

## SVILUPPO DI UN SENSORE INNOVATIVO PER LA MISURA DEL CONTENUTO D'ACQUA DI TERRENI PARZIALMENTE SATURI

Simona Guglielmi

*Scuola Superiore Meridionale  
simona.guglielmi@unina.it*

Marianna Pirone

*Università degli studi di Napoli "Federico II"  
marianna.pirone@unina.it*

Nicola Amatucci

*Università degli studi di Napoli "Federico II"  
nicola.amatucci@unina.it*

Umberto Cesaro

*Università degli studi di Napoli "Federico II"  
ucesaro@unina.it*

Mauro D'Arco

*Università degli studi di Napoli "Federico II"  
darco@unina.it*

Gianfranco Urciuoli

*Università degli studi di Napoli "Federico II"  
gianfranco.urciuoli@unina.it*

### Sommario

La nota presenta lo sviluppo e la calibrazione di un sistema innovativo per la misura del contenuto d'acqua in terreni parzialmente saturi, basato sulla spettroscopia d'impedenza. Tale tecnica, relativamente recente e poco comune in applicazioni geotecniche, permette di caratterizzare un campione di terreno a partire dalle sue proprietà elettriche, determinate applicando una tensione alternata e misurando l'intensità di corrente nel campione per valori di frequenza compresi nell'intervallo [500 Hz - 50 kHz].

L'impedenza del mezzo, dovuta sia alla resistenza opposta al passaggio di corrente sia alla reattanza, ovvero alla capacità di immagazzinare e cedere energia, dipende dal contenuto d'acqua del campione di terreno. La sperimentazione di laboratorio discussa in questa nota è volta a costruire una funzione di calibrazione del sistema di misura.

I risultati preliminari mostrano un adeguato grado di ripetibilità delle misure e suggeriscono l'esistenza di una correlazione monotona tra il modulo dell'impedenza e il contenuto d'acqua gravimetrico.

### 1. Introduzione

Il monitoraggio geotecnico delle condizioni idrauliche di coltri parzialmente sature riveste un ruolo cruciale nella previsione dell'innesco di colate rapide. In contesti idrogeologici affetti da tali fenomeni di instabilità, la mitigazione del rischio da frana può essere convenientemente affidata a sistemi di early

warning basati sul monitoraggio delle grandezze predisponenti l'innesco come la suzione e/o il contenuto d'acqua nel pendio.

A tal proposito, la nota propone un sistema innovativo per la misura del contenuto d'acqua in terreni parzialmente saturi, basato su una tecnica elettromagnetica spesso adottata per l'analisi delle proprietà dei materiali, ma poco nota in ambito geotecnico. Ai fini dell'utilizzo del nuovo sistema di misura per la determinazione del contenuto d'acqua in sito, è stato sviluppato un programma sperimentale volto a individuare una correlazione tra le misure di impedenza eseguite su campioni di terreno di contenuto d'acqua noto ed il contenuto d'acqua degli stessi.

A valle della preparazione di campioni di terreno a diversi contenuti d'acqua in accordo ad una procedura standard, tale sperimentazione ha permesso di valutare l'efficacia e la ripetibilità del sistema di misura e di individuare una funzione di calibrazione del dispositivo. Il sistema presentato, di realizzazione relativamente semplice ed economica, si configura come uno strumento di supporto a tecniche di misura tradizionali, quali le sonde TDR. Inoltre, il sistema consentirà, a valle di ulteriori approfondimenti e ottimizzazioni volti a meglio caratterizzare la correlazione tra impedenza e contenuto d'acqua nei terreni, lo sviluppo di sonde geometricamente più adatte all'installazione in sito ed al monitoraggio di lungo termine.

