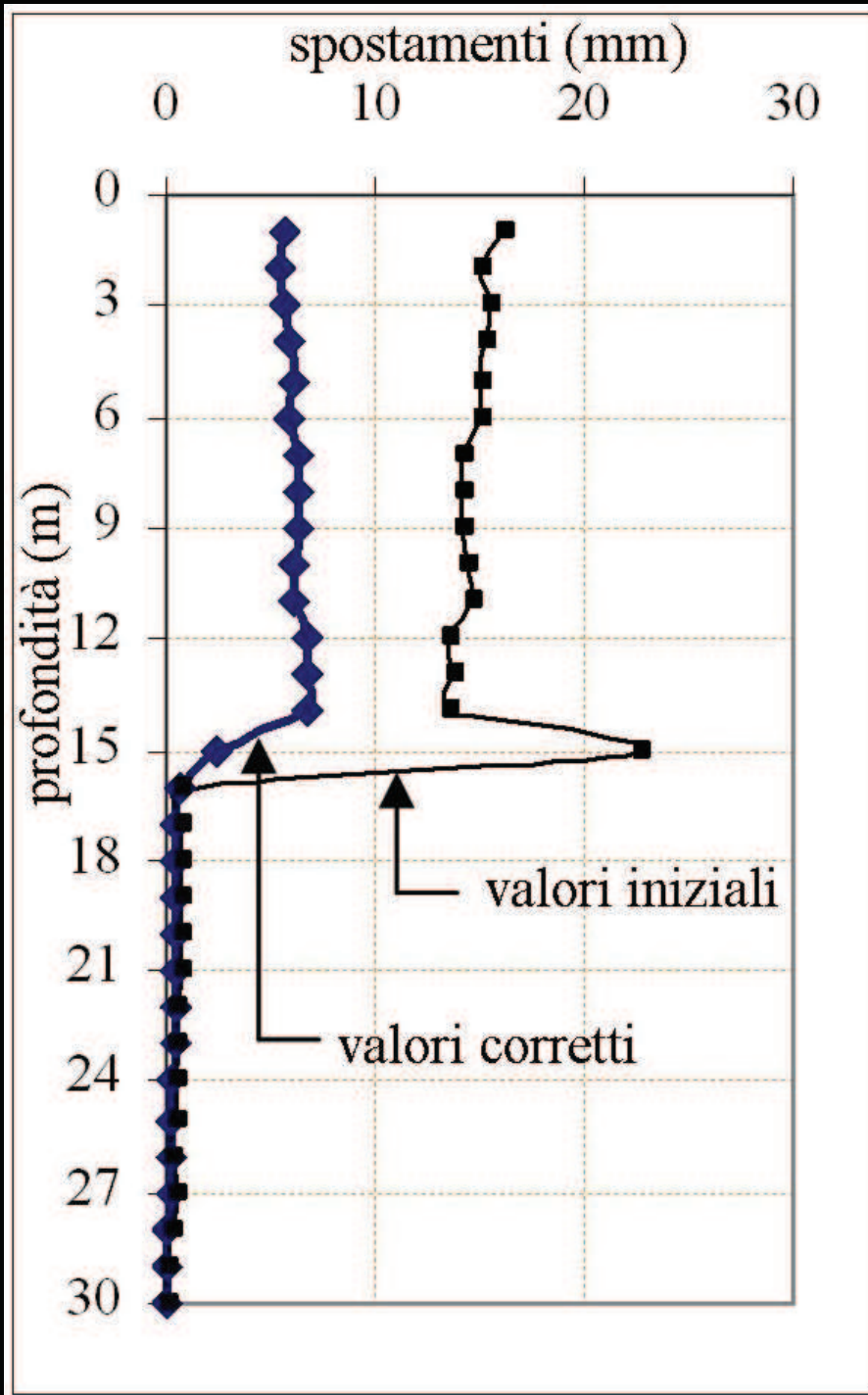
2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: il metodo inclinometrico



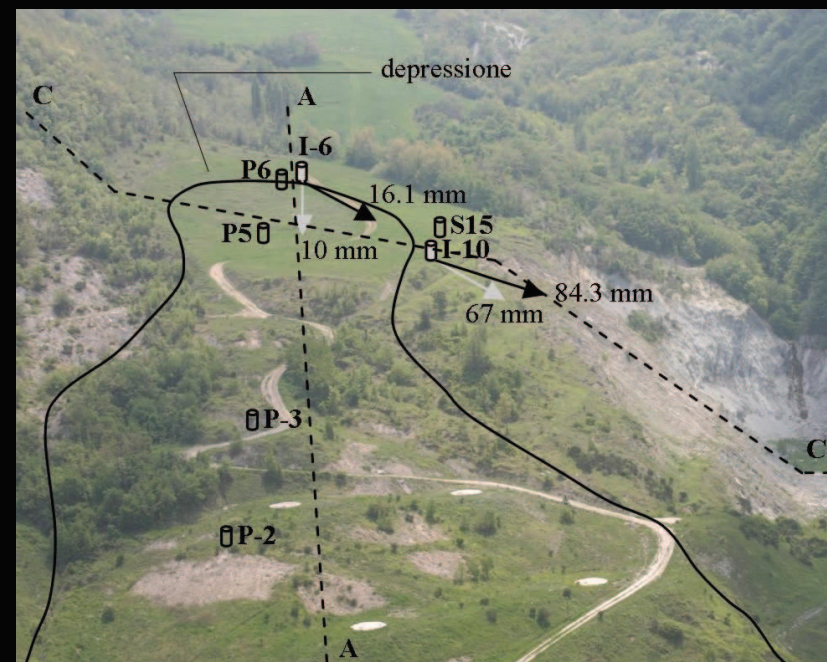
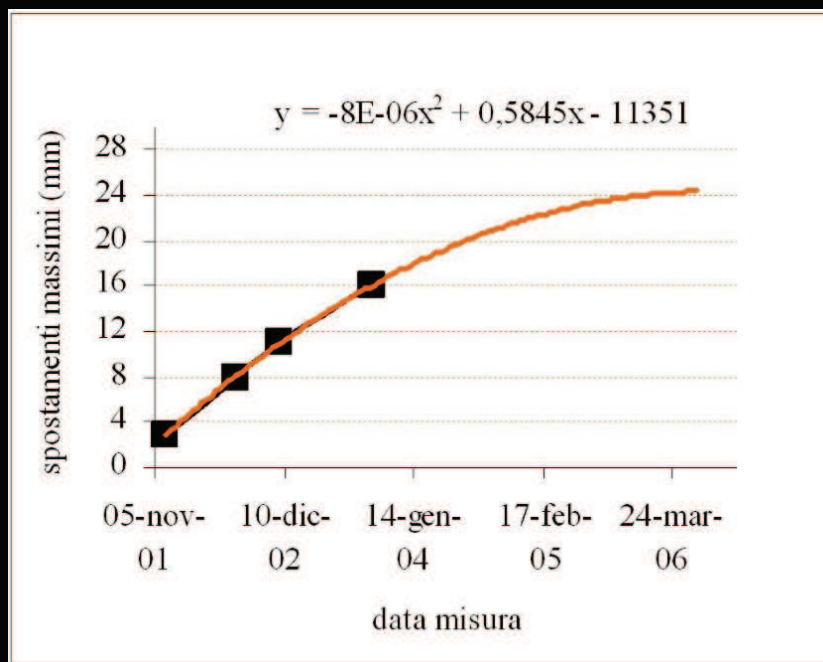
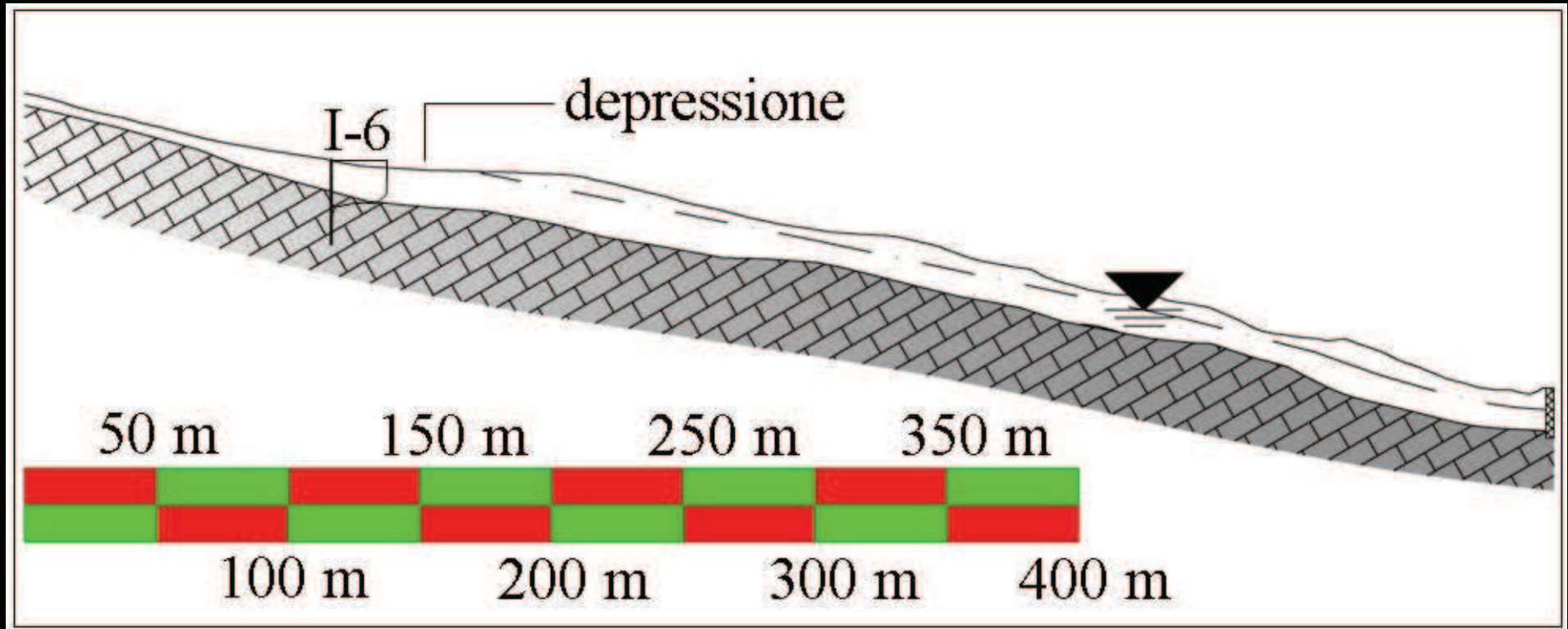
2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: il metodo inclinometrico



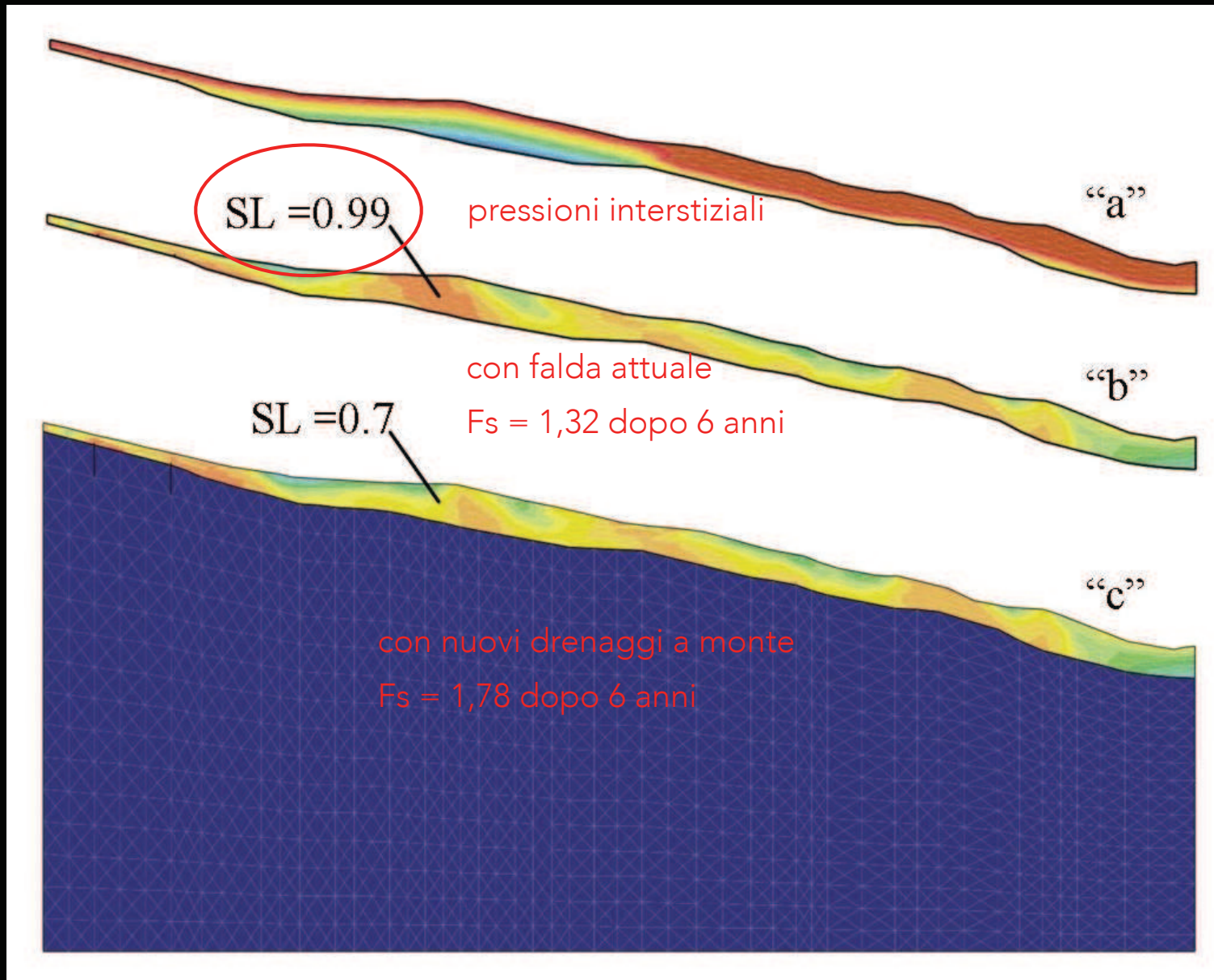
2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: il metodo inclinometrico



2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: il metodo inclinometrico

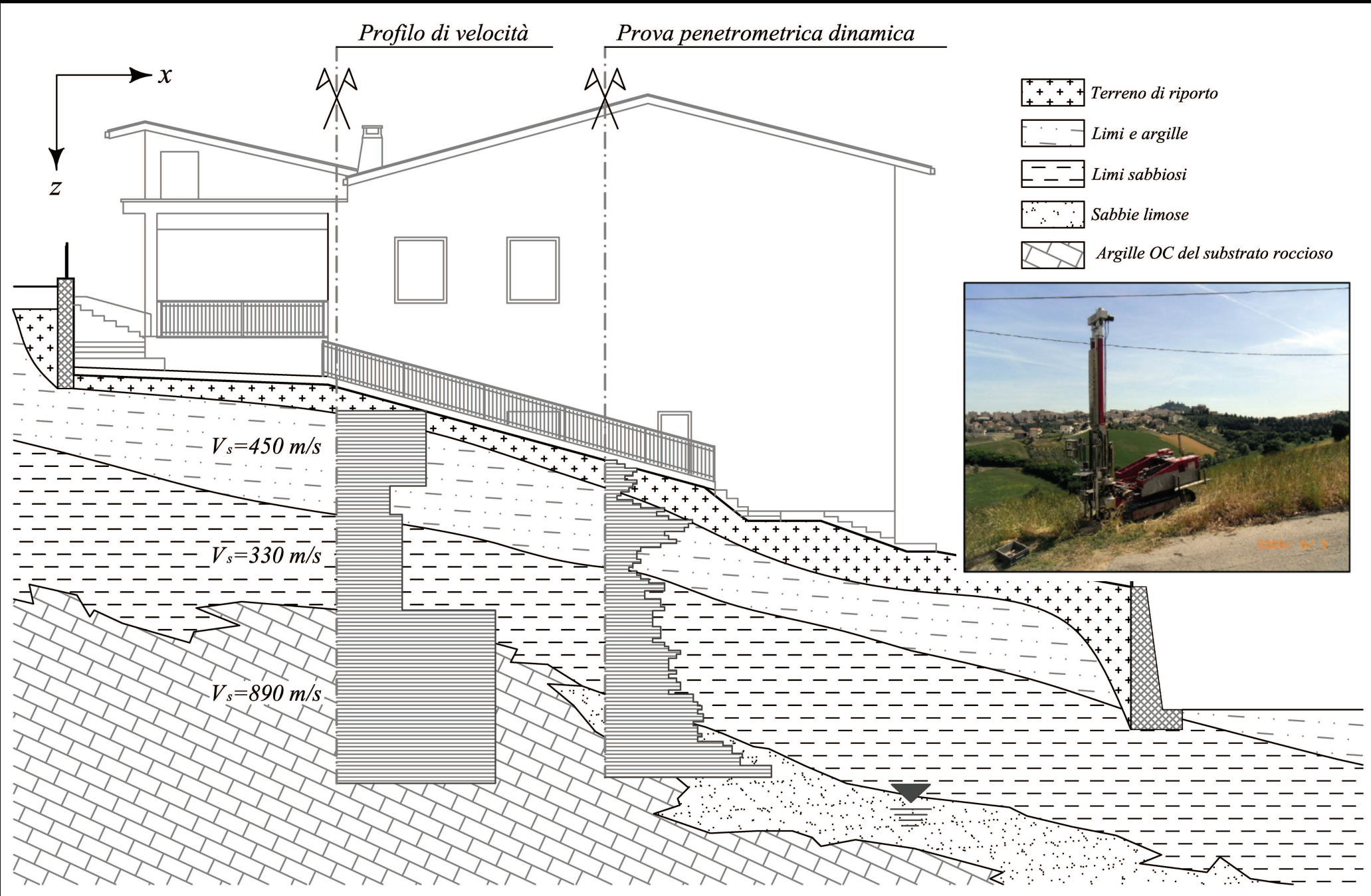


2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: il metodo inclinometrico

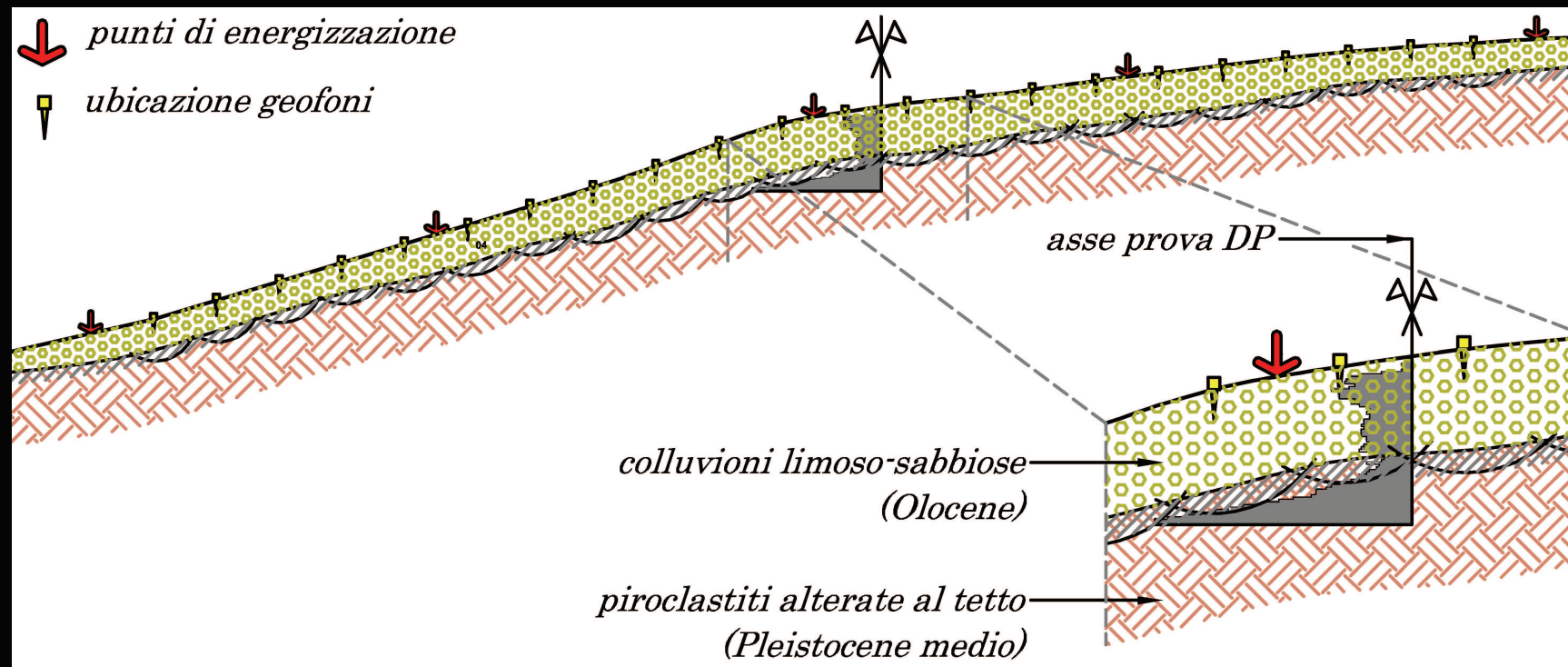


Il ricorso al metodo del pendio indefinito fornisce $Fs = 1,02$ attuale ed $Fs = 2,04$ in caso di esecuzione di nuovi drenaggi nella zona di testata della frana

