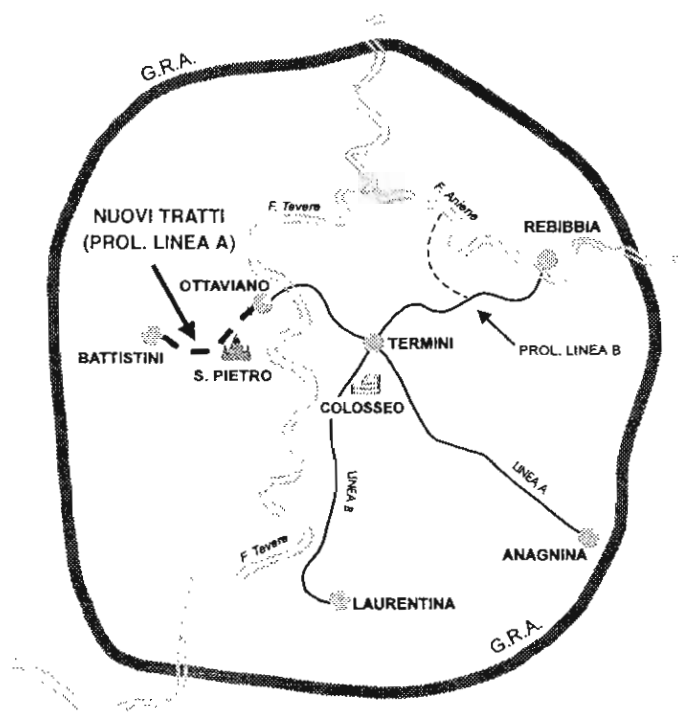


A.N.P.A.
 Agenzia Nazionale per la Protezione
 dell'Ambiente

C.N.R.
 Comitato per le Scienze
 Geologiche e Minerarie

PROGETTO STRATEGICO **GALLERIE**

PROBLEMATICHE GEOLOGICHE ED INGEGNERISTICHE PER LA REALIZZAZIONE DELLE GALLERIE DI LINEA E DI STAZIONE DEI NUOVI TRATTI DELLA METROPOLITANA DI ROMA **PROLUNGAMENTO LINEA A**



Roma 1996

OTTIMIZZAZIONE DI SOLUZIONI OPERATIVE NELLO SCAVO DI GALLERIE DI METROPOLITANE A PICCOLA PROFONDITÀ E PROFONDE ATTRAVERSO LA PREVISIONE GEOLOGICA ED IL CALCOLO: INDAGINI GEOFISICHE

Franco Beneo^{*}, Gianfranco Censini[■], Giuseppe Pino^{*}, Leonello Serva^{*}, Antonio Zechini[■]

^{*}Contrattista ANPA, [■]Libero Professionista, ^{*}ANPA.

Parole chiave: geofisica, metropolitana, area urbana

INTRODUZIONE

Nell'ambito del "PROGETTO STRATEGICO GALLERIE", è stata programmata ed eseguita una indagine geofisica sperimentale su alcuni tratti del prolungamento della linea A della metropolitana di Roma.

Lo scopo dell'indagine era di verificare l'applicabilità delle tecniche di prospezione geofisica *anche* in ambiente urbano, caratterizzato quindi dalla presenza di manufatti, sottoservizi, traffico di superficie e, nel caso in esame, anche dall'attività di cantieri aperti per la realizzazione del prolungamento della linea metropolitana A di Roma, fra le stazioni Ottaviano e Battistini. Come è noto, nella fase progettuale di fattibilità di gallerie, o di lavori in sotterraneo in genere, le tecniche di indagine geofisica, convenientemente programmate in funzione dei problemi da risolvere, possono integrare e completare le informazioni di tipo geologico e geognostico reperibili con la ricerca sui dati esistenti facilitando così la scelta del tracciato e riducendo all'essenziale il numero delle perforazioni geognostiche. Nella successiva fase di progetto esecutivo le indagini geofisiche possono identificare, a priori, quelle significative variazioni geolitologiche o strutturali nei livelli sotterranei che possono influire sulla realizzazione dell'opera; di conseguenza è possibile precisare i siti dove sarà necessario eseguire le perforazioni geognostiche ed i livelli dove prelevare i campioni da sottoporre ad analisi di laboratorio geotecnico.

A maggior chiarimento, si precisa che le tecniche di indagine geofisica non sostituiscono completamente le indagini geognostiche ma, se eseguite preventivamente, sono in grado di identificare le ubicazioni dove è indispensabile avere un controllo diretto di quella parte del tracciato, quindi limitando all'essenziale il numero delle perforazioni. Per quanto riguarda invece la relazione fra indagini geofisiche e prove di laboratorio geotecnico le prime, studiando il sottosuolo "per volumi", fanno conoscere al progettista ed al geotecnico fino a che *intorno* sono ragionevolmente estrapolabili i dati puntuali provenienti dall'analisi geotecnica dei campioni prelevati durante le perforazioni eseguite a scopo geognostico-geotecnico.

1) Inquadramento geologico

La serie stratigrafica interessata dal tracciato comprende una sequenza basale, di età Plio-pleistocenica, depostasi sia in ambiente marino (parte basale) che continentale (parte sommitale). In particolare la serie basale è costituita dalle argille marine Plioceniche (Pl di Fig. 1 e 5 di Fig. 2). Su di esse, in discordanza dovuta alla fase erosiva dell'Acqua Traversa Auct., poggiano le cosiddette argille di Monte Mario (Pleistocene inferiore - Si di Fig. 1 e 7,8,9,10 di Fig. 2). In tutto il Pleistocene inferiore si susseguono fasi erosive e sedimentarie che si concludono con la deposizione della formazione di Ponte Galeria Auct..

Da questo momento inizia la deposizione dei prodotti piroclastici dei centri vulcanici laziali (Ta di Fig. 1 e 6 di Fig. 2), di età compresa tra 0,7 e 0,3 m.a., cui si intercalano ancora sedimenti marini intravallivi (formazioni di San Cosimato ed Aurelia).

Gli spessori di tutte le formazioni postPlioceniche, come anche le facies, sono strettamente collegati agli

effetti della tettonica e/o vulcanotettonica ed, ancor più, alle glaciazioni succedutesi nel corso del Quaternario.

Segue poi una nuova fase regressiva, legata all'ultimo ciclo glaciale Wurm 3, che porta alla formazione di profonde incisioni da parte del paleo Tevere e dei suoi affluenti; esse sono legate ad un livello di base marino che, alla fine della glaciazione, era circa 100 metri al di sotto di quello attuale. Successivamente, il rapido innalzamento postglaciale del livello marino (si ritiene che 5000-6000 anni or sono esso fosse praticamente simile all'attuale) ha portato al colmamento di queste paleovalli da parte delle alluvioni dell'antico sistema idrografico (Al di Fig. 1 e 2, 2 bis, 3, 4, di Fig. 2).

Infine, i terreni di riporto, legati all'evoluzione urbanistica della città di Roma, costituiscono la parte sommitale della serie stratigrafica.

Tutti i terreni sopra citati sono stati incontrati nei vari tratti del percorso del prolungamento della linea A della metropolitana.

In Fig.1 è riportata la carta geologica schematica dell'area; in essa, per semplificare la grafica, non figurano i terreni di riporto, che invece appaiono sul profilo geologico della Fig.2.

Ai fini progettuali, la situazione su descritta può essere sintetizzata come segue:

la formazione di base, nei tratti esaminati, è rappresentata dalle argille ed altri sedimenti terrigeni Plio-Pleistocenici che, per motivi di facies deposizionale, presentano giaciture sub orizzontali ed una discreta omogeneità sia in senso areale che verticale, associate a buone caratteristiche meccaniche; il tetto di questa formazione è molto irregolare per effetto dei cicli erosivi legati all'ultimo glaciale. I sedimenti di colmata, Olocenici, si sono depositati in un periodo di tempo geologicamente molto limitato e, per motivi di facies, presentano giaciture lenticolari con conseguenti variazioni sia in senso areale che verticale. Ne derivano quindi scadenti qualità meccaniche definibili soltanto attraverso sondaggi meccanici o, come di seguito esposto, con adeguate prospezioni geofisiche.

E' importante sottolineare che il termalismo, ancora attuale, che ha accompagnato la deposizione di questi sedimenti può avere provocato la deposizione di corpi travertinosi allo sbocco delle sorgenti che drenavano le paleovalli. E' possibile quindi che lenti travertinose siano intercalate ai sedimenti olocenici ed a quelli piroclastici. Infine è anche possibile l'esistenza di lenti di torba, o di materiali analoghi, all'interno dei depositi olocenici. Dal punto di vista idrogeologico i terreni basali presentano una scarsissima permeabilità, mentre quelli olocenici hanno permeabilità molto variabili che lasciano supporre l'esistenza di modesti acquiferi su più livelli.