## 2. Spettroscopia d'impedenza

La spettroscopia d'impedenza (Impedance spectroscopy, IS) è una tecnica di misura relativamente recente, che si pone l'obiettivo di caratterizzare le proprietà elettriche di un materiale quando esso è stimolato tramite un segnale elettrico. In particolare, tale tecnica consiste nella misura della impedenza complessa  $Z(f)$ , che rappresenta l'opposizione del mezzo al passaggio di una corrente elettrica alternata e dipende dalla frequenza,  $f$  (Barsoukov & Macdonald, 2005). Essa pertanto generalizza la legge di Ohm ai circuiti funzionanti in regime sinusoidale ed in coordinate rettangolari (Figura 1) è espressa come:

$$\frac{V(f)}{I(f)} = Z(f) = Z' + jZ'' \quad (1)$$

$$Re(Z) = Z' = |Z|\cos\theta \quad Im(Z) = Z'' = |Z|\sin\theta \quad (2)$$

La parte reale dell'impedenza,  $Z'$ , è associata al fenomeno dissipativo e rappresenta dunque la componente resistiva (*resistenza*), mentre la parte immaginaria,  $Z''$ , corrisponde a fenomeni energetici di accumulo, pertanto costituisce la parte capacitiva (*reattanza*).

In coordinate polari (Figura 1), angolo di fase e modulo sono rispettivamente pari a:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Z''}{Z'}\right) \quad (3)$$

$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (4)$$

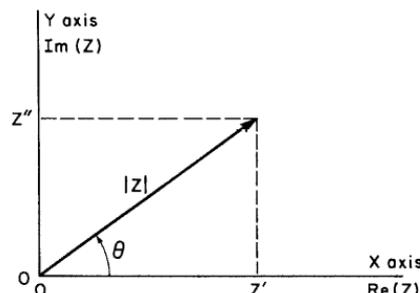


Fig 1. Impedenza  $Z$  rappresentata come vettore planare in coordinate rettangolari e polari.

### 3. Sperimentazione di laboratorio

#### 3.1 Materiale testato e programma sperimentale

Il terreno utilizzato per la sperimentazione di laboratorio è una piroclastite prelevata da piano campagna presso il sito di Nocera Inferiore (SA) (Santo et al., 2021). La sequenza stratigrafica tipica dei Monti Lattari (Forte et al., 2019), riconosciuta al sito di prelievo, identifica un livello superficiale di terreni più recenti, livello A, depositati a seguito dell'eruzione del Somma Vesuvio del 79 d.C., all'interno del quale sono riconoscibili un livello superiore, A1, vegetato e affetto da processi biogeochimici, ed un livello inferiore, A2, di sabbie limose ricche in pomici (Figura 2). Il terreno prelevato appartiene, dunque, al livello A e risulta prevalentemente sabbioso (SF=49%; Figura 2b), con una significativa componente ghiaiosa (GF=31%) e limosa (MF=18%). Le principali proprietà fisiche di tale terreno sono riportate in Tabella 1.

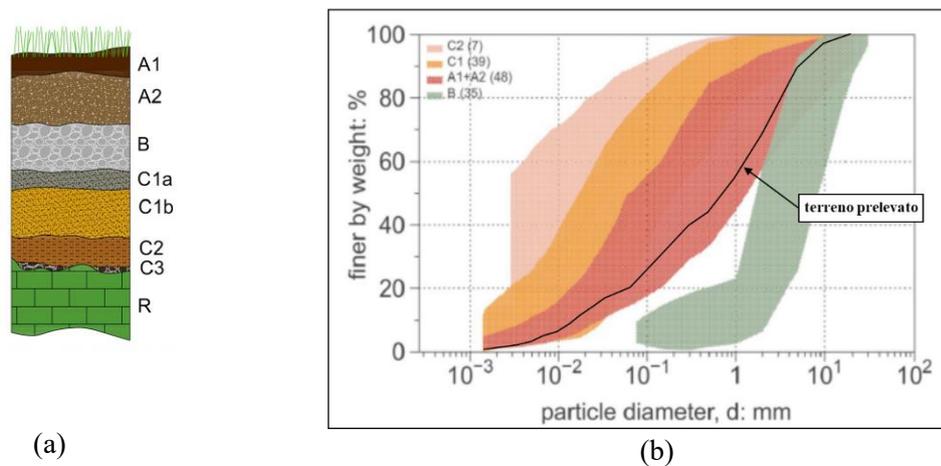


Fig 2. (a) Sequenza stratigrafica riconosciuta in sito (da Forte et al., 2019) e (b) involucri delle curve granulometriche per ciascuno strato (in parentesi il numero di campioni analizzati).