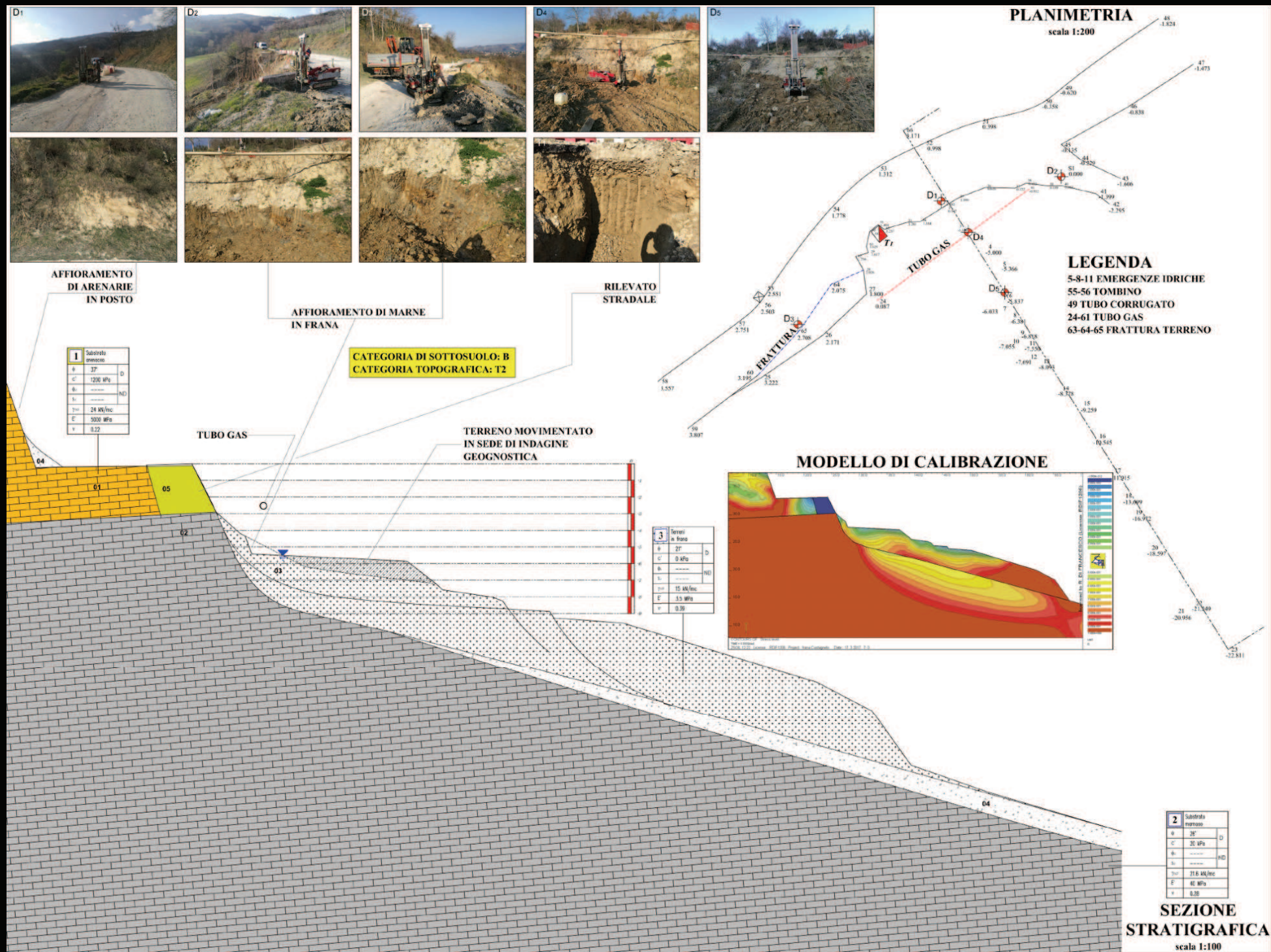
2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: dpsh



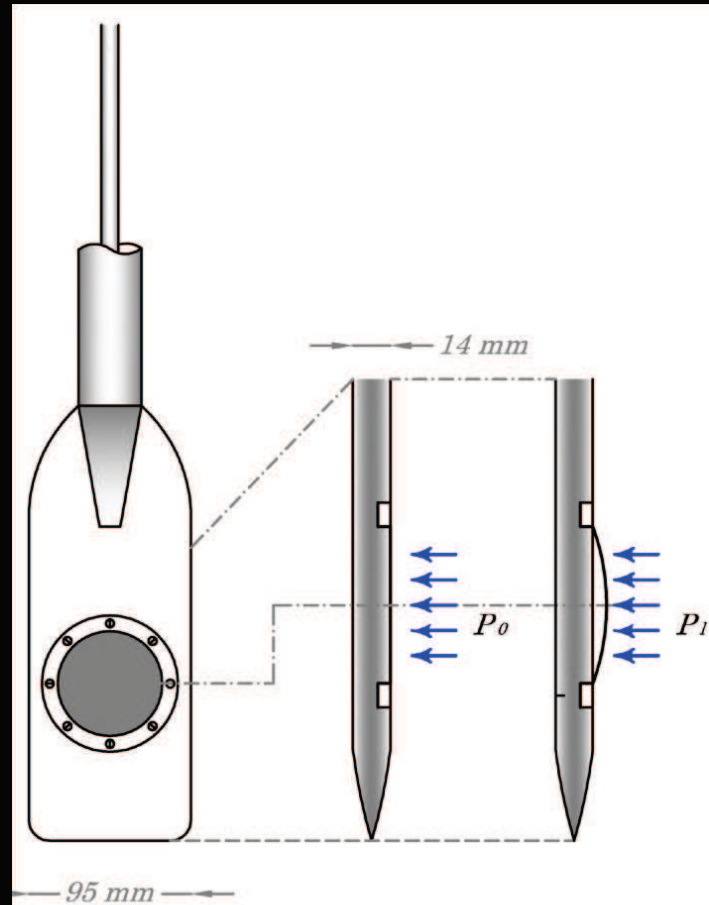
2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: dpsh



2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: dpsh



2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: dilatometro di Marchetti



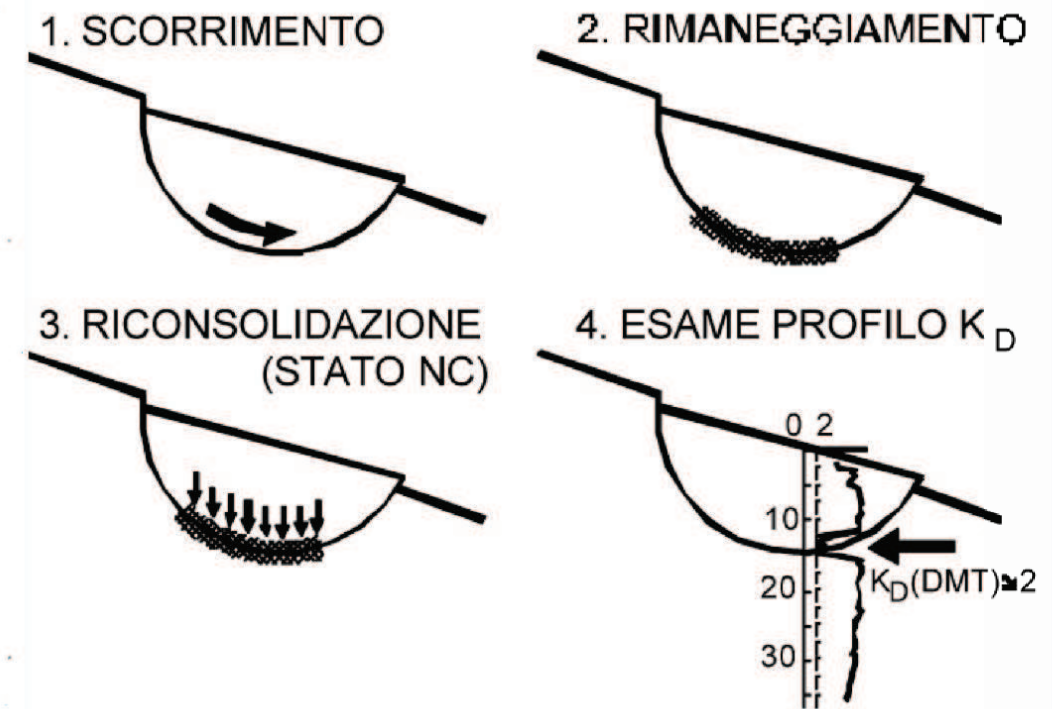
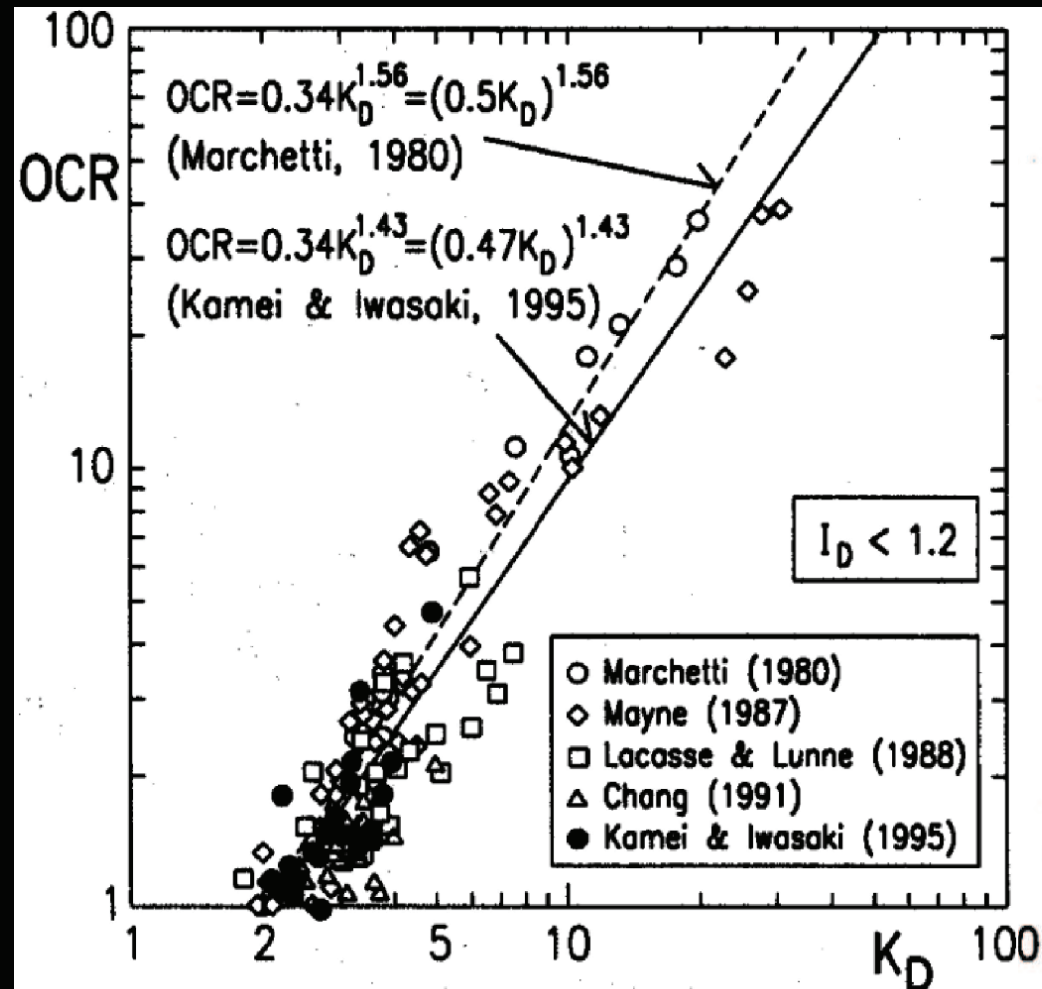
Si misurano due parametri:

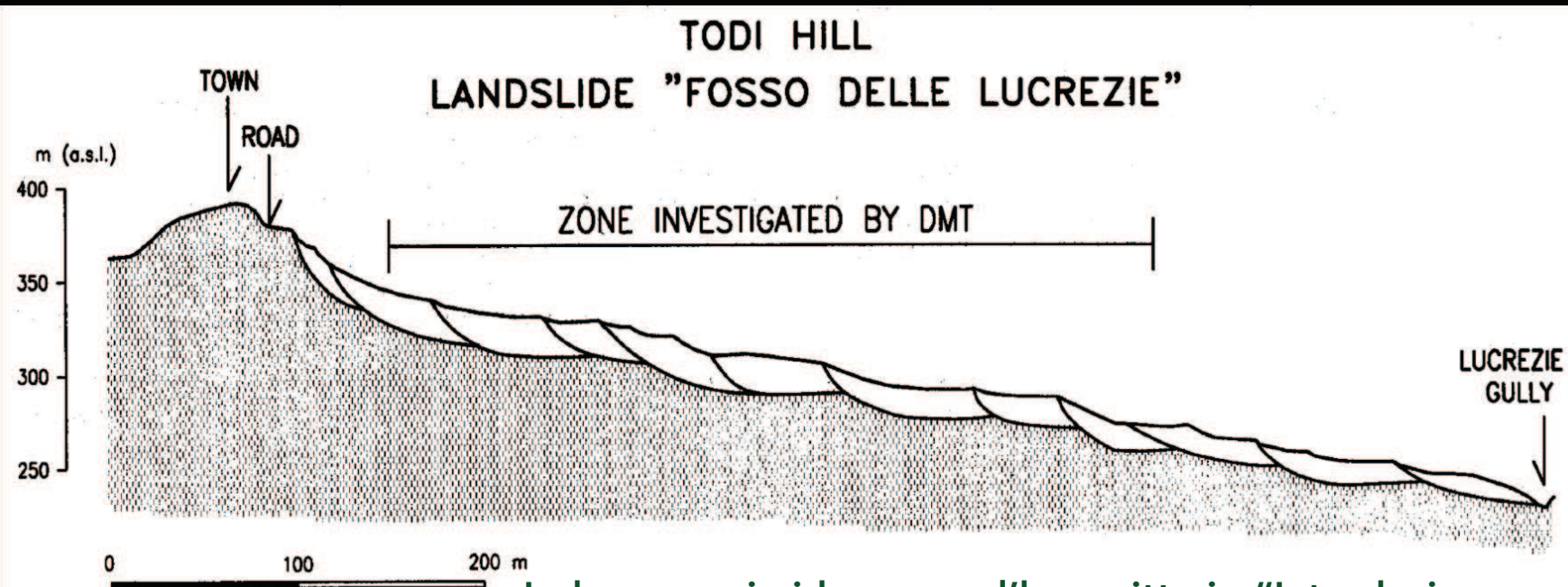
- 1) la **pressione P_0** , corrispondente all'istante in cui la membrana inizia a staccarsi dal supporto con uno spostamento prefissato di 0,05 millimetri;
- 2) la **pressione successiva P_1** , corrispondente ad uno spostamento della membrana di 1,1 millimetri.

Da questi si ricavano l'**Indice del materiale I_D** , l'**Indice di spinta orizzontale K_D** , il **Modulo elastico E_D** , la **coesione non drenata s_u** .

