

# Metodi integrati di indagine non invasiva per lo studio delle tecniche costruttive e il restauro: il caso del rosone della Cattedrale di Troia

NICOLA MASINI, LUGIA NUZZO, ENZO RIZZO, DOMENICO LIBERATORE

## *Introduzione*

Nel campo della conoscenza e conservazione del patrimonio storico architettonico le tecniche di indagine non distruttive rappresentano un mezzo fondamentale per la sua caratterizzazione fisica, costruttiva e meccanica. Quando si è di fronte a manufatti fragili e con serie problematiche di degrado, il ricorso a tali metodiche di indagine è indispensabile.

Il presente saggio ha come obiettivo quello di discutere delle potenzialità, dei limiti e delle opportunità di integrazione tra quelle tecniche di indagine non invasiva basate sull'osservazione ed elaborazione di onde di natura e frequenza diverse che attraversano la "materia" costitutiva di un bene culturale.

L'argomentazione sarà effettuata con riferimento al rosone della Cattedrale di Troia che rappresenta una pregevole testimonianza di arte e di architettura di età medievale<sup>1</sup>.

Le tecniche in questione sono il Georadar o Ground Probing Radar (GPR), le prove ultrasoniche e la termografia agli infrarossi.

Ciascuna di esse presenta delle peculiarità che consentono di fornire dati utili per la conoscenza delle caratteristiche costitutive dei materiali. Nessuna di esse, però, è capace da sola di offrire un quadro conoscitivo esaustivo degli aspetti fisici, costruttivi e meccanici da correlare allo studio storico e alla valutazione dello stato di degrado.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Nel 2004 l'IBAM-CNR e il DiSGG dell'Università della Basilicata, su incarico della Diocesi di Lucera-Troia, hanno condotto una campagna di indagini diagnostiche e conoscitive finalizzate al restauro statico del rosone della Cattedrale di Troia. Le indagini, coordinate da Nicola Masini (IBAM-CNR) e da Domenico Liberatore (DiSGG-UNIBAS) sono state effettuate da ricercatori dell'IBAM-CNR, del DiSGG, dell'IMAA-CNR di Tito Scalo (PZ), dell'Università di Lecce, del Politecnico di Milano e dell'ISTI-CNR di Pisa.

<sup>2</sup> MCCANN, FORDE 2001; BINDA *ET ALII* 2003

Ciò rende necessario l'impiego integrato di tali tecniche, ciascuna delle quali è caratterizzata da una distinta banda di frequenza, da cui dipendono le capacità di osservazione e di analisi.

Le prove ultrasoniche si basano sull'interpretazione del comportamento di onde elastiche con frequenze nell'intervallo 40 kHz - 200 kHz, che si propagano in un mezzo elastico per cui sia valida la legge di Hooke<sup>3</sup>.

Il Georadar è un metodo elettromagnetico di indagine sub-superficiale non invasivo basato sull'invio di segnali elettromagnetici (EM) ad alta frequenza e sull'acquisizione della parte riflessa.

L'analisi del segnale sia delle onde elastiche che di quelle elettromagnetiche consente di individuare difetti e disomogeneità con una risoluzione che dipende dalla lunghezza d'onda dominante e dalla dimensione dell'elemento investigato<sup>4</sup>.

Come è noto la lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) è funzione della velocità ( $v$ ) e della frequenza ( $\nu$ ). Per una data velocità la frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda ( $\nu = v/\lambda$ ).

Al crescere della frequenza aumenta la risoluzione ma diminuisce la profondità di investigazione dell'elemento costruttivo soggetto dell'analisi. Pertanto è necessario scegliere la giusta frequenza al fine di ottimizzare: l'attenuazione del segnale, la capacità investigativa e la risoluzione, da cui dipende la precisione delle informazioni ricavabili per i diversi tipi costruttivi<sup>5</sup>.

