

Indagini geofisiche preliminari per la verifica delle condizioni statiche del viadotto Mingardo sulla s.r. ex s.s. 562C alla km.ca 3+100 c.a. nei comuni di Centola e Camerota. Individuazione del sistema fondale

Sergio Santoro | Geologo, Servizio Geologico - Settore Viabilità e Trasporti
Giuseppe Scalese | Ingegnere, Servizio Geologico - Settore Viabilità e Trasporti
Maria Grazia Soldovieri | Geologo libero professionista - Ordine della Campania

Abstract

A seguito del crollo del viadotto Polcevera (noto anche come ponte Morandi o ponte delle Condotte), si è dato avvio ad una serie di verifiche delle condizioni statiche dei viadotti stimando che i *ponti scaduti* e da revisionare in Italia sono circa 10mila. Gli elementi principali alla base del rischio crollo, secondo i dati, sono i volumi di traffico variato di molto rispetto a quando siano stati realizzati e l'età dei manufatti. Purtroppo la normativa che regola le nuove costruzioni e che ha introdotto il grado di sicurezza strutturale, è solo del 2008. Il direttore dell'Istituto per le Tecnologie della Costruzione del Cnr, Antonio Occhiuzzi, parlando all'Ansa, fotografa una situazione di precarietà che il crollo del ponte Morandi a Genova ha trasformato nella nuova, ennesima emergenza Paese: il crollo di Genova ha ricordato ad amministrazioni ed enti che, per evitare ulteriori incidenti, la manutenzione e i controlli sono indispensabili. Considerata l'età di costruzione dei viadotti, in molti casi non è semplice reperire il fascicolo del progetto del ponte in esame. Con questo lavoro si vuole mostrare come la geofisica, in fase di caratterizzazione preliminare, sia in grado di fornire informazioni utili non solo nella ricostruzione della stratigrafia del sottosuolo ma anche nel definire la tipologia del sistema fondale. In particolare la ricostruzione delle variazioni di resistività elettrica in termini tridimensionali, ha consentito di definire che le fondazioni fossero di tipo dirette. La ricostruzione della tipologia del sistema fondale congiuntamente all'assenza di fratture da correlare a cedimenti strutturali

e/o del piano di posa delle fondazioni ha consentito di programmare interventi solo in merito all'impalcato e non sull'intero viadotto.

Introduzione

Il viadotto Mingardo si trova al confine tra i comuni di Camerota e Centola ed attraversa l'omonimo fiume, lungo il tragitto della Strada Regionale di competenza della Provincia di Salerno, tra la progressiva km.ca 3+100 e la progressiva km.ca 3+200, ed è un'opera che presumibilmente risale agli anni '50.

La struttura, interamente in calcestruzzo cementizio armato gettato in opera, si compone in elevazione di n.6 campate di luce pari a circa 18 m ciascuna; ogni campata è realizzata attraverso un impalcato con una soletta nervata ovvero un graticcio di travi longitudinali e trasversali: tre file di travi sono disposte in direzione longitudinale, mentre sono sette i traversi di cui due ovviamente di testata. Una rappresentazione schematica del viadotto è riportata in Figura 1.

Tutte le travi e i traversi hanno sezione trasversale rettangolare: le travi longitudinali hanno sezione con dimensioni 40 cm di base e 130 cm di altezza, ma con una maggiore altezza della sezione resistente poiché compresa nello spessore della soletta; per quanto riguarda i traversi, sempre al netto dello spessore della soletta, sono state rilevate due tipologie di sezione trasversale rettangolare, ovvero i traversi di testata con dimensioni di 35x130cm e quelli intermedi che hanno dimensioni di 25x45 cm.

Tutti gli impalcati sono poggiati direttamente su apposite rientranze o “selle” sulle spalle, per i tratti alle estremità, o sui pulvini delle pile intermedie, che si stagliano dal greto del corso d’acqua a partire dai plinti, ben visibili in forma e dimensioni nei periodi di magra. Gli elementi portanti verticali e di fondazione sono anch’essi interamente in calcestruzzo cementizio armato e sono quelli, evidentemente, che risentono maggiormente della presenza dell’acqua. Nelle strutture in elevazione sono visibili unicamente interventi di manutenzione ordinaria per il solo impalcato, nulla è stato fatto per i restanti elementi portanti; non si hanno informazioni dell’intervento che ha interessato la pila n.1 in destra orografica, per la quale non sussiste più una schematizzazione a telaio, ma piuttosto come un unico setto per l’intera altezza. Non si conoscono né le motivazioni né il periodo dell’intervento.

Da quanto descritto, come è evidente anche dalle immagini fotografiche, se ne desume che lo schema di calcolo per l’impalcato è quello di elementi semplicemente appoggiati agli estremi, con le condizioni di carico e modellazione tipica degli impalcati con soletta nervata; gli elementi verticali, ovvero le pile, sono perlopiù riconducibili a modelli di calcolo tipo telai, soggetti a forze concentrate trasmesse dagli appoggi.

Oltre alla caratterizzazione dei materiali costituenti l’opera (calcestruzzo e acciaio delle barre di armatura), l’eventuale modellazione dell’opera nelle condizioni attuali, richiede anche la completa definizione delle fondazioni; andava quindi accertata, oltre alla stratigrafia del terreno sottostante, la presenza o meno di pali di fondazione ed eventualmente definire la profondità del piano di posa dei plinti, se quest’ultimi risultassero l’unica tipologia presente.

La Provincia di Salerno, nel 2019 ha avviato uno studio dello stato di fatto dell’opera e della vulnerabilità sismica, con il fine ultimo di identificare i necessari interventi di consolidamento, da attuare per la risoluzione di tutte le criticità che verranno riscontrate a seguito delle verifiche. Sono stati programmati dalla Provincia di Salerno i seguenti step, in parte già realizzati:

- Esame visivo globale e puntuale dell’opera
- Prove sui materiali componenti
- Prove geologiche sul terreno di sedime
- Analisi dei risultati e prime conclusioni sullo stato della struttura
- Prove di carico statiche e approfondimento conoscenza
- Studio definitivo di vulnerabilità sismica e valutazione della transitabilità provvisoria
- Ipotesi di interventi necessari alla messa in sicurezza
- Progettazione esecutiva degli interventi.

Nella prima fase, che doveva culminare con la definizione della vulnerabilità sismica del viadotto e la valutazione della sua transitabilità provvisoria, non essendo disponibili gli elaborati progettuali originali né i certificati di prova sui materiali, è stato necessario svolgere tutte le indagini ed analisi utili per valutare lo stato di degrado dell’opera, ma soprattutto per caratterizzarla dal punto di vista della risposta alle azioni esterne e dell’interazione con il terreno di fondazione.

Metodologia geofisica utilizzata per la ricostruzione del sistema fondale.

Tra le diverse metodologie di prospezione geofisica in grado di risolvere la problematica in esame, si è optato di utilizzare la prospezione geofisica tipo *tomografia elettrica* in quanto i terreni ed il cemento hanno valori di resistività piuttosto differenti e quindi hanno un alto contrasto di resistività. Tale metodologia si basa, in generale, sugli effetti prodotti da una corrente elettrica, di origine naturale o artificiale, circolante nel sottosuolo e rilevabili attraverso misure di differenza di potenziale. In particolare il metodo della resistività in corrente continua consiste nella determinazione sperimentale di un set di valori di resistività apparente che, in accordo con una formulazione matematica deducibile direttamente dalle leggi dell’elettromagnetismo per campi stazionari, descrivono una qualsiasi struttura complessa formata

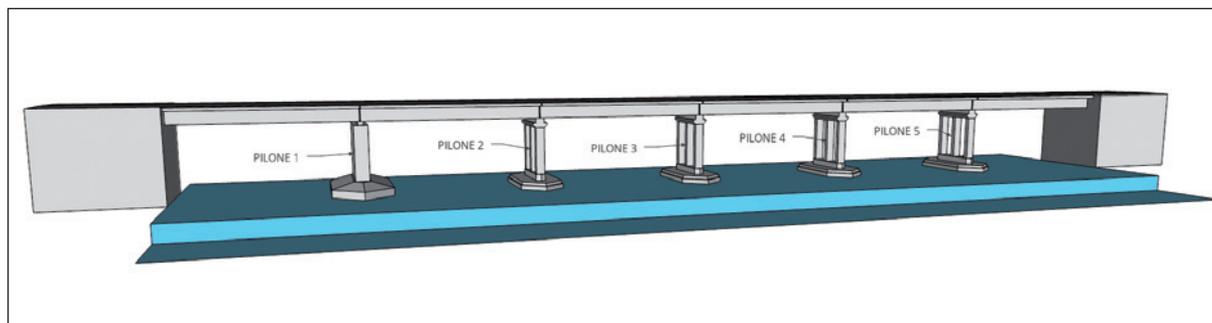


Fig. 1 – Rappresentazione schematica del viadotto oggetto di indagine.

