

Mus. civ. Rovereto	Atti del Workshop in geofisica	3-4 dicembre 2015	23-33	2016
--------------------	--------------------------------	-------------------	-------	------

MARIO NALDI <sup>(1)</sup> & DIEGO BARBERO <sup>(2)</sup>

## APPROCCIO GEOFISICO MULTI-METODOLOGICO PER LA MODELLAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA DEL SOTTOSUOLO

**Abstract** - MARIO NALDI & DIEGO BARBERO - Geophysical multi-method approach for the geological and geotechnical modelling of the subsoil.

The evolution of the geophysical survey techniques allow a more realistic vision of the subsurface. However, the use of only one method of investigation, or of only one physical parameter (such as the electrical resistivity, the velocity of propagation of seismic waves, etc.), can lead to not fully representative interpretation of the geological/geotechnical model. The ambiguity of mono-parametric geophysical models is closely linked to the number of the geological-geotechnical variables (presence of water, density, lithological differences) that, in most cases, are not known “a priori”. To reduce the ambiguity, and then arrive at a correct interpretation, from the geophysical model to geological / geotechnical model, it is therefore necessary to analyze the variables that contribute to influence the physical parameters of the subsoil by means of comparison of different physical parameters (i.e., through the combined use of more geophysical survey methods). In the present paper, we describe the concept of the “inverse model” and a case history, where the combined use of multi-parametric methods has significantly reduced the interpretative uncertainty.

**Key words:** Geophysics - Multi-method approach - Cross-check correlation - Geological and geotechnical modelling.

**Riassunto** - MARIO NALDI & DIEGO BARBERO - Approccio geofisico multi-metodologico per la modellazione geologica e geotecnica del sottosuolo.

L'evoluzione delle tecniche di indagine geofisica consente una visione del sottosuolo sempre più realistica. Tuttavia, l'utilizzo di un solo metodo di indagine, ovvero di un solo parametro fisico (quale la resistività elettrica, la velocità di propagazione delle onde sismiche, ecc.), può condurre a interpretazioni non pienamente rappresentative del modello geologico-geotecnico. Infatti, l'ambiguità interpretativa di

---

<sup>(1)</sup> Techgea Srl, Torino.

<sup>(2)</sup> Dipartimento Scienze della Terra, Università degli studi di Torino.

modelli geofisici mono-parametrici è strettamente collegata al numero di variabili geologiche/geotecniche sito-specifiche (presenza d'acqua, grado di addensamento, differenze litologiche) che, nella maggior parte dei casi, non sono note a priori. Per ridurre l'ambiguità interpretativa, e quindi giungere ad un corretto passaggio dal modello geofisico al modello geologico/geotecnico, occorre quindi analizzare le variabili che concorrono ad influenzare i parametri fisici del sottosuolo mediante confronto incrociato di differenti parametri fisici (ovvero, attraverso l'utilizzo combinato di più metodi di indagine geofisica). Nel presente studio si descrive il concetto di "modello inverso" e viene presentato un tipico "case history" dove l'utilizzo combinato di metodi multi-parametrici ha ridotto notevolmente l'incertezza interpretativa.

**Parole chiave:** Geofisica - Approccio multidisciplinare - Correlazione incrociata - Modellazione geologica e geotecnica.

## 1. IL PROBLEMA INVERSO

La definizione di un modello geologico a partire dalla distribuzione quantitativa di una o più proprietà fisiche misurate con un'indagine geofisica può essere definito come «problema inverso», ovvero: definire un modello geologico ignoto a partire dalla misurazione di parametri fisici caratteristici del sottosuolo. A differenza della diagnostica medica per immagini (che valuta le differenze rispetto ad un modello noto «a priori» con un modello parametrico deterministico o "modello diretto"), la diagnostica geofisica del sottosuolo non può riferirsi ad un modello geologico univoco perché i parametri fisici misurati possono variare in funzione di diverse variabili geologiche ("modello inverso"). Come illustrato in Fig. 1, la diagnostica medica per immagini (radiografia di una mano) evidenzia le anomalie di strutture note (le ossa) ed è quindi un problema diretto. L'esempio relativo alla diagnostica geologica per immagini (definizione del volume di resistività elettrica del sottosuolo) evidenzia come, in assenza di una calibrazione diretta (sondaggi geognostici) o indiretta (conoscenza preventiva dell'assetto geologico) sia pressoché impossibile definire un modello geologico.

