



Durabilità delle costruzioni

Le indagini in sito e tecniche di consolidamento

Indagini sperimentali e diagnostica di costruzioni esistenti in muratura

Domenico Liberatore

Roma, 21 ottobre 2015



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Le costruzioni in muratura esistenti

Le indagini distruttive: il problema fondamentale

L'esecuzione di prove distruttive richiede di operare su un volume significativo di "materiale".

Per la muratura, a causa delle dimensioni degli elementi, si deve operare su pannelli con dimensioni minime $1 \times 1 \text{ m}^2$ affinché la prova sia significativa.



Prove moderatamente distruttive (MDT)

Indagine endoscopica

Prova con martinetto piatto singolo e doppio

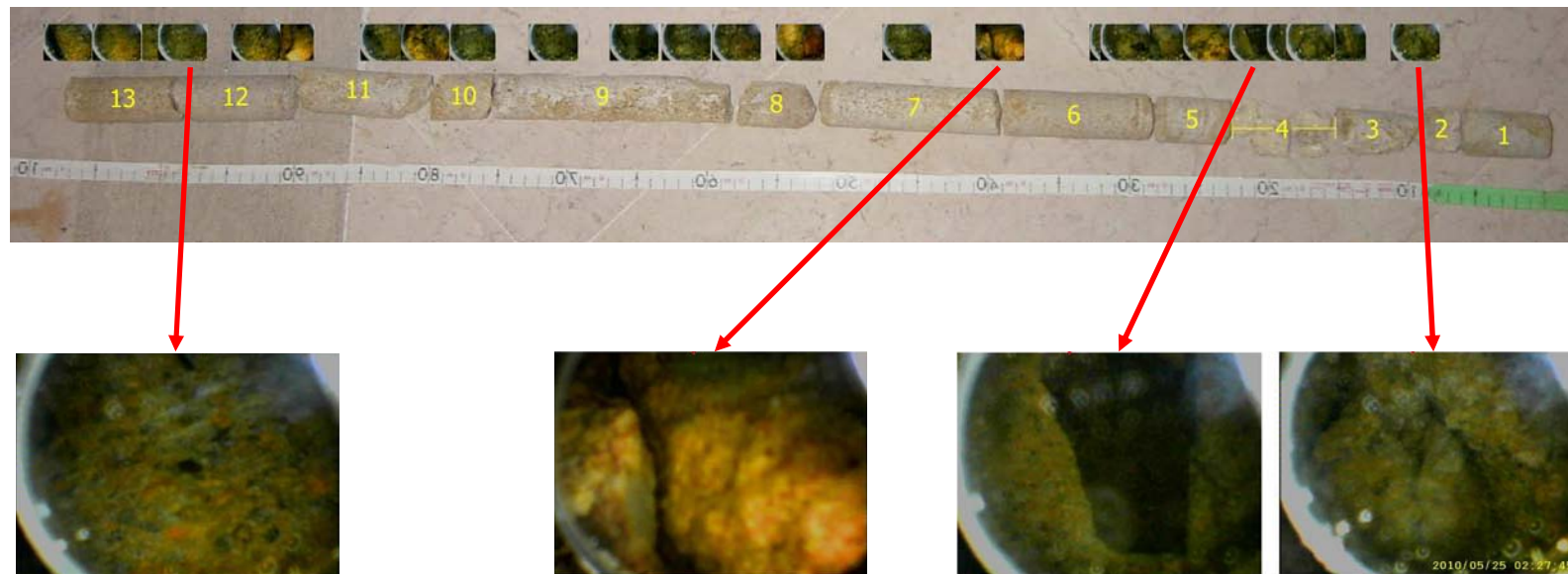
Prove su malta incoerente prelevata *in situ*

Prova penetrometrica *in situ* su malta incoerente

Indagine endoscopica

Perforazione tramite carotatrice a testa diamantata.

All'interno viene introdotto un endoscopio, collegato a una apparecchiatura fotografica o a una videocamera.



Prova con martinetto piatto singolo e doppio



1. Individuazione del giunto e posizionamento dei riferimenti.



2. Misura della distanza iniziale tra i riferimenti.



3. Taglio del giunto tramite sega circolare con eccentrico.



Prova con martinetto piatto singolo e doppio

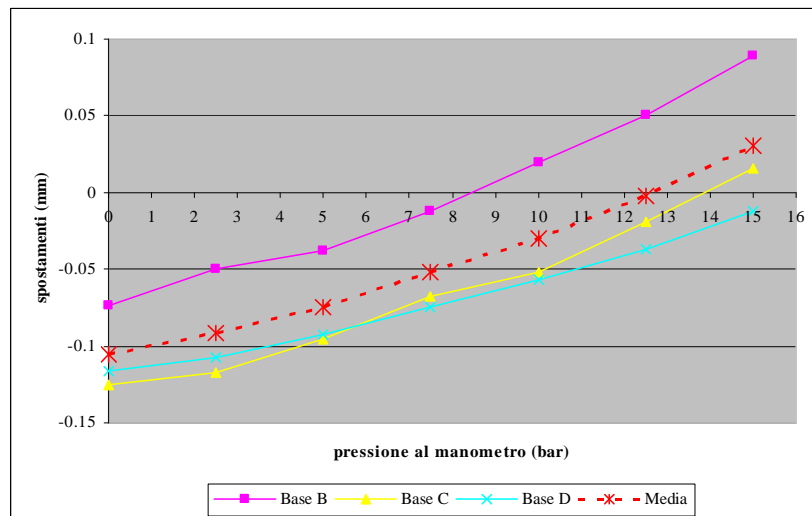


4. Inserimento del martinetto piatto nel taglio.

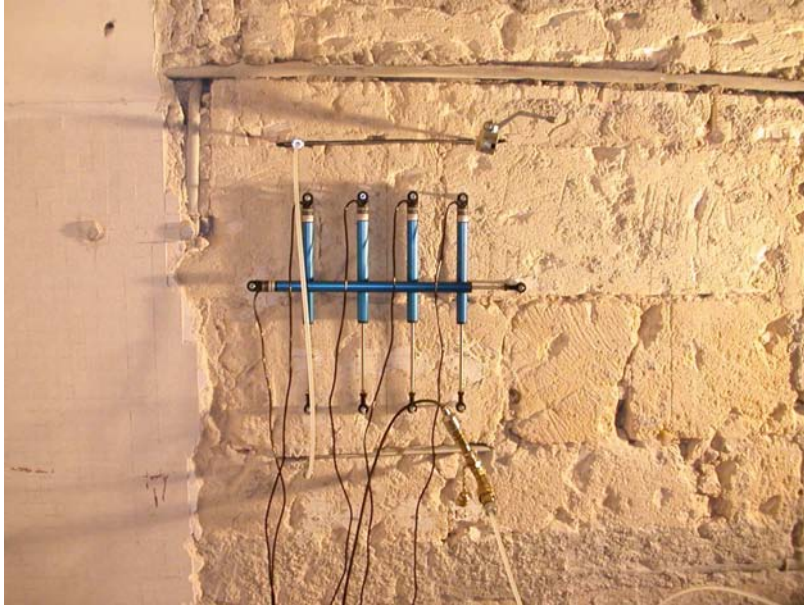


5. Pompaggio di olio in pressione nel martinetto piatto, fino a ristabilire la distanza iniziale tra i riferimenti.

La pressione al manometro permette di determinare la compressione iniziale nella direzione verticale.



Prova con martinetto piatto singolo e doppio



6. Si scarica il martinetto piatto e si pratica un nuovo taglio, al di sopra o al di sotto del primo, nel quale si introduce un secondo martinetto. Tra i due tagli si applicano quattro trasduttori di spostamento in direzione verticale e uno in direzione orizzontale. Si pompa olio in pressione nei due martinetti e si acquisiscono gli spostamenti relativi ai capi dei trasduttori.

La prova con doppio martinetto permette di determinare il modulo elastico della muratura e di stimare la resistenza a compressione.

