



POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE

**DALLA CONOSCENZA E DALLA CARATTERIZZAZIONE
DEI MATERIALI E DEGLI ELEMENTI DELL'EDILIZIA
STORICA IN MURATURA AI PROVVEDIMENTI
COMPATIBILI DI CONSOLIDAMENTO**

**Atti del Workshop tenutosi il 16-17 Dicembre 2004
a Milano presso il DIS – Politecnico di Milano**

a cura di Luigia Binda

“Esemplare fuori commercio per la distribuzione agli effetti di legge”

Complementarietà delle prove in situ ed in laboratorio: il Castello di Avio

L. Binda, L. Cantini, M. Lualdi, C. Tedeschi, A. Saisi, L. Zanzi

Dip. di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano Piazza Leonardo da Vinci, 32 - 20133 Milano

Abstract

The preliminary results of the investigations carried out by the authors on a Castle, considered as case history are presented and discussed. An extensive investigation programme (including sonic, radar, thermovision, flat jack, coring, boroscopy, etc.) has been planned to support the preservation and restoration actions of the Castle. The experience shows the importance of a project for the investigation in order to select the most relevant strategies and tests for each specific problem.

Introduzione

Il programma di indagini applicato al Castello di Avio (TN) (Fig. 1) ha lo scopo di definire una metodologia di indagini indirizzate a problemi specifici, che possono riguardare la generica caratterizzazione dei materiali, la localizzazione di irregolarità e/o anomalie della muratura, o la definizione di danni alle strutture murarie nel loro complesso.

In particolare, le prove erano finalizzate allo studio di problemi specifici identificati dai responsabili del progetto di conservazione, come supporto all'analisi dei problemi strutturali che caratterizzano il Castello, quali la presenza di fessure passanti, deformazione fuori piombo dei maschi murari. In questo contesto, le prove sono state estese anche alla caratterizzazione delle murature e al controllo dello stato di sforzo locale e delle caratteristiche tenso-deformative [1].

Un quadro fessurativo di una certa rilevanza è visibile sui principali fronti delle torri. Tali fessurazioni sono spesso passanti, e riconoscibili nei prospetti interni. Il rilievo e la classificazione del quadro fessurativo, insieme alla mappatura delle discontinuità e della tessitura muraria, sono stati condotti per valutare le condizioni di conservazione delle strutture dell'edificio.

Prove georadar, soniche, martinetti piatti ed altre tecniche di diagnosi sono state utilizzate per analizzare i problemi riscontrabili sulle strutture murarie, lo stato di conservazione dei maschi murari e le loro connessioni e per verificare la presenza di vuoti ed altre discontinuità al loro interno [1], [2], [3], [4].

Prove di laboratorio condotte su campioni prelevati in situ hanno fornito informazioni sui materiali componenti la muratura, pietre e malte, informazioni rilevanti per eventuali interventi sull'edificio [1]. In particolare, sono state eseguite analisi chimiche sui campioni di malta prelevati il più vicino possibile alle zone già provate con i martinetti piatti, in modo da ampliare il quadro delle informazioni disponibili su una specifica tipologia muraria [6].



Fig. 1. Vista del Castello.

1 Descrizione del Castello

Attualmente il Castello fa parte del patrimonio del FAI, il Fondo per l'Ambiente Italiano dei monumenti. Il complesso edilizio del Castello di Avio si articola intorno alla torre principale

(il Mastio) ed è circondato da ampie mura difensive (Fig. 1).

Le strutture del Castello sono per la maggior parte in pietra, con interventi locali di riparazione o completamento in muratura di laterizi. Attualmente, gli edifici del complesso hanno solai e coperture lignee.

Le prime notizie del Castello risalgono all'XI secolo: nel corso del XIII secolo ebbe la sua massima espansione. Feudo dei Castelbarco, nel corso dei secoli il Castello cambiò numerosi proprietari: i Veneziani, l'Imperatore d'Austria, il Vescovo Bernardo Cles, la famiglia Madruzzo e solo nel XVII secolo tornò nuovamente alla famiglia dei Castelbarco. Al XIX secolo risalgono alcuni rimaneggiamenti delle strutture, ma la configurazione attuale del Palazzo Baronale risente del crollo nel 1893 della Torre posta in posizione simmetrica a quella tuttora esistente.

