

CNR-IRPI
di Torino

Convegno GeoBen 2000



Torino 7-9 giugno 2000
Palazzina di Caccia di Stupinigi

**Condizionamenti Geologici e Geotecnici
nella Conservazione del Patrimonio
Storico Culturale**

*Geological and Geotechnical influences
in the Preservation of Historical
and Cultural Heritage*

Atti - Proceedings

A cura di - *Edited by*
Giorgio LOLLINO



IGCP 425
Landslide Hazard Assessment
and Cultural Heritage



Pubblicazione
n. 2133



Direzione Servizi Tecnici
di Prevenzione

CNR
Ufficio del Presidente

J. Mazzanti

SUL MODELLO BIDIMENSIONALE DEL SOTTOSUOLO OTTENIBILE MEDIANTE TECNICHE DI PROSPEZIONE GEOFISICA, PER LO STUDIO DEI TERRENI SOTTOSTANTI LE FONDAZIONI DI EDIFICI DI IMPORTANZA STORICO-CULTURALE: DUE ESEMPI DI INTERVENTO A SIENA ED IN PROVINCIA

Gabbani G.¹, Censini G.², Ciacci G.², Moschini B.³ e Mosconi L.³

ABSTRACT: *Underground bidimensional model carried out with geophysical prospections for foundation heritages: Two examples in Siena and vicinities*

This note deals with the possibility of geophysical methods application to the exploration of the ground in order to understand its physical-mechanical features, to be able to value the stability conditions of historical-monumental buildings in which there is evidence of fractures or in the case of works to be carried out in the vicinities.

Two examples of studies carried out near Siena, the first inside the city (Santa Chiara Monastery) the second one in the surrounding countryside near the small Church of Vergelle (S. Giovanni d'Asso).

In the first case the study had to provide us some elements (presence of landfills, pipes and/or tunnels in the ground) to regarding the situation beneath the building (Monastery), which is accessible only through the main entrance, but with some free areas inside (some cloisters a few tens of meters wide).

In the second case the geophysical study had to provide information concerning the wide fractures on the church and the canonical house close to it and whether these are linked to instability of the hill or due only to the semi-abandoned state of the buildings with the aim of directing the works at the building or hill stabilisation.

In both these cases we have used geoelectrical and seismic methods together, the first one with the refraction system, the second one with the multielectrode system, in particular the polo-dipolo system.

The processing and results analysis have allowed us to built stratigraphic models of the ground that allowed an optimal designing of the works.

SOMMARIO: *Sul modello bidimensionale del sottosuolo ottenibile mediante tecniche di prospezione geofisica, per lo studio dei terreni sottostanti le fondazioni di edifici di importanza storico-culturale: Due esempi di intervento a Siena ed in provincia*

Si affronta il tema della possibilità di applicazione delle metodologie geofisiche all'esplorazione del sottosuolo con la finalità di conoscerne le caratteristiche fisico-meccaniche in modo da poter valutare le condizioni di stabilità di edifici di interesse storico-monumentale in cui vi siano evidenze di lesioni oppure si prevedano opere accessorie limitrofe agli stessi.

In questa nota si riferisce di due studi eseguiti nella zona di Siena, uno entro le mura della Città e specificamente all'interno del Monastero di Santa Chiara, l'altro in provincia, intorno alla piccola Chiesa di Vergelle a S. Giovanni d'Asso.

¹ Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi, via G. La Pira, 4 – 50121 Firenze. giga@unifi.it

² Georisorse Italia sas – Società per l'esplorazione geofisica del sottosuolo, via E. Fermi, 8 – 53048 Sinalunga (SI). georisorse@iol.it

³ Studio di Geologia Associato Moschini & Mosconi, viale Trieste, 41 – 53100 Siena. moschini-mosconi@iol.it

Nel primo caso l'indagine doveva fornire alcuni elementi (presenza di terreni di riporto, di cunicoli e/o gallerie nel sottosuolo) per meglio inquadrare la situazione sottostante il complesso edilizio di un monastero, accessibile solo dal portone di ingresso, ma con alcune aree libere all'interno (alcuni chiostrini di poche decine di metri).