Tabella 1. Proprietà fisiche del terreno testato.

n (-)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	IP (%)
0,6-0,7	25,1	10,09	n.d.

I campioni di terreno sono stati preparati strato per strato per deposizione pluviale (Battaglio et al., 1979; Lagioia et al., 2006) ad una porosità confrontabile con quella di sito ( $n=0,6$ ), all'interno di contenitori di forma e dimensioni compatibili con la geometria del sensore. Dopo aver completamente essiccato in stufa il materiale, ciascuno strato del campione è stato realizzato per caduta da un imbuto posizionato a distanza costante (20 cm) dalla base dello strato di riempimento. A partire dai campioni di materiale secco, si è proceduto quindi alla imbibizione mediante un sistema di tipo sprinkler, al fine di favorire la distribuzione omogenea dell'acqua di imbibizione ed evitare il collasso volumetrico. Con questa tecnica è stato ottenuto un gruppo di campioni a 4 diversi valori di contenuto d'acqua gravimetrico:  $w=21\%$ ,  $31\%$ ,  $42\%$  e  $57\%$ , corrispondenti a gradi di saturazione rispettivamente di:  $S_r=36\%$ ,  $54\%$ ,  $71\%$  e  $96\%$ . Al fine di investigare la ripetibilità delle misure, ciascun valore di  $w$  è stato riprodotto su una terna di campioni, per un totale di 12 campioni testati. Come sarà discusso in dettaglio al Paragrafo 4, per ciascun campione sono state eseguite misure a diversi intervalli di tempo dal momento dell'imbibizione, fino al raggiungimento di una condizione di invarianza del valore di impedenza rilevato (condizione stazionaria). A seguito dell'imbibizione, perciò, i campioni sono stati sigillati in modo da minimizzare le perdite d'acqua per evaporazione e pesati prima dell'esecuzione di ciascuna misura.

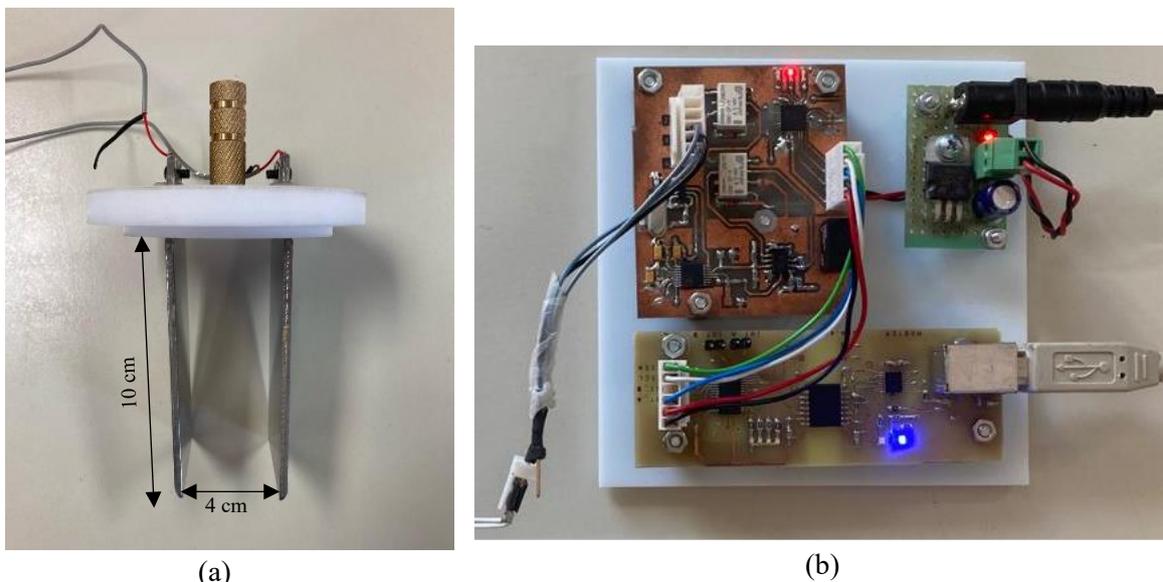
### *3.2 Sistema di misura*

Il sistema di misura si compone di un sensore, sviluppato attualmente in versione prototipale (Figura 3a), e di un circuito misuratore di impedenza (Figura 3b), provvisto di un generatore di segnali a sintesi digitale on-board e di una scheda di conversione analogico-digitale (Analog device: AD5943, 2017). Gli elettrodi consistono in due piastre di acciaio inossidabile, che vengono infisse nel campione di terreno per l'esecuzione della misura. L'esecuzione della misura è controllata da remoto tramite un pc interfacciato al sensore via USB con un software di controllo dedicato.