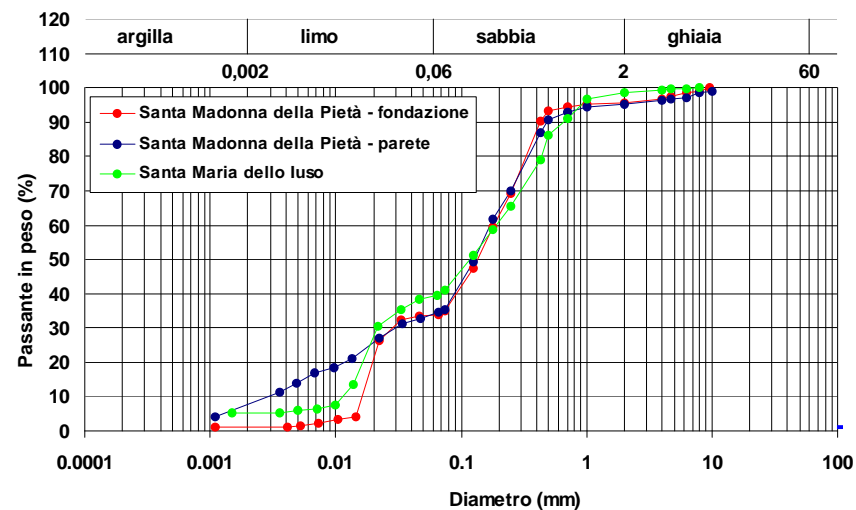
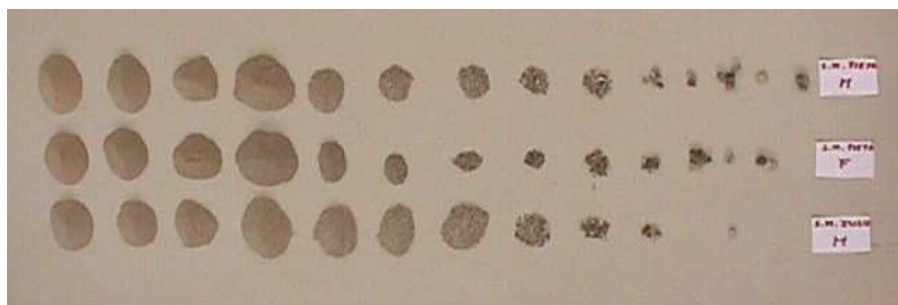
Prove su malta incoerente prelevata *in situ*

Tipo di legante

Tipo di aggregato

Rapporto legante/aggregato

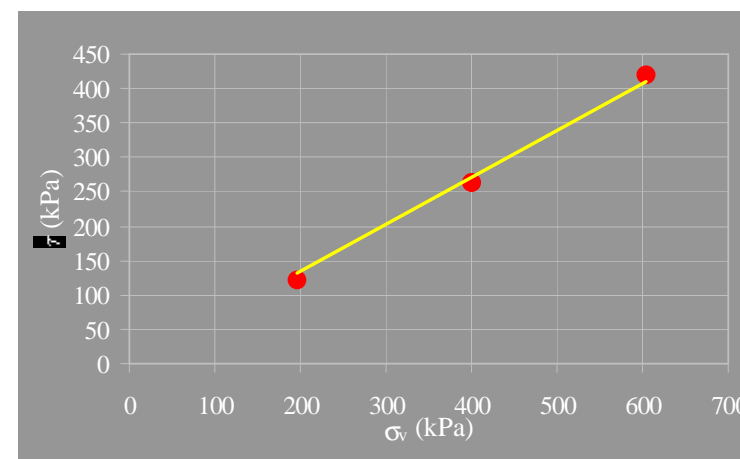
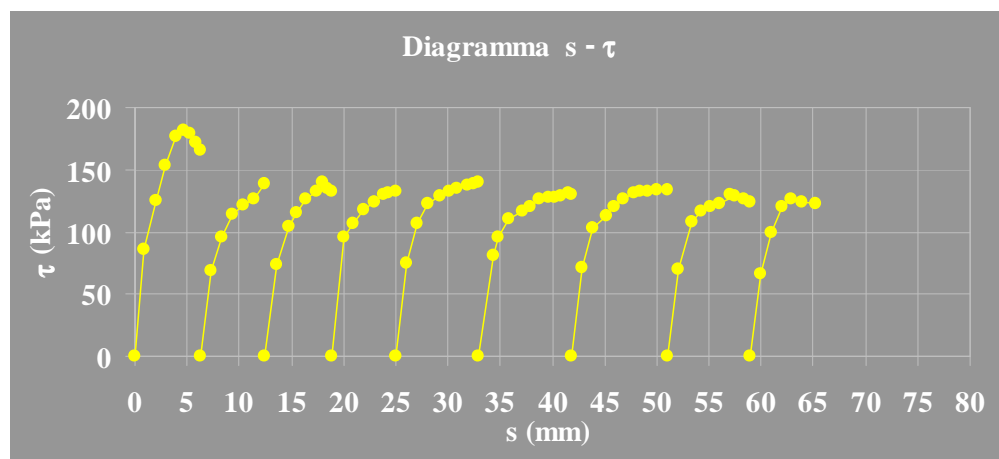
Analisi granulometrica di malte incoerenti



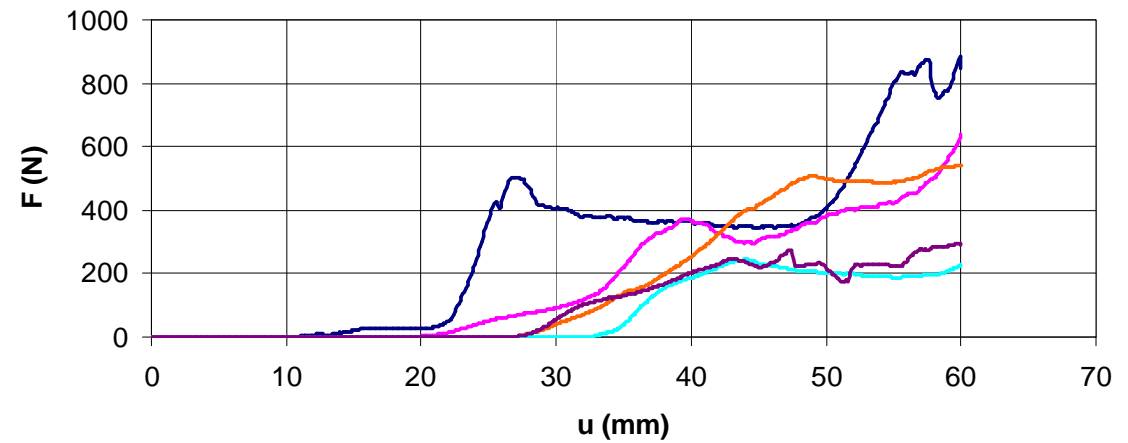
La malta va prelevata all'interno, ad almeno 50-60 mm di profondità nello spessore murario.

Prove su malta incoerente prelevata *in situ*

Prova di taglio diretto su malta incoerente prelevata *in situ*



Prova penetrometrica *in situ* su malta incoerente



Prove non distruttive (NDT)

L'utilizzo di tecniche d'indagine non distruttive (NDT), a scale diverse, può integrare le prove moderatamente distruttive per fornire gli strumenti per la valutazione delle caratteristiche costruttive, dello stato di conservazione e della sicurezza di costruzioni in muratura esistenti.

Prova sonica

Georadar

Termografia infrarosso

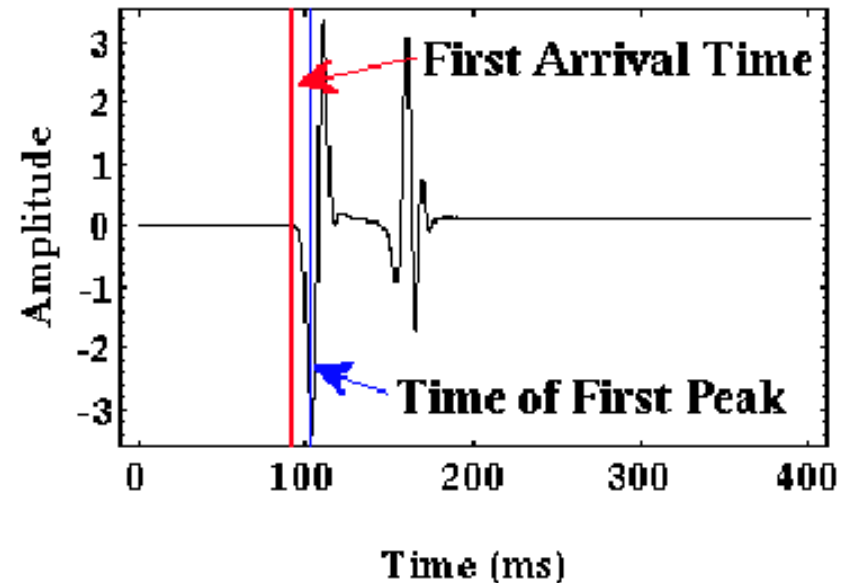
Misura di vibrazioni ambientali

Prova sonica

La tecnica di indagine sonica si basa sulla generazione di impulsi sonici ($10^2 \div 10^4$ Hz) o ultrasonici ($10^4 \div 10^6$ Hz) in un punto della struttura, attraverso la percussione con un martello strumentato (prova sonica) o con trasduttori piezoelettrici (prova ultrasonica). Il ricevitore, tipicamente posizionato sulla superficie opposta, è un accelerometro o un ricevitore piezoelettrico.

La prova fornisce la velocità di attraversamento media dell'impulso nello spessore della muratura.

Essa può essere rappresentata in una mappa di curve di livello in modo da consentire una valutazione delle condizioni interne della struttura e una stima semiquantitativa delle sue proprietà meccaniche.



Prova sonica

Le indagini soniche sono utilizzate nella diagnosi della muratura per qualificare la morfologia della sezione, individuando la presenza di vuoti o difetti o lesioni. In presenza di lesioni, vuoti o altri tipi di discontinuità, infatti, la velocità apparente diminuisce in quanto l'onda deve aggirare la lesione, il percorso si allunga e non risulta più quello diretto tra sorgente e ricevitore.

