

# DISSESTO E RESTAURO DELLE ANTICHE MURATURE A SACCO: GRADIENTI TERMICI PROVOCATI DA INIEZIONI DI CEMENTO

L. Coppola (\*), M. Collepari (\*\*)

(\* ) Enco, Engineering Concrete, Spresiano (TV).

(\*\*) Dipartimento di Scienza dei Materiali e della Terra, Università di Ancona

## ABSTRACT

In the present paper the main causes of the failure in the old masonry walls "a sacco" have been examined. Moreover the main problems related with the repair techniques usually utilized for the consolidation of these masonry walls, have been analyzed. In particular, special attention has been given to the consolidation technique through injection of cement slurries, since physical (thermal gradients) and chemical (reaction with gypsum) events can promote the deterioration of consolidated walls.

## INTRODUZIONE

Nel presente lavoro vengono discusse le cause principali che determinano il dissesto delle antiche murature a sacco con nucleo in calcestruzzo improprio. Vengono, inoltre, analizzate le principali problematiche connesse con le tecniche di intervento usualmente impiegate per il consolidamento delle murature "concrete". Particolare attenzione viene dedicata al consolidamento mediante iniezioni cementizie in relazione ai potenziali degradi di tipo fisico (gradienti di temperatura elevati) e chimico (incompatibilità con i materiali originali, in special modo il gesso) che possono innescare nelle murature consolidate.

## 1. LE MURATURE A SACCO

Per la costruzione delle murature degli edifici storici è stato largamente impiegato nei secoli scorsi il procedimento "a sacco". Questa tecnica, utilizzata estesamente dai Romani (Fig. 1), si basava sulla realizzazione di due paramenti esterni, che fungevano da casseforme a perdere e da elementi strutturali portanti, e di un nucleo centrale costituito da elementi lapidei di grosse dimensioni, frammisti a scarti di tegole e mattoni legati con malta di calce, di gesso o di calce e pozzolana, molto spesso di qualità scadente (*opus caementicium*) (1).



**Fig. 1 - Esempio di opus caementicium (Pompei - Terme del foro)**

L'eccellente qualità dei materiali impiegati per la realizzazione dei paramenti esterni delle murature a sacco, unitamente all'accuratezza nella loro realizzazione (dettata da motivi di carattere statico ed estetico) e, per contro, l'impiego di materiali disposti alla rinfusa e legati con malta di qualità spesso scadente nella realizzazione del nucleo di riempimento, determina per le murature in calcestruzzo improprio una struttura non omogenea ma, il più delle volte, tripartita; ne consegue che il comportamento statico dei tre elementi che costituiscono la muratura a sacco è sostanzialmente differente. In particolare, il nucleo, sommariamente legato con malte di qualità scadenti, risulta nella maggior parte dei casi (fatta eccezione per le murature di ridotto spessore) un elemento non essenziale dal punto di vista statico. I paramenti, invece, unitamente all'intonaco, soprattutto nei casi in cui questo si presenta di ottima qualità e di spessore considerevole (maggiore di 3 cm), assolvono ad un compito di carattere statico fungendo da elementi portanti rigidi.

## **2. I DISSESTI DELLE MURATURE A SACCO**

Numerose sono le cause che tendono ad alterare il regime interno di tensione esistente nelle murature degli edifici storici. Queste cause conducono generalmente ad una perdita locale o generale dell'equilibrio statico preesistente annunciato da deformazioni o lesioni.

Tralasciando le cause di dissesto provocate da cedimenti fondali, che riguardano gli elementi di fabbrica indipendentemente dalla loro tipologia muraria, quelle che più frequentemente compromettono o pregiudicano la stabilità delle murature in calcestruzzo improprio sono lo schiacciamento e la pressoflessione.

## **2.1 Lo schiacciamento**

Le strutture murarie risultano soggette a schiacciamento, allorquando, per effetto di sollecitazioni di compressioni eccessive, subiscono dilatazioni trasversali non compatibili con le capacità coesive dei materiali di cui sono costituite. Lo schiacciamento è un dissesto estremamente pericoloso in quanto il sistema murario, se per gli altri tipi di dissesto (ad esempio un cedimento fondale) raggiunge, anche se fessurato, uno stato di quiete, per effetto dello schiacciamento, invece, volge inevitabilmente verso il collasso strutturale.

