62_65_CIL79_Carpinteri 26-01-2001 16:02 Pagina 62

Alberto Carpinteri*
Giuseppe Lacidogna*

Monitoraggio di un edificio in muratura con il metodo delle emissioni acustiche

Questa metodologia di analisi non distruttiva è stata applicata su alcuni setti murari dell'edificio "Casa Capello", localizzato nel centro storico del Comune di Rivoli (To), per valutare l'evolversi del quadro fessurativo che si era determinato per il cedimento di un muro di sostegno

Le metodologie per il controllo, la conservazione ed il recupero del costruito, ed in particolare degli edifici storici, assumono sempre maggiore importanza nel definire gli interventi che caratterizzano il restauro dei manufatti architettonici. Il contributo dei metodi d'indagine non distruttivi e strumentali viene oggigiorno impiegato per misurare e controllare l'evoluzione di certi fenomeni strutturali negativi, quali il danneggiamento e la fessurazione, e prevederne i successivi sviluppi. Una metodologia d'indagine non distruttiva, che si sta attualmente diffondendo per la rilevazione dei difetti e del danneggiamento nei materiali lapidei da costruzione, è quella che utilizza l'emissività acustica dei materiali soggetti a stati di tensione e di deformazione. La comparsa di lesioni nelle strutture è infatti preceduta ed accompagnata dalla emissione di onde elastiche che si propagano nel materiale e possono essere ricevute e registrate da sensori applicati sulla superficie. Utilizzando questo metodo sperimentale si è potuta monitorare la muratura portante di un edificio localizzato nel centro storico del comune di Rivoli (To), valutandone il livello di danneggiamento e l'evoluzione del quadro fessurativo.

L'edificio oggetto dell'indagine L'edificio storico, denominato "Casa Capello", è attualmente sede di un presidio socio-assistenziale. Per il suo restauro ed ampliamento funzionale, negli anni 1996-99, sono stati effettuati degli interventi secondo un progetto redatto dal Professor Andrea Bruno. Poiché la costruzione è tutelata dalla legge 1089 del 1939, il suo restauro ha richiesto il parere preventivo della Soprintendenza ai Beni Ambientali ed Architettonici del Piemonte. La zona nella quale la casa è ubicata ricade all'interno del nucleo storico di Rivoli, approssimativamente a metà della costa che raccorda il rilievo del Castello con la sottostante piana. Il fabbricato, compreso tra via alla Parrocchia e via Stella Maris, si confronta con la chiesa medievale della Collegiata, è costruito su delle preesistenze del XIV secolo ed ha raggiunto la sua conformazione attuale alla fine del 1800.

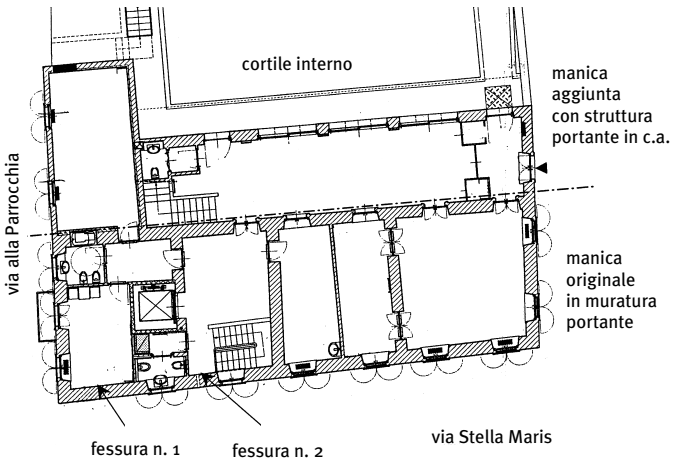
Tipologia strutturale dell'edificio L'impianto è quello classico delle strutture in muratura dell'Ottocento. La manica originale, parallela a via Stella Maris, lunga 23 m, larga 7,5 m ed alta circa 13 m dallo spiccato delle fondazioni, presenta delle partizioni trasversali, ad interasse compreso tra 4 e 6 metri. Lo spessore della muratura, dal piano interrato fino al terzo piano fuori terra, risulta essere circa costante e non inferiore a 60 cm. L'orditura dei setti murari è in mattoni pieni con interposti giunti di malta dello spessore di circa 1cm. La scansione delle finestre, in facciata, è regolare e non presenta discontinuità, mentre i vani porta nelle murature trasversali sono localizzati quasi tutti verso il cortile interno. La struttura di copertura è realizzata con travi e falsi puntoni in legno massiccio. Originariamente i solai dell'edificio erano realizzati con travi portanti e tavolati lignei, come è consuetudine nel nucleo storico della città di Rivoli; solo gli orizzontamenti sul piano seminterrato, probabilmente quelli originali del XIV secolo, sono realizzati da volte in muratura.
Nell'intervento di restauro ed ampliamento, gli orizzontamenti in legno, gravemente ammalorati, sono stati sostituiti con solai laterocementizi. Le volte in mattoni sono state consolidate gettando all'estradosso un manto di conglomerato cementizio, dello spessore di circa 6 cm, armato con rete metal-