2) Attività svolta

2.1 Scelta dei siti per l'esecuzione delle indagini

L' avanzato stato dei lavori di costruzione (maggio 1996) del prolungamento della linea A della metropolitana di Roma, fra le stazioni Ottaviano e Battistini, ha limitato e condizionato le possibilità operative dell'indagine geofisica sperimentale.

I lavori di scavo a cielo aperto ed in sotterraneo con la continua presenza di mezzi d'opera che generano rumori di fondo, l'esistenza di tratti di galleria già scavati, le deviazioni del traffico di superficie convogliato in percorsi obbligati a causa dei lavori in corso, sono tutte circostanze che, in questo caso, hanno condizionato le possibilità di applicazione delle tecniche di indagine geofisica. Tuttavia è da tenere presente che non è stato necessario arrestare le attività di cantiere né ricorrere all'ausilio degli addetti al traffico per interrompere lo stesso durante le registrazioni sismiche: infatti utilizzando opportunamente le pause delle attività di cantiere, le ore di traffico meno intenso, le interruzioni momentanee del traffico dovute ai semafori, ed infine, operando sulla sensibilità dei geofoni, a seconda del rumore di fondo, si sono ottenuti risultati apprezzabili.

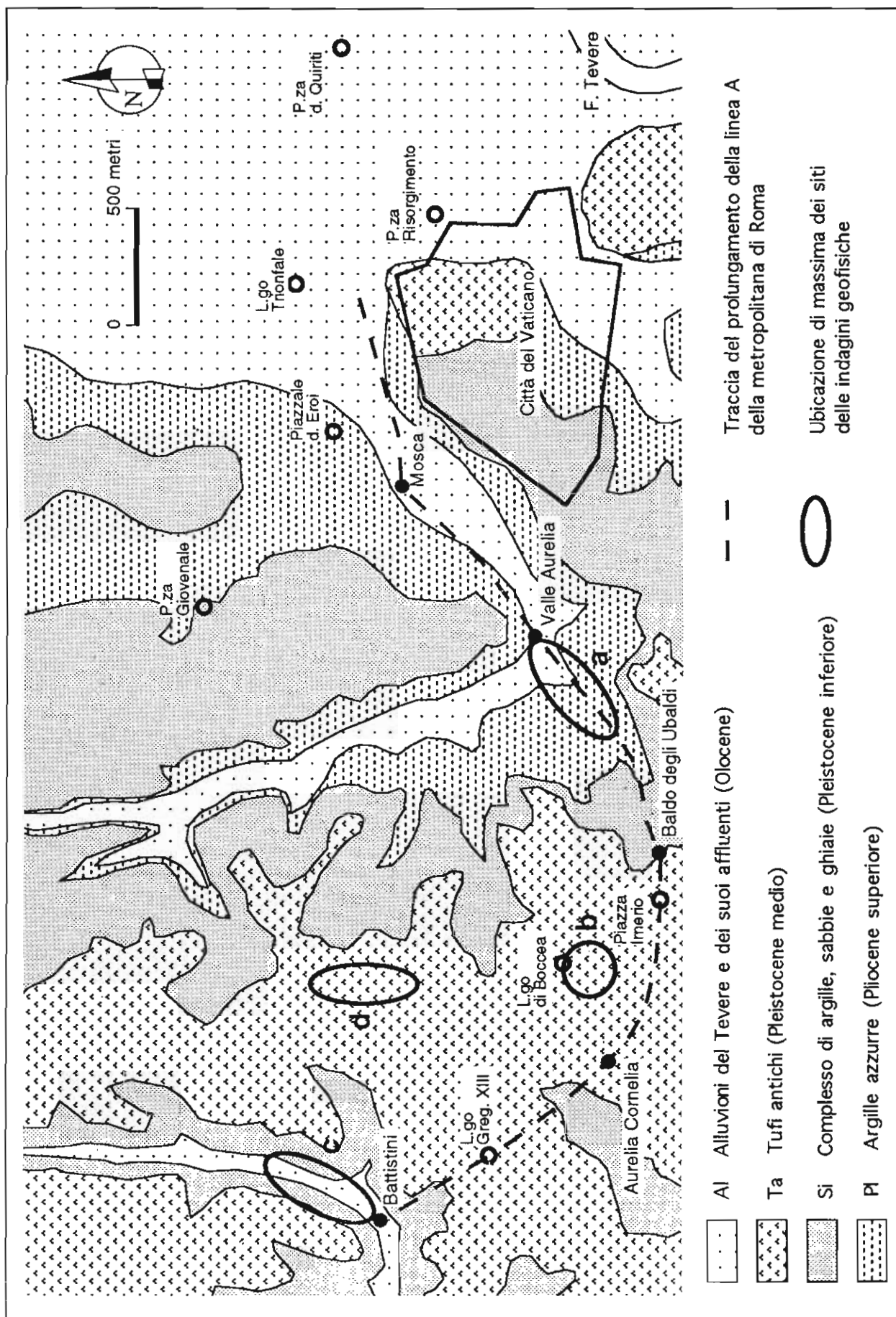


Figura 1 Inquadramento geologico dell'area interessata dal prolungamento della linea A della metropolitana di Roma (Ventriglia 1971)

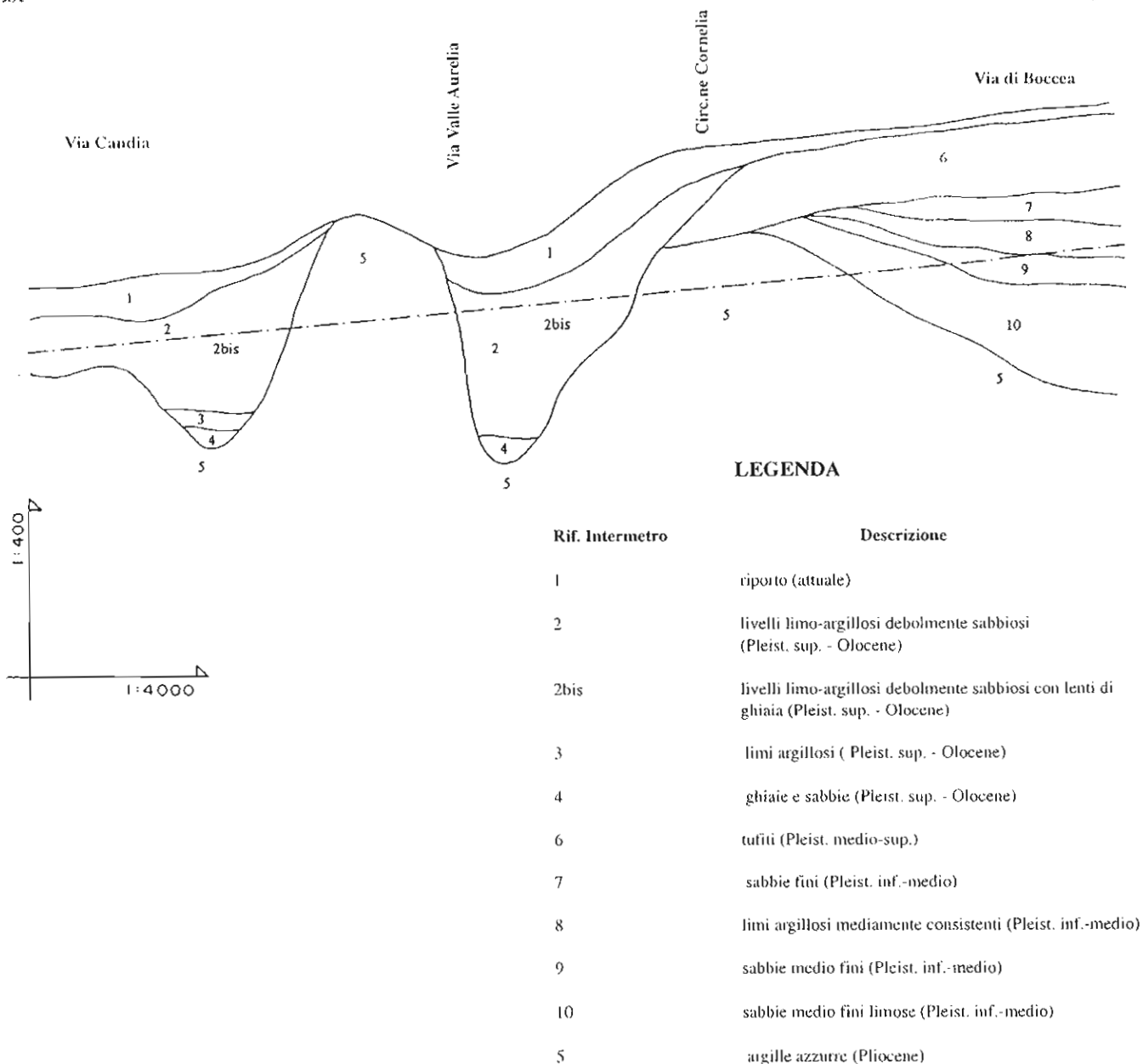


Figura 2 Profilo geologico in corrispondenza dello scavo. (indagine Intermetro 1988)

Si ritiene che in condizioni di operazioni progettuali "normali", cioè là dove le cause di disturbo sono limitate al traffico ed ai sottoservizi, le tecniche non distruttive di indagine del sottosuolo, sia pure utilizzate con qualche accorgimento -fra cui lavoro notturno, sorgenti di energizzazione sismica più potenti (es. caduta di peso), possibilità di inserire gli elettrodi in piccoli fori predisposti per attraversare il manto di asfalto ecc.-, potrebbero fornire elementi ancora più utili per l'inquadramento geologico-geotecnico dei livelli del sottosuolo interessati dai progetti di gallerie metropolitane; lo stesso concetto è ragionevolmente estrapolabile anche alle gallerie ferroviarie o stradali da realizzare in ambiente urbano.

