POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Dal Dottorato di Ricerca sulla durabilità dei materiali consolidanti al cantiere di restauro della Reggia di Venaria

Original
Dal Dottorato di Ricerca sulla durabilità dei materiali consolidanti al cantiere di restauro della Reggia di Venaria / Grazzini, A. - In: Il Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Strutture del Politecnico di Torino 1990-2018: Una Fucina di Idee per oltre un Quarto di Secolo / Alberto Carpinteri e Giuseppe Lacidogna. - STAMPA. - Torino : Politecnico di Torino, 2022. - ISBN 978-88-85745-79-7. - pp. 85-92

Availability:
This version is available at: 11583/2973077 since: 2022-11-15T09:24:28Z

Publisher:
Politecnico di Torino

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

27 November 2026

Dal Dottorato di Ricerca sulla durabilità dei materiali consolidanti al cantiere di restauro della Reggia di Venaria

Alessandro Grazzini[1]

[1]*Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino*
E-mail: *alessandro.grazzini@polito.it*

Keywords: murature storiche, consolidamento, compatibilità, prove di laboratorio.

SOMMARIO. Il restauro di un edificio storico è un'operazione complessa e multidisciplinare, in cui la scelta di materiali consolidanti compatibili con l'originario supporto storico rappresenta un nodo cruciale per la durabilità dell'intervento. L'esigenza di maggiore sicurezza statica e sismica del patrimonio monumentale richiede l'utilizzo di diverse malte di rinforzo, la cui interazione meccanica deve essere preventivamente testata in relazione all'eterogeneità delle tessiture murarie esistenti. L'obiettivo di questa ricerca di dottorato è stato lo sviluppo di una rapida metodologia sperimentale di qualificazione: attraverso prove statiche, cicliche e termo-igrometriche, è possibile simulare le sollecitazioni che intervengono all'interfaccia tra malta consolidante e muratura originale, valutando la variazione di parametri deformativi nel tempo. Tale studio è stato validato positivamente nell'applicazione diretta all'interno del cantiere di restauro della Reggia di Venaria, dove ha permesso di individuare i migliori prodotti consolidanti che a tutt'oggi stanno dimostrando la loro durabilità. La stessa procedura è stata migliorata nel corso degli studi post dottorato, anche col supporto delle emissioni acustiche, ed impiegata con successo per conto di altri siti storici, come i Sacri Monti per la compatibilità degli intonaci deumidificanti.

1 INTRODUZIONE

Il patrimonio architettonico richiede significativi lavori di recupero a causa dell'elevato degrado a cui è stato abbandonato. Gli edifici storici presentano danni causati da sollecitazioni meccaniche (azioni sismiche, dissesti strutturali, sovraccarichi) e termo-igrometriche (cicli di gelo-disgelo, umidità) che nel tempo riducono la resistenza della muratura compromettendone la conservazione. Questo studio riguarda l'utilizzo di malte strutturali nel campo del consolidamento con tecniche di tipo tradizionale (intonaci armati, calotte estradossali, iniezioni): sebbene l'applicazione dei nuovi materiali compositi sia oramai sempre più frequente e ben sviluppata, tuttavia molte operazioni di rinforzo possono essere ancora eseguite con l'utilizzo di tradizionali malte di calce per una migliore compatibilità dell'intervento. Il mercato offre molte tipologie di malte strutturali, alcune con elevate prestazioni meccaniche, di cui vengono dichiarati solo valori di resistenza a breve termine; tuttavia non si conosce quasi nulla della loro durata se applicati a strutture in muratura molto eterogenee. Una singola malta non può avere caratteristiche meccaniche e termo-igrometriche compatibili con tutte le diverse murature storiche. Inoltre, i recenti terremoti hanno mostrato il fallimento di consolidamenti eseguiti con malte cementizie, la cui eccessiva rigidità ha completamente distorto gli schemi statici originali degli edifici. In questi casi si possono generare pericolose sollecitazioni all'interfaccia con la muratura esistente: l'esperienza nel campo dei beni monumentali ha oramai portato a favorire l'utilizzo di malte a base di calce idraulica con caratteristiche meccaniche simili a quelle delle murature storiche.