La risoluzione della prova, in termini di dimensione minima del difetto riconoscibile, è legata alla lunghezza d'onda della frequenza dominante, e anche dalle dimensioni dell'oggetto esaminato.

Prova sonica

Le misure soniche di velocità possono essere svolte secondo diverse procedure:

- **diretta** o per **trasparenza**: la scelta dei punti di emissione e di ricezione dei segnali acustici sono sui due lati opposti della parete muraria, alla stessa altezza dal suolo e in modo che la congiungente sia perpendicolare alle superfici;
- **semidiretta**: i due punti sono sui due lati opposti della parete muraria, ma non in corrispondenza simmetrica;
- **di superficie**: nel caso di disponibilità di una sola superficie si possono eseguire misure con punti di emissione e ricezione posti sullo stesso lato, lungo una linea retta (verticale o orizzontale);
- **radiale**: i trasduttori possono essere applicati su facce adiacenti del mezzo indagato.

Prova sonica

La velocità sonica è influenzata da:

- **frequenza** di input;
- **numero di giunti** attraversati; la velocità tende a diminuire con l'aumento del numero di giunti;
- **presenza di fessure**;
- **caratteristiche del materiale superficiale**; ad es. la presenza di intonaci o lesioni superficiali filtra le componenti ad alta frequenza del segnale. Dato che la lunghezza d'onda è legata al rapporto tra velocità e frequenza, questo effetto tende ad aumentare la lunghezza d'onda e, quindi, diminuire la risoluzione della prova. Può accadere che la risoluzione consenta di trarre solamente considerazioni generali sulla localizzazione di zone di bassa velocità nella muratura.

Prova sonica

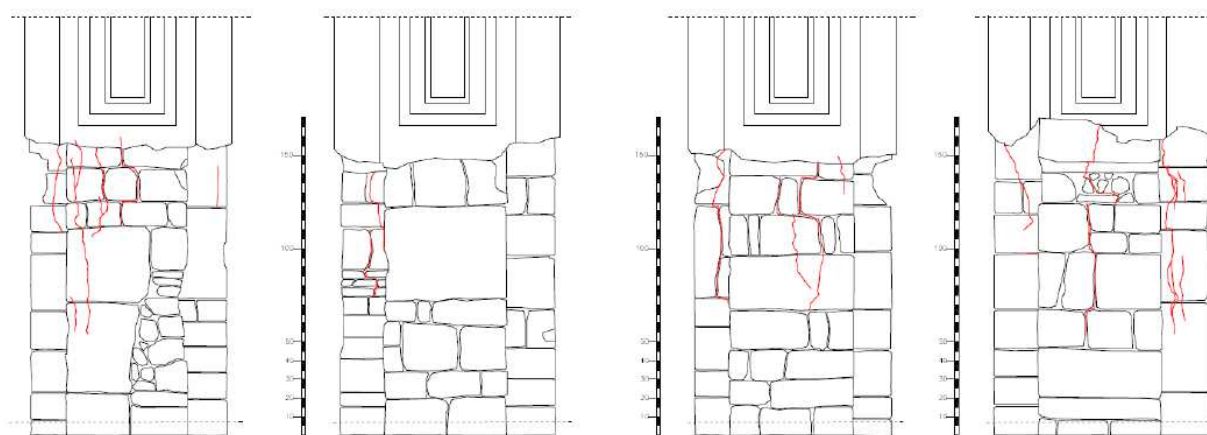
Velocità sonica:

- 1) $V < 1000$ m/s: individua murature fortemente danneggiate con presenza di grossi vuoti interni;
- 2) 1000 m/s $< V < 2000$ m/s: rappresenta la maggioranza delle murature in mattoni esistenti; valori di V inferiori ai 1500 m/s possono indicare presenza di vuoti e difetti, irregolarità nei corsi o nelle giunzioni.
- 3) $V > 2000$ m/s: indica murature accuratamente costruite e conservate con elevata resistenza a compressione, stimabile fra i 5 e 15 MPa.

Le indagini soniche sono utilizzate anche per controllare le caratteristiche della muratura dopo interventi di consolidamento (iniezioni di malte e resine), verificando i cambiamenti delle caratteristiche fisiche dei materiali.

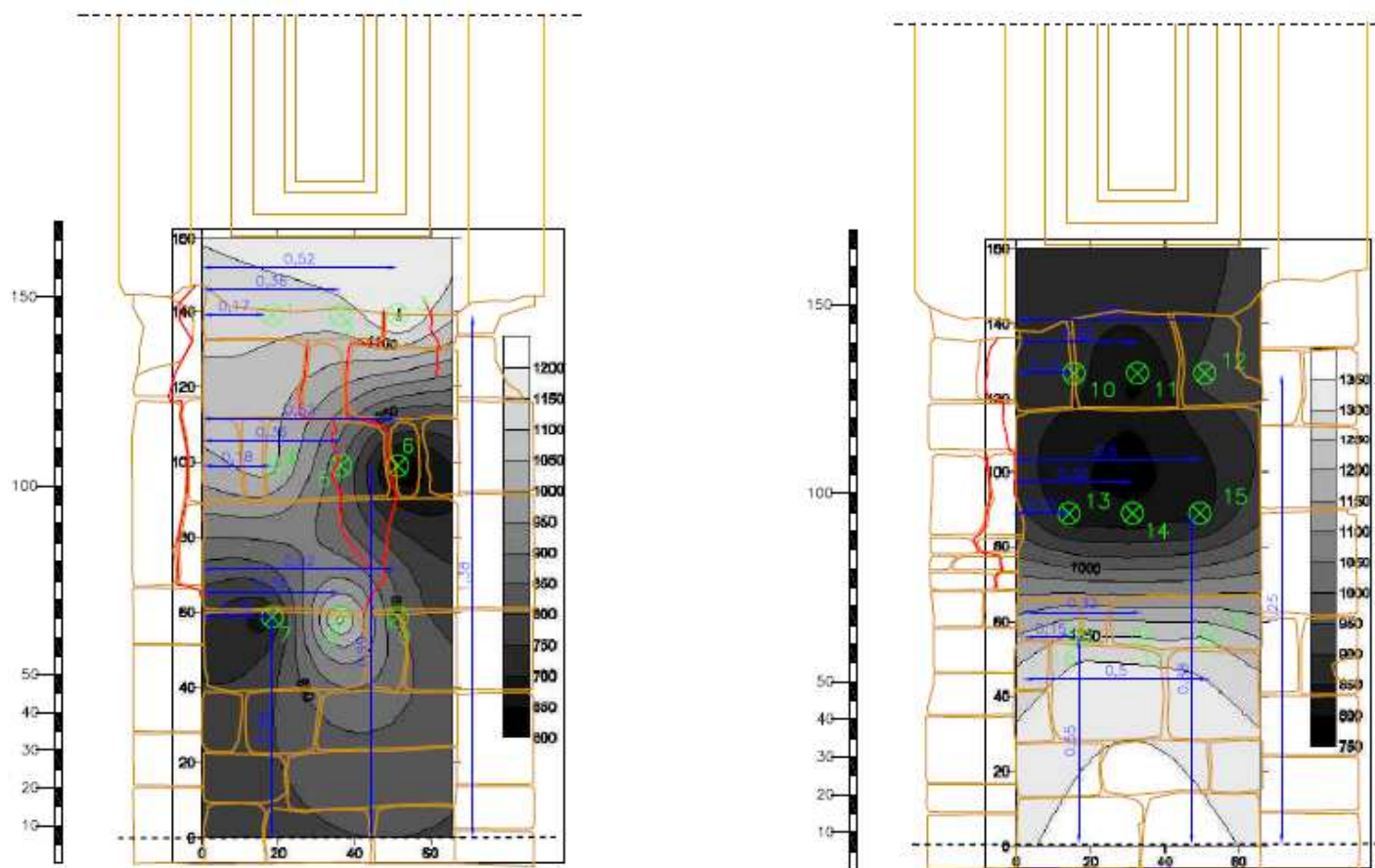
Prova sonica

Caso studio: Cattedrale di Tricarico (MT)



Prova sonica

Caso studio: Cattedrale di Tricarico (MT)

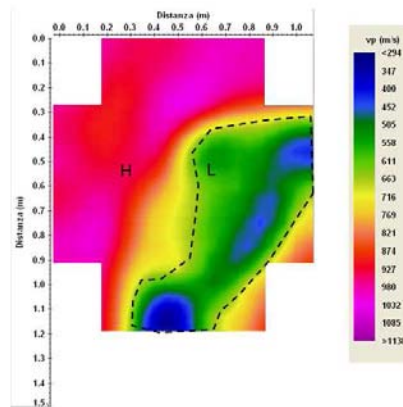
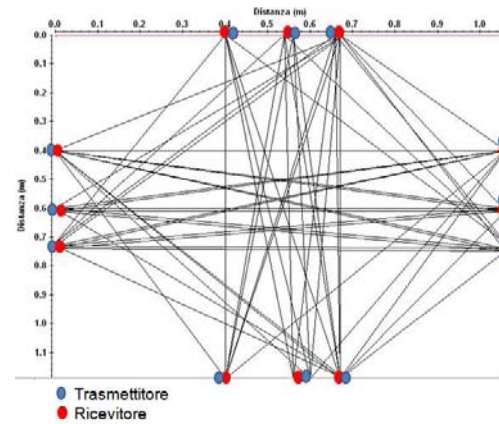