L'evoluzione storica è stata valutata [5] tramite un'attenta analisi delle fonti documentarie dirette ed indirette, grazie ad una lettura stratigrafica delle caratteristiche morfologiche dell'edificio. Il metodo stratigrafico permette di suddividere l'edificio in aree omogenee, caratterizzate da relazioni cronologiche. Ogni area corrisponde ad una fase precisa dello sviluppo della fabbrica, riconoscibile dall'osservazione di dettagli costruttivi. La relazione temporale con le altre aree può portare ad una valutazione di sequenzialità dell'edificio, spesso senza datazione precisa. Le connessioni tra le diverse aree devono essere studiate con attenzione, in modo da identificare le fasi di espansione e di trasformazione del complesso edilizio (diagramma di Harris) [5].

Il riconoscimento di fasi costruttive dell'edificio, unito ad una valutazione sulla qualità delle connessioni tra le parti, sono informazioni molto importanti per il controllo dell'edificio perché possono dar luogo a discontinuità strutturali.

Lo studio, coordinato da C. Campanella [5], si è concluso con l'osservazione degli elementi databili come il tipo di mattone impiegato e le sue dimensioni, la caratterizzazione cronologica delle tecniche costruttive e attraverso il rilievo e la caratterizzazione delle diverse tipologie murarie. In particolare, C. Campanella e M. Tessonni – Architetti Associati di Crema, hanno eseguito il rilievo geometrico (Fig. 2) del Castello di Avio, mentre S. Bortolotto del Dipartimento di Progettazione Architettonica (DPA), del Politecnico di Milano, ha condotto il rilievo stratigrafico. La ricerca è dettagliatamente riportata in [5].

Sui fronti principali del Palazzo Baronale, e particolarmente della Torre, è riconoscibile un esteso quadro fessurativo. Nel caso della Torre, fessure verticali di una certa rilevanza attraversano l'intera sezione muraria, essendo visibili anche nel prospetto interno (Figg. 1, 2). Il rilievo e la classificazione del quadro fessurativo, unito alla mappatura delle discontinuità e delle tessiture murarie, sono stati condotti per la valutazione dello stato di conservazione strutturale dell'edificio.

In generale, l'obiettivo delle indagini riguarda la valutazione dei danni strutturali del Castello, partendo dal primo strumento diagnostico diretto, il rilievo del quadro fessurativo, ed arrivando fino alla caratterizzazione della muratura ed al controllo dello sforzo locale e del comportamento tenso-deformativo.

Altra finalità dell'indagine riguarda il controllo diretto delle specificità delle singole prove; ciò permette di valutarne l'opportunità e la significatività per la soluzione delle problematiche individuate dai responsabili diretti del progetto di conservazione. Si tratta di una fase importante, che permette di arricchire il quadro generale del panorama diagnostico e di ricavare delle linee guida specifiche.



Fig. 2. Rilievo del Quadro fessurativo del lato Sud rivolto verso la vallata.

2 Rilievo del quadro fessurativo e monitoraggio

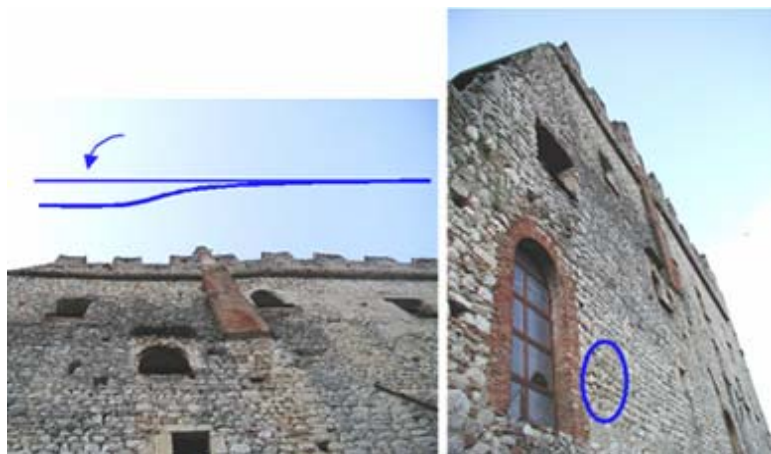
Tra tutti corpi di fabbrica che compongono il Castello di Avio, la struttura più problematica dal punto di vista strutturale è la Torre del Palazzo Baronale. Le fessure sono presenti in prossimità degli spigoli (Figg. 2, 3) ed intorno alle finestre ad arco dei piani superiori.

L'interpretazione del quadro fessurativo e delle caratteristiche della cortina muraria, sembra indicare una mancanza di connessione tra le murature ortogonali, specialmente nella parte superiore della Torre, dove i solai lignei sono andati perduti. Inoltre sono ancora visibili fessure risarcite con malta di colore grigio scuro, che indicano l'esistenza del fenomeno da molto tempo. Si riscontra una deformazione molto accentuata dello spigolo occidentale più alto del fronte sud (Fig. 4a). Questo movimento non ha prodotto ampie fessure e può essere probabilmente connesso al crollo dell'adiacente Torre, avvenuto alla fine del XIX secolo, e alla mancanza dei solai lignei.