Tenuto conto delle condizioni al contorno e, soprattutto, dello stato avanzato dei lavori in sotterraneo, sono stati scelti quei siti, ancora relativamente poco coinvolti dai lavori di costruzione della metropolitana A di Roma, dove, o per la profondità di investigazione richiesta (dell'ordine dei 30/50 m) o per la

situazione geologica prevedibile (substrato argilloso Plio-Pleistocenico profondo ed eroso durante le varie fasi di esposizione subaerea) i risultati forniti dalle tecniche di indagine geofisica potessero essere considerati sufficientemente indicativi per una loro futura utilizzazione nelle progettazioni di nuove linee metropolitane, ferroviarie o sottopassi stradali in ambiente urbano.

I siti prescelti sono stati (vedi Fig. 1):

a) Dalla stazione Valle Aurelia al pozzo di aereazione di via Moricca:

Questo tratto ha uno sviluppo di circa 330 m di linea metropolitana.

La situazione geologica, che all'epoca delle varie fasi della progettazione era stata messa in luce con l'esecuzione di almeno venti sondaggi geognostici, consiste, a partire dai vicini affioramenti delle argille Plioceniche, nella presenza di una paleovalle con substrato argilloso Pliocenico e ricoprimento di sedimenti alluvionali e nella successiva risalita in quota del substrato argilloso verso la stazione di via Baldo degli Ubaldi; il tutto ricoperto da una spessa coltre di terreni di riporto.

b) Stazione Aurelia Cornelia:

Questo tratto ha uno sviluppo di circa 180 m di linea metropolitana con annessa stazione.

La situazione geologica consiste in un primo strato di terreno di riporto, poco spesso, cui segue un orizzonte di tufi che ricoprono depositi continentali; i sottostanti terreni, di età pleistocenica, sono costituiti da una alternanza di argille e sabbie siltose con livelli ghiaiosi alla base. Il substrato, raggiunto solo da alcune perforazioni geognostiche, è costituito da argille siltose di deposito marino attribuite al Pliocene che sono state rinvenute anche ad oltre i 40 m di profondità.

c) Stazione Battistini:

Lo stato dei lavori e l'esistenza delle gallerie di manovra già costruite, ha di fatto limitato le possibilità operative ad un tratto della via Battistini perpendicolare alla direzione della linea metropolitana; il tratto esplorato ha uno sviluppo di circa 150 m.

La situazione geologica consiste in depositi alluvionali e palustri che ricoprono i terreni di deposito marino pleistocenico costituiti da alternanze di argille e sabbie siltose con livelli ghiaiosi alla base; il substrato raggiunto dalle perforazioni geognostiche è costituito da argille siltose di deposito marino attribuite al Pliocene superiore.

d) Pineta Sacchetti:

Questa zona è relativamente distante dal tracciato (poche centinaia di metri), tuttavia è stata scelta per avere una "taratura" in ambiente poco disturbato da cause antropiche. La situazione geologica è simile a quella esistente nella zona della stazione Aurelia Cornelia e cioè ricoprimento di tufi e depositi continentali su di una alternanza di terreni argillosi e sabbiosi Pleistocenici con substrato di argille di deposito marino attribuite al Pliocene superiore.

2.2 Metodi geofisici impiegati

- Sismica a rifrazione: mediante 5 basi sismiche costituite da 12 geofoni intervallati di 3, 5 o 10 metri; l'apparato di registrazione impiegato è costituito da un registratore sismico digitale OYO McSeis. L'energizzazione è stata fornita da una massa battente di 10 Kg; per ogni base sismica sono stati eseguiti almeno 7 tiri (=1 al centro del dispositivo, 2 interni, 2 alle estremità e 2 'lontani', distanti cioè almeno l'equivalente di una 1/2 base).
- Sondaggi Elettrici Verticali (SEV): mediante 5 SEV con lunghezza dello stendimento della linea AB di invio di corrente da 100 fino a 400 m; tali dimensioni sono state imposte dalle varie situazioni ambientali.
- Profili Dipolo-Dipolo (DP): con 5 profili DP eseguiti con AB variabile da 10 a 20 m ed n da n 4 a n 6. L'apparato di registrazione utilizzato è il georesistivimetro digitale SYSCAL R2 (costruito da BRGM) che è stato utilizzato anche per l'esecuzione dei SEV.
- Profili Elettromagnetici (EM): mediante la tecnica che consente di operare con la distanza fra trasmettitore e ricevitore, per ogni punto di stazione, di 10-20-40 m, per ottenere quindi profondità di investigazione dell'ordine dei 30 m. L'apparecchiatura utilizzata è il GEONICS EM 34 di fabbricazione canadese.

3) Cenni sui principi dei metodi geofisici impiegati

Le prospezioni geofisiche eseguite sono state progettate per fornire la maggiore quantità possibile di informazioni, sia di tipo litologico e di assetto strutturale, sia di tipo geotecnico per quanto concerne la differenziazione dello stato di coesione nell'ambito di uno stesso tipo litologico.

La presenza di litotipi sabbiosi ed argillosi, in orizzonti più o meno potenti con frequenti alternanze ed intercalazioni, ha richiesto un approccio geofisico di tipo integrato, quindi non focalizzato alla determinazione di una sola proprietà fisica delle rocce presenti, ma capace di fornire dati dal cui confronto reciproco fosse possibile ottenere una ricostruzione più dettagliata ed attendibile della situazione geologica del sottosuolo.

Questo approccio integrato si basa sull'esecuzione combinata di prospezioni geoelettriche, volte al riconoscimento delle litologie presenti sfruttando le differenti resistività dei terreni sabbiosi rispetto a quelli argillosi, e sismiche volte al riconoscimento del grado di "compattezza" delle rocce mediante la misura delle velocità di propagazione delle onde sismiche.

In tal modo si ottiene una ricostruzione geologico-strutturale di un'area basata essenzialmente su correlazioni elettrostratigrafiche, ed una valutazione della distribuzione delle zone allentate o più compatte all'interno delle medesime litologie mediante l'andamento degli orizzonti sismici.

Di seguito vengono fornite alcune informazioni di base sui metodi di prospezione geofisica impiegati nel corso della presente indagine.

3.1 Sismica a rifrazione:

Questa tecnica consiste nel rilevare lungo stendimenti di geofoni i tempi di arrivo delle onde sismiche generate da diversi punti di energizzazione del terreno (=punti di tiro).

La successiva interpretazione dei diagrammi dei tempi di 1° arrivo, in funzione della distanza dal punto di tiro (=dromocrone) consente di ottenere una stratigrafia del sottosuolo costituita da strati con velocità crescenti con la profondità.

La velocità misurata è relativa alle onde di compressione P, ed essa dipende dal grado di compattezza dei litotipi. Rocce incoerenti sono caratterizzate da bassi valori di velocità, compresi tra 500 e 1500/1700 m/s. Rocce a maggiore coesione sono caratterizzate da velocità comprese tra 2000 (ad esempio argille) ed oltre i 3500 m/s (ad esempio calcari, graniti ecc.). Questa proprietà fisica può dipendere anche dalla lito-

logia ma, a volte, può essere difficile, se non impossibile, distinguere tra due litotipi diversi (ad esempio sabbie ed argille) quando essi siano compatti e diagenizzati.

3.2 Sondaggi Elettrici Verticali (SEV):

Si tratta di una tecnica molto diffusa che sfrutta l'immissione diretta di corrente nel terreno per la misura della resistività mediante un resistivimetro. Con il dispositivo adottato, Schlumberger, si eseguono misure di resistività in uno stesso punto posto al centro dello stendimento di invio di corrente. Le misure si eseguono aumentando progressivamente in modo simmetrico la lunghezza della linea di corrente e la distanza tra gli elettrodi di misura della differenza di potenziale. I valori di resistività misurati vengono trasferiti su diagrammi, in carta bilogaritmica, in funzione della semilunghezza del dispositivo.

L'interpretazione delle curve, mediante abachi precalcolati e programmi di ottimizzazione automatica, permette di ottenere una elettrostratigrafia del sottosuolo nel punto di stazione, con strati di cui viene calcolato lo spessore e la resistività.

