

# RESISTENZA A COMPRESSIONE DI MURATURE PORTANTI DELLA SCUOLA "F. IOVINE" IN SAN GIULIANO DI PUGLIA

N. AUGENTI

*Dipartimento di Analisi e Progettazione Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II*

## SOMMARIO

Il presente lavoro tratta le modalità con cui sono state condotte le prove e i risultati conseguiti sulle murature portanti della scuola "F. Iovine" di San Giuliano di Puglia (CB), crollata il giorno 31 ottobre 2002.

L'autore, nella qualità di consulente della Procura della Repubblica presso il Tribunale di Larino, ha richiesto e partecipato all'esecuzione di prove in sito finalizzate alla determinazione della resistenza a compressione, nell'ambito delle indagini svolte per individuare le cause del crollo e le relative responsabilità.

Nel presente lavoro vengono esposte dettagliatamente le modalità con le quali è stata condotta la sperimentazione, il comportamento esibito dai cinque campioni sottoposti a prova e i risultati conseguiti. Particolare attenzione viene dedicata al fenomeno di *splitting*, che ha sempre preceduto il tradizionale fenomeno di collasso.

Sulla scorta dell'esperienza maturata vengono fornite, infine, osservazioni e utili indicazioni circa le procedure di prova da seguire per la conduzione di indagini simili.

## ABSTRACT

This paper describes the experimental campaign and the achieved results on the masonry bearing walls of the "F. Iovine" primary school of San Giuliano di Puglia (CB – Italy), collapsed on the 31<sup>st</sup> of October 2002.

The author, as consultant of the Procura della Repubblica at the Larino Court, in the aim of determining the collapse causes and the correspondent responsibilities, claimed the execution of "in situ" tests to evaluate the compression strength.

In this paper, the conditions of the lead experiments, the behaviour shown by the five tested specimens and the achieved results are illustrated in detail. Great attention is devoted to the *splitting* phenomenon that has always anticipated the traditional collapse.

Finally, afterwards the matured experience, some useful indications about the procedure of this kind of experimental tests are provided.

## 1. PREMESSA

In concomitanza con il terremoto del Molise verificatosi il 31 ottobre 2002, crollò interamente l'edificio scolastico "F. Iovine" di San Giuliano di Puglia (CB), provocando la morte di 27 bambini e di una maestra.

In seguito a tale evento, la Procura della Repubblica presso il Tribunale di Larino (CB) ha aperto un procedimento penale finalizzato a individuare delle cause del crollo e le relative responsabilità.

Nel corso dell'inchiesta è stato richiesto dagli indagati l'Incidente Probatorio, per cui gli accertamenti tecnici sono proseguiti con la consulenza dei proff. N. Augenti e V. Vitone per conto del Procuratore della Repubblica e dei proff. F. Braga e A. Burghignoli per conto del G.I.P..

Nell'ambito delle indagini svolte, è stata considerata di fondamentale importanza la determinazione delle caratteristiche di resistenza possedute dalle murature con le quali era stato costruito l'edificio scolastico, in modo da poter confrontare con esse i risultati delle analisi strutturali.

Dopo avere scartato la proposta (formulata dagli indagati) di ricostruire in laboratorio pannelli murari di caratteristiche simili, si era ipotizzato di isolare pannelli significativi dalle murature residue del crollo e di trasportarli nel laboratorio di prova, con tutte le cautele necessarie (proteggendo ciascun campione mediante casseforme e imbragature). Anche tale soluzione è stata ritenuta impraticabile poiché i traumi indotti dalle operazioni di isolamento del campione alla base e di trasporto avrebbero falsato i risultati. Si è optato, infine, per l'esecuzione di prove in sito, le uniche che avrebbero potuto garantire il mantenimento delle caratteristiche possedute dalla muratura.

Di concerto con i periti del G.I.P. sono state definite tutte le modalità di prova descritte nel seguito.

## **2. PROCEDURA DI PROVA**

Per chiarezza di esposizione si ritiene opportuno separare la descrizione delle diverse fasi in cui si sono articolate le prove.