A tale problema se ne aggiungono altri. Nel caso di indagini eseguite su paramenti murari, le componenti di alta frequenza delle onde elastiche possono essere filtrate da intonaci di grosso spessore o in fase di distacco. Ciò riduce la risoluzione e la capacità di rilevare la morfologia interna degli apparecchi murari. L'attenuazione del segnale riguarda anche gli elementi lapidei monolitici rivestiti da intonaci, sia di natura se-

<sup>3</sup> La legge di Hooke descrive quantitativamente le deformazioni elastiche subite da un solido al quale sia applicata una forza meccanica. Se l'intensità della forza ( $F$ ) è minore di un certo valore critico, l'allungamento o l'accorciamento ( $X$ ) prodotto è a essa proporzionale.

<sup>4</sup> L'analisi del segnale delle onde elastiche nel dominio nel tempo e delle frequenze, consente di determinare la velocità che è correlabile alla densità, il modulo dinamico di elasticità longitudinale e il coefficiente di Poisson.

Nel caso delle onde EM la velocità in un materiale dielettrico omogeneo è funzione di una serie di parametri quali la permittività elettrica, la conducibilità elettrica e la permeabilità magnetica. La permittività elettrica rappresenta la capacità di polarizzazione di un materiale in presenza di un campo elettrico ed è il parametro fondamentale nella maggior parte dei materiali di interesse per i Beni Culturali (non magnetici e poco conduttivi). La conducibilità elettrica misura l'attitudine di un materiale a lasciarsi attraversare dalla corrente, mentre la permeabilità magnetica misura l'attitudine di un materiale a lasciarsi magnetizzare.

<sup>5</sup> Dall'intonaco di qualche centimetro di spessore alle murature.

dimentaria che intrusiva<sup>6</sup>. In tali situazioni le onde elettromagnetiche del GPR mostrano minori problematiche.

Al contrario, in presenza di umidità il radar evidenzia maggiori limiti delle onde elastiche a causa dell'assorbimento del segnale, proporzionale al contenuto d'acqua<sup>7</sup>.

Molto più efficace è, invece, il GPR nella individuazione e localizzazione di elementi metallici impiegati dall'antichità al Medio Evo per collegare lastre, colonne e capitelli, come nel caso del rosone di Troia.

Un ulteriore contributo alla conoscenza può essere fornito dalla termografia che consente la visualizzazione delle radiazioni emesse dalle superfici nel campo dell'infrarosso<sup>8</sup>. Lo strumento di rilevazione trasforma i valori di intensità di radiazione infrarossa emessa in temperatura consentendo di rilevare disomogeneità di materiali, umidità, distacchi e fratture.

I limiti sono legati alla profondità di investigazione, notevolmente inferiore rispetto al GPR e alle tecniche di indagine basate sull'analisi delle onde elastiche.

I vantaggi sono invece legati alla modalità di acquisizione dei dati da remoto, con conseguente risparmio di tempo e facilità di esecuzione.

Per tale ragione anche la termografia è stata impiegata nel caso di studio al fine di ricavare informazioni complementari su elementi costruttivi di difficile investigazione con il georadar e i test ultrasonici.

### *Il rosone della cattedrale di Troia*

Secondo la tradizione storica la cattedrale di Troia sarebbe stata fondata nel 1093, sulle strutture di una chiesa dedicata alla Vergine<sup>9</sup>. I lavori ebbero all'inizio un decorso lento. Un deciso impulso fu dato dal vescovo Guglielmo II a partire dal 1106. Questi fece realizzare le tre navate della chiesa che fu inaugurata al culto nel 1120<sup>10</sup>.

<sup>6</sup> Il problema è stato registrato anche nelle colonnine interne del rosone di Troia rivestite da sottili strati di intonaco e da scialbature (v. *infra*).

<sup>7</sup> Per tale ragione, ad esempio, il controllo delle murature consolidate con iniezioni di legante idraulico viene effettuato con le prove soniche.

<sup>8</sup> MALDAGUE 2001. Per quanto riguarda le applicazioni della termografia all'infrarosso nel campo dei Beni Culturali v. AVDELIDIS, MOROPOLOU 2004; GRINZATO ET ALII 2002.

<sup>9</sup> DE SANTIS 1986.