da materiali fisicamente diversi in contatto elettrico tra loro. La resistività elettrica esprime la maggiore o minore predisposizione di un materiale a farsi attraversare dalla corrente e dipende da molti fattori. Quelli più importanti sono rappresentati dalla presenza di acque ionizzate e/o dalla presenza di particelle minerali metalliche eventualmente presenti nella struttura dei pori della roccia. Entrambi i fattori, infatti, possono dar luogo a traiettorie interne particolarmente conduttive, in contrasto con situazioni resistive caratterizzate da strutture compatte e/o da pori anidri. Gli elettrodi, opportunamente posizionati sul terreno, vengono utilizzati sia come elettrodi di corrente che di potenziale, secondo una sequenza opportunamente costruita ed automatizzata. L'esecuzione di un profilo tomografico, si realizza disponendo sul terreno una quantità elevata di elettrodi, con un passo tra gli stessi che dipende dalla risoluzione e dalla profondità d'investigazione. In Figura 2 è riportato un esempio di acquisizione di tipo dipolo-dipolo Assiale. La misura si esegue immettendo nel terreno una corrente continua attraverso i primi elettrodi, indicati con a e b in figura 2, e misurando la differenza di potenziale DV che si determina ai capi di altri due elettrodi, indicati con m e n nella stessa figura, posti simmetricamente al centro dell'allineamento tra a e b (schema di acquisizione definito Wenner o Wenner-Schlumberger) o affiancati ad essi (schema di acquisizione definito Dipolo-Dipolo Assiale). Le acquisizioni sono state fatte con dispositivo polo-dipolo (che consente di raggiungere, a parità di lunghezza dello stendimento, una maggiore profondità di investigazione) e con dispositivo dipolo-dipolo (che consente di evidenziare meglio le discontinuità laterali) al fine di definire le sezioni elettrostratigrafiche del sito.

Per quanto relativo alle acquisizioni 3D, in generale, gli elettrodi possono essere stati posti lungo griglie regolari realizzando profili paralleli tra loro con distanza pari al doppio della distanza minima tra gli elettrodi oppure ubicando gli elettrodi in modo da circoscrivere la zona di indagine (Figura 3). In Figura 4 è riportato lo schema utilizzato per acquisire i dati al di sotto di ciascun Pilone esaminato. E' stata ricostruita una apposita sequenza di acquisizione disponendo gli elettrodi lungo una maglia di dimensioni [18 * 10.5] m.

L'inversione dei dati è stata eseguita utilizzando l'algoritmo di inversione, scritto da Loke and Barker nel 1996 (Res2Dinv e Res3Dinv), che rappresenta un metodo iterativo basato sulla deconvoluzione ai minimi quadrati ed è tra i più utilizzati in letteratura. Con questo algoritmo è necessario definire innanzitutto un modello iniziale, ottenuto discretizzando il sottosuolo in un numero di blocchi rettangolari e/o prismi le cui dimensioni sono legate ai parametri geometrici scelti in fase di acquisizione. La suddivisione del sottosuolo può essere eseguita

secondo diversi modelli ed ad ognuno dei blocchi è assegnato, automaticamente dal programma o a discrezione dell'operatore, un valore di resistività reale e l'algoritmo calcola il valore di resistività apparente che si otterrebbe se il sottosuolo investigato fosse rappresentato proprio dal modello iniziale ipotizzato.....

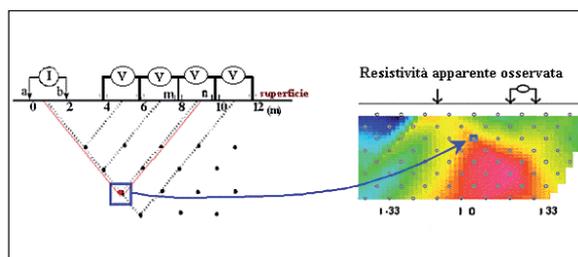


Fig. 2 - Esempio di una ricostruzione di tomografia elettrica in configurazione Dipolo-Dipolo Assiale.

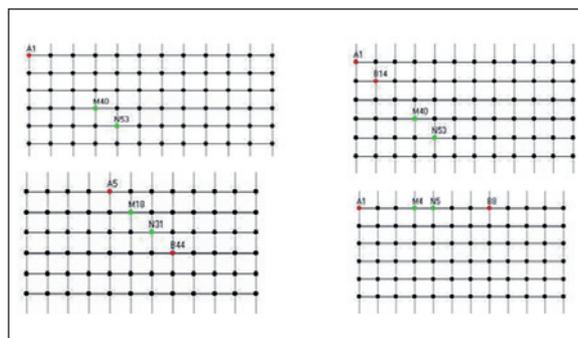


Fig. 3 - Schema di acquisizione 3D su griglie regolari.

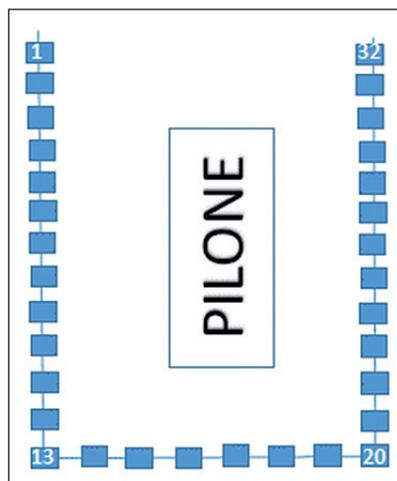


Fig. 4 - Schema di acquisizione 3D ubicando opportunamente degli elettrodi o delle piastre a ridosso della zona da investigare.

Indagini eseguite al disotto dei piloni ed elaborazione dei risultati.

Le acquisizioni dei dati di resistività al disotto di ciascun pilone, sono state eseguite con array Dipolo Dipolo Assiale e ottimizzando la sequenza di dati elaborata dalla scrivente e costituita complessivamente da circa 200 dati. Dopo aver eliminato alcuni spikes, i dati sono stati elaborati utilizzando l'algoritmo di calcolo RES3DInv, descritto precedentemente. I diversi modelli ottenuti sono stati visualizzati con la stessa scala colorimetrica in modo da rendere più immediato il confronto tra le

diverse sezioni. In Figura 5 sono riportate le modalità di rappresentazione dei dati tridimensionali attraverso la ricostruzione di diverse sezioni. In particolare in Figura 6, in Figura 7 e in **Figura 8** si riportano le sezioni elettrostratigrafiche ricostruite elaborando i dati acquisiti a ridosso del Pilone 1; in Figura 9, in Figura 10 e in **Figura 11** si riportano le sezioni elettrostratigrafiche ricostruite elaborando i dati acquisiti a ridosso del Pilone 3 ed infine in Figura 12, in Figura 13 e in **Figura 14** si riportano le sezioni elettrostratigrafiche ricostruite elaborando i dati acquisiti a ridosso del Pilone 4. I diversi pilone sono riportati in Figura 1.

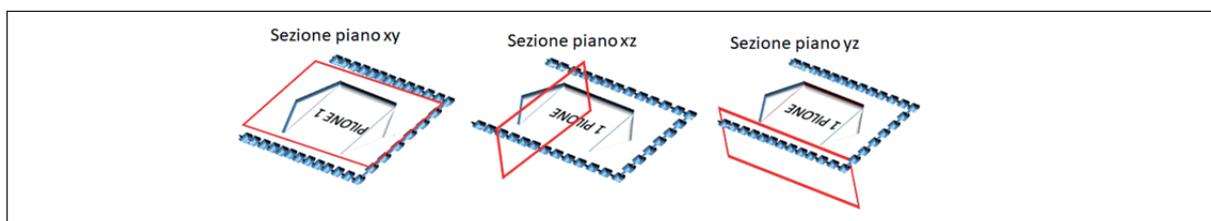


Fig. 5 - Visualizzazione dei dati elaborati considerando diverse sezioni.