## 2. CORRELAZIONE INCROCIATA DI INDAGINI MULTI-PARAMETRICHE

Il passaggio dal "modello geofisico" al "modello geologico" richiede la calibrazione con dati geologici di superficie e con dati geognostici (stratigrafici) del sottosuolo (sondaggi), ed è tanto più complesso quanto più numerose sono le variabili in gioco. Tale ambiguità interpretativa, tipica dei sistemi complessi, può essere notevolmente ridotta mediante applicazione di metodi geofisici multi parametrici, in grado di discriminare e caratterizzare gli elementi stratigrafici o strutturali caratteristici del sottosuolo (correlazione incrociata tra parametri fisici differenti). Nel caso riportato in Fig. 2, relativo allo studio di un'area contaminata, si riportano i risultati di un rilievo elettromagnetico FDEM con la mappa di conducibilità elettrica apparente

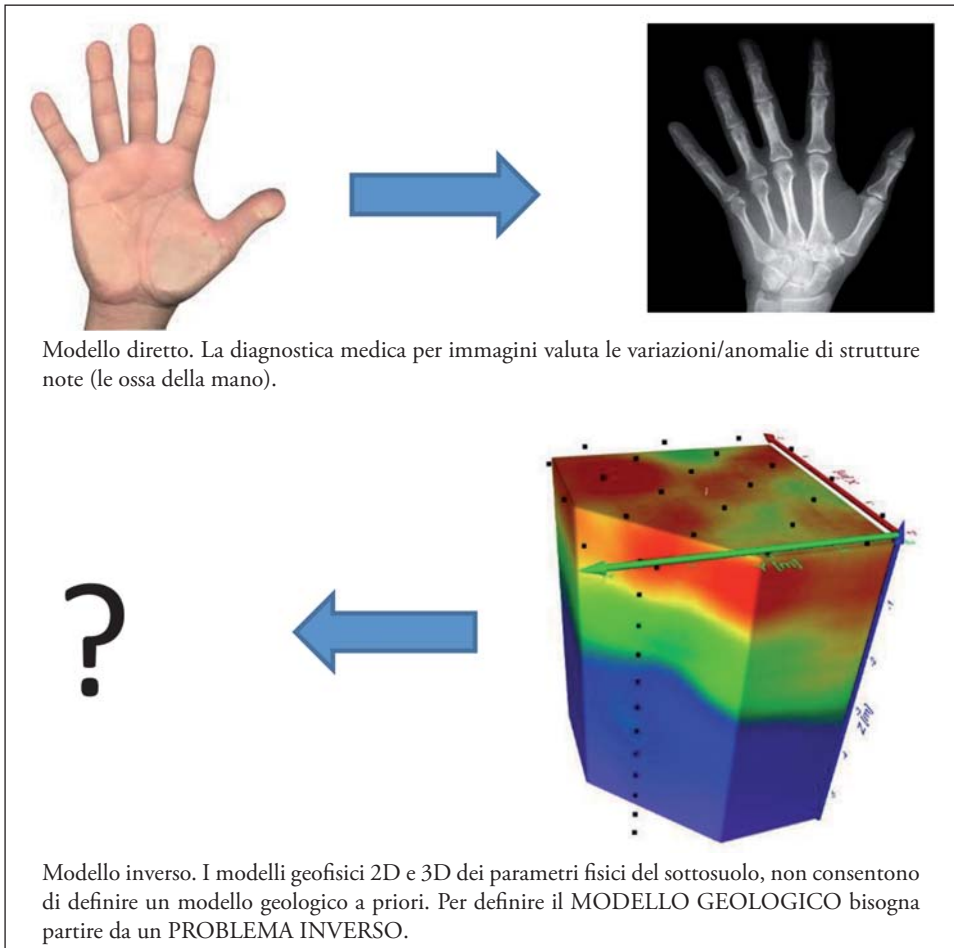


Fig. 1 - Confronto tra il “modello diretto” e il “modello inverso” nella diagnostica per immagini.