<sup>10</sup> A Guglielmo si deve gran parte degli elevati architettonici che insistevano sull'impianto tracciato a tre navate, e scandite da sei colonne per lato, di cui quello occidentale presenta in corrispondenza della prima campata il raddoppio della colonna al fine di avere 13 sostegni verticali. Al cantiere del vescovo Guglielmo vanno anche ascritti i celebri battenti bronzei del portale principale, realizzati da Oderisio da Benevento (BELLI D'ELIA 1987, p. 408).

I lavori riprendono intorno alla metà del XII secolo. Il presbiterio fino a quel momento occupato dalle strutture della precedente chiesa viene ricostruito assumendo l'attuale configurazione. Intanto continuano i lavori di rivestimento delle facciate laterali. Per quanto riguarda il rosone non vi sono documenti che consentino di datarlo. Taluni elementi formali e costruttivi suggeriscono una datazione da ascrivere ad un'epoca successiva alla metà del XIII secolo<sup>11</sup>.

Con il rosone viene completata anche la facciata principale, costituita da un basamento da cui spicca una teoria di archi ciechi a pieno centro, impostati su lesene sui bordi della facciata, che incorniciano delle losanghe e degli oculi<sup>12</sup>. Sia gli archi ciechi che le losanghe sono caratterizzati da una bicromia chiaro-scuro ottenuta con pietra calcarea di Castelluccio e una pietra arenaria grigia di Roseto<sup>13</sup>.

Una cornice modanata poggiante su mensole decorate con motivi zoomorfi, fitomorfi e geometrici, separa la zona inferiore da quella superiore della facciata (A in fig. 1a). Quest'ultima è divisa in tre parti<sup>14</sup>, di cui quella centrale (il timpano), composta da un arco a pieno centro a sesto rialzato (C in fig. 1a), impostato su due coppie di colonne binate di marmo di reimpiego, ciascuna posta sopra di un leone stiloforo (B, fig. 1a). All'interno dell'arco del timpano vi è un ulteriore arco di supporto a sculture e bassorilievi, con figure antropomorfe, zoomorfe ed elementi floreali (D, fig. 1a). All'interno di esso vi è il rosone ad 11 raggi composti da colonnine binate (vedi F in fig. 1a) in marmi di reimpiego (in gran parte *Proconnesio*, e in minore *Pavonazzetto* e marmo *Pario*) e in rocce sedimentarie di provenienza locale. Esse sono collegate: i) ad un oculare centrale di arenaria (fig. 1a, E), tramite dei 'bicchieri' (ovvero elementi cilindrici cavi) entro cui sono inserite le teste delle stesse colonnine; ii) e ad un anello più esterno (mediante dei capitelli) costituito da elementi di calcare sagomati con forme curve a pieno centro

<sup>11</sup> Su tutti si considerino gli archi ogivali, all'interno dell'intreccio di archi a tutto sesto che si susseguono lungo il perimetro del vano circolare, e il livello tecnologico raggiunto nel taglio e nel controllo delle tolleranze costruttive.

<sup>12</sup> La facciata principale presenta dimensioni massime alla base di m 18,28 e in altezza di m 19,90 ca. Il basamento ha un'altezza dal piano stradale di 1,48-2,08 m. Da esso partono sette archi ciechi a tutto sesto di cui sei di diametro pari a circa 1,70 m ed uno centrale di diametro 3,20 m ca. Gli archi ciechi sono impostati su lesene di larghezza 0,35 m ca. all'interno e 1,02 m sui bordi della facciata, che incorniciano delle losanghe e degli oculi.

<sup>13</sup> Le cave di Castelluccio e Roseto, in provincia di Foggia, sono state individuate da Angela Calia dell'IBAM-CNR che si è occupata della caratterizzazione dei materiali lapidei (LIBERATORE ET ALII 2006)

<sup>14</sup> Una centrale costituita dal timpano triangolare corrispondente alla sezione interna della navata, e due laterali ad una falda, a richiamare la sezione interna delle rispettive navate laterali.

che si intrecciano a formare delle ogive (fig. 1a, H). All'esterno di esso vi è un cordolo in pietra, con conchi squadrate (fig. 1a, I).

