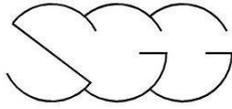


ALLEGATO 6:
PROSPEZIONI GEOELETTICHE

Tutti i diritti sono riservati.
La riproduzione e la divulgazione a terzi e' vietata.

D																
C																
B																
A	EMISSIONE	marzo 2016	Mencarini	Rossi	Rossi											
Rev.	Descrizione	Data	Redatto	Verificato	Approvato											
COMMITTENTE : Ingegnerie Toscane Srl																
				Archivio n° 4718/16												
				Commessa n° K 208												
LOCALITA' : Diga del Cepparello - Comune di Poggibonsi (SI)																
INDAGINE: Indagine geofisica per la ricostruzione del sottosuolo																
OGGETTO: RAPPORTO TECNICO INDAGINE ELETTRICA 3D																
<table border="1"> <tr> <td>4</td><td>7</td><td>1</td><td>8</td><td>S</td><td>G</td><td>G</td><td>0</td><td>1</td><td>A</td> </tr> </table>			4	7	1	8	S	G	G	0	1	A	marzo 2016	N° Copie	N° Pagine	Formato
4	7	1	8	S	G	G	0	1	A							
Nome file			4718sgg01A.doc			A4 <input checked="" type="checkbox"/>	A3 <input type="checkbox"/>									
IL TECNICO: Dr. Geol. Claudio Rossi																
				STUDIO DI GEOLOGIA E GEOFISICA S.r.l. STRADA MASSETANA ROMANA , 56 - SIENA - ITALY - Tel. 0577 49276 - Fax 0577 287254 - e.mail: info@sgg.it												
				CONTROLLO QUALITA' data-sigla												



INDICE

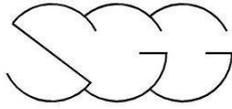
1 - INTRODUZIONE.....	3
2 - INDAGINI SVOLTE.....	4
3 – STRUMENTAZIONI, PERSONALE IMPIEGATO E QUALITA'	6
4 – ESECUZIONE DEI RILIEVI.....	8
5 – ELABORAZIONE TOMOGRAFIA ELETTRICA 2D.....	12
6 – ELABORAZIONE TOMOGRAFIA ELETTRICA 3D.....	15
6.1 – <i>Pre-processing dei dati</i>	15
6.2 – <i>Inversione tomografica 3D</i>	17
7 – ANALISI DEI RISULTATI.....	19

ALLEGATI

Elaborato	Titolo	scala
4718SGG02	Planimetria indagine elettrica	1:500
4718SGG03	Sezioni orizzontali del modello 3D della resistività elettrica del sottosuolo	1:1.000
4718SGG04	Sezioni verticali NNE-SSW del modello 3D della resistività elettrica del sottosuolo	1:500
4718SGG05	Sezioni verticali ESE-WNW del modello 3D della resistività elettrica del sottosuolo	1:500
4718SGG06	Sezioni elettrotomografiche 2D della resistività elettrica del sottosuolo	1:500



Diga del Cepparello – Poggibonsi (SI)
INDAGINE ELETTRICA 3D



1 - INTRODUZIONE

Il presente rapporto riferisce i risultati dell'indagine geofisica condotta per la società **INGEGNERIE TOSCANE Srl** presso la diga del Cepparello, nel Comune di Poggibonsi (SI).

Scopo della prospezione geofisica è stato la caratterizzazione del sottosuolo, attraverso il parametro della resistività elettrica (indagine elettrotomografica 3D). La prospezione è stata eseguita sull'intero corpo diga, attraverso linee 2D ed acquisizioni 3D fra linee parallele (metodo *cross-cable*). L'ubicazione e le operazioni inerenti la prospezione elettrica sono state coordinate dal Dr. Geol. Carlo Ferri, rappresentante la Committenza.

Nella presente relazione sono illustrate le metodologie esecutive ed interpretative delle misure geofisiche ed i risultati della prospezione secondo un criterio essenzialmente geofisico.



Diga del Cepparello – Poggibonsi (SI)
INDAGINE ELETTRICA 3D

2 - INDAGINI SVOLTE

La prospezione geoelettrica è stata realizzata nei giorni 9-10-11 febbraio 2016, attraverso l'esecuzione sul corpo diga di array elettrodi con passo 3,0 metri acquisiti in configurazione DIPOLO-DIPOLO 2D ed in configurazione DIPOLO-DIPOLO 3D (14 linee, pari a 731 metri per complessivi 258 elettrodi). Inoltre, sono stati eseguiti n°3 profili elettrici con passo 5,0 metri acquisiti in configurazione DIPOLO-DIPOLO 2D, lungo direttrici trasversali e longitudinali al corpo diga (3 linee elettrodeiche, pari a 705 metri, per 131 elettrodi a terra).