62_65_CIL79_Carpinteri 26-01-2001 16:02 Pagina 63

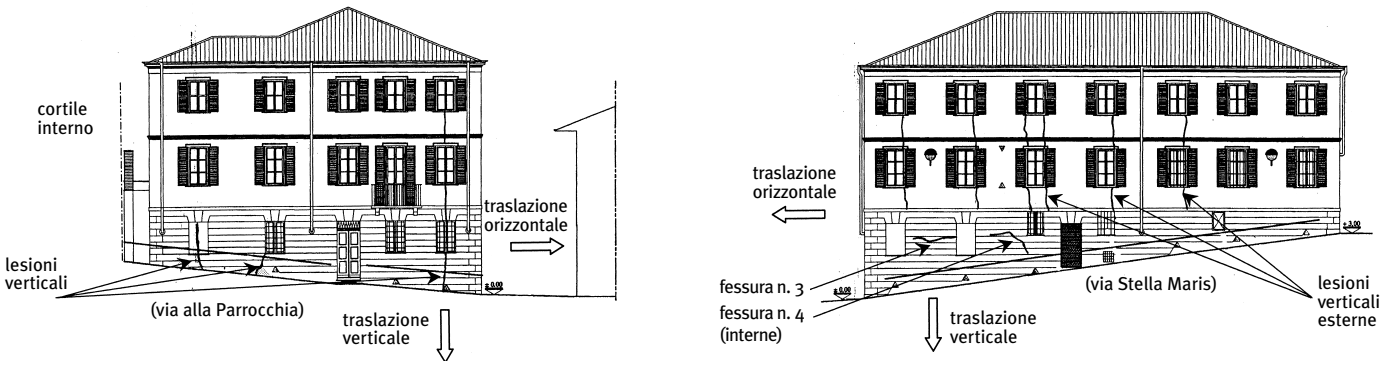
lica elettrosaldata, alleggerito con argilla espansa e reso collaborante con la muratura. Le strutture della manica aggiunta in adiacenza del fabbricato in muratura, durante i lavori di restauro, sono composte da travi e pilastri in c.a., così come le fondazioni sono state realizzate mediante travi continue in cemento armato. Con questo tipo di strutture si può ipotizzare che i carichi gravanti sulle murature, nella zona preesistente dell'edificio, non essendoci orizzontamenti spingenti, agiscano praticamente senza eccentricità e che la pressione massima nelle sezioni più sollecitate dei setti murari non superi i 35 N/cm^2, valore perfettamente ammissibile per una muratura di mattoni ben confezionata e ben organizzata.