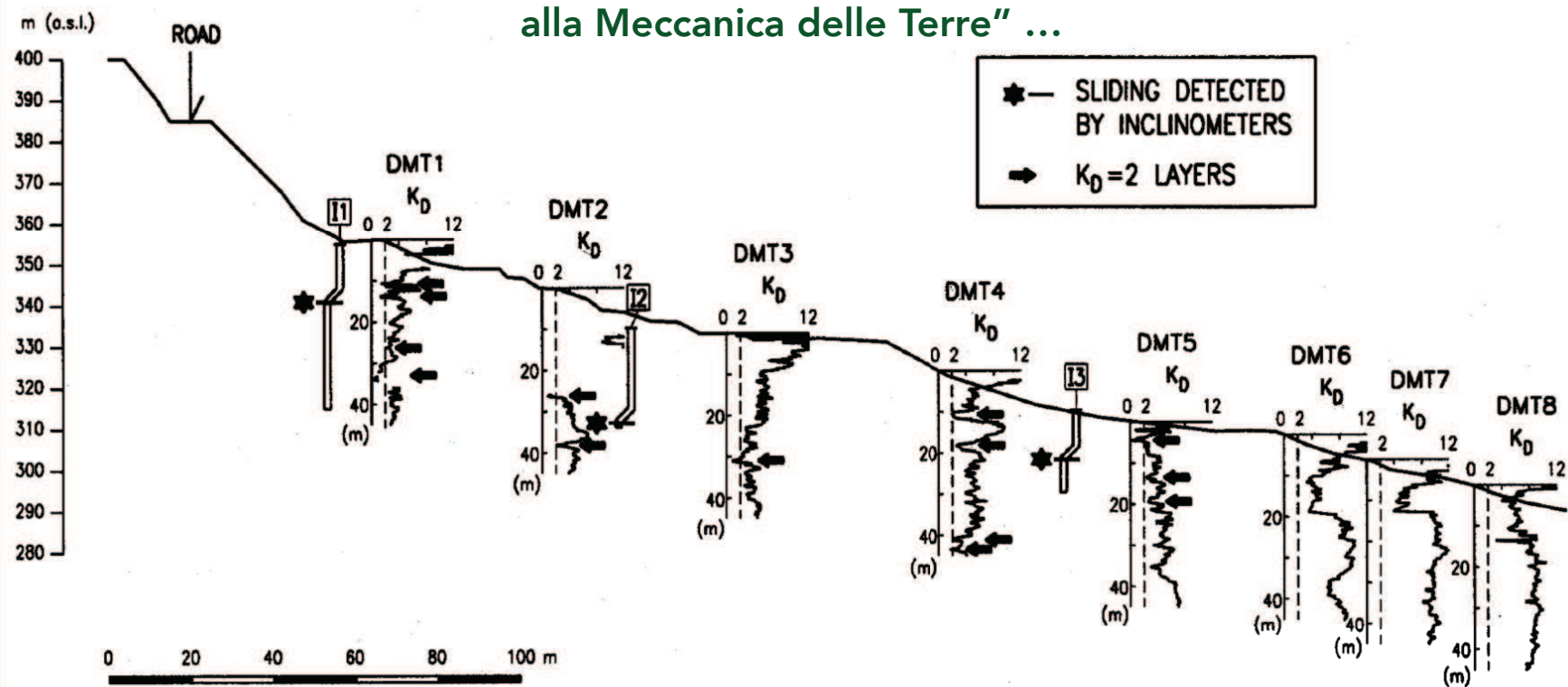
2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: dilatometro di Marchetti

Il K_D si calcola in funzione della pressione iniziale P_0 , dello sforzo verticale efficace e della pressione interstiziale. E' stato dimostrato che nelle argille NC raggiunge il valore minimo di 2, potendo essere utilizzato per individuare le superficie di rottura in pendii impostati nelle argille OC.

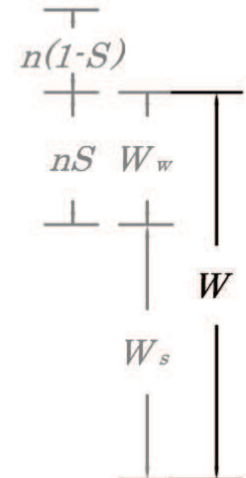
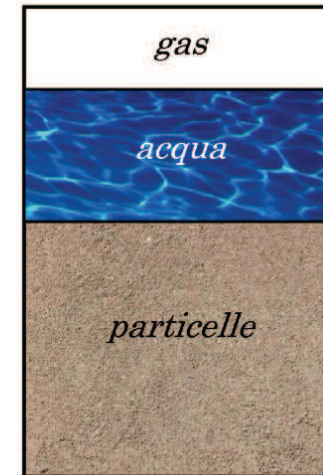
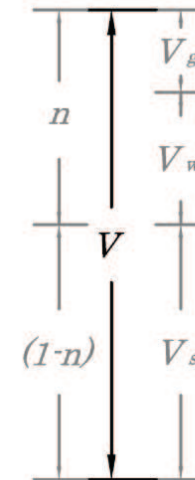
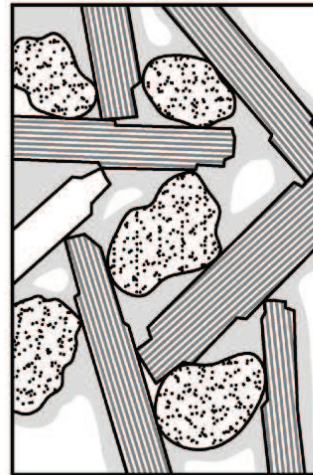
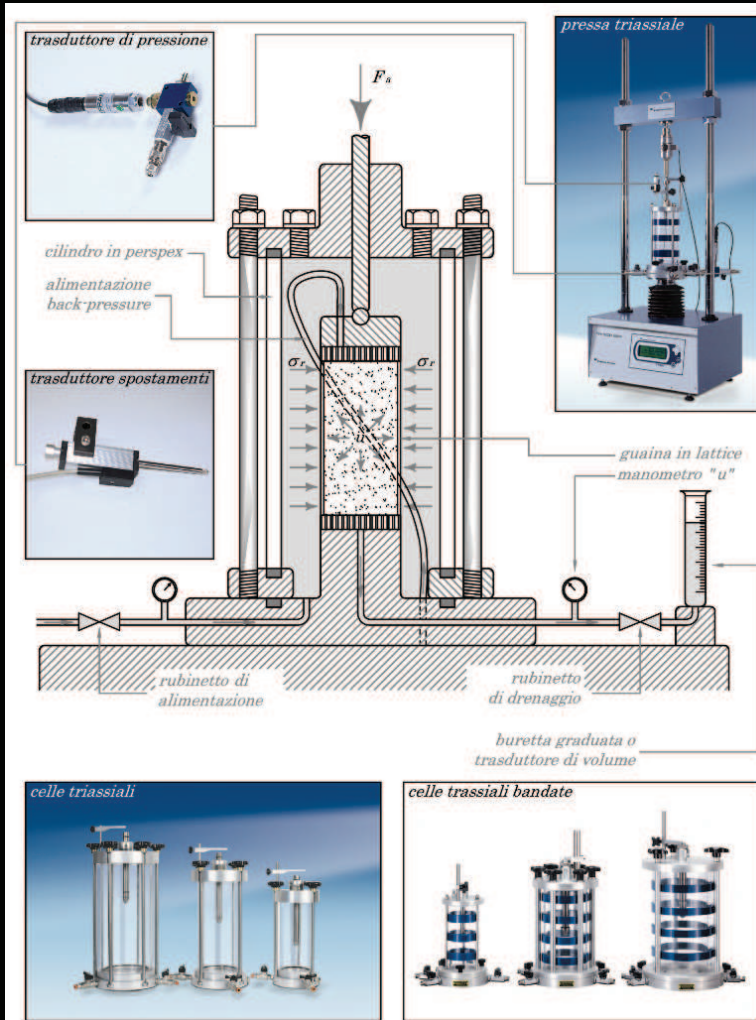




Io ho una mia idea e l'ho scritta in "Introduzione alla Meccanica delle Terre" ...



2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: prove TRX

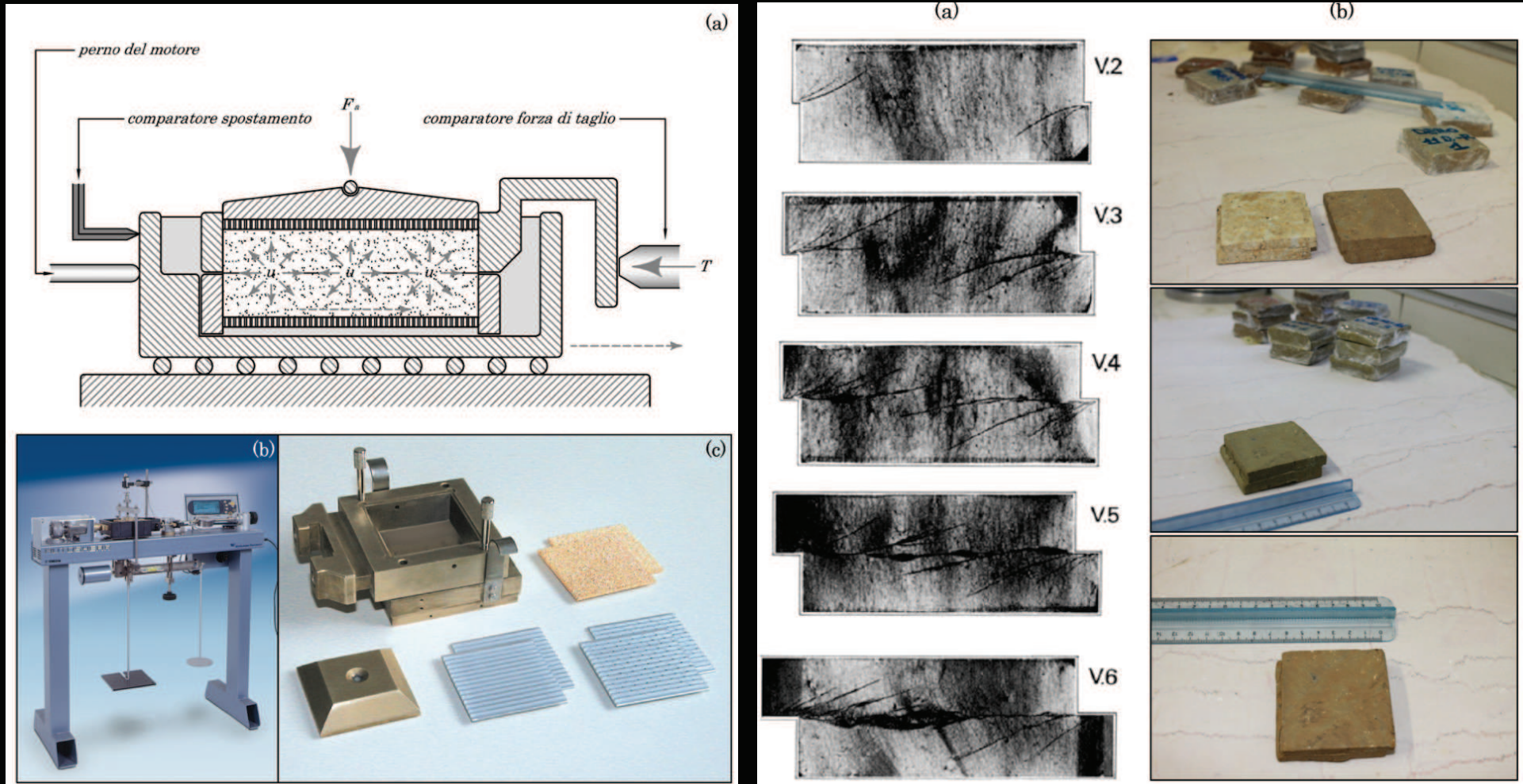


Le prove TRX possono non avere alcun senso nello studio delle frane, se non nell'analisi del comportamento delle argille con struttura del substrato. In particolar modo le prove che forniscono la coesione non drenata sono del tutto inutili, così come le prove edometriche.

Particolarmente utile è la determinazione dell'indice dei vuoti, del peso di volume, del contenuto d'acqua e del grado di saturazione

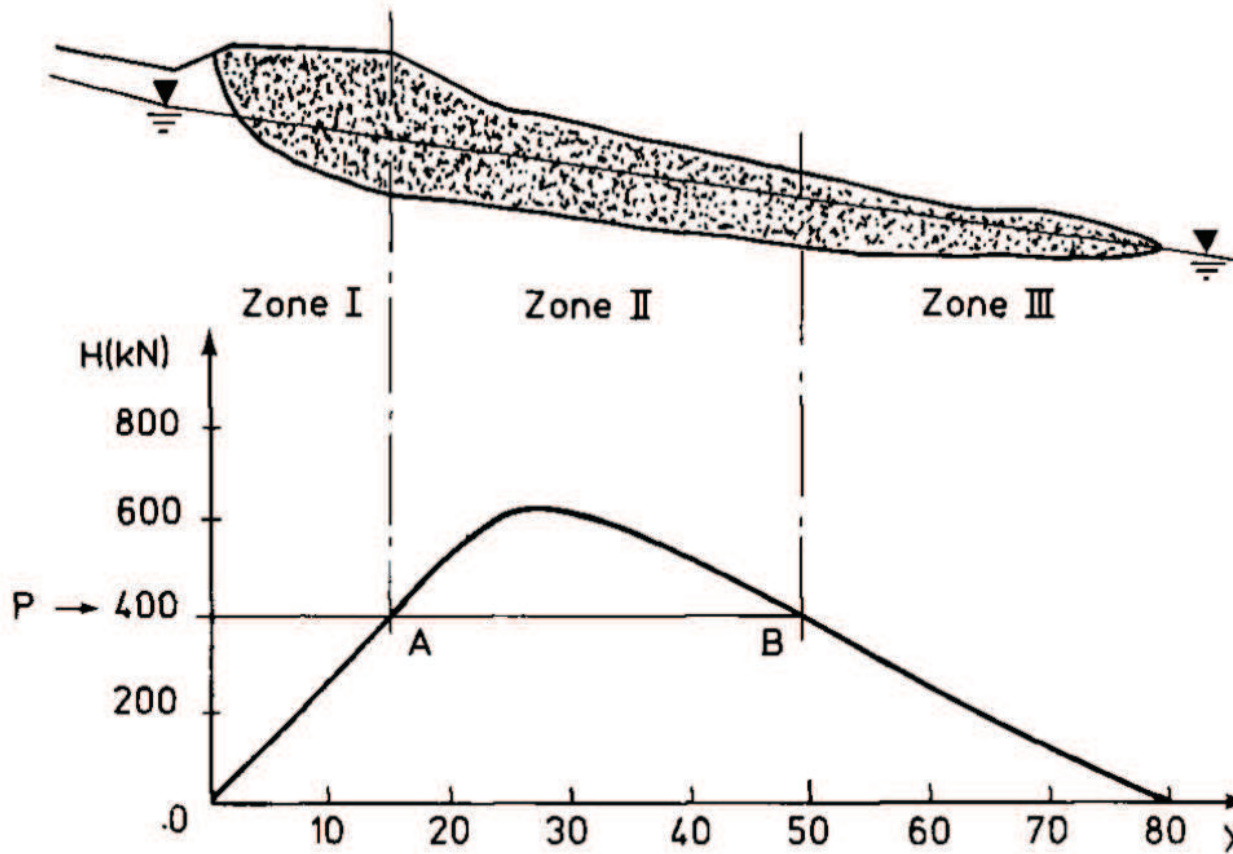
2) METODOLOGIE DI INVESTIGAZIONE DELLE FRANE: prove TD e TR

La prova di taglio diretto (TD) simula il comportamento della prima rottura di un pendio; la prova di taglio residuo (TR) simula il comportamento di una frana esistente che ha attinto alla sua resistenza ultima non potendo più accelerare.



I limiti sono: 1) non consentono di utilizzare i cerchi di Mohr; 2) la superficie di rottura è predeterminata, potendo risentire dell'orientazione del provino rispetto all'eventuale stato di fratturazione; 3) non possono essere controllate le pressioni interstiziali come invece avviene nelle celle triassiali.

3) OPERE DI SOSTEGNO E CONSOLIDAMENTO: il fallimento delle teorie classiche



$$H = \sum_{i=0}^x (N_i \sin \alpha_i - T_i \cos \alpha_i)$$

Il metodo di Nakamura (1984) e Cartier (1986) prevede che:

- sia calcolata la forza orizzontale mediante la scrittura della legge di equilibrio rispetto alla direzione orizzontale, avendo suddiviso la massa instabile in un numero congruo di conci;
- N_i e T_i rappresentano le forze orizzontali agenti alla base del generico concio i -esimo, inclinata di un angolo α .

Il secondo passaggio consiste nel calcolo della forza P capace di innalzare il fattore di sicurezza dal valore iniziale F_i al valore di progetto F_p ; il terzo passaggio consiste nel sovrapporre P alla curva di variazione di H in modo tale da individuare 3 zone:

- 1) la zona I, nella quale la spinta esercitata dalla frana è insufficiente a mobilitare l'opera di sostegno che a sua volta si comporta come un sostegno inutile;
- 2) la zona II, nella quale la struttura di sostegno si trova in posizione ottimale;
- 3) la zona III, nella quale l'opera di sostegno non impedisce la deformabilità della massa sovrastante, potendo inoltre essere scavalcata dai terreni in movimento.

