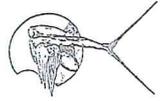


Fabbrica della Conoscenza numero dieci
Collana diretta da Carmine Gambardella

Le Vie dei
Mercanti
S.A.V.E. HERITAGE
SAFEGUARD OF ARCHITECTURAL,
VISUAL, ENVIRONMENTAL HERITAGE

Carmine Gambardella



La scuola di Pitagora Editrice

© copyright 2011 La scuola di Pitagora s.r.l.
Piazza Santa Maria degli Angeli, 1
80132 Napoli
Tel.-Fax +39 081 7646814

È assolutamente vietata la riproduzione totale o parziale di questa pubblicazione, così come la sua trasmissione sotto qualsiasi forma e con qualunque mezzo, anche attraverso fotocopie, senza l'autorizzazione scritta dell'editore.

www.scuoladipitagora.it
info@scuoladipitagora.it

ISBN 978-88-6542-046-1

Finito di stampare nel mese di maggio 2011
Stampa: Morconia Print s.p.a. - Morcone (BN)

MISURE DI UMIDITÀ IN MURATURE DI TUFO CON LA TIME DOMAIN REFLECTOMETRY

Luigi MOLLO¹, Roberto GRECO²

⁽¹⁾ Dipartimento di Ingegneria Civile, Facoltà di Ingegneria, Seconda Università degli Studi di Napoli, Aversa, Italia, e-mail: luigi.mollo@unina2.it

⁽²⁾ Dipartimento di Ingegneria Civile, Facoltà di Ingegneria, Seconda Università degli Studi di Napoli, Aversa, Italia, e-mail: roberto.greco@unina2.it

Abstract

La memoria è dedicata alla valutazione della possibilità di utilizzare la riflettometria nel dominio del tempo (Time Domain Reflectometry, TDR) per determinare, in modo poco invasivo, il contenuto di umidità delle murature ponendolo in relazione con la permittività dielettrica apparente del materiale. A tal fine, è stato determinato sperimentalmente il legame permittività/umidità su campioni di tufo giallo napoletano. Le relazioni ottenute sono risultate simili a quelle già esistenti in letteratura per altri mezzi porosi, come terreni e rocce e per altri materiali edili. I risultati ottenuti mostrano che in tutti i casi la permittività dielettrica dei materiali investigati è molto sensibile alle variazioni di contenuto d'acqua. Ciò indica che la TDR costituisce un promettente strumento di misura dell'umidità di materiali edili, particolarmente adatto per applicazioni a murature reali, in virtù della poca invasività.

Time Domain Reflectometry (TDR) has been evaluated as a tool for the measurement of moisture content of masonry materials. To this aim, the relationship between relative dielectric permittivity, measured by TDR, and volumetric water content, measured gravimetrically, has been experimentally determined in laboratory over samples of Neapolitan tuff. The obtained relationships resemble the calibration curves available in literature for other porous materials, such as soils and rocks, and other building materials. The obtained results show that in all cases dielectric permittivity is highly sensitive to moisture variations, indicating TDR as a promising tool for building materials moisture measurement, also for real masonry walls moisture monitoring applications.

Parole chiave: murature, umidità da risalita, tufo, time domain reflectometry

1. Introduzione

La presenza di umidità all'interno di un materiale poroso può essere dovuta a numerose cause, quali l'assorbimento dell'umidità dall'aria, la risalita capillare, l'esposizione alla pioggia o i fenomeni di condensa superficiale. In tutti i casi, l'umidità provoca un processo irreversibile di disfacimento degli intonaci e delle malte che legano la muratura. Tale fenomeno è generato dalla variazione di concentrazione dei sali presenti nell'acqua, particolarmente il solfato e il cloruro di sodio, a seguito dei cicli di umidificazione ed essiccazione [1,2]. I sali danneggiano la muratura sia direttamente a seguito della differente idratazione ed espansione termica sia indirettamente fungendo da catalizzatori per la formazione del gesso [3]. I danni sono maggiormente concentrati nella zona di confine fra la parte umida e quella secca [2,3].