(a sinistra) confrontata con la mappa di suscettività magnetica (a destra). La mappa di conducibilità elettrica evidenzia un’anomalia allungata a forma di “pennacchio” che fuoriesce da uno stabilimento industriale, allungato in direzione di falda. La mappa di suscettività magnetica evidenzia, invece, un’anomalia di forma e posizione completamente diverse, che coincide con il tracciato della strada (sottofondo in ciottoli serpentinitici, ferro-magnetici), e non ha nessuna corrispondenza con l’anomalia di conducibilità elettrica. Dal confronto tra i due parametri, si desume che l’anomalia di conducibilità elettrica non è legata alla presenza di strutture metalliche interrate.

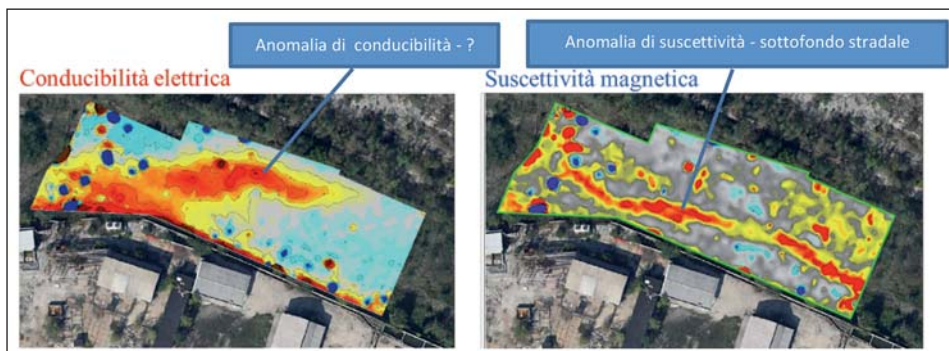


Fig. 2 - Rilievo EM. Confronto tra la mappa di conducibilità elettrica apparente e la mappa di suscettività magnetica (colore rosso = valori positivi elevati).

Il caso presentato rimaneva insoluto per molti aspetti, e necessitava di ulteriori approfondimenti per caratterizzare l'anomalia rilevata. Come illustrato in Fig. 3, l'applicazione del metodo geoelettrico tomografico, con *imaging* dei valori di resistività elettrica e di IP, ha fornito ulteriori informazioni che hanno permesso di caratterizzare compiutamente il fenomeno:

- la sezione tomografica di resistività elettrica evidenzia una evidente e diffusa anomalia di bassa resistività elettrica (alta conducibilità) in corrispondenza del “pennacchio”. Si noti, tuttavia, che tali valori possono anche coincidere con terreno naturale a matrice fine, e non necessariamente con terreni contaminati;
- la sezione tomografica del valore di polarizzazione indotta (IP) mette in evidenza con estrema chiarezza la presenza di un'anomalia corrispondente con la larghezza del “pennacchio”, con valori decisamente elevati e compatibili con terreni contaminati <sup>(3)</sup>.

La sintesi del flusso logico che ha portato alla caratterizzazione del sito contaminato è di seguito analizzata:

1. **Risultati della correlazione incrociata** → Notevole alterazione di alcune proprietà fisiche del sottosuolo (IP e conducibilità elettrica apparente) → assetto geologico omogeneo, ghiaie e sabbie, incompatibile con valori di IP e di conducibilità elettrica misurati e quindi → pennacchio di contaminazione.
2. **Verifica diretta con scavo fino a 5 m** → localizzazione prodotto libero surnatante (alterazione IP per biodegradazione e elevato contenuto ionico) → caratterizzazione chimica dell'inquinante.

<sup>(3)</sup> “Two-dimensional electrical imaging for detection of hydrocarbon contaminants” - Near Surface Geophysics, 2003, 131-137, A. Godio, M. Naldi.