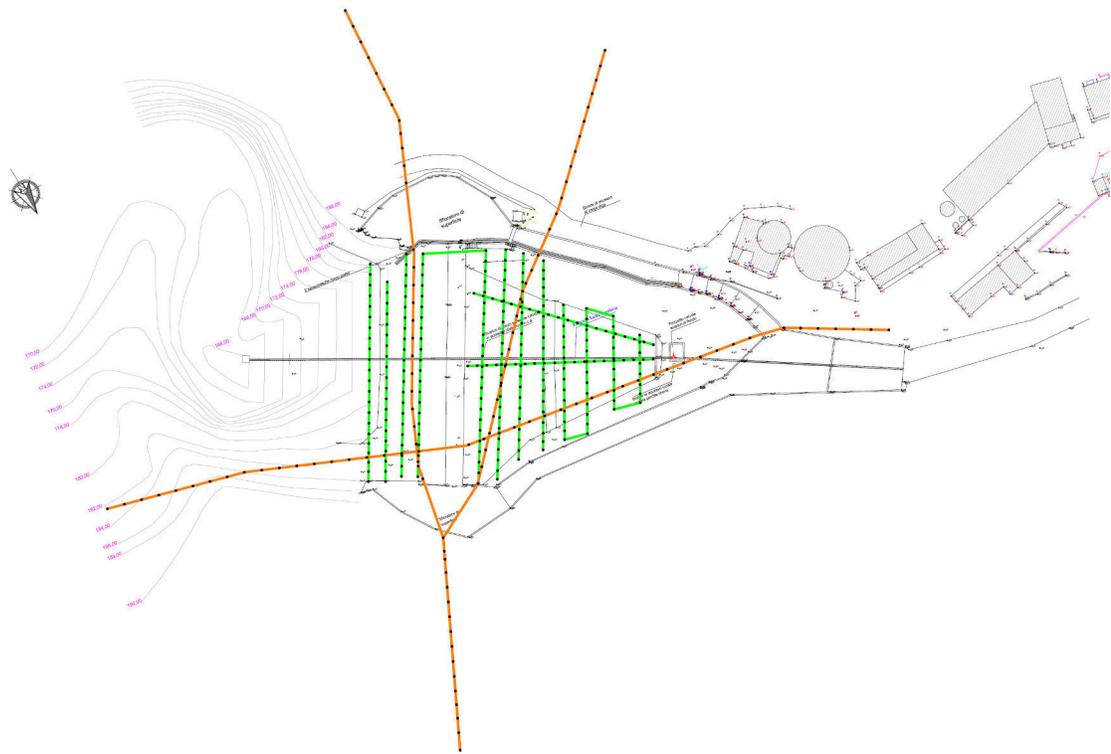


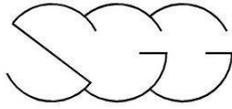
Figura 2.1 – In verde: array elettrodi con passo 3 metri, acquisiti in configurazione 2D e 3D; in arancio: profili elettrici passo 5 metri, acquisiti in configurazione 2D.

L'acquisizione dei dati è avvenuta con georesistivimetro digitale SYSCAL R1PLUS. La totalità dei dati derivanti dalle linee con passo 3m e la porzione centrale dei profili elettrici a passo 5m, sono stati utilizzati per l'elaborazione tomografica di un modello geoelettrico 3D del sottosuolo, attraverso l'inversione contemporanea su piattaforma ERTLab del complesso delle misure di resistenza elettrica ($\Delta V/I$).

I profili elettrici con passo 5 metri, sono stati inoltre elaborati con software 2D dedicato (Res2Dinv) e rappresentati nella tavola 4718sgg06.



Figura 2.2 – Acquisizione 3D del tipo cross-cable, sul paramento di monte della diga.

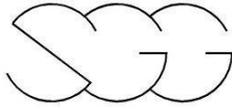


3 – STRUMENTAZIONI, PERSONALE IMPIEGATO E QUALITA'

Per la prospezione geofisica sono state utilizzate le seguenti strumentazioni ed attrezzature:

n°	Strumentazione per INDAGINI GEOELETTRICHE	COD. ID.
1	Georesistivimetro digitale SYSCAL R1plus – IRIS Instruments	SGG-SI-58
2	batterie di alimentazione 12V / 27Ah	
3	cavi specifici per prospezione geoelettrica con 24 prese spaziate di 5 metri – STC	cavoELE 11-13
60	elettrodi in acciaio e rame impolarizzabili	
1	notebook ACER, con software ELECTREll , Prosys ed ERTLAB SEQUENCER per la creazione degli array elettrodi, delle sequenze, ed il download dei dati	

Per il trasporto del personale, degli strumenti e delle attrezzature è stato utilizzato un pick-up Nissan Navara, in dotazione all'azienda. Tutti gli strumenti di misura impiegati sono tarati presso il laboratorio metrologico GAMMAMISURE di Calenzano (*Laboratorio Accreditato di Taratura LAT 56*) e/o verificati secondo il *piano annuale di taratura e verifica* adottato presso questo studio.



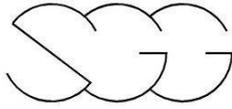
Risorse coinvolte

Per l'esecuzione della prospezione di campagna e della relativa interpretazione in ufficio, sono state coinvolte le seguenti risorse:

Responsabile della Commessa	C. ROSSI
Responsabile Assicurazione Qualità	A.M. BALDI
Responsabile sicurezza in cantiere	S. MENCARINI
Prospettore geofisico	S. MENCARINI – E. CANNUCCI
Elaborazione modello 3D	S. MENCARINI
Interpretazione prospezione elettrica	C. ROSSI - S. MENCARINI
Editing	S. MENCARINI

Qualità

La prospezione geofisica è stata eseguita in riferimento alle specifiche interne SP0302; in conformità all'istruzione IS0901. Per la registrazione delle varie attività sono stati utilizzati i moduli del sistema qualità in uso presso questo studio.



4 – ESECUZIONE DEI RILIEVI

La prospezione geoelettrica è stata condotta secondo due modalità principali. In un caso, sono stati eseguiti n°3 profili elettrici con passo 5 metri e lunghezza 235 metri, trasversalmente e longitudinalmente al corpo diga (ved. Figura 2.1). Le misure di resistenza elettrica ($R=\Delta V/I$) sono state acquisite in configurazione 2D classica DIPOLO-DIPOLO, permettendo una profondità di investigazione di circa 40 metri da p.c. e consistono nel generare corrente (I) su una coppia di elettrodi AB e misurare la tensione (ΔV) su una coppia di elettrodi NM (Figura 4.1). I profili suddetti hanno ovviamente intersecato gli sfioratori di superficie, destro e sinistro, in cemento; in queste zone non sono stati posti gli elettrodi di connessione con il terreno.