La Fig. 4b mostra una vistosa deformazione verso l'esterno della parete volta a valle, con espulsione di alcune pietre ed un quadro fessurativo molto esteso nella sale interne. Le fessure rilevabili nel prospetto interno hanno un andamento simile, parallelo tra loro. Questo tipo di danno non dovrebbe essere connesso a fenomeni di instabilità della muratura. La muratura appare molto disomogenea, con pietre tondeggianti, anche di piccole dimensioni, e con giunti di malta degradati.



Fig. 3. Quadro fessurativo interno della Torre del Palazzo Baronale



a)

b)

Fig. 4. Schema delle deformazioni che caratterizzano il prospetto Sud.

In molti casi, il quadro fessurativo non è leggibile con precisione, a causa della mancanza di malta nelle zone più superficiali dei giunti ed alla propagazione delle fessure nelle murature in pietra, che spesso riguarda l'interfaccia con i conci di pietra. Molte discontinuità sono presenti sia nelle murature interne che perimetrali. Molte di queste fessure possono essere legate alla presenza di canne fumarie.

I muri divisorii interni, privi di ammassamento con la muratura perimetrale, si trovano solo al livello del basamento ed al piano terra. La mancanza di connessione dalla muratura perimetrale, è stata creata dalla più recente costruzione, risalente solo al XIX sec., delle partizioni interne, con una tecnica disomogenea, con inserti di laterizi e malta debole nei giunti, caratterizzata da ampie lacune. La povertà della tecnologia costruttiva e dei materiali impiegati, può aver influenzato il comportamento della struttura nel suo complesso. In generale, la sala corrispondente alla Torre sembra la più danneggiata, anche per le vistose discontinuità delle tessiture murarie.

Per valutare la pericolosità e le motivazioni dei differenti dissesti del Castello, si è provveduto al monitoraggio delle fessure più rilevanti fin dal Dicembre 2002 (Figg. 5- 8). Le deformazioni sono state rilevate, con l'ausilio di un deformometro digitale millesimale di tipo removibile (Fig. 6), a intervalli regolari di 3 mesi.

È importante ricordare che i monitoraggi dovrebbero coprire un periodo di tempo di 4 - 5 anni, tenendo conto che il periodo minimo non deve essere inferiore a 18 mesi, per eliminare

l'influenza di deformazioni termiche stagionali.

La Fig. 7 mostra la localizzazione di alcune delle fessure in oggetto. In particolare, la posizione 1-4 corrisponde alla muratura portante già illustrata in Fig. 4. La Fig. 8 mostra l'andamento di alcune deformazioni, misurate dal 2002 fino ad oggi. I risultati del monitoraggio indicano che gli spostamenti delle posizioni 3, 4, 7, 8 e 10 non seguono le variazioni stagionali di temperatura, come invece dovrebbero fare in condizioni di stabilità.

Questa tendenza è confermata dalle misure di spostamento fuoripiombo riportate in Fig. 9. L'analisi e la comprensione di questi fenomeni, rientrano in un quadro diagnostico dell'edificio che tenga conto, come presupposto indispensabile, anche delle diverse morfologie e discontinuità delle pareti.

Un altro quadro fessurativo molto esteso e, in alcune parti passante, è riconoscibile sul Mastio (la più antica ed alta del complesso), ma al momento non è ancora oggetto di monitoraggio (Fig. 10).

3 Studio dei materiali e della morfologia muraria

L'ispezione ed il rilievo della tessitura muraria forniscono una prima informazione generale sulle caratteristiche apparenti della muratura. Il parametro più influente sulla qualità muraria è, infatti, la morfologia della sezione (Fig. 11). Una paramento con tessitura regolare, può nascondere una struttura interna con intrinseche debolezze, come succede ad esempio per le murature a sacco.

Nel Castello di Avio sono presenti numerose tipologie murarie, legate alle sovrapposizioni degli interventi, raggruppabili per le caratteristiche strutturali, a 3 principali categorie, come illustrato in Fig. 12. In particolare, due tipologie riguardano rispettivamente le murature esterne, più antiche, e le partizioni interne, in generale non ammassate o mal connesse alle precedenti. La presenza di fessure, infatti, sottolinea tale discontinuità. La terza tipologia riguarda il Mastio.