Attraverso il generatore, il sistema di misura applica agli elettrodi immersi nel campione di terreno una tensione alternata la cui frequenza è linearmente incrementata per effettuare la scansione dell'intervallo [500 Hz - 50 kHz]. Tale intervallo è selezionato per minimizzare gli effetti di disturbo prodotti dall'ambiente circostante, da cui le misure di impedenza sono sistematicamente affette per valori di frequenza più elevati. L'applicazione della tensione tra le piastre determina il passaggio di una corrente nel terreno, condizionata dall'impedenza del terreno. Dunque il segnale di risposta in corrente viene trasdotto, digitalizzato ed elaborato dal circuito, al fine di determinare modulo e angolo di fase di  $Z(f)$ . Per eseguire la taratura del sistema di misura è stato predisposto un misurando in grado di offrire valori noti di impedenza. Il sistema è costituito da un resistore a decadi e un condensatore di capacità costante in serie. Tale operazione di taratura è stata eseguita per valori discreti di frequenza, in un intervallo opportunamente selezionato in base alle caratteristiche operative del sistema prototipale proposto e all'intervallo di risposta rintracciato nei campioni esaminati.

La taratura ha permesso di verificare la linearità del sistema di misura e ha evidenziato la sua accuratezza, in termini di scostamento dei valori di impedenza misurati da quelli nominali. In Figura 4 sono illustrati i risultati della taratura per il valore di frequenza fissato di 10 kHz.

Al fine di investigare la presenza di artefatti nelle misurazioni di impedenza eseguite sul campione di terreno in esame, ciascuna misura è stata acquisita simultaneamente sia con il prototipo, sia con un impedenziometro da banco, assunto in tal caso come riferimento. Quest'ultimo opera a frequenze discrete, pertanto la frequenza di misura è stata opportunamente fissata, a seguito della familiarizzazione con il dispositivo, al valore di 1 kHz.



*Fig 3. (a) Prototipo di sensore e (b) circuito misuratore di impedenza costituenti il dispositivo di misura.*

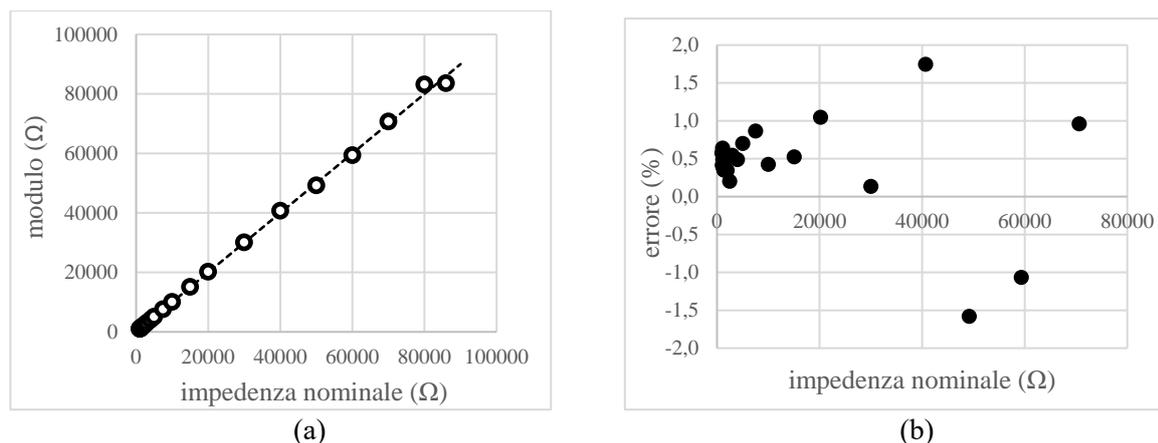


Fig 4. (a) Linearità del sistema e (b) errore di misura contro un sistema di impedenza nota ( $f=10$  kHz).

