

Effetti dell'umidità sulle strutture romane

di Carlo Giavarini e Maria Laura Santarelli

Molte costruzioni romane in opus caementicium sono soggette a periodi di bagnamento e di essiccazione causati da eventi stagionali o permanenti, dovuti alle acque meteoriche o capillari. È noto da studi precedenti che tali cicli umido-secco producono variazioni sia nella struttura di vari composti cristallini sia nei materiali di natura zeolitica contenuti in rocce vulcaniche. Scopo del presente lavoro è stato quello di valutare, in via preliminare, l'effetto prodotto da cicli secco-umido su un certo numero di provini cilindrici di calcestruzzo romano prelevati da un monumento antico (la Domus Tiberiana sul Palatino a Roma).



La presenza di fessurazioni nelle murature antiche (ad esempio in quelle delle strutture romane) così come la variazione pur minima della loro inclinazione, sono indici di dissesti e fonti di possibili pericoli. Questi fenomeni sono spesso attribuiti a cedimenti del terreno di fondazione o all'instaurarsi di stati tensionali dovuti a forze esterne. I "diagnostici" e i "medici" di questi monumenti sono in genere i pur bravissimi colleghi strutturisti e geotecnici. Anche il punto di vista del chimico, però, può aiutare. Prendendo infatti in considerazione i costituenti delle murature romane in opus caementicium possono essere fatte alcune considerazioni.

L'opus caementicium ha una struttura composita; infatti è costituito da due strati esterni di mattoni che includono un riempimento di calcestruzzo [1-3]. Nell'area di Roma, quest'ultimo era normalmente prodotto con una malta idraulica a base pozzolanica e un aggregato grosso (>4,75 mm) costituito da pezzi di tufo (spesso in numero elevato), mattoni e marmo aventi varie dimensioni [2, 3]. È noto che i tufi contengono percentuali variabili di zeoliti, dipendentemente dalla loro origine e provenienza [4].

La malta era a sua volta costituita da calce (10-30%) e da un aggregato fine (<4,75 mm), costituito prevalentemente da pozzolana con differenti colorazioni. Infatti, nell'area romana, a seguito di diverse eruzioni, si sono formati dalle ceneri vulcaniche diversi strati geologici di colore differente. Si distinguono pozzolane rosse, nere, grigie e marroni [5-7].

La pozzolana è generalmente composta da silicati e silico-alluminati cristallini (come feldspati, pirosseni e zeoliti) e da sili-

cati e silico-alluminati amorfi, responsabili dell'assorbimento di acqua [8].

La porosità delle malte pozzolaniche è relativamente alta (spesso pari al 30-40%) [6] e permette la risalita capillare delle acque meteoriche all'interno delle strutture, con associati problemi di degrado fisico e chimico [8], dovuti anche alla solubilizzazione dei componenti delle malte; esempio tipico è la trasformazione del carbonato di calcio in bicarbonato.

La struttura e composizione dei materiali costituenti il calcestruzzo romano fanno pensare alla possibilità che l'assorbimento di acqua, che è una loro caratteristica peculiare, possa essere accompagnato anche da variazioni dimensionali. Ciò anche sulla base di dati della letteratura che citano fenomeni di "swelling" relativi a varie rocce cristalline [9] e, specialmente, ai tufi [10]; in questi ultimi sembra esserci una correlazione tra adsorbimento di acqua e contenuto di zeoliti [10].

Scopo della presente indagine è stata una prima valutazione, pratica e sperimentale, dell'effetto dei cicli secco-umido su porzioni di muratura romana prelevata da un antico monumento, nell'ipotesi che pur modeste variazioni dimensionali possano, una volta riferite ad estese porzioni di strutture antiche, essere responsabili di vari fenomeni di degrado quali fessurazioni, cedimenti, espansioni, spesso attribuiti a cedimenti del terreno di fondazione. Non rientra negli scopi del lavoro la definizione scientifica e la modellazione dei fenomeni osservati.

Materiali e prove

La possibilità di avere campioni di dimensioni sufficienti per effettuare prove e indagini su monumenti antichi, soprattutto del tipo di quelle sopra ipotizzate, non è facile, in quanto il loro prelievo implica un intervento distruttivo.