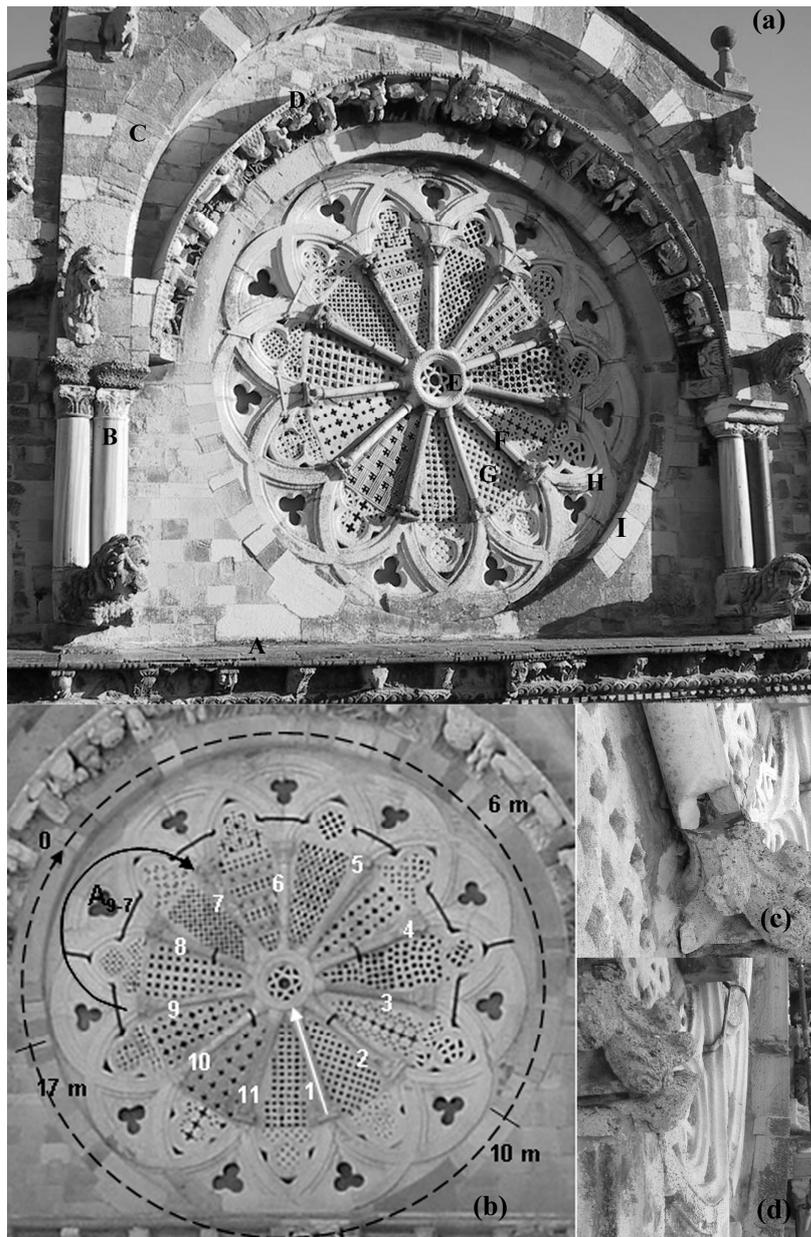


Fig. 1 - Cattedrale di Troia: (a) veduta generale della parte superiore della facciata principale; (b) schema delle indagini GPR (le frecce indicano la direzione di indagine); (c) disgregazione nel giunto tra una colonnina ed un capitello; (d) deformazione fuori del piano: particolare di conchi di pietra in fase espulsiva.

Tra le colonnine binate sono inserite undici transenne triangolari traforate (fig. 1a, G), ciascuna con un disegno geometrico diverso<sup>15</sup>.

Nei secoli successivi la storia della cattedrale viene fortemente condizionata dai terremoti<sup>16</sup> del 1456, 1627 e 1731. Nel 1627 la chiesa è dichiarata inagibile. Nel 1731 il sisma causa il crollo di una cappella posta nel braccio sinistro del transetto. E' presumibile che gli effetti del sisma abbiano interessato altre parti della cattedrale tra cui lo stesso rosone. Tra '700 e '800 si susseguono numerosi interventi di consolidamento e di restauro. In particolare, si segnalano le opere di "abbellimento" interno di Travaglino, realizzate dopo il 1857, a cui seguono gli interventi di Adolfo Aveta del 1909 volti a "valorizzare" la *facies* romanica, mediante la rimozione di elementi stilisticamente "dissonanti" con essa, ed infine i de-restauri<sup>17</sup> degli anni '50.