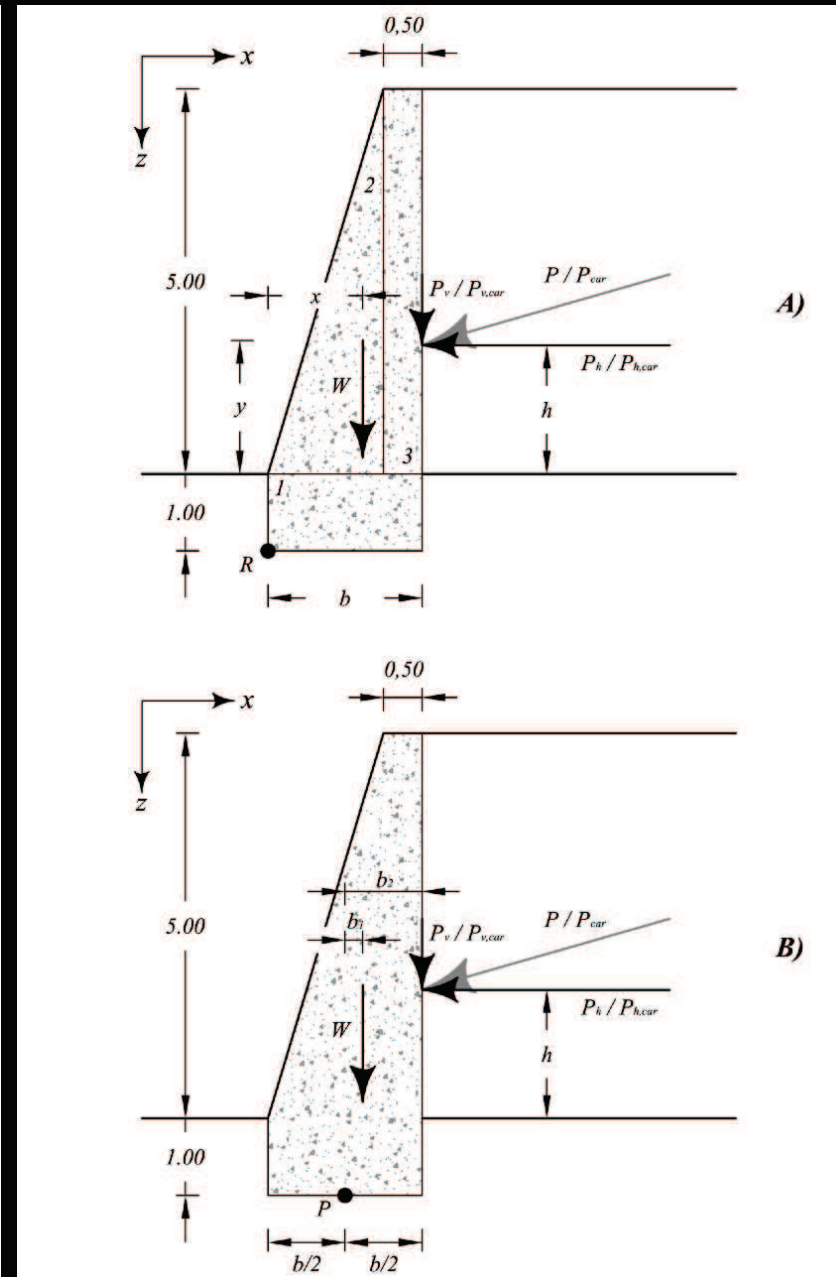
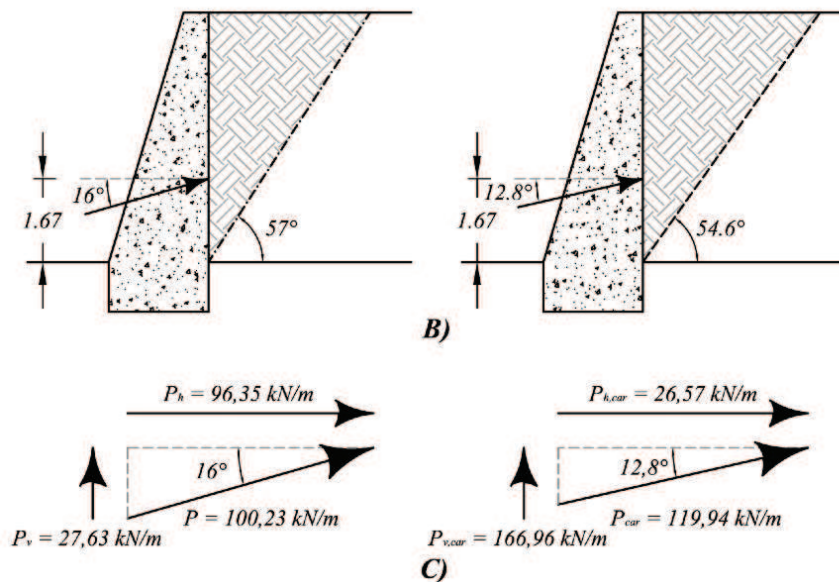
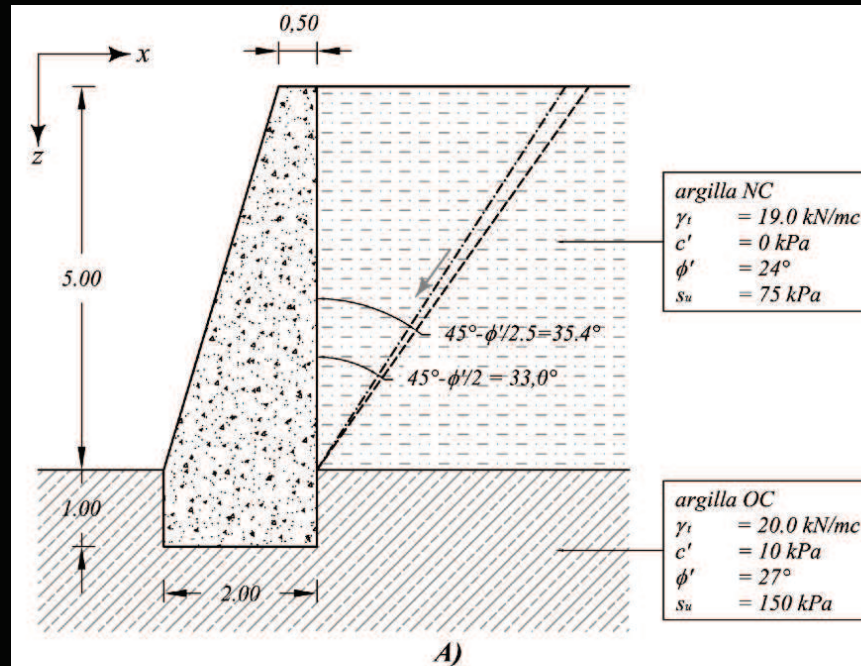
3) OPERE DI SOSTEGNO E CONSOLIDAMENTO: il fallimento delle teorie classiche

Nonostante il metodo sia noto da oltre due decenni, i software continuano a calcolare le opere di sostegno interagenti con frane ricorrendo alle teorie classiche basate sull'individuazione dei cunei di spinta attiva e passiva alla Coulomb, piuttosto che ricorrere al metodo dell'equilibrio limite globale



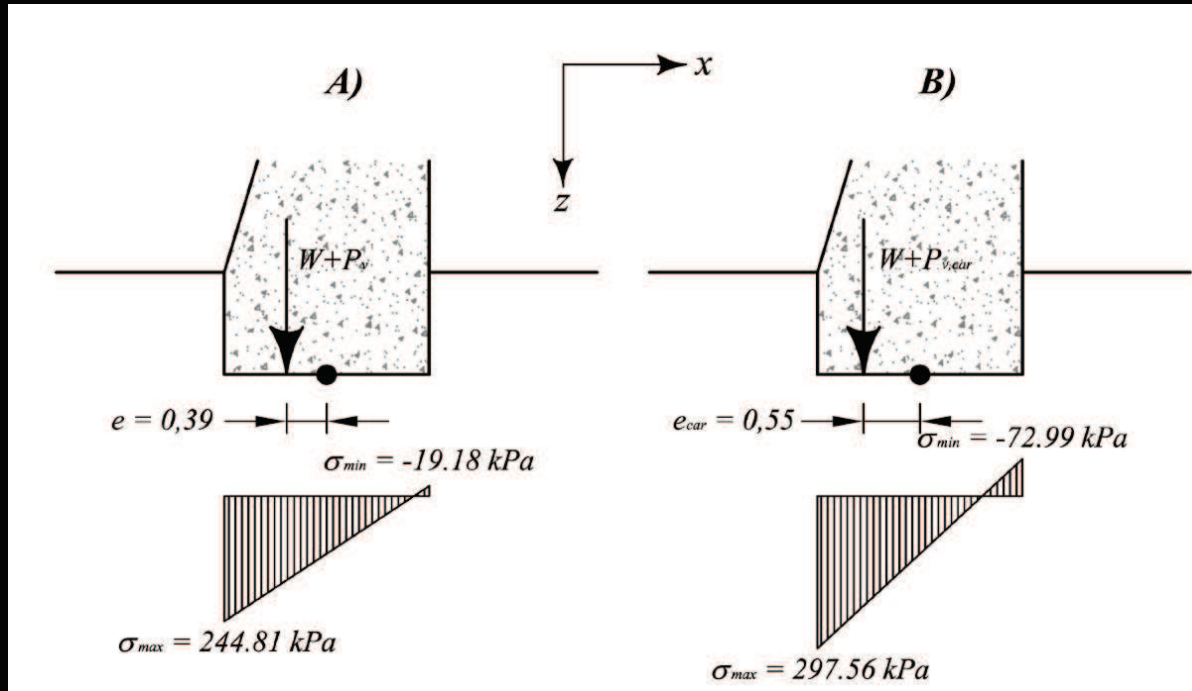
3) OPERE DI SOSTEGNO E CONSOLIDAMENTO: il fallimento delle teorie classiche

Nel caso dei muri di sostegno occorre eseguire 4 verifiche rispetto: 1) **al ribaltamento**; 2) **alla traslazione**; 3) allo schiacciamento; 4) alla stabilità globale

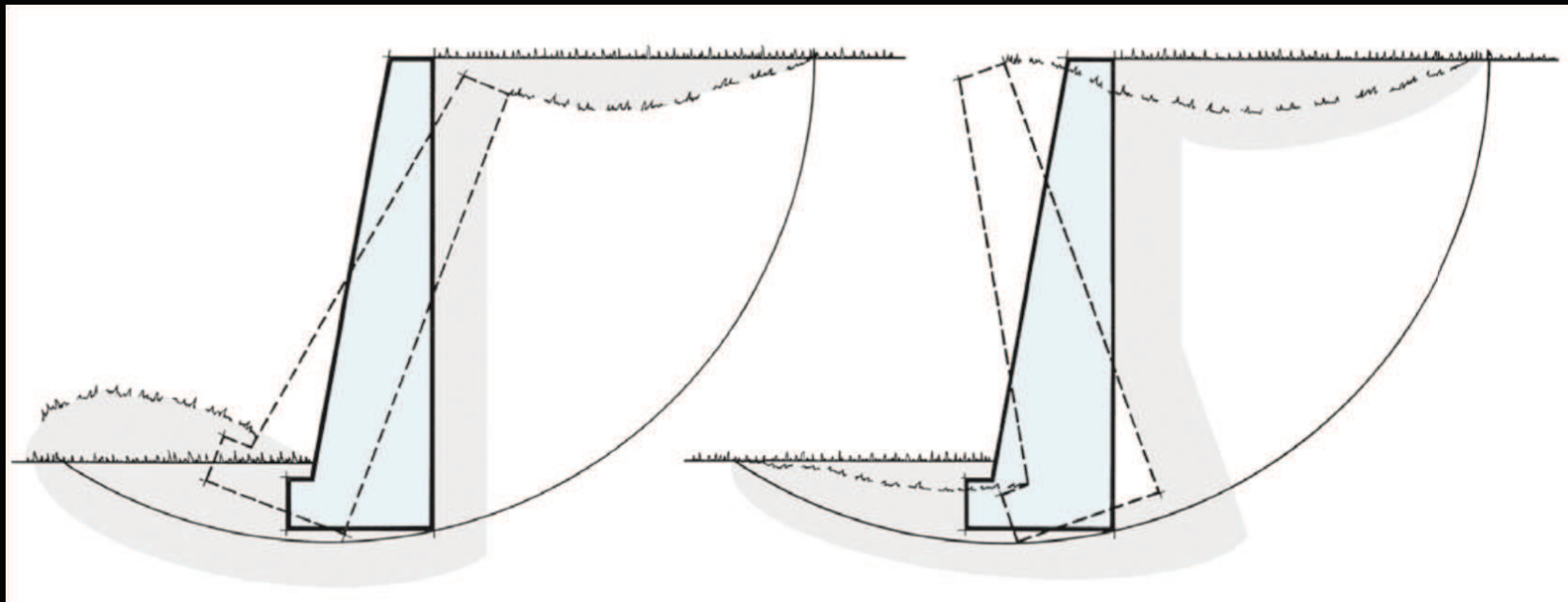


3) OPERE DI SOSTEGNO E CONSOLIDAMENTO: il fallimento delle teorie classiche

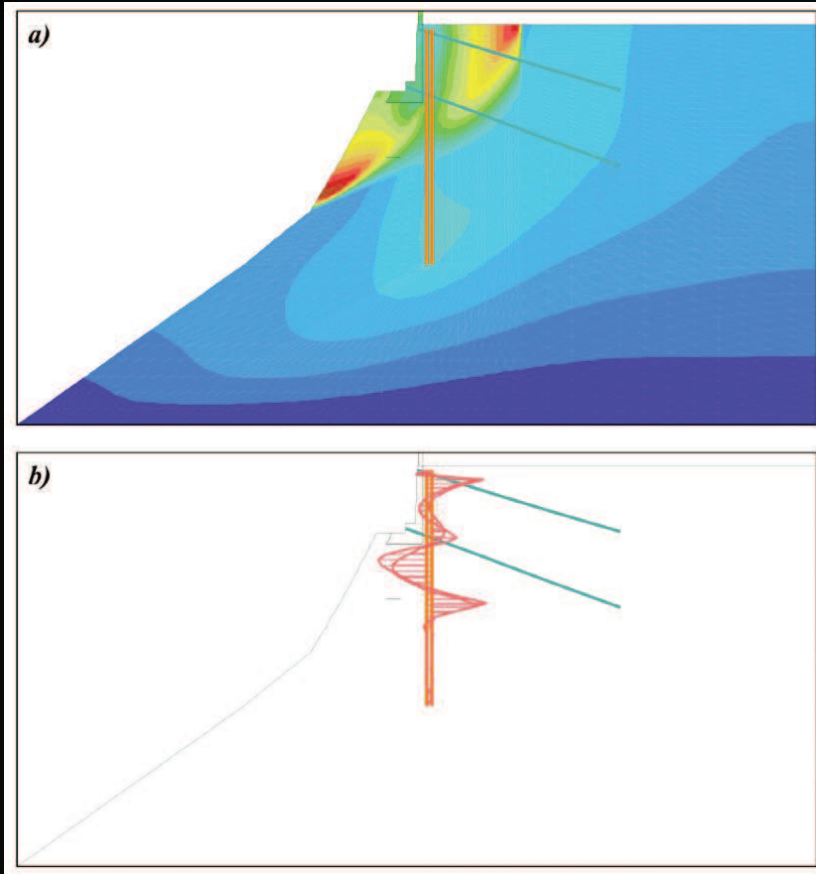
Nel caso dei muri di sostegno occorre eseguire 4 verifiche rispetto: 1) al ribaltamento; 2) alla traslazione; 3) allo schiacciamento; 4) alla stabilità globale



E' anche vero che voler consolidare una frana con un muro di sostegno è pur sempre una follia, anche se tirantato o multitirantato



3) OPERE DI SOSTEGNO E CONSOLIDAMENTO: il fallimento delle teorie classiche



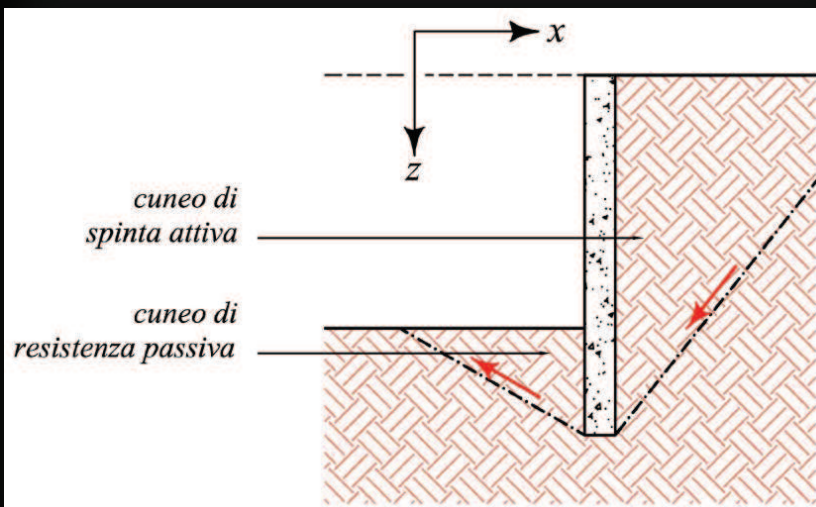
Le paratie sono particolari tipi di opera costituite da:

- 1) una porzione fuori terra soggetta a condizioni di spinta attiva;
- 2) una porzione interrata, capace di contrastare le spinte attive opponendo la resistenza passiva del terreno.

Inoltre possono essere presenti anche tiranti in uno o più ordini.

Le variabili da introdurre nei modelli di analisi possono essere:

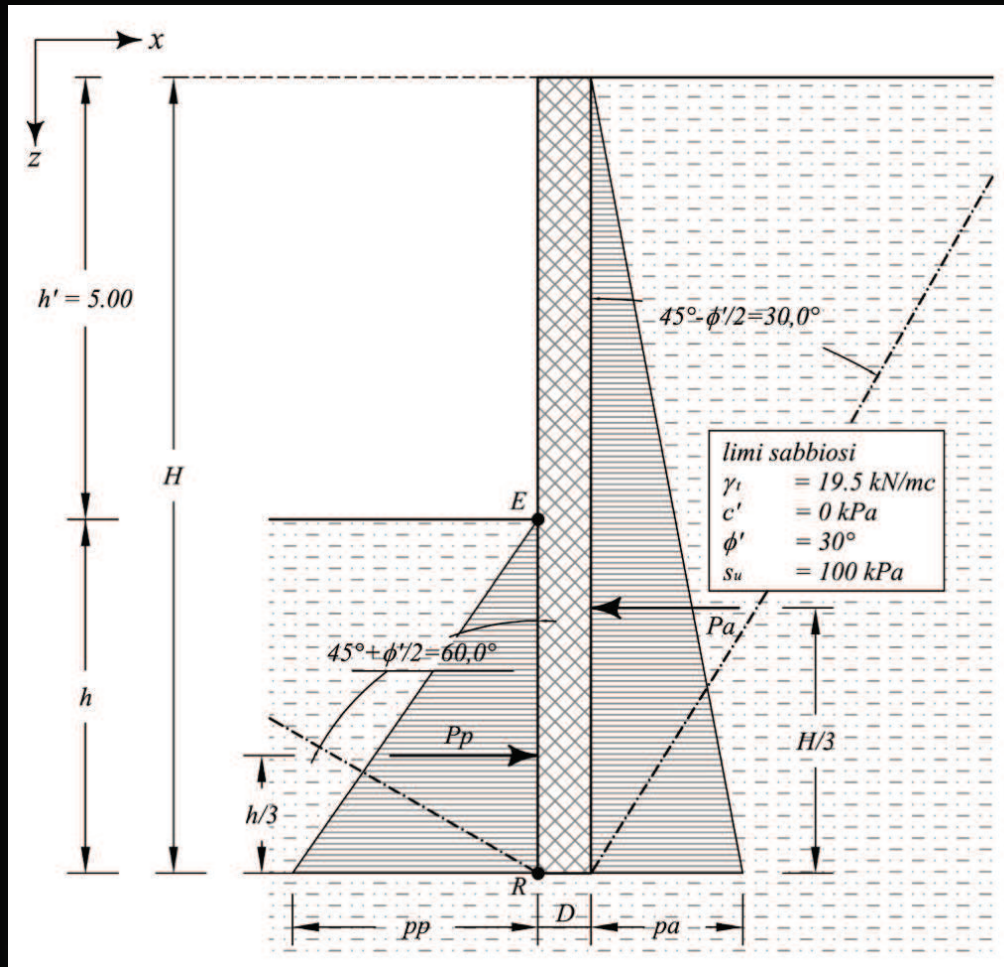
- A) la stratigrafia;
- B) l'idrodinamica delle acque di falda;
- C) la natura e la meccanica dei terreni;
- D) la geometria strutturale;
- E) i materiali da costruzione;
- F) le azioni, sia permanenti che transitorie.



Limitando l'attenzione alla sola verifica della stabilità globale, con la quale viene dimensionata la profondità di infissione, il punto di partenza è dato dal calcolo delle pressioni attiva e passiva agenti sulla paratia, da trasformare in spinte attive e passive.

Il metodo più semplice, per casi semplici, consiste nell'utilizzo dell'equazione della statica di equilibrio dei momenti che fornisce un'equazione cubica da risolvere con metodi di iterazione matematica.