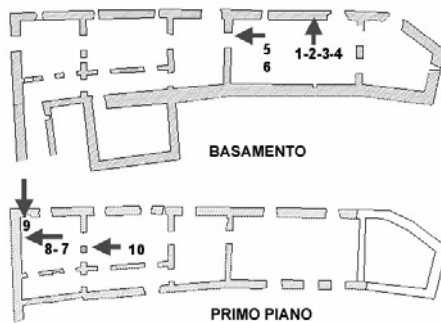


Fig. 5. Localizzazione delle fessure monitorate - Fig. 6. Operazioni di misura.

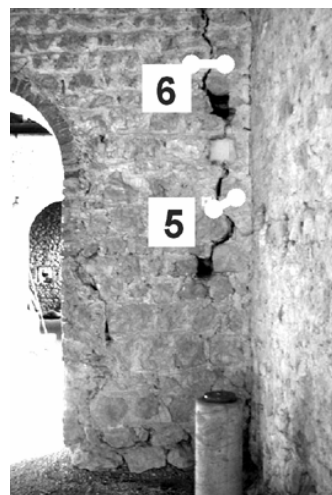
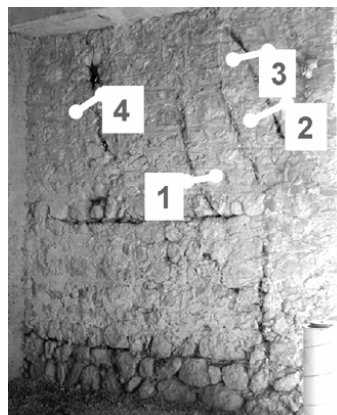


Fig. 7. Localizzazione di alcune fessure monitorate

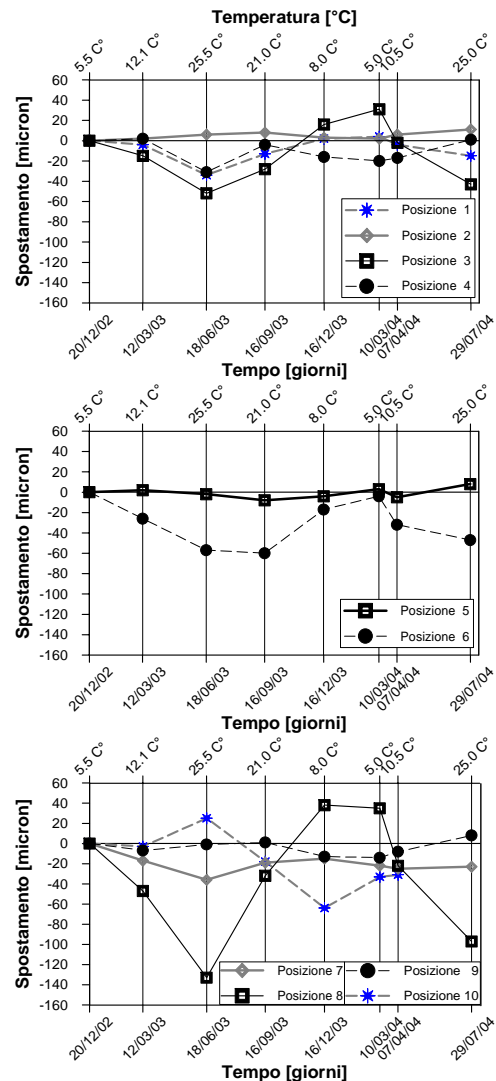


Fig. 8. Monitoraggio delle fessure

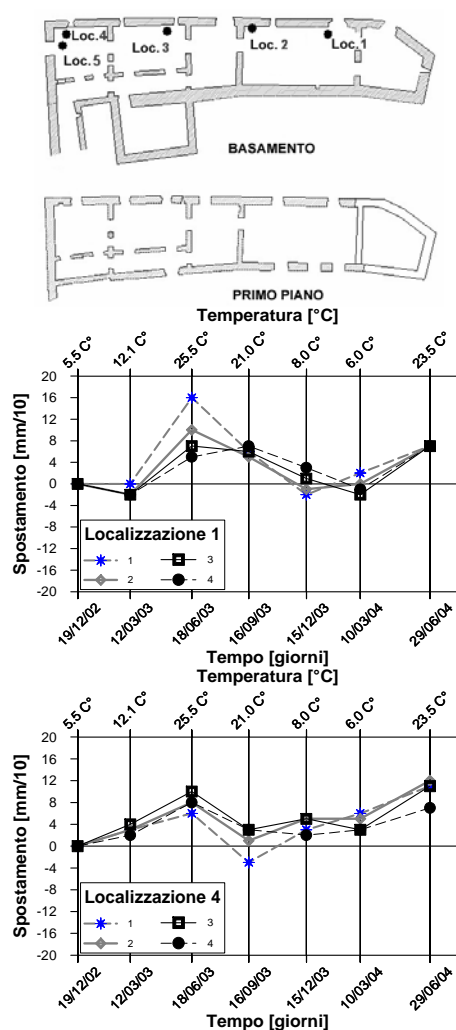


Fig. 9. Monitoraggio delle deformazioni fuori piombo.

canne fumarie o altri vuoti. In presenza di tali anomalie, infatti, la prova con i martinetti piatti potrebbe essere falsata.