Nel secondo caso l'indagine geofisica doveva stabilire se le vistose lesioni che caratterizzano l'edificio della Chiesa e della contigua casa canonica, fossero legate ad un dissesto del crinale oppure ad un cedimento strutturale collegabile con lo stato di semi-abbandono in cui versano gli edifici, ciò al fine di indirizzare la progettazione verso interventi sulle strutture oppure verso un consolidamento del crinale stesso.

In entrambi i casi sono state utilizzate, congiuntamente, le tecniche sismiche e geoelettriche: la prima con i sistemi a rifrazione, la seconda con il sistema del profilo multielettrodo, nel caso specifico con il dispositivo polo-dipolo.

L'elaborazione dei dati acquisiti con specifici programmi di calcolo e l'analisi combinata dei risultati ottenuti dalle differenti metodologie ha permesso di costruire modelli stratigrafici del sottosuolo che hanno consentito l'ottimale impostazione dei rispettivi progetti di intervento.

Parole chiave: Modello bidimensionale del sottosuolo, tecniche di prospezione geofisica, edifici di importanza storico culturale.

UBICAZIONE DELLE ZONE DI INDAGINE

Le zone ove sono ubicati gli edifici oggetto di questa nota sono rappresentate con un cerchio nella Figura 1 sottostante che riguarda la città di Siena e parte della sua provincia.

1 - CONVENTO DELLE CAPPUCINE A SIENA

Gli edifici del Monastero di Santa Chiara a Siena sono collocati sul Colle di Santa Maria in adiacenza alla Basilica di S. Maria dei Servi tra via delle Cantine, via di Val Montone e P.za A. Manzoni. Per questi edifici, acquisiti dall'Università degli Studi di Siena è in progetto la ristrutturazione con parziali modifiche per la realizzazione di nuove strutture da inserire nel complesso. Al momento delle indagini l'accesso alle aree interessate dalle indagini era possibile solo dal portone principale ed attraverso i locali abitati dalla Comunità Religiosa, per cui non si è ritenuto opportuno accedere con impianti tali da creare disturbo e disagio alla suddetta Comunità, ma si è ritenuto che mediante indagini geofisiche si potesse giungere ad una adeguata conoscenza del sottosuolo in modo da permettere la conservazione delle parti di interesse storico-artistico e progettare in maniera ottimale le nuove strutture.



Figura 1: Mappa della città di Siena e parte della provincia, i cerchi identificano i luoghi di culto oggetto dell'indagine
Figure 1: Siena map and countryside, the circles are the studied historical-monumental buildings

1-1- GEOLOGIA.

La zona ricade nella parte apicale di un rilievo collinare allungato in direzione N-S alla quota di circa 320 m s.l.m. nel centro storico di Siena (Figura 2) In particolare è caratterizzata dalla presenza di sabbie marine addensate di

età pliocenica con alternanze di marne e di lenti di conglomerati cementati che generalmente si trovano con giacitura debolmente inclinata verso Ovest.

In particolare nell'area di indagine è stato possibile osservare la formazione presente nella parete di una cantina scavata dove sono presenti sabbie compatte di colore giallo-ocra con limo generalmente poco cementate sebbene alcuni livelli di 20-30 cm presentino elevata cementazione.

L'assetto tettonico della zona è caratterizzato da frequenti fratture con direzione N120 e subordinatamente N030. Proprio una di queste linee è evidente nella cantina suddetta dove si nota una incrostazione calcitica lungo il piano di faglia.

1.2- METODOLOGIE DI INDAGINE

Le indagini indirette sono state eseguite, oltre che per una caratterizzazione preliminare del sottosuolo in termini di parametri geotecnici anche con la finalità di esplorazione alla ricerca di eventuali cavità non conosciute; in particolare sono state eseguite indagini geoelettriche e sismiche.