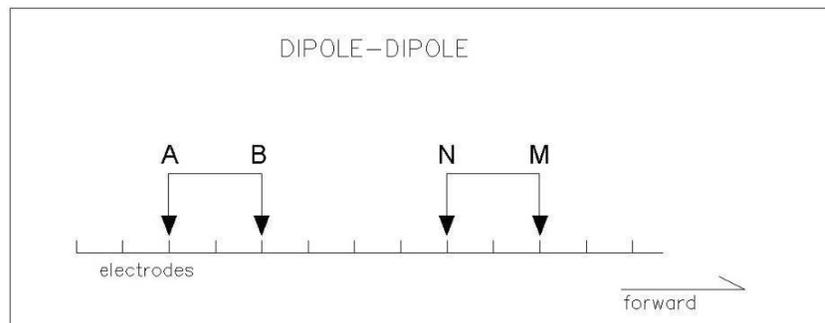


Figura 4.1 – Schema delle misure in array DIPOLO-DIPOLO.

Su tutto il restante corpo diga, la prospezione geoelettrica è stata condotta secondo array elettrodi paralleli, con spaziatura pari a 3 metri. La posizione delle linee (Figura 4.2) è stata progettata a priori e quindi verificata direttamente su campo, in modo da poter eseguire la maggior parte delle misure in configurazione DIPOLO-DIPOLO 3D del tipo *cross-cable*.

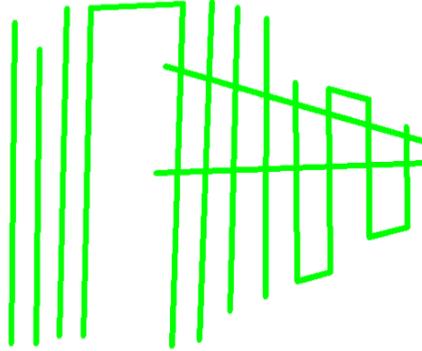
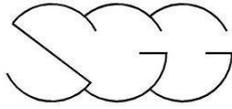


Figura 4.2 – Schema della disposizione degli array elettrodi sul corpo diga, al fine di eseguire una tomografia 3D della resistività elettrica del sottosuolo.

La geometria utilizzata, ha permesso l'esecuzione di misure elettriche 2D classiche lungo le linee (acquisizioni *common-cable*) e l'esecuzione di misure in configurazione 3D, tra linee parallele (acquisizioni *cross-cable*), con notevole beneficio per il dettaglio e la sensibilità dell'indagine di tomografia elettrica. Inoltre, le acquisizioni del tipo *cross-cable* hanno permesso lo studio del terreno al di sotto della zona del coronamento della diga (interamente cementato!), tramite la misura tra quadripoli di corrente, posti contemporaneamente da una parte e dall'altra del coronamento stesso; tale operazione è stata ripetuta su più linee, al fine di aumentare la sensibilità di misura nella zona del coronamento (Figura 4.3 – 4.4).

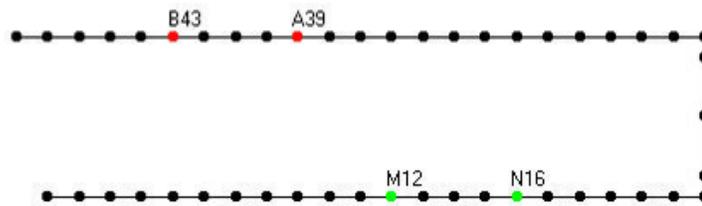


Figura 4.3 – Misure del tipo dipolo-dipolo 3D con metodologia *cross-cable*.



Figura 4.4 – Misure della resistività elettrica in configurazione dipolo-dipolo 3D (cross-cable), tra elettrodi posti a monte ed a valle del coronamento della diga.

Nella zona di valle del corpo diga, in corrispondenza del restringimento della sezione, è stata invece adottata una metodologia di acquisizione 3D su una griglia di 4 linee con misure su tutto il reticolato di elettrodi, come si può vedere dal dettaglio della Figura 4.5. In questo caso, con un'acquisizione 2D di tipo classico si sarebbero ottenute poche decine di letture di resistenza elettrica, in luogo delle centinaia operate (800 misure eseguite sulla griglia 3D).

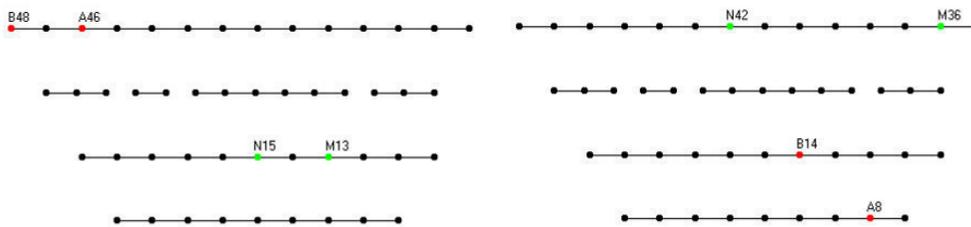


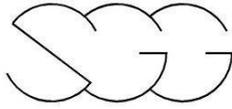
Figura 4.5 – Esempio di disposizione dei quadripoli di lettura sulla griglia 3D, operata nella zona di valle del corpo diga, in corrispondenza del restringimento della sezione.

Le sequenze sono state generate con software ERTLAB SEQUENCER, che permette di definire la spaziatura degli elettrodi, il loro posizionamento spaziale reciproco e, soprattutto, la modalità con cui eseguire le misure di resistenza elettrica.