Il valore di resistività ottenuto ha una diretta relazione con la composizione del terreno e la eventuale presenza di fluidi nei pori od interstizi: ad esempio i livelli sabbiosi sono porosi ed hanno valori di resistività più elevati di quelli argillosi che sono caratterizzati da una alta percentuale di elementi fini e che sono molto poco permeabili.

3.3 Profili Elettrici Dipolari (DP):

I profili Dipolari utilizzano gli stessi principi che sono alla base del metodo dei SEV; essi sono caratterizzati da una serie di misure di resistività riferite ad un dispositivo costituito da una linea AB fissa ed una serie (n) di linee MN, delle stesse dimensioni di AB, che vengono spostate su un allineamento per n volte, ottenendo così fino ad n valori di resistività apparente disposti in sezione a profondità crescenti.

I risultati vengono espressi con "pseudosezioni di resistività" che, pur essendo un documento qualitativo, consentono di visualizzare, per ogni profilo DP, le successioni dei vari livelli geoelettrici presenti nel sottosuolo.

Con un programma di calcolo è possibile ricostruire i "diagrammi equivalenti Schlumberger" di SEV, a partire dai valori di resistività ottenuti con il DP; tali diagrammi possono essere interpretati in modo quantitativo seguendo le stesse procedure dei SEV per ottenere così una serie di dati di resistività e spessore che consentono di costruire una sezione profondità.

Va tuttavia chiarito che l'interpretazione quantitativa dei profili DP, con il procedimento su esposto, non è esattamente paragonabile a quella ottenibile con i SEV sperimentali: infatti le disomogeneità della superficie topografica e/o l'inclinazione degli strati possono indurre delle distorsioni nelle resistività apparenti sulla pseudosezione che si riflettono poi sui "diagrammi equivalenti Schlumberger" ottenuti con il programma di calcolo.

Nel caso di profili DP della lunghezza limitata ad un centinaio di metri, la sezione quantitativa risultante dal trattamento dei dati sperimentali, è limitata al 35/40 % della lunghezza totale del profilo DP; invece nel caso di profili DP che si svolgono su lunghezze maggiori (es. alcune centinaia di metri) la sezione quantitativa utile è molto maggiore, fino al 85/90 % della lunghezza totale, potendo sfruttare un numero maggiore di dati.

3.4 Profili Elettromagnetici

E' una tecnica di misura della conducibilità, intesa come valore medio di uno strato superficiale, basata sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica.

Con un trasmettitore a bassa frequenza viene creato un campo EM; questo campo viene distorto a secon-

da delle caratteristiche elettriche del sottosuolo. Un ricevitore, confrontando il segnale trasmesso con quello ricevuto, permette di misurare le distorsioni che vengono automaticamente espresse in termini di conducibilità del sottosuolo.

Variando il dispositivo, e cioè la distanza tra trasmettitore e ricevitore, cambia la profondità di indagine.

Possono essere utilizzate apparecchiature che consentono di utilizzare dispositivi di 10, 20, 40 m che consentono di registrare valori di conducibilità su spessori di terreno crescenti da circa 8 a circa 30 m.

Con questo metodo si possono ottenere mappe di resistività relative a differenti porzioni di sottosuolo e anche pseudosezioni di resistività.

4) Risultati dell'interpretazione geofisica

4.1 Metodo sismico a rifrazione

I risultati ottenuti dalla lettura dei primi arrivi delle onde sismiche, indotte dall'energizzazione del terreno, ai geofoni (onde P) e dal successivo trattamento dei dati, anche con adeguati programmi di calcolo, ha consentito di ricavare la seguente successione dei livelli sismici differenziati da velocità crescenti con la profondità:

- da 300 a 600 m/s: strato superficiale corrispondente alla parte più aerata dei terreni di riporto, dei tufi vulcanici e delle alluvioni; gli spessori di questo livello sismico sono molto variabili, da circa 1 m fino ad oltre 10 m.
- da 400 a 800 m/s: livello sismico molto decompresso, rinvenuto soltanto sul retro di via Battistini (distributore ERG), che dovrebbe corrispondere a depositi fluvio palustri di un affluente di sinistra della paleovalle che si sviluppava lungo l'attuale via M.Battistini; gli spessori massimi attribuiti a questo livello sono di circa 10 m.
- da 800 a 1100 m/s: è un livello sismico la cui attribuzione litologica è molto varia: infatti esso corrisponde ai livelli sub-superficiali delle alluvioni, ed ai tufi terrosi o pozzolanici poco addensati; gli spessori più elevati, dell'ordine dei 15 m, sono stati riscontrati a Valle Aurelia, nei pressi della vecchia fornace, e ad Aurelia Cornelia.
- da 1500 a 2200 m/s: è un livello relativamente profondo (oltre i 10 e fino a 15 m), rinvenuto soltanto sulla via Battistini, che si ritiene sia qui attribuibile alle sabbie addensate con ghiaie alla base.
- da 2000 a 2400 m/s: è il "substrato geofisico" raggiunto con l'attuale ricerca:

l'attribuzione litologica di questo orizzonte veloce deve tenere conto del contesto geologico fornito dalla geologia di superficie:

- nella zona fra Valle Aurelia e Baldo degli Ubaldi il substrato sismico è attribuibile, senza alcun dubbio, alle argille Plioceniche; l'incremento di velocità riscontrato da Valle Aurelia (2000/2100 m/s) a via Baldo degli Ubaldi (2200/2400 m/s) dovrebbe corrispondere a caratteristiche geotecniche leggermente diverse, per quanto riguarda la parte più superficiale delle argille: un pò più decomprese nella zona di valle Aurelia, perché già esposte all'azione degli agenti meteorici ed incise dall'erosione, nonché sottostanti ad una sia pure modesta falda alluvionale; più compattate da via Baldo degli Ubaldi a via Moricca perché, non sottoposte al contatto con la falda alluvionale, esse hanno potuto mantenere non alterate le proprie caratteristiche fisiche.
- nelle zone di Aurelia Cornelia e di Via M.Battistini invece, il substrato sismico sembra corrispondere al tetto dei terreni di deposito marino molto ben compattato (argille siltose con intercalati livelli sabbiosi); invece il substrato geologico, costituito dalle argille Plio-Pleistoceniche, si trova a profondità maggiori e, se le velocità attribuibili a queste si dovesse mantenere costante, circa 2200 m/s, esso non può essere differenziato dai sovrastanti livelli argillosi e sabbiosi con la sola sismica a rifrazione.

4.2 Metodi di Resistività

4.2.1 Sondaggi Elettrici Verticali

L'interpretazione dei diagrammi dei SEV è stata eseguita utilizzando abachi precalcolati in cui sono stati adottati valori di resistività e spessori dei vari livelli geoelettrici compatibili con il contesto geologico locale. Questa interpretazione, "manuale", è stata successivamente confrontata ed affinata con adeguati programmi di ottimizzazione automatica.

La successione dei livelli geoelettrici è caratterizzata dai seguenti valori di resistività:

- da 45 a 75 ohmxm: terreno di riporto
- da 17 a 21 ohmxm: alluvioni di fondovalle e parte inferiore, presumibilmente imbibita, dei terreni di riporto
- da 13 a 18 ohmxm: tufi vulcanici e sabbie continentali, ambedue probabilmente imbibiti nei livelli più profondi
- da 12 a 40 ohmxm: complesso di terreni di deposito marino costituiti da alternanze di livelli sabbiosi ed argillosi con alla base un livello di sabbie con ghiaia.
- da 7 a 10 ohmxm: substrato conduttore attribuibile al tetto delle argille Plio-Pleistoceniche che costituiscono l'orizzonte geologico di base dell'area, da Roma città alla costa.

Il complesso dell'alternanza di livelli sabbiosi ed argillosi di deposito marino, il più direttamente interessato dai lavori in sotterraneo, è stato ben differenziato soprattutto nella zona di Aurelia Cornelia dove (v. SEV 2), ad un primo livello costituito dall'alternanza di argille e sabbie è stata attribuita una resistività di 12 ohmxm ed uno spessore di circa 16 m, mentre alle sottostanti sabbie con ghiaia, presumibilmente imbibite, è stata attribuita una resistività di 20/21 ohmxm ed uno spessore di circa 12 m.

Si deve segnalare che nel tratto di linea che va da Valle Aurelia a Baldo degli Ubaldi, il complesso delle argille e sabbie sovrastanti le argille Plio-Pleistoceniche sembra assente (v. SEV 1 e 4) e le argille sono direttamente sottostanti alle alluvioni.

L'interpretazione dei diagrammi di SEV, sempre tenendo presente il contesto geologico e strutturale dell'area, consente di prevedere, con una buona precisione, anche quei tratti dove sono prevedibili i livelli più permeabili, probabili sedi di falde sotterranee: ciò attraverso la definizione del parametro geoelettrico denominato "Resistenza Trasversale" (RT).