Sono state applicate le metodologie di sismica a rifrazione e della geoelettrica mediante profili Polo-Dipolo; la sismica a rifrazione è stata utilizzata al fine di valutare lo spessore dei terreni di riporto ed è stata messa in opera mediante dispositivi di piccole dimensioni (22 o 33 m) ma con tiri sismici posti anche a distanze relativamente grandi (anche dall'esterno del complesso del Monastero) al fine di incrementare la profondità di indagine. La geoelettrica aveva la finalità di individuare eventuali cunicoli e gallerie non documentate ed è stata messa in opera con profili polo-dipolo con dipoli di un metro ed "n" fino a 12.

L'elaborazione dei dati è stata eseguita con sistemi operanti su p.c.: per la sismica a rifrazione è stato utilizzato il software "GREMIX" v.2.58 della Interpex. Per la geoelettrica è stato utilizzata una versione free-ware del software di M.H. Loke RES2Dinv ver.3.41.

L'indagine sismica è stata eseguita con il sismografo OYO McSeis e geofoni Mark Products a 14 Hz. Per l'indagine geoelettrica è stata utilizzata la strumentazione incentrata sul resistivimetro SYSCAL E2E del BRGM, in grado di acquisire e memorizzare misure di resistività con qualsiasi dispositivo di elettrodi, memorizzare i risultati e trasferire i dati.

1.3- PROSPEZIONI GEOFISICHE

L'indagine geoelettrica è stata eseguita lungo n° 3 profili di lunghezza variabile da 15 a 25 metri, ha permesso di esplorare fino a circa 5 metri dal p.c.. Due profili hanno evidenziato lo sviluppo della cantina parzialmente esplorabile anche nelle zone in cui non vi era accessibilità, indicandone un marcato ampliamento. Il terzo profilo ha permesso di evidenziare la presenza di una fascia di materiali di riempimento che erano stati utilizzati per riempire una preesistente cavità o un cunicolo di accesso dalla sottostante via delle Cantine verso la zona di interesse.

Per quanto riguarda la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo, questa è stata effettuata per correlazione con situazioni analoghe in cui si è potuto abbinare l'indagine sismica ad indagini geognostiche dirette mediante prove S.P.T.. La correlazione che è stata ritenuta idonea può essere quella desumibile dalla seguente tabella ottenuta sperimentalmente in un'area limitrofa.

In conclusione le indagini geofisiche (Figura 4) hanno permesso di acquisire informazioni utili alla progettazione di quanto in programma senza la necessità di effettuare opere di demolizione per poter accedere alle aree di indagine evitando il disagio che sarebbe stato arrecato alla comunità religiosa presente nel monastero.



Figura 2: Ubicazione del Convento di S. Chiara
Figure 2: S. Chiara Monastery



Figura 3: Faglia nel sottosuolo
Figure 3: Ground fault evidence

Sotto l'aspetto geotecnico (Tabella 1) le sabbie presenti nell'area di indagine sono state caratterizzate in due differenti tipologie: un complesso superficiale costituito da materiali molto allentati con velocità sismica inferiore a 400 m/s al quale sono state attribuite un peso di volume di 1,7 gr/cm³, un angolo di attrito di 25° ed un M_{cd} pari a 80 kg/cm²; un substrato compatto costituito da sabbie

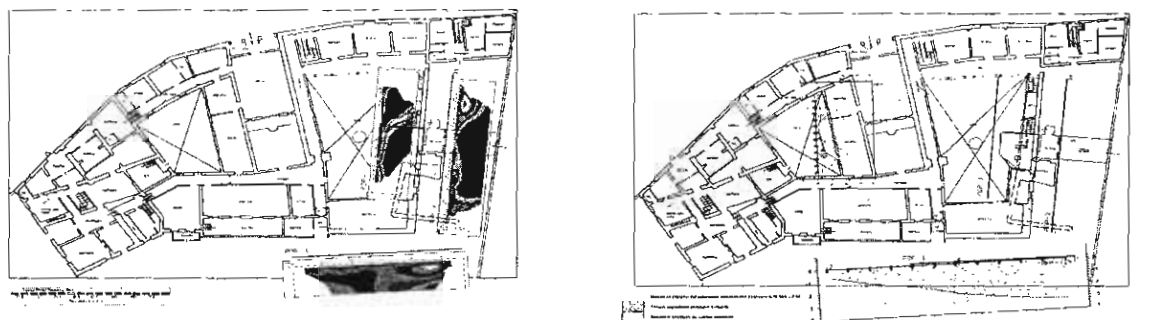


Figura 4: Planimetria del monastero e tipologie d'indagine geofisica effettuate
 Figure 4: Monastery map and geophysical prospectings