3) OPERE DI SOSTEGNO E CONSOLIDAMENTO: il fallimento delle teorie classiche



Passo 1: calcolo delle pressioni:

$$p_a = \gamma_t \cdot H \cdot K_a$$

$$p_p = \gamma_t \cdot h \cdot K_p$$

con:

$$K_a = \tan^2 [45^\circ - \Phi' / (2\gamma_\phi)] = 0.421$$

$$K_p = \tan^2 [45^\circ + \Phi' / (2\gamma_\phi)] = 2.375$$

Nota 1: $K_a = 0.333$, $K_p = 3.000$

Nota 2: vale sempre $K_a \cdot K_p = 1$

Nota 3: vale anche $K_a < K_0 < K_p$

Risultato:

$$p_a = 8.21H$$

$$p_p = 46.31h$$

Passo 2: calcolo delle spinte:

$$P_a = (p_a \cdot H) / 2 = 4.11H^2$$

$$P_p = (p_p \cdot h_{car}) / 2 = 23.16h^2$$

Passo 3: equazione di equilibrio dei momenti:

$$P_a \cdot H/3 = P_p \cdot h/3$$

$$4.11H^3 = 23.16h^3$$

risolvendo la cubica con il solutore di Excel si ottiene:

$$H = 1.78h$$

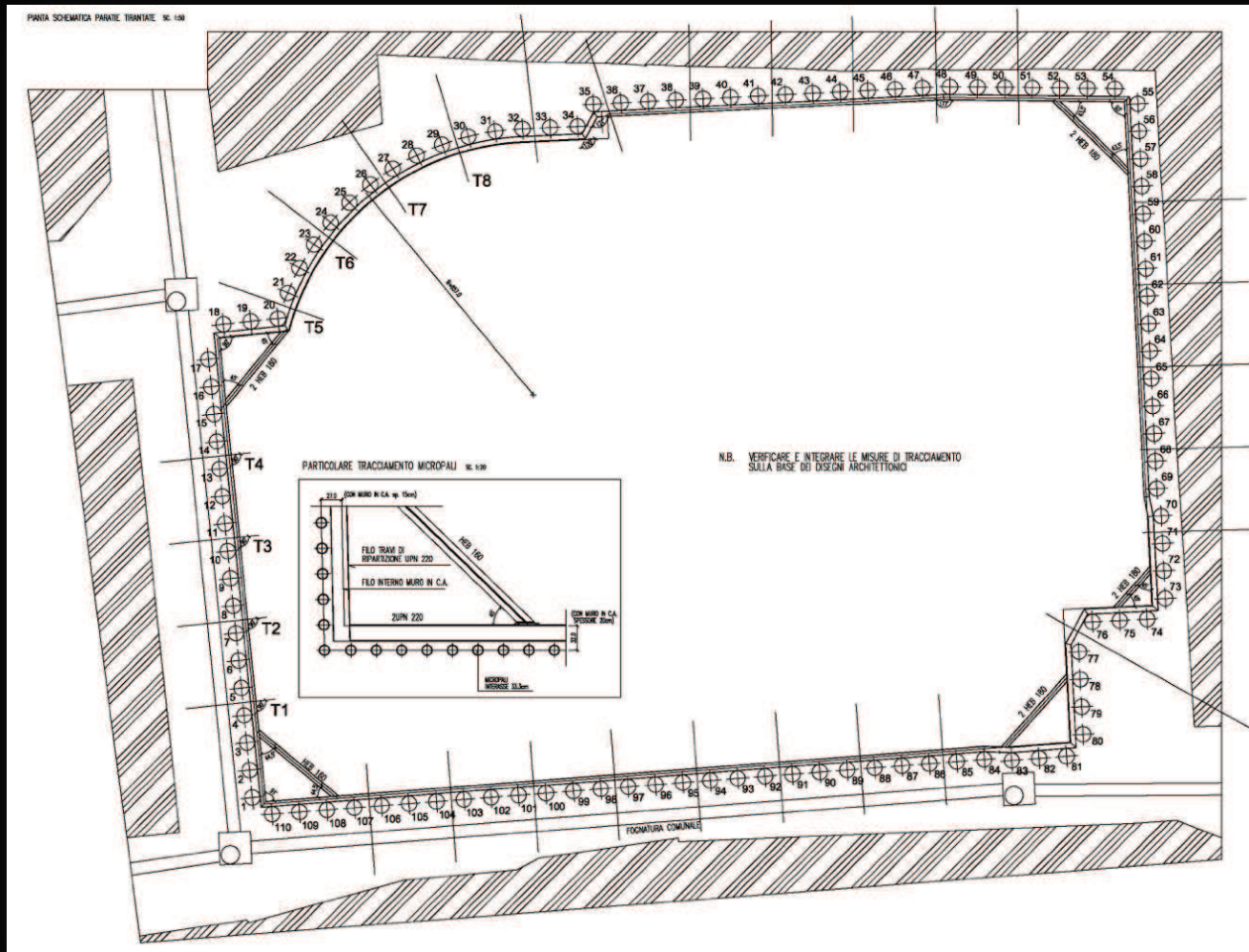
Passo 4: calcolo della profondità di infissione. Occorre sostituire nell'ultima equazione il valore $H = h + 5$ per ottenere: **$h = 6.41$ metri ed $H = 11.41$ metri.**

Notare che in caso di calcolo con i parametri geotecnici invariati (DM 11.03.1988) il risultato sarebbe stato: $h = 4.63$, da incrementare del 20% ($h = 5.56$ m). La differenza tra i due metodi è del 13.3%.

4) PARATIE: un esempio in provincia di Bergamo

L'esempio è relativo alla costruzione di un parcheggio interrato in una piazza del centro storico del comune di Zanica (BG) che ha richiesto la realizzazione di una paratia quale opera provvisoria di sicurezza.

Nel progetto originario quest'ultima era stata pensata come una berlinese a doppio ordine di tiranti ... ma l'appalto era stato affidato, dopo gara pubblica, "a corpo"! Di conseguenza l'impresa affidataria dei lavori ha chiesto di minimizzare il costo dell'opera.



La paratia, e quindi lo scavo, è prevista ad una distanza dagli edifici variabile da 1.5 a 2.5 metri; la profondità di scavo è di 7.5 metri.

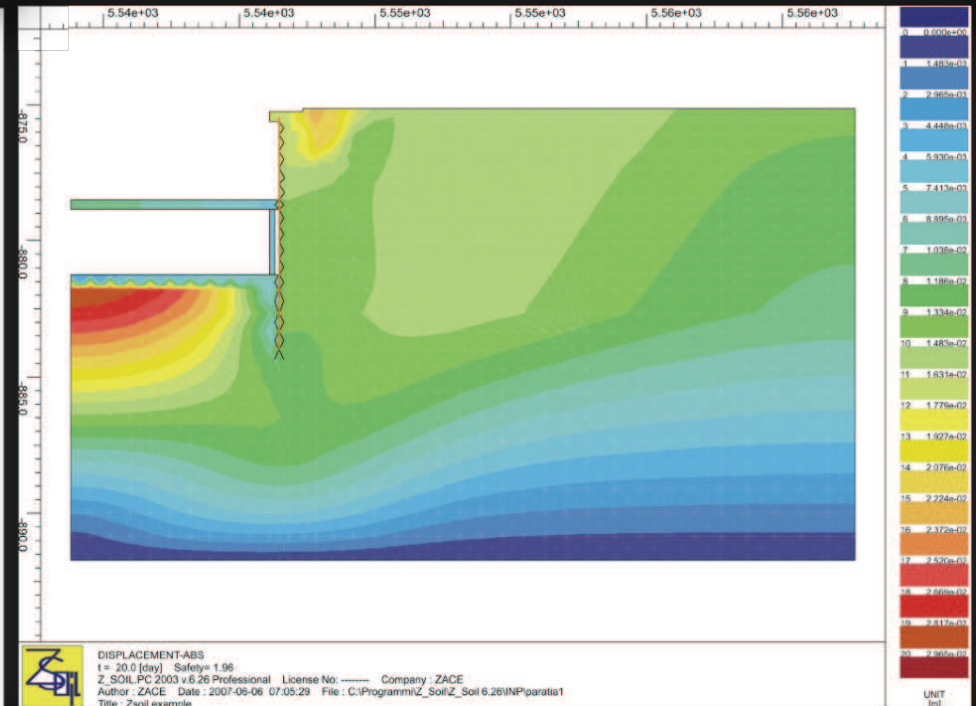
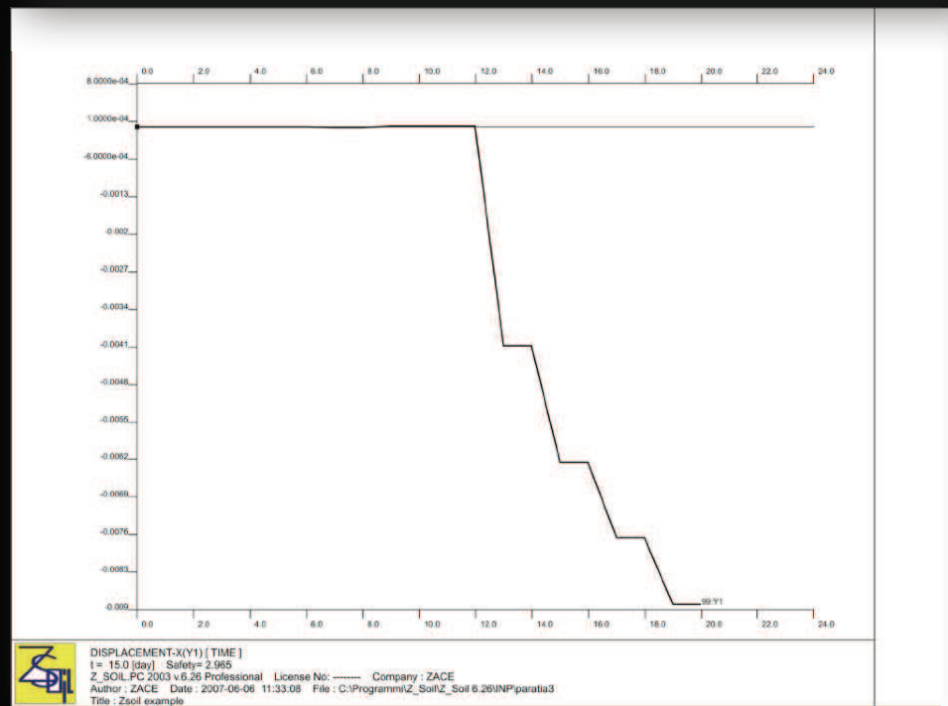
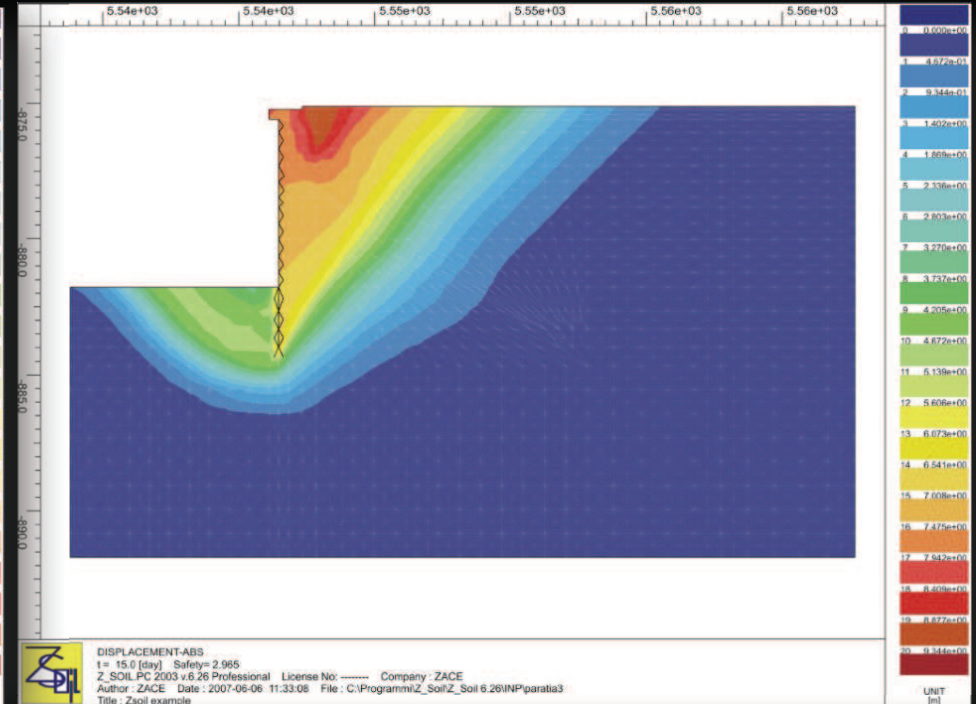
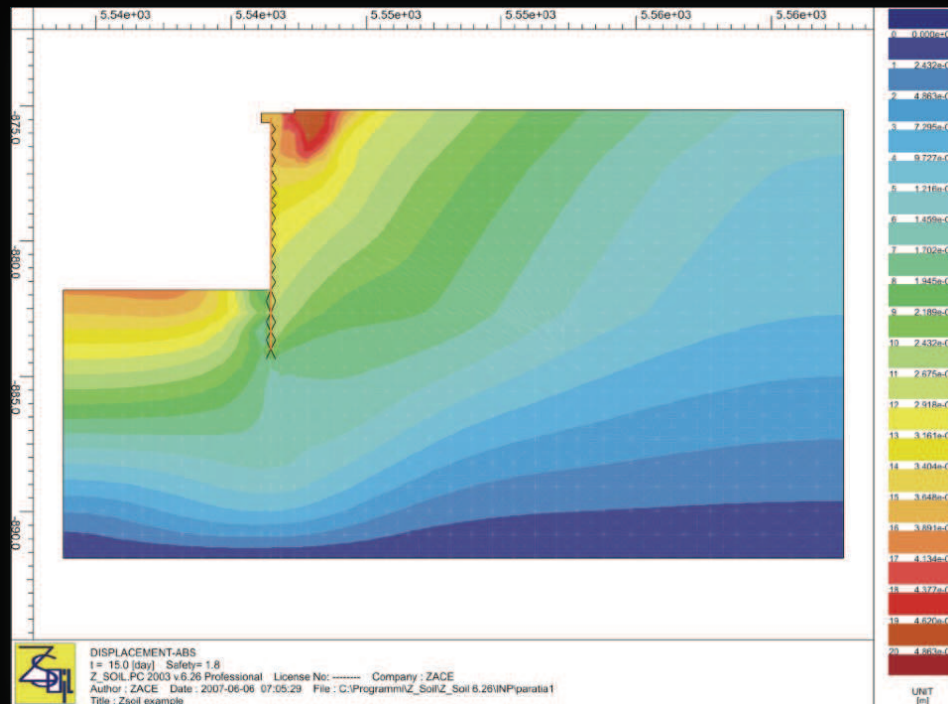
Da un'accurata lettura dei tabulati di calcolo della paratia appaltata + emerso che gli spostamenti di progetto non erano compatibili con l'integrità strutturale degli edifici limitrofi; inoltre mancavano le autorizzazioni per eseguire i tiranti al di sotto delle proprietà dei privati.

Di conseguenza è stata chiesta la riprogettazione dell'opera a spese dell'impresa e con propri tecnici.

Le indagini, nel contempo, avevano evidenziato una resistenza dei terreni molto superiore a quella di progetto!

Il modello geotecnico è stato costruito tramite la combinazione di prove di laboratorio e di indagini geofisiche.