La conoscenza del comportamento igroscopico di un materiale edile è importante al fine di ridurre questi fenomeni; la letteratura [4] mostra come siano poco affidabili i metodi di predizione del comportamento igroscopico basati sulla osservazione della struttura microporosa dei materiali. Normalmente sono utilizzati metodi diretti di misura di tipo gravimetrico che però sono distruttivi, molto dispendiosi in termini di tempo e spesso poco affidabili [2,3;5,6]. Pochi esempi sono rintracciabili in letteratura di prove non distruttive applicate alla scala reale e riguardano soprattutto l'umidità superficiale [7].

La riflettometria nel dominio del tempo (Time Domain Reflectometry, TDR) è stata molto usata, negli ultimi decenni, per determinare, in laboratorio o sul campo, il contenuto volumetrico di acqua nei ter-

reni data la sua capacità di fornire stime affidabili del contenuto di umidità con minimo disturbo del materiale. Le misure TDR si basano sul forte legame esistente fra la permittività dielettrica, ϵ_r , di un volume di materiale poroso umido e il suo contenuto di acqua, θ [8,9,10]. La sensibilità della TDR è così alta che recentemente è stata applicata alla determinazione della distribuzione del contenuto di acqua in suoli non omogenei [11,12,13]. La TDR è stata anche usata per la determinazione del contenuto d'acqua nelle rocce [14,15,16]. Solo di recente sono state proposte alcune applicazioni della TDR come metodo di misura dell'umidità di materiali edili [17,18] mostrando come sia necessario, al fine di ottenere valutazioni precise, una calibrazione specifica del legame $\theta(\epsilon_r)$ per il materiale investigato [19].

In questa memoria viene sperimentalmente determinata fra la relazione fra la permittività dielettrica e il contenuto d'acqua di uno dei materiali da costruzione storicamente più utilizzati in Campania: il tufo giallo.

2. Il contenuto d'acqua in un mezzo poroso misurato con la TDR

Un tipico apparato TDR per la determinazione del contenuto di umidità in un mezzo poroso è costituito da un generatore di impulsi provvisto di un oscilloscopio e una linea di trasmissione, costituita da un cavo coassiale e una sonda

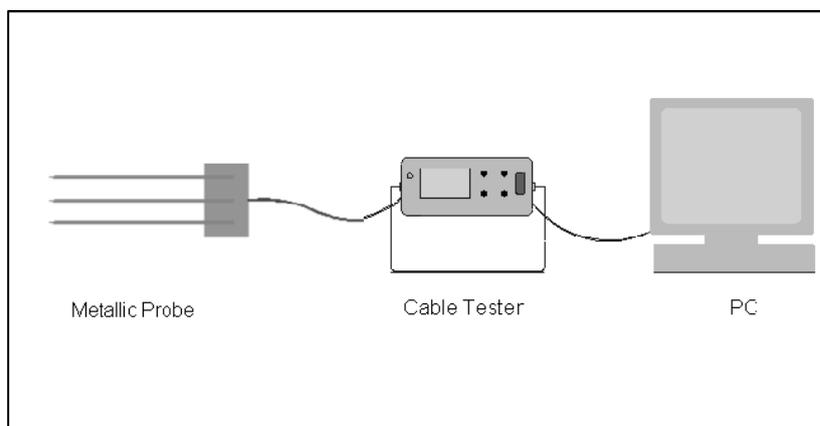


Fig. 1- Tipico apparato TDR

metallica di lunghezza nota L_p (Figura 1).