Una delle cause di "natura intrinseca" più frequenti che determina il dissesto per schiacciamento delle murature "concrete" è il difetto di omogeneità delle sezioni reagenti (2). La maggiore compressibilità delle zone centrali costituite dal riempimento, rispetto ai paramenti esterni, infatti, determina, per il rispetto della congruenza, una concentrazione degli sforzi sui rivestimenti. In alcuni casi addirittura, soprattutto nelle murature a sacco rivestite in pietra da taglio, il carico grava quasi interamente sui paramenti, mentre il nucleo in "calcestruzzo" risulta praticamente scarico. Ne deriva, quindi, che negli elementi di fabbrica soggetti successivamente alla loro costruzione a sovraccarichi aggiuntivi o, più semplicemente, ad una riduzione della capacità portante per effetto del degrado dei materiali del paramento (ed in particolare delle malte) - più esposti agli agenti aggressivi che non il nucleo - è elevato il rischio di dissesto per schiacciamento.

## **2.2 La pressoflessione**

Al dissesto da schiacciamento si accompagna sovente quello per pressoflessione.

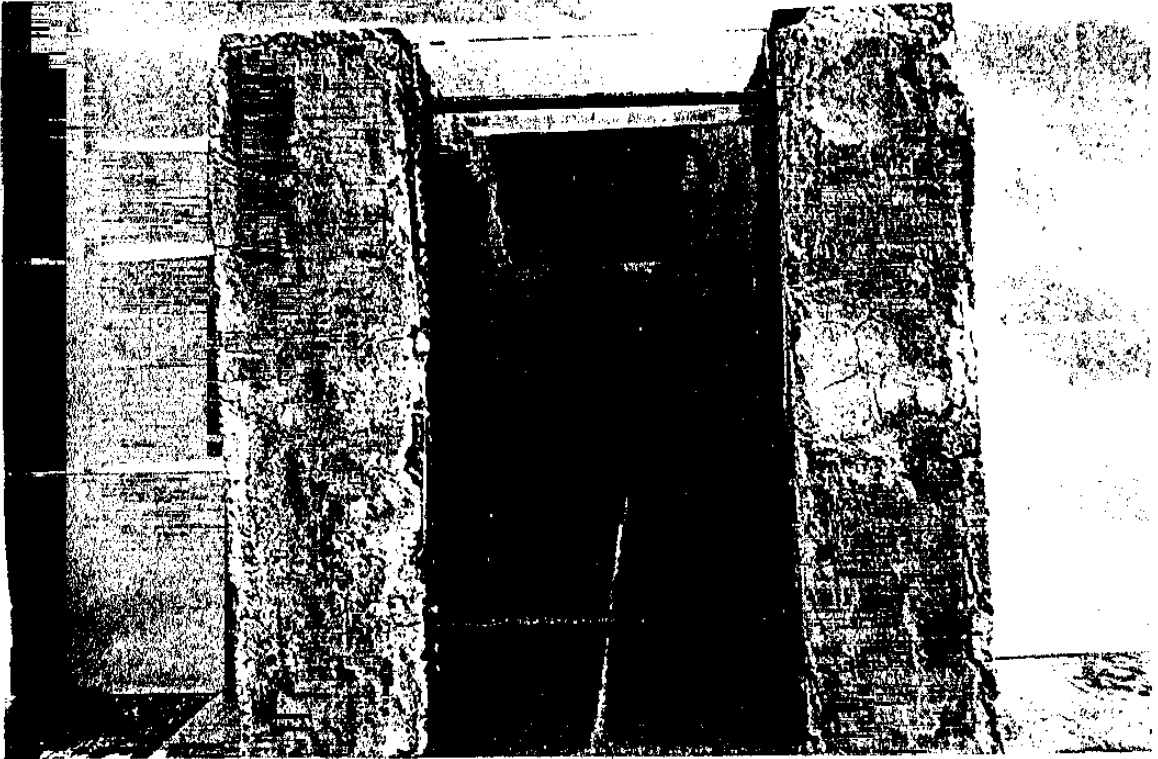
L'impiego di malte di qualità scadente, la mancanza di omogeneità delle sezioni degli elementi murari a sacco e, molto spesso, l'assenza di collegamento tra i paramenti murari delle murature "concrete", determina in questi elementi di fabbrica l'insorgere delle deformazioni e delle lesioni caratteristiche del dissesto da pressoflessione. La mancanza di omogeneità delle sezioni nelle murature in calcestruzzo improprio, dove ciascun elemento è caratterizzato da un modulo di elasticità diverso da quello del materiale adiacente, infatti, comporta sempre uno scostamento del baricentro meccanico dalla verticale per l'asse del solido lungo il quale agisce la risultante dei due carichi. Il risultato è la nascita di una eccentricità delle risultanti dei carichi e, quindi, di una sollecitazione di pressoflessione anche in presenza di carico geometricamente centrato.