4) PARATIE: un esempio in provincia di Bergamo

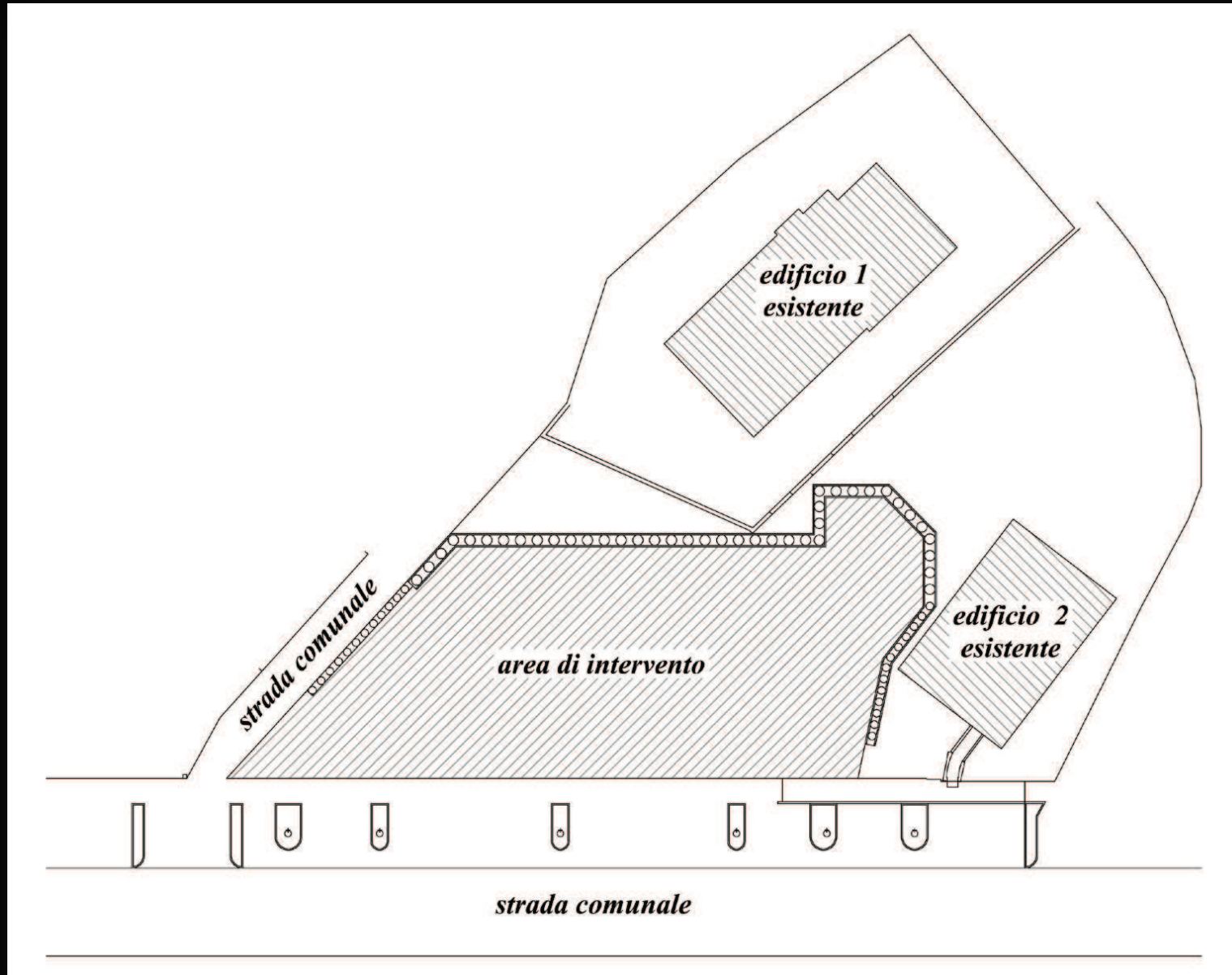


4) PARATIE: un esempio in provincia di Bergamo



4) PARATIE: un esempio realizzato nel tessuto urbano di Teramo

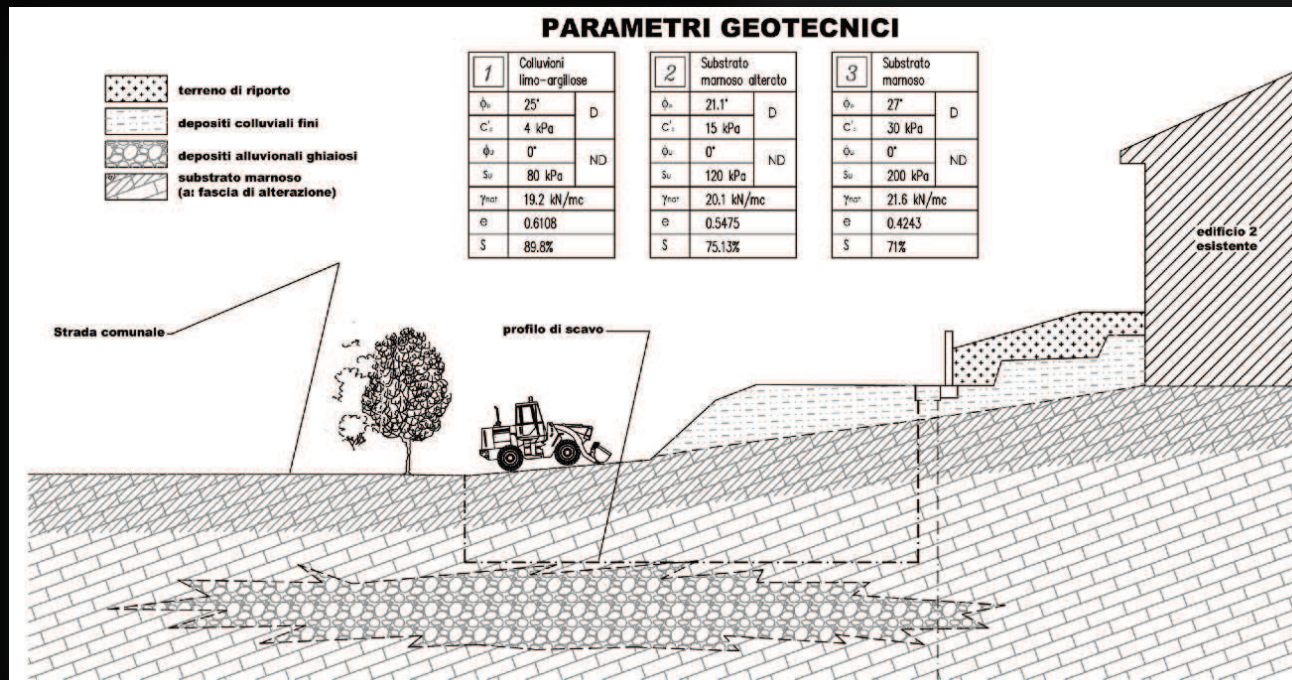
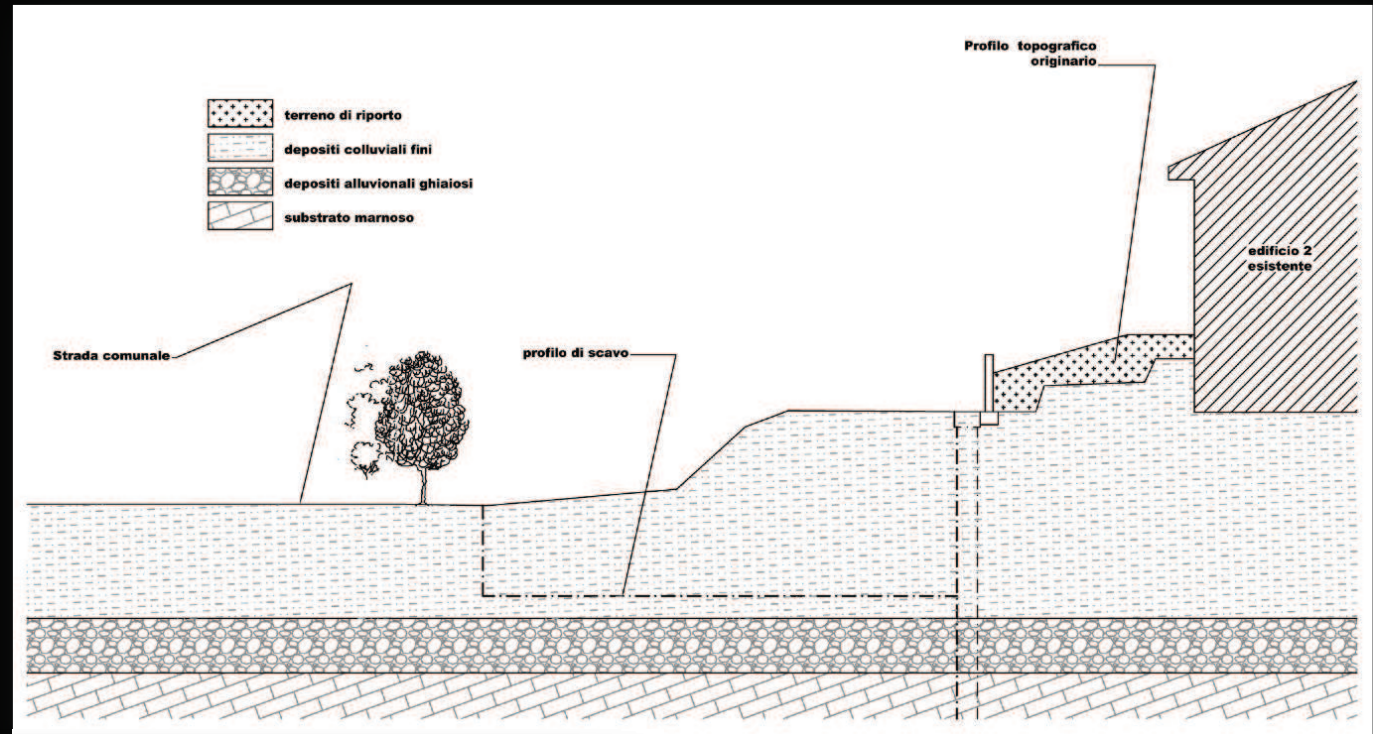
La costruzione di un palazzo, con due piani interrati, richiede la realizzazione di una paratia a protezione delle strutture preesistenti e della limitrofa strada provinciale. Il progetto iniziale prevedeva pali di 80/100 cm di diametro, lunghezza di 12 metri, oltre a pali di fondazione, per un costo complessivo di 250.000 € per le sole opere di protezione e fondazioni.



4) PARATIE: un esempio realizzato nel tessuto urbano di Teramo

Gli studi iniziali avevano erano consistiti in perforazioni di sondaggio (senza prelievo di campioni) e prove in sito tipo DPSH.

La presenza di ghiaia sovrastante il substrato roccioso aveva indotto ad attribuire i terreni sovrastanti a depositi colluviali fini con un ovvio comportamento NC; il substrato era invece costituito da marne del Messiniano (5.5 – 5 MA) molto sovraconsolidate e fessurate.



Da un riesame delle carote è emerso un quadro differente, con parte dei terreni sovrastanti le ghiaie appartenenti al substrato roccioso!

Infine sono state eseguite nuove prove DP, nuovi sondaggi e sono stati prelevati campioni indisturbati, sottoposti a prove EDO e TRX-CIU.

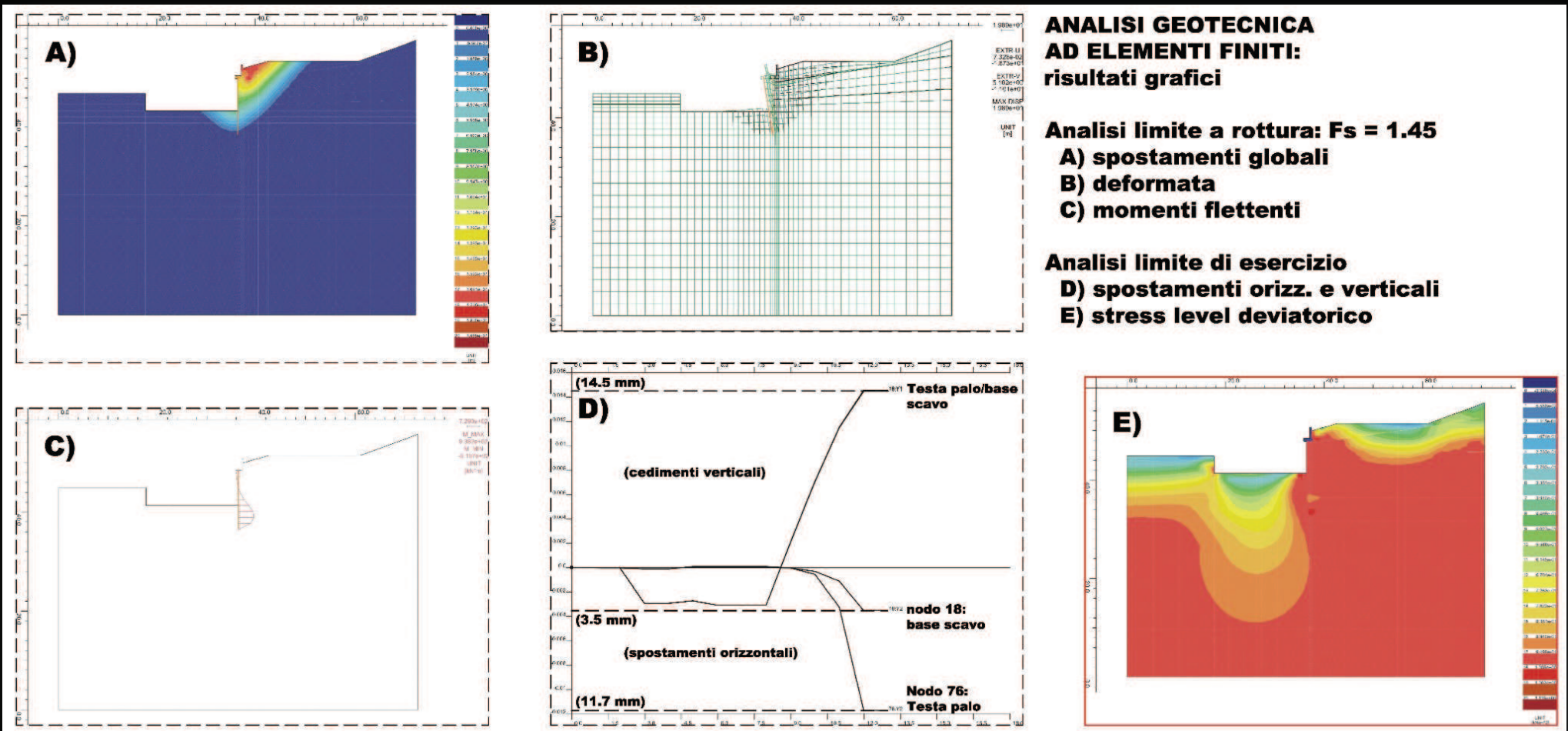
Sono stati eliminati i pali di fondazione mentre il costo della paratia è sceso a 120.000,00 €.

4) PARATIE: un esempio realizzato nel tessuto urbano di Teramo

Le nuove prove penetrometriche DP sono state eseguite con lo scopo di valutare la variazione di resistenza con la profondità; quindi i campioni sono stati prelevati a profondità stimate sulla scorta delle DP.

I risultati hanno consentito di eseguire un'analisi accurata in ambiente ad elementi finiti. Terminata l'analisi, e con lo scopo di minimizzare i costi, è stato imposto uno spostamento ammissibile sulla testa della paratia di circa 1 cm, che avrebbe causato lesioni sul muro di recinzione esistente a monte ma non sugli edifici.

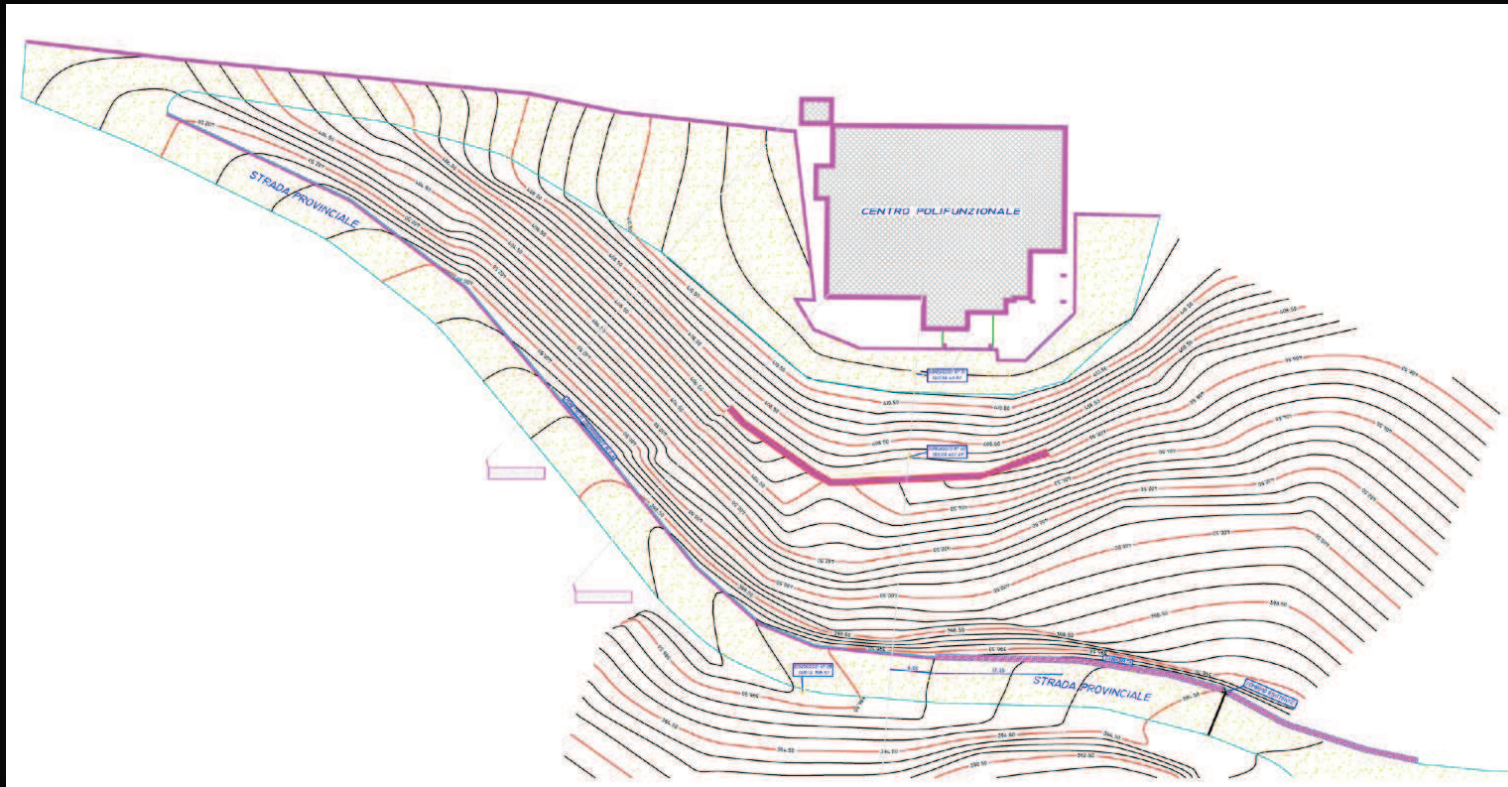
Il costo finale della paratia e della platea, avendo potuto escludere anche i pali di fondazione, è stato di 56.000 €!



4) PARATIE: un esempio realizzato nel tessuto urbano di Teramo



5) PARATIE: il fallimento della teoria classica



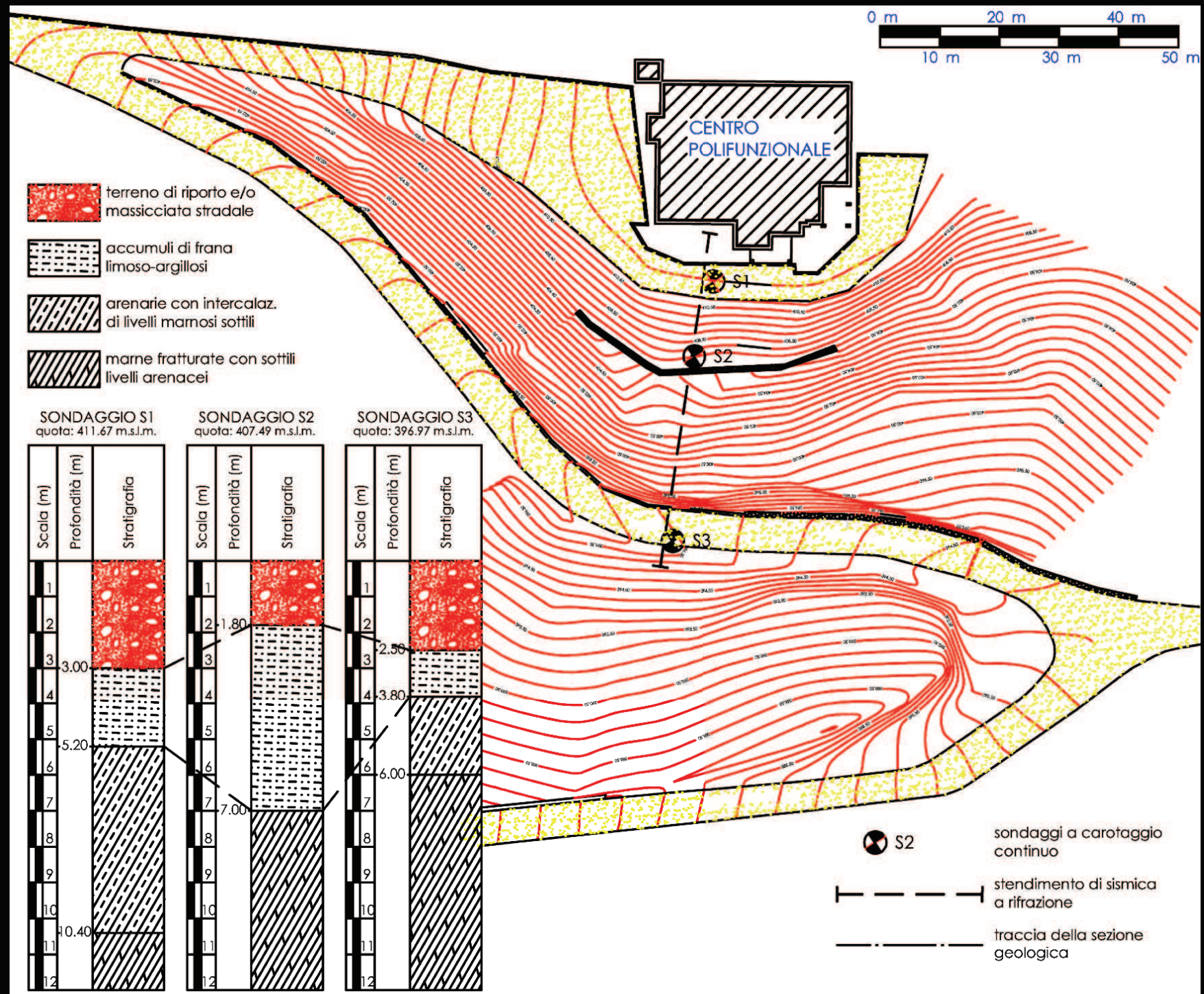
Una paratia è collassata poco dopo la costruzione, nonostante i calcoli geotecnici e strutturali siano risultati corretti a posteriore.

