

M. FRANZINI (*), A. GIONCADA (*), L. LEONI (*), M. LEZZERINI (*)

UNO STRUMENTO PER LA MISURA DELLA DILATAZIONE IDRICA LINEARE DELLE ROCCE

Riassunto - Viene proposto uno strumento realizzato per misurare, in continuo o in discontinuo, la dilatazione idrica lineare delle rocce indotta dall'assorbimento d'acqua a pressione atmosferica. Le misure sono effettuate a temperatura costante ($T = 20,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$) su prismi retti a base quadrata ($L = 20$ mm) o cilindri ($\varphi = 20$ mm) aventi lunghezza variabile da 40 a 250 millimetri.

La dilatazione idrica lineare delle rocce può essere misurata con un'incertezza variabile da $\pm 0,02$ a $\pm 0,004$ mm/m utilizzando, rispettivamente, provini di 40 o 250 mm.

Parole chiave - Dilatazione idrica lineare, dilatazione termica lineare, materiali lapidei.

Abstract - *An apparatus for determining the hydric dilatation of rocks.* In this work we present an apparatus for the continuous or discontinuous measurement of the linear hydric dilatation of rocks due to water absorption at atmospheric pressure. The measurements are carried out at constant temperature ($T = 20.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$), on parallelepipeds ($L = 20$ mm) or cylinder-shaped ($\varphi = 20$ mm) specimens with the longest dimension variable from 40 to 250 mm. The linear hydric dilatation of rocks can be measured with an accuracy within ± 0.02 and ± 0.004 mm/m, corresponding respectively to specimens 40 and 250 mm long.

Key words - Hydric linear dilatation, thermal linear dilatation, natural stones.

INTRODUZIONE

La dilatazione presentata da alcune rocce in seguito all'assorbimento d'acqua è una proprietà in grado di condizionare, in molti casi, la resa in opera. La dilatazione idrica lineare di un campione si determina misurando a una certa temperatura (normalmente $T = 20^\circ\text{C}$) la massima variazione di lunghezza (ΔL_{\max}) di uno o più provini, in seguito ad assorbimento d'acqua per immersione totale. Generalmente, le misure sono rapportate alla lunghezza iniziale del campione (L_0), essiccato alla temperatura $T = 60^\circ\text{C}$ fino al raggiungimento della massa costante, e sono espresse in mm/m o in percentuale:

$$\text{a) } \alpha(\text{mm/m}) = \frac{\Delta L_{\max}}{L_0} * 1000 \quad \text{b) } \alpha(\%) = \frac{\Delta L_{\max}}{L_0} * 100 \quad (1)$$

In letteratura i dati sulla dilatazione idrica delle rocce sono piuttosto scarsi e non esiste una metodologia univoca con la quale determinare questa importante proprietà. Gamberini & Masini (2001) hanno proposto

uno strumento capace di misurare in continuo, mediante un comparatore digitale Mitutoyo mod. 543-250b con risoluzione di $\pm 0,001$ mm, la dilatazione idrica, a temperatura ambiente, di campioni di roccia con dimensioni di $20 \times 20 \times 200$ mm³; questi autori riportano i dati relativi a due campioni di arenaria estratta nel comprensorio di Firenzuola (FI), nota merceologicamente come «Pietra Serena». Bargossi *et al.* (2002), utilizzando lo strumento proposto da Gamberini & Masini (2001), hanno misurato la dilatazione idrica di ulteriori 11 campioni di arenaria provenienti dallo stesso comprensorio. Weiss *et al.* (2004) presentano dati di dilatazione idrica misurati su 21 campioni di rocce magmatiche, sedimentarie e metamorfiche. Le misure sono state effettuate mediante un dilatometro con risoluzione di $\pm 0,001$ mm, alla temperatura di 21°C , su provini cilindrici con diametro di 15 mm e lunghezza di 50 mm. Franzini *et al.* (2007a, 2007b) riportano valori di dilatazione idrica di campioni di arenaria Macigno, misurati, mediante un comparatore millesimale, su provini di dimensioni $20 \times 20 \times 100$ mm³ e $20 \times 20 \times 200$ mm³ orientati, rispetto al verso della roccia, sia in direzione parallela sia in direzione ortogonale. Recentemente, Benavente *et al.* (2008) e Sebastián *et al.* (2008) hanno determinato, mediante un sensore di spostamento LVDT-SX8 con risoluzione di $\pm 0,001$ mm ed alla temperatura di 20°C , la dilatazione idrica di diverse varietà di arenaria su provini di $10 \times 10 \times 30$ mm³. Nei diversi lavori citati, la dilatazione idrica è risultata, per lo più, dell'ordine di alcuni decimi di millimetro per metro, con valori fino a 4 mm/m, riscontrati da Sebastián *et al.* (2008) e Weiss *et al.* (2004) in alcune varietà di arenaria e in una roccia metamorfica, nella direzione perpendicolare al verso della roccia.