La mancanza di un efficace collegamento tra i paramenti, di certo non garantito dal "calcestruzzo" del nucleo di scadente qualità, espone il muro a sacco al rischio della pressoflessione. A tal proposito è opportuno ricordare che, essendo il carico di punta proporzionale al cubo dello spessore del muro, se esso è "smembrato" in tre elementi distinti (paramento esterno, più nucleo in calcestruzzo improprio, più paramento interno), supposti per semplicità di pari spessore, ognuno di essi potrebbe sopportare appena un ventisettesimo del carico che l'interno muro sopporterebbe se costituito da elementi omogenei e ben collegati (2).

## **3. TECNICHE DI INTERVENTO**

Le manifestazioni del dissesto dovute a deficienze strutturali delle murature sono nella maggior parte dei casi di tipo misto in quanto ciascun dissesto (es. pressoflessione) produce sempre dei fenomeni secondari (ad esempio lo schiacciamento) che aggravano il processo distruttivo prodotto dal dissesto principale.

Generalmente la pressoflessione produce uno smembramento del setto murario che determina come fenomeno secondario lo schiacciamento del materiale che può aggravare o anticipare il collasso dell'elemento murario. Nelle fasi iniziali, il dissesto si manifesta con deformazioni dell'intonaco accompagnate da lesioni ad andamento verticali e da espulsione di piccole porzioni di materiale. Negli stadi più avanzati l'espulsione del materiale può interessare importanti masse murarie, e le superfici di frattura si localizzano in corrispondenza delle zone basali con andamento iperboloidico classico della rottura a compressione.



**Fig. 2 - Intelaiatura del blocco di muratura costituita da paramenti in mattoni pieni su tre lati e da una lastra di vetro (per consentire l'osservazione visiva) sul quarto.**



**Fig. 3 - Blocco di muratura realizzato con l'intelaiatura di Fig. 2 riempita con ghiaia legata con malta di calce e pozzolana.**

I provvedimenti da attuare per le murature in calcestruzzo improprio soggetto a pressoflessione o schiacciamento dipendono dallo stato di avanzamento del dissesto.

Nelle fasi iniziali, e quindi meno pericolose, solitamente si procede ad una rigenerazione del legante mediante colature o iniezioni cementizie con le quali ci si prefigge anche di riempire le macrocavità che sono presenti nel nucleo centrale in calcestruzzo, al fine di garantire una maggiore omogeneità degli elementi strutturali che costituiscono l'elemento di fabbrica.

L'intervento si realizza eseguendo nel muro da consolidare una serie di perforazioni disposte ai vertici di un reticolo a maglie quadrate di lato variabile tra i 50 e i 100 cm. Per muri di spessore non superiore a 60 cm i fori vengono eseguiti da un solo lato; per spessori superiori si procede attaccando il muro da entrambi i fronti. I fori, del diametro di 3-4 cm, possono essere orizzontali oppure inclinati e vengono muniti di appositi boccagli in plastica del diametro di 1-1.5 cm attraverso i quali si cola la bolacca di cemento, dopo aver provveduto a tappare tutte le possibili vie di fuga e dopo aver eseguito un accurato lavaggio della muratura con acqua. Nel caso che l'introduzione della bolacca venga effettuata a pressione, questa non deve superare le 3 atmosfere (3).