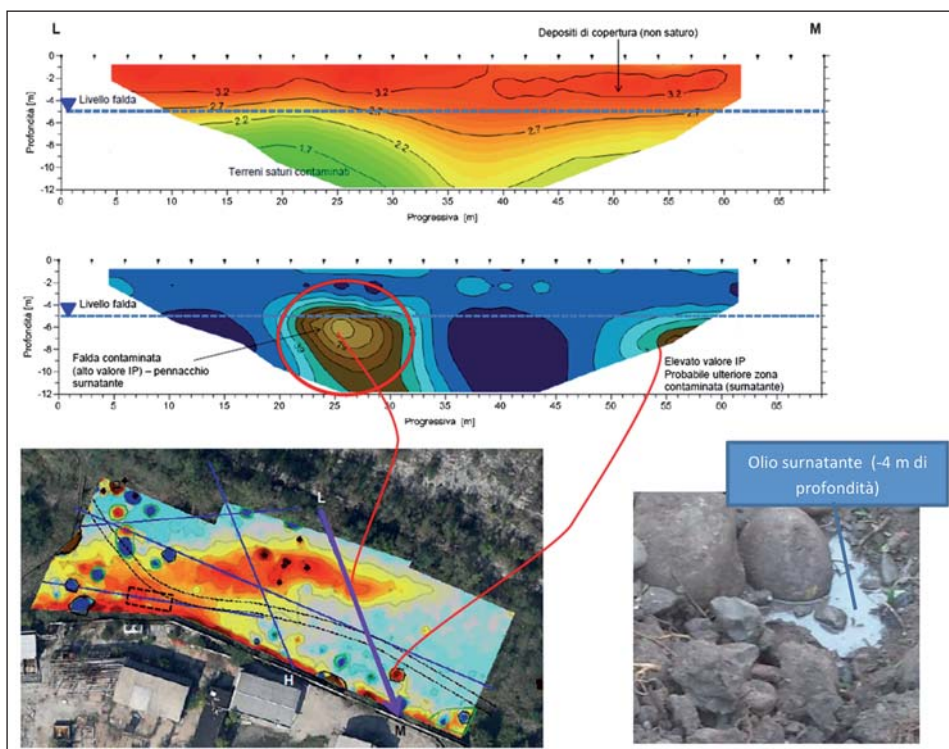


Fig. 3 - Sezione tomografica trasversale all'anomalia EM.

3. **Modello interpretativo (back-analysis)** → pennacchio di contaminazione in falda determinato da idrocarburi (oli) in parte degradati (elevato contenuto ionico) → modello concettuale.

### 3. ESEMPIO DI APPLICAZIONE DI INDAGINI GEOFISICHE MULTIPARAMETRICHE

L'esempio descritto nel seguito si riferisce ad un problema di instabilità di un versante che ha coinvolto il piazzale di valle di un fabbricato residenziale, per un fronte di circa 80 m ed un'altezza di circa 3-4 m (Fig. 4).

Dal punto di vista geologico, il piazzale insiste su un terrazzo fluvio-glaciale modellato su depositi morenici di ablazione.

In relazione agli obiettivi di indagine (definire il modello geologico e geotecnico del fenomeno di instabilità per la progettazione degli interventi di consolidamento), sono stati scelti i seguenti parametri fisici del sottosuolo:



Fig. 4 - Dissesto del ciglio di un piazzale lastricato (fronte di 80 m).

1. Presenza d'acqua  $\rightarrow$  resistività elettrica.
2. Profilo stratigrafico  $\rightarrow$  resistività elettrica.
3. Addensamento del terreno (rigidità)  $\rightarrow$  profilo MASW (Vs) e sismica a rifrazione (Vp).

Il piano di indagini ha previsto la realizzazione di (Fig. 5):

1. N° 2 sezioni geoelettriche trasversali ai possibili deflussi idrici sotterranei (deflussi canalizzati), rilevati come tracce di umidità nel corpo di frana.
2. N° 2 sezioni sismiche a rifrazione in onde di compressione, disposte a croce nella zona di massimo dissesto.
3. N° 1 profilo MASW nella zona centrale (massimo dissesto) su cui è stato posizionato anche un sondaggio geognostico.

Dai risultati dell'indagine geoelettrica (Fig. 6) si rileva un'alternanza di strati sabbiosi (media resistività) e limosi (bassa resistività), con intercalazioni di lenti ghiaiose e poggianti su un (probabile) substrato roccioso ad elevata resistività elettrica (sezione di valle). Le lenti di limo sono verosimilmente sature d'acqua nella zona di dissesto, dato che mostrano valori di resistività elettrica molto bassi.