In questo lavoro si propone un nuovo strumento per la misura della dilatazione idrica lineare delle rocce, capace di garantire un'elevata sensibilità analitica, ridurre gli errori sistematici legati alla dilatazione termica, effettuare, in continuo o in discontinuo, misure sia su provini cilindrici ($\varphi=20$ mm) sia su prismi retti a base quadrata ($L = 20$ mm), aventi lunghezza variabile da 40 a 250 millimetri.

DESCRIZIONE E CARATTERISTICHE DELLO STRUMENTO

In Figura 1 sono rappresentati, in modo schematico, i componenti dello strumento proposto per la misura della dilatazione idrica lineare delle rocce. Esso è costituito di un dilatometro (A), di un contenitore par-

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa, via S. Maria 53, 56126 Pisa, Italy.

zialmente riempito d'acqua (B) nel quale è alloggiato il dilatometro, e di un criotermostato (C) Lauda mod. Proline RP 1840, collegato al contenitore d'acqua B per assicurarne un riempimento costante con acqua alla temperatura di misura ($T = 20 \pm 0,1^\circ\text{C}$).

La struttura del dilatometro è interamente realizzata in acciaio inossidabile; due supporti (X) tengono in posizione il campione di roccia del quale si vuol misurare la dilatazione. Un braccio basculante (Y) trasferisce ad un comparatore digitale le variazioni di lunghezza del campione. Il braccio basculante amplifica meccanicamente di tre volte la dilatazione lineare del campione. Il comparatore digitale è fissato alla porzione superiore dello strumento, in modo da trovarsi al di sopra della superficie dell'acqua contenuta nel recipiente B.

I supporti X possono accogliere provini sia cilindrici ($\varphi = 20 \text{ mm}$) sia prismatici a base quadrata ($L_0 = 20 \text{ mm}$); modificando opportunamente la posizione dei supporti X (Fig. 1) è possibile misurare provini di lunghezza variabile da 40 a 250 mm.

Per effettuare le misure di dilatazione idrica lineare è stato utilizzato un comparatore digitale Mitutoyo mod. BP256 con sensibilità di $\pm 0,001 \text{ mm}$; considerata l'amplificazione di movimento data dal braccio (Y), la sensibilità teorica del dilatometro è di $\pm 0,0003 \text{ mm}$. L'uscita seriale RS-232 del comparatore, è stata collegata ad un sistema di registrazione per effettuare le misure in continuo.

Lo strumento descritto può essere utilizzato per la determinazione sia del valore della dilatazione idrica lineare, come definita nelle relazioni (1), sia dell'andamento nel tempo della dilatazione per immersione

in acqua. In ambedue i casi si può procedere «in continuo», cioè posizionando il campione nel dilatometro una sola volta e registrando le variazioni di lunghezza nel tempo, o «in discontinuo», cioè posizionando il campione nel dilatometro ad intervalli di tempo prestabiliti e leggendo ogni volta il valore di dilatazione ed il tempo trascorso dall'inizio della prova.