addensate con livelli cementati con velocità sismica di circa 1500 m/s che tende ad aumentare con la profondità, al quale sono state attribuite un peso di volume di 1,8 gr/cm³, una densità relativa di 80 %, un angolo di attrito di 32° ed un M_{cd} di circa 150 kg/cm².

Tabella 1: Correlazione tra N'₇₀ e velocità sismiche
 Table 1: Correlation between N'₇₀ and seismic velocity

CORRELAZIONE TRA N' ₇₀ E VELOCITÀ SISMICHE			
Terreni coerenti	0 < N' ₇₀ < 2	Molto soffice	V _s = 0-500 m/s
Terreni incoerenti	0 < N' ₇₀ < 4	Molto sciolta	
Terreni coerenti	2 < N' ₇₀ < 4	Soffice	V _s = 500-1500 m/s
Terreni incoerenti	4 < N' ₇₀ < 10	Sciolta	
Terreni coerenti	4 < N' ₇₀ < 15	Plastica dura	
Terreni incoerenti	10 < N' ₇₀ < 30	Media	V _s = 1500-2000 m/s
Terreni coerenti	15 < N' ₇₀ < 30	Molto dura	
Terreni incoerenti	30 < N' ₇₀ < 50	Densa	V _s => 20000 m/s
Terreni coerenti	N' ₇₀ < 30	Durissima	
Terreni incoerenti	N' ₇₀ < 50	Molto densa	

N.B. Come terreni coerenti si considerano i seguenti litotipi: A, Agp, Ag, Lg;
 come terreni incoerenti si considerano i seguenti litotipi: Ls, S, Sg.

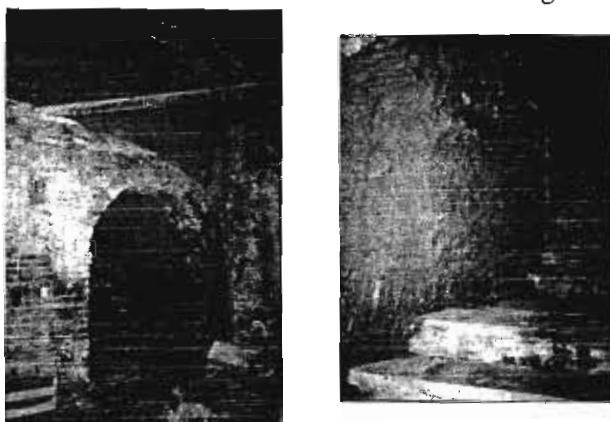


Figura 5: Interno del Monastero
 Figure 5: Inside Monastery

2. CHIESA E CANONICA DI VERGELLE.

La chiesa e la canonica di Vergelle, località situata nella valle del T.te Asso tra Montalcino e San Giovanni d'Asso, sono interessate da seri fenomeni di dissesto che ne pregiudicano la stabilità. L'indagine che è stata eseguita aveva la finalità di individuare le cause ed indirizzare la progettazione di interventi di recupero e consolidamento.