Una volta definito lo schema di acquisizione, le misure dell'intensità di corrente e della differenza di potenziale vengono eseguite in successione, automaticamente. Il georesistivimetro digitale Syscal R1plus (Figura 4.6) è in grado di imporre fino ad 600V di tensione ai capi degli elettrodi AB, generando quindi campi elettrici con correnti fino a 2,5A con una sensibilità di lettura di $20\mu\text{V}$. Le misure di resistenza elettrica (V/I) del terreno, derivano da una serie di letture eseguite attraverso l'inversione di polarità della corrente che, nel presente rilievo, è stata fissata fra tre e otto cicli; la validità della misura finale è data dal valore della deviazione standard registrata per ogni quadripolo. Nel presente rilievo geoelettrico sono state acquisite, in totale, circa 7.000 letture.



Figura 4.6 – Georesistivimetro digitale Syscal R1plus, in acquisizione cross-cable, sul paramento di valle della diga.



5 – ELABORAZIONE TOMOGRAFIA ELETTRICA 2D

L'elaborazione tomografica elettrica 2D è stata operata soltanto sui profili elettrici eseguiti con passo 5 metri, al fine di trasmettere qualche elemento in più per la valutazione delle condizioni al contorno della diga del Cepparello.

Preventivamente all'interpretazione tomografica, sono state ricostruite le posizioni assolute degli elettrodi, al fine di immettere i corretti parametri per il calcolo delle distanze relative. Le misure sperimentali vengono quindi consultate e trattate mediante il software ProsysII, che permette di eseguire il controllo statistico dei valori sperimentali per ogni singolo quadripolo; in particolare si evidenziano:

- gli elettrodi che formano il quadripolo (A, B, M, N);
- l'intensità di corrente (I, espressa in mA);
- il potenziale elettrico (ΔV , espresso in mV);
- la resistività apparente ($\rho = k * \Delta V / I$, espressa in $\Omega \cdot m$);
- la deviazione standard (espressa come valore percentuale).

L'inversione tomografica viene effettuata con il software RES2DINV, che elabora un modello bidimensionale della resistività del sottosuolo in funzione dei valori sperimentali acquisiti. L'elaborazione tomografica consiste nella suddivisione dello spazio bidimensionale in celle secondo uno schema definito in riferimento alla distribuzione ed alla dispersione dei dati. Per ognuna delle celle viene determinata la resistività che soddisfi il complesso delle misure.

Il programma di inversione restituisce, inoltre, per ogni modello, il valore della deviazione standard dell'errore relativo (rms), calcolato sulla base dei valori di resistività apparente misurati ed i calcolati.

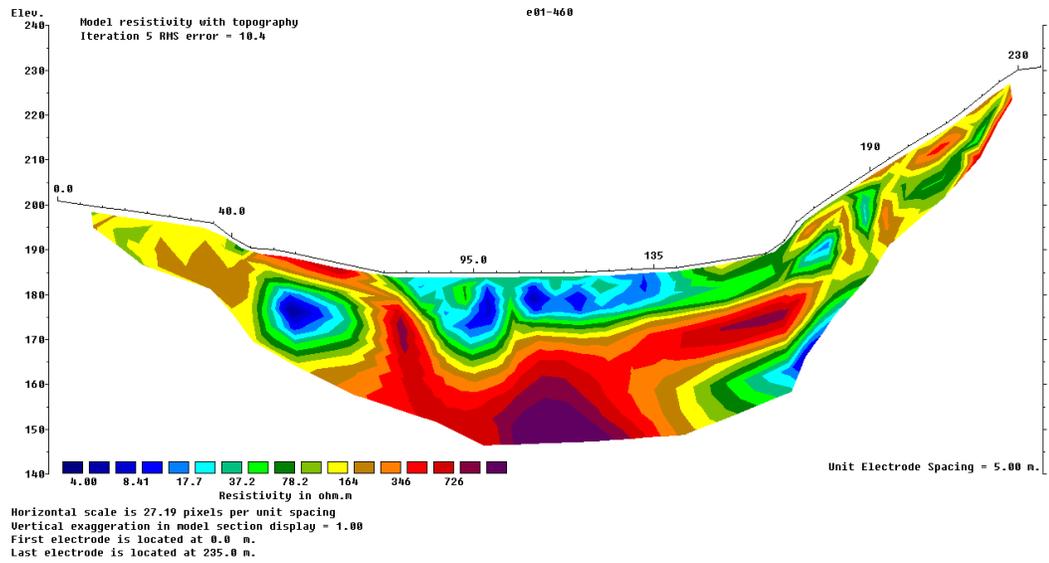


Figura 5.1 – Profilo e-01 con parametri statistici dell'inversione tomografica.

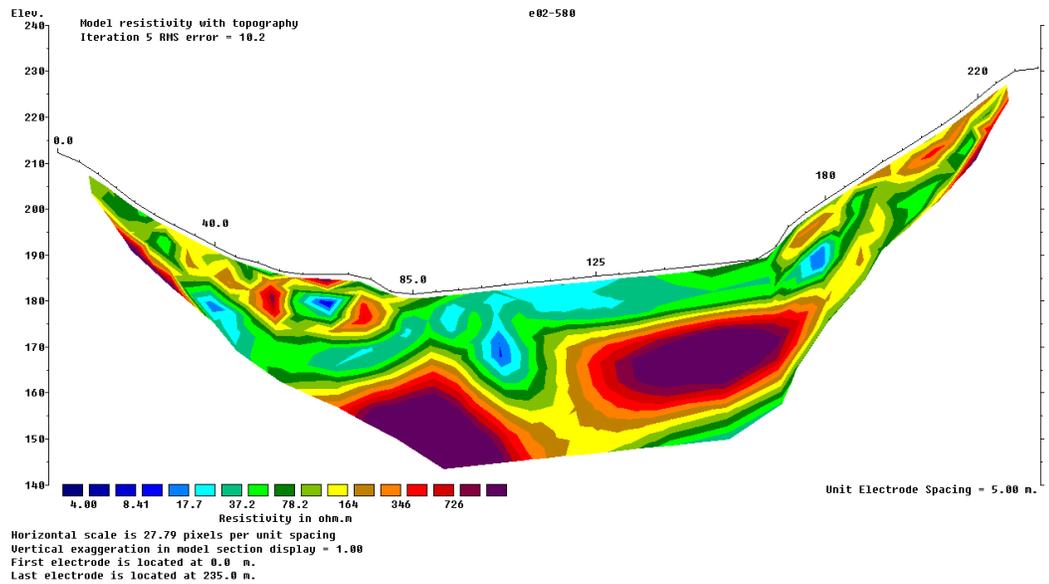
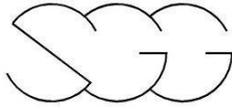


Figura 5.2 – Profilo e-02 con parametri statistici dell'inversione tomografica.