PRECISIONE E ACCURATEZZA DELLA MISURA DELLA DILATAZIONE IDRICA LINEARE

La precisione e l'accuratezza del valore calcolato della dilatazione idrica lineare dipendono dalla precisione e dall'accuratezza della misura dei due valori che compaiono nelle relazioni (1). La lunghezza iniziale del campione (L_0) è misurata con un calibro digitale con lettura a 0,1 mm. In queste condizioni si può assumere che la misura di L_0 sia priva di errori di accuratezza e abbia una precisione (σ_0) pari a $\pm 0,1 \text{ mm}$.

La precisione della misura di ΔL_{max} effettuata in continuo dipende essenzialmente dalla sensibilità complessiva del dilatometro e, dunque, dovrebbe corrispondere al valore di $\pm 0,0003 \text{ mm}$, come già indicato. Nel caso delle misure in discontinuo, la precisione dipende anche dalla riproducibilità con la quale l'operatore riposiziona il provino nel dilatometro. La deviazione standard, calcolata su circa 150 misure ripetute su quattro differenti provini (quarzo sintetico, marmo, arenaria, granito) con dimensioni $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$, è risultata pari a $\pm 0,0008 \text{ mm}$. Per le misure in discontinuo, si assume nel seguito il valore $\sigma_1 = \pm 0,001$ come precisione della misura di ΔL_{max} .

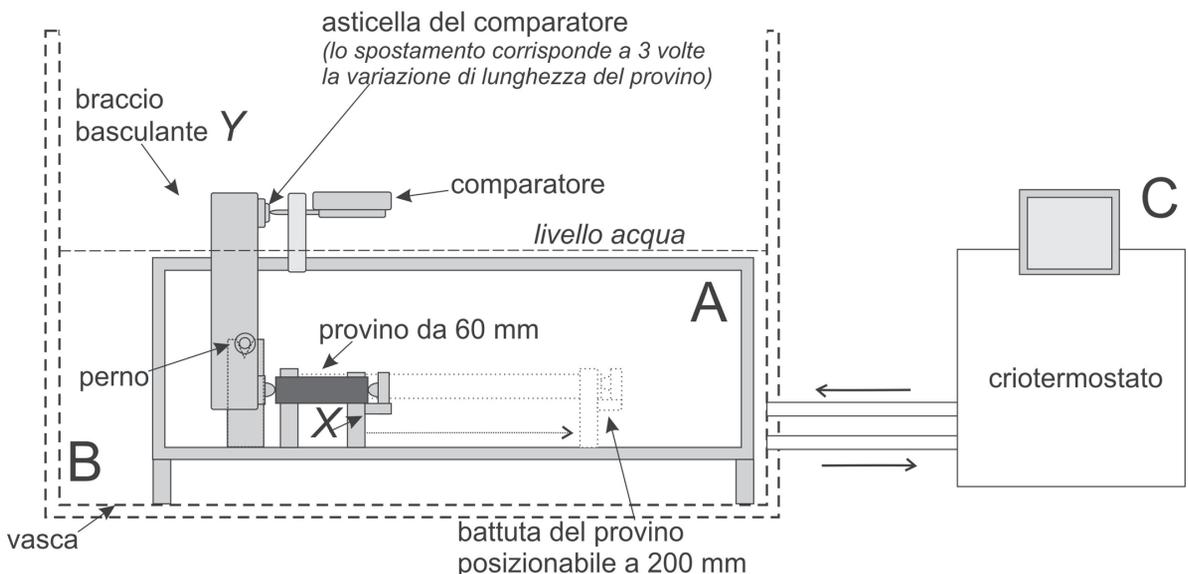


Fig. 1 - Schema semplificato dello strumento proposto per misurare la dilatazione idrica lineare conseguente all'assorbimento d'acqua per immersione totale. A = dilatometro; B = recipiente contenente acqua alla temperatura di misura ($T = 20^\circ\text{C}$) nel quale sono immersi il campione ed il dilatometro; C = criotermostato; X = supporti portacampione; Y = braccio basculante che collega il campione al comparatore digitale.