Pilastro 6, mappe della velocità sonica

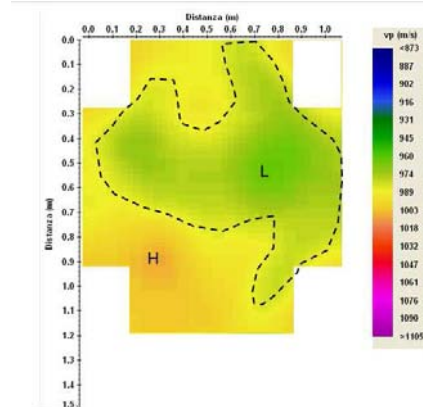
Prova sonora

Caso studio: Cattedrale di Tricarico (MT)

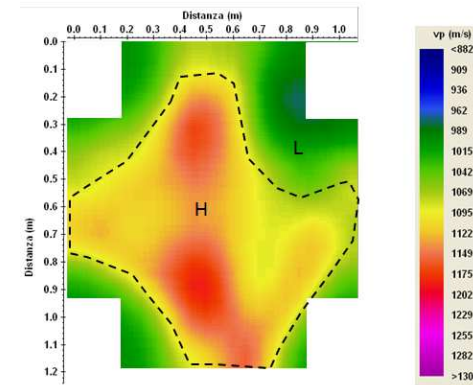
Tomografia sonora



$h = 0.50$ m



$h = 1.00$ m



$h = 1.50$ m

Prova sonica

Vantaggi

- Applicabilità a vaste porzioni di murature;
- Affidabilità in relazione al periodo di impiego.

Svantaggi

- I risultati colgono caratteristiche qualitative e non quantitative della muratura;
- Le prove ultrasoniche mostrano limiti severi per indagini su materiali altamente porosi;
- La necessità di elaborare i risultati, data la disomogeneità del materiale;
- La necessità di una calibrazione dei valori per le differenti tipologie murarie.

Georadar

Il principio di funzionamento del georadar è basato sulla propagazione di onde elettromagnetiche (EM), e sulla loro riflessione in corrispondenza delle superfici che delimitano mezzi con proprietà dielettriche diverse.

Una coppia di antenne (con frequenza nominale tipicamente nell'intervallo 100÷2000 MHz) invia brevi impulsi EM verso la superficie e registra gli echi di ritorno.

Dopo la stima della velocità di propagazione (ad es. dal viaggio andata-ritorno verso riflettori a profondità nota) il radargramma tempo-distanza viene convertito in una sezione trasversale del mezzo investigato. Effettuando molti profili paralleli, e utilizzando metodi di processamento e visualizzazione avanzati, è possibile ottenere immagini 3-D dell'area investigata.

Nel caso della muratura, gli impulsi possono essere riflessi dalla superficie, dai vuoti, dalle discontinuità, dai distacchi, etc.

Il limite principale del georadar è l'elevato assorbimento dell'energia EM da parte dell'umidità, che riduce considerevolmente la profondità di penetrazione.

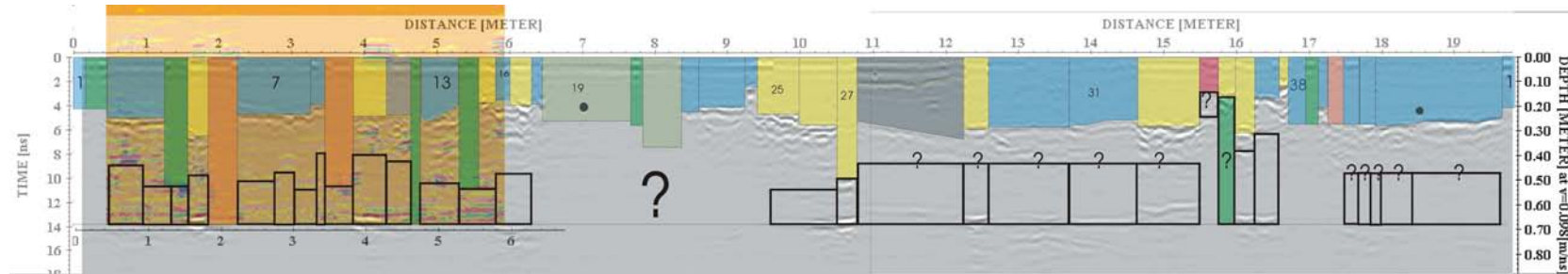
Georadar

Utilizzi:

- ricerca di **elementi strutturali nascosti** in murature portanti e orizzontamenti;
- individuazione di **tessiture murarie nascoste** da intonaci e affreschi;
- controllo dell'efficacia di **iniezioni**;
- individuazione di **difetti, fessure e vuoti**, inclusioni di materiali diversi;
- individuazione della **morfologia delle sezioni di murature a più paramenti**;
- rilievo della presenza di **umidità** nelle murature.

Georadar

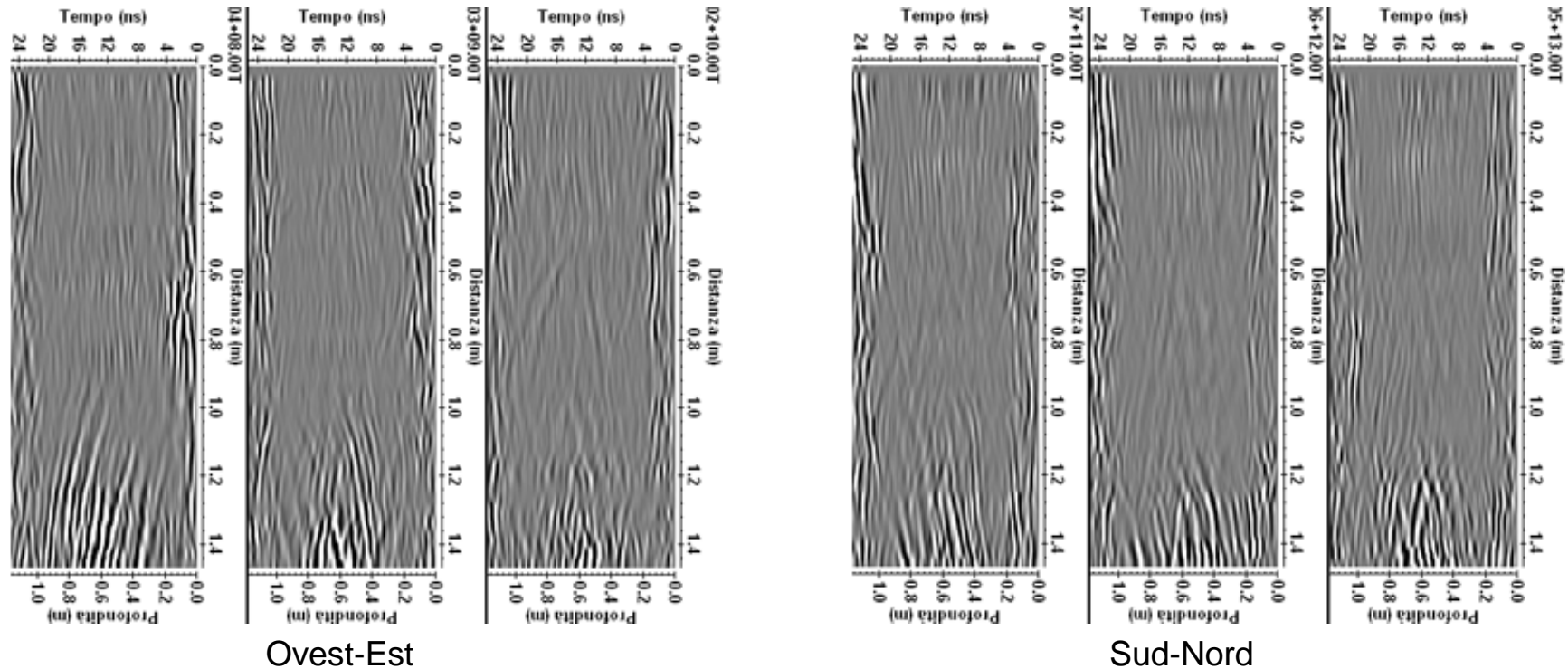
Caso studio: Cattedrale di Troia (FG)



Risultati delle indagini georadar sul cordolo circolare in muratura che circonda il rosone: l'interpretazione strutturale è sovrapposta al radargramma migrato, evidenziando la geometria dei conci e la presenza di un nucleo interno eterogeneo.