#### 4. Risultati preliminari

Nel seguito sono mostrati alcuni risultati preliminari ottenuti sulle terne di campioni menzionate. Occorre precisare che, per ciascun campione, è stata raggiunta una condizione di equalizzazione in termini di distribuzione dell'acqua di imbibizione nel campione di terreno. A tal fine, previa verifica dell'assenza di significative perdite per evaporazione, su ciascun campione le misure di impedenza sono state eseguite a diversi intervalli di tempo (2h, 4h, 8h, 24h, 48h, 3gg, 7gg, 21gg) dal momento dell'imbibizione, fino ad ottenere una misura sovrapponibile alla precedente. I risultati nel seguito mostrati sono dunque riferiti alla misura in condizioni di equilibrio.

La Figura 5 mostra l'andamento del modulo (Figura 5a) e della fase (Figura 5b) dell'impedenza, sull'intero intervallo operativo di frequenza, per le quattro terne di campioni imbibiti. Si osserva innanzitutto che il modulo dell'impedenza in tutti i casi si stabilizza ad un valore costante ed indipendente dalla frequenza sin da basse frequenze ( $<1$  kHz); la fase, invece, ha un andamento lineare con la frequenza fino a  $f=45$  kHz. Fatta eccezione per la terna a  $w=21\%$ , le misure effettuate mostrano un elevato livello di ripetibilità. Confrontando il comportamento del mezzo per diversi  $w$ , si osserva che il modulo dell'impedenza diminuisce all'aumentare di  $w$ : ciò è atteso, in considerazione della più elevata conducibilità elettrica dell'acqua interstiziale rispetto al terreno.

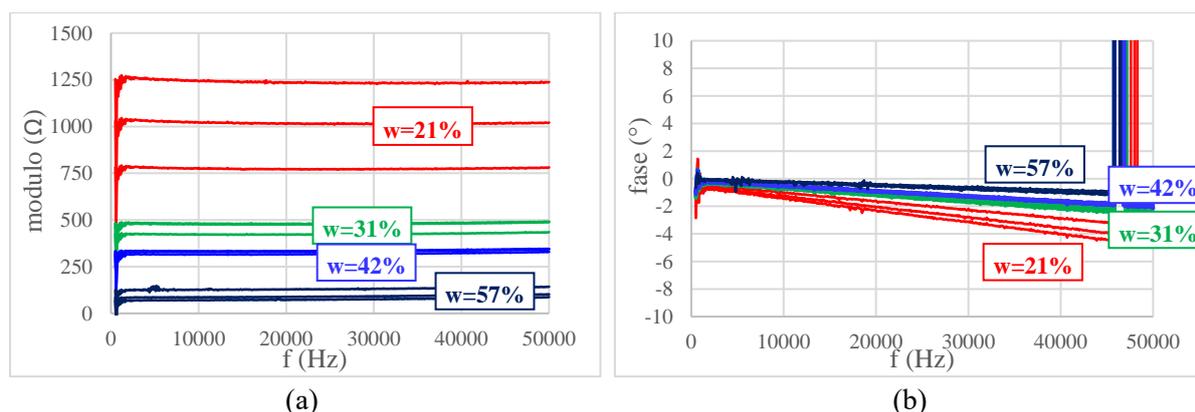


Fig 5. (a) Andamento del modulo e (b) della fase dell'impedenza al variare della frequenza, per i contenuti d'acqua da  $w=21\%$  a  $57\%$ .

In Figura 6 sono riportati, in scala lineare, i valori del modulo dell'impedenza, indipendente dalla frequenza, in funzione del contenuto d'acqua del campione corrispondente. Sono inoltre riportati con simboli vuoti i valori del modulo dell'impedenza misurati con l'impedenzimetro da banco, operante a frequenza fissata.