Inizialmente un'onda elettromagnetica a fronte ripido è trasmessa attraverso il cavo coassiale dal generatore alla sonda infissa nel materiale poroso. Alla giunzione fra il cavo coassiale e la sonda ha luogo una parziale riflessione del segnale che ritorna indietro lungo la linea di connessione e viene letto dall'oscilloscopio come una variazione di voltaggio. L'onda rifratta si muove lungo la sonda, con una velocità di propagazione dipendente dalla permittività dielettrica del

mezzo. La conduttività elettrica del mezzo provoca invece una attenuazione dell'ampiezza dell'onda [10]. Al termine della sonda, l'onda è completamente riflessa all'origine della linea di trasmissione. Un esempio di onda di riflessione è riportato in figura 2.

Dalla misura dell'intervallo di tempo T_p intercorso fra le due riflessioni indicate nella curva con le lettere A e B si calcola la velocità di propagazione c

$$c = \frac{2L_p}{T_p} \quad (1)$$

Il quadrato del rapporto fra la velocità di propagazione di un onda elettromagnetica nel vuoto, c_0 , e la velocità, c , precedentemente determinata, permette di calcolare la permittività dielettrica, ϵ_r , del materiale che si sta studiando.

$$\epsilon_r = \left(\frac{c_0}{c} \right)^2 \quad (2)$$

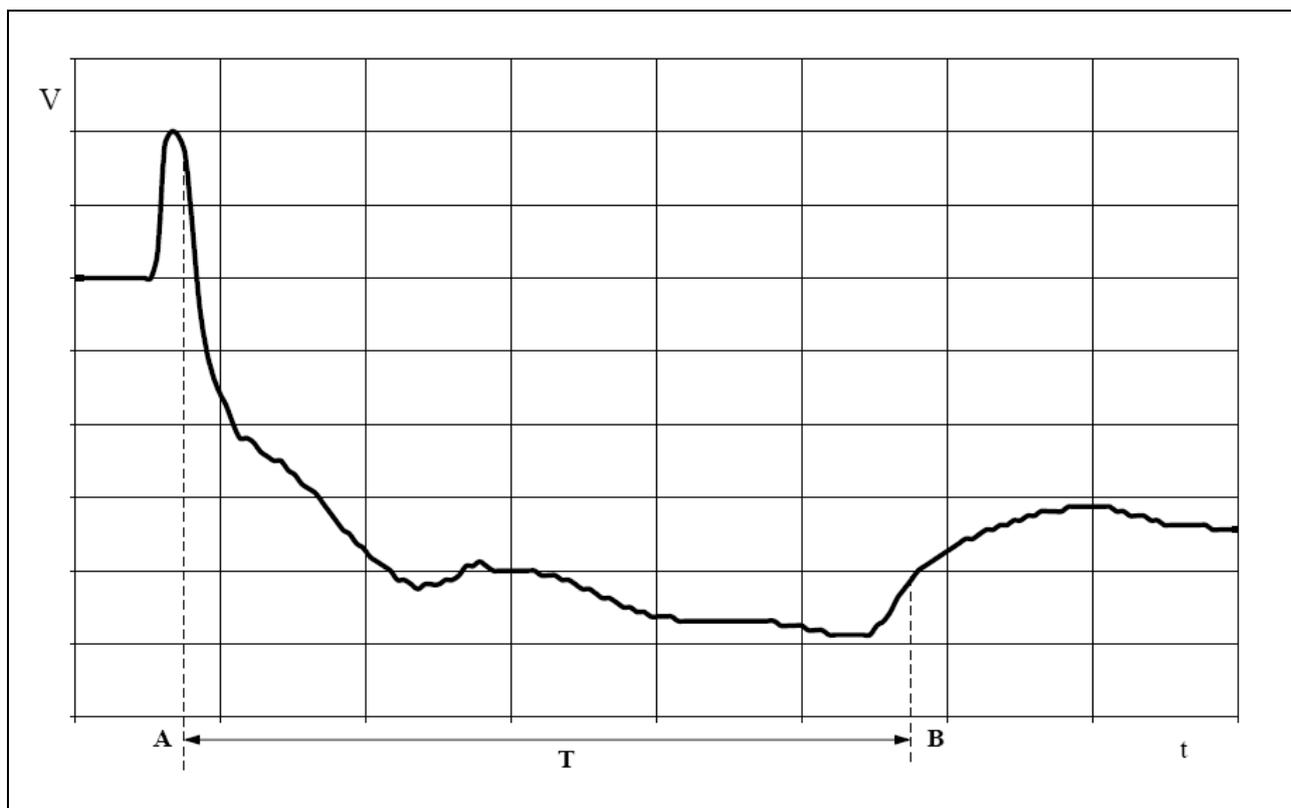


Fig. 2 – Esempio di onda di riflessione

La relazione fra ϵ_r e θ è stata studiata sperimentalmente per i terreni e molte relazioni sono state proposte in letteratura. Il polinomio proposto da Topp et al. [8] può essere considerato una espressione “universale”, nel senso che fornisce risultati accettabili per diversi terreni senza necessità di calibrazione. L’espressione del polinomio di Topp è la seguente

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (3)$$

Altre espressioni, basate su un approccio semi-analitico sono state proposte quali, ad esempio [20], la seguente