Caratteristiche geologiche del terreno di fondazione Il luogo è riconducibile ad un terrazzamento artificiale, almeno in parte realizzato attraverso riporto, sostenuto verso valle da un muro di contenimento, realizzato in pietrame e giunti di malta, la cui altezza è dell'ordine di 4-5 metri. Per la caratterizzazione geologica e geotecnica del sito è stato realizzato un pozzetto esplorativo e sono state eseguite quattro prove penetrometriche dinamiche (penetrometro leggero). Sino alla profondità di 12 metri dal piano di campagna, coincidente con il piano-cortile dell'edificio, si estende una sequenza sabbioso-limosa omogenea, con locali e sottili interposizioni di sabbie ghiaiose. Poiché lo stato di addensamento è debole o pressoché nullo, secondo la terminologia geotecnica il terreno si presenta come una sabbia sciolta. In particolare, sino alla quota di 2,5 m circa dal piano di campagna il materiale denuncia caratteristiche molto scadenti e si rileva l'esistenza di un livello rimaneggiato, testimoniato dalla presenza di frammenti di laterizio per una profondità compresa tra 0,15 e 1,50 m.

Danneggiamento e quadro fessurativo dell'edificio Durante i lavori di restauro ed ampliamento di Casa Capello, un incidente fortuito provocò il crollo parziale del muro di contenimento posto a valle dell'edificio, variando gli equilibri instauratisi nel terreno di fondazione. I danni furono subito riparati mediante la ricostruzione del muro di sostegno ed il consolidamento del terreno a monte del muro con micropali trivellati. Tuttavia, in conseguenza del crollo, cominciò a manifestarsi nella muratura portante della struttura originale dell'edificio un quadro fessurativo diffuso, caratterizzato da lesioni capillari che andavano man mano estendendosi sulla superficie muraria.
Le fessure erano particolarmente evidenti sulle pareti delle murature disposte lungo via Stella Maris e via alla Parrocchia. Sulla superficie esterna del fabbricato disposta lungo via Stella Maris le fessure presentavano una direzione prevalentemente verticale ed interessavano le zone di muratura più deboli lungo l'asse delle finestre. Sulla superficie interna della stessa muratura, invece, oltre alle fessure verticali individuate esternamente, che tuttavia risultavano meno evidenti anche per le interruzioni prodotte nella uniformità del muro dai solai in c.a., comparivano due fessure con andamento orizzontale, ad un'altezza di circa 1,8 m dal piano del pavimento seminterrato.
La prima (fessura n.1) era localizzata in una stanza d'angolo, ad una distanza media di circa 2 m dallo spigolo del fabbricato; la seconda (fessura n.2), in un vano scala adiacente, era distante circa 2 m dalla prima. Queste due ultime fessure, la cui comparsa è avvenuta in tempi posteriori rispetto a quelli delle fessure verticali, hanno avuto una lenta evoluzione nel tempo, per cui è stato possibile monitorarle con la tecnica delle emissioni acustiche.
Le manifestazioni fessurative nella muratura dell'edificio, ed in particolare le lesioni verticali presenti su via Stella Maris e via alla Parrocchia, possono essere spiegate supponendo una traslazione orizzontale relativa delle murature terminali dei due versanti, con uno scivolamento nella direzione dello spigolo del fabbricato. La traslazione orizzontale potrebbe essere stata provocata dal cedimento del muro di sostegno posto a valle del fabbricato. Questo fenomeno può ingenerare, infatti, nella muratura delle tensioni orizzontali che superano la tensione di rottura per trazione del materiale.
Le due lesioni orizzontali visibili sulla superficie interna della muratura verso via Stella Maris (fessure n.1 e n.2) evidenziano invece un ulteriore moto relativo di traslazione verticale della muratura dovuto al cedimento della fondazione. Anche la traslazione verticale determina nella muratura, che non è più completamente sostenuta dalla fondazione, delle tensioni verticali in grado di provocarne il distacco secondo delle linee di rottura inizialmente orizzontali, che deviano in un secondo tempo obliquamente verso la base fondale, ove si stabilizzano in zone di forte compressione.
Le cause dei fenomeni fessurativi appena descritti vanno certamente ricercate nella instabilizzazione del terreno di fondazione in corrispondenza dell'angolo del fabbricato, provocata dal crollo del muro di sostegno, ma anche, sebbene in misura minore, nell'incremento dei carichi gravanti sul terreno conseguente alle opere di restauro ed ampliamento dell'edificio.



Pianta dell'edificio.