In Fig. 14 sono rappresentati i risultati dei martinetti piatti applicati al Castello di Avio. I risultati mostrano come tali prove permettono una classificazione qualitativa della muratura.

Sorprendentemente, la muratura del Mastio sembra più deformabile rispetto alle altre murature caratterizzate.

Fig. 15 mostra un tentativo di correlazione tra velocità sonica e modulo di elasticità, ottenuto grazie ai martinetti piatti doppi, su una casistica di 25 dati. I risultati appartenenti al Castello di Avio sono coerenti rispetto agli altri casi.

3.3 Uso del georadar per la localizzazione di vuoti e anomalie.

La muratura che presenta una notevole complessità morfologica ed un interesse statico primario, è la parete mostrata in Fig. 4. Tale parete, infatti, mostra al livello del basamento un marcato fuori piombo e un importante quadro fessurativo monitorato. A causa della considerevole deformazione, tra le priorità dell'indagine si evidenzia anche la necessità di comprenderne le

3.1 Caratterizzazione delle malte

Analisi chimiche e mineralogico-petrografiche sono state condotte sulle malte prelevate in punti rappresentativi delle fasi costruttive e dell'assetto strutturale. Le analisi sono finalizzate alla valutazione del tipo di legante e di aggregato, del rapporto legante/aggregato, del grado di carbonatazione, della presenza di reazioni chimiche che diano luogo a prodotti di neoformazione (reazioni pozzolaniche, reazioni tra aggregati e leganti, ecc.). La distribuzione granulometrica degli aggregati è stata ricostruita separando il legante dagli aggregati attraverso trattamenti chimici e/o termici [6].

Il programma di prove può portare al riconoscimento della composizione delle malte, molto importante per la produzione di malte da riparazione o miscele da iniezione compatibili con la muratura esistente.

In dettaglio, le analisi chimiche hanno dimostrato materiali simili, come è possibile dedurre da Fig. 13. Il basso valore di Silice Solubile è associabile ad un legante aereo. Gli aggregati sono prevalentemente calcarei, come è rilevabile dalle percentuali di Residuo Insolubile, variabile tra 17% e 42%. I materiali, simili tra loro, hanno probabilmente origine locale.

3.2 Indagini soniche e prove con martinetti piatti

L'uso complementare di indagini soniche e martinetti piatti permette di qualificare le caratteristiche della muratura.

L'applicazione preliminare di indagini soniche e radar è, in generale, utile per controllare la presenza di eventuali anomalie nella muratura, come



Fig. 10. Quadro fessurativo del Mastio

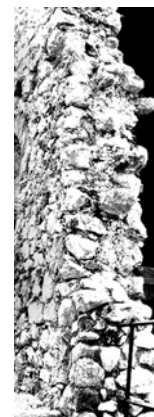


Fig. 11. Sezione della porzione parzialmente crollata



Fig. 12. Tessiture murarie rispettivamente delle murature esterne, di partizione interna e del Mastio