C. Giavarini, M.L. Santarelli, CISTeC/Centro Interdipartimentale di Scienza e Tecnica per la Conservazione del Patrimonio Storico-Architettonico - Università di Roma "La Sapienza" - Via Eudossiana, 18 - 00184 Roma. cistec.roma@uniroma1.it

I lavori di consolidamento della vasta Domus Tiberiana sul Palatino, effettuati dalla Soprintendenza Archeologica di Roma con la collaborazione del CISTeC [11], prevedevano la messa in opera di un certo numero di nuove catene; in alcuni punti fu necessario perforare le murature per creare il passaggio alle barre metalliche (catene) di rinforzo strutturale.

I risultanti campioni cilindrici di calcestruzzo, messi a disposizione della Soprintendenza Archeologica di Roma, sono risultati di dimensioni sufficienti per le prove di imbibizione previste dal presente studio; le loro caratteristiche sono riportate nella Tabella 1. Osservate al microscopio stereoscopico, le sezioni delle malte mostrano la presenza di fini particelle di pozzolana rossa e di tufo (aggregati minori di 4 mm); il tufo del campione 2 è un tipico tufo giallo romano, mentre i tufi degli altri campioni sono del tipo rosso (tufo lionato). Le malte dei campioni 1 e 4 contengono anche un aggregato fine costituito da pozzolana grigia. Considerando invece l'intera composizione del calcestruzzo, gli aggregati di grandi dimensioni sono del tipo evidenziato in Tabella 1.

Le prove previste erano estremamente semplici e consistevano in cicli di imbibizione ed essiccamento controllati dei provini cilindrici. Per effettuare le misure, su ogni campione cilindrico venivano applicate tre coppie di riferimenti metallici, incollati mediante resina epossidica (Figura 1).

La distanza tra i riferimenti (ca. 10 cm) di ogni coppia era misurata periodicamente con un estensimetro avente 0,002 mm di sensibilità. Ogni campione veniva immerso longitudinalmente in acqua, così da coprirlo solo per metà e permettere la risalita capillare dell'acqua, lasciando nel contempo la possibilità all'aria interna di fuoriuscire.

L'ambiente circostante i campioni veniva controllato periodicamente in modo da mantenere costanti nel tempo le condizioni di umidità relativa e di temperatura.

Per un mese e a periodi regolari, si effettuavano le misure sui campioni umidi. Successivamente i campioni umidi venivano lasciati asciugare nel laboratorio per semplice esposizione all'aria, misurandone le variazioni dimensionali; quest'ultima operazione durava un mese o poco più.

Come indicano i grafici di Figura 2, la fase umida e la fase secca hanno avuto una durata di circa 1 mese ciascuna, cioè fino a quando non si registravano ulteriori variazioni dimensionali. Su ogni campione sono stati effettuati sei cicli umido-secco completi. Le suddette modalità di prova, relativamente semplici non fanno riferimento a metodologie standardizzate, date le caratteristiche dei campioni e gli scopi della presente indagine; esse tuttavia sono state effettuate controllando le condizioni ambientali, onde renderle costanti il più possibile durante i vari cicli.

Risultati

La Tabella 2 e la Figura 3 riportano i risultati delle prove sperimentali; i dati sono la media di tre misure fatte su ogni campione.

Escludendo il primo e il secondo ciclo del campione 4, i dati della figura mostrano che, mediamente, il comportamento è molto simile per tutti i cicli: la variazione dimensionale, intesa come rapporto $\Delta L/L$ tra dilatazione e lunghezza originale, è infatti sostanzialmente ripetibile per i vari calcestruzzi romani.

Il campione 5, che contiene minori quantità di

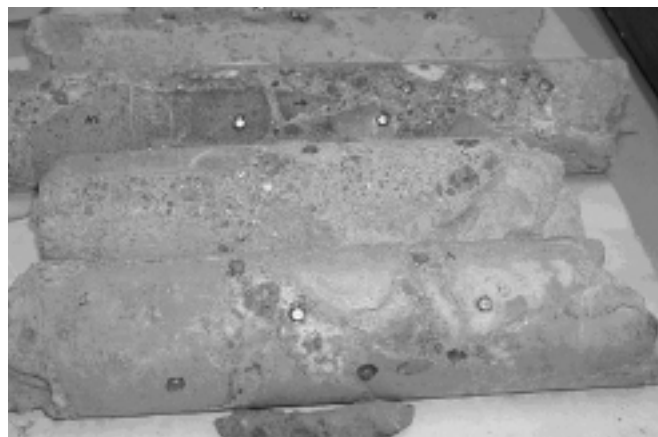


Figura 1 - Campioni impiegati per gli esperimenti; sono visibili alcuni dei riferimenti metallici