Esprimendo L_0 e ΔL_{max} in mm, le precisioni relative di L_0 e ΔL_{max} valgono, rispettivamente, $\epsilon_0 = 0,1/L_0$ e $\epsilon_1 = 0,001/\Delta L_{max}$. Esprimendo ΔL_{max} in funzione di α (si veda la relazione 1a) ed α in mm/m, si ricava: $\epsilon_1 = 1/(\alpha \cdot L_0)$, da cui: $\epsilon_1 / \epsilon_0 = 10/\alpha$.

Ai fini dunque di valutare la precisione relativa del valore della dilatazione idrica lineare, è significativa soltanto la precisione relativa della misura di ΔL_{max} , in quanto questa è assai più grande della precisione relativa di L_0 , perlomeno per valori di α minori di 2 mm/m.

Con questa approssimazione, posto $\sigma_1 = \pm 0,001$, l'errore relativo ϵ_r , espresso in percento, della misura di α , si calcola con l'espressione $\epsilon_r = 100/(\alpha \cdot L_0)$, graficamente riportata nella Figura 2 che mostra la precisione relativa della misura di α in funzione della lunghezza del provino e per diversi valori di α , scelti nell'intervallo di variazione presentato dalle rocce più comuni (Gamberini & Masini, 2001; Franzini *et al.*, 2007a, 2007b; Weiss *et al.*, 2004; Benavente *et al.*, 2008). Come si vede in figura, nel caso si volesse misurare una dilatazione idrica molto bassa, inferiore a 0,05 mm/m, sarebbe opportuno impiegare provini con lunghezza di almeno 200 mm per ottenere errori relativi inferiori al 10%. Una dilatazione di 0,25 mm/m o superiore sarà, invece, già misurabile con un errore relativo inferiore o uguale al 5% anche utilizzando provini con lunghezza di almeno 80 mm.

L'accuratezza della misura di ΔL_{max} dipende da possibili errori sistematici legati a eventuali deformazioni della roccia stessa o dello strumento in conseguenza di variazioni di temperatura. In Figura 3 è mostrato l'effetto della dilatazione termica in funzione della lunghezza iniziale del provino L_0 , per valori di α_t compresi tra $5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $25 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, rappresentativi dell'intervallo di variazione presentato dalle rocce più comuni (Hodgman *et al.*, 1960), per $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$ e $\Delta T = 3^\circ\text{C}$. Si osserva che una variazione di temperatura di 3°C deter-

mina una variazione di lunghezza del provino superiore all'errore strumentale ($1 \sigma_1$) già per campioni di 40 mm di lunghezza ed a piccolo coefficiente di dilatazione termica lineare. Inoltre, poiché la dilatazione termica dell'acciaio è $21 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Hodgman *et al.*, 1960), oscillazioni termiche di 3°C comportano variazioni di lunghezza dei componenti dello strumento di valore superiore a $3 \sigma_1$ (Fig. 3). Il criotermostato fornisce acqua a temperatura costante con $\Delta T = \pm 0,01^\circ\text{C}$. La temperatura dell'acqua nella vasca, misurata in continuo con un termometro digitale, resta costante con oscillazioni inferiori a $\pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$. Tale intervallo, come si vede dalla Figura 3, non determina alcuna dilatazione apprezzabile. Utilizzando come materiale di riferimento a dilatazione idrica nulla e dilatazione termica nota un provino di quarzo sintetico di $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$ e mantenendo l'acqua a temperatura costante mediante il criotermostato, il comparatore non ha registrato alcuna deformazione superiore all'errore strumentale.

ESEMPIO DI APPLICAZIONE

Come esempio di utilizzo dello strumento presentato, si riportano i risultati di alcune misure di dilatazione idrica, effettuate in continuo o in discontinuo, su provini diversamente orientati e rappresentativi di diversi litotipi.

