MISURA DELLA RESISTIVITA' ELETTRICA DEI TERRENI IN LABORATORIO

Claudia Festa, Cesare Comina, Sebastiano Foti e Renato Lancellotta Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino e-mail: <u>claudia.festa@polito.it</u>

Sommario

Le tecniche geofisiche costituiscono un valido aiuto per la caratterizzazione geotecnica dei terreni e possono fornire informazioni complementari a quelle dedotte con i comuni mezzi di indagine. Questa nota presenta la misura della resistività di alcuni campioni ricostituiti con l'utilizzo di due differenti apparecchiature messe a punto in laboratorio. Con la prima, un ago sonda, sono state condotte delle misure dirette puntuali ed invasive; con la seconda, una cella edometrica strumentata con una serie di elettrodi, è stato possibile effettuare delle misure indirette ed ottenere delle ricostruzioni tomografiche 3D del campo di resistività.

1. Correlazioni tra resistività elettrica e caratteristiche geotecniche del terreno.

Esistono in letteratura diverse correlazioni teoriche ed empiriche che legano la resistività elettrica di un terreno alle sue caratteristiche geotecniche (ad esempio il grado di saturazione, la sua composizione mineralogica, la distribuzione granulometrica e la porosità). Il parametro più rilevante ai fini del comportamento elettrico è sicuramente la porosità (Bussian, 1983).

Tra le correlazioni teoriche tra conducibilità elettrica e porosità ricordiamo quella proposta da Maxwell (1904) che prende in considerazione il comportamento di una miscela costituita da una fase fluida e da inclusioni solide, aventi bassa frazione di volume. Tale modello ha la seguente formulazione:

$$\sigma_{mix} = \sigma_1 \left(1 - \frac{1 - n}{1 - L} \right) \tag{1}$$

in cui *L* è il coefficiente di demagnetizzazione ed è funzione della forma delle inclusioni, σ_{mix} e σ_I sono rispettivamente i valori di conducibilità della miscela e delle inclusioni ed *n* è la porosità. Questa legge è però limitata nella sua applicabilità a miscele a bassa concentrazione; per superare questo limite è stato introdotto il *self-similar medium* (Sen et al., 1981) riempito di ellissoidi:

$$\frac{d_1(\sigma_1 - \sigma_{mix})}{\sigma_{1.} + \left(\frac{1-L}{L}\right)\sigma_{mix}} + \frac{d_2(\sigma_2 - \sigma_{mix})}{\sigma_2 + \left(\frac{1-L}{L}\right)\sigma_{mix}} = 0$$
(2)

in cui i pedici 1 e 2 si riferiscono ai diversi componenti della miscela rispetto alla frazione di volume *d* ed alla conducibilità σ . Tale formulazione è applicabile sia a basse che ad alte concentrazioni ed è *self consistent* in quanto la conducibilità del mezzo coincide con la conducibilità della miscela e non si ha la necessità di definire un limite superiore e inferiore come per la maggior parte delle leggi teoriche da letteratura. Da un punto di vista empirico esistono numerose correlazioni che considerano la conducibilità dell'elettrolita, la concentrazione ionica e la temperatura. La più nota fra queste è la legge di Archie (1942), applicabile nel caso in cui non ci sia conducibilità superficiale delle particelle e che le stesse siano resistive:

$$\sigma = a\sigma_{w}S^{c}n^{m} \tag{3}$$

in questa σ_w è la conducibilità del fluido, *n* la porosità ed *S* il grado di saturazione. I coefficienti *a*, *c* ed *m* sono dei parametri sperimentali.

2. Apparecchiature di laboratorio.

Per le misure in laboratorio della conducibilità sono state utilizzate due differenti apparecchiature. Una che si basa sul metodo diretto di misura, la seconda sulla soluzione di un problema inverso.

Le misure dirette sono state eseguite per mezzo di un ago sonda (Cho et al., 2004) costituito da una cannula in acciaio inossidabile coassiale ad un conduttore interno in rame isolato dall'esterno per mezzo di una resina e-



Figura 1 Schema elettrico del circuito e della sonda ago.

possidica. Questa sonda è stata allocata in serie ad una resistenza elettrica nota (R_{fix}) in un circuito elettrico (Figura 1). Il circuito completo è stato collegato ad un generatore di segnale (SG), mentre le letture sono state eseguite con un oscilloscopio a due canali. La misura della differenza di potenziale a valle della resistenza nota (ΔV_N) ci consente di determinare il valore delle perdite di carico nel terreno in cui è immersa la sonda secondo le relazioni:

$$i = \frac{V_{S} - \Delta V_{N}}{R_{fix}}$$

$$R_{N} = \frac{\Delta V_{N}}{i} = \frac{\Delta V_{N}}{V_{S} - \Delta V_{N}} R_{fix} \qquad (4)$$