6 – ELABORAZIONE TOMOGRAFIA ELETTRICA 3D

La totalità dei dati derivanti dalle linee con passo 3 metri e la porzione centrale delle misure dei profili elettrici a passo 5 metri, sono stati contemporaneamente utilizzati per l'elaborazione tomografica di un modello 3D della resistività elettrica del sottosuolo, attraverso l'inversione su piattaforma ERTLlab del complesso delle misure di resistenza elettrica ($\Delta V/I$).

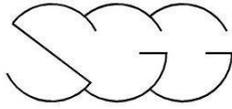
6.1 – Pre-processing dei dati

Preventivamente all'interpretazione tomografica, sono state ricostruite le posizioni assolute dell'intera griglia elettrodica (x,y,z), al fine di ottenere, per ogni quadripolo, il fattore geometrico k corretto (espresso in metri), che fornisce, unitamente ai valori di differenza di potenziale (mV) e corrente (mA), la resistività apparente del terreno in un punto (equazione 6.1):

$$\rho_a = k * \Delta V / I \quad [\Omega \cdot m] \quad (6.1)$$

Le misure sperimentali vengono quindi consultate e trattate mediante il software per tomografia elettrica 3D, ERTLlab SOLVER, che permette di esaminare i parametri relativi ad ogni singolo quadripolo:

- elettrodi che formano il quadripolo e *cavo* di appartenenza;
- intensità di corrente (mA);
- potenziale elettrico (mV);
- standard deviation (rms);
- resistenza elettrica ($\Delta V/I$).



Il software permette di eseguire il *pre-processing* dei dati, con controllo su tutti i parametri dei valori sperimentali che, trattati con analisi statistica complessa (*reciprocal check*), vengono successivamente elaborati. I dati acquisiti hanno mostrato un'ottima qualità; l'analisi *reciprocal check* (cioè su quelle misure per cui esiste il quadrupolo reciproco, costituito dal rovesciamento della coppia di elettrodi di corrente con quelli di potenziale), ha individuato il valore mediano della differenza percentuale delle misure reciproche pari a 1,2% (Figura 6.2).

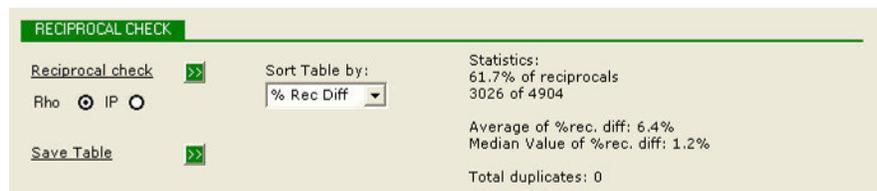


Figura 6.2 – Analisi statistica dei dati *reciprocal check*: computo dei reciproci, con espressione del valore medio e della mediana, espressi percentualmente.

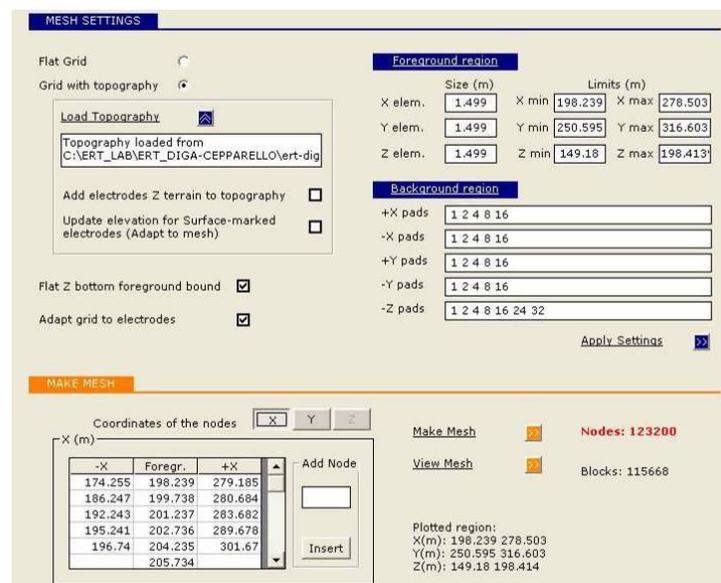


Figura 6.3 – Mesh 1,5x1,5x1,5m con 123200 nodi.

A questo punto si procede alla creazione della mesh, maglia regolare di nodi, il cui elemento più piccolo è rappresentato dalla cella tetraedrica che unisce 4 vertici. Nel caso specifico è stata adottata una **maglia di dimensioni 1.5x1.5x1.5m**, per complessivi **123200 nodi**, al fine di assicurare un'elevata sensibilità e la massima accuratezza del modello finale (Figura 6.3).