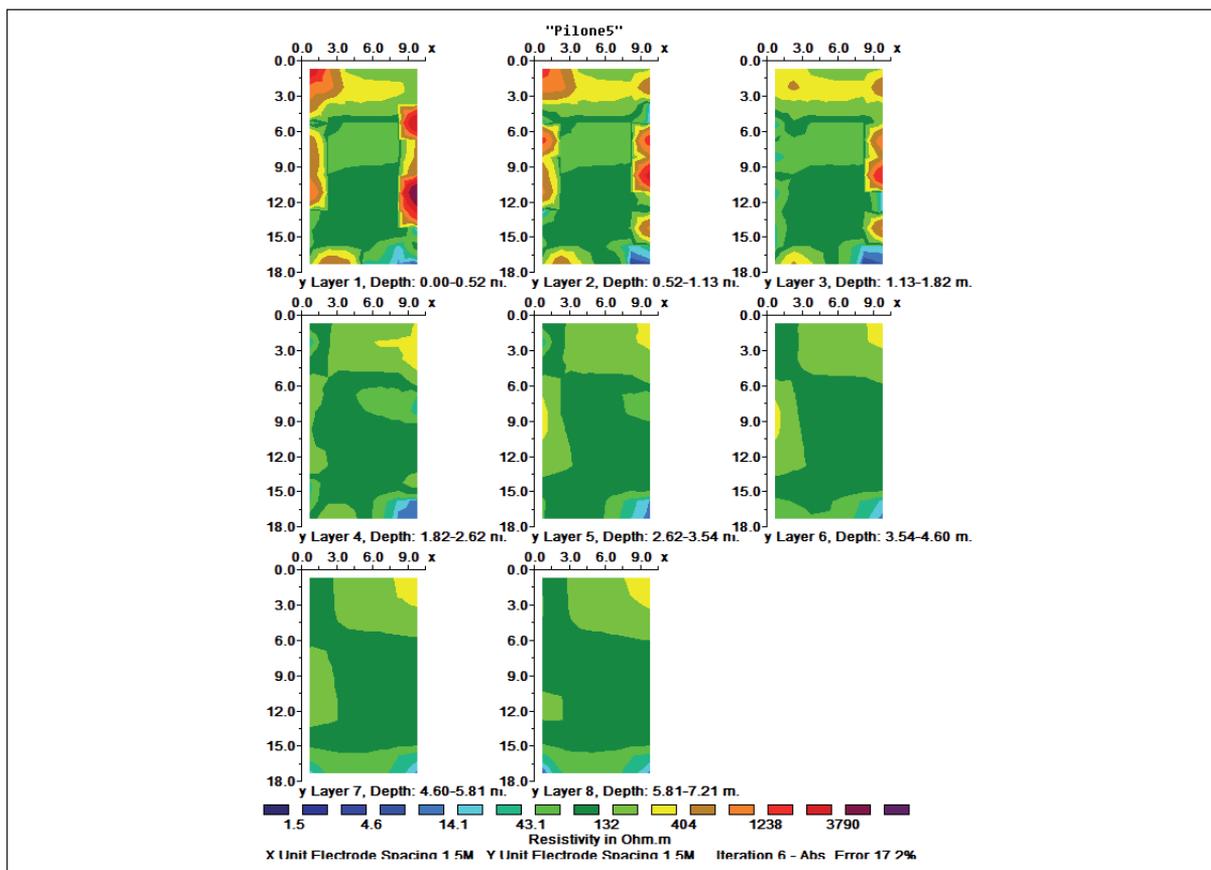


Fig. 6 - Elaborazione dei dati di resistività del Pilone 1. Ricostruzione degli andamenti di resistività nel piano X-Y.

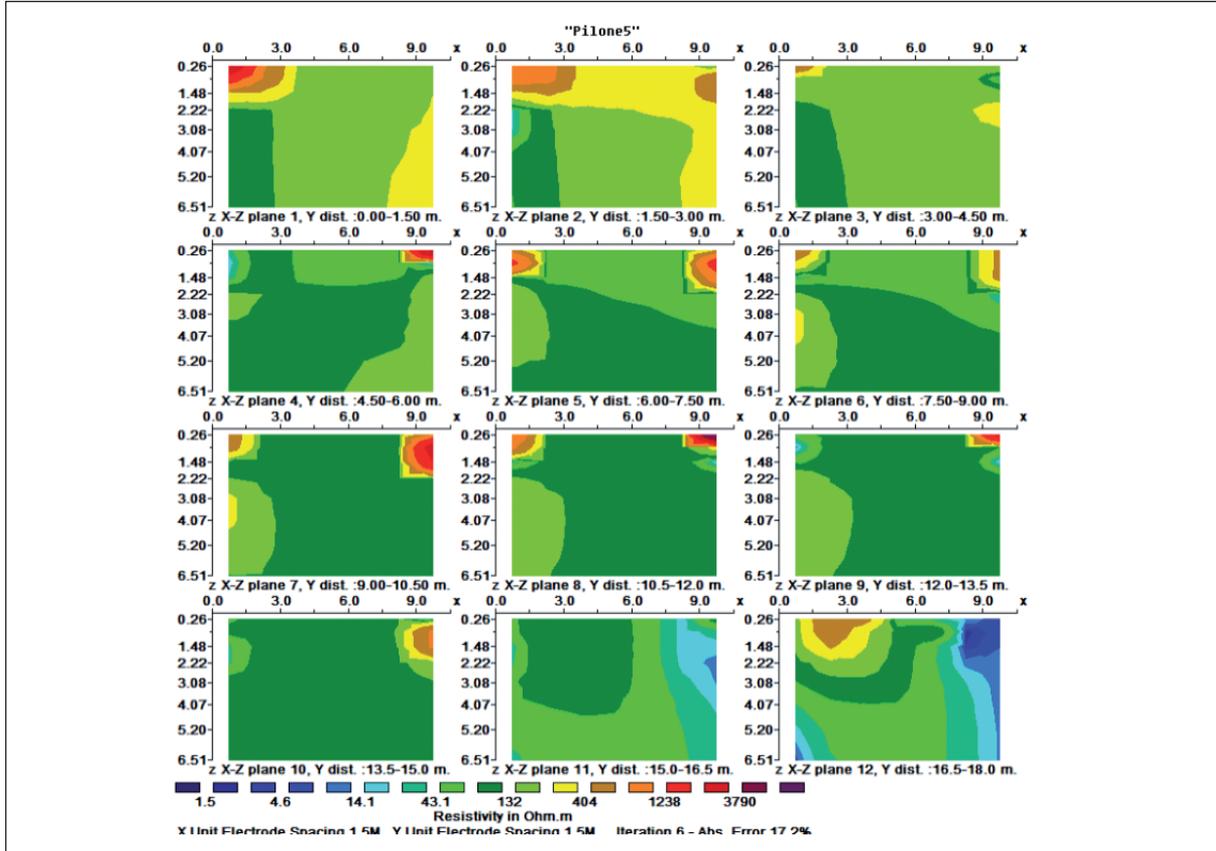


Fig. 7 - Elaborazione dei dati di resistività del Pilone 1. Ricostruzione degli andamenti di resistività nel piano X-Z.

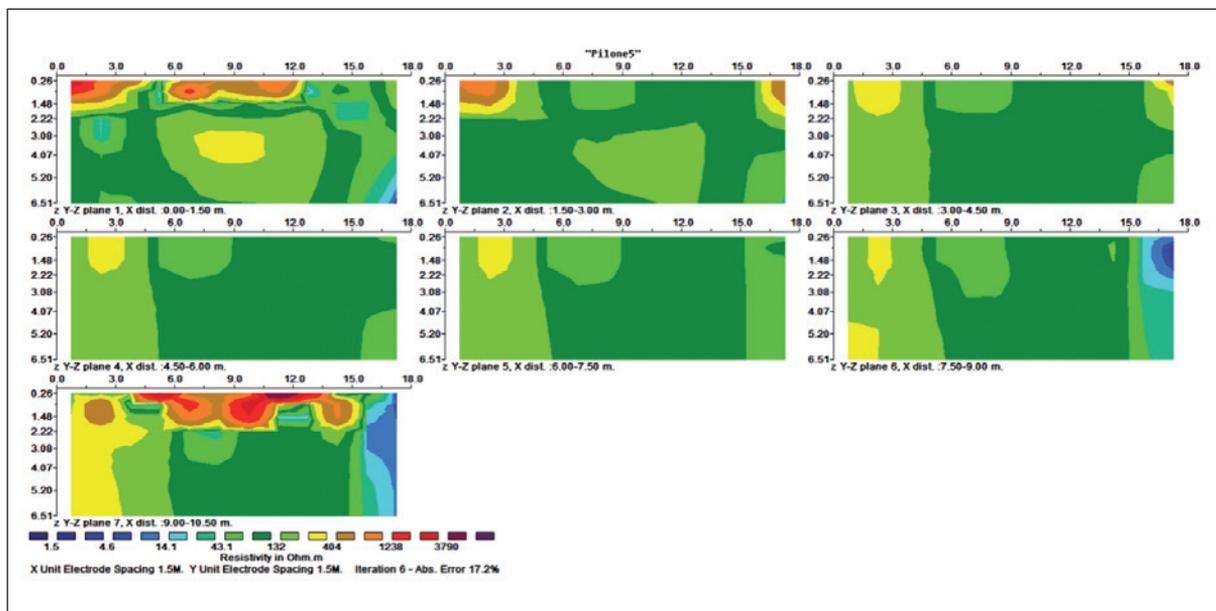


Fig. 8 - Elaborazione dei dati di resistività del Pilone 1. Ricostruzione degli andamenti di resistività nel piano Y-Z.