$$\theta = \frac{\epsilon_r^\alpha - (1-n)\epsilon_{r,soil}^\alpha - n\epsilon_{r,air}^\alpha}{\epsilon_{r,wat}^\alpha - \epsilon_{r,air}^\alpha} \quad (4)$$

Nell’equazione (4), n rappresenta la porosità del terreno; $\epsilon_{r,soil}$ la permittività relativa del minerale costituente le particelle dello scheletro solido del terreno (compresa tra 2 e 5 nella maggior parte dei casi); $\epsilon_{r,air}$ la permittività dell’aria (circa pari ad 1 come per il vuoto); $\epsilon_{r,wat}$ è la permittività dielettrica dell’acqua (circa pari ad 80 alla temperatura di 20°C); $\alpha = 0.5$ è un fattore geometrico determinato empiricamente.

Più recentemente sono state proposte espressioni semplificate che tengono conto della permittività dielettrica di un terreno secco $\epsilon_{r,ds}$ [21,22,23]:

$$\theta = \frac{\epsilon_r^{0.5} - \epsilon_{r,ds}^{0.5}}{\epsilon_{r,wat}^{0.5} - 1} \quad (5)$$

Benché le relazioni (4) e (5) abbiano una base fisica, tutte le espressioni proposte in letteratura per il legame $\theta(\epsilon_r)$ devono essere considerate come espressioni empiriche, i cui parametri devono essere stimati attraverso l’esecuzione di prove sperimentali.

Recentemente [19] è stata proposta la seguente relazione empirica

$$\theta = A + B \epsilon_r^{0.5} \quad (6)$$

per la determinazione del contenuto d’acqua nei materiali edili, applicata a mattoni a faccia vista e a tre tipi differenti di malta.

Il valore di A e B varia in funzione del materiale. Il lavoro si prefigge di determinare il valore di A e B per il tufo e verificare, ancora una volta, la validità di applicazione della tecnologia TDR per la misura della risalita capillare nelle murature.

3. Materiali e metodi

Il tufo che si è testato è il tipico tufo giallo napoletano proveniente da Quarto (Na). La seguente tabella 1 sintetizza le caratteristiche tecniche ritenute utili ai fini della sperimentazione così come rilevate dalla letteratura.