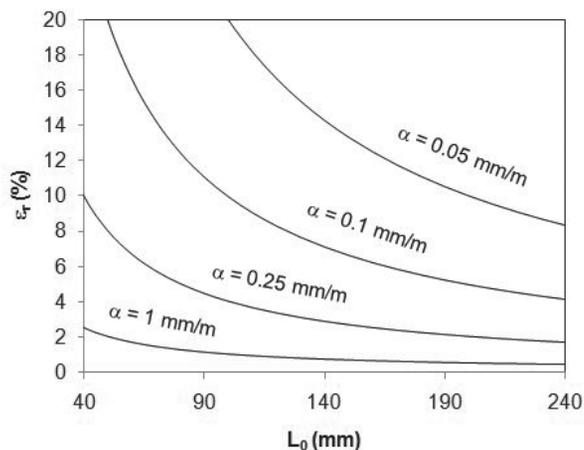


Fig. 2 - Errore relativo percentuale (ϵ_r , %) della misura di dilatazione idrica lineare in funzione della lunghezza (L_0 , mm) dei provini per diversi valori della dilatazione idrica (α , mm/m).

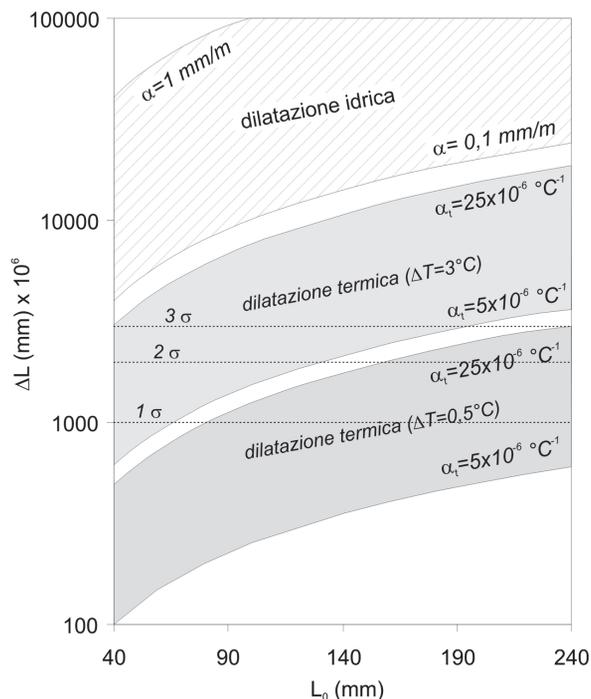


Fig. 3 - Valore della variazione di lunghezza (ΔL , mm) in funzione della lunghezza iniziale (L_0 , mm) dei campioni, per valori della dilatazione idrica (α , mm/m) e della dilatazione termica (α_t , $^\circ\text{C}^{-1}$) corrispondenti a quelli presentati dalle rocce più comuni. La dilatazione termica è riportata per $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$ e $\Delta T = 3^\circ\text{C}$. Le linee orizzontali tratteggiate corrispondono all'errore strumentale del comparatore digitale impiegato per effettuare le misure di dilatazione.

La dilatazione idrica in seguito ad assorbimento d'acqua per immersione totale, è stata misurata in continuo, alla temperatura di 20°C, su provini di tre diversi litotipi toscani impiegati come materiale da costruzione e ornamentale: arenaria Macigno (A) di Greve in Chianti, arenaria di Manciano (B), nota commercialmente come «Pietra Dorata», e marmo bianco ordinario (C) delle Alpi Apuane.

I provini sono stati tagliati in forma di parallelepipedi con base di circa 20 x 20 mm² e lunghezza di 60 mm, con la dimensione maggiore perpendicolare al verso della roccia. Prima di essere immersi nella vasca del dilatometro, i provini sono stati essiccati in stufa a 60°C.

La Tabella 1 riporta i dati raccolti.