Il confronto con l'indagine sismica a rifrazione (riportato in Fig. 7) evidenzia come le lenti di limo superficiale (lenti sature) siano caratterizzate da velocità delle onde di compressione molto basse ( $V_p < 500$  m/s), indicative di terreni allentati.

Inoltre, si evidenzia nettamente la presenza di una superficie di scivolamento superficiale entro i primi 3-4 m (superficie di scivolamento attiva, causa del dissesto) e una superficie di dissesto più profonda, rilevabile anche dalla prova MASW (Fig. 8).

Il profilo MASW è stato realizzato, come detto, a fianco del sondaggio geognostico di calibrazione, in modo da avere il confronto tra il profilo stratigrafico e il "profilo di rigidità" fornito dalla prova MASW.

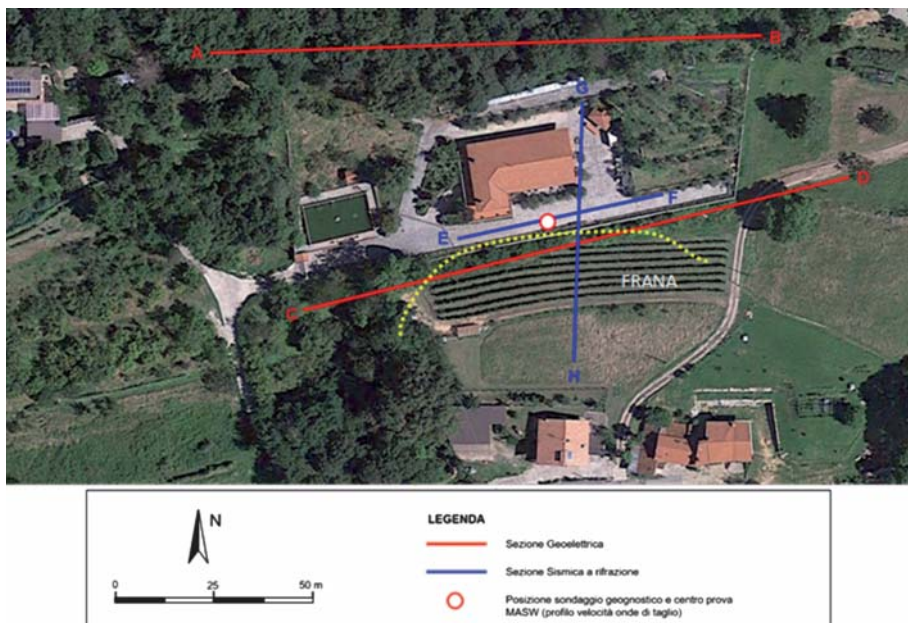


Fig. 5 - Esempio di caratterizzazione di frana superficiale - Piano di indagini geofisiche.

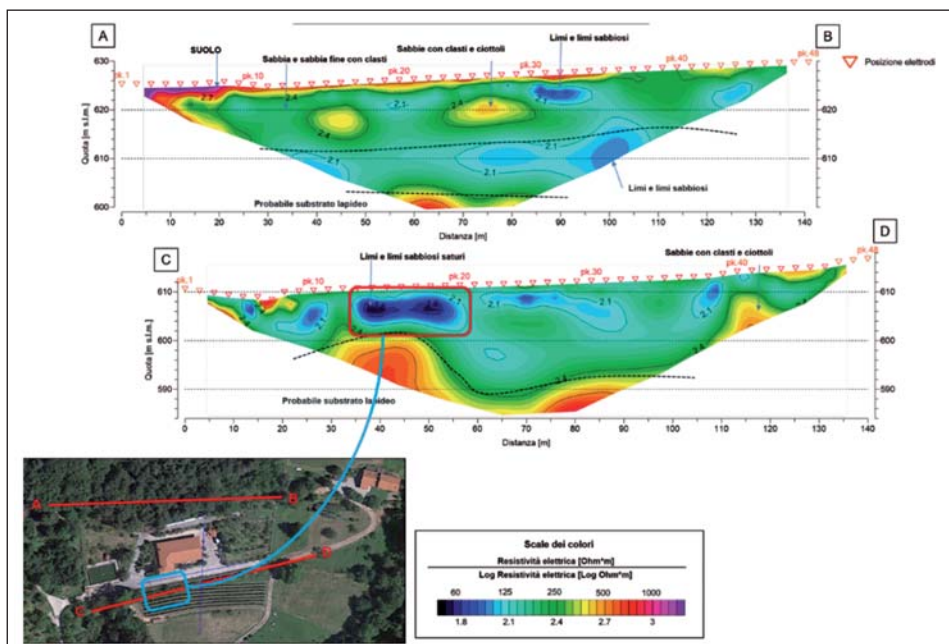


Fig. 6 - Sezioni geoelettriche a monte e a valle della zona di distacco della frana.