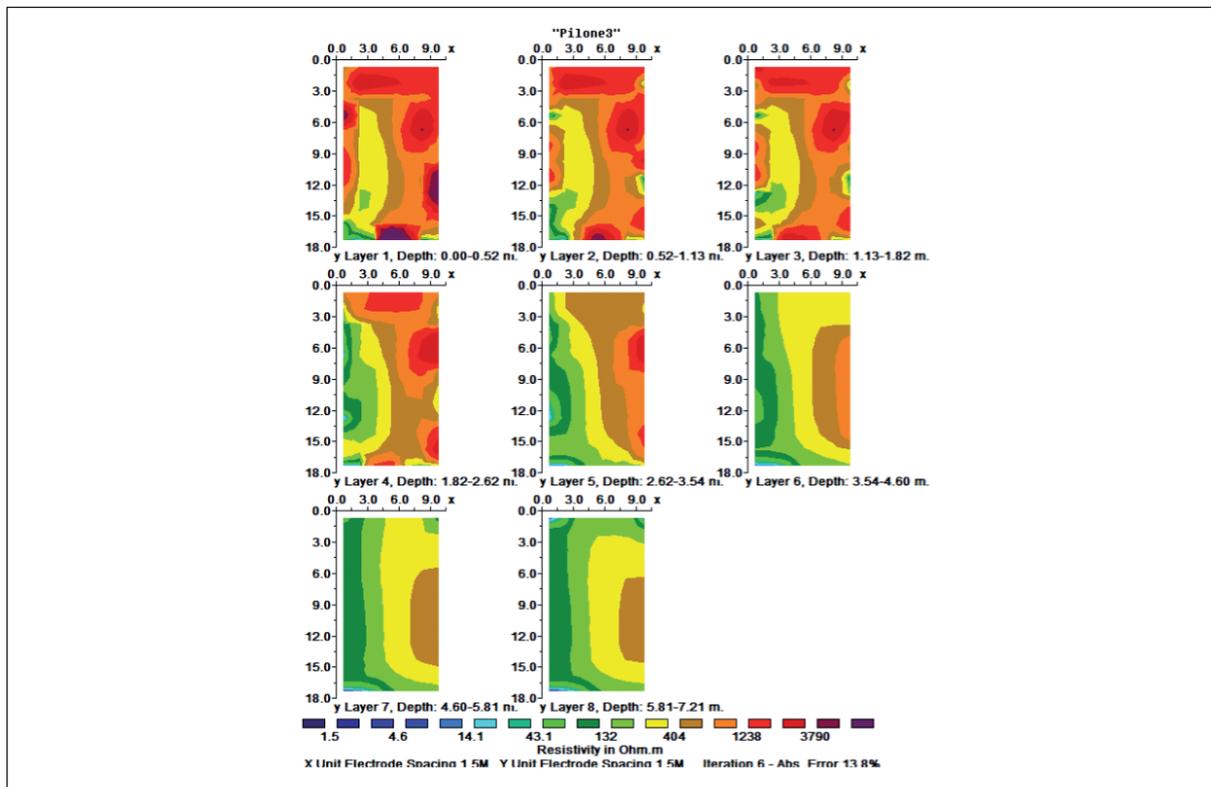


Fig. 9 - Elaborazione dei dati di resistività del Pilone 3. Ricostruzione degli andamenti di resistività nel piano X-Y.

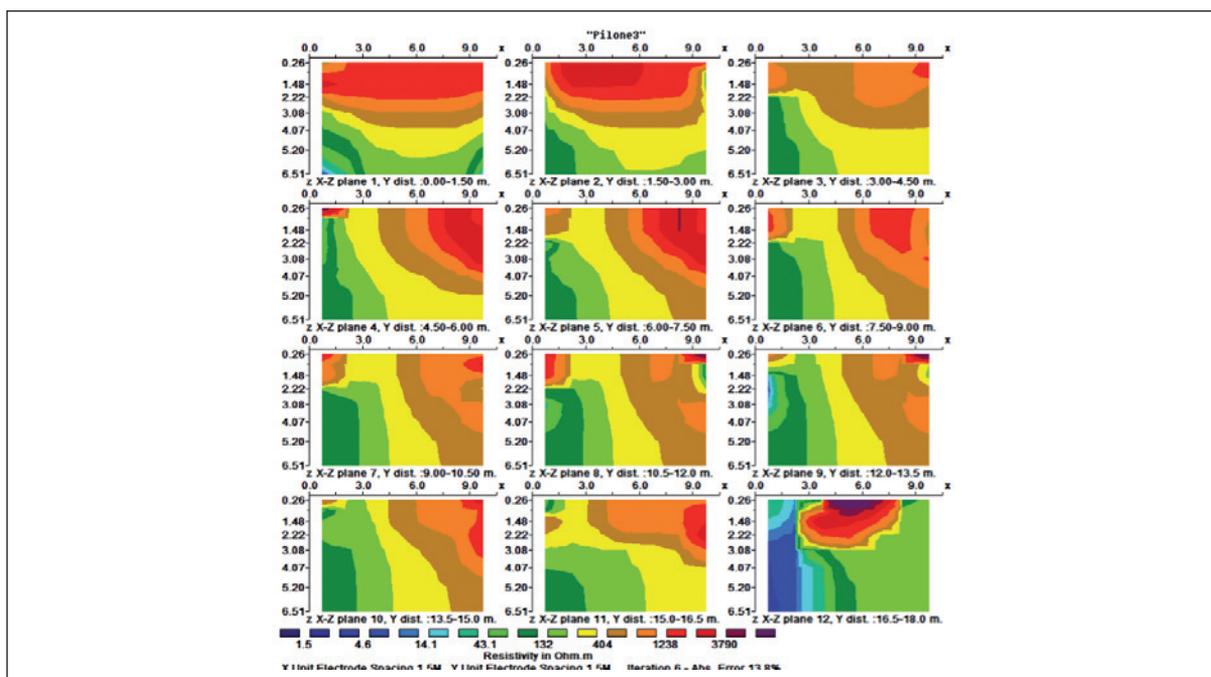


Fig. 10 - Elaborazione dei dati di resistività del Pilone 3. Ricostruzione degli andamenti di resistività nel piano X-Z.

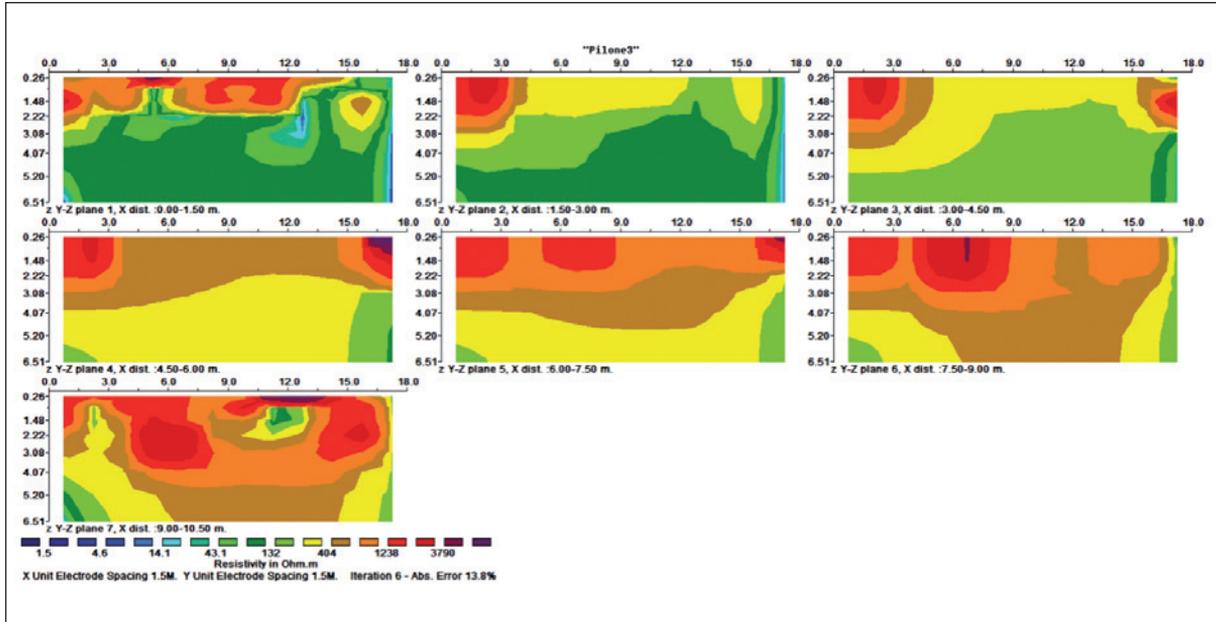


Fig. 11 - Elaborazione dei dati di resistività del Pilone 3. Ricostruzione degli andamenti di resistività nel piano Y-Z..