### **2.1. Preparazione dei campioni**

La scelta dei provini da sottoporre a sperimentazione in sito è stata particolarmente delicata. Al termine della rimozione "controllata" delle macerie era stato possibile, infatti, mettere in luce solamente alcune pareti portanti, parzialmente integre, che costituivano il piano terreno dell'edificio scolastico crollato.

Le strutture verticali del primo impianto erano state realizzate, negli anni 1959-'60, mediante murature in pietrame calcareo a doppio paramento, caratterizzate da tessitura non organizzata e malta povera. In particolare le pietre sono risultate, in parte sbazzate sulla sola faccia esterna, in parte informi, talvolta tondeggianti. La malta, sottoposta ad analisi diffrattometriche nel corso delle indagini, ha manifestato composizione uniforme, ridotto contenuto di legante (cemento o calce), presenza di minerali argillosi e assenza di solfati.

La sopraelevazione di due aule fu realizzata, invece, nel 2002 utilizzando blocchi portanti in laterizio e malta cementizia. A seguito del crollo tutte le murature sono risultate interamente scompagnate ad eccezione di quelle del piano terreno, che erano state parzialmente preservate dalla caduta di alcuni elementi strutturali.

Le pareti residue dalle quali isolare dei campioni sono state scelte tra quelle che presentavano migliore stato di conservazione: in particolare sono state scartate le parti caratterizzate da tessiture eccessivamente irregolari o da malte divenute pulverulente. Sono state scelte, invece, murature i cui paramenti esterni erano ancora coperti da intonaci integri o da rivestimenti in piastrelle sani, circostanze entrambe garanti del fatto che le murature non avevano subito, nel corso del disastro, particolari traumi.

Dopo aver individuato quattro monconi di muratura che presentavano le caratteristiche d'integrità innanzi descritte e dimensioni compatibili con quelle richieste dalle prove, si è provveduto a isolare lateralmente cinque muretti, mediante la scomposizione manuale della tessitura, ed a stendere, sulle sezioni di sommità, una cappa di malta cementizia necessaria a rettificare la superficie di carico.

### **2.2. Attrezzatura di prova**

Per sollecitare a compressione i campioni sino al carico di collasso, è stato necessario prevedere "strutture di contrasto" in grado di sopportare oltre 2000 KN. Essendo stata ritenuta eccessivamente onerosa la realizzazione di una zavorra simile, si è optato per la costruzione di un sistema basato su elementi in grado di esplicitare reazioni di trazione.

L'attrezzatura di prova, visibile nella Figura 1, è stata realizzata attraverso l'impiego dei seguenti elementi:

- n. 8 micropali  $\phi$  200 valvolati, armati con camicie metalliche per l'intera lunghezza e ancorati nel suolo per 20 m;
- n. 4 profilati metallici HEA360 per il collegamento delle coppie di micropali;
- n. 2 profilati metallici HEA360 per il collegamento, a coppie, dei quattro profilati innanzi citati;
- n. 1 trave metallica HES900 in grado di trasmettere il carico dei martinetti al graticcio di travi appena descritto.



Figura 1. Attrezzatura di sperimentazione in sito

Il carico di prova è stato esercitato tramite due martinetti idraulici accoppiati di portata pari a 185 t ciascuno, alimentati da un sistema oleodinamico. L'azione applicata è stata misurata tramite una cella di carico avente portata massima pari a 500t.

La ripartizione del carico sulla muratura è stata realizzata interponendo, tra la cappa di malta cementizia e i due martinetti, una piastra di acciaio avente dimensioni 1000x600x50 mm<sup>3</sup> (Figura 2).



Figura 2. Uno dei campioni da sottoporre a prova

Per rilevare le componenti verticali di spostamento dei campioni sotto carico, sono stati utilizzati (in quattro delle cinque prove) trasduttori dotati di sensibilità pari a 0.01 mm.

Sia la cella di carico che i trasduttori di spostamento, sono stati collegati a un sistema di acquisizione multi-canale in grado di registrare la variazione dei carichi e degli spostamenti nel tempo.

### 2.3. Modalità di esecuzione delle prove e risultati

La sperimentazione in sito è stata condotta su cinque campioni differenti, con modalità leggermente diverse da un caso all'altro. Si riportano sinteticamente di seguito le fasi di carico e gli eventi salienti che hanno caratterizzato ciascuna prova.