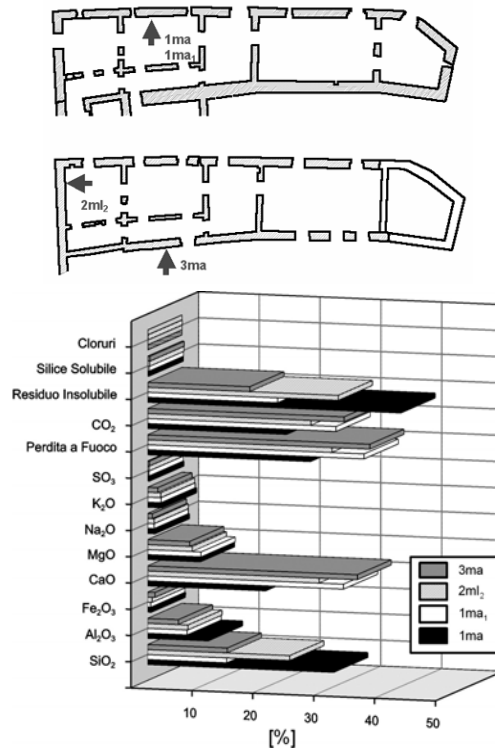
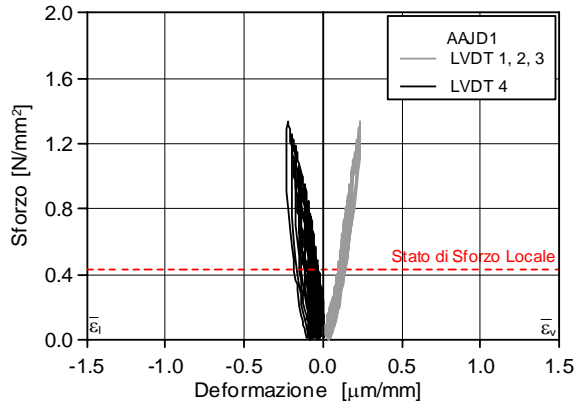


Fig. 13. Analisi chimiche delle malte e localizzazione dei prelievi.

AAJ1D

Modulo Elastico (33-59%): $6524 \text{ N}_2/\text{mm}^2$

Stato di Sforzo Locale: $0.43 \text{ N}/\text{mm}$



ATJ2D

Modulo Elastico (10-36%): $2307 \text{ N}_2/\text{mm}^2$

Stato di Sforzo Locale: $0.97 \text{ N}/\text{mm}$

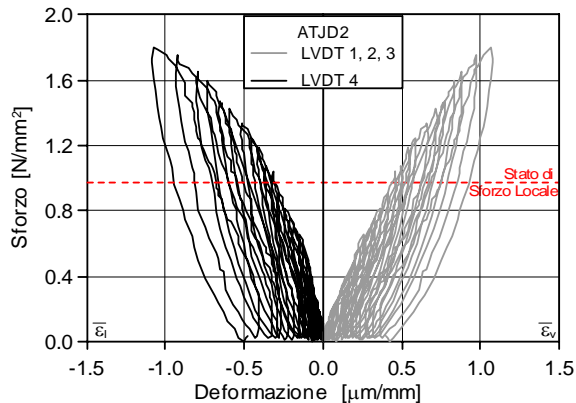
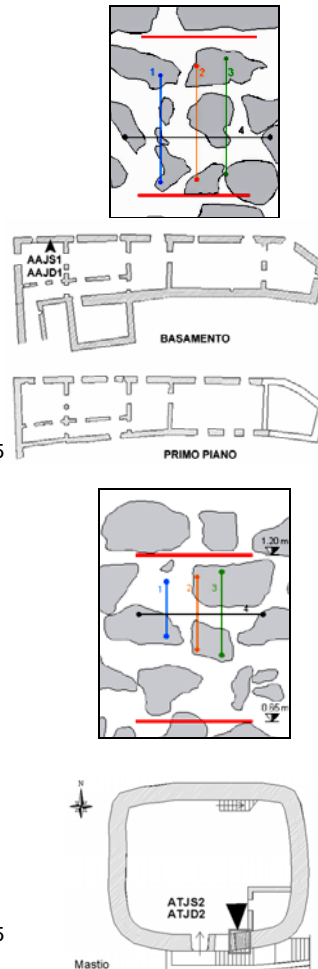


Fig. 14. Risultati dei martinetti piatti doppi



caratteristiche interne.

L'indagine radar è stata condotta acquisendo profili paralleli sufficientemente densi da poter essere elaborati in modalità 3D. La morfologia interna è stata indagata sezionando il volume dei dati focalizzati secondo direzioni ortogonali (Fig. 16) e parallele (Fig. 17) alla superficie di indagine [7].

Le ispezioni hanno mostrato diverse zone con materiale meno compatto (Fig. 16), che possono essere interpretate come distacchi dei due paramenti della muratura (Fig. 17). Fig. 17 mostra le ricostruzioni dei profili radar a varie profondità, insieme alla localizzazione dei difetti leggibili sulla superficie muraria.