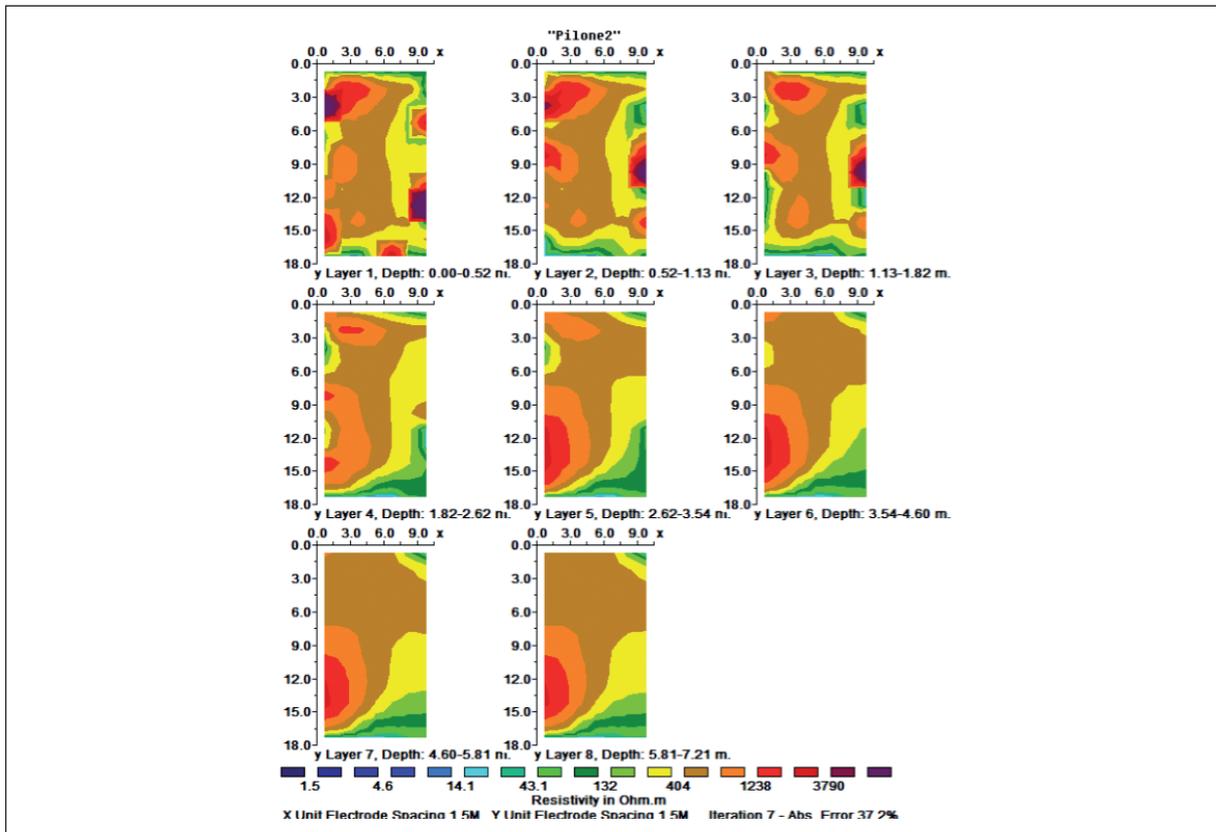


Fig. 12 - Elaborazione dei dati di resistività del Pilone 4. Ricostruzione degli andamenti di resistività nel piano X-Y.

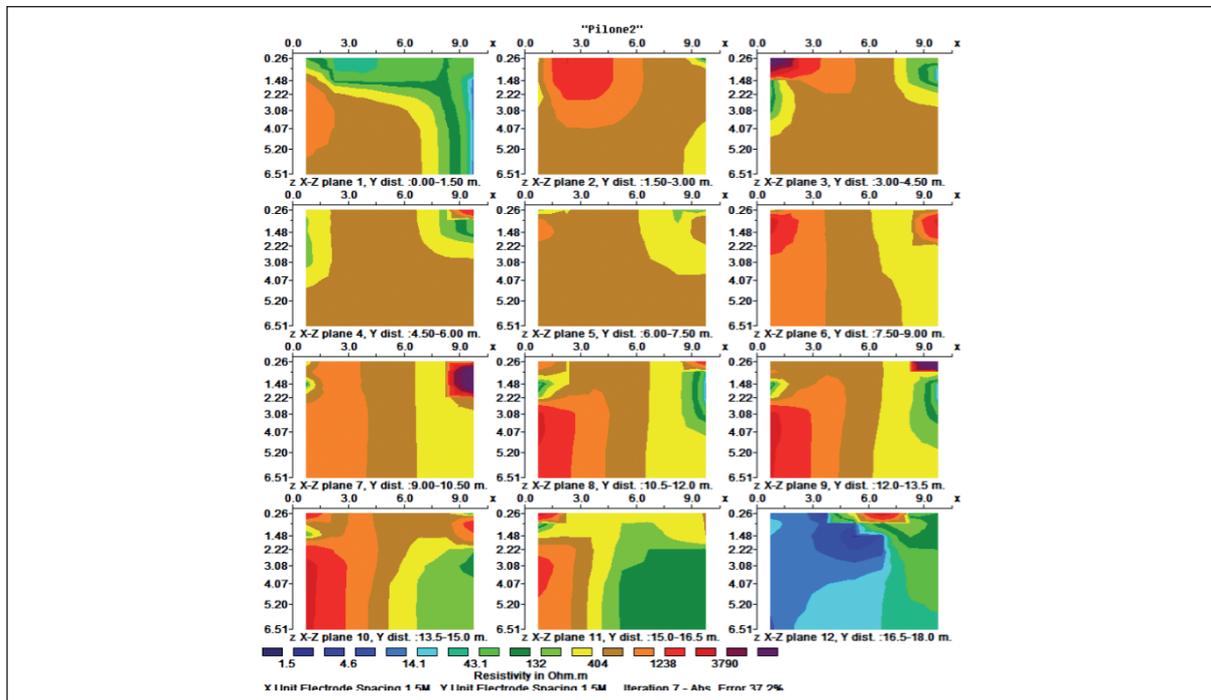


Fig. 9 - Elaborazione dei dati di resistività del Pilone 3. Ricostruzione degli andamenti di resistività nel piano X-Y.

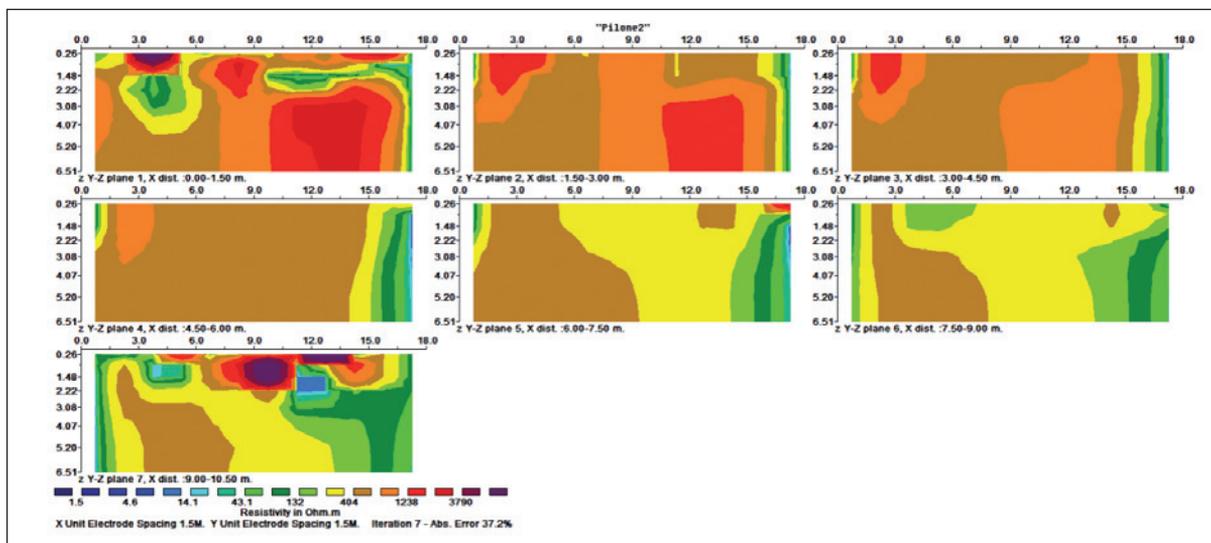


Fig. 14 - Elaborazione dei dati di resistività del Pilone 4. Ricostruzione degli andamenti di resistività nel piano Y-Z.