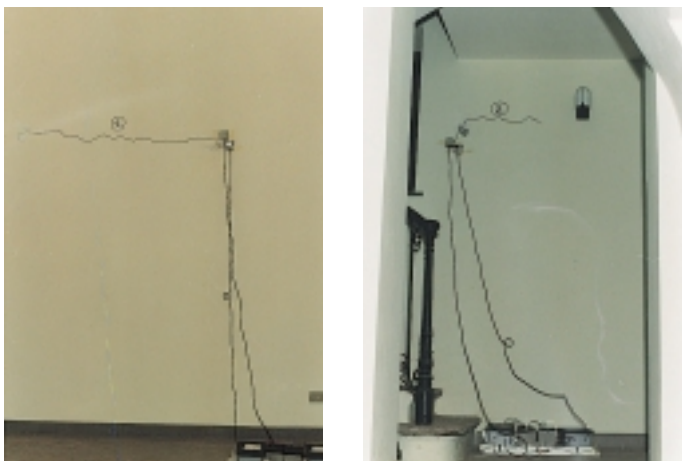
Prospetti dell'edificio sulle vie alla Parrocchia e Stella Maris, con i rispettivi quadri fessurativi.

Il metodo delle emissioni acustiche La generazione spontanea di onde di pressione, che un materiale strutturale crea sotto sforzo, viene denominata emissività acustica (EA). Per la rilevazione delle EA si utilizzano generalmente sensori piezoelettrici (PZT), sfruttando la proprietà di certi cristalli di generare segnali elettrici ogniqualvolta siano soggetti ad una sollecitazione meccanica. Le ampiezze di pressione delle onde elastiche, variabili da materiale a materiale anche di diversi ordini di grandezza, sono di solito molto deboli ed inferiori ad un milionesimo della pressione atmosferica. Ne risulta che il segnale elettrico del trasduttore necessita di un'amplificazione molto elevata ($10^4 \div 10^5$ volte) prima di poter essere correttamente elaborato. A tali livelli di amplificazione accade peraltro che i segnali di disturbo, quali i rumori ambientali, in particolare nelle zone dell'udibile, sovrastino i segnali EA da elaborare elettronicamente. I segnali di rumore disturbante devono perciò essere drasticamente ridotti mediante filtri di frequenza e di ampiezza, ovvero mediante speciali tecniche di discriminazione.

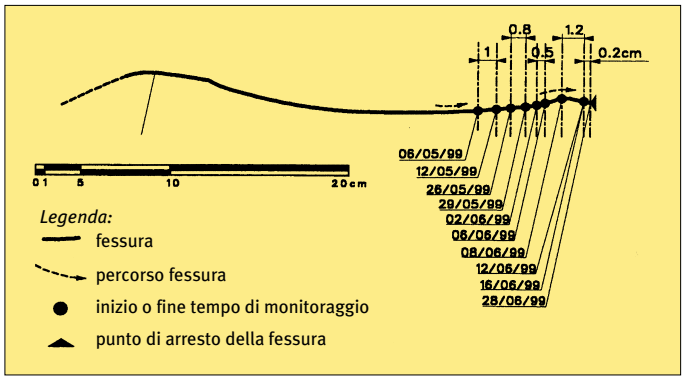
Monitoraggio delle lesioni Utilizzando un'apparecchiatura per il rilevamento delle emissioni acustiche fornita dalla ditta ATEL di Pomezia (Roma), il monitoraggio della fessura n.1 è stato condotto per un tempo totale di circa 900 ore. Sono stati costruiti dei grafici in cui sono state riportate le date in cui sono state applicate per la prima volta le apparecchiature e quelle in cui sono state tolte definitivamente, oltre a rappresentare in scala il rilievo della fessura nel momento della prima applicazione del sistema di misurazione, così come il suo avanzamento nel tempo espresso in cm. In tal modo è possibile osservare come la lesione abbia avuto uno sviluppo pressoché orizzontale, conservando un'apertura costante di circa 0,2 mm durante la sua evoluzione. Il setto murario sul quale si è sviluppata questa fessura ha uno spessore di circa 60 cm, comprensivo dell'intonaco esterno; l'orditura è composta da mattoni pieni in laterizio con interposti giunti di malta di circa 1 cm. In aderenza alla superficie interna della muratura è stata realizzata, durante le opere di consolidamento, una paretina in calcestruzzo non armato dello spessore di circa 5 cm, avente funzione di migliorarne la resistenza a compressione.