Al Laboratorio Prove non Distruttive del Politecnico di Torino è stata messa a punto una procedura sperimentale per selezionare le nuove malte strutturali e testarne la durabilità quando applicate su una specifica struttura storica in muratura. L'obiettivo è dimostrare l'importanza dei test preliminari per identificare il prodotto più compatibile per ogni specifico lavoro di restauro, sensibilizzando i professionisti ad operare la scelta dei materiali in funzione del contesto storico-architettonico. I test sono sia statici che ciclici, e partono da singoli campioni per caratterizzare il materiale fino a campioni misti mattone-malta per simulare le reali sollecitazioni che nel tempo possono sollecitare il binomio strutturale. La ricerca è iniziata a supporto del cantiere di restauro della Reggia di Venaria, attraverso un accordo di ricerca con il Politecnico di Torino finalizzato a convalidare la durabilità delle malte consolidanti nei lavori di restauro. Applicata con successo, la metodologia sperimentale ha continuato a perfezionarsi nei successivi anni di ricerca post dottorato anche grazie alla tecnica di monitoraggio con le emissioni acustiche, intervenendo in supporto tecnico ad altri siti UNESCO come i Sacri Monti per testare intonaci deumidificanti applicati su murature in pietra.



(a) (b)

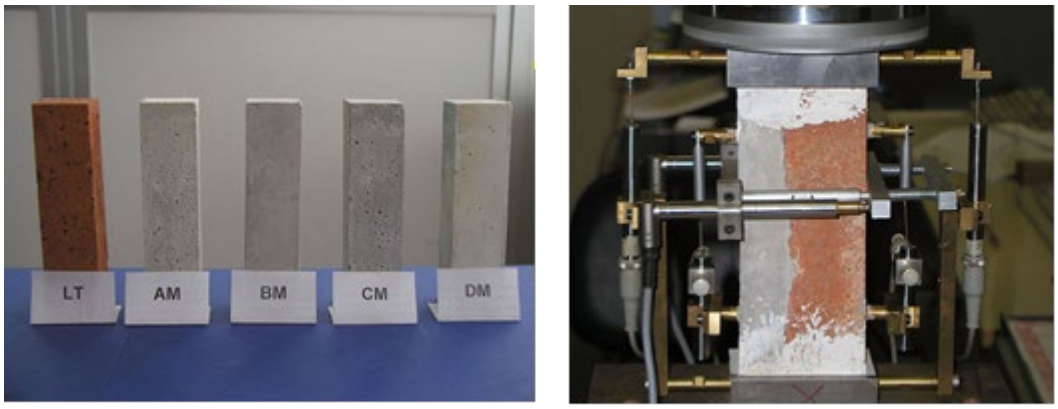
Figura 1: a) Cantiere della Reggia di Venaria; b) Consolidamento estradossale di volta.

2 MATERIALI E PREPARAZIONE DEI PROVINI

La procedura sperimentale utilizzata per la Reggia di Venaria ha interessato quattro tipologie di malte (codificate A, B, C, D), adatte alle seguenti tecniche di consolidamento: rinforzo con intonaco armato (A; C), ristilatura dei giunti (A; D), intonaco armato o calotta estradossale per volte (D), iniezioni (B). Sono stati scelti prodotti dalle diverse finalità con l'intenzione di tarare la metodologia di prova e mettere in risalto le differenze di prestazione a lungo termine.

Oltre ad una esauriente serie di prove su campioni di singolo materiale, compreso il laterizio storico della Reggia di Venaria (provini 40x40x160 mm, Figura 2a), particolare attenzione è stata posta a specifici provini misti laterizio-malta (Figura 2b), strumentati con tre coppie di trasduttori e una coppia estensimetrica per misurare le deformazioni assiali in ogni direzione. Questi sono

stati sottoposti sia a prove meccaniche (statiche e cicliche), sia termo-igrometriche di gelo-disgelo per valutare anche l'influenza della gelività sul comportamento a fatica. Ogni provino misto è stato etichettato con "XL" dove "X" sta per il codice relativo alla malta (A, B, C, D).



(a) (b)

Figura 2: a) provini singoli; b) provino misto (223x57x83mm)

Per ogni serie oltre alle prove statiche di determinazione del carico di rottura su due campioni misti, altri due-tre provini sono stati testati a prova ciclica, impostata al 70% del carico di rottura statico per una durata di 100000 cicli, a 1.3 Hz per un totale di 24 ore circa. I campioni misti che sono rimasti integri dopo tale prova sono stati sottoposti a rottura per compressione. Inoltre, sempre per ogni serie, altri quattro campioni misti sono stati testati a 28 cicli di gelo-disgelo, successivamente estratti dalla cella e sottoposti a 3 cicli di carico-scarico per valutare il modulo elastico. Di questi, due hanno poi compiuto la prova statica a rottura, mentre i rimanenti sono stati utilizzati per le successive prove cicliche post gelività.