La RT è data dal prodotto della resistività (ρ) di uno strato con il suo spessore (h).

Ad esempio calcolando la RT della sola formazione sabbiosa ed argillosa (sommatoria dei valori di RT dei singoli livelli geoelettrici) e quindi escludendo dal calcolo i valori di RT competenti ai tufi ed alle sabbie continentali, se ne potrebbe dedurre che nella zona di Aurelia Cornelia gli orizzonti più permeabili, pur consistenti, siano sede di falde relativamente meno importanti di quelle contenute negli analoghi livelli presenti nella zona di via Battistini.

4.2.2 Profili Dipolari

I risultati qualitativi, ottenuti dall'analisi dei valori di resistività apparente sulle 'pseudosezioni di resistività', possono essere così sintetizzati:

- nell'area di Stazione Valle Aurelia-via Moricca (v. Fig. 3a e 3b) sono molto bene identificate le argille Plioceniche costituenti i fianchi della valle poi ricoperta dai terreni di riporto.

Per quanto riguarda la copertura sia la presenza di una vecchia platea in cemento (zona fornace) sia l'estrema varietà dei materiali costituenti il riporto non rende agevole una sicura determinazione dei principali costituenti il riporto. Si può avanzare l'ipotesi che il riporto nella zona della Stazione Valle Aurelia, avendo basse resistività, sia prevalentemente argilloso in quanto costituito dagli scarti della vecchia fornace, mentre verso la via Moricca, il riporto sembra costituito da materiali elettricamente più resistenti

attribuibili a riporti tufacei ed a laterizi.

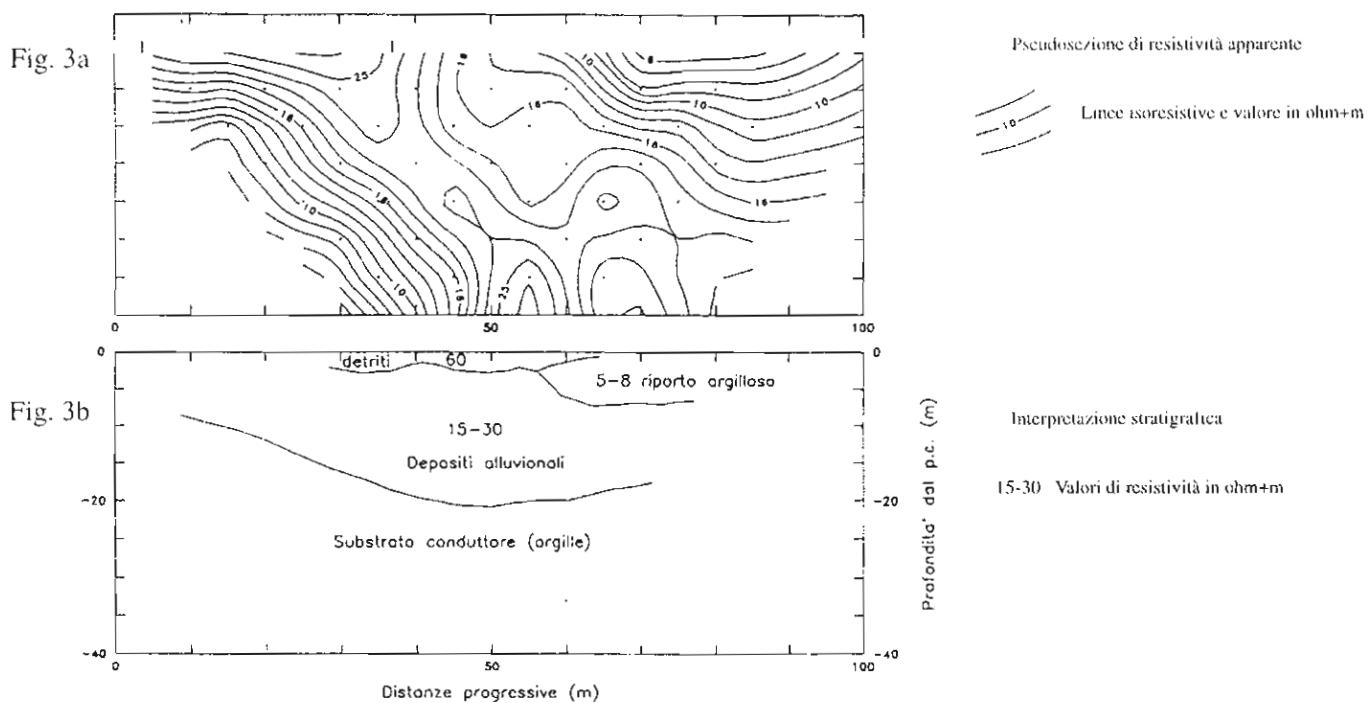


Figura 3a / 3b Valle Aurelia, Profilo DPI

Con resistività intermedie tra quelle delle argille Plioceniche e del riporto, sui profili DP è possibile distinguere le resistività apparenti attribuibili alle alluvioni.

- nell'area della stazione Aurelia Cornelia, sono stati eseguiti 2 profili DP (DP 2 e 3).

Il primo ha un AB di 10 m ed n 6: la prima parte del profilo (da 0 ad 80 m) risente in maniera evidente di disturbi causati da sottoservizi e dispersioni da messe a terra; la restante parte, verso via Boccea, mostra resistività attribuibili ad un significativo ispessimento del complesso di tufi e sabbie continentali che sovrastano il complesso argillo sabbioso di deposito marino; con questo dispositivo non è stato raggiunto il substrato argilloso Plio-Pleistocenico.

L'altro profilo DP ha un AB di 20 m ed n 5: con l'aumento delle dimensioni del dispositivo è aumentata anche la profondità di investigazione.

Nella pseudosezione di resistività della Fig. 4a è bene evidenziata la presenza di un livello di base conduttore, analogo a quello di Valle Aurelia, attribuibile alle argille Plio-Pleistoceniche.

In questa area i sondaggi geognostici eseguiti nel passato hanno indicato argille siltose Pleistoceniche.

Inoltre il profilo DP conferma l'ispessimento dei depositi piroclastici nella zona centrale del profilo; l'andamento delle linee di isoresistività lascia supporre l'esistenza di una possibile incisione valliva successivamente riempita dalle sabbie continentali e dai tufi.

I risultati quantitativi ottenuti dal trattamento numerico dei dati sperimentali (trasposizione della serie di valori di resistività apparente sulla verticale del profilo su diagrammi equivalenti Schlumberger di SEV) hanno dato le seguenti informazioni:

- nell'Area della Stazione Valle Aurelia a via Moricca la sezione stratigrafica ottenuta conferma e precisa l'andamento strutturale del tetto delle argille Plioceniche; in particolare viene messa in evidenza la loro risalita verso gli affioramenti subsuperficiali.
- nella zona della Stazione Aurelia Cornelia con il DP che ha il dispositivo AB 20m è stato evidenziato

il contatto fra i terreni vulcanici e continentali con quelli della sottostante serie marina Pleistocenica costituita da alternanze di livelli argillosi limosi con livelli sabbioso limosi. Risulta pure molto evidente nei suoi aspetti qualitativi (espressi dal parametro resistività) e quantitativi (spessore) l'orizzonte marino costituito da sabbie e ghiaie che si trova al tetto della formazione argillosa Plio-Pleistocenica che ha costituito il substrato della ricerca.

Per quanto riguarda l'ispessimento dei depositi piroclastici nella zona centrale del Profilo Dipolare, esso viene confermato dalla sezione stratigrafica della fig. 4b, ottenuta con il trattamento dei dati di resistività apparente della pseudosezione: si ha l'impressione di una possibile incisione valliva che avrebbe interessato in epoca Pleistocenica le argille e sabbie per essere poi riempita da sabbie (alluvionali?) e tufi. In effetti, più a valle, a Sud Ovest della Circonvallazione Cornelia e della via di Boccea, le attuali quote della superficie topografica mostrano un leggero avvallamento, confermato dall'andamento delle curve di livello che evidenzia una incisione dei terreni Pleistocenici all'altezza del Viale di Valle Aurelia: si potrebbe trattare quindi di un affluente di destra della Valle dell'Inferno di cui forse era ignota l'esistenza nella zona di via Boccea e della Circonvallazione Cornelia.