L'arenaria Macigno presenta una discreta dilatazione idrica (0,750 mm/m), in accordo a quanto era già stato evidenziato in precedenti lavori (Franzini *et al.*, 2007a, 2007b; Di Battistini & Rapetti, 2003). L'arenaria di Manciano presenta una dilatazione idrica minore, intorno a 0,17 mm/m; la dilatazione idrica del marmo risulta molto bassa (0,067 mm/m), prossima all'errore di misura con provini delle dimensioni impiegate. Da sottolineare che, nonostante le modeste dimensioni dei provini, la dilatazione massima è stata raggiunta dopo tempi assai lunghi dalle due arenarie e più velocemente dal marmo.

In seguito, si è misurata in discontinuo la dilatazione idrica e l'assorbimento d'acqua per immersione totale su 6 provini di arenaria Macigno proveniente dalle cave di Greve in Chianti. I provini, in forma di parallelepipedi con base di circa 20 x 20 mm² e lunghezza di 60 mm, sono stati tagliati con la dimensione maggiore parallela (3 provini, A in Tab. 2) o ortogonale (3 provini, B in Tab. 2) al verso della roccia. I provini sono stati essic-

cati in stufa a 60°C sino a peso costante, condizionati in essiccatore a temperatura ambiente e immersi nella vasca del dilatometro, in acqua mantenuta a 20°C. A intervalli di tempo prestabiliti, nell'arco di sette giorni, di ciascun provino è stata misurata la lunghezza con il dilatometro e, contemporaneamente, il peso con una bilancia analitica. Le Figure 4a e 4b presentano i dati raccolti espressi, secondo l'uso comune, in funzione della radice quadrata del tempo. La Tabella 2 presenta una sintesi dei valori misurati.

L'andamento della dilatazione idrica (Fig. 4a) è rappresentato da una curva con un caratteristico andamento ad «S» che indica una fase iniziale di isteresi cui segue un andamento relativamente rapido della dilatazione che poi rallenta raggiungendo asintoticamente il valore massimo. La dilatazione massima si raggiunge fra le 60 e le 75 ore, tuttavia, gran parte della dilatazione (il 95% del totale) si realizza entro le prime 24-40 ore di immersione in acqua. La maggior dilatazione idrica dei provini orientati perpendicolarmente al verso della roccia (valore medio 1,04 mm/m) rispetto a quelli paralleli al verso (valore medio 0,64 mm/m), nonostante il paragonabile assorbimento d'acqua, evidenzia l'esistenza di una spiccata anisotropia di questa proprietà, in accordo a quanto già rilevato in letteratura (Franzini *et al.*, 2007a). L'assorbimento d'acqua presenta una variazione nel tempo tipica di questa proprietà nei mezzi porosi. Rappresentando l'assorbimento d'acqua, espresso come per cento in peso del peso secco del campione, in funzione della radice quadrata del tempo, si ottiene un andamento schematicamente descrivibile come due segmenti consecutivi, il primo con una pendenza caratteristica, il secondo sostanzialmente orizzontale. Il confronto fra le Figure 4a e 4b evidenzia il diverso andamento nel tempo dell'assorbimento d'acqua e della dilatazione idrica. Le differenze sono quantitativamente espresse in Tabella 2. Il 50% ed il 95% dell'assorbimento totale di acqua si raggiungono assai prima dei corrispondenti valori percentuali della dilatazione massima. Nella colonna 6, etichettata con la lettera A, è indicata la percentuale (da 8 a 14) della dilatazione massima che si osserva quando si raggiunge il 50% del totale dell'acqua assorbita. I dati raccolti mettono in evidenza che occorre un certo tempo perché l'acqua assorbita da un'arenaria ne produca la dilatazione. Sembra dunque confermata l'interpretazione della dilatazione idrica

Tab. 1 - Dati relativi ad alcuni litotipi toscani.