3 RISULTATI SPERIMENTALI

La Tabella 1 sintetizza le principali caratteristiche meccaniche dei singoli materiali, valutate anche dopo 6 mesi dal getto in cui si evidenziano notevoli variazioni delle resistenze meccaniche. Occorre ricordare che la compatibilità del materiale presuppone al contrario una certa stabilità delle prestazioni meccaniche nel tempo.

Materiale	**σ_{28gg} (MPa)**	**Δ% 6 mesi σ_{28gg}**	**E (MPa)**
A	8,94	-7,50	6208
B	5,16	+111,55	7534
C	4,20	+146,39	12678
D	15,85	+57,47	12274
Laterizio storico	8,98	-9,89	4099

Tabella 1: risultati prove a compressione e modulo elastico su singoli materiali

Il carico di rottura dei provini misti (Tabella 2) risulta più alto nelle combinazioni fra materiali

con modulo elastico similare (serie AL e BL) rispetto a quelle in cui la malta ha un modulo elastico notevolmente superiore al laterizio storico (serie CL e DL). Il modulo elastico dei materiali ha un'importanza elevata soprattutto con materiali accoppiati: in presenza di sollecitazioni statiche o dinamiche nascono tensioni nel materiale applicato, che dovranno bilanciare quella dovuta al vincolo (supporto murario). Lo sforzo di trazione o compressione sarà tanto più grande quanto maggiore è la rigidità del materiale stesso: in tal caso possono nascere sollecitazioni in uno dei due materiali proporzionali al proprio modulo elastico, portando all'insorgere di fenomeni di degrado come la delaminazione o la fessurazione.

Serie provino misto	σ (MPa)	%Δσ dopo 28 cicli gelo-disgelo	E (MPa)
AL	15,40	+3,15	13072
BL	16,89	-17,81	10670
CL	12,58	+18.25	9537
DL	12,04	+89,93	7148

Tabella 2: risultati test a compressione e modulo elastico su provini misti.

Le prove cicliche rappresentano la parte più delicata e importante della sperimentazione. L'alto valore di carico è finalizzato a rendere la prova severa entro un breve periodo di durata del test, nonché di mettere in luce la potenzialità di alcuni indicatori monitorati nel tempo.

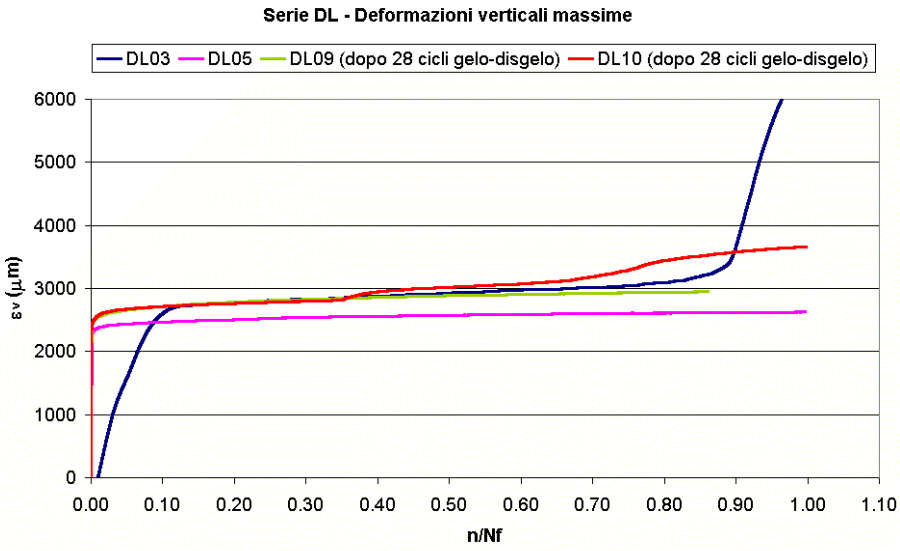


Figura 3: prove cicliche serie DL: deformazioni verticali massime

In una tipica curva σ−ε di una prova ciclica a fatica è possibile individuare tre fasi distinte: fase I, dove si verifica un rapido incremento delle deformazioni (interessa all'incirca il 10% della vita del provino); fase II di stabilizzazione, dove le deformazioni crescono gradualmente a tensione