2.1 - GEOLOGIA

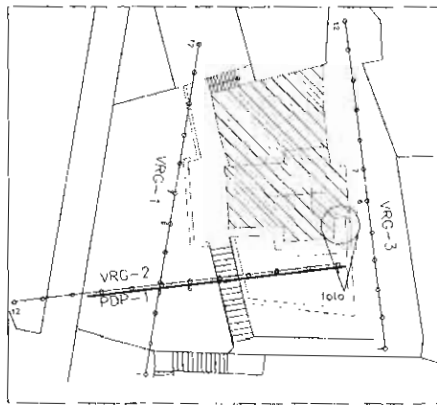
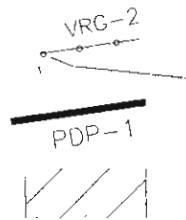


Figura 6: Pianta chiesa di Vergelle
Figure 6: Vergelle church map



- Traccia dei profili sismici a rifrazione e relativa sigla di identificazione
- Posizione e numerazione dei geofoni
- Profilo geoelettrico Polo-Dipolo
- Edifici in oggetto

L'area in esame appartiene al "Bacino pliocenico di Siena" ed in particolare è situata lungo il margine occidentale dello stesso; qui è presente il passaggio dagli affioramenti dei sedimenti marini di facies costiera costituiti dalle sabbie fini e ai sedimenti marini di facies distale delle argille grigio azzurre che affiorano a sud di Siena per oltre 80 km.

I terreni affioranti nell'area possono essere suddivisi e raggruppati in due complessi: uno superiore caratterizzato da depositi

continentali quaternari affioranti nei fondovalle dove scorrono i corsi d'acqua, ed uno inferiore costituito dai depositi marini del Pliocene appartenenti al Complesso Neoautoctono.

Nell'area dove sorge la chiesa (Figura 6) i terreni che costituiscono il sottosuolo, fatta eccezione per un limitato spessore di terreno superficiale di riporto, fanno parte dei depositi marini pliocenici ed in particolare sono riferibili alle formazioni Ps e Pa della Carta Geologica d'Italia al 100.000.

2.2 - METODOLOGIE UTILIZZATE

Anche in questo caso sono state utilizzate le metodologie della sismica a rifrazione e della geoelettrica mediante profili polo-dipolo.

La prima è stata utilizzata per la valutazione del grado di compattezza del sottosuolo, mentre la seconda doveva fornire indicazioni sulla profondità del passaggio alle argille sottostanti le sabbie addensate ed indicare la eventuale presenza di cavità o zone di riempimento nel sottosuolo

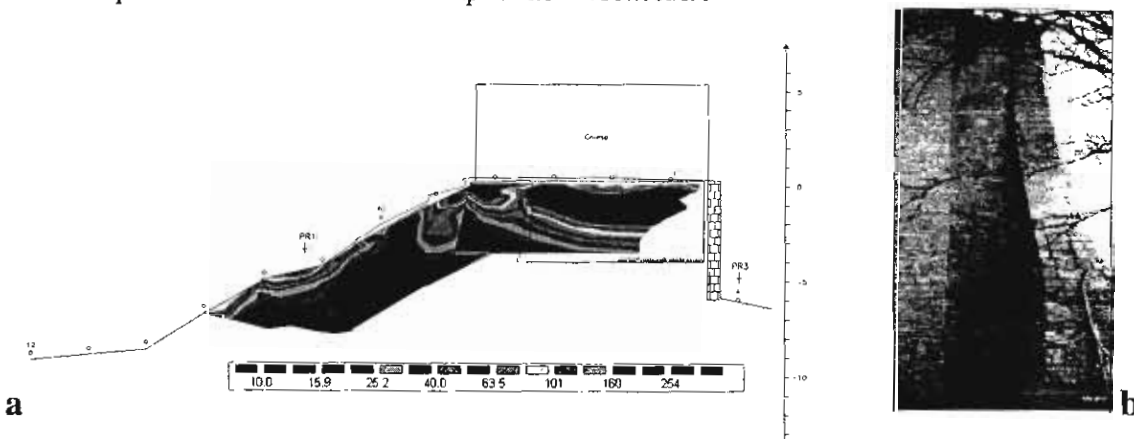


Figura 7: Modello geoelettrica per il Profilo Polo-Dipolo PDP_1, con scala cromatica delle variazioni di resistività (a); Foto delle lesioni alla chiesa (b)

Figure 7: Geoelectrical model of Pole-Dipole Profile PDP_1, with cromathic scale of variations resistivity (a); Picture of church fissures (b)

2.3 - PROSPEZIONI GEOFISICHE

L'indagine geoelettrica (Figura 7 a) è stata eseguita lungo un profilo di 26 m di lunghezza con dipoli di un metro ed $n=12$ (PDP-1) ed ha permesso di esplorare fino a circa 5 metri dal p.c. L'indagine sismica a rifrazione (Figura 8) è stata eseguita lungo 3 profili di 33 m ciascuno.