Fig. 4a

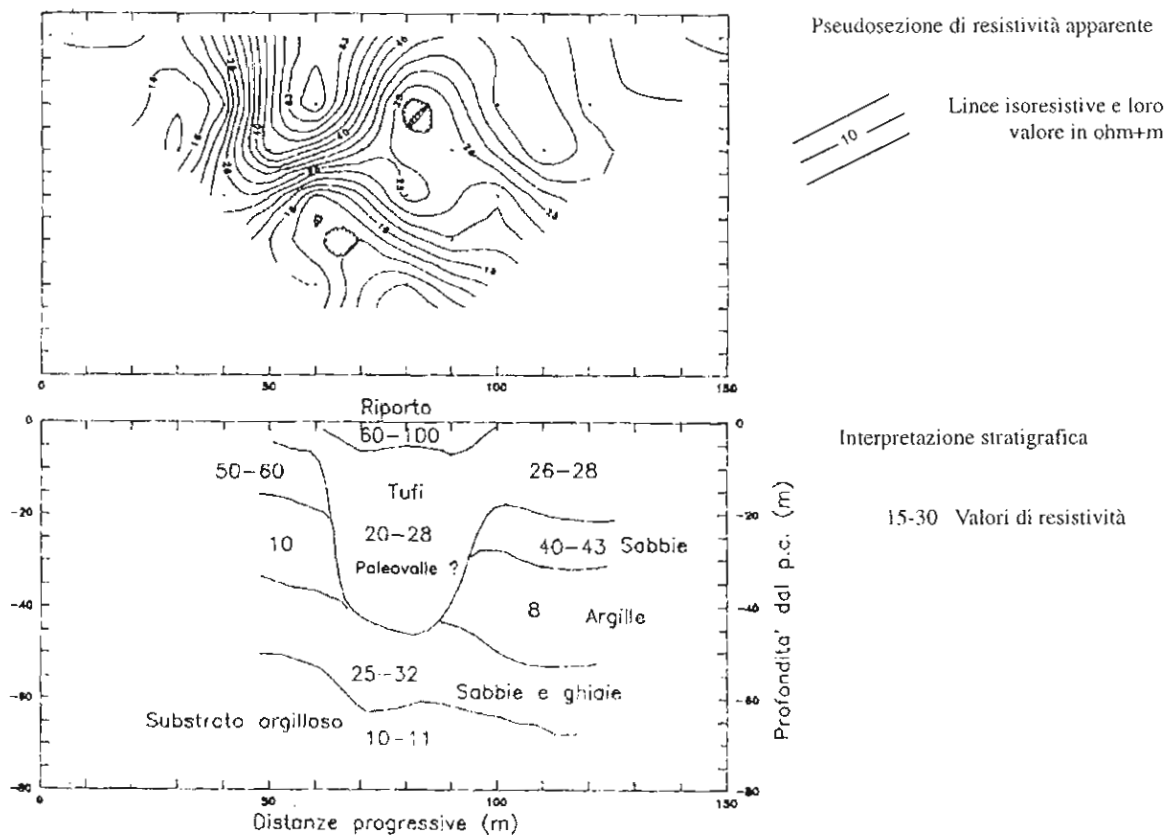


Figura 4a / 4b Aurelia Cornelia Profilo DP3

4.2.3 Profili Elettromagnetici

L'interpretazione dei profili EM ha mostrato che, fra i metodi impiegati, quello EM si è rivelato il più sensibile ai disturbi causati dalle linee elettriche, telefoniche ed anche dalle cataste di materiali ferrosi (reti elettrosaldate ecc.) accumulati per le attività di cantiere.

I Profili EM, eseguiti sugli stessi allineamenti dei Profili DP, sono apparsi disturbati in maniera tale da non mostrare variazioni significative delle conducibilità con le profondità.

Si ritiene tuttavia che in particolari situazioni (assenza di cataste di reti elettrosaldate e/o linee elettriche a meno di una decina di metri dal profilo), il metodo EM, di *rapida esecuzione e basso costo*, possa fornire dati interessanti sulla distribuzione della conducibilità nel sottosuolo soprattutto per quanto riguarda l'individuazione di livelli conduttori (argille) intercalati a livelli più resistenti (sabbie e ghiaie).

5) Sintesi dei risultati dell'indagine geofisica e confronto con i sondaggi geognostici eseguiti nella fase progettuale.

5.1 Stazione Valle Aurelia - via Moricca (pari a circa 330 m di tracciato)

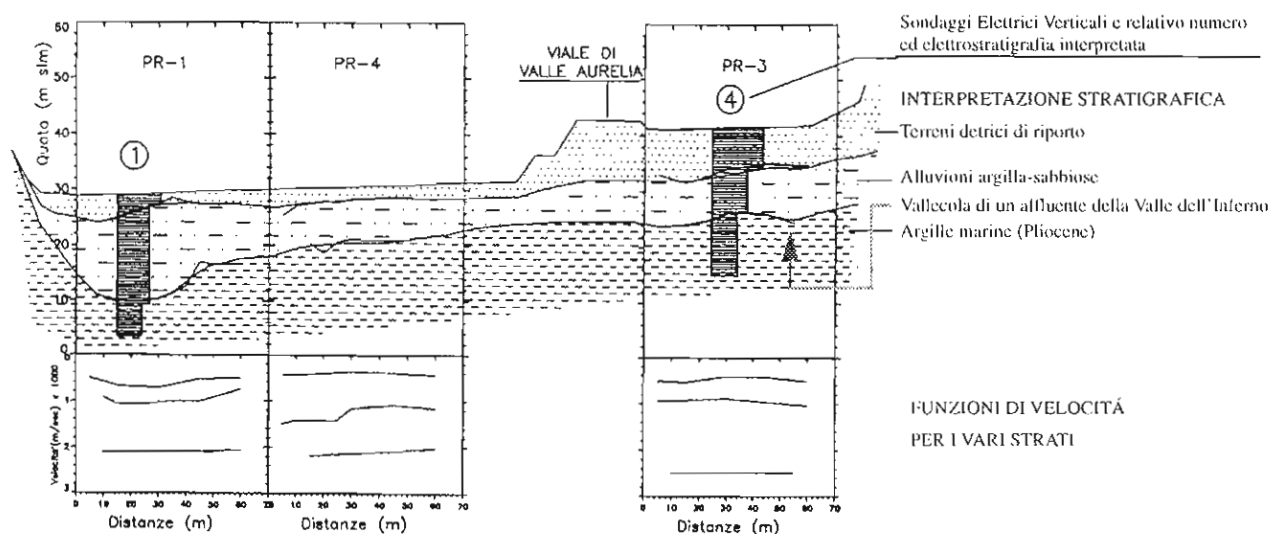


Figura 5 Valle Aurelia, Sezione Interpretativa

La Sezione interpretativa della Fig. 5, è stata ottenuta con l'interpretazione di profili sismici PR 1, PR4, PR 3 e con i SEV e profili DP.

Nella Sezione è messo in evidenza l'andamento del substrato argilloso Pliocenico che, dagli affioramenti della collina che fiancheggia ad Est la via di Valle Aurelia, si immerge verso Ovest, a causa dell'erosione operata dal Fosso della Valle dell'Inferno (affluente di destra del Tevere). La profondità massima delle argille Plioceniche rispetto alla superficie topografica è di circa 20 m; tale profondità è stata registrata sul profilo PR 1 ed al SEV 1 in corrispondenza dell'incisione valliva e corrisponde ad una quota assoluta di +10 mslm.

Proseguendo verso la Via Moricca, il profilo sismico PR4 mostra che il substrato argilloso, dopo il fondo-valle, risale gradualmente verso Ovest, mantenendosi fra i 12 ed i 9 metri dalla superficie topografica situata a 31/32 mslm.

Nel tratto terminale della Sezione, fra il Viale di Valle Aurelia e la Via Moricca, il profilo sismico PR 3 ha rinvenuto il substrato argilloso, al di sotto di un rilevante spessore di terreni di riporto, tra i 18 ed i 15 metri di profondità che, in quote assolute corrispondono a +24 e +28 mslm. Il SEV 4 ha rinvenuto il substrato conduttore a circa 15 metri di profondità (+24 mslm) in accordo con quanto mostrato dalla sismica a rifrazione.

Infine per quanto riguarda l'interpretazione quantitativa dei profili Dipolari (vedi Fig. 3b) essa ha mostrato i tratti essenziali della struttura della paleovalle, evidenziata anche con la sismica rifrazione.

I risultati dell'interpretazione geofisica sono stati confrontati con le stratigrafie dei sondaggi geognostici eseguiti nella fase progettuale della linea metropolitana: pur essendo stati eseguiti su allineamenti diversi, esaminando le profondità del substrato e considerando le quote assolute, ne risulta che i risultati geofisici sono perfettamente correlabili con quelli geognostici.

Ci si riferisce in particolare ai sondaggi geognostici SP4, SP4bis, SP6, G3 che sono stati eseguiti negli anni '80 nella zona della costruenda stazione Valle Aurelia della metropolitana A e lungo la via Baldo degli Ubaldi, su di un allineamento distante meno di un centinaio di metri da quello della prospezione geofisica:

- SP4 profondo 40,5 m ha rinvenuto le argille Plioceniche a 7,5 m di profondità che corrispondono a +9 mslm
- SP4bis profondo 31,5 m ha rinvenuto a fondo foro sedimenti alluvionali ghiaiosi e sabbiosi; la correlazione con i sondaggi posti sull'allineamento, in sede di progetto, ha fatto ritenere il substrato poco più profondo, a circa +9 mslm
- SP6 profondo 49 m ha rinvenuto a fondo foro sabbia medio-fine, mediamente addensata, di deposito alluvionale; in sede di progetto la correlazione con i sondaggi posti sull'allineamento ha fatto ritenere le argille Plioceniche a circa +19 mslm
- G3, situato sul lato opposto della vecchia fornace rispetto a PR 1 e SEV 1, ha rinvenuto il substrato argilloso a 23 m di profondità che corrispondono a +11 mslm.