L'iniezione o la colatura si interrompe quando la bolacca fuoriesce dal foro più vicino; si provvede, quindi, a sigillare il foro appena iniettato e si procede nell'iniezione del foro successivo, cercando sempre di effettuare le iniezioni per zone di muratura simmetriche, in modo da non creare squilibri nei setti murari.

Al fine di garantire l'efficacia dell'intervento di consolidamento mediante iniezioni cementizie è necessario che le sospensioni utilizzate posseggano alcuni importanti requisiti reologici, elastici, chimici e termici.

Per quanto attiene alle caratteristiche reologiche è necessario che la bolacca di iniezione risulti sufficientemente fluida (svuotamento al cono di Marsh di un litro di miscela minore di 30 secondi) per intasare completamente tutti i vuoti e le soluzioni di continuità del calcestruzzo improprio, ma allo stesso tempo risulti priva di segregazione di acqua essudata (*bleeding*); la separazione dell'acqua dalla miscela cementizia, infatti, determinerebbe, in seguito alla successiva evaporazione, la presenza di vuoti all'interno della massa del nucleo, vanificando così l'efficacia dell'intervento.

Relativamente alle proprietà elastiche delle miscele iniettanti, è convinzione diffusa che esse debbano essere paragonabili a quelle dei materiali originali; se, invece, si vuole garantire a consolidamento effettuato una maggiore omogeneità della sezione del muro e, soprattutto, se si vuole alleviare l'impegno statico dei paramenti esterni (più rigidi rispetto al nucleo in calcestruzzo), è opportuno elevare il modulo elastico del calcestruzzo improprio iniettando delle boiacche di medio-alta rigidità (modulo elastico  $> 15000 \text{ N/mm}^2$ ).

Le sospensioni cementizie iniettanti non debbono possedere particolari requisiti chimici, salvo i casi in cui le murature siano state realizzate con elementi lapidei contenenti forme di silice amorfa reattive con gli alcali o quando in esse è presente il solfato (sia sottoforma di legante che di sali trasportati dall'acqua per capillarità attraverso le fondazioni). Se sussiste la prima delle suddette condizioni il legante deve essere privo di alcali ( $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente  $< 0.6\%$ ) i quali, potrebbero altrimenti reagire con la silice amorfa degli elementi lapidei dando luogo ad espansioni deleterie per l'integrità degli elementi di fabbrica (4).

La presenza del solfato all'interno delle murature in calcestruzzo improprio, impone di scegliere per il confezionamento delle boiacche leganti insensibili a questo sale. L'impiego di leganti tradizionali (cemento Portland, calce idraulica, calce-pozzolana) potrebbe portare, infatti, alla formazione di due prodotti, l'ettringite e la thaumasite, per effetto della reazione tra solfato e prodotti di idratazione (C-S-H e C-A-H) dei leganti comuni. L'azione rigonfiante che caratterizza la formazione dell'ettringite e della thaumasite conduce alla fessurazione del nucleo e nei casi più gravi alla rottura dei paramenti murari con grave pregiudizio per la stabilità della muratura concreta (5).

Nella scelta di un legante per iniezioni che sia insensibile chimicamente al solfato, il saggio di Anstett costituisce una prova estremamente severa, ma di indubbia efficacia (6).

Sovente viene trascurata un'importantissima proprietà delle miscele iniettanti: lo sviluppo di calore per effetto della reazione d'idratazione. I gradienti termici che si creano all'interno delle murature concrete per effetto del calore generato dalla reazione tra l'acqua ed il legante, invece, possono dar luogo alla nascita di tensioni di trazione capaci di provocare la formazione di soluzioni di continuità dannose ai fini del consolidamento strutturale (7). Nei nostri laboratori è stata effettuata una sperimentazione impiegando diverse boiacche cementizie per consolidare dei blocchi di muratura (50 x 45 x 35 cm) costituiti da paramenti in mattoni pieni (Fig. 2) su tre lati e da una lastra di vetro sul quarto lato (per consentire l'osservazione visiva), riempiti a sacco con ghiaia (25 mm) legata da un sottile velo di malta di calce e pozzolana (Fig. 3). Il volume di vuoti, determinato sperimentalmente misurando il volume di acqua necessario ad inondare il nucleo della muratura, variava dal 15 al 18% del volume compreso tra i due paramenti.