Tab. 1 - Caratteristiche tecniche del tufo utilizzato [24]

γ_d	Peso secco	11-12 kN/mc
γ_{sat}	Peso saturo	16-17 kN/mc
γ'	Peso immerso	6-7 kN/mc
Φ	porosità	0.55
k	permeabilità	$10^{-4}, 10^{-5}$ cm/s
σ	Resistenza a compressione monoassiale	3,0 MPa
c	coesione	0,8-1,0 MPa
φ	Angolo di attrito	$27^\circ-28^\circ$
E	Modulo di Young	1500 MPa
ν'	Modulo di Poisson	0,3
K_o	coefficiente di spinta riposo	0,5

Per effettuare le prove è stato ricavato, dal tufo, un prisma di 12.5cm×7.0cm×5.5cm. Il provino è stato



Fig 3- Una delle sonde TDR utilizzate per strumentare i provini

strumentato con sonde TDR a tre barre della lunghezza di 10.5cm (figura 3). Le tre barre hanno un diametro di 3mm e un interasse esterno di 32mm. Per assicurare il contatto tra la sonda ed il tufo, sono stati praticati, con l'aiuto di una dima metallica di riferimento, tre fori paralleli di diametro leggermente inferiore a quello delle barre. Le barre sono state poi infisse nei fori con piccoli colpi. I fori sono stati approfonditi di 3mm rispetto alla lunghezza delle barre, affinché la polvere di perforazione presente nel foro non ostacolasse l'infissione.

Il provino strumentato è stato immerso in acqua per 24 ore e poi fatto asciugare, a temperatura ambiente, per 10 giorni. Durante tale periodo il peso del provino strumentato W_i è stato acquisito ad intervalli regolari con una bilancia di precisione Precisa Instruments Ltd XB4200C con una sensibilità di 0.1g. Contemporaneamente le curve sperimentali TDR

venivano acquisite con una strumentazione Tektronics 1502C connessa ad un PC tramite una porta RS232.

Al termine del processo di evaporazione, la sonda TDR è stata rimossa e il provino è stato asciugato in stufa per 48 ore a 105 °C e poi pesato per determinarne il peso secco W_{od} .

Il contenuto volumetrico di acqua, θ_i , è stato infine determinato con la relazione

$$\theta_i = \frac{W_i - W_p - W_{od}}{V} \quad (7)$$

dove V è il volume del provino e W_p è il peso della sonda TDR.

3. Risultati e discussione

La relazione fra il contenuto volumetrico di acqua determinato con la relazione (7) e la permittività dielettrica ottenuta con l'equazione (2) è stata stimata per il materiale testato: La relazione lineare fra θ e la radice quadrata di ϵ_r , già riportata come equazione (6), è apparsa la migliore per interpretare i risultati sperimentali.

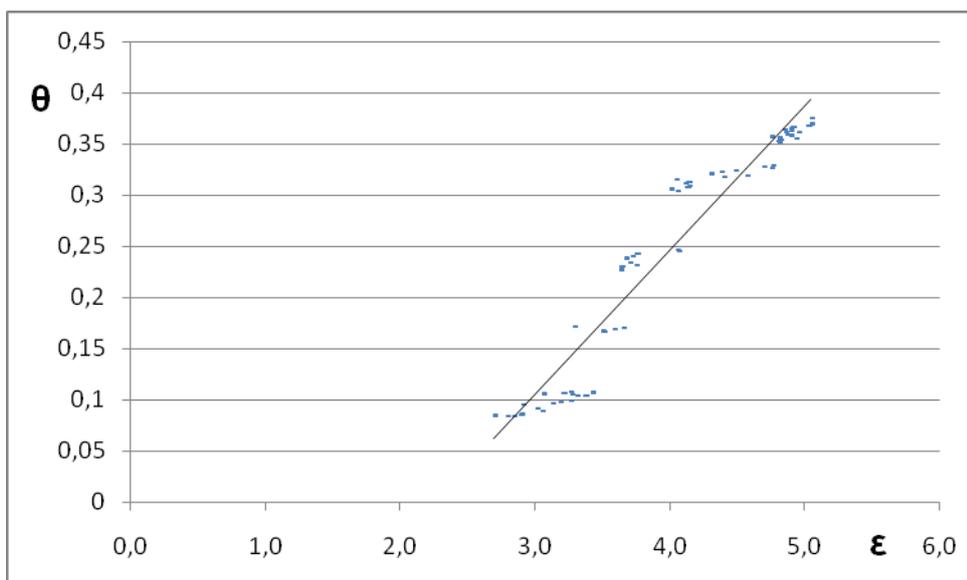


Fig. 4 - Nel diagramma sono riportati i punti di misura e le curve di calibrazione tracciate secondo l'equazione (6) per il tufo.