	ΔL_{max} (mm)	α (mm/m)	t_{max} (ore)*	$t_{95\%}$ (ore)*
A	0,045	0,750	72	60
B	0,010	0,172	96	71
C	0,004	0,067	40	4

* t_{max} e $t_{95\%}$, tempi ai quali si raggiunge rispettivamente la dilatazione massima o il 95% di questa.

Tab. 2 - Dilatazione idrica lineare ed assorbimento d'acqua di campioni di arenaria Macigno.

	Dilatazione idrica				Assorbimento d'acqua			
	ΔL_{max} (mm)	α (mm/m)	$t_{50\%}$ (ore)*	$t_{95\%}$ (ore)*	A (%)	CIp (%)	$t_{50\%}$ (ore)*	$t_{95\%}$ (ore)*
A1	0,033	0,556	7	38	10	1,385	1,4	23
A2	0,043	0,711	6	42	14	1,368	1,2	22
A3	0,039	0,656	7	24	13	1,451	1,3	22
B1	0,063	1,044	8	32	10	1,497	1,4	24
B2	0,061	1,016	7	24	8	1,486	1,3	21
B3	0,063	1,044	7	38	8	1,494	1,3	22

* $t_{50\%}$ e $t_{95\%}$, tempi ai quali si raggiunge rispettivamente il 50% e il 95% del valore massimo. A = percentuale di dilatazione raggiunta al tempo (colonna 8) al quale l'assorbimento d'acqua ha raggiunto il 50% del totale.

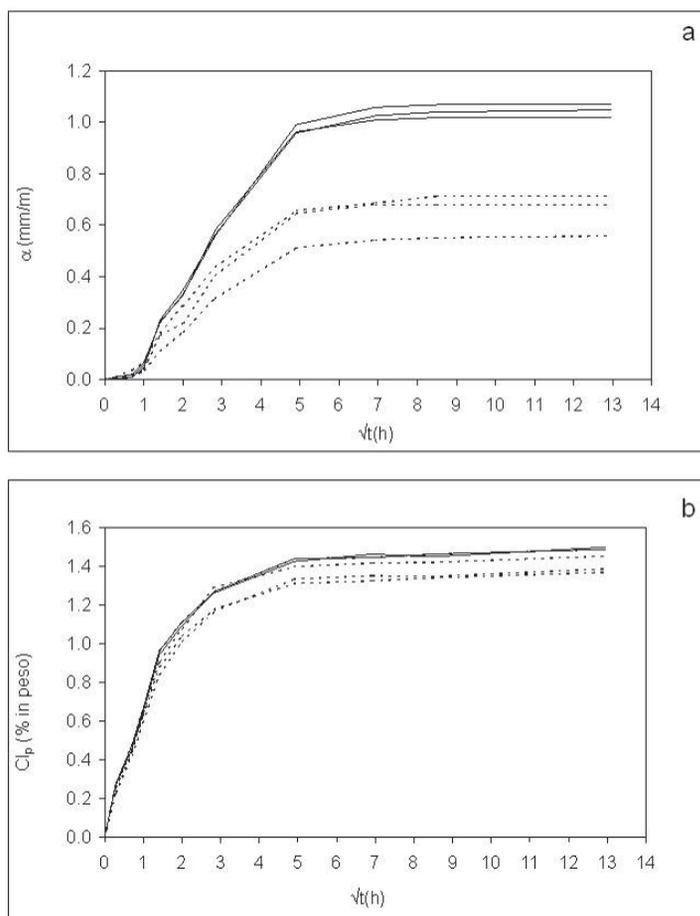


Fig. 4 - a) Curve di dilatazione idrica lineare (α , mm/m) in funzione della radice quadrata del tempo di provini di un campione di arenaria Macigno, misurati perpendicolarmente (tratto continuo) e parallelamente (tratteggiato) al verso della roccia; b) Curve di assorbimento d'acqua per immersione totale (C_{lp} , % in peso) in funzione della radice quadrata del tempo, relative ai provini di Figura 4a.

dell'arenaria Macigno come conseguenza dell'espansione dei minerali argillosi che essa contiene (Franzini *et al.*, 2007a; Sebastián *et al.*, 2008).