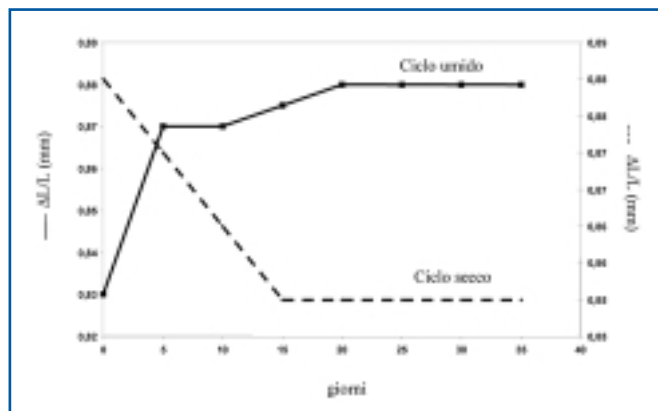


Figura 2 - Tipiche variazioni dimensionali ($\Delta L/L$) durante i cicli secco-umido (campione 1)

tufi, mostra minori variazioni dimensionali, le quali tuttavia restano apprezzabili; anche il contributo della malta pozzolanica alla dilatazione sembra quindi importante. La dilatazione degli altri maggiori componenti del calcestruzzo (per esempio pezzi di mattone e marmo) può essere considerata di entità molto minore. Al fine della presente limitata sperimentazione, si può concludere che le variazioni dimensionali dei campioni sono mediamente del 3-4%, ovvero 3-4 mm per metro lineare. Questi valori sono abbastanza eclatanti per un materiale normalmente considerato dimensionalmente stabile, quale è il calcestruzzo. L'influenza dei materiali zeolitici non può quindi essere trascurata. Considerando i risultati di precedenti studi [9, 10], si può forse ipotizzare che le forze superficiali (attra-

Tabella 1 - Principali caratteristiche dei campioni cilindrici di calcestruzzo

Campione	Diametro (cm)	Lunghezza (cm)	Colore della pozzolana	Aggregato grossolano del calcestruzzo
1	10	40	Rosso	Tufo rosso (~33%)
2	9	37	Rosso	Tufo giallo (~14%) Mattone (~18%)
3	9	52	Rosso	Tufo rosso (~33%)
4	9	43	Rosso	Tufo rosso (~29%) Marmo (~2%)
5	8	33	Rosso scuro	Mattone (~30%) Tufo giallo (~12%)

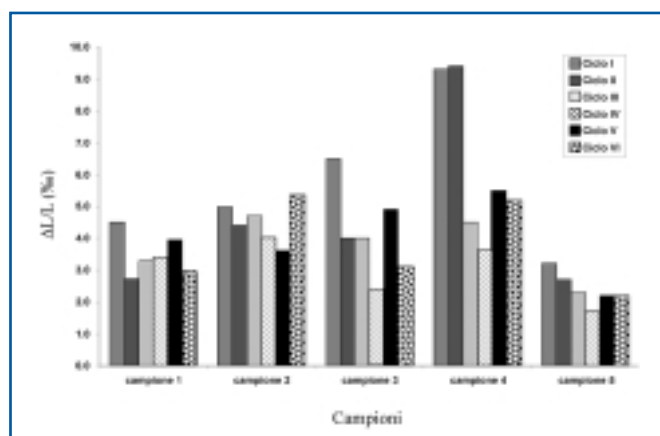


Figura 3 - Visualizzazione grafica degli allungamenti durante i cicli, riferita a cinque campioni



Figura 4 - Le porzioni di Domus Tiberiana affacciata sui Fori Romani

zioni di van der Waals, repulsioni per solvatazione e doppio strato elettrico), responsabili della variazione di pressione nei pori, si manifestino soprattutto nelle malte pozzolaniche e negli aggregati tufacei. Nel seguito mostriamo brevemente, con due esempi, l'importanza che le dilatazioni misurate possono avere su grandi strutture archeologiche.

Ipotesi di influenza della dilatazione su due strutture romane antiche

Domus Tiberiana

La Domus Tiberiana è un imponente complesso quadrangolare sito nella parte occidentale del Palatino e considerato il pri-

mo palazzo imperiale costruito con un progetto unitario sul Palatino. Il palazzo, ampliato varie volte [10, 11], fu ricoperto in buona parte nel quindicesimo secolo dagli Orti Farnesiani. Attualmente sono chiaramente visibili solo le parti che si affacciano verso il Foro Romano (Figura 4); esse sono composte da due livelli di arcate in opus caementicium, aggiunte dall'imperatore Adriano alla precedente struttura: la loro altezza è circa 27 metri. Il retro delle arcate è separato dalle strutture preesistenti tramite un passaggio, detto Clivo della Vittoria. Entrambi i lati che si affacciano sul Clivo sono alti circa 16 metri. Tutto il complesso è stato oggetto, nel corso dei secoli, di vistosi fenomeni di spoliazione e di degrado. Negli anni Ottanta alcuni cedimenti hanno aumentato la possibilità di contatto con l'ambiente.