Verifica gli assi

Le sezioni più rappresentative, che consentono di stimare la tipologia del sistema fondale, sono quelle elaborate lungo i piani Y-Z. Infatti, come sintetizzato in Figura 15

ed evidenziato con delle linee nere, l'effetto sui dati di resistività della presenza del cemento circonda aree a comportamento elettrico resistivo. Le sezioni in cui è stato riscontrato tale effetto sono le sezioni 0.0-1.5 e

9.0-10.5m, ovvero le zone in cui gli andamenti di resistività sono ricostruiti lungo le sezioni esterne al piano fondale del pilone.

Le forme evidenziate si ripetono, conservando le stesse caratteristiche di forma e profondità, nelle sezioni 0.0-1.5 e 9.0-10.5 del Pilone 1, nella sezione 0.0-1.5 del Pilone 3 e nella sezione 9.0-10.5 del Pilone4. Le forme evidenziate lungo la sezione 0.0-1.5 e lungo la sezione 9.0-10.5 del Pilone 4 non sono simili tra loro ma, l'effetto da correlare con la presenza di cemento, è discriminato fino alla profondità di 2.2mt. **Queste ricostruzioni consentono di asserire che al disotto dei piloni è presente una fondazione superficiale di spessore massimo pari a 2.20mt. Non si vede l'effetto della presenza di micropali al disotto dei piloni esaminati.**

Infine, per quanto ricostruito sulla sezione 9.0-10.5 del pilone 3, il confronto con la sezione 0.0-1.50 evidenzia che non solo la forma da correlare con il sistema fondale nelle due sezioni non è ben conservata ma, risultano essere piuttosto differenti anche le profondità alle quali è presente il resistivo. Infatti, tale resistivo, è discriminato fino ad una profondità di 4.0mt ovvero pari al doppio di quella rinvenuta lungo la sezione 0.0-1.5 dello stesso pilone. **Per comprendere la causa di tale differenza,**

contestualmente allo stato di fatto del viadotto, è indispensabile correlare tale risultato con la stratigrafia dell'area.

Altre indagini eseguite a supporto della ricostruzione geologica dell'area.

Sul sito in esame per una puntuale ricostruzione geologica del sottosuolo a ridosso della zona del viadotto, si è ritenuto opportuno eseguire 3 stendimenti di tomografia elettrica e uno stendimento di tomografia sismica la cui ubicazione è riportata in Figura 16. In particolare sono stati eseguiti due profili di tomografia elettrica con acquisizione polo-dipolo per poter raggiungere una maggiore profondità di investigazione e un profilo con acquisizione dipolo-dipolo in modo da evidenziare meglio le variazioni laterali di resistività. Le ricostruzioni sono riportate con la stessa scala colorimetrica in modo semplificare la lettura dei dati sulle diverse sezioni ricostruite. Infine, la sovrapposizione tra gli andamenti di resistività e quelli delle velocità delle onde P, hanno consentito di definire il modello geologico di sottosuolo presente a ridosso dei piloni.

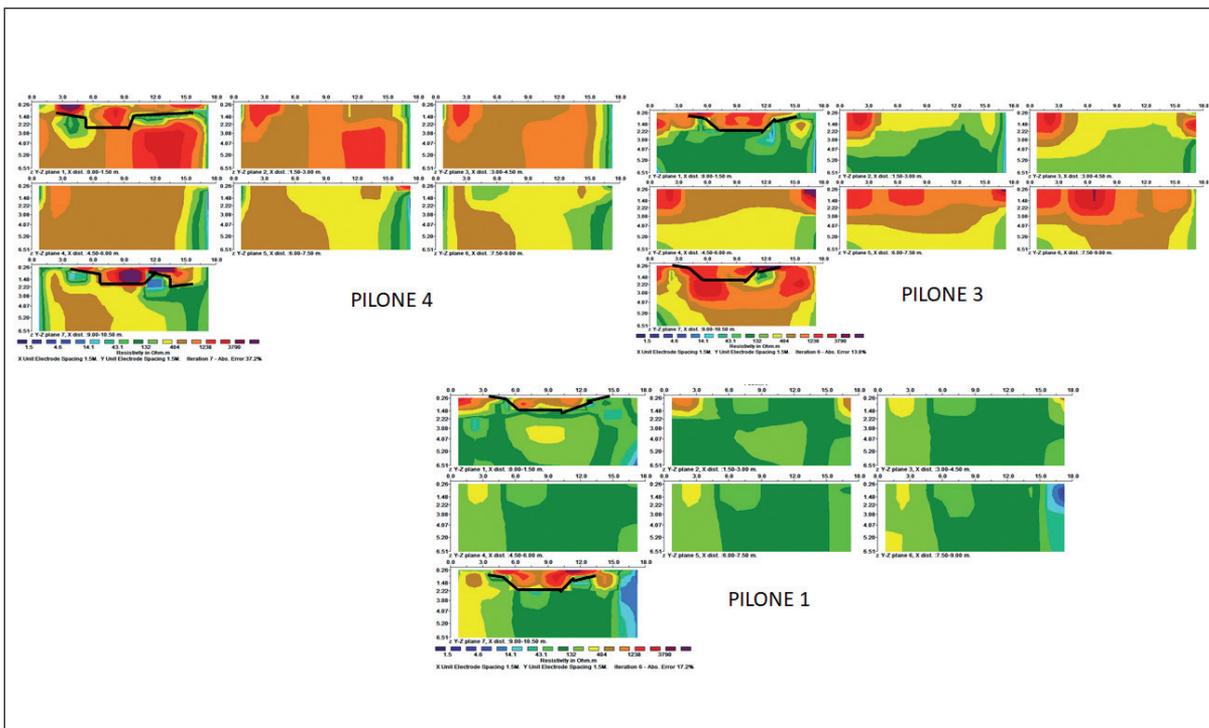


Fig. 15 - Visualizzazione degli andamenti di resistività lungo i Piloni 1-3-4 nel piano Y-Z. La linea in nero indica l'effetto del cemento sui dati.

Particolarmente significative ai fini della ricostruzione del modello geologico di sottosuolo, risultano essere le ricostruzioni elettrostratigrafiche eseguite lungo i profili siglati come TomoE1 e TomoE2. Infatti, è possibile asserire che fino alla profondità massima di circa 15 m è presente uno strato distinto da variazioni laterali piuttosto significative. Si discriminano aree francamente conduttive con valori di resistività inferiori a 20 Ohm m (isoresistive blu) da correlare con la presenza di limi o di materiali argillosi e aree resistive con valori di resistività medi pari a 3500 Ohm m da correlare con la presenza delle ghiaie. Al di sotto è stato discriminato un elettrostrato continuo lungo tutta la sezione investigata e distinto da valori di resistività che aumentano con la profondità con un gradiente piuttosto regolare. Tale elettrostrato è da

correlarsi con il substrato arenaceo tipico della zona oggetto di indagine e presente anche in affioramento. La geometria emersa dalle indagini elettriche è rafforzata da quanto elaborato dalla tomografia sismica (Figura 20). Il primo sismo strato presenta valori di velocità compresi tra circa 0.5 km/s e 2,0 km/s e spessore medio pari a circa 15 m. Al di sotto i valori di velocità aumentano fino a circa 2,5 km/s e rappresentano il semispazio esplorativo. Così come messo in evidenza dalle elaborazioni geoelettriche, all'interno del primo strato sono osservabili delle geometrie a forma lenticolare che fanno ipotizzare la presenza di aree in cui prevale la granulometria più fine (velocità intorno a 1.3 km/s) rispetto alle circostanti (velocità pari a circa 1.8 m/s) in cui è ipotizzabile la presenza di ghiaie.