pressoché costante (10-80% della vita utile); fase III, durante la quale c'è un rapido incremento fino a rottura. Diversi autori hanno dimostrato che la vita a fatica del materiale sotto sollecitazione ciclica è strettamente dipendente dalla velocità di evoluzione delle deformazioni della fase II. In analogia a quanto proposto per il calcestruzzo, viene analizzato l'andamento della deformazione verticale nel tempo come parametro principale per quantificare e prevedere la fatica del materiale. In Figura 3, ad esempio per la serie DL, è possibile osservare come i provini che sono giunti a rottura abbiano manifestato una pendenza maggiore nel tratto della fase II, seguita, intorno all'80-90% della vita utile, da un brusco innalzamento in corrispondenza della fase III (rottura). Al contrario, le curve dei campioni che hanno superato i 100.000 cicli hanno una pendenza minore che si mantiene pressoché costante fino alla fine, segno di un comportamento efficace ancora lontano dal punto di rottura.

Dai risultati delle prove cicliche appena descritte sono state ricavate, per interpolazione lineare tra il 20% e 80% dei valori di deformazione (secondary creep), le derivate $\partial\varepsilon_v / \partial n$, cioè le variazioni dell'andamento della curva delle deformazioni rispetto al tempo nella fase II. Attraverso una regressione lineare in scala logaritmica è possibile diagrammare i dati per ottenere una relazione analitica (1), che leghi la velocità di variazione della deformazione verticale $\partial\varepsilon_v / \partial n$ col numero di cicli N a rottura per fatica.

$$N = 1839{,}92 \cdot \left(\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial n} \right)^{-0{,}7284} \quad (1)$$

In base ai risultati conseguiti nel corso della sperimentazione, le malte B e D hanno dimostrato un comportamento soddisfacente nel binomio col laterizio storico della Reggia di Venaria Reale.

4 PROSECUZIONE DELLA RICERCA

Nel corso degli studi di dottorato è stata ricavata una valida correlazione, attraverso la quale eseguendo un certo numero di cicli sul materiale, fino a portarlo alla fase in cui le deformazioni crescono a velocità costante, è possibile predire la vita a fatica con un buon grado di approssimazione. La metodologia e l'analisi numerica si sono rivelate molto sensibili ai primi segni di indebolimento del sistema laterizio- malta, segnalando le fasi iniziali di crisi per fatica.

Tuttavia la procedura sperimentale ha saputo adattarsi nel tempo anche ad altre specifiche esigenze di valutazione. Nel corso del programma di ricerca REFRESCOS, sono state tarate prove sperimentali per la pre-qualificazione di nuove malte di calce idraulica per il risanamento degli intonaci decoesi dall'umidità all'interno del complesso monumentale e sito UNESCO dei Sacri Monti di Varallo. Il setup di prova è stato riadattato: lo strato di malta non è stato applicato in completa aderenza con il blocchetto lapideo, bensì sono state inserite due simmetriche discontinuità (inferiore e superiore) per innescare la frattura lungo l'interfaccia tra i materiali. Si tratta, infatti, di una prova di taglio in cui si vuole favorire la delaminazione mediante un doppio sistema di cunei di supporto inferiore in acciaio, accoppiato con Teflon di spessore pari a 1 mm. Tale sistema di appoggio è servito per ridurre l'attrito legato alla espansione orizzontale della malta, in modo da stabilizzare le curve di carico che durante la prova progredisce in funzione del controllo di spostamento (Figura 4).

A questo setup di prova sono stati altresì introdotti i sensori di monitoraggio con la tecnica delle emissioni acustiche. Essi hanno permesso di rilevare con maggiore precisione la modalità di frattura mediante la valutazione dell'Average Frequency e del Rise Angle (Figura 5), individuando le fasi di rottura per Modo I rispetto a quelle di Modo II nelle fasi della delaminazione. La

geometria dei provini compositi ha permesso di verificare la compatibilità tra intonaco deumidificante e muratura: il parametro di valutazione non è solamente il carico di rottura, bensì anche la duttilità o fragilità del distacco, valutata grazie ai sensori di emissione acustica.