6.2 – Inversione tomografica 3D

L'inversione tomografica 3D è avvenuta con software ERTLAB SOLVER partendo dalle misure di resistenza elettrica ($\Delta V/I$). Il modello geoelettrico 3D è stato operato in corrispondenza dell'intero corpo diga. Scopo dell'inversione 3D è risolvere il problema matematico che consente di determinare, per *ogni elettrodo*, i valori del potenziale elettrico per ogni *nodo della mesh*, con approccio numerico del tipo *discretizzazione agli elementi finiti*. L'*inversione 3D* è la ricerca del modello di resistività elettrica del sottosuolo che soddisfi al meglio le misure sperimentali. Un modello risulta un "buon candidato" alla soluzione finale quando la differenza fra i dati di campagna ed i dati modellati (definita *misfit*) è piccola (Figura 6.4).

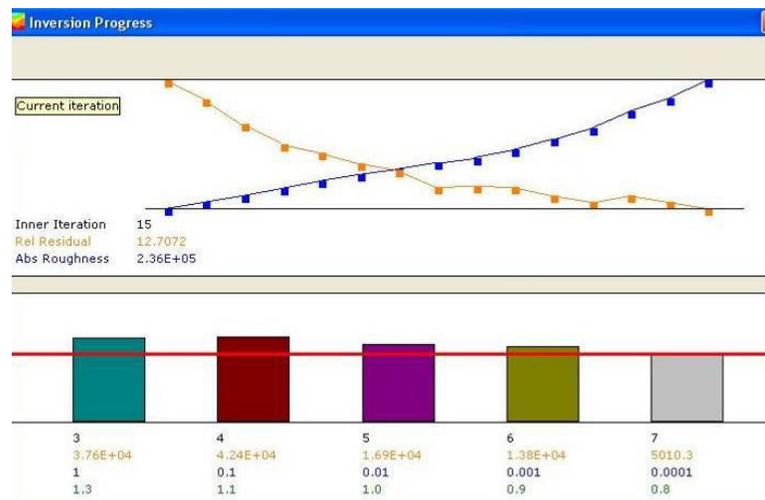
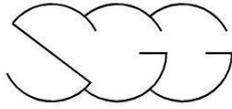


Figura 6.4 – Analisi statistica dell'inversione tomografica 3D: finestra relativa alla fase di elaborazione dell'algoritmo di analisi, con raggiungimento del "misfit" alla iterata numero 7.



Se ciascun dato è affetto da disturbo gaussiano, una buona stima del misfit è rappresentata dall'equazione 6.5:

$$\phi_d(m) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{obs} - d_i^{pred}}{\varepsilon_i} \right)^2 \quad (6.5)$$

in cui:

$\phi_d(m)$	misura statistica del <i>misfit</i>
d_i^{obs}	dati di campagna
d_i^{pred}	dati calcolati
ε_i	deviazione standard del “rumore” sui dati

Dal punto di vista statistico $\phi_d(m)$ è una variabile del tipo *chi-quadro*, il cui valore atteso è pari al numero di dati (N). Quindi, il miglior modello è quello con rapporto fra misfit ed N prossimo ad 1.

DATI STATISTICI DELL'INVERSIONE

mesh in X Y Z	n° nodi	misfit $\phi_d(m)$	$\phi_d(m)/N$
1.5x1.5x1.5m	123200	5.010 (it 7)	1,02

7 – ANALISI DEI RISULTATI

La prospezione geofisica oggetto del presente studio ha avuto come scopo la creazione di un modello 3D della resistività elettrica del sottosuolo, coincidente con il corpo della diga del Cepparello, nel Comune di Poggibonsi. Dall'analisi del modello elettrotomografico 3D sono emerse alcune peculiarità, esposte di seguito secondo un criterio prettamente geofisico.

Negli elaborati 4718sgg03-04-05 sono riportate varie sezioni del modello elettrico 3D, secondo piani orizzontali e verticali; tali sezioni permettono di analizzare in dettaglio i risultati dell'elaborazione tomografica 3D. In particolare, si evince la presenza di un corpo resistivo (prevalentemente ghiaie), localizzato nella parte centrale e di valle del modello 3D. La porzione superficiale del paramento di monte risulta invece essere caratterizzata da litotipi con caratteristiche conduttive (prevalentemente argille e limi) (Figura 7.1).

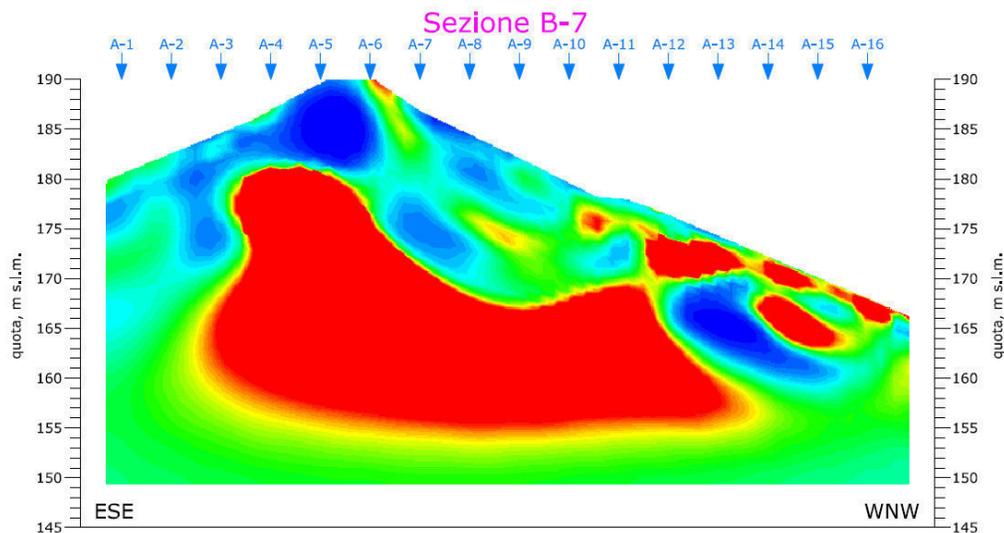


Figura 7.1 – Sezione verticale del modello 3D, condotta da ESE a WNW, in corrispondenza dell'asse mediano della diga del Cepparello.