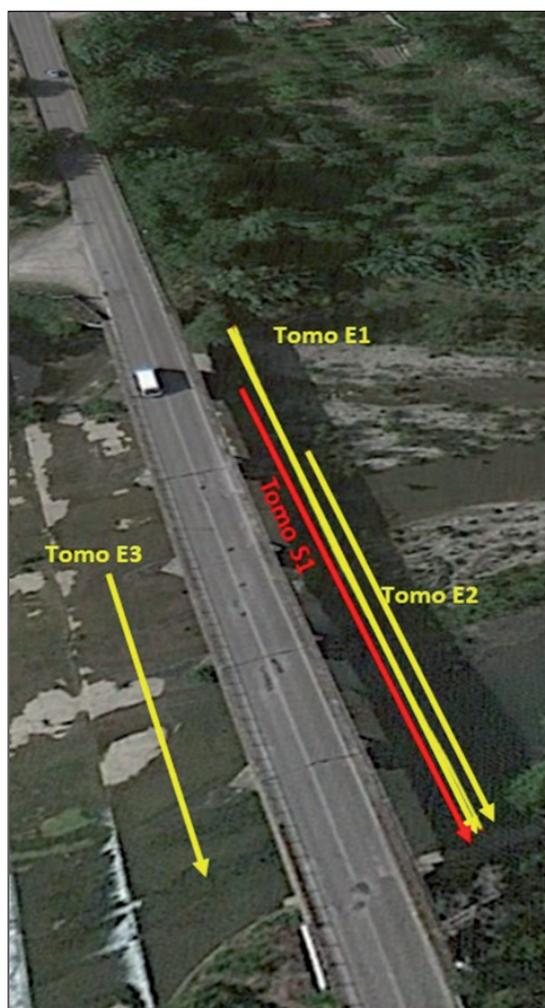


Fig. 16 - Ubicazione stendimenti di tomografia elettrica (in giallo) e di tomografia sismica (in rosso) con indicazione del verso di lettura dei dati.

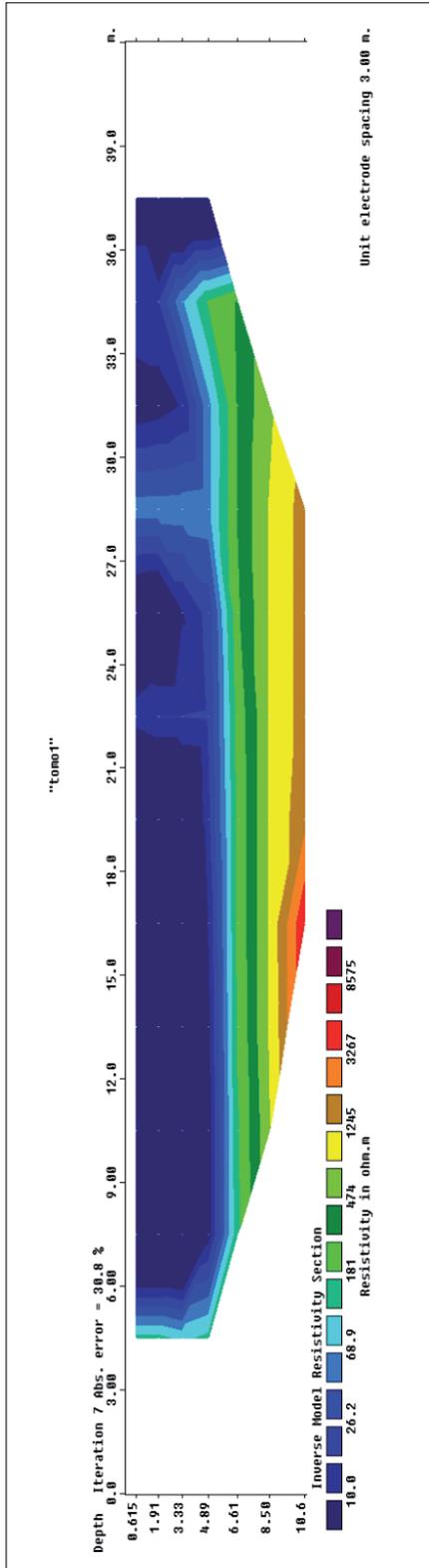


Fig. 17 - Sezione elettrostratigrafica eseguita lungo il profilo siglato come TomoE1. I dati sono stati acquisiti con schema polo-dipolo.

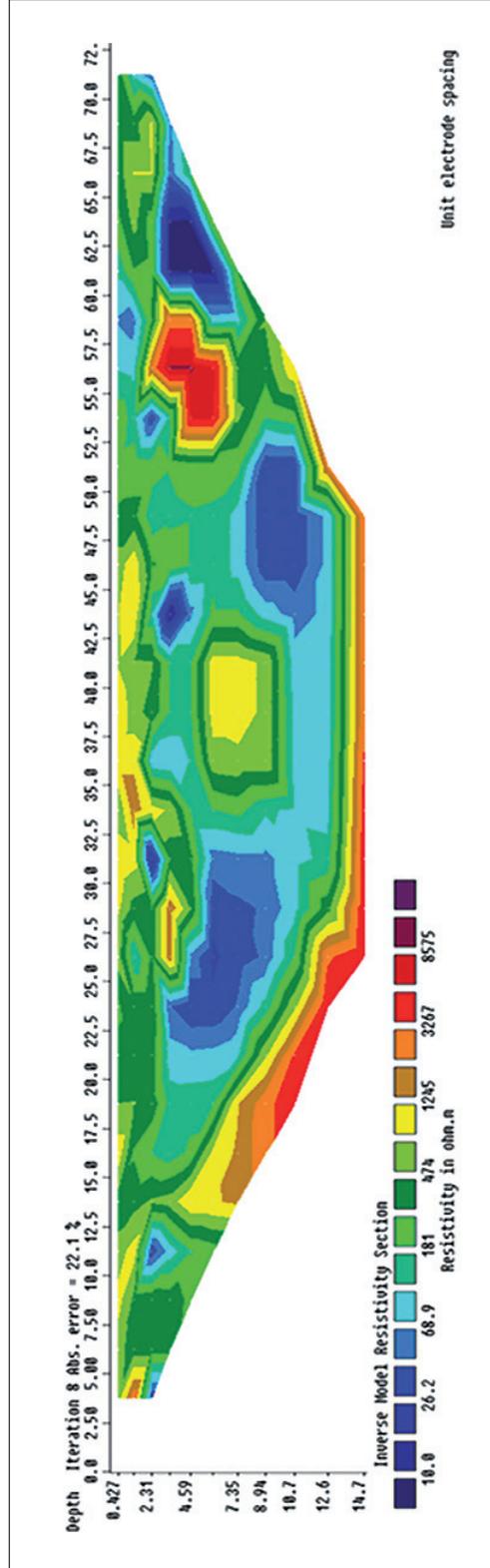


Fig. 18 - Sezione elettrostratigrafica eseguita lungo il profilo siglato come TomoE2. I dati sono stati acquisiti con schema dipolo-dipolo-Assiale.

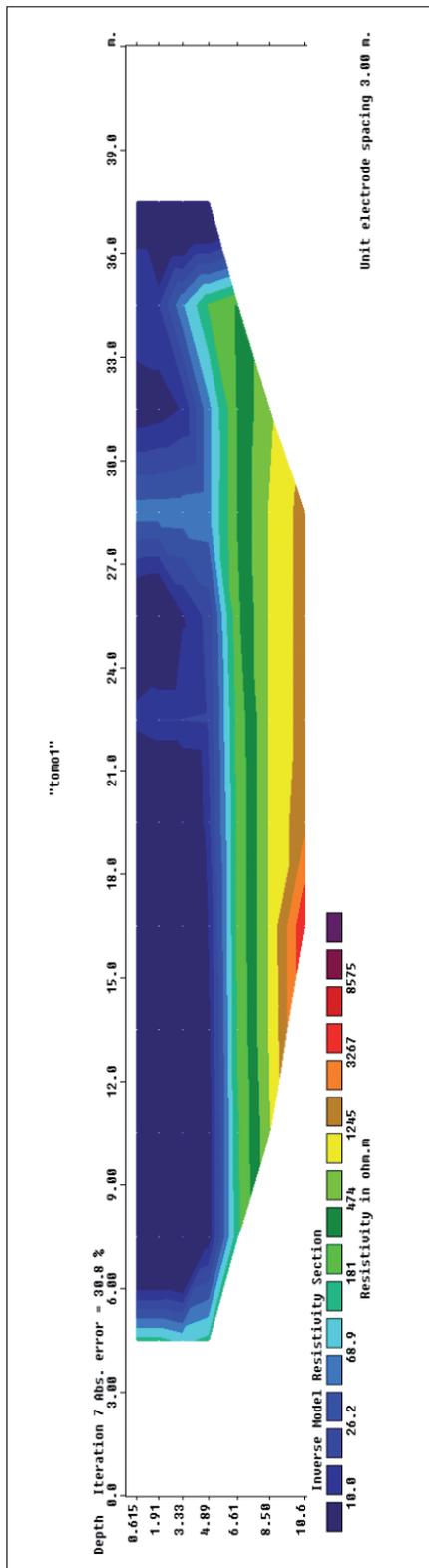


Fig. 19 - Sezione elettrostratigrafica eseguita lungo il profilo siglato come TomoE3. I dati sono stati acquisiti con schema polo-dipolo.