I vari cantieri succedutisi affrontano anche il problema del dissesto del rosone che probabilmente già nell'800 presentava un fuori-piombo verso l'esterno, tanto da rendere necessario intervenire con "cravatte" metalliche ed altri dispositivi volti a impedire la rotazione del prezioso manufatto. Diffuse fratture e dislocazioni nei giunti tra gli elementi costruttivi, alveolizzazione e disgregazione delle transenne traforate, conc in fase espulsiva e fenomeni di schiacciamento di alcune colonnine costituiscono l'attuale stato di degrado del rosone. Esso è in buona parte la manifestazione di un dissesto costituito da un cinematismo di rotazione intorno ad un asse sub-orizzontale posto poco al di sotto del centro dell'oculo.

#### *Metodologia e tecniche di indagine impiegate*

Tale situazione di degrado ha reso necessario il ricorso a delle indagini con il fine di effettuare una diagnosi per un intervento di restauro strutturale. Il grado di dettaglio delle informazioni da acquisire è stato "tarato" in prospettiva di due alternative strategie di restauro: 1) una costituita dallo smontaggio, consolidamento a piè d'opera e rimontaggio del rosone; 2) l'altra, *in situ*, con interventi mirati a consolidamenti localizzati e ad opere di ritegno alla rotazione del manufatto.

Considerato lo stato di fragilità materiale e strutturale e la risoluzione delle informazioni richieste, sia sullo stato di degrado che sulle tecniche costruttive, la campagna di indagini si è basata in particolare sull'impiego di tecniche non invasive, quali il Georadar, le prove ultra-

<sup>15</sup> Tra le transenne e la giunzione delle arcate, vi sono altrettante griglie trilobate, anch'esse l'una diversa dall'altra. Le figure ricorrenti dei trafori sono: il quadrato, la losanga, la croce, il rombo, il cerchio, tutte figure geometriche fortemente simboliche.

<sup>16</sup> MASTRULLI 1985; PICONE 2000.

<sup>17</sup> PICONE 2000.

soniche e la termografia<sup>18</sup>. Le difficoltà logistiche, i limiti e le potenzialità di ciascuna tecnica in rapporto alle problematiche da indagare, hanno posto in evidenza la necessità di mettere a punto una metodologia per la integrazione di tali tecniche, di cui si argomenterà nei paragrafi successivi.

## *Il GPR*

Il Georadar è un metodo geofisico attivo d'indagine sub-superficiale non invasivo, in grado di fornire sezioni verticali (radargrammi) estremamente dettagliate di un materiale, grazie all'uso di segnali EM impulsivi inviati tramite un'antenna trasmittente. I segnali riflessi da discontinuità interne del materiale vengono captati da un'antenna ricevente, compiendo un tragitto dipendente essenzialmente dall'impedenza dei mezzi attraversati<sup>19</sup>. In presenza di eterogeneità, il segnale può essere riflesso verso la superficie o subire attenuazioni e diffusioni che ne provocano la pressoché totale dissipazione. In caso di emersione di echi, il segnale ricevuto viene messo in correlazione con quello trasmesso e il ritardo degli arrivi, cioè il tempo necessario a compiere il tragitto nel materiale, è funzione della velocità con cui il segnale si è propagato<sup>20</sup>. La scala verticale dei radargrammi è proporzionale ai tempi necessari all'onda per compiere il tragitto di andata e ritorno e può essere convertita in profondità se è nota la velocità di propagazione delle onde EM nel mezzo<sup>21</sup>.

<sup>18</sup> CAPRIUOLI *ET ALII* 2006; MASINI *ET ALII* 2007; NUZZO *ET ALII* 2008.