Georadar

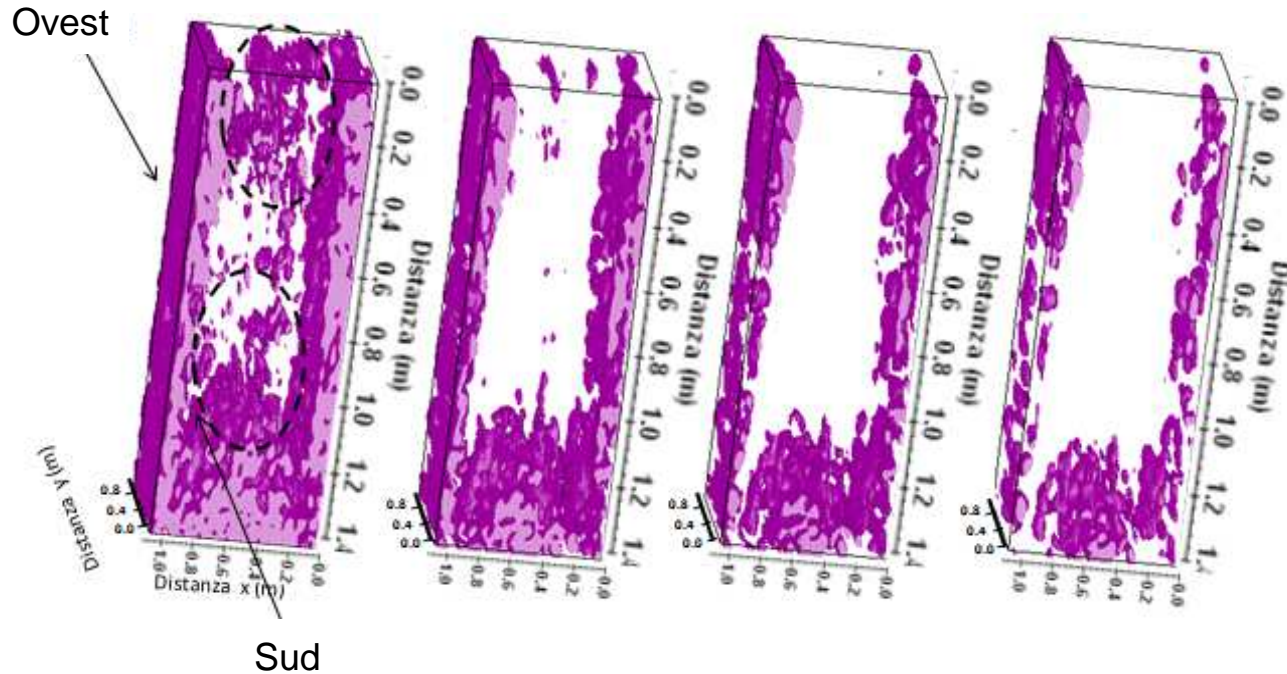
Caso studio: Cattedrale di Tricarico (MT)



L'analisi dei profili evidenzia la presenza di riflessioni verticali indicanti una forte stratificazione (fessurazione), così come riflessioni multiple con la caratteristica forma iperbolica che corrispondono alle fessure visibili sulla superficie.

Georadar

Caso studio: Cattedrale di Tricarico (MT)



Curve di livello dell'ampiezza per il pilastro 6

I dati possono essere anche rappresentati in 3D attraverso le linee di livello di ampiezza a opportune soglie del segnale (20%, 40%, 60%, 80%). Questa rappresentazione evidenzia il distacco delle lesene dal nucleo del pilastro, come anche la presenza di anomalie di ampiezza elevata nel nucleo. Queste anomalie sono coerenti con le discontinuità rilevate (vuoti e fratture), specialmente alla base del pilastro.

Georadar

Vantaggi

- Applicabilità a vaste porzioni di murature;
- Rileva anomalie anche in murature di consistente spessore e coglie la presenza di umidità;
- Utilizzabile nella diagnostica di pareti affrescate o rivestite in quanto non richiede il contatto diretto.

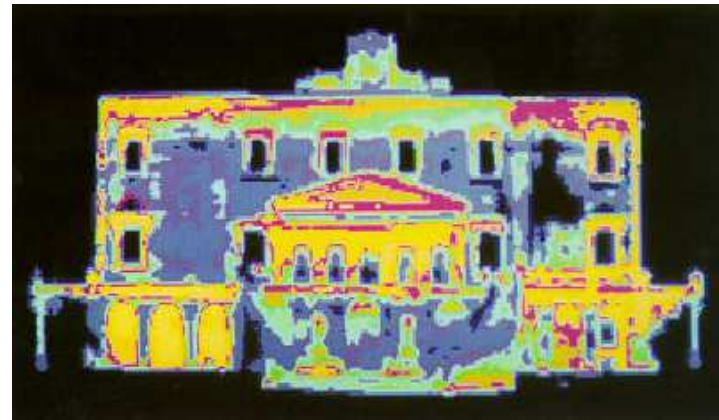
Svantaggi

- Interpretazione dei risultati non sempre univoca;
- Rilevanti disturbi del segnale legati ad effetti della prima componente, ad echi multipli dovuti a numerosi cambi di materiali, sovrapposizione di echi laterali;
- Necessità di una calibrazione preliminare della frequenza di emissione.

Termografia infrarosso

La termografia infrarosso è basata sulla proprietà che tutti i corpi con temperatura superiore allo zero assoluto (0 K) emettono una radiazione nel campo dell'infrarosso (IR), ossia energia nella banda $10^{12}\div 10^{14}$ Hz dello spettro EM. Per mezzo di una termocamera IR è possibile misurare l'energia e determinare la distribuzione di temperatura sulla superficie dell'oggetto attraverso la legge di Stefan-Boltzmann.

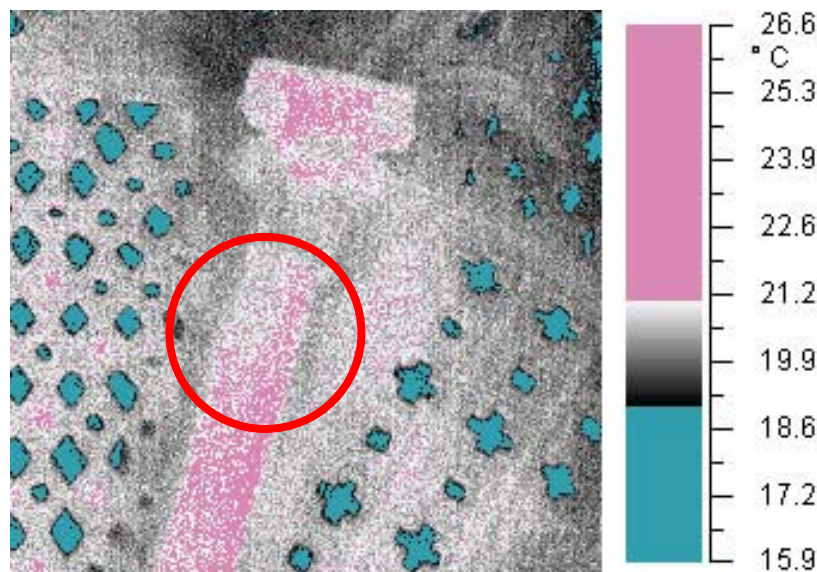
Il risultato è una immagine termica dell'oggetto, visualizzabile attraverso scale di colori o di toni di grigio. A ogni colore – o tono della scala di grigi – corrisponde un intervallo di temperatura. Generalmente le differenze di temperatura rilevabili sono dell'ordine di frazioni di grado centigrado.



Termografia infrarosso

L'energia emessa dalla superficie dipende dalle proprietà spettrali (emissività, riflessione), termiche (conduttività, calore specifico, diffusività), o altre (porosità, densità, umidità) del mezzo.

Nell'indagine e diagnosi degli edifici in muratura, questa tecnica rappresenta generalmente uno strumento economico, efficiente e non distruttivo per l'individuazione qualitativa di vuoti e difetti superficiali, per la mappatura dell'umidità e per la valutazione di trattamenti conservativi.



Cattedrale di Troia (FG). L'indagine termografica ha permesso di rilevare la variazione termica indotta da un perno metallico interno di collegamento tra una colonnina del rosone e il corrispondente capitello.

Termografia infrarosso

L'indagine termografica può essere condotta in modo attivo o passivo:

- nella termografia **passiva** si analizzano gli effetti dei cicli termici naturali (insolazione e successivo raffreddamento);
- nella termografia **attiva**, invece, le superfici sono riscaldate artificialmente.

Mentre la termografia passiva interessa solo lo strato più superficiale della muratura, quella attiva può essere utilizzata per indagare strati collocati ad una certa profondità (fino a 10 ÷ 20 cm). In tal caso, la superficie da indagare è riscaldata per diverse ore, in modo che il calore, grazie alla conducibilità termica del materiale, interessi strati più profondi nel muro.

Termografia infrarosso

Vantaggi

- Applicabilità a vaste porzioni di murature;
- Utilizzabile nella diagnostica di pareti affrescate o rivestite in quanto non richiede il contatto diretto;
- Valida per l'individuazione di vuoti o cavità, di inclusioni di differenti materiali, di eventuali anomalie e modifiche nella tessitura, per la verifica della presenza di umidità, per il rilievo di impianti incassati.