Per eseguire le misure indirette di ricostruzione tomografica, si è invece utilizzata una cella edometrica appositamente progettata in collaborazione con *l'Universitat Politecnica de Catalunya* (Comina et al., 2005). La cella è analoga ad un edometro convenzionale sul cui anello di confinamento e sui basamenti superiore e inferiore, sono stati allocati 42 elettrodi. Per consentire l'isolamento elettrico l'anello di confinamento è stato realizzato in materiale plastico a bassa deformabilità. Le misure vengono raccolte dall'esterno del campione e, per mezzo di un processo di inversione, si ottiene una mappatura della distribuzione della conducibilità interna dell'oggetto (Borsic et al., 2005).

3. Misure e analisi dei risultati.

Prima di eseguire le misure dirette puntuali con l'ago sonda, è stato necessario procedere con la sua calibrazione. Il segnale in ingresso nel circuito è caratterizzato da una frequenza f pari a 500 Hz e una ampiezza A pari a 2 V_{pp} per ottenere una lunghezza d'onda che sia paragonabile ad un REV (*Rapresentative Element Volume*). La calibrazione è stata eseguita utilizzando



Figura 2 Grafico di calibrazione della sonda ago.

delle soluzioni acquose di NaCl a diversa concentrazione molare e di resistività nota (Figura 2). Sono inoltre state eseguite una serie di prove preliminari volte a esplorare le potenzialità della tecnica.

A titolo di esempio si riporta una prova effettuata per testare la capacità di risoluzione della sonda al passaggio di strato in un campione di terreno stratificato, costituito da tre materiali

differenti (Figura 3). Lo strato inferiore è formato da sabbia del Kenya, lo strato intermedio da sabbia del Ticino (TS9) ed infine lo strato superiore è costituito da argilla di Beaucaire. Questo tipo di stratificazione consente di verificare l'attendibilità dello strumento nel rilevare il passaggio sia da uno strato meno conduttivo (argilla di Beaucaire) ad uno strato più conduttivo (sabbia TS9), che viceversa (da TS9 alla sabbia del Kenya). L'argilla di Beaucaire risulta essere meno conduttiva della sabbia TS9 perché è elettricamente scarsamente attiva mentre la

sabbia TS9 è stata saturata con acqua corrente, senza compattazione e quindi con un elevato indice dei vuoti. Viceversa la sabbia del Kenya è più resistiva di TS9 poiché ha granulometria più fine e quindi inferiore indice dei vuoti. Nella figura 3 è riportato l'andamento della resistività misurata in funzione della profondità sovrapposto alla foto del campione: appare ben visibile la sensibilità della sonda al passaggio di strato.

Una seconda applicazione della tecnica riguarda la caratterizzazione di provini sedimentati in laboratorio. In particolare i provini analizzati derivano dalla sedimentazione di un residuo di lavorazione dell'alluminio proveniente da uno stabilimento industriale sito in Porto Scuso (CA). Sono stati preparati cinque campioni mescolando il materiale, costituito da una miscela di ossidi colloidali e minerali argillosi, con cinque diversi additivi per determinarne le caratteristiche di sedimentazione in diversi ambienti. Obiettivo delle misure era stimare le variazioni di porosità all'interno del campione e confrontarla con il suo valore medio. Sono stati quindi tracciati gli andamenti della resistività con la profondità di ogni campione e sono state fatte delle previsioni di porosità tramite la legge analitica proposta da Maxwell e la legge empirica di



Figura 3 Andamento della resistività del campione stratificato.

Archie. Per quest'ultima si è considerato il valore di *a* pari a 1 mentre il valore di *m* è stato preso pari a 1,3 (valido per campioni ricostituiti non consolidati). La legge di Maxwell è stata semplificata, considerando il caso limite di miscela costituita da acqua e fase solida resistiva con particelle di forma ellittica, per cui, posto L=1/3, la (1) diventa:

$$\frac{\sigma_{mix}}{\sigma_{w}} = \frac{2 \cdot n}{(3 - n)} \cdot$$
(5)