<sup>19</sup> L'impedenza è data dal rapporto tra i valori del campo magnetico ed elettrico del mezzo interessato dalla propagazione di un campo elettromagnetico esterno. In pratica dipende dalle caratteristiche di conducibilità, di permeabilità magnetica e di permittività elettrica del mezzo.

<sup>20</sup> Un tipico sistema georadar è costituito da una coppia di antenne, da un generatore di forme d'onda, da un plotter grafico e da un registratore magnetico digitale o da un sistema di acquisizione dati su disco. Le antenne, che costituiscono il cuore del sistema, si differenziano fra loro in base alla frequenza (nominale) di emissione, cioè alla principale caratteristica del segnale emesso. Tipicamente la frequenza centrale (o nominale) è pari alla larghezza di banda impiegata e può avere valori molto diversi variabili fra qualche decina di MHz e alcuni GHz. La scelta delle antenne da usare in una prospezione è funzione delle caratteristiche del mezzo da investigare e della natura e dimensioni delle strutture ricercate.

<sup>21</sup> Si consideri che le antenne operanti alle frequenze più basse consentono di raggiungere profondità maggiori, ma con una risoluzione inferiore rispetto a quelle a frequenze più alte. Mentre l'antenna è spostata lungo la superficie, essa invia nel sottosuolo una piccola quota d'energia elettromagnetica sotto forma d'impulsi emessi ad una certa frequenza di ripetizione (tipicamente centinaia di migliaia d'impulsi al secondo). Un apparato ricevente, spesso incorporato nello stesso contenitore di quello trasmittente, capta gli echi prodotti da variazioni di densità del materiale (riflessioni) e, al variare della posizione, produce un'immagine in tempo reale su un video o su un monitor grafico. Le ampiezze delle riflessioni sono generalmente rappresentate in un'opportuna scala di colori o toni di grigio. Contemporaneamente, il segnale riflesso può essere registrato in forma digitale per consentire successive analisi al calcolatore.

Le indagini sul rosone sono state eseguite utilizzando un sistema d'acquisizione<sup>22</sup> e due antenne con frequenza centrale di 900 MHz e 1500 MHz di tipo monostatico (ossia con trasmittente e ricevente nello stesso contenitore a distanza fissa molto piccola). Per facilitare il posizionamento delle tracce acquisite si è, in alcuni casi, fatto uso di un sistema a ruote dotato di encoder, che permette l'acquisizione di segnali ad un prefissato intervallo di campionamento spaziale (nel nostro caso una traccia ogni 5 mm). In altri casi, per difficoltà logistiche, le tracce sono state acquisite in continuo, inserendo dei marker a distanze regolari (0.5 m) per la successiva normalizzazione della scala orizzontale<sup>23</sup>.

L'indagine georadar che ha interessato la parte esterna del rosone è stata resa possibile utilizzando un ponte mobile di sollevamento che ha permesso di raggiungere un'altezza massima dal piano stradale di circa 20 m. In particolare l'investigazione radar è stata effettuata su tutte le colonnine esterne<sup>24</sup>; sull'anello ad archi incrociati<sup>25</sup> e sul cordolo<sup>26</sup>.

Per l'investigazione della parte interna del rosone si è utilizzata un'impalcatura fissa che arrivava fino al cordolo superiore del rosone. Durante l'acquisizione dei dati georadar sul cordolo<sup>27</sup>, si sono localizzate manualmente le posizioni dei giunti tra i vari conci. Inoltre si sono determinate le dimensioni lineari e, laddove visibile, lo spessore dei conci e si è effettuata una loro preliminare classificazione litologica.

La differente modalità di acquisizione e natura degli oggetti investigati ha richiesto un trattamento dei dati leggermente diverso per cordolo, archi e colonnine. Per il cordolo e gli archi incrociati, acquisiti in continuo, si è resa necessaria una fase preliminare di Editing (rimozione di tracce superflue ed inserimento delle coordinate) e Normalizzazione della scala orizzontale, interpolando le tracce ad un passo regolare di 1 cm. Per il cordolo si è dovuto procedere anche all'unione dei vari tratti, che si è rivelata una operazione alquanto delicata. Inoltre, è stato rimosso il gain (amplificazione per esaltare gli arrivi più profondi già in fase di acquisizione) e posizionato correttamente il primo arrivo

<sup>22</sup> SIR System-2000 della Geophysical Survey System Inc. (GSSI).