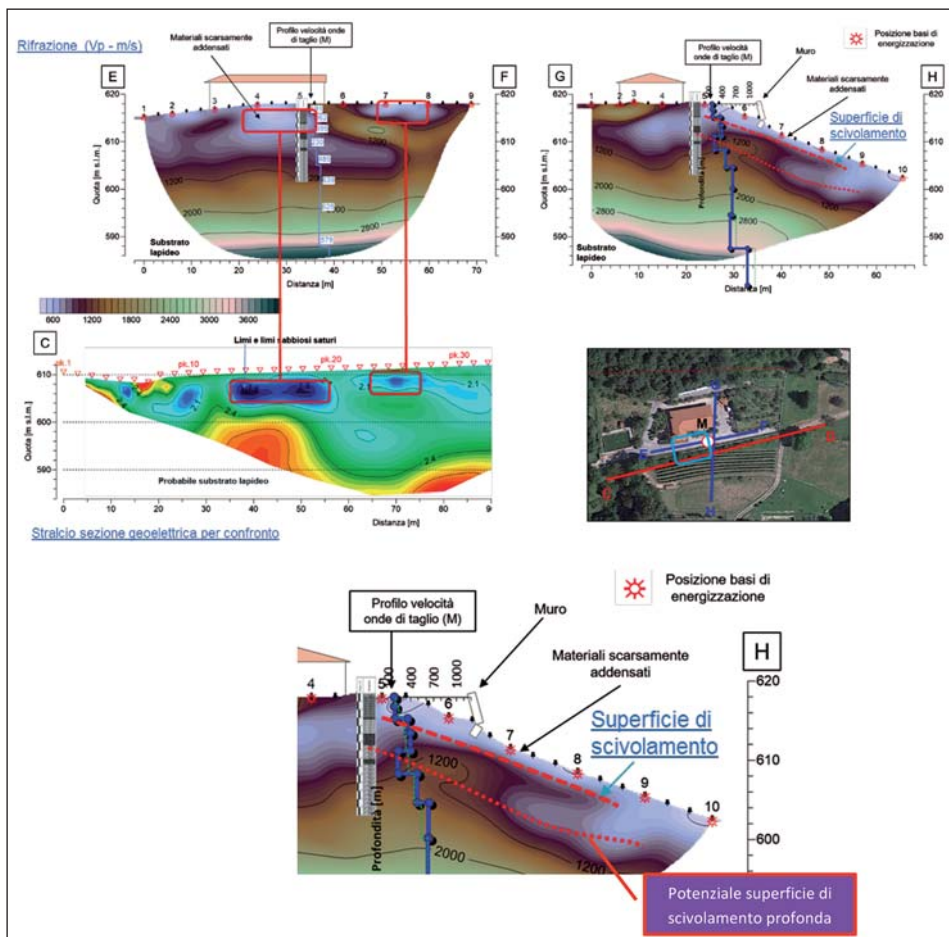


Fig. 7 - Confronto tra misure geoelettriche e misure sismiche a rifrazione, e dettaglio della superficie di scivolamento (dettaglio profilo MASW in Fig. 8).