La determinazione dei valori da attribuire ai parametri A e B è stata fatta minimizzando lo scarto quadratico medio fra la curva e i dati sperimentali. Nella figura 4 sono riportati, per il tufo, i punti di misura e la curva di calibrazione tracciata secondo l'equazione (6).

Nella tabella 3 sono riportati i valori di A e B per il tufo confrontati con gli stessi parametri, disponibili in letteratura,

per il mattone e il corrispondente valore del coefficiente di regressione R^2 . Appare immediatamente evidente l'ottimo adattamento della curva ai dati sperimentali. Il coefficiente angolare delle due rette ottenute (tufo e mattone laterizio) è dello stesso ordine di grandezza, nonostante il contenuto d'acqua nei diversi materiali sia risultato piuttosto diverso. Ciò conferma una buona sensibilità di ϵ_v al variare del contenuto di umidità per tutti i materiali edilizi. L'andamento del legame $\theta(\epsilon_v)$ determinato sperimentalmente per i materiali testati si avvicina fortemente alle classiche curve di calibrazione riportate in letteratura per diversi materiali porosi ed in particolare per i terreni, per i quali la TDR è, attualmente, la più usata tecnica di misura del contenuto volumetrico di umidità. I risultati ottenuti confermano, pertanto, che la TDR può essere una buona tecnica di misura del contenuto di umidità nelle murature.

Tabella 3. Valori di A e B per il tufo e per il mattone

Materiale	A	B	R^2	Rif. bibliografico
Tufo	-0.317	0.141	0.931	
Mattone	-0.224	0.147	0.984	[19]

4. Conclusioni

La sperimentazione in laboratorio è stata condotta sul tufo giallo napoletano, per il quale è stata determinata la relazione sperimentale fra la permittività dielettrica, misurata con una strumentazione TDR, e il contenuto volumetrico di acqua, determinato gravimetricamente.

Il lavoro ha permesso di verificare che una relazione empirica, esprime il legame tra la permittività dielettrica ed il contenuto d'acqua, analoga a quella trovata per altri materiali edili, possa essere estesa allo studio del tufo. Si conferma quindi come la tecnica TDR possa essere impiegata con successo per misurare l'umidità nei materiali edili all'interno di edifici reali, grazie alle caratteristiche di poca invasività ed economicità che la contraddistinguono. È attualmente in corso, infatti, una campagna di misure della risalita capillare su elementi murari in scala 1:1, realizzati con il tufo e tre differenti tipi di malta, e strumentati con sonde TDR per monitorare le variazioni del contenuto volumetrico di acqua alle varie quote.

Riferimenti bibliografici

- [1] SELVARAJAH S, JOHNSTON AJ. "Water permeation through cracked skin masonry", Build Env 1995;30:19-28.