Si ricorda che la quota attribuita al substrato geosismico e geoelettrico in corrispondenza della vecchia fornace, situata circa 75 m a monte dell'allineamento dei sondaggi geognostici, è di +10 mslm.

Quindi, in questo caso, la prospezione geofisica consente di avere un quadro areale più completo e continuo di quello risultante dalla correlazione dei soli sondaggi geognostici.

5.2 Stazione Aurelia Cornelia (pari a 180 m di tracciato)

La Sezione interpretativa della Fig. 6 è stata ottenuta con i risultati del profilo sismico PR 2 e del SEV 2. Nella sezione risulta molto evidente che il substrato sismico è molto più prossimo alla superficie di quello elettrico: è evidente che dal punto di vista litologico sono stati identificati orizzonti completamente diversi.

Infatti i sondaggi geognostici P 12A e P 12B, eseguiti in sede di progetto esecutivo e situati ad un centinaio di metri più a valle rispetto ai profili geofisici ed a quota inferiore di 2/3 m, mostrano che il substrato sismico, calcolato tra i 12 ed i 16 m di profondità, corrisponde al passaggio dai depositi piroclastici e terreni argillo sabbiosi continentali ai terreni Pleistocenici di deposito marino costituiti da sabbie addensate ed argille consistenti.

Il substrato conduttore, interpretato al SEV 2, è invece situato a 51 m di profondità ed i sondaggi geognostici su menzionati hanno incontrato un orizzonte argilloso, quantomeno comparabile al substrato geoelettrico, ad una profondità di 44-45 m dal piano campagna. In quote assolute il substrato geoelettrico si trova a +37,5 mentre il presumibile corrispondente orizzonte litologico (=argilla verdastra consistente), rinvenuto con le perforazioni, si trova a +41 mslm; considerando la distanza (75-100 m) tra i siti delle perforazioni e quello della prospezione geofisica nonché la situazione ambientale in cui si è dovuta limitare la

prospezione geofisica, i risultati ottenuti con la geoelettrica sono da considerare molto soddisfacenti.

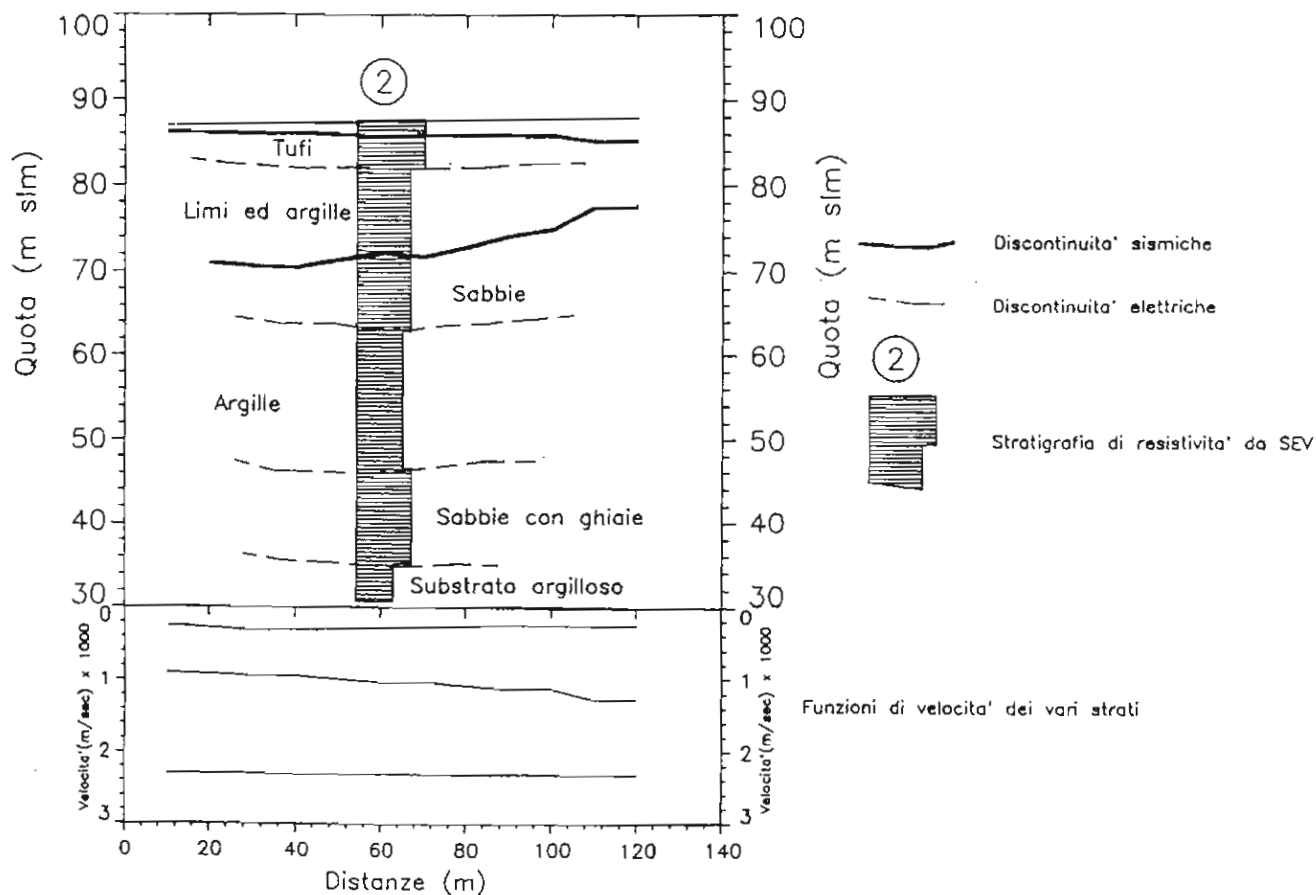


Figura 6 Aurelia Cornelia, Sezione interpretativa

Inoltre la geoelettrica ha individuato un orizzonte elettricamente resistente spesso oltre i 10 m al di sopra del substrato conduttore mentre i sondaggi geognostici hanno individuato, sopra le argille di fondo foro, un orizzonte di sabbia e sabbia con ghiaia abbastanza addensate ed alternanze di sabbia limosa e limo sabbioso, con una intercalazione argillosa, da 32 a 44 m di profondità (12 m); anche questo risultato è da considerare molto soddisfacente, soprattutto per avere messo in evidenza con la geoelettrica un orizzonte permeabile probabile sede di falda acquifera interessato dai lavori di scavo delle gallerie.

Per quanto riguarda la differenza litologica fra il substrato sismico e quello geoelettrico è da rilevare che:

- il passaggio fra formazioni vulcaniche e marine segna il passaggio da terreni a media coesione a terreni a buona consistenza; la velocità delle onde P, qui pari a 2300 m/s, ci fa affermare che in situazioni stratigrafiche analoghe, e cioè con substrato argilloso Plio-Pleistocenico ricoperto dagli orizzonti sabbiosi ed argillosi Pleistocenici di buona consistenza, con la sola sismica rifrazione le argille Plio-Pleistoceniche non possono essere distinte dal loro ricoprimento di deposito marino; al contrario, quando il substrato argilloso si trova immediatamente sottostante depositi alluvionali e terreni di riporto (come nel precedente caso di Valle Aurelia), ambedue a velocità sismica poco elevata, esso può essere ben identificato anche con la sola sismica a rifrazione.

- il parametro resistività invece, meno sensibile alla coesione, ma più sensibile alla permeabilità, identifica con eccellente approssimazione il substrato argilloso, oltre che al di sotto della copertura alluvionale anche al di sotto della copertura sabbioso argillosa del Pleistocene marino; inoltre la resistività ha messo in evidenza un orizzonte permeabile sabbioso e ghiaioso, sede di una discreta falda idrica, rinvenuto anche con le perforazioni geognostiche.

L'interpretazione quantitativa del profilo Dipolare 2 eseguito con dispositivo AB di 20 m (v. Fig. 4b) consente di seguire su circa 150 m l'evoluzione strutturale del substrato argilloso e degli orizzonti alternativamente più sabbiosi ed argillosi sovrastanti:

in particolare è stata messa in evidenza una possibile incisione delle sabbie ed argille Pleistoceniche, successivamente riempita da argille e sabbie presumibilmente alluvionali e da materiale piroclastico.

L'esistenza di questa paleovalle sembra confermata da un avvallamento della superficie topografica lungo la via A.Sala e, più a valle, dall'andamento delle curve di livello in corrispondenza del sottostante viale di Valle Aurelia; ne risulta che l'incisione riscontrata nei terreni Pleistocenici a monte della stazione Aurelia Cornelia può corrispondere ad un corso d'acqua, affluente di destra della Valle dell'Inferno, successivamente colmato.