Numerosi vuoti sono riconoscibili nei radar-grammi, in corrispon-

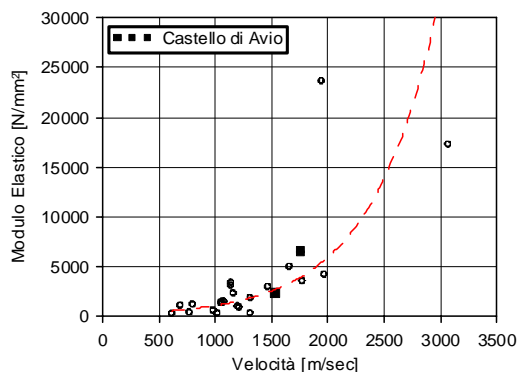


Fig. 15. Correlazione tra velocità sonica e modulo di elasticità

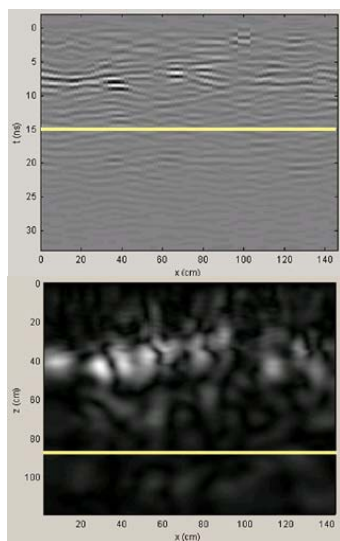


Fig. 16. Profili radar che indicano la presenza di una muratura a due paramenti

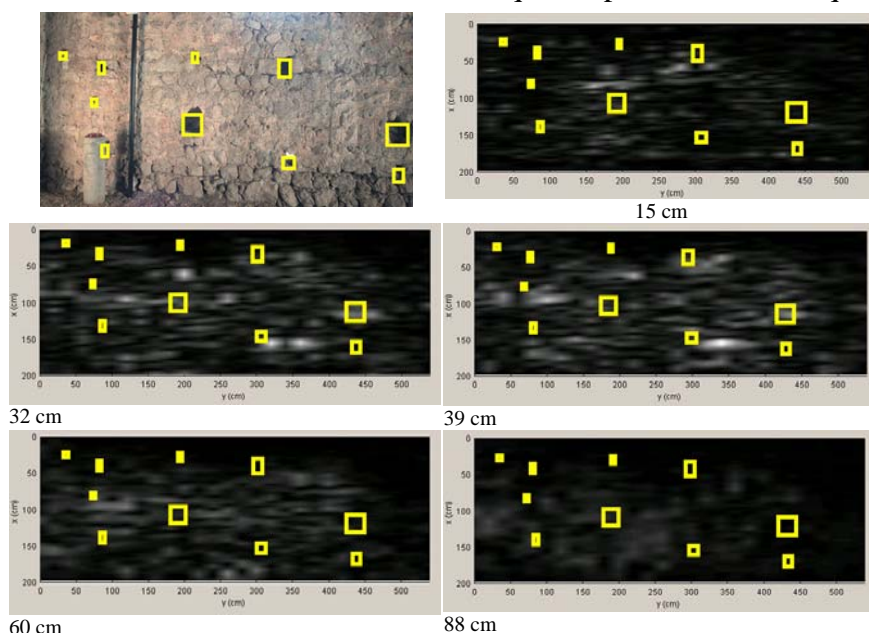


Fig. 17. Ricostruzione dei radargrammi alla profondità di: 15, 32, 39, 60 e 88 cm. L'elaborazione evidenzia la presenza di vuoti interni. I riquadri evidenziano la presenza di vuoti superficiali legati alla mancanza di pietre.

denza dell'interfaccia tra gli strati. Questa conclusione è stata anche confermata dalle successive ispezioni dirette. Il materiale appare molto povero, localmente con mancanza di malta o comunque con malta molto debole (Fig. 18). Queste caratteristiche morfologiche possono spiegare la vistosa deformazione della muratura, come un fenomeno di instabilità dello strato esterno conseguente alla separazione dei paramenti.

4 Conclusioni

Le esperienze maturate negli ultimi decenni nel campo della conservazione e del recupero dell'edilizia storica mettono in evidenza la necessità di disporre, oltre che della conoscenza visiva, anche di adeguate tecniche di valutazione delle sue caratteristiche costruttive e dell'effettivo stato di danno della struttura, prima di adottare qualsiasi tecnica di intervento.

Questa necessità vale anche nel caso di interventi preventivi (ad es. in zona sismica) contro eventi eccezionali, ed anche quando si debbano predisporre progetti di intervento su interi centri storici o parte di essi. La fase diagnostica non è solo importante per la scelta di soluzioni appropriate, ma anche per la definizione di tempi e costi di intervento.

Inoltre, le procedure di indagine devono avere delle fasi preliminari di calibrazione ed ottimizzazione, in modo da verificarne l'efficacia e l'applicabilità per ogni specifica problematica, cercando di avere correlazioni anche quantitative con le caratteristiche murarie.