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato presentato uno strumento per la misura della dilatazione idrica lineare delle rocce. Lo strumento può essere adottato per effettuare misure di dilatazione idrica lineare in continuo ed in discontinuo, a temperatura costante ($\Delta T = 20 \pm 0,1^\circ C$), con una precisione sulla misura della deformazione lineare di $\pm 0,001$ mm. Lo strumento proposto permette di misurare la dilatazione idrica lineare di provini cilindrici o prismatici lunghi da 40 a 250 mm, con un'incertezza variabile da $\pm 0,02$ mm/m, nel caso di provini di ridotte dimensioni ($L_0 = 40$ mm), fino a $\pm 0,004$ mm/m, nel caso dei provini di dimensioni maggiori ($L_0 = 250$ mm).

Per le caratteristiche descritte, lo strumento si presta ad essere impiegato nell'ambito delle indagini sui processi implicati nella dilatazione per imbibizione d'acqua dei materiali lapidei e sulla loro influenza nella propensione al degrado.

Misure su provini diversamente orientati di arenaria Macigno hanno confermato l'anisotropia, in questo materiale, della dilatazione idrica lineare. Il confronto con misure di assorbimento d'acqua sugli stessi provini ha mostrato che la dilatazione idrica si sviluppa con un certo ritardo rispetto all'assorbimento d'acqua.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare Marcello Gini per l'insostituibile supporto tecnico nella costruzione e perfezionamento dello strumento. Si ringrazia inoltre Marco Soldani per l'aiuto nella ricerca di materiali da utilizzare come standard per la dilatazione termica lineare. Infine, gli autori ringraziano il prof. Roberto Mazzuoli per la lettura critica del manoscritto.

BIBLIOGRAFIA

- Bargossi G.M., Felli P., Gurrieri F., 2002. Pietra serena. Materia della città. Ed. Aida, Firenze.
- Benavente D., Cultrone G., Gomez-Heras M., 2008. The combined influence of mineralogical, hygric and thermal properties on the durability of porous building stones. *European Journal of Mineralogy* 20: 673-685.
- Di Battistini G., Rapetti C., 2003. Arenaria. Pietra ornamentale e da costruzione nella Lunigiana. Opera monografica, Silva Editore, Parma.
- Franzini M., Leoni L., Lezzerini M., Cardelli R., 2007a. Relationships between mineralogical composition, water absorption and hydric dilatation in the «Macigno» sandstones from Lunigiana (Massa, Tuscany). *European Journal of Mineralogy* 19 (1): 113-123.
- Franzini M., Leoni L., Lezzerini M., Gioncada A., Baglini P., 2007b. Relazioni fra composizione mineralogica e proprietà fisiche nell'arenaria Macigno dei Monti d'Oltre Serchio (Toscana occidentale). Atti IV Congresso Nazionale di Archeometria, pp. 291-305.
- Gamberini F., Masini L., 2001. Dilatometro per imbibizione, realizzazione e metodologia d'analisi per la determinazione della variazione di lunghezza di campioni rocciosi immersi in acqua. Rapporto Tecnico n. 75, Istituto di Geologia Marina, CNR, e Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Bologna, pp. 17.
- Hodgman C.D., Weast R., Selby S.M., 1960. Handbook of chemistry and physics. The Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio, pp. 3481.
- Sebastian E., Cultrone G., Benavente D., Linares L., Elert K., Rodriguez-Navarro C., 2008. Swelling damage in clay-rich sandstones used in the church of San Mateo in Tarifa (Spain). *J. Cult. Herit.* 9: 66-76.
- Weiss T., Siegesmund S., Kirchner D., Sippel J., 2004. Insolation weathering and hygric dilatation: two competitive factors in stone degradation. *Environmental Geology* 46 (3-4): 402-413.

(ms. pres. il 31 dicembre 2008; ult. bozze il 10 aprile 2009)