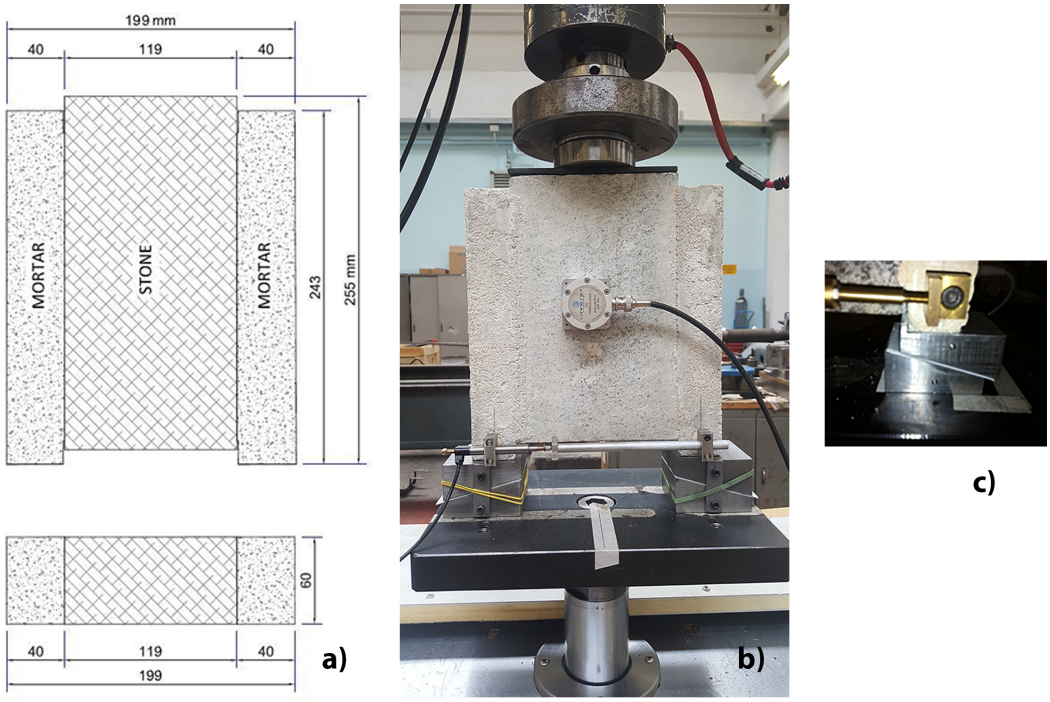
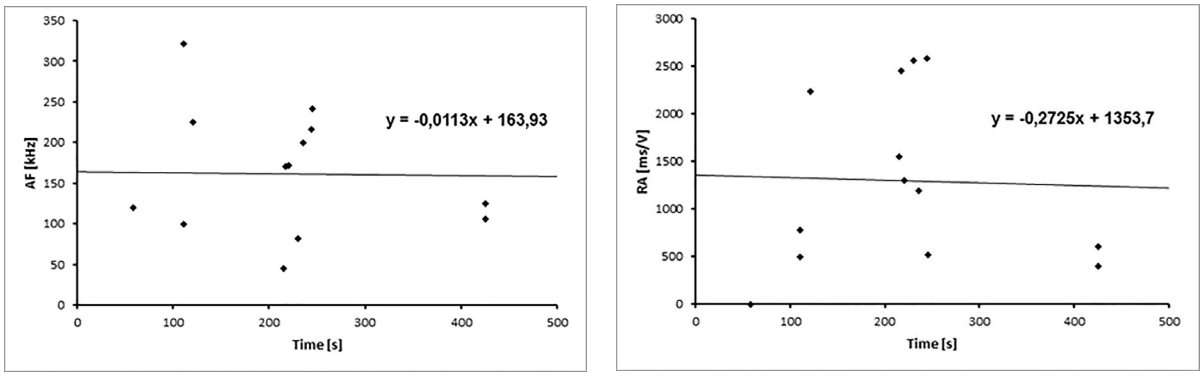


Figura 4: geometria del campione (a); configurazione della prova (b); geometria dei cunei (c).



(a) (b)

Figura 5: Average Frequency, AF (a); and Rise Angle, RA (b).