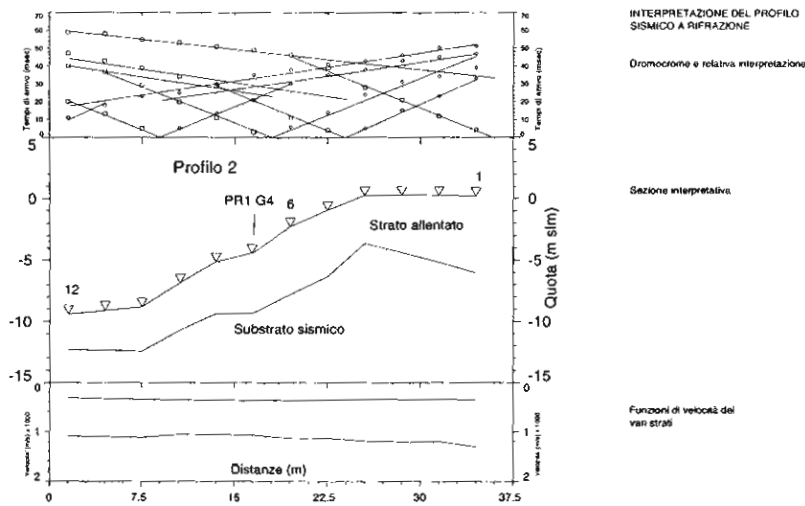


Figura 8: Profilo sismico a rifrazione e relativa interpretazione
 Figure 8: Seismic refraction profile and interpretation

Dal modello geoelettrico del sottosuolo sono emerse alcune anomalie resistive nella parte vicina alla base della chiesa mentre in profondità la resistività risulta generalmente bassa con valori tipici delle argille della zona.

I tre profili sismici hanno evidenziato una possibile distinzione di due strati: uno superficiale molto allentato ($V < 500-600$ m/s) ed uno più profondo con velocità sismica di circa 1200-1400 m/s, tipica dei terreni della serie pliocenica sabbioso-argillosa della zona.

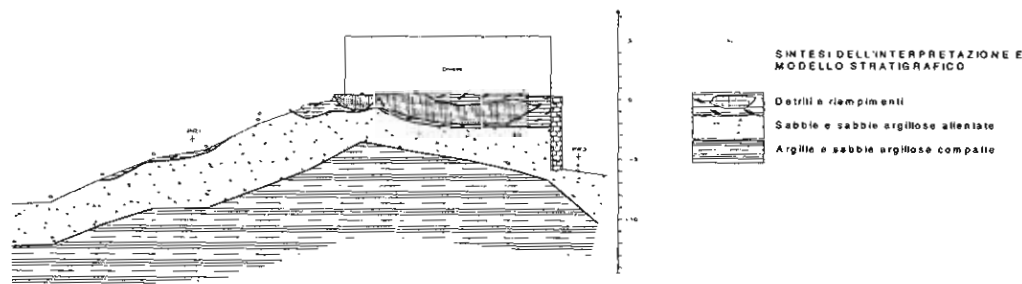


Figura 9: Interpretazione e modello stratigrafico del sottosuolo
 Figure 9: Underground stratigraphic model and interpretation

Le sezioni che qui riportate (Figura 9 e Figura 10) sono quelle sulle quali sono stati effettuati i due differenti rilievi e la possibile interpretazione lito-stratigrafica che è stata redatta evidenzia la possibilità che nella zona sottostante l'edificio della chiesa il materiale sia notevolmente allentato, (vedi caratteristiche geotecniche in Figura 11) probabilmente costituito dalle sabbie addensate che, come visibile nelle immediate vicinanze, presentano una fitta fratturazione in cui la circolazione di acqua infiltratasi nel terreno, asportando la parte più alterata, ha provocato i fenomeni di cedimento che hanno creato il dissesto della struttura.