- [2] FASSINA V, FAVARO M, NACCARI A, PIGO M. "Evaluation of compatibility and durability of a hydraulic lime-based plaster applied on brick wall masonry of historical buildings affected by rising damp phenomena", *J Cult Herit* 2002;3:45-51.
- [3] LUBELLI B, VAN HEES RPJ, GROOT CJWP. "The role of sea salts in the occurrence of different damage mechanisms and decay patterns on brick masonry", *Constr Build Mater* 2004;18:119-124.
- [4] RAIMONDO M, DONDI M, MAZZANTI F, STEFANIZZI P, BONDI P. "Equilibrium moisture content of clay bricks: The influence of the porous structure", *Build Env* 2007;42:926- 932.
- [5] AL-SAAD Z, ABDEL-HALIM M. "Laboratory evaluation of various types of mortars for the conservation of Qasr al-Bint monument, Petra-Jordan", *Eng. Struct.* 2001;23:926- 933.
- [6] CULTRONE G, SEBASTIÁN E, ORTEGA HUERTAS M. "Durability of masonry systems: A laboratory study", *Constr Build Mater* 2007;21:40-51.
- [7] MATSUKURA Y, TAKAHASHI K. "A new technique for rapid and non-destructive measurement of rock-surface moisture content; preliminary application to weathering studies of sandstone blocks", *Eng Geol* 1999; 55:113-120.
- [8] TOPP GC, DAVIS JL, ANNAN AP. "Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines", *Water Resour Res* 1980;16:574- 582.
- [9] DALTON FN, HERKELRATH WN, RAWLINS D.S., RHOADES J.D. "Time domain reflectometry: simultaneous assessment of the soil water content and electrical conductivity with a single probe", *Science* 1984;224:989-990.
- [10] CAMPBELL JE. "Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz", *Soil Sci Soc Am J* 1990;54:332-341.
- [11] OSWALD B, BENEDICKTER HR, BÄCHTOLD W, FLÜHLER H. "Spatially resolved water content profiles from inverted time domain reflectometry signals", *Water Resour Res* 2003;39(12):1357.
- [12] GRECO R. "Soil water content inverse profiling from single TDR waveforms", *J Hydrol* 2006;317:325-339.
- [13] MORET D, ARRÚE JL, LÓPEZ MV, GRACIA R. "A new TDR waveform analysis approach for soil moisture profiling using a single probe", *J Hydrol* 2006;321:163-172.
- [14] SAKAKI T, SUGIHARA K, ADACHI T. "Application of time domain reflectometry to determination of volumetric water content in rock", *Water Resour Res* 1998;34:2623- 2631.
- [15] SCHAAP MG, ROBINSON DA, FRIEDMAN SP. "Measurement and modelling of the TDR signal propagation through layered dielectric media", *Soil Sci Soc Am J* 2003;67:1113-1121.
- [16] SAKAKI T, RAJARAM H. "Performance of different types of time domain Reflectometry probes for water content measurement in partially saturated rocks", *Water Resour Res* 2006;16:W07404.
- [17] ROELS S, CARMLIET J, HENS H, ADAN O, BROCKEN H, CERNY R, PAVLIK Z, ELLIS AT, HALL C, KUMARAN K. "A comparison of different techniques to quantify moisture content profiles in porous building materials", *J Therm Env Build Sci* 2004;27(4):261-276.
- [18] PAVLIK Z, JIRICKOVA M, CERNY R, SOBCZUK H, SUCHORAB Z. "Determination of moisture diffusivity using Time Domain Reflectometry (TDR) Method", *J Build Phys* 2006;30(1):59-70.
- [19] MOLLO L., GRECO R, "Moisture Measurements in Masonry Materials by Time Domain Reflectometry", *J Materials in Civ Eng* 2011; 24: 464-467.
- [20] ROTH K, SCHULIN R, FLUHLER H, ATTINGER W. "Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach", *Water Resour Res* 1990;26:2267-2273.

- [21] WHALLEY WR. "Considerations on the use of time domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content", J Soil Sci 1993;44:1-9.
- [22] HOOK WR, LIVINGSTON NJ. "Errors in converting time domain reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil water content", Soil Sci Soc. Am J 1996;59:35-41.
- [23] GONG Y, CAO Q, SUN Z. "The effects of soil bulk density, clay content and temperature on soil water content measurement using time-domain Reflectometry", Hydrol Process 2003;17:3601-3614.
- [24] COLOMBO G., CAVAGNA B., CASSANI G., MANASSERO V., "La tecnica del congelamento artificiale del terreno per lo scavo delle gallerie di stazione della Metropolitana di Napoli", Gallerie e grandi opere sotterranee, 2009; 89: 93-129.