Svantaggi

- In assenza di adeguata sollecitazione termica, la termovisione si limita agli strati più esterni;
- Sensibilità alle condizioni al contorno allo svolgimento della prova;
- Necessità di calibrazione degli algoritmi di acquisizione.

Misura di vibrazioni ambientali

Le misure di vibrazioni ambientali *in situ* permettono di indagare i comportamenti e verificare l'integrità strutturale.

Tali prove sono, in genere, efficienti in fase diagnostica nel rilievo di eventuali anomalie e per la calibrazione di modelli numerici.

Le misure sono generalmente effettuate con una rete di accelerometri o velocimetri, installati in punti significativi della struttura. L'analisi spettrale permette di determinare i parametri modali dalle registrazioni, in termini di frequenze e forme modali.

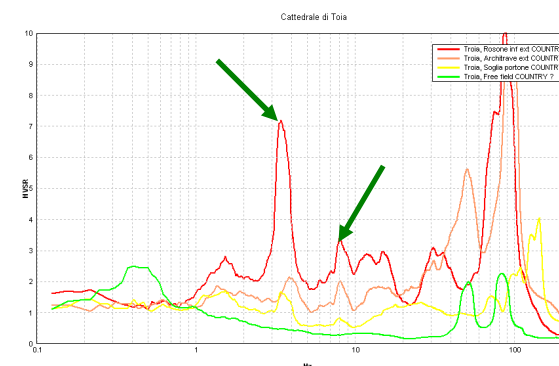


Misura di vibrazioni ambientali

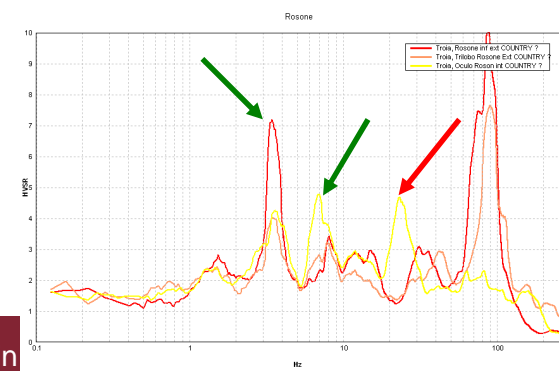
Caso studio: Cattedrale di Troia (FG)

L'HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) ha identificato frequenze fondamentali diverse per le due direzioni ortogonali (nel piano e fuori dal piano). Sulla facciata sono state identificate due frequenze, a 3.2 e 8.0 Hz, con ampiezza crescente con l'altezza, come atteso per i modi fondamentali.

Le misure eseguite sul rosone (oculo, archi incrociati e collegamento con la facciata) mostrano una frequenza diversa. Mentre le frequenze della facciata sono ancora visibili, emerge una nuova frequenza a 22 Hz. Il modo corrispondente ha ampiezza massima al centro del rosone e decrescente verso il collegamento con la facciata, come atteso per un modo fondamentale di piastra in 2-D.



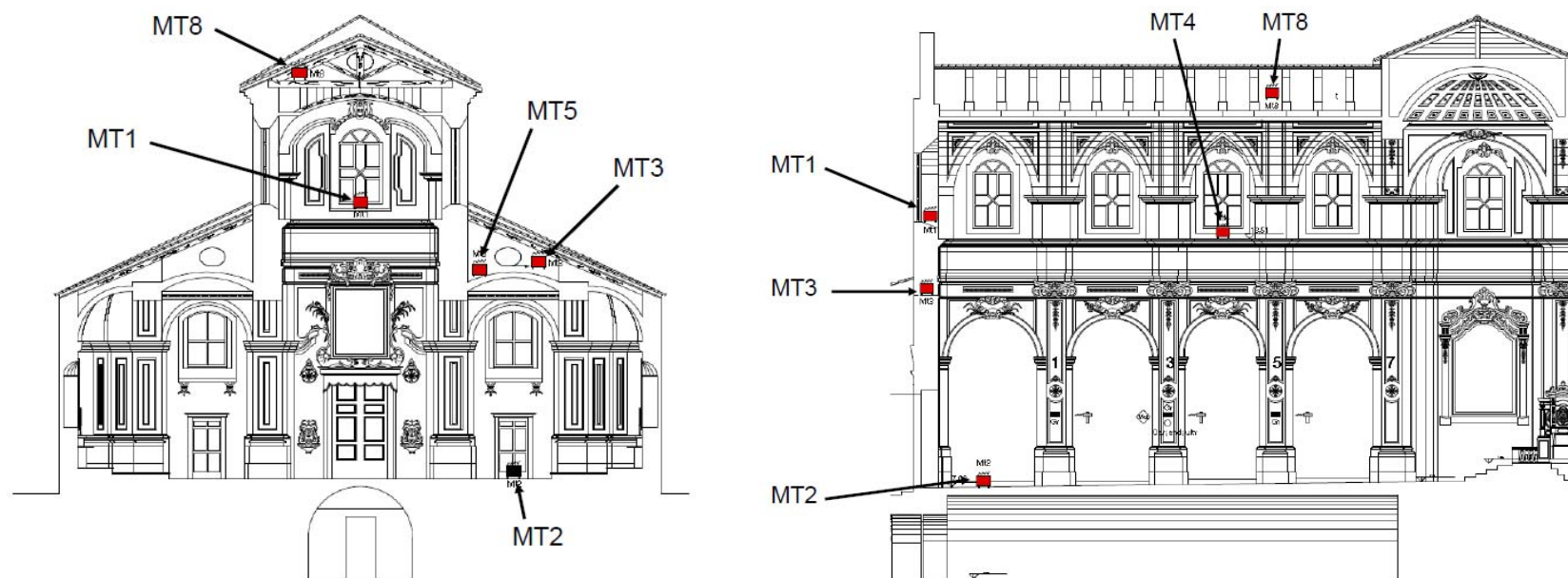
HVSR della facciata a diverse altezze



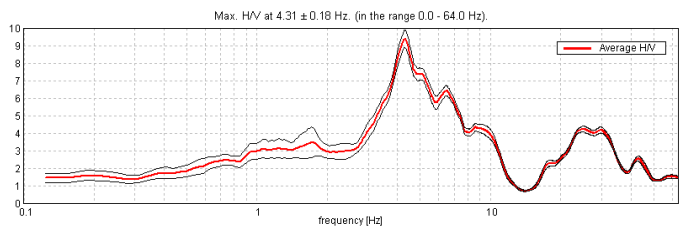
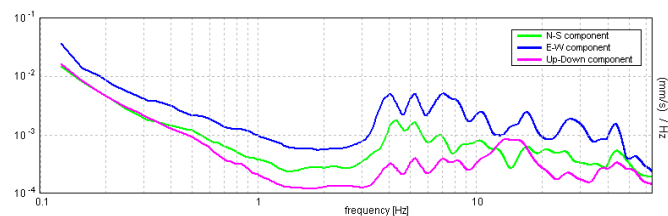
HVSR del rosone

Misura di vibrazioni ambientali

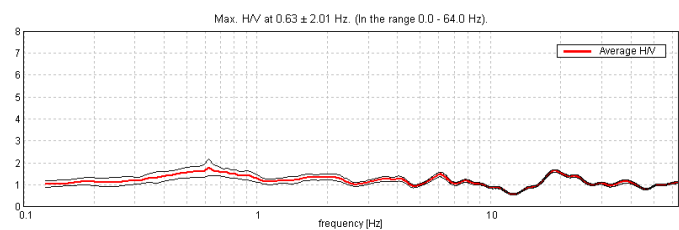
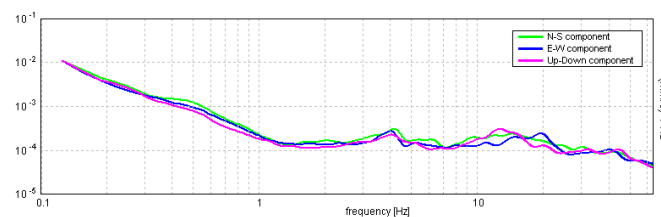
Caso studio: Cattedrale di Tricarico (MT)



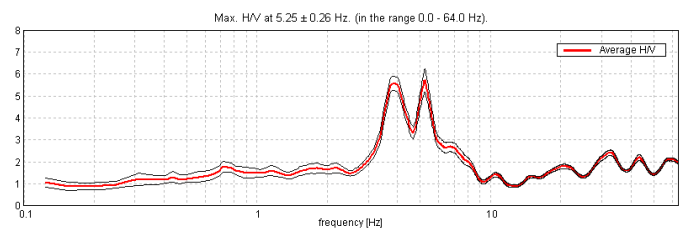
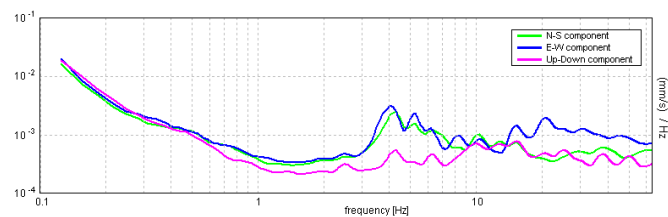
Misura di vibrazioni ambientali