PROVA n. 1. Il campione è stato sottoposto a due "storie di carico". La prima attuando due diversi cicli di carico-scarico (fino a 500 KN e fino a 1000 KN) e, successivamente, facendo aumentare le azioni sino alle soglie del collasso. Una seconda fase è stata realizzata aumentando il carico, con legge monotona, fino al massimo valore raggiungibile di 1786 KN (corrispondente a una tensione di 2.98 MPa).

Nelle Figure 3, 4, 5, 6 e 7 è possibile osservare differenti momenti della prova. In particolare, la Figura 3 mostra il campione e l'attrezzatura immediatamente prima della sperimentazione; nella Figura 4 si possono vedere i martinetti che sollecitano la muratura sulla quale era applicato un rivestimento in piastrelle maiolicate ancora integro; le Figure 5, 6, e 7 consentono di osservare l'evoluzione del quadro fessurativo, nello spessore del campione, sino al completo collasso.



Figura 3. Organizzazione della Prova n.1

PROVA n. 2. Sono state realizzate quattro distinte fasi di sollecitazione. Nella prima, il carico è stato aumentato fino a prefissati valori e mantenuto costante per un tempo definito: 10 minuti a 500 KN; 10 minuti a 1000 KN; 30 minuti a 1300 KN; 15 minuti a 1500 KN. Le successive tre fasi sono state caratterizzate da un aumento monotono del carico, rispettivamente, fino a 1403 KN, fino a 1748 KN e fino a 1815 KN, senza interruzione alcuna. La tensione di rottura è stata pari a 3.02 MPa.

PROVA n. 3. Si è articolata in due distinte fasi di sollecitazione. Nel corso della prima, il carico è stato arrestato a 500 KN per 13 minuti e a 1000 KN per 25 minuti, aumentandolo poi sino a 1272 KN con continuità. Nella seconda fase, il carico è stato aumentato in maniera monotona sino a 1260 KN; la massima tensione di compressione raggiunta è stata di 2.10 MPa.





Figura 4. Prova n.1: campione integro



Figura 5. Prova n.1: fessurazione incipiente



Figura 6. Prova n.1: fessurazione avanzata



Figura 7. Prova n.1: collasso

PROVA n. 4. Sono state realizzati tre distinti cicli di carico. Nei primi due sono stati raggiunti solamente valori massimi pari a 621 KN e 894 KN (per motivi accidentali dovuti a mancanza di alimentazione elettrica); nella terza fase, il carico crescente con legge monotona è stato mantenuto costante per circa 20 minuti a 1000 KN ed è stato aumentato, successivamente, sino al valore di collasso di 1510 KN, corrispondente a una tensione di 2.52 MPa.

PROVA n. 5. Sono stati attuati due distinti cicli. Nel primo si è fatto crescere il carico sino a 500 KN, mantenendolo costante per 8 minuti, e poi si è fatto aumentare sino a 1034 KN, mantenendolo costante per 12 minuti. La seconda fase è stata attuata facendo crescere il carico senza interruzioni fino al valore massimo di 1094 KN (tensione pari a 1.82 MPa), in corrispondenza del quale si è verificata la rottura del terreno.

Nel corso delle prove n. 2, n. 3, n. 4 e n. 5 sono state misurate, tramite trasduttori, le componenti verticali di spostamento in corrispondenza delle due superfici laterali di ciascun campione, ottenendo dati sensibilmente differenti (per i motivi di cui si dirà in seguito).

### 3. OSSERVAZIONI SULLA SPERIMENTAZIONE CONDOTTA

Tutte le prove sono state caratterizzate dai medesimi fenomeni e meccanismi di collasso.