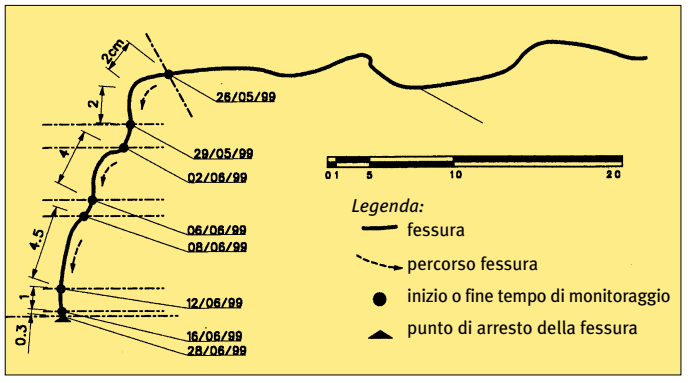
Per il rilevamento delle emissioni acustiche sono stati applicati due trasduttori, il cui baricentro si trovava circa a 3 cm dall'apice della fessura per ridurre al minimo il fenomeno dell'attenuazione dovuto alla distanza nella percezione del segnale. La distanza di 3 cm è la più piccola possibile in relazione alle dimensioni dei trasduttori utilizzati, che hanno la forma di una scatola metallica di lato 5x5 cm e spessore di circa 2 cm. L'applicazione dei trasduttori alla muratura è stata effettuata con una resina siliconica in modo da garantire una perfetta adesione tra le superfici.

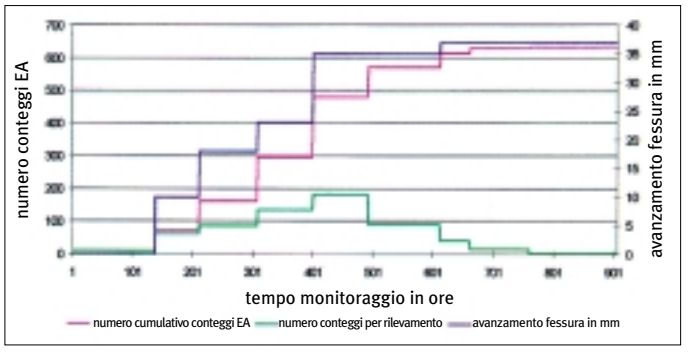
Dall'analisi dei grafici si è osservato come, durante ogni fase del rilevamento, l'andamento dei conteggi delle oscillazioni sia stato proporzionale all'avanzamento della fessura e come l'esaurirsi del numero delle oscillazioni registrate denunci chiaramente l'arrestarsi della propagazione della fessura stessa. Inoltre i grafici evidenziano come il massimo numero di conteggi EA durante il rilevamento si sia verificato in corrispondenza della massima velocità di avanzamento della fessura. Nei tempi posteriori a questo evento, sia il numero dei conteggi che la velocità di avanzamento della fessura decrescono rapidamente sino ad annullarsi. Si può quindi dedurre come il picco della funzione di distribuzione delle EA corrisponda al periodo più critico di avanza-

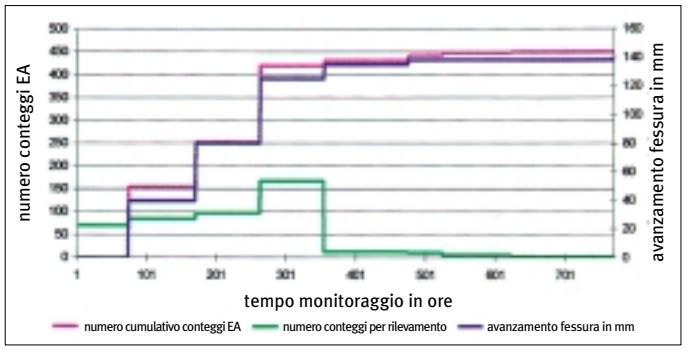


Fessure n. 1 e n. 2 sulla parete interna della muratura del fabbricato, durante il monitoraggio. Si notano i trasduttori PZT posti all'apice delle fessure e le apparecchiature per il rilevamento delle emissioni acustiche.