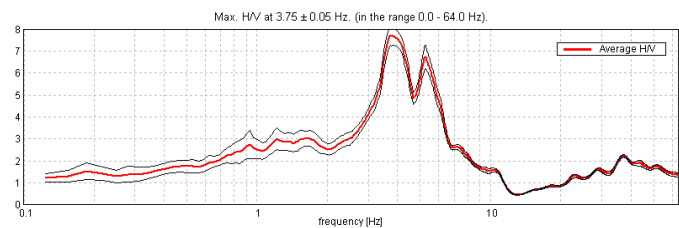
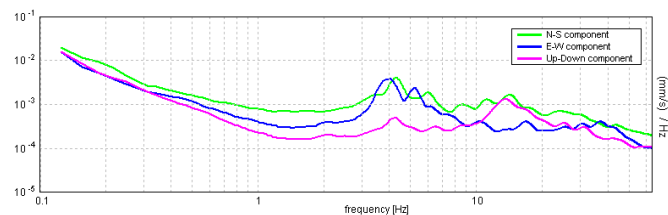
MT1: finestra centrale della facciata



MT2: pavimento, portale sinistro della facciata

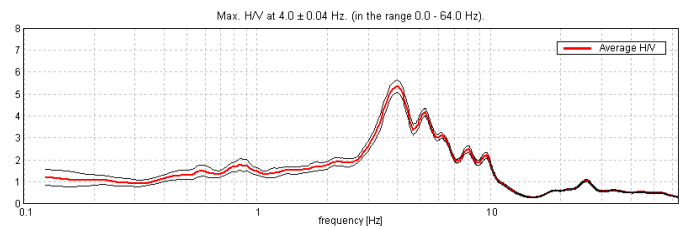
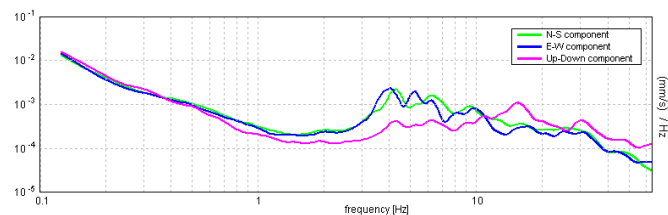


MT3: oculo sinistro della facciata

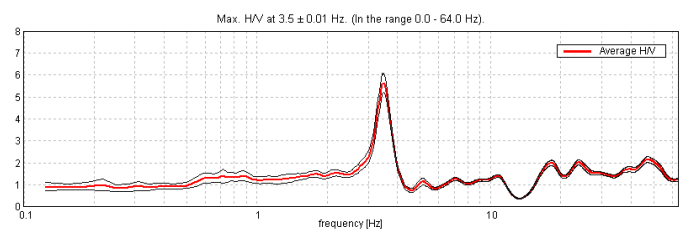
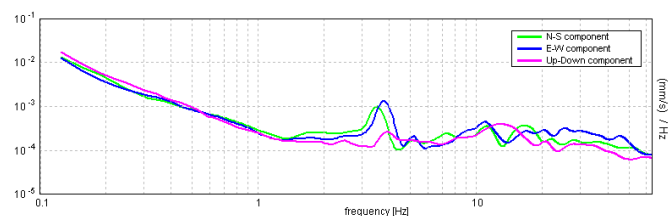


MT4: cleristorio, 3^a finestra della parete sinistra

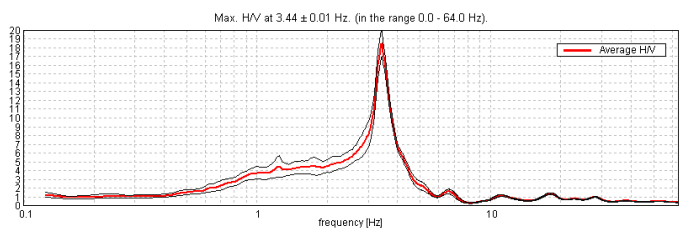
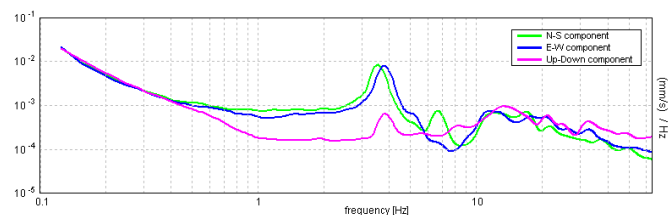
Misura di vibrazioni ambientali



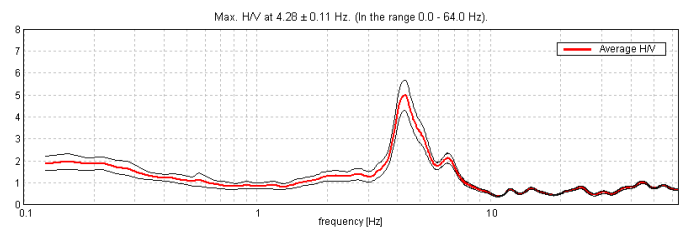
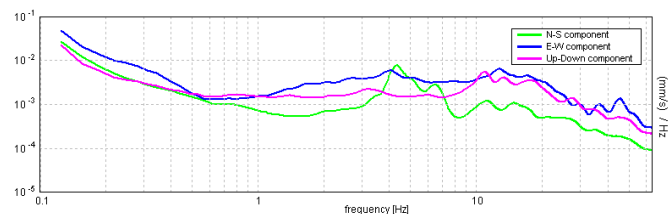
MT5: chiave della volta a crociera della 1^a campata



MT7a: campanile, 2^o piano



MT7b: campanile 4^o piano



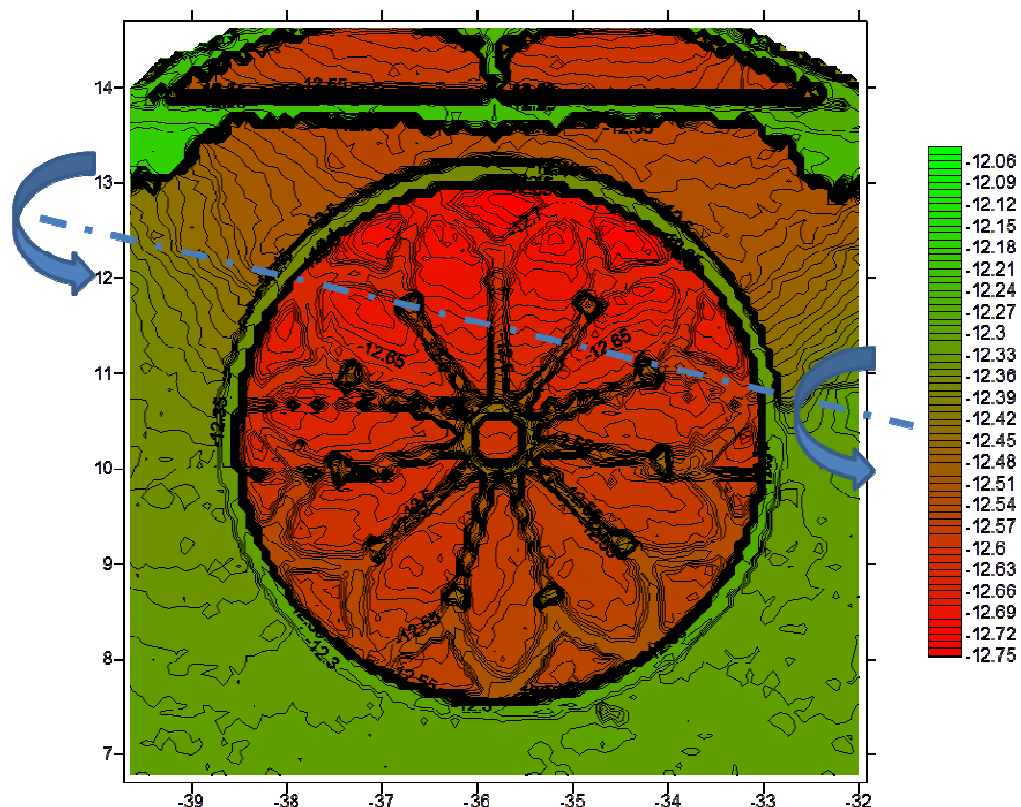
MT8: struttura in legno sopra la navata

Identificazione di meccanismi locali attraverso laser scanner

Caso studio: Cattedrale di Troia (FG)