Studi relativamente recenti hanno ipotizzato uno slittamento e rotazione delle strutture (Figura 5); una piccola variazione di altezza delle strutture è stata attribuita a cedimenti differenziati dal terreno di fondazione [14].

L'ipotesi che si può fare, a seguito degli esperimenti secco-umido sul calcestruzzo, è che ai fenomeni di degrado sopracitati possano aver contribuito, seppur in parte, graduali fenomeni evaporativi dovuti alla rimozione del terreno, un tempo addossato alle strutture e ad altre cause. Anche considerando un'ipotetica variazione percentuale di umidità del 25% relativa ad una muratura di 16 metri, si possono raggiungere valori di ritiro (o dilatazione) pari a ca. 1,5 cm (maggiori degli ipotizzati "spostamenti" delle strutture misurati negli ultimi 20-25 anni).

Sostruzione del lato sud-ovest del Palatino

Le imponenti sostruzioni del lato sud-ovest del Palatino, al confine con la Domus Tiberiana, sostengono la parte del Palatino che include il tempio della Magna Mater [15]; trattasi quasi certamente di mura di fondazione, attualmente scoperte e visibili solo da un lato (Figure 6 e 7). L'altro lato è con tutta probabilità a contatto con il terreno del Palatino o con altre strutture (murature, tufi repubblicani o altro). Fenomeni relativamente recenti e difficili da definire hanno favorito la penetrazione delle acque meteoriche nella struttura muraria.

In proposito è significativo il confronto tra le foto delle due Figure 6 e 7, prese rispettivamente alcuni anni fa e recentemente. La sostruzione rappresentata, che ha una altezza di circa 15 metri, era in precedenza asciutta (Figura 6); la porzione scura della Figura 7 mostra invece che attualmente circa la metà del muro è impregnata di acqua. Tale fenomeno è visibile, senza apparenti variazioni, in tutte le stagioni dell'anno. Il calcestruzzo è in questo caso composto da una malta pozzolanica (pozzolana rosso-scura, principalmente) conte-

Tabella 2 - Variazioni dimensionali riferite a una lunghezza di 100 mm

Campioni	I ciclo			II ciclo			III ciclo			IV ciclo			V ciclo			VI ciclo		
	ΔLu	ΔLs	%	ΔLu	ΔLs	%	ΔLu	ΔLs	%	ΔLu	ΔLs	%	ΔLs	ΔLu	%	ΔLu	ΔLs	%
1	8,72	8,24	4,8	8,72	8,43	2,9	8,78	8,43	3,5	8,78	8,42	3,6	8,90	8,48	4,2	8,90	8,59	3,1
2	9,49	8,95	5,4	9,49	9,02	4,7	9,34	8,84	5,0	9,34	8,91	4,3	9,29	8,91	3,8	9,29	8,72	5,7
3	9,28	8,59	6,9	9,28	8,85	4,3	9,28	8,85	4,3	9,28	9,02	2,6	9,31	8,79	5,2	8,98	9,31	3,3
4	9,68	8,69	9,9	9,68	8,68	10,0	9,16	8,68	4,8	9,16	8,78	3,8	9,14	8,55	5,9	9,14	8,60	5,4
5	8,96	8,62	3,4	8,96	8,67	2,9	8,92	8,67	2,5	8,92	8,74	1,8	8,93	8,70	2,3	8,93	8,70	2,3

ΔLu = variazione dimensionale, fase umida del ciclo (espressa in mm); ΔLs = variazione dimensionale, fase secca del ciclo (espressa in mm)