<sup>23</sup> Sulle colonnine si è inoltre effettuata anche un'acquisizione ad antenna fissa in corrispondenza di alcuni punti.

<sup>24</sup> Colonnine di lunghezza pari a circa 1 m e spessore di 10-12 cm.

<sup>25</sup> Archi di circonferenza pari 3,75 m e spessore di circa 25 cm.

<sup>26</sup> Cordolo di diametro pari a ca. 6 m (circonferenza di ca. 20 m) e spessore di 66 cm.

<sup>27</sup> Difficoltà operative legate alla variazione di quota hanno impedito l'acquisizione lungo il cordolo in un unico passo. Sono stati perciò acquisiti più tratti di varia lunghezza e la parte finale di ciascuno (0.5 m) è stata ripetuta anche nell'acquisizione del tratto successivo al fine di garantire la corretta unione dei vari tratti in fase di processing. La qualità dei dati acquisiti è molto alta, pertanto è stato eseguito solo un minimo processing. I dati presentati si riferiscono solo a quelli ottenuti con l'antenna a 1500 MHz sia per la migliore risoluzione che per la sufficiente profondità d'indagine per gli obiettivi proposti.

(aggiustamento del tempo zero). Nei primi 4.4 ns è stato applicato un “background removal”, ossia la sottrazione della traccia media, per eliminare gli arrivi diretti ed esaltare le discontinuità laterali. Per eliminare il rumore di alta frequenza è stata applicata una media mobile bidimensionale (2D average filter). Infine è stata stimata la velocità delle onde EM mediante adattamento di iperboli di diffrazione presenti nei dati con iperboli (teoriche) a velocità nota e, utilizzando la velocità media stimata, è stata effettuata una migrazione per ottenere la corretta posizione dei riflettori.

Per quanto riguarda le colonnine, dove ci si è avvalsi della *survey wheel*, non è stato necessario un *pre-processing* in quanto le tracce erano già equispaziate con intervallo di campionamento di 5 mm. Come nella fase di processing dei cordoli ed archi, si è rimosso il gain e, sistemata la posizione del primo arrivo (tempo zero), è stata stimata la velocità mediante adattamento di iperboli ed infine applicata la migrazione.

### *Prove ultrasoniche*

Le prove ultrasoniche consistono nel misurare e analizzare le caratteristiche di propagazione delle onde elastiche all'interno di strutture, sotto le ipotesi di omogeneità, isotropia ed elasticità, attraverso la misura del tempo impiegato da un impulso meccanico per coprire la distanza tra trasmettitore e ricevitore ed il successivo calcolo della velocità. L'indagine è condotta con due sonde piezoelettriche (una emittente e una ricevente) ed impiega frequenze comprese tra 40 e 200 kHz.

A seconda delle posizioni relative tra punto d'impulso e di ricezione si possono effettuare prove per: i) trasmissione diretta, in cui ricevitore e generatore d'impulso sono posizionati sulle facce opposte dell'elemento strutturale in modo simmetrico rispetto al suo piano mediano o all'asse; ii) trasmissione semi-diretta, in cui si posizionano i due punti sulle facce opposte ma non in corrispondenza simmetrica; iii) trasmissione indiretta, quando il punto d'impulso viene scelto sulla stessa faccia dove si trova la sonda ricevente<sup>28</sup>.

<sup>28</sup> Nell'ipotesi di propagazione lungo percorsi rettilinei (ossia variazioni di velocità molto deboli) è possibile calcolare la velocità ultrasonica (media)  $v_d$  tramite l'equazione:  $v_d = d/t$ , in cui  $d$  è la distanza trasmettitore-ricevitore e  $t$  è il tempo di primo arrivo. Le prove ultrasoniche così come quelle soniche consentono di calcolare il modulo di elasticità dinamico ( $E_d$  espresso in Pa; v. formula 1) che in genere, per il bassissimo sforzo generato nel test, sovrastima del 10% circa il modulo elastico misurato su provini o carotaggi. Nota la densità  $\rho$  del materiale e fissato il modulo di Poisson  $\nu$  si può ricavare  $E_d$  dalla relazione:

$$E_d = v^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (1)$$

dove:  $v$  è la velocità dell'onda in  $\text{ms}^{-1}$ ,  $\nu$  è il modulo dinamico di Poisson e  $\rho$  è la densità del mezzo in  $\text{kgm}^{-3}$ .