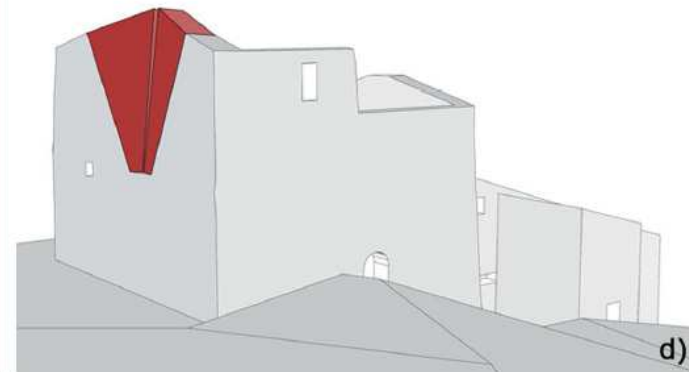
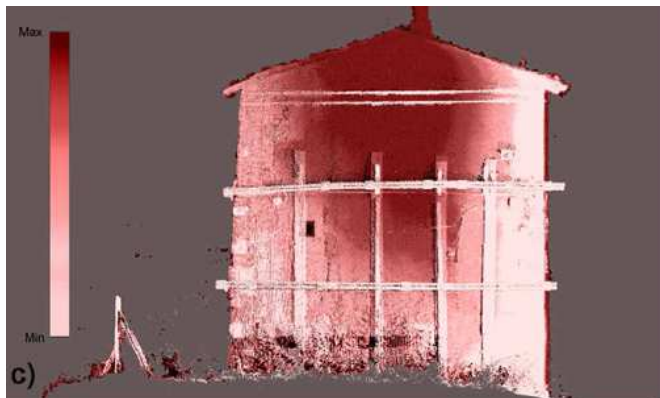
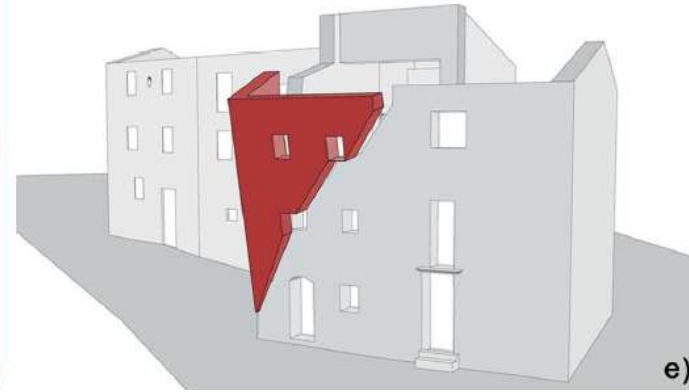
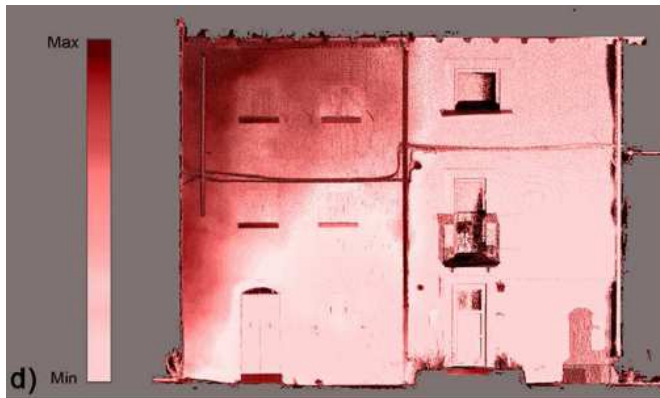
Il rilievo, effettuato con laser scanner, ha consentito di individuare l'attivazione di un meccanismo locale di rotazione della facciata attorno ad una cerniera sub-orizzontale situata al di sopra del centro del rosone.

Il moto di rotazione della facciata è stato la presumibile causa di un insieme di scorrimenti e danneggiamenti rilevati sulla facciata.



Identificazione di meccanismi locali attraverso laser scanner

Caso studio: centro storico di Rovere, Rocca di Mezzo (AQ)



Riferimenti bibliografici (1/2)

Liberatore D, Spera G, Cotugno M. A New Penetration Test on Mortar Joints. Proc. of the Workshop RILEM TC177MDT “On Site Control and Non Destructive Evaluation of Masonry Structures and Materials”, Mantua, 13-14 November 2001, 191-202.

Liberatore D, Spera G, Cotugno M. Una nuova prova penetrometrica sui giunti di malta. Atti del Workshop “Danneggiamento, conservazione e manutenzione di strutture murarie e lignee: diagnosi e modellazione con riferimento alle tipologie costruttive e edilizie”, Milan, 16-17 January 2003, 169-178.

Liberatore D, Spera G, Racina V. Una prova penetrometrica per valutare le caratteristiche della malta: prime calibrazioni. Atti dell'11° Convegno “L’Ingegneria Sismica in Italia”, Genoa, 25-29 January 2004.

Liberatore D, Spera G, Racina V. Calibrazione sperimentale della prova penetrometrica sui giunti di malta. Atti del Workshop “Dalla conoscenza e dalla caratterizzazione dei materiali e degli elementi dell’edilizia storica in muratura ai provvedimenti compatibili di consolidamento”, Milan, 16-17 December 2004, 189-197.

Liberatore D, Spera G, Mucciarelli M, Masini N, Calia A, Caprioli A, Racina V, Nuzzo L, Rizzo E, Binda L, Cantini L. The Façade and the Rose-Window of Troia Cathedral (Apulia, Italy). Proc. of the Conference “Structural Analysis of Historical Constructions – SAHC 2006”, New Delhi, 6-8 November 2006, paper n. 1983, 1998-2004.

Liberatore D, Spera G, Mucciarelli M, Gallipoli MR, Santarsiero D, Tancredi C, Masini N, Racina V, Caprioli A, Cividini A, Tedeschi C. Typological and Experimental Investigation on the Adobe Buildings of Aliano (Basilicata, Italy). Proc. of the Conference “Structural Analysis of Historical Constructions – SAHC 2006”, New Delhi, 6-8 November 2006, paper n. 845, 851-858.

Liberatore D, Mucciarelli M, Gallipoli MR, Masini N. Two Applications of the HVSR Technique to Cultural Heritage and Historical Masonry. In: Mucciarelli M, Herak M, Cassidy J (eds.), Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data, Springer, Dordrecht, 2009, 325-335.

Nuzzo L, Calia A, Liberatore D, Masini N, Rizzo E. Integration of Ground-Penetrating Radar, Ultrasonic Tests and Infrared Thermography for the Analysis of a Precious Medieval Rose Window. Advances in Geosciences, 2010, 24:69-82. doi: 10.5194/adgeo-24-69-2010.

D. Liberatore, Indagini sperimentali e diagnostica di costruzioni esistenti in muratura

Riferimenti bibliografici (2/2)

Masini N, Nuzzo L, Rizzo E, Liberatore D. Metodi integrati di indagine non invasiva per lo studio delle tecniche costruttive e il restauro: il caso del rosone della Cattedrale di Troia. In: D'Andria F, Malfitana D, Masini N, Scardozzi G (eds.), *Il Dialogo dei Saperi. Metodologie integrate per i Beni Culturali*, vol. I, ESI, Naples, 2010, 563-580.

Calia A, Liberatore D, Masini N, Racina V, Galizia A. Sviluppo di un algoritmo di correlazione tra prove penetrometriche e analisi porosimetriche delle malte: prime correlazioni. In: D'Andria F, Malfitana D, Masini N, Scardozzi G (eds.), *Il Dialogo dei Saperi. Metodologie integrate per i Beni Culturali*, vol. I, ESI, Naples, 2010, 653-670.

Masini N, Liberatore D, Gizzi F, Leucci G, Quarta G, Persico R. Analysis of Damage and Diagnostic Investigations on Tricarico Cathedral (Italy). Proc. of the Conference "Structural Analysis of Historical Constructions – SAHC 2012", Wrocław, October 15-17, 2012, paper n. 330.

Calia A, Liberatore D, Masini N. Approach to the study of conservation of historical masonry mortars by means of the correlation between porosimetry and penetrometric test. First results. Proc. of Built Heritage 2013 Monitoring Conservation Management, Milan, November 18-20, 2013, 1133-1140.

Liberatore D, Masini N. L'acciaio nel restauro: dalla diagnostica all'intervento. Caso di studio. Proc. of the REHABEND 2014, Santander, April 1-4, 2014, 1666-1677.

Liberatore D, Masini N, Sorrentino L, Racina V, Frezza L, Sileo M. A static penetration test for masonry mortar. Proc. of SAHC 2014 – 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Mexico City, October 14-17, 2014, paper n. 06-03.

Gizzi FT, Masini N, Sileo M, Zotta C, Scavone M, Liberatore D, Sorrentino L, Bruno M. Building features and safeguard of church towers in Basilicata (Southern Italy). In: Rogerio-Candelera MA (ed.), *Science, Technology and Cultural Heritage*, CRC Press, 2014, 369-374.

Andreotti C, Liberatore D, Sorrentino L. Identifying seismic local collapse mechanisms in unreinforced masonry buildings through 3D laser scanning. *Key Engineering Materials*, 2015, 628:79-84. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.628.79.

**Grazie per
l'attenzione!**

domenico.liberatore@uniroma1.it