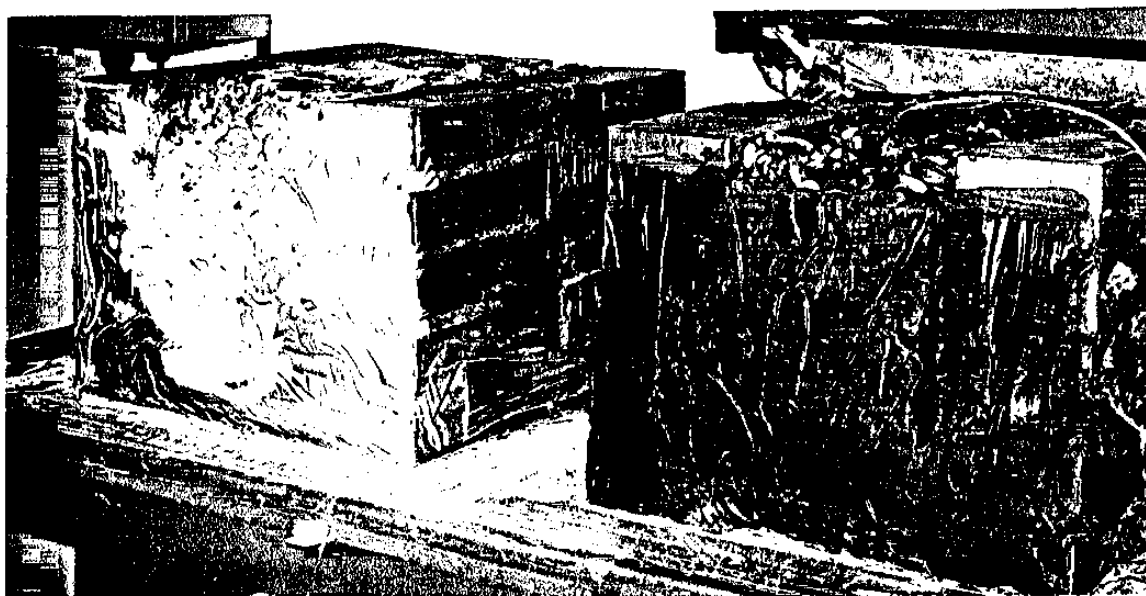
Per il confezionamento delle miscele iniettanti sono stati impiegati i seguenti leganti: calce idraulica, cemento d'altoforno ad alto tenore di loppa (68%), cemento 325 Portland ferrico, cemento 325 e 425 Portland.

Dopo aver preparato le boiacche, tutte con rapporto acqua legante 0.4, si è proceduto all'iniezione fino a riempire completamente i vuoti del nucleo (Fig. 4). Ad iniezione conclusa, mediante delle termocoppie annegate nel nucleo e sistemate sui paramenti esterni è stata registrata per ogni singola muratura la temperatura nell'arco dei primi 7 giorni dall'iniezione.

Il gradiente termico esistente tra paramento esterno e nocciolo del nucleo in calcestruzzo "improprio" è riportato in Tabella 1, unitamente ai valori del calore di idratazione unitario di ogni legante impiegato ed ai gradienti termici calcolati supponendo il sistema murario perfettamente adiabatico nel nucleo, ma con le zone periferiche a contatto con il paramento interno in equilibrio con l'ambiente ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ).

**Tab. 1 - Calore d'idratazione dei leganti, gradienti di temperatura reali e teorici (in condizioni adiabatiche) tra paramento esterno e nucleo in calcestruzzo.**

Tipo di legante	Calore d'idratazione (KJ/Kg)	Gradiente termico misurato ( $^{\circ}\text{C}$ )	Gradiente termico calcolato per condizioni adiabatiche ( $^{\circ}\text{C}$ )
Calce idraulica	120	15	20
Cemento 325 Altoforno (loppa = 68%)	135	18	23
Cemento 325 Portland	250	33	43
Cemento 325 Portland ferrico	170	25	32
Cemento 425 Portland	315	43	55



**Fig. 4 - Blocchi di muratura a sacco (paramenti in mattoni e nucleo in ghiaia monogranulare legata con malta di calce e pozzolana) consolidati mediante iniezioni cementizie. A sinistra un blocco di muratura consolidata con boiaccia di calce idraulica; a destra un blocco di muratura consolidata con boiaccia di cemento Portland ferrico.**

Come si può notare i gradienti termici reali risultano considerevoli per le boiacche confezionate con i cementi Portland ed in particolare per la sospensione realizzata con quello di classe 425. Gradienti più bassi sono stati registrati per le miscele confezionate con gli altri leganti. In particolare, la boiacca confezionata con calce idraulica ha determinato il gradiente più basso (15°C).