In molti situazioni non si può parlare di una singola tecnica di indagine, ma di una combinazione di tecniche complementari, come emerge dalle ricerche svolte. Si tratta, quindi, di definire un quadro preciso anche di queste strategie, per raggiungere

la conoscenza necessaria delle caratteristiche della muratura.

Il caso del Castello di Avio mette ben in evidenza tale complessità diagnostica: la valutazione generale dell'edificio si avvale di molte tecniche per rispondere a domande specifiche.



Fig. 18. Ispezione diretta che evidenzia la presenza di un vuoto

In particolare, sono state raggiunte le seguenti evidenze:

- Le strutture del Palazzo baronale sono state danneggiate dal crollo della torre nel XIX sec.
- Lo stato di danneggiamento e il fuori piombo di alcune pareti, può essere connesso alla mancanza di solai e di connessioni tra le murature portanti ortogonali.
- La situazione generale ha provocato localmente la separazione dei paramenti murari.
- La presenza di canne fumarie incrementa localmente lo stato di danneggiamento.
- Il Mastio, a causa di incrementi di carichi (come il supporto delle campane e i piani aggiunti), la mancanza di connessione e probabilmente la struttura muratura, probabilmente a più paramenti mal ammortati, dovrebbe essere monitorato e studiato in modo più approfondito.

La ricerca dimostra chiaramente come la complementarietà delle indagini può essere un supporto strumentale alle operazioni di conservazione del costruito, permettendo una profonda conoscenza di materiali, struttura e specifiche problematiche. Tale supporto dovrebbe però, rientrare in un progetto diagnostico generale, ottimizzato per ogni caso.

In particolare, le indagini basilari dovrebbero coprire i seguenti punti:

- Rilievo geometrico e rilievo del quadro fessurativo possono essere fondamentali per l'interpretazione delle cause del danneggiamento;
- La caratterizzazione dei materiali e della morfologia muraria può essere condotta, in sito, dalla combinazione tra martinetti piatti e indagini soniche e/o radar;
- I risultati delle indagini soniche e dei martinetti piatti possono avere delle possibili correlazioni.
- Vuoti nascosti, inclusioni o canne fumarie possono essere individuati da georadar e/o indagini soniche.

Ringraziamenti

Si ringraziano, per il prezioso contributo durante le prove in situ l'Ing. M. Ciano, M. Antico, M. Cucchi, M. Iscandri e C. Arcadi.

Un particolare ringraziamento è rivolto al FAI, proprietario del Castello di Avio, al Prof. C. Campanella, responsabile dell'intervento conservativo al Castello, all'Arch. S. Bortolotto del Politecnico di Milano, e all'Ing. Macchi. La ricerca è stata cofinanziata nell'ambito del progetto MIUR – Cofin, 2002 e nell'ambito del progetto ONSITEFORMASONRY finanziato dalla CEE (project EVK4-2001-00091) coordinato da C. Maierhofer del BAM.

Bibliografia

- [1] L. Binda, A. Saisi, C. Tiraboschi, Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries, *Construction and Building Materials*, 14(4), pp. 199-233, 2000.
- [2] L. Binda, A. Saisi, C. Tiraboschi, Cattedrale di Noto: le indagini soniche per la diagnosi di strutture murarie danneggiate e riparate, *Edilizia*, ed. De Lettera, anno XIV, N. 9-10, Settembre-Ottobre, pp. 28-41, 2000.
- [3] L. Binda, A. Saisi, L. Zanzi, Sonic tomography and flat jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S.Nicolo' l'Arena, *Non Destructive Testing and Evaluation Int.*, 36(4), pp. 215-227, 2003.
- [4] L. Binda, M. Lualdi, A. Saisi, L. Zanzi, The complementary use of on site non destructive tests for the investigation of historic masonry structures, *Proc. 9th North American Masonry Conference 9NAMC*, Clemens, South Carolina, pp. 978-989, 2003.
- [5] C. Campanella, S. Bortolotto, *Metodi di datazione dell'edilizia storica: il Palazzo: Baronale del Castello di Avio (TN)*, Beni Culturali e Politecnico di Milano, n.8, pp. 28-37, 2004.
- [6] G. Baronio, L. Binda, Experimental approach to a procedure for the investigation of historic mortars, *Proc. 9th Int. Brick/Block Masonry Conf.*, Berlin, pp. 1397-1405, 1991.
- [7] M. Lualdi, L. Zanzi, L. Binda, Acquisition and processing requirements for high quality 3D reconstructions from GPR investigations, *CD-ROM Proceedings of the International Symposium Non Destructive Testing in Civil Engineering NDT-CE*, Berlin, 2003.