Il profilo MASW evidenzia un primo strato detensionato (riporto in frana) con velocità delle onde di taglio inferiori a 200 m/s. A circa 3 m di profondità si assiste ad un incremento della velocità delle onde di taglio, a valori di circa 400 m/s, e corrispondenti con limi saturi con rari ciottoli di ghiaia. Il dato più interessante si rileva a circa 7 m di profondità, dove si assiste ad una netta inversione di velocità (zona con  $V_s$  pari a circa 200 m/s tra 7 e 9.5 m di profondità) identificata anche con la sezione sismica in onde di compressione. Si tratta di una zona di sabbia limosa detensionata più profonda, potenzialmente attivabile come superficie di scivolamento in caso di aumento della pressione interstiziale dell'acqua sotterranea. Al di sotto dei 9.5 m di profondità la velocità delle onde di taglio ritorna a valori medio alti



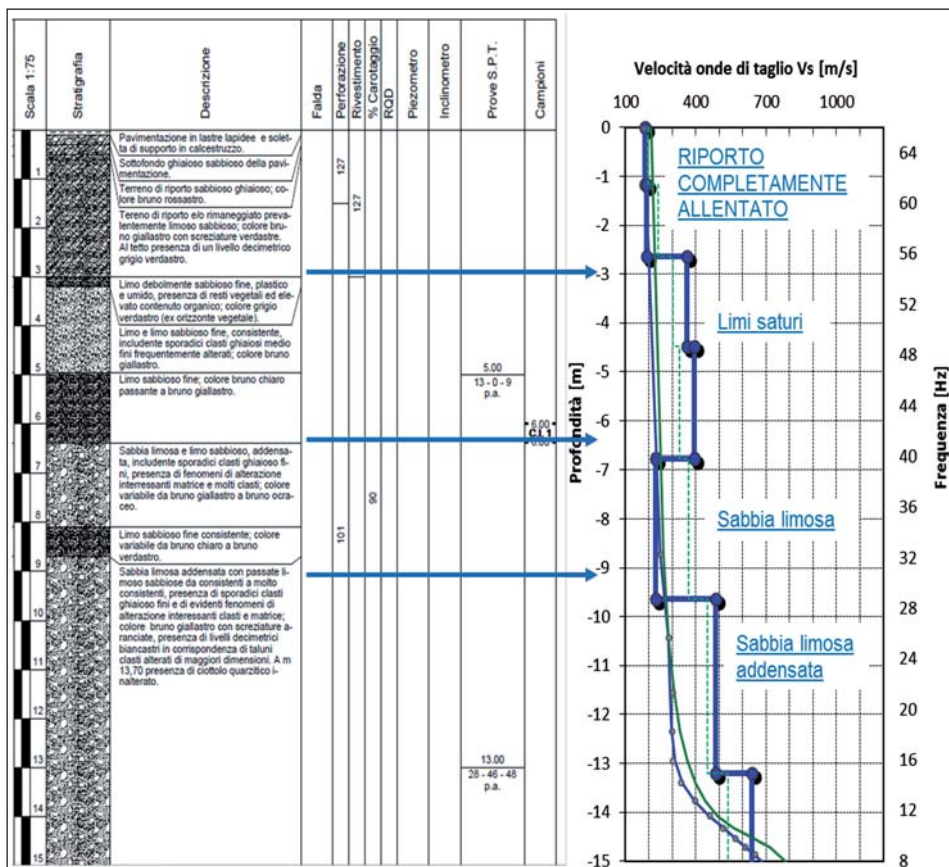


Fig. 8 - Confronto tra il profilo MASW e il profilo stratigrafico da sondaggio geognostico.

e, come verificabile dai valori di SPT misurati nel sondaggio, si tratta di depositi a elevato grado di addensamento.

La correlazione incrociata di tutti i dati acquisiti ha consentito di definire un modello concettuale realistico (Fig. 9), grazie al quale si è potuto definire un progetto di consolidamento mirato alla stabilizzazione della frana superficiale ed alla prevenzione della potenziale frana profonda

#### 4. CONCLUSIONI

La maggiore limitazione della prospezione geofisica in campo geologico è legata alla "ambiguità interpretativa" che, per situazioni complesse e in assenza di calibrazione diretta, non consentono una corretta definizione del modello geologico.