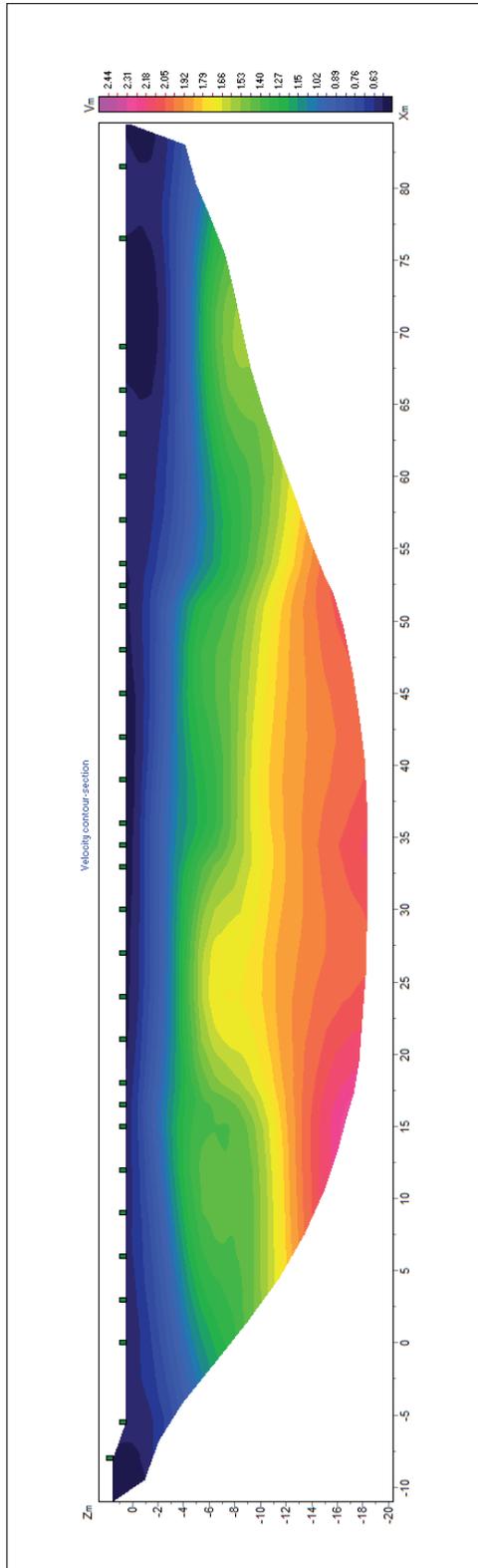


Fig. 20 - Sezione sismostratigrafica eseguita lungo il profilo siglato come TomoS1. Le velocità sono espresse in Km/s.

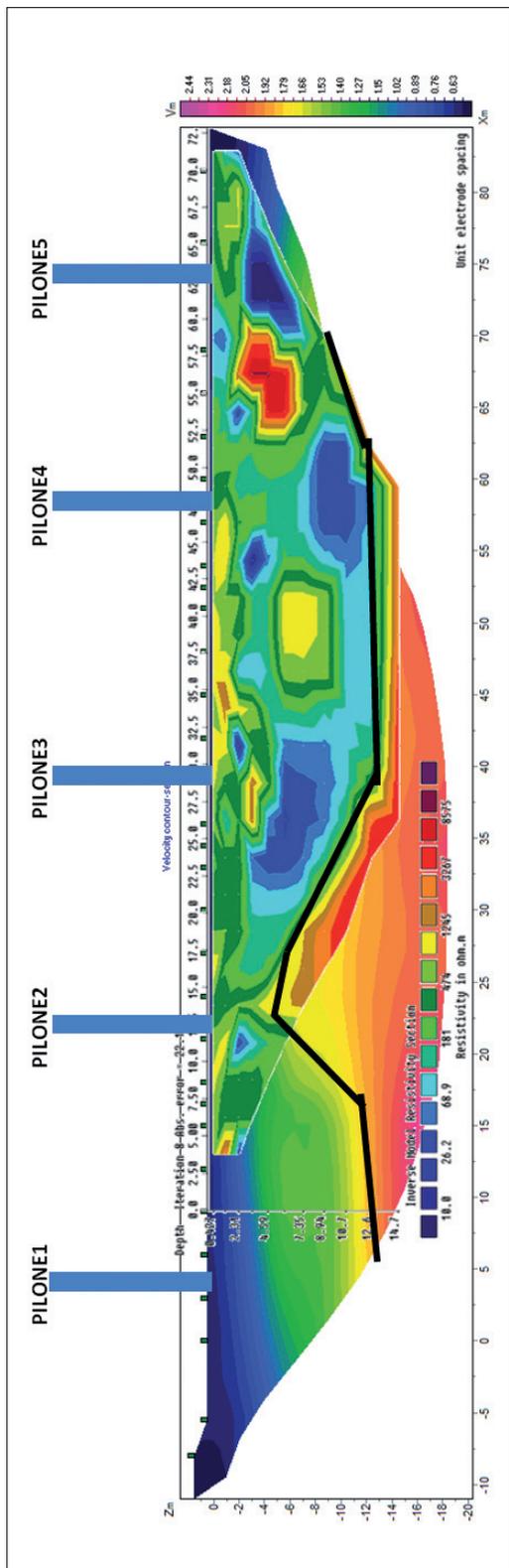


Fig. 21 - Ricostruzione del modello geologico del sottosuolo ottenuto dalla sovrapposizione della sezione sismica e della sezione elettrostratigrafica indicata come TomoE2. I rettangoli in blu indicano la posizione dei piloni proiettati sulla sezione.

Osservazioni conclusive

La tomografia elettrica si è confermata un valido strumento di analisi che ha consentito di valutare, attraverso le ricostruzioni degli andamenti di resistività elettrica in termini sia bidimensionali sia tridimensionali del sottosuolo, la stratigrafia del sito e la tipologia di fondazioni presenti al disotto dei piloni. Le fondazioni risultano essere di tipo superficiale e si approfondiscono fino alla profondità di 2.20m. Non sono presenti i micropali. Inoltre, la ricostruzione del modello geologico del sottosuolo presente a ridosso dei piloni e riportato in Figura 21, congiuntamente alla sovrapposizione con la sezione sismostratigrafica ha consentito di evidenziare la presenza di uno strato continuo ad una profondità compresa tra [5-15]mt da correlare con il substrato geologico al di sopra del quale sono presenti lenti con diverse caratteristiche elettriche e sismiche, da correlare con la presenza di ghiaie laddove i valori di resistività sono maggiori di 500 Ohm m (isolinee verdi e rosse) e i valori di velocità maggiori di 1.5km/s, ovvero con i limi dove i valori di resistività sono inferiori a 30 Ohm m e i valori di velocità minori di 1.5 km/s. Dalle ricostruzioni elaborate è stato messo in evidenza inoltre che:

1. il confronto tra la sezione 0.0-1.50 con quanto ricostruito sulla sezione 9.0-10.5 del pilone 3 (Figura 22), evidenzia che non solo la forma nelle due sezioni non è ben mantenuta ma, risultano essere piuttosto differenti anche le profondità alle quali è presente il resistivo. Infatti, tale resistivo, che rappresenta l'effetto della presenza del cemento sui dati di resistività, è discriminato fino ad una profondità di 4.0mt ovvero pari al doppio di quella rinvenuta lungo la sezione 0.0-1.5 dello stesso pilone (linea puntinata in bianco di **Figura 15**). A ridosso di questo pilone, la sezione geoelettrica ricostruita, ha evidenziato la presenza di variazioni stratigrafiche piuttosto significative. Pertanto, considerato lo stato di fatto del viadotto, è possibile asserire che, le variazioni di profondità (e non di forma) tra le due sezioni in esame, potrebbero correlarsi al fatto che durante la realizzazione delle fondazioni, il cemento si sia infiltrato nelle litologie più resistive ovvero all'interno delle ghiaie.
2. la ricostruzione della sezione simo-elettrostratigrafica definita a ridosso dei piloni mette in evidenza che gli stessi non poggiano sulla stessa tipologia di materiale.

In funzione di quanto definito dalle indagini di cui sopra, opportunamente integrate con altre tipologie di prove (quali ad esempio le prove di carico su impalcato eseguita utilizzando 4 automezzi a 4 assi debitamente caricati fino alla realizzazione di una massa pari a 75tonn) è stato possibile definire e caratterizzare lo stato di fatto del viadotto PER IL QUALE SONO STATI PREVENTIVATI SOLI interventi in merito all'ammaloramento DELLE STRUTTURE FUORITERRA.