Contestualmente sono comparse lesioni su un edificio polifunzionale presente molto a monte della stessa, in assenza di un nesso causale giustificato.

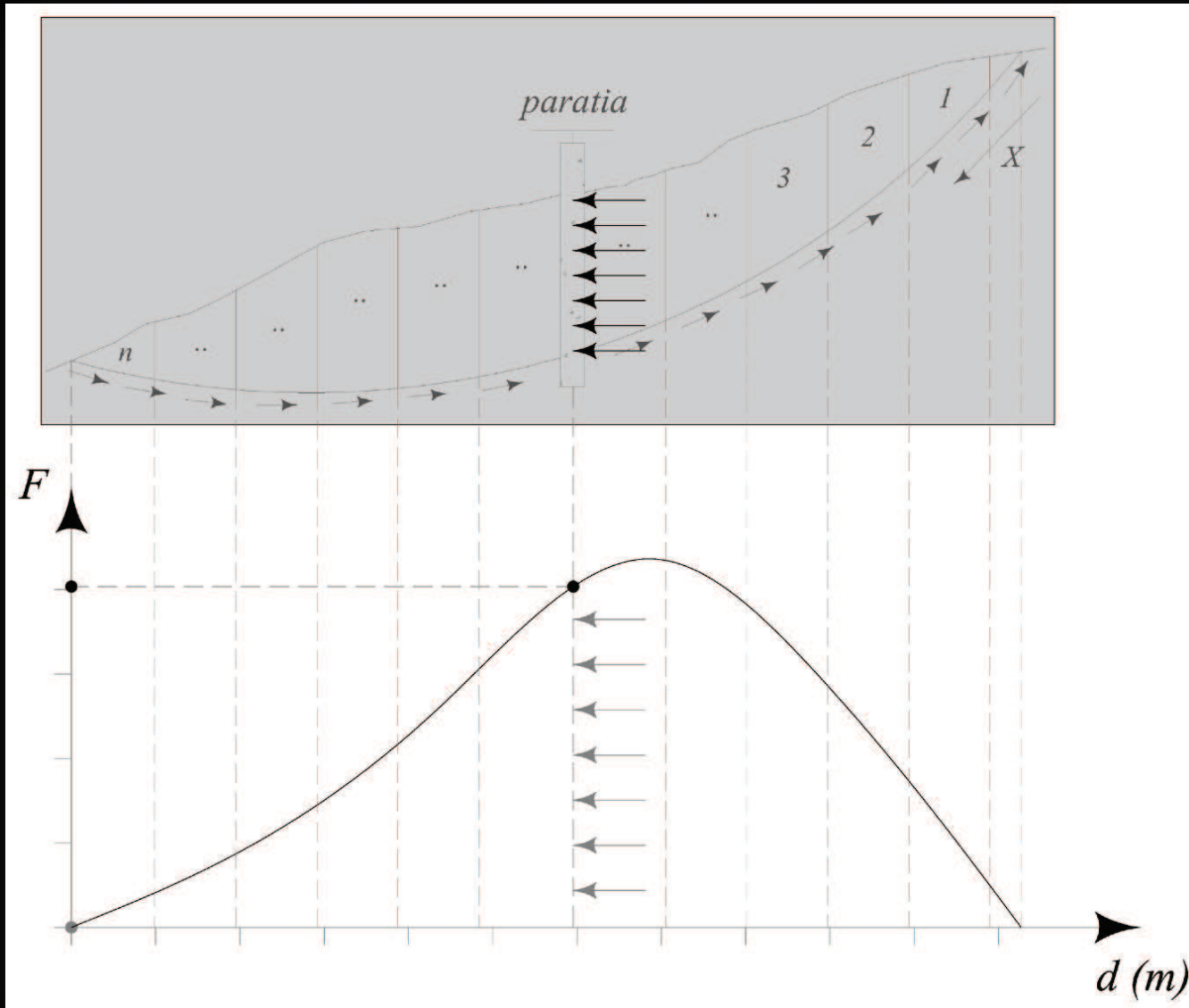


5) PARADIGMA: il fallimento della teoria classica

5) PARATIE: il fallimento della teoria classica



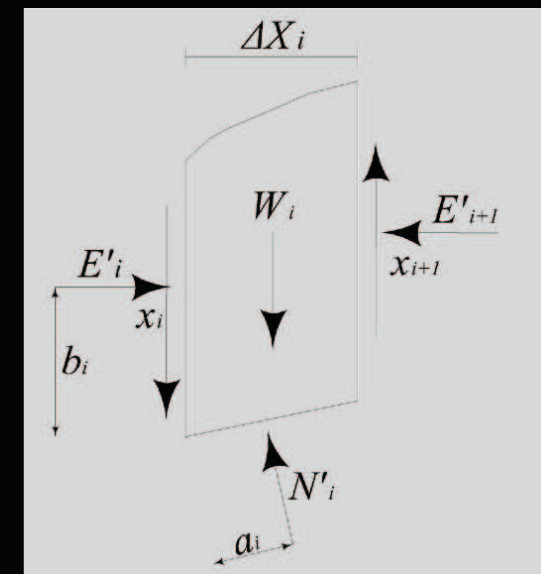
5) PARATIE: il fallimento della teoria classica



In tutti i casi per i quali esistono campi di sforzo orientati, come nel caso delle frane, la teoria classica basata sulle leggi di equilibrio tra spinta attiva e resistenza passiva falliscono.

Una soluzione semplice consiste nell'eseguire l'analisi di stabilità del pendio e di graficizzare le forze mutue orizzontali scambiate tra i conci.

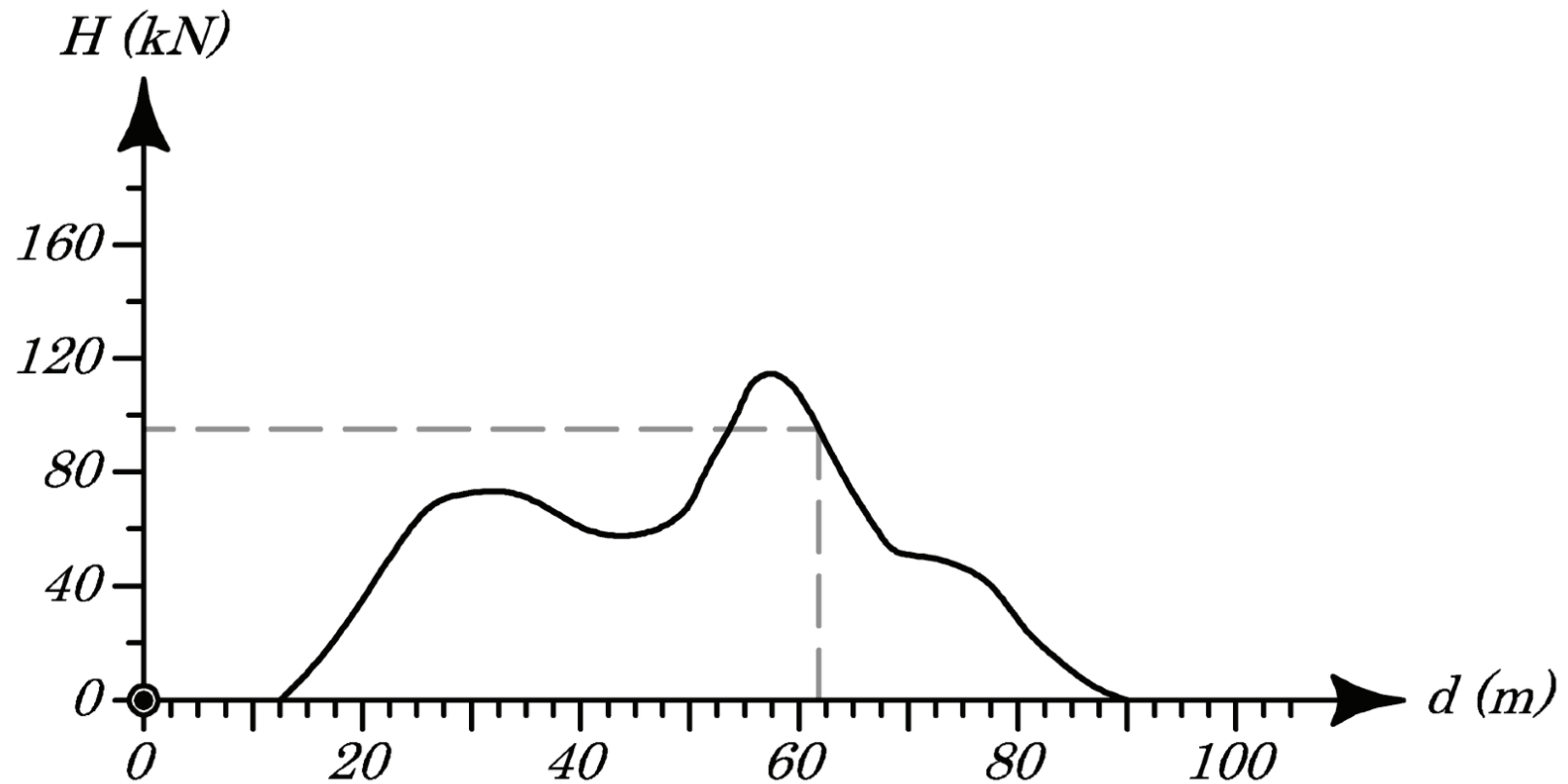
Quindi, individuando la posizione della paratia è possibile determinare il corretto valore della spinta orizzontale.



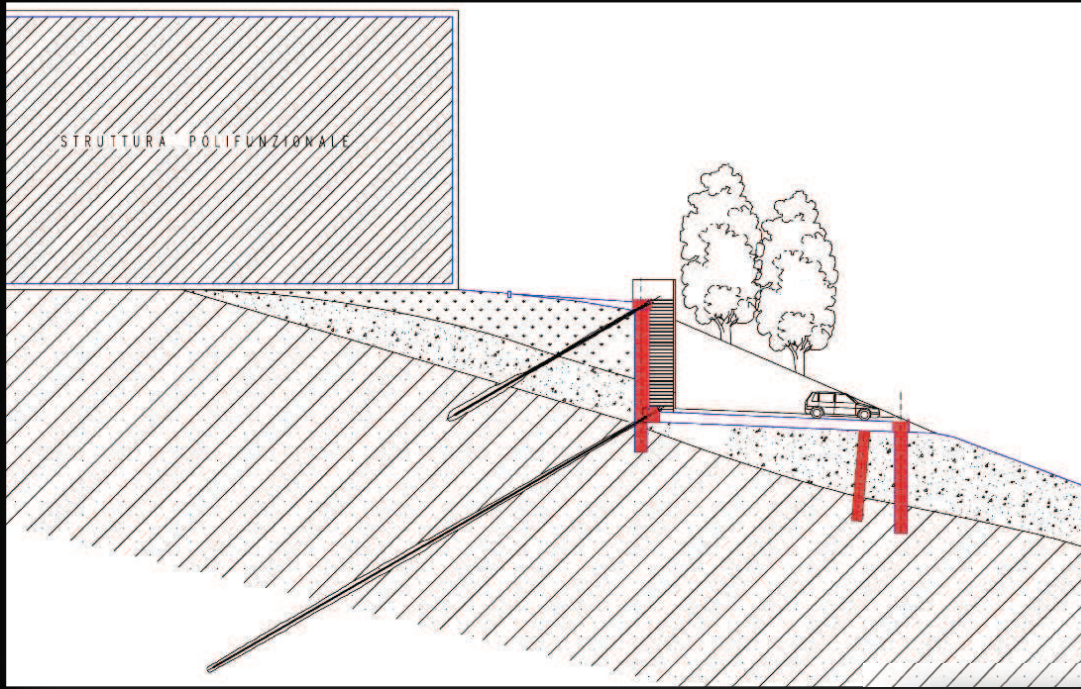
Infine, inserendo quest'ultima nella teoria classica e ponendo il punto di applicazione ad $\frac{1}{2}$ della porzione sveltante della paratia si perviene ad una lunghezza di ammortamento più corretta.

Nel caso specifico la paratia risultava incernierata alla base

5) PARATIE: il fallimento della teoria classica



5) PARATIE: il fallimento della teoria classica

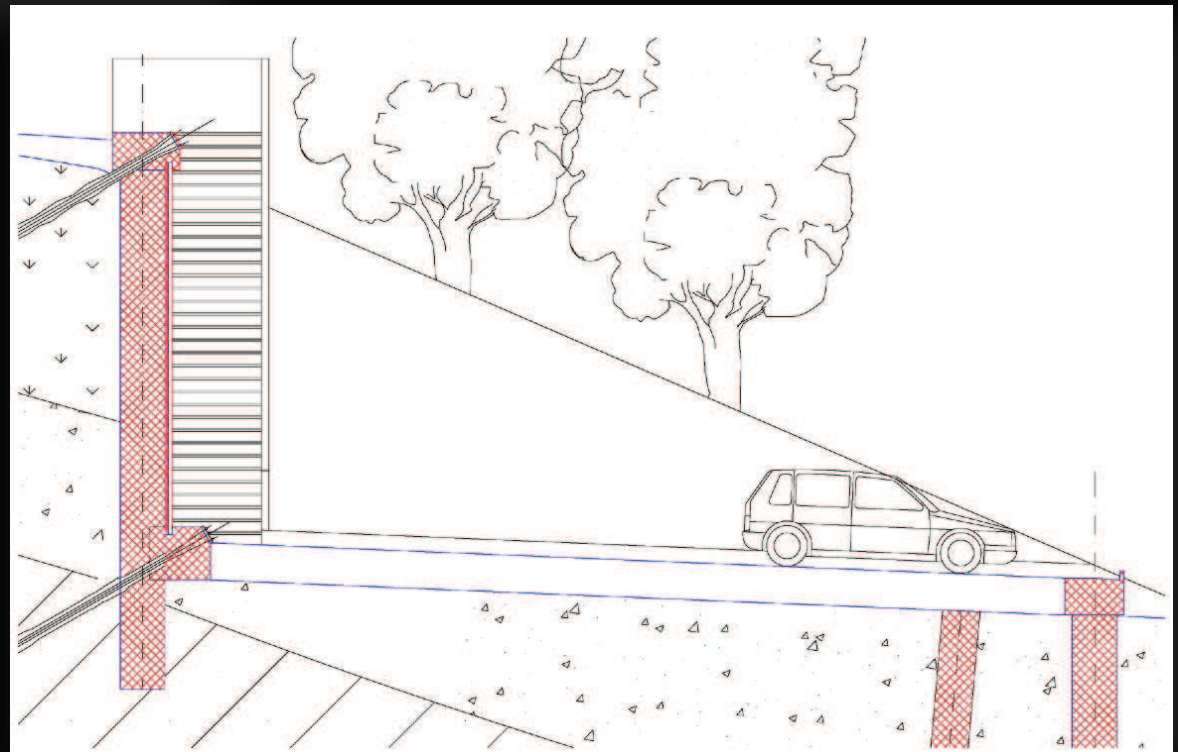


L'intervento di consolidamento ha dovuto tenere conto anche delle necessità dell'amministrazione comunale di dotare la struttura polifunzionale di un parcheggio pubblico.

Ciò ha comportato la progettazione di una doppia paratia multiancorata, affidando al tirante inferiore anche il campo di sforzi dettato dalla struttura di valle.

Le due paratie sono state collegate da travi-tiranti in calcestruzzo armato.

Notare che con tale soluzione è stata ridotta di molto la lunghezza di ancoraggio nel sottostante substrato delle due paratie!