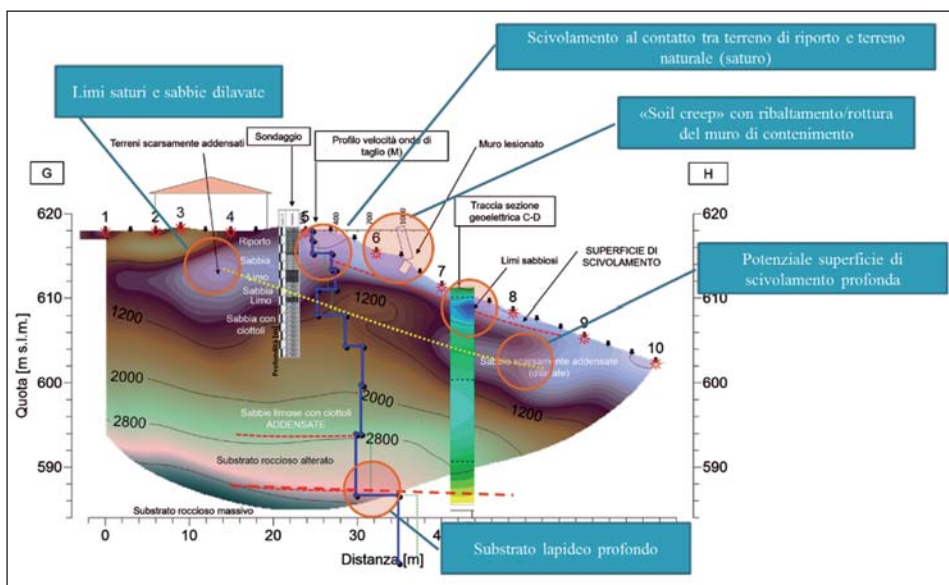


Fig. 9 - Modello concettuale del fenomeno di instabilità derivante dalla correlazione incrociata dei risultati dell'indagine multi-parametrica.

L'ambiguità interpretativa deriva dal fatto che non conosciamo “a priori” un modello geologico di partenza, ed inoltre è funzione diretta della “numerosità” delle variabili geologiche del sottosuolo: tanto più è complesso il sistema geologico, tanto maggiori possono essere i modelli interpretativi ad esso associabili. Posto che le “variabili geologiche” possono essere paragonate alle “variabili” di un sistema matematico di equazioni, per ridurre l'ambiguità interpretativa si può aumentare il numero di equazioni nel sistema mediante utilizzo di metodi di indagine geofisica (equazioni) che misurano differenti parametri fisici (variabili). Nel caso più semplice, il confronto incrociato tra due variabili può fornire due risultati:

$A = B \rightarrow$  conferma del dato. Ad esempio, nel caso di argille non consolidate a resistività elettrica bassa (A) = velocità onde di taglio medio-bassa (B).

$A \neq B \rightarrow$  dato non confermato dal confronto. Ad esempio, litotipi presunti argillosi con resistività elettrica bassa (A) e velocità delle onde di taglio elevate (B) indicano che non si tratta di argille ma di rocce argillose o scisti.

Appare chiaro che per ridurre l'ambiguità interpretativa in modelli complessi (in particolare in modelli tridimensionali) sia necessario utilizzare più variabili per applicare i confronti incrociati su una matrice complessa. Ad esempio, con tre variabili si possono avere quattro diversi modelli concettuali:

A = B = C

A = B ≠ C

A ≠ B = C

A ≠ B ≠ C

L'applicazione di metodi multi parametrici permette quindi di incrementare il livello di dettaglio del modello geologico del sottosuolo, base di partenza imprescindibile per qualsiasi progetto geotecnico, idrogeologico o ambientale.

#### BIBLIOGRAFIA

- ABUELADAS A.A. & AL-ZOUBI A.S., 2004 - The Application of a Combined Geophysical Survey (Ground-Penetrating Radar and Seismic Refraction) for mapping Sinkholes in Ghor Al-Haditha Area, Jordan, *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- GODIO A. & NALDI M., 2003 - Two-dimensional electrical imaging for detection of hydrocarbon contaminants, *Near Surface Geophysics*, pp. 131-137.
- GODIO A., CONFORTO GALLI C., CHIARA P. & NALDI M., 1998 - *A combined geophysical survey for hydrogeological purposes in north-eastern Italy*, Proceedings 4<sup>th</sup> Meeting Environmental and Engineering Geophysics, Barcelona (Spain), sep., pp. 14-17.
- SOLBERG I-L., *et al.*, 2012 - Combined geophysical and geotechnical approach to ground investigations and hazard zonation of a quick clay area, mid Norway, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71.1, pp. 119-133.