In figura 4 sono riportati gli andamenti della porosità all'interno del campione ottenuti con le diverse leggi per il campione sedimentato in ambiente acido (pH=5,5); viene anche riportata, per confronto, l'interpolazione lineare ricavata imponendo che al valore di porosità medio del campione corrisponda il valore di conducibilità medio e che al valore unitario di porosità corrisponda il valore di conducibilità del fluido che sovrasta il campione. Gli andamenti ottenuti riproducono le variazioni di porosità attese nel campione e presentano una stima di porosità

media in buon accordo con la determinazione diretta (rispettivamente n=0.86 per la legge di Maxwell e 0.84 per la legge di Archie a fronte di un valore misurato pari a 0.83). Tutti e tre gli andamenti definiscono un valore di porosità che varia in funzione dell'approfondimento, passando da valori di 0,9 negli strati superficiali, sino a valori di 0,75 sul fondo. Tali valori sono significativi perché in buon accordo con le stime di porosità degli strati superficiali dei depositi sedimentali. Con questa tecnica, in definitiva, si riesce a stimare la variazione di porosità che viene a crearsi in un campione sedimentato ed ha una vasta applicabilità nell'ambito delle problematiche di laboratorio: basti pensare alla possibilità di poter stimare il grado di omogeneità dei campioni ricostituiti.

Per quanto riguarda le misure indirette, l'apparecchiatura edometrica citata è in una fase di messa a punto. A titolo di esempio si riportano i risultati di una prova edometrica di tipo convenzionale sulla sabbia del Kenya, utilizzando un campione deposto direttamente in cella con un livello di densità relativa iniziale pari al 60 %. Le misure tomografi-



Figura 4: Andamento della porosità per il provino W ph 5.5 dei residui sedimentati di Porto Scuso (CA).

Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2006 - IARG 2006 Pisa, 26 - 28 giugno 2006

che sono state eseguite in corrispondenza di ciascun gradino di carico per valutare la variazione di conducibilità e la sua corrispondente distribuzione spaziale. A tal proposito si è evidenziato come all'istante di applicazione del carico il campo di conducibilità ricostruito subisca delle marcate variazioni locali che vanno via via ad omogeneizzarsi con il passare del tempo.

A prova terminata si è inoltre innescato un processo di diffusione, per mezzo di un gradiente idraulico tra la cella e un serbatoio contenente una soluzione acquosa 3M di NaCl. Il processo di diffusione è stato attentamente monitorato tramite misure elettriche eseguite ogni quarto d'ora.



Figura 5 Ricostruzioni tomografiche delle fasi iniziale e finale della diffusione.

Nella Figura 5 sono riportate la fase iniziale e finale del processo di diffusione presentate in due diverse scale di colore. Da queste prime è ben visibile un aumento di conducibilità su alcuni elementi della mesh dovuto all'infiltrazione della soluzione acquosa a più alta concentrazione. Nella fase finale d'altro canto si evidenzia un processo di progressiva omogeneizzazione del campione a valori di conducibilità medi crescenti. Per una miglior comprensione dei dati sperimentali ottenuti si intende procedere alla costruzione di un modello matematico agli elementi finiti che permetta di simulare prove di diffusione e di carico.

Ringraziamenti

Si ringraziano: Guido Musso per la collaborazione alla ricerca, Roberto Maniscalco e Giampiero Bianchi per l'assistenza in laboratorio e Alessandra Carrera per i dati relativi alle misure dirette della porosità dei campioni di materiale residuale di Porto Scuso.

Bibliografia

Archie, G.E. (1942) "*The electrical resistivity log as an aid to determining some reservoir characteristics*" Trans AIME, 146; pp. 54 - 63.

Borsic A., Comina C., Lancellotta R., Foti S. e Musso G. (2005) "Imaging heterogeneities in sand samples with ERT: laboratory results" Geotechnique, vol. 50, number 7, pp 539 - 547.

Bussian E. (1983) "*Electrical conductance in a porous medium*" Geophysics, vol. 48. number. 9; pp. 1258 - 1268.

Cho G.C., Lee J.S. and Santamarina J.C. (2004) "Spatial Variability: High-resolution Assessment with Electrical Needle Probe", ASCE J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 130, no. 8; pp. 843 - 850.

Comina C., Foti S., Lancellotta R., Musso G. e Romero E. (2005) "Una nuova cella per lo studio di processi idro-chemo-meccanici", Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, Ancona, 29 giugno-1 luglio.

Maxwell J. C. (1904) "A treatise on electricity and magnetism", Clarendon press, Oxford.

Sen P. N., Scala C. and Cohen M. H. (1981) "A Self similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads" Geophysics, vol. 46 number 5; pp. 781 - 795.