6) PARATIE: inclinazione ottimale dei tiranti

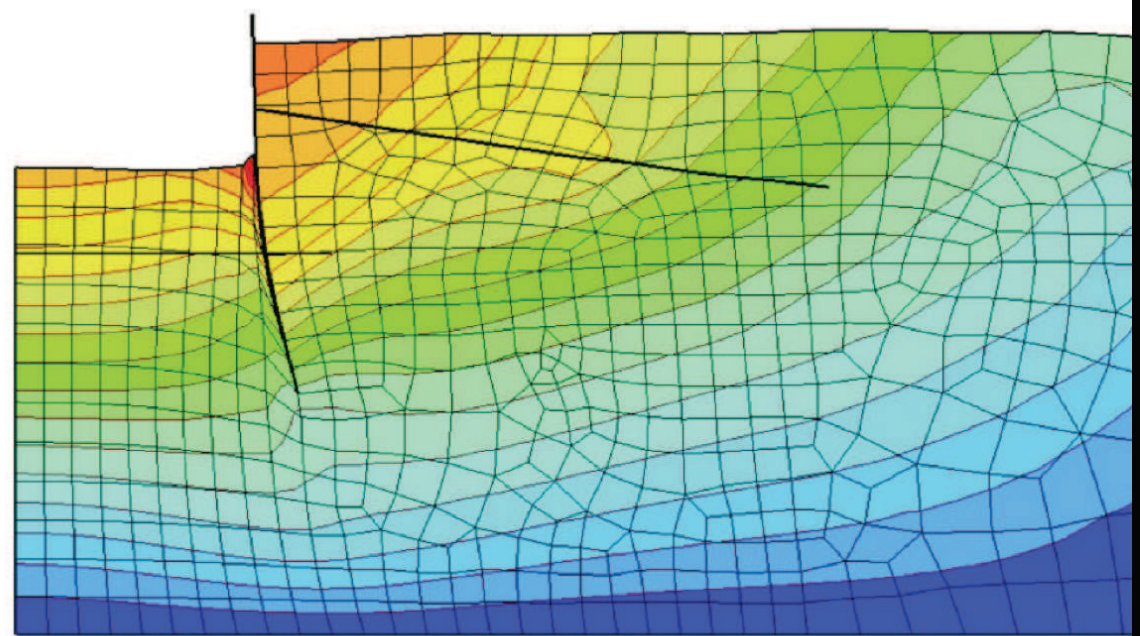
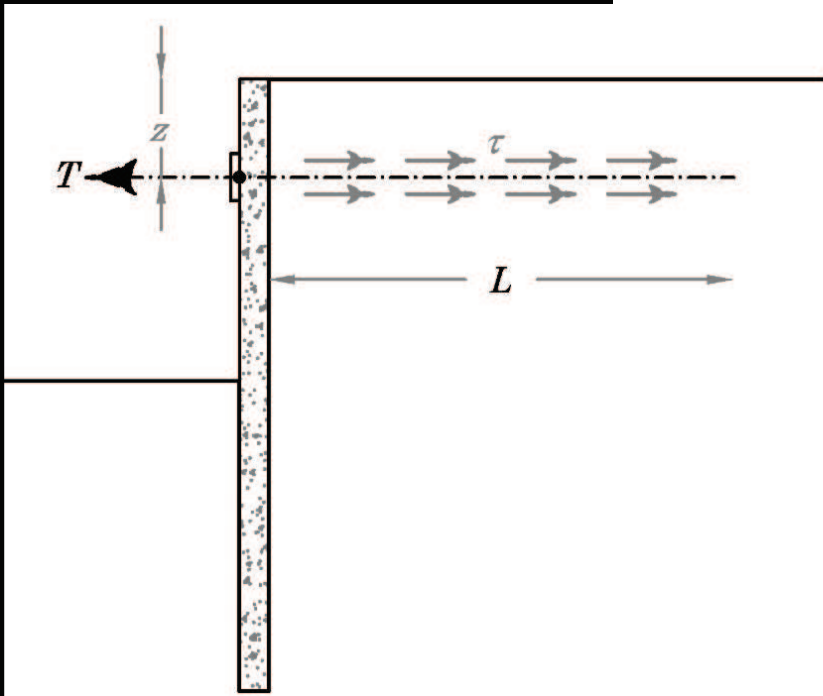
Nel progetto delle paratia non è importante soltanto la determinazione delle spinte e delle resistenze, ma è essenziale anche una corretta esecuzione



6) PARATIE: inclinazione ottimale dei tiranti

La presenza dei tiranti, simulabili mediante appoggi, serve per contrastare la spinta attiva unitamente alla parte interrata

$$T = [D \cdot \pi \cdot L \cdot \alpha] \cdot [(\gamma \cdot z) \cdot \tan \varphi']$$



Ad esempio:

$$D = 0,10 \text{ metri} \quad L = 10 \text{ metri}$$

$$\alpha = 1,5 \quad \varphi' = 30^\circ$$

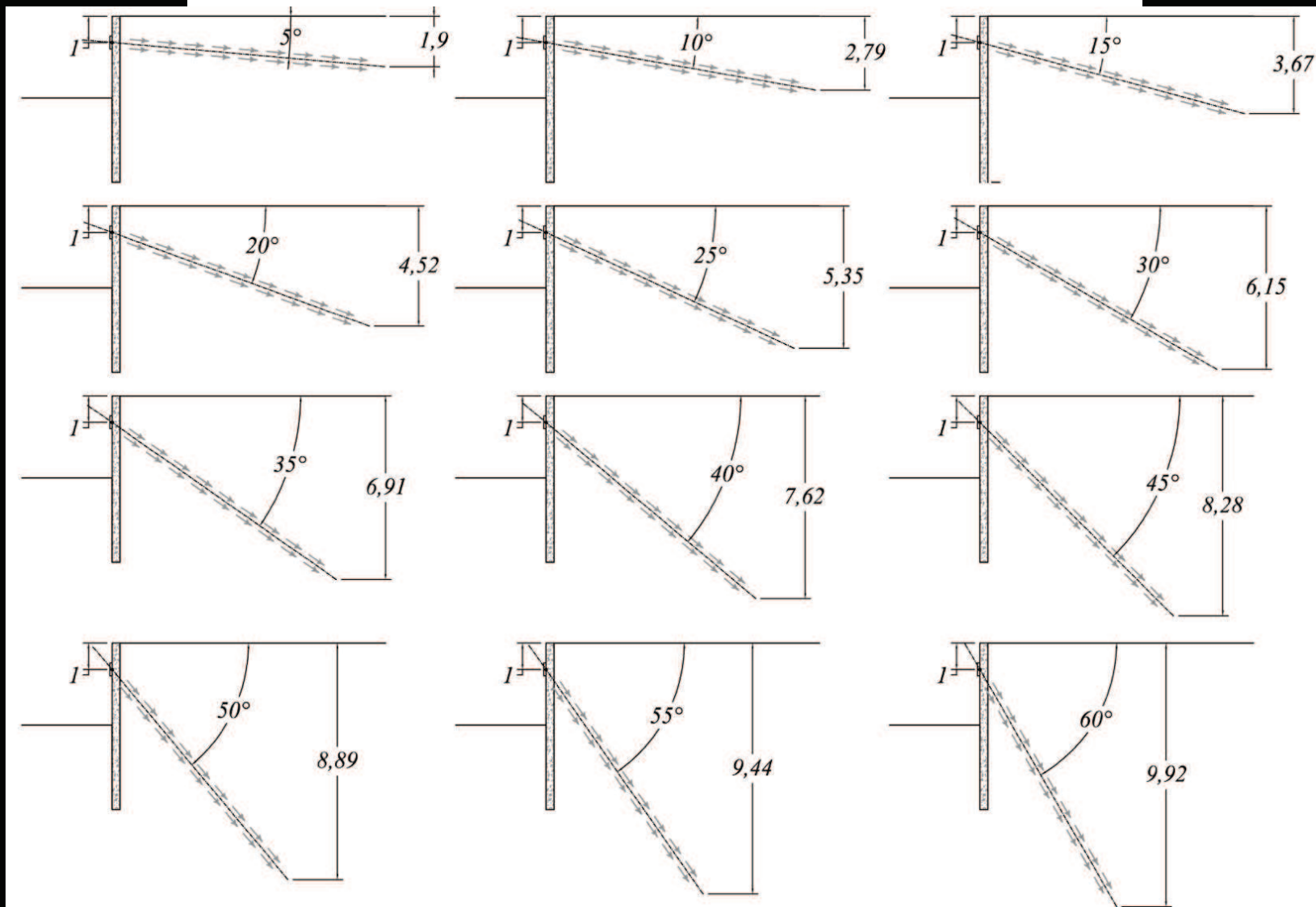
$$z = 1-3 \text{ metri} \quad \gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$T = 54,4-163,2 \text{ kN}$$

6) PARATIE: inclinazione ottimale dei tiranti

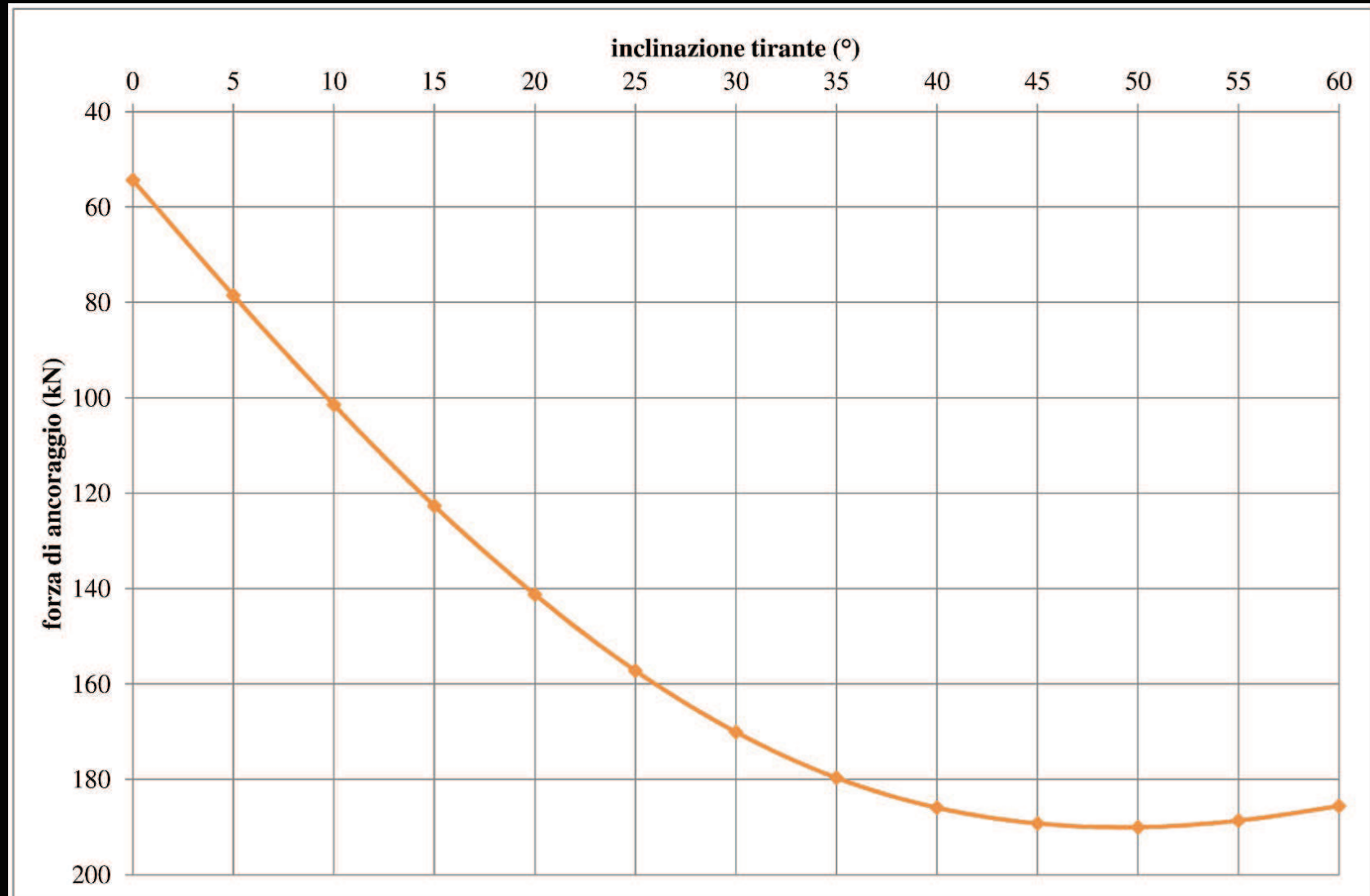
$$\sigma = \left[\frac{\frac{(z_1 + z_2)}{2} \cdot \gamma + \frac{(z_1 + z_2)}{2} \cdot \gamma \cdot K_0}{2} \right] + \left[\frac{\frac{(z_1 + z_2)}{2} \cdot \gamma - \frac{(z_1 + z_2)}{2} \cdot \gamma \cdot K_0}{2} \right] \cdot \cos 2\vartheta$$

$$T = [D \cdot \pi \cdot L \cdot \alpha] \cdot (\sigma \cdot \tan \varphi')$$



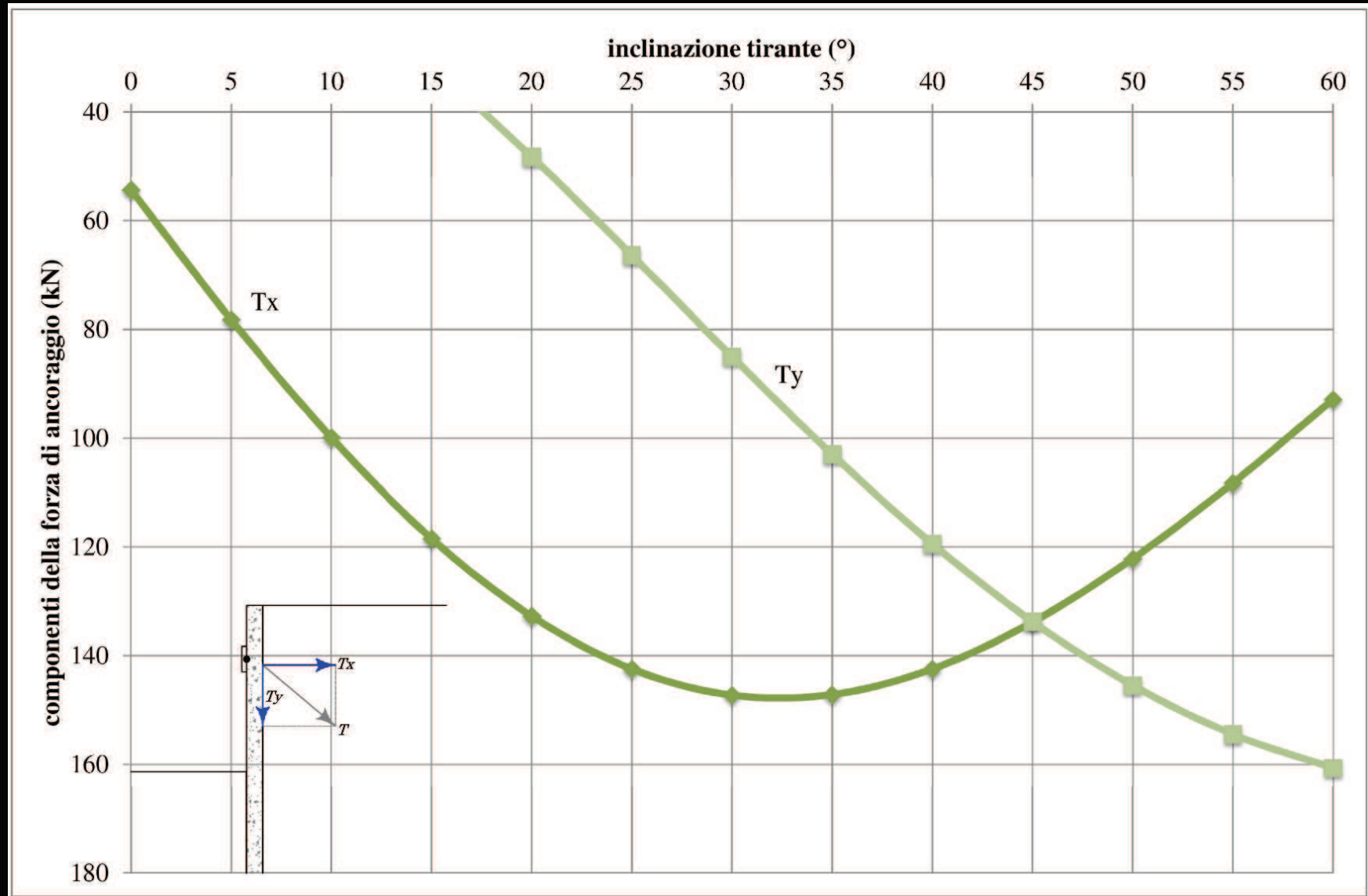
6) PARATIE: inclinazione ottimale dei tiranti

Campo di variazione delle forze di ancoraggio calcolate con il metodo della figura precedente; per un'inclinazione nulla si riduce al caso del tirante orizzontale; la massima forza si ottiene per un'inclinazione di 50°



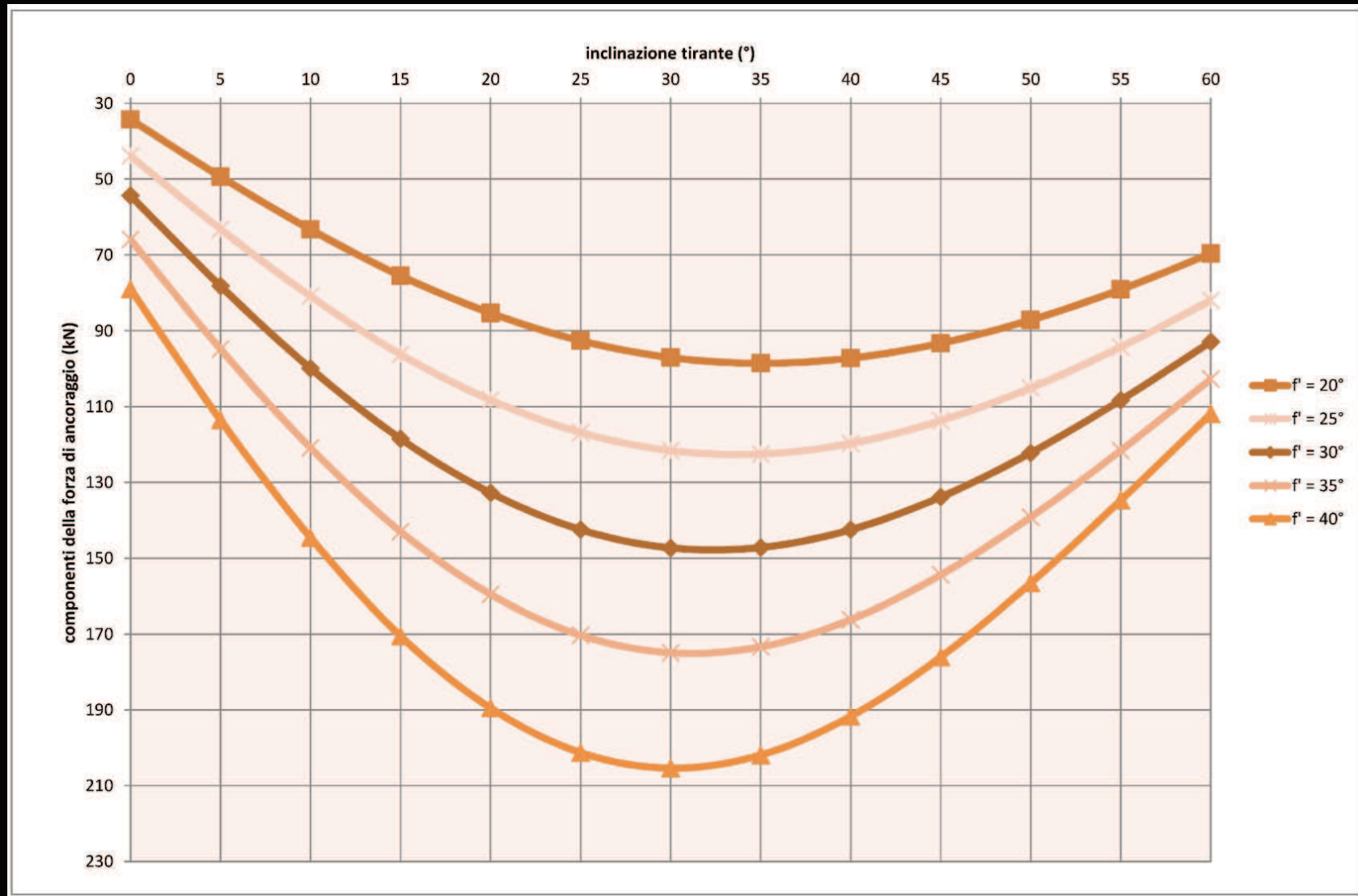
6) PARATIE: inclinazione ottimale dei tiranti

Ciò a che a noi interessa davvero è però la sola componente orizzontale, che raggiunge il suo valore massimo per un'inclinazione dei tiranti di 30°-35°



6) PARATIE: inclinazione ottimale dei tiranti

Come si può notare, l'ottimizzazione dell'inclinazione del tirante è indipendente dall'angolo di resistenza al taglio dei terreni ... **peccato che i software non ne tengano conto**



FINE

Tutte le figure sono protette dai diritti di copyright;
contattare l'autore per l'autorizzazione all'uso.