Al termine dei 7 giorni di sperimentazione sono stati analizzati visivamente i muretti e si è constatata la presenza di soluzioni di continuità, per quelli iniettati con cemento Portland (sia 325 che 425) e Portland ferrico, tra nucleo in calcestruzzo e faccia interna del paramento, per effetto della contrazione termica del riempimento nella fase di raffreddamento. Una perfetta aderenza al paramento, invece, è stata osservata per i nuclei iniettati con boiacche di calce idraulica o cemento d'altoforno.

Da questa sperimentazione emerge che occorre limitare i gradienti termici prodotti dall'idratazione dei leganti se si vuole, a consolidamento avvenuto, garantire l'omogeneità delle sezioni. A tal fine è opportuno impiegare leganti con un calore d'idratazione unitario inferiore a 135 KJ/Kg.

Per quanto attiene al calcolo dei gradienti termici in condizioni adiabatiche, esso risulta ovviamente prudenziale. Tuttavia, tale calcolo risulta utile, soprattutto se utilizzato a scopo comparativo, per individuare tra i leganti a disposizione quello più idoneo a minimizzare il rischio di fessurazione di origine termica, pur nell'incertezza di quei parametri (massa della struttura, geometria, temperatura ambientale, ventilazione, ecc.) che influenzano lo smaltimento del calore.

#### **4. CONCLUSIONI**

Le murature a sacco sono generalmente costituite da due paramenti in mattoni o pietra di ottima fattura cui è affidato un compito principalmente di carattere statico e da un nucleo realizzato legando con malte di qualità scadente elementi lapidei di grosse dimensioni frammisti a cocci di tegole e mattoni.

L'eterogeneità della sezione dei muri a sacco e, conseguentemente, la diversità delle caratteristiche elastiche tra paramento in pietra o mattoni e nucleo in calcestruzzo improprio, unitamente alla mancanza di connessione tra le fodere esterne, predispone le murature "concrete" al dissesti di schiacciamento e pressoflessione.

Gli interventi di consolidamento per le murature a sacco dissestate per schiacciamento e pressoflessione si basano solitamente su una "bonifica" delle murature mediante iniezioni cementizie.

Gli interventi di consolidamento mediante iniezioni cementizie possono rivelarsi fallimentari per una scelta inadeguata del legante (incompatibilità con i materiali originari presenti nella muratura ed in particolar modo con il solfato; eccessivo sviluppo di calore per effetto della reazione di idratazione) o della miscela iniettante (scarsa fluidità con conseguente parziale riempimento delle cavità del nucleo; elevata instabilità; bleeding con formazione di cavità per accumulo di acqua essudata).

#### **BIBLIOGRAFIA**

- (1) J. P. Adam, L'arte di costruire presso i romani - Materiali e tecniche, Longanesi, Milano (1984).
- (2) S. Mastrodicasa, Dissesti statici delle strutture edilizie, Hoepli, Milano (1981).
- (3) Laboratorio Urbanistico dell'Associazione Intercomunale Pesarese, Prontuario del Restauro, Pesaro (1980).
- (4) M. Collepardi, L. Coppola, Materiali negli Edifici Storici - Degradazione e Restauro, Enco, Spresiano (1990).
- (5) M. Collepardi, Degradation and restore works of masonry walls of historical buildings, *Materials et Construction*, 23, 81-102, (1989).
- (6) F. M. Lea, *The Chemistry of Cement and Concrete*, Edward Arnold, Londra (1970).
- (7) L. Coppola, Durabilità del calcestruzzo: teoria, pratica e prescrizioni di capitolato. Parte II: cause di degrado di tipo fisico e meccanico, *L'Industria Italiana del Cemento*, 675, 199-209 (1993).