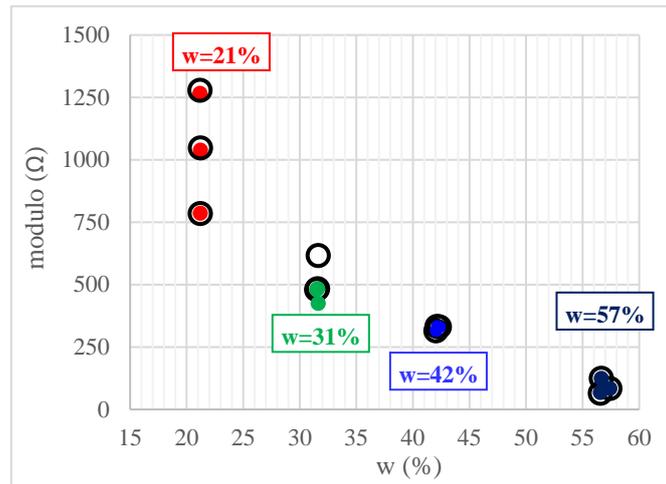


Fig 6. Correlazione preliminare tra  $w$  ed il modulo dell'impedenza e confronto con le misure eseguite su ciascun campione utilizzando un impedenziometro da banco (simboli vuoti).

L'accordo tra i valori del modulo dell'impedenza ottenuti attraverso il sistema qui presentato e l'impedenziometro di riferimento è soddisfacente e conferma l'efficacia del dispositivo messo a punto. Inoltre, sebbene preliminari, i risultati di Figura 6 suggeriscono l'esistenza di una correlazione monotona tra le misure di modulo d'impedenza ed i contenuti d'acqua gravimetrici testati.

## 5. Conclusioni

È stato presentato uno studio finalizzato allo sviluppo di un sensore innovativo per la misura del contenuto d'acqua in terreni parzialmente saturi, basato sulla spettroscopia di impedenza, potenzialmente integrabile in reti di monitoraggio di pendii in coltri piroclastiche suscettibili di colate rapide.

Risultati preliminari confermano l'efficacia del sistema di misura nel caratterizzare le proprietà elettriche del terreno esaminato. Il sistema appare inoltre capace di descrivere la dipendenza di tali proprietà dal contenuto d'acqua gravimetrico del terreno stesso, permettendo così di individuare una correlazione monotona tra la misura del modulo dell'impedenza ed il contenuto d'acqua, con un adeguato grado di ripetibilità, al punto da configurare la metodologia descritta come una promettente alternativa alle tecniche di misura tradizionali.

Sviluppi futuri includono l'indagine della relazione che intercorre tra le misure di angolo di fase e contenuto d'acqua, ma anche il completamento della sperimentazione attraverso l'aggiunta di terne a contenuti d'acqua non esplorati e l'esecuzione di una imbibizione progressiva su uno o più campioni.

## Ringraziamenti

Questa ricerca è stata finanziata dal PON Programma R&I 2014-2020 (MITIGO, ARS01\_00964).

## Bibliografia

- AD5934 (2017). 250 kSPS, 12-Bit Impedance Converter, Network Analyzer, Data sheet.
- Barsoukov E., Macdonald J.R. (2005). Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment, and Applications. Wiley.
- Battaglio M., Bellotti R., Pasqualini E. (1979). La deposizione pluviale come mezzo per la preparazione dei provini di sabbia. Rivista Italiana di Geotecnica, 2, p.106.
- Forte G, Pirone M, Santo A, Nicotera MV, Urciuoli G (2019) Triggering and predisposing factors for flow-like landslides in pyroclastic soils: the case study of the Lattari Mts. (southern Italy). Eng Geol 257:105137.
- Lagioia R., Sanzeni A., Colleselli F. (2006). Air, Water and Vacuum Pluviation of Sand Specimens for the Triaxial Apparatus, Soils and Foundations, 46(1), pp 61-67, ISSN 0038-0806, <https://doi.org/10.3208/sandf.46.61>
- Santo A., Pirone M., Forte G., De Falco M., Urciuoli G. (2021). Slope Stability Assessment of the Test Site in Pagani (Campania, Southern Italy). Lecture Notes in Civil Engineering 156, 359–365.