Va ricordato che l'andamento del substrato sismico del PR 2 (vedi Fig. 6) ha mostrato una variazione di quota tra le estremità del profilo, da circa +72 a +78 che, dopo l'interpretazione dei Profili Dipolari, possiamo attribuire al possibile fianco sinistro della palcosella che scende verso la Valle dell'Inferno.

Quindi, in questo caso la prospezione geofisica con il metodo dei SEV e dei profili Dipolari ha consentito di evidenziare il livello di sabbie e ghiaie, acquifero, ed il tetto del substrato argilloso; inoltre con i profili Dipolari, che permettono una esplorazione continua del tratto investigato, è stata individuata una incisione valliva la cui esistenza non era stata sufficientemente precisata con i soli sondaggi geognostici.

5.3 Via M.Battistini

Nella zona della via M.Battistini, a valle e non distante dalla omonima stazione e dal tratto di galleria di manovra già costruito, si ripete la situazione di discordanza litologica fra substrato sismico e geoelettrico: sulla sezione interpretativa della Fig. 7, si nota che la sismica individua come substrato il tetto del Pleistocene marino, mentre la geoelettrica individua molto bene il passaggio dalle sabbie e sabbie con ghiaie Pleistoceniche alle sottostanti argille del substrato conduttore.

La sismica ha pure messo in evidenza l'esistenza di una paleovalle (v. PR 5) trasversale alla via Battistini e quindi affluente di sinistra della valle in cui si sviluppa l'attuale via Battistini.

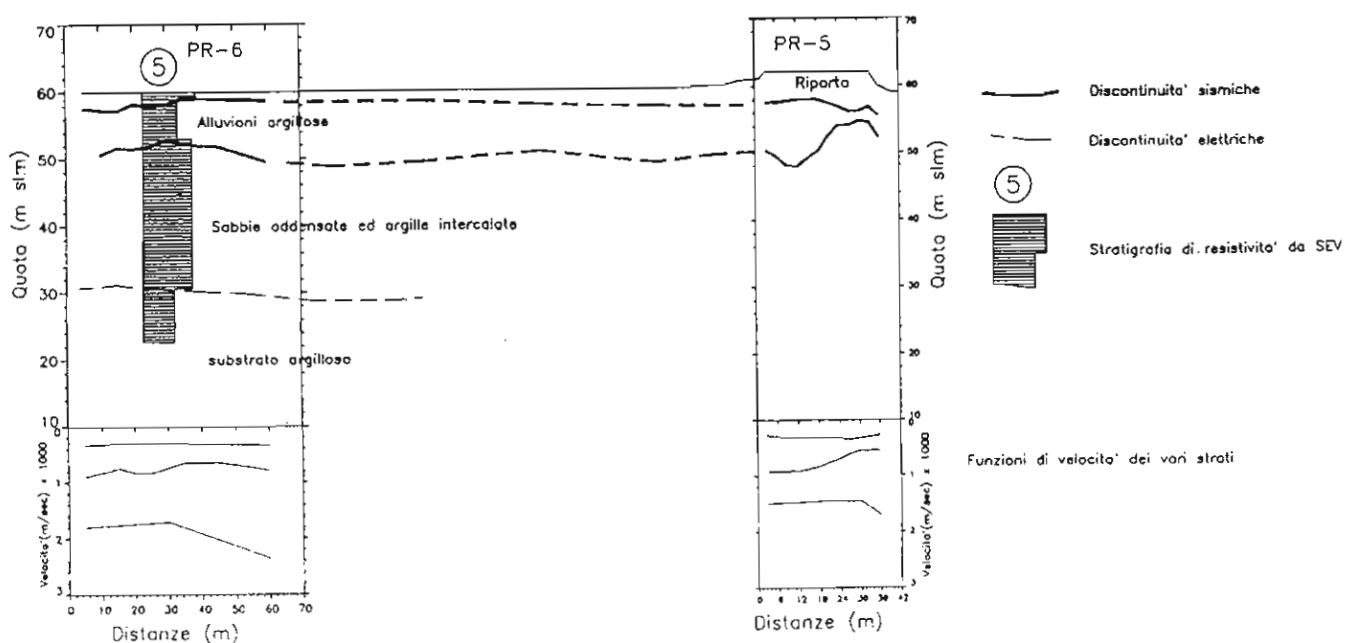


Figura 7 Via Battistini, Sezione interpretativa

Per quanto riguarda la profondità del substrato argilloso Pleistocenico il sondaggio geognostico V5 ha rinvenuto le argille a 26,8 ed il V5 bis a 26,5 m di profondità mentre il SEV 5, non distante, ha identificato il substrato conduttore, attribuibile alle argille, a 28 m di profondità con una precisione, verificata a posteriori, più che accettabile.

Anche in questo caso è confermata la migliore possibilità della geoelettrica di individuare il substrato conduttore argilloso al di sotto di una copertura resistente di terreni alluvionali e di sedimenti argillosi e sabbiosi di deposito marino. La sismica a rifrazione da parte sua è in grado di individuare con buona precisione il passaggio dai terreni a coesione non elevata (riporto ed alluvioni) a quelli a buona consistenza, quali si sono rivelati i depositi marini Pleistocenici sovrastanti le argille di base.

6) Conclusioni

Al termine dell'interpretazione dei dati geofisici sperimentali eseguiti in aree urbanizzate, si può affermare che con l'integrazione dei risultati forniti dai vari metodi, bene inseriti in un contesto geologico, è possibile arrivare in tempi brevi ad una buona definizione dei livelli litologici interessati dai lavori di scavo di gallerie di nuove linee metropolitane.

I singoli metodi, esaminati separatamente, potrebbero dare luogo ad incertezze sull'attribuzione litologica dei vari livelli "geofisici"; l'integrazione reciproca con altri metodi consente di eliminare, o quantomeno di attenuare, le incertezze interpretative e di avere un quadro più completo, del sottosuolo.

Ci si riferisce ad esempio al livello sismico veloce (2200 m/s) rinvenuto ad Aurelia Cornelia e Battistini : qui con l'ausilio dei metodi di resistività si è potuto stabilire, senza alcun dubbio, che il livello sismico veloce era da attribuire al tetto dei terreni sabbiosi ben addensati e con ghiaia di deposito marino, mentre altrove (Valle Aurelia, Baldo degli Ubaldi) il livello veloce era stato attribuito al tetto delle argille Plioceniche, anche in accordo con i metodi di resistività.

Se con la sismica rifrazione possono essere identificati e selezionati i livelli a diverso grado di coesione, con lo stesso metodo è possibile distinguere, nell'ambito di uno stesso orizzonte litologico, il diverso grado di decompressione dovuta all'alterazione o alla diversa compattazione dovuta alla profondità.

Con i metodi di resistività invece, oltre che la sicura definizione di un substrato argilloso, conduttore, sotto una copertura prevalentemente sabbiosa elettricamente resistente, può essere meglio definita la permeabilità dei livelli sabbiosi o ghiaiosi riferita al singolo strato od al complesso che li ingloba.

Si può concludere che in fase progettuale, eseguendo le indagini geofisiche nella fase iniziale di fattibilità, si sarà in grado di identificare in tempi brevi e con buona approssimazione i livelli litologici ed i tratti strutturali essenziali dei terreni che saranno interessati dallo scavo delle gallerie. Potranno anche essere identificati con sicurezza i siti dove sarà necessario eseguire i sondaggi geognostici di controllo e per la raccolta dei campioni da sottoporre ad analisi di laboratorio geotecnico.

Studiando il sottosuolo per volumi le indagini geofisiche potranno aiutare il geotecnico ed il progettista nello stabilire fino a che intorno sono ragionevolmente estrapolabili i dati puntuali ottenuti con le prove di laboratorio.

Inoltre le indagini geofisiche possono essere eseguite oltre che sul tracciato anche lateralmente a questo, in modo da ottenere un quadro strutturale più completo che può aiutare il geotecnico ed il progettista alla comprensione dell'origine di particolari livelli. Infine, eseguendo le indagini geofisiche in via preliminare, il numero dei sondaggi geognostici esplorativi potrà essere limitato allo stretto necessario, essendo già stata definita con buona approssimazione la costituzione litologica e la struttura del sottosuolo; la possibilità di distinguere i livelli anche in base alla loro permeabilità potrà consentire di prevedere la situazione idrogeologica (origine ed andamento degli acquiferi) del sottosuolo.

Per quanto riguarda l'aspetto costi/benefici le informazioni riportate sul presente rapporto, che riguardano circa 500 m di linea, hanno richiesto una spesa equivalente a circa 100 m di perforazione geognostica, considerando, oltre che al costo della perforazione vera e propria, anche gli oneri derivanti dall'installazione, carotaggio e prove in loro di routine.