Il corpo definito resistivo mostra una discreta continuità ed omogeneità, sia verticale che laterale. Tale continuità accenna leggermente a disgregarsi procedendo verso le sponde della diga, mentre è possibile definire una debole immersione del nucleo resistivo della diga verso la sponda sinistra (Figura 7.2).

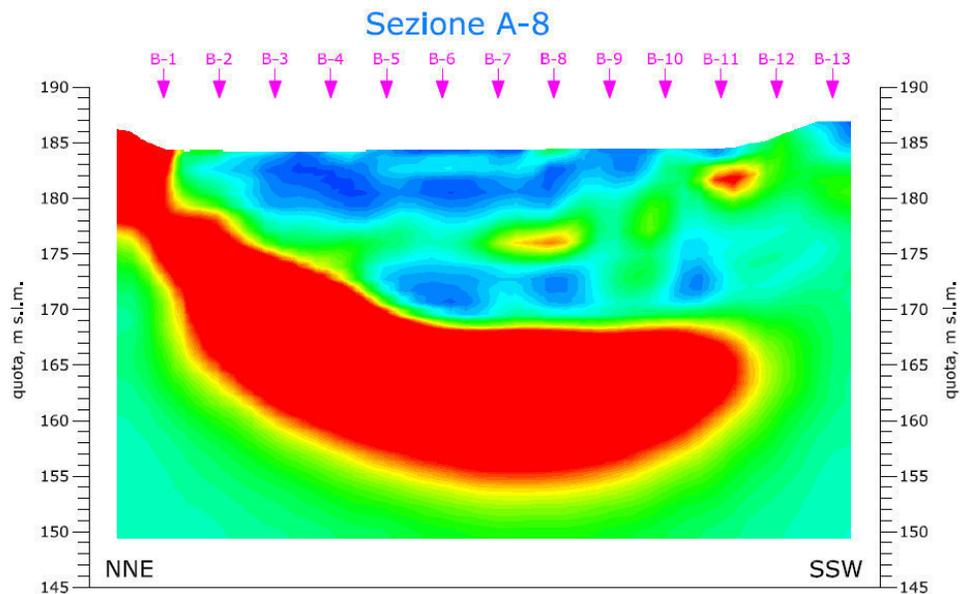


Figura 7.2 – Sezione verticale del modello 3D, condotta da NNE a SSW ortogonalmente all'asse mediano della diga, in corrispondenza della porzione centrale del paramento di valle.

Le sezioni orizzontali eseguite intorno alla quota 166 metri s.l.m. indicano un'interruzione del corpo resistivo ghiaioso (Figura 7.3), imputabile, probabilmente, alla presenza dello scarico di fondo della diga, come si può notare anche sulle sezioni verticali condotte ortogonalmente all'asse mediano, nella zona marginale del paramento di valle della diga (Figura 7.4). La presenza dello scarico di fondo risulta più difficile da riconoscere man mano che le sezioni verticali sul corpo diga procedono verso il coronamento, poiché direttamente aumenta distanza dello scarico dalla superficie.

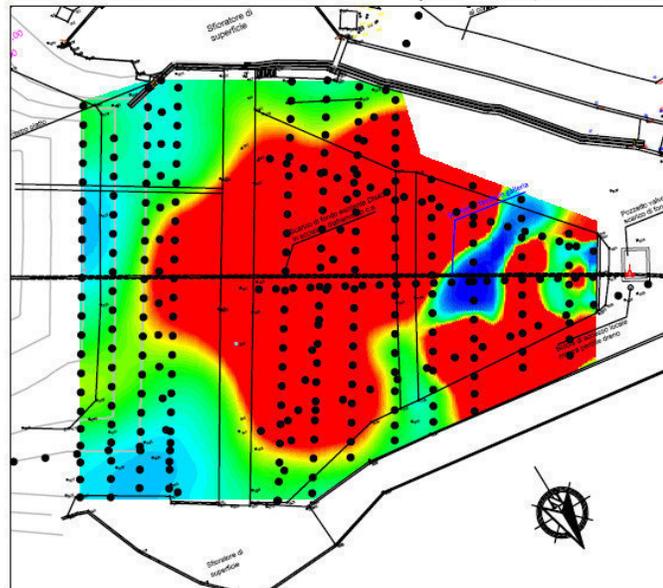


Figura 7.3 – Sezione orizzontale del modello 3D, alla quota di 166 metri s.l.m.; si può notare che il corpo resistivo si localizza in modo forte sulla porzione centrale del paramento di valle, con apparente disgregazione sul margine occidentale.

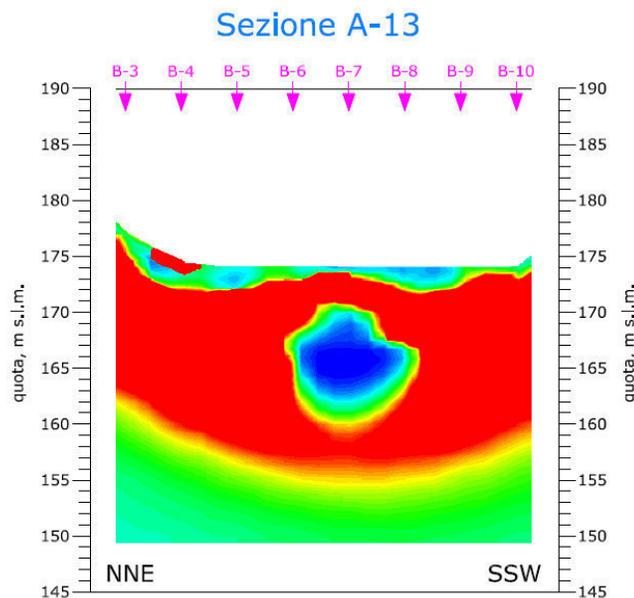


Figura 7.4 – Sezione verticale del modello 3D, condotta da NNE a SSW ortogonalmente all'asse mediano della diga, in corrispondenza del margine occidentale del paramento di valle. L'anomalia conduttiva al centro è riferibile alla presenza dello scarico di fondo.