Come si è detto in precedenza, le strutture portanti verticali dell'edificio scolastico "F. Iovine" di S. Giuliano di Puglia erano state costruite con due paramenti esterni non collegati e un riempimento di malta e pietre informi. Nel corso di tutte le prove, per un valore del carico pari a circa la metà di quello massimo raggiunto, è stato osservato un distacco incipiente dei due paramenti, inequivocabilmente denunciato dalla comparsa delle prime lesioni nello spessore della muratura (come bene si può osservare in Figura 5). Nella maggior parte dei casi, a tale circostanza è corrisposta la momentanea impossibilità di far aumentare ulteriormente il carico, perlomeno sino a quando la tessitura muraria non ha trovato nuove configurazioni di equilibrio che consentissero lo svilupparsi di rinnovate capacità resistenti. Il distacco osservato si è progressivamente accentuato (come è visibile nella Figura 6) fino al completo collasso del campione (Figura 7). Da quanto osservato, si evincono due conclusioni di grande rilievo. Innanzitutto, i collegamenti tra i paramenti (diatomati di pietra o connessioni di altra natura) svolgono un ruolo fondamentale nei riguardi della resistenza della muratura. Importanza ancora maggiore, poi, assume il fenomeno di incipiente distacco e allontanamento dei paramenti (*splitting*), che può essere assimilato allo snervamento dell'acciaio: così come il valore dello snervamento viene assunto quale limite superiore nella progettazione di elementi metallici, allo stesso modo, per gli elementi murari sottoposti a compressione, il limite invalicabile di progetto dovrebbe essere costituito dalla tensione cui corrisponde il fenomeno di *splitting*.

Le condizioni di sofferenza della muratura sono denunciate dal distacco e dalla fessurazione degli intonaci o dei rivestimenti esterni: tale circostanza ha fornito, peraltro, conferma dell'ipotesi secondo la quale i muri caratterizzati da intonaci e rivestimenti non lesionati possono, ragionevolmente, essere considerati come elementi strutturali che non hanno subito particolari traumi, anche nel caso di crolli. Tale considerazione ha assunto particolare importanza ai fini delle indagini perché ha consentito di valutare la resistenza posseduta dalle strutture portanti verticali della scuola "F. Iovine" già prima dell'evento disastroso verificatosi il giorno 31 ottobre 2002.

I tempi di applicazione del carico sono determinanti per individuare la capacità portante di un elemento strutturale nei riguardi dei carichi verticali. Un maschio murario (così come una colonna in cemento armato) esibisce capacità di sopportare carichi differenti a seconda del loro tempo di applicazione. Qualunque elemento in muratura, sollecitato da un'azione di compressione costante nel tempo, subisce infatti un progressivo affaticamento e rilassamento, funzione della durata del carico. Ciò significa che uno stesso campione, a seconda che sia sottoposto a un carico crescente con legge monotona senza interruzioni, o che venga sollecitato con successivi *step* di carico mantenuti costanti per un certo periodo, esibisce carichi massimi sopportabili notevolmente differenti (minori, ovviamente, nella seconda ipotesi). Nel caso in esame, se fossero stati applicati ai campioni, azioni di valore anche inferiore a quello massimo raggiunto ma per tempi maggiormente

prolungati (dell'ordine delle ore o dei giorni), sarebbero stati rilevati carichi di collasso sensibilmente inferiori a quelli ottenuti descritte. Ciò significa che la resistenza determinata con prove "veloci" può, al massimo, fornire un limite superiore della resistenza della muratura, ma non certo il valore vero. Nella realtà, le strutture portanti verticali di un edificio vengono progressivamente caricate sino alla completa costruzione di tutti gli elementi che rappresentano i carichi fissi. Sotto tale condizione la struttura permane per la quasi totalità della sua vita utile, subendo variazioni di breve durata soltanto allorché vengono applicati i carichi di esercizio o quelli eccezionali. Ciò significa che le murature di un edificio sono sottoposte a uno stato tensionale, dovuto ai carichi permanenti, pressoché costante nel tempo e che l'eventuale aumento di tensione in grado di produrre il collasso si somma a condizioni di tensione e di equilibrio già consolidate. La vera capacità di resistenza di una parete muraria è, dunque nella realtà, inferiore a quella misurata attraverso prove di brevissima durata.

In merito alla possibilità di eseguire cicli di carico e scarico sui campioni di muratura, si ritiene che ciò assuma poco significato nei riguardi delle vere capacità di resistenza della struttura che, come si è detto, nella realtà subisce solamente ridotti incrementi di carico rispetto a uno stato tensionale da peso proprio, costante e già consistente. Non è contemplabile, pertanto, lo "scarico" del provino a meno che non si tratti di edifici demoliti o crollati, dei quali si preveda la ricostruzione sulle pareti portanti residue. In tutti gli altri casi, l'esecuzione di cicli di carico e scarico potrebbe falsare i risultati delle prove dando luogo a condizioni di lavoro irreali.