Fessura n. 1. Rilievo dello sviluppo nel tempo e i risultati del monitoraggio.

Fessura n. 2. Rilievo dello sviluppo nel tempo e i risultati del monitoraggio.

mento della frattura, la quale poi converge verso una condizione di stabilità procedendo verso zone compresse della muratura.
Il monitoraggio della fessura n.2 è stato condotto per un tempo totale di circa 800 ore. In questo caso si è osservato come la frattura, dopo aver effettuato un percorso tendenzialmente orizzontale, abbia subito una deviazione obliqua, conservando un'ampiezza costante di circa 0,2 mm durante la sua evoluzione. Il setto murario su cui si è sviluppata questa seconda fessura conserva lo spessore di 60 cm, è composto da mattoni pieni e non presenta nessuna opera aggiuntiva di consolidamento. Anche per il monitoraggio della fessura n.2 è stata utilizzata una coppia di trasduttori disposti a 3 cm dall'apice della lesione. Anche in questo caso si è osservato che il numero dei conteggi cumulativi è approssimativamente proporzionale all'avanzamento della fessura e che l'arrestarsi della fessura coincide con l'esaurirsi delle oscillazioni significative. La funzione di distribuzione delle emissioni per rilevamento ha evidenziato ancora come il numero massimo di oscillazioni si sia verificato subito dopo il maggior avanzamento della frattura. In seguito il numero dei conteggi per rilevamento, così come la velocità della fessura, decrescono rapidamente sino a zero. Il diagramma tempo-avanzamento della fessura mostra dunque un comportamento complessivamente stabile, così come è stabile il diagramma che mette in relazione il tempo con il conteggio cumulativo delle emissioni EA.

Confronto tra i risultati del monitoraggio Un confronto tra i dati rilevati mostra come il numero totale dei conteggi misurati durante lo sviluppo della fessura n.1 sia circa 1,4 volte maggiore di quello rilevato durante l'estensione della fessura n.2. Il percorso effettuato da quest'ultima risulta peraltro essere circa 3,6 volte maggiore di quello della fessura n.1. Il fenomeno può essere spiegato valutando la diversa tipologia dei materiali che compongono i setti murari e considerando che il numero totale delle oscillazioni conteggiate è proporzionale all'energia rilasciata durante il processo di fessurazione. La fessura n. 1, infatti, ha avuto luogo su una muratura di mattoni rinforzata con una paretina di calcestruzzo non armato dello spessore di circa 5 cm, mentre la fessura n. 2 si è sviluppata su una parete composta da semplice muratura. Evidentemente la fessura n.1 si è sviluppata in un materiale complessivamente meno tenace (il calcestruzzo della paretina) di quello costituito dalla muratura di mattoni; per cui ad un relativamente alto numero di emissioni EA corrisponde un piccolo avanzamento della fessura. La fessura n. 2, invece, si è prodotta in un materiale più tenace; infatti, ad un relativamente basso numero di conteggi EA corrisponde un maggiore avanzamento della fessura. Il diverso percorso evidenziato dalle fessure n.1 e n.2 denuncia anche come la parete composta da sola muratura sia più sensibile ai difetti di quella rinforzata dal getto di calcestruzzo; infatti, nell'una si è avuto un percorso costantemente orizzontale, mentre nell'altra un andamento complesso e tortuoso indicativo dell'eterogeneità del materiale. ¶

Gli autori ringraziano il Professor Andrea Bruno per aver consentito il monitoraggio dell'edificio "Casa Capello", nonchè gli Architetti Cirino Leotta e Luigi Bacco per il competente supporto fornito nella realizzazione del presente lavoro.

** Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino.*