I profili elettrici e-01, e-02, e-03, acquisiti con passo 5 metri trasversalmente e longitudinalmente al corpo diga, sono stati elaborati anche con software 2D dedicato (RES2DINV). Dall'analisi delle sezioni elettrotomografiche è emersa, anche in questo caso, la presenza di un corpo resistivo che occupa massivamente la porzione centrale del corpo della diga del Cepparello (Figura 7.5 – 7.6). In prossimità della sponda sinistra, si evince una breve lacuna, dovuta con molta probabilità alla presenza di una struttura parallela all'asse (prog. 150m del profilo e-02).

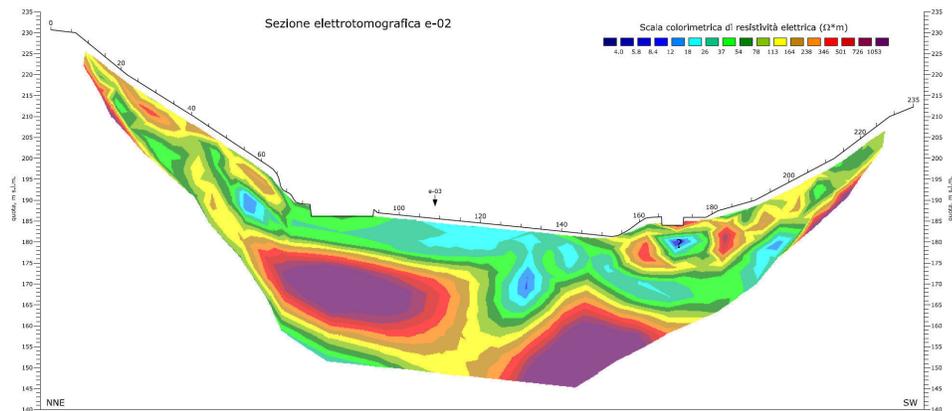


Figura 7.5 – Sezione elettrotomografica e-02, condotta trasversalmente al corpo diga.

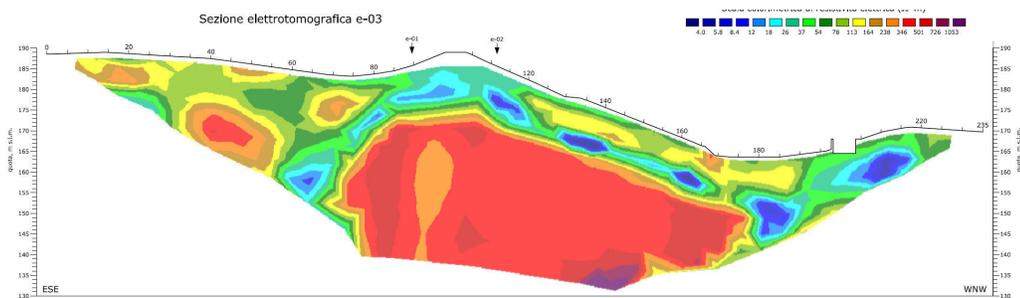


Figura 7.6 – Sezione elettrotomografica e-03, condotta longitudinalmente al corpo diga.

I fianchi della diga del Cepparello appaiono costituiti entrambi dallo stesso materiale, che mostra un comportamento elettricamente resistivo e piuttosto caotico (probabilmente litotipi lapidei arenacei con alternanze).

In Figura 7.7 sono riportate due viste prospettiche, rispettivamente da Nord e da Sud del corpo della diga del Cepparello. Si nota la distribuzione dei materiali conduttivi (principalmente argille e limi), in azzurro, sulla superficie del paramento di monte della diga. Il corpo resistivo (principalmente ghiaie), in rosso, risulta invece occupare in modo continuo tutta la porzione centrale del paramento di valle della diga.

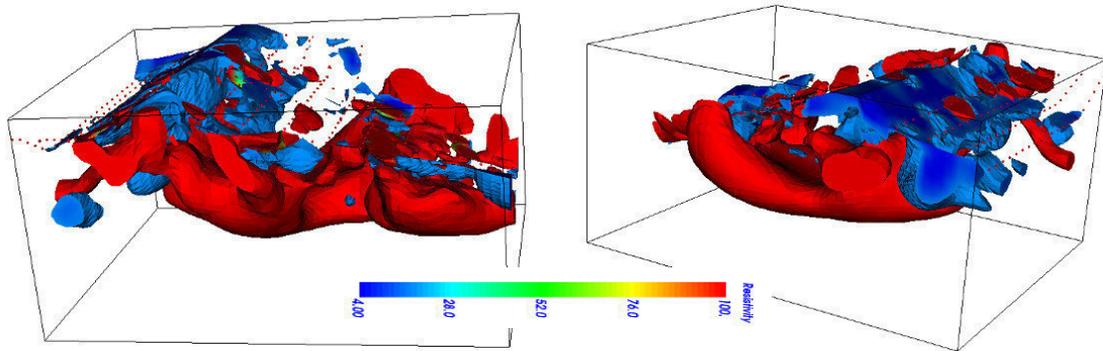


Figura 7.7 – Viste prospettiche del modello 3D della diga. A sinistra vista prospettica da Nord; a destra, vista prospettica da Sud. Evidenza della distribuzione dei materiali di tipo conduttivo e resistivo.

Siena, marzo 2016

Dr.Geol. Claudio Rossi