Le differenti deformazioni osservate in corrispondenza delle due superfici esterne dei campioni di prova al crescere del carico dipendono essenzialmente dalla fattura eterogenea della muratura. Quello che, talvolta, viene interpretato come un fenomeno dovuto a eccentricità accidentali del carico applicato (conseguente all'imperfetto centramento dei martinetti) è solamente conseguenza della differente fattura che caratterizza la realizzazione dei paramenti esterni di una muratura in pietrame irregolare, ove dimensioni delle pietre e quantità di malta possono subire variazioni notevolissime. In effetti, all'aumentare della compressione nel corso di una prova, alcuni elementi lapidei vanno immediatamente in contatto, mentre altri raggiungono nuove condizioni di equilibrio solamente dopo avere prodotto lo schiacciamento dei cementi di malta debole. Un simile fenomeno non si riscontra quasi mai, invece, nel caso di murature realizzate con tessitura regolare di elementi lapidei squadrate (naturali, come le pietre di tufo, o artificiali, come i mattoni in laterizio).

#### 4. CONCLUSIONI

Alla luce delle osservazioni innanzi riportate è possibile trarre, sinteticamente, le seguenti conclusioni:

- la resistenza delle murature esistenti può essere stimata, in maniera attendibile, solamente attraverso prove in sito;
- un'attenta progettazione e realizzazione delle strutture di contrasto da utilizzare nel corso delle attività di sperimentazione è requisito essenziale affinché i risultati non vengano inficiati da fenomeni di dissesto estranei al comportamento del provino;
- lo stato di conservazione di intonaci e rivestimenti costituisce indice importante per individuare murature che non abbiano subito traumi particolari, prima delle prove;
- l'estensione del campione di muratura da sottoporre a sperimentazione, rispetto all'impronta di carico, deve essere tale da escludere che i risultati siano viziati da fenomeni di mancato confinamento;
- la preparazione dei campioni va condotta con mezzi manuali e non meccanici al fine di evitare turbative del campione scelto;
- le condizioni di carico devono essere sufficientemente rappresentative dello stato di sollecitazione cui è stata, realmente, sottoposta la muratura da esaminare;
- la "storia di carico" alla quale sottoporre i campioni deve prevedere lunghi periodi di sollecitazione a carico costante, in modo tale da poter simulare l'azione esercitata dai carichi fissi sulle strutture;
- le caratteristiche costruttive della muratura condizionano fortemente i meccanismi e le modalità di collasso;

- il limite superiore di resistenza della muratura, nella fase progettuale, dovrebbe essere limitato al valore cui corrisponde il fenomeno di *splitting* e non già a quello di collasso che prevede lo scompaginamento totale della muratura e la definitiva separazione degli elementi lapidei; come si è osservato in corso di sperimentazione, infatti, in presenza dell'incipiente fenomeno di distacco dei paramenti, la muratura conserva ancora una capacità portante che, invece, perde completamente in fase di collasso;
- la consuetudine degli Ingegneri di vecchia Scuola consistente nell'esaminare con attenzione gli "imbotti" (ovvero gli spessori interni) dei vani nel caso di edifici particolarmente cimentati, costituisce importante indagine per individuare sintomi di sofferenza della muratura attraverso i fenomeni di incipiente distacco dei paramenti.

Il presente lavoro è stato parzialmente finanziato con fondi del D.P.C. relativi al progetto di Ricerca ReLUIIS 2005/2007 – Linea 1: "Valutazione e riduzione della vulnerabilità di edifici in muratura".

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Agenti N.: Il calcolo sismico degli edifici in muratura; UTET libreria, Torino, 2004.
- [2] Agenti N., Vitone V.: Relazione di Consulenza Tecnica per la Procura della Repubblica presso il Tribunale di Larino di cui al procedimento penale n. 2097/02 relativo al crollo dell'edificio scolastico "F. Jovine" in San Giuliano di Puglia; Napoli, 2005.