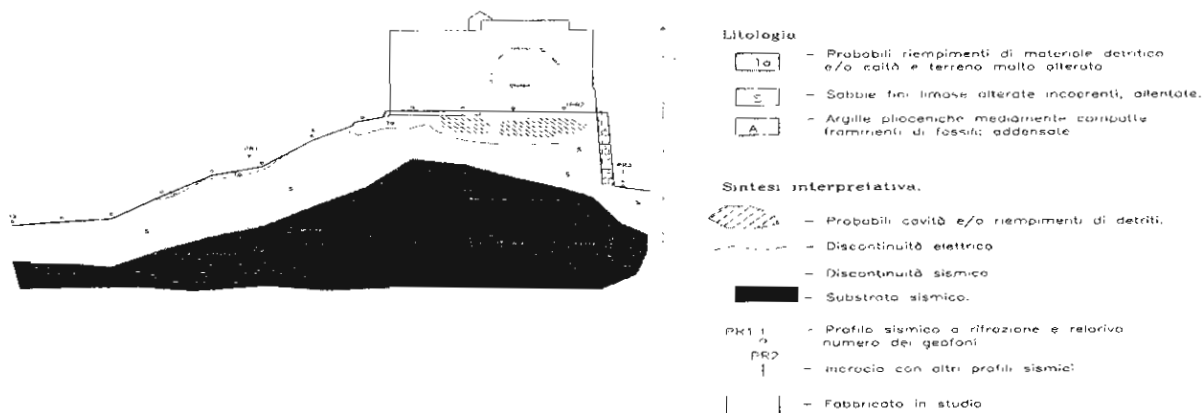


Figura 10: Sezione sismica interpretativa
Figure 10: Seismic section

Anche in questo caso, date le difficoltà di accesso per le normali macchine operatrici, si è data una valutazione indicativa dei parametri geotecnici dei terreni, come indicato nella tabella illustrata, facendo riferimento a situazioni analoghe in cui vi era stata la possibilità di eseguire, nelle stesse posizioni, sia i rilievi geofisici sia quelli geotecnici.

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

	γ gr/cm ³	Dr %	φ_p	φ_r	Cu kg/cm ²
Ta	1,6	-	-	-	-
S	1,7	27	31	27	-
A	1,9	-	-	-	0,35

Figura 11: Caratteristiche geotecniche del terreno
Figure 11: Geotechnical features

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV.(1997). "Geophysical survey in archeology field evaluation". Research & Professional Services Guideline No 1, English Heritage.
- CENSINI G. & COSTANTINI P.(1989). "Profilo Geoelettrico Dipolare continuo. Descrizione della metodologia ed esempi di applicazioni a problemi di ingegneria civile, ricerche idriche e minerarie". Atti del Congresso internazionale di Geingegneria "Suolo Sottosuolo", Torino, Settembre 1989, Vol.1°, pp. 201-208.
- COSTANTINI A., GANDIN A., GUASPARRI G., MAZZANTI R., LAZZAROTTO A. & SANDRELLI F.(1980). "Neotettonica dei fogli 120 Siena e 121 Montepulciano".
- HAGEDOORN J. G. (1959). "The plus - minus method of interpreting seismic refraction and reflection data". Geophysical Prospecting, Vol 3, pp. 325-338.
- LOKE M. H. (1999). "Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method". note del programma Res2dinv. ver. 3.41.
- LOKE M. H. & BARKER R.D. (1996). "Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method". Geophysical Prospecting, n. 44, pp. 131-152.
- PALMER D. (1980). GRM (Generalize Reciprocal Method).
- PATELLA D.& MONNA D. (1998). "3D Geoelectric tomography and archeological applications". Geophysical Prospecting - Vol. 46, n.5, September 1998 - pp. 543-570.