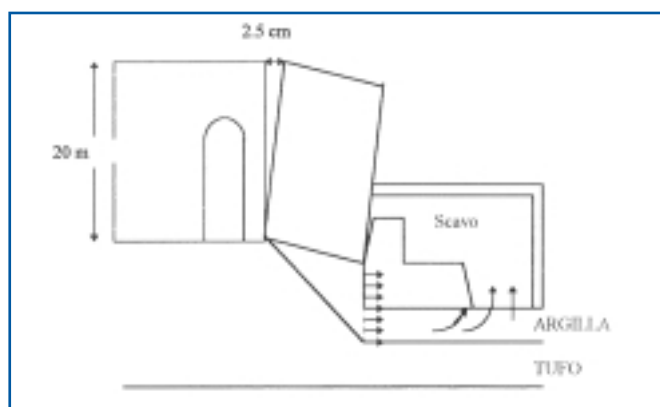


Figura 5 - L'ipotesi di scivolamento della Domus Tiberiana verso i Fori



Figura 6 - Il muro di costruzione del lato sud-ovest del Palatino, come era qualche anno fa



Figura 7 - Il muro di Figura 6 nello stato attuale. La porzione scura è impregnata di acqua

nente grossi pezzi di selce. Nell'ipotesi che la selce sia dimensionalmente stabile, si può calcolare che la variazione dimensionale dovuta alla malta pozzolanica sia dell'ordine di 2-3 cm, valore non trascurabile e in grado di creare tensioni nella muratura (nella quale in effetti si osservano vistosi fenomeni fessurativi).

Conclusioni

La semplice sperimentazione condotta su alcuni provini di calcestruzzo romano non vuole avere un valore "universale", in quanto per un approccio rigorosamente scientifico occorrerebbero prove statistiche su un numero superiore di campioni. Essa mostra tuttavia che anche un approccio più chimico rivolto ai materiali, può contribuire alla comprensione di alcuni fenomeni che interessano le grandi strutture dell'archeologia romana. Si è approfittato dell'eccezionale disponibilità di materiali provenienti da interventi "distruttivi", per effettuare alcune semplici prove di imbibizione/essiccazione, aventi caratteri eminentemente pratici e indicativi; lo scopo era quello di verificare le variazioni dimensionali di un tipico calcestruzzo romano sottoposto a cicli secco/umido.

Le prove hanno mostrato senza alcun dubbio che tale materiale è soggetto ad apprezzabili variazioni dimensionali se viene impregnato di acqua: mediamente, le variazioni sono state di 3-4 mm per ogni metro lineare. È ipotizzabile che tale fenomeno interessi, in misura minore o maggiore, anche altri tipi di calcestruzzo antico.

Rapportate a murature strutturali di notevoli dimensioni (10-20 metri), o in genere a monumenti dell'epoca romana, le dilatazioni misurate diventano abbastanza impressionanti. Nel caso specifico della Domus Tiberiana potrebbero in parte spiegare alcuni fenomeni macroscopici (distacco delle cortine murarie, microfessure, variazioni dimensionali localizzate ecc.) in precedenza attribuiti a possibili cedimenti differenziati nel terreno di fondazione.

Bibliografia

- [1] C.F. Giuliani, *L'edilizia nell'antichità*, Nis, Roma, 1991.
- [2] R. Marta, *Tecnica Costruttiva Romana*, Ed. Kappa, Roma, 1986.
- [3] C.F. Giuliani, *Materiali e Strutture*, 1997, VII(2-3), 49.
- [4] G. Lombardi, *Clay Miner.*, 1984, 19(5), 789.
- [5] G. Chiari et al., *Materiali e Strutture*, 1992, II(3), 111.
- [6] G. Chiari et al., *Materiali e Strutture*, 1996, VI(1), 1.
- [7] Servizio Geologico Italiano, *Memorie descrittive per la carta geologica d'Italia. La geologia di Roma*, Il Centro Storico, Vol. L, R. Funiciello (coordinamento scientifico), Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 1995.
- [8] W. Bland, D. Rolls, *Weathering*, Arnold, London, 1998.
- [9] A. Schult, G. Shi, *Geophys. J. Inst.*, 1997, 131, 179.
- [10] A. Colantuono et al., *Atti del I° Convegno Nazionale di Scienza e Tecnologia delle Zeoliti*, L'Aquila 1991, 115.
- [11] CISTeC, *Rapporto per Soprintendenza Archeologica di Roma sui lavori per la Domus Tiberiana*, Roma, 1999.
- [12] E. Monaco, *Il Palatino - Area Sacra Sud-Ovest e Domus Tiberiana*, C. Giavarini (Ed.), L'Erma di Bretschneider, Roma, 1998, 289.
- [13] C. Krause, *ibid.*, 259.
- [14] G. Calabresi, G. Scarpelli, *ibid.*, 379.
- [15] P. Pensabene, *ibid.*, 1.