La visualizzazione e l'osservazione dei valori di velocità consente di individuare anomalie riconducibili alla presenza di vuoti, fratture e parti interessate da degrado materico.

Sul rosone sono state effettuate prove dirette su 11 colonnine interne e 8 esterne con 6 punti di battuta per ogni colonnina ad intervalli di 20 cm<sup>29</sup>.

Di gran parte delle colonnine si conosceva il litotipo, le principali problematiche di deterioramento (esfoliazione) e dissesto (fessure da schiacciamento, dislocazioni dei giunti) e l'esistenza di punti critici dal punto di vista costruttivo (cavità nei giunti per l'alloggiamento di perni metallici). L'obiettivo delle prove ultrasoniche è stato proprio quello di: a) valutare l'entità delle patologie di degrado già note; b) e di scoprirne altre in quei punti nei quali le velocità misurate risultassero molto basse.

### *Termografia*

La termografia è una tecnica che consente di rilevare le radiazioni emesse nel campo dell'infrarosso da un corpo con temperatura maggiore di 0°K, attraverso una strumentazione capace di trasformare i valori di radiazione (Q) in temperature (T), mediante la legge di Stefan-Boltzmann<sup>30</sup>.

La visualizzazione digitale consente di individuare zone interessate da anomalie di radiazione emessa dalla cui interpretazione si possono ricavare informazioni sulle caratteristiche fisico-termiche dei materiali. Per tale ragione l'indagine termografica è efficace nel rilevare soluzioni di continuità e vuoti nei materiali e tutti quei fenomeni legati a variazioni di densità ( $\delta$ ), conducibilità termica (k) e quindi di calore nel tempo<sup>31</sup>.

<sup>29</sup> Punti di battuta numerati da 1 a 6 a partire dalla base di unione con l'oculo centrale ad arrivare al capitello.

<sup>30</sup> La legge di Stefan-Boltzmann è:  $Q = \epsilon\sigma T^4$  (2)  
dove  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann e vale  $5,6703 \times 10^{-8} \text{ W} \times \text{m}^{-2} \times \text{K}^{-4}$ ,  $\epsilon$  è l'emissività della superficie emittente (variabile tra i limiti teorici 0 e 1) e T è la sua temperatura assoluta.

<sup>31</sup> Ossia la diffusività termica  $\alpha$  ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) come si evince dalla formula:

$$\alpha = k / (\delta C_p) \quad (3)$$

dove k è la conducibilità termica ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $\rho$  è la densità del materiale ( $\text{kg m}^{-3}$ ) e  $C_p$  è il calore specifico ( $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ).

Un altro esempio di applicazione è quella relativa all'individuazione di superfici umide. A parità di materiale costituente l'energia termica necessaria a far variare la temperatura di un'area umida è significativamente maggiore di quella richiesta per un'area non interessata da umidità. In particolare la differenza sta nel diverso valore di calore specifico ( $C_p$ ) e di densità. Tale situazione può essere sintetizzata dalla seguente equazione:  $Q = m C_p \Delta T$  (4)

dove Q è la quantità di calore assorbita (J), m è la massa,  $\Delta T$  è la variazione di temperatura (K).

Le riprese del rosone sono state effettuate utilizzando una termocamera con risoluzione spaziale di 14.0 x 13.7 mm (ad una distanza di ripresa di 10 metri) che opera nella banda spettrale “long wave” tra gli 8 e i 10 micron dove gli oggetti a temperatura ambiente emettono la maggior parte della propria radiazione termica. Ciò consente di effettuare riprese in presenza di luce solare.

Oggetto dell’indagine termografica è stato l’intero rosone sul lato esterno che presenta un’esposizione ovest-nordovest. Non si è fatto uso di fonti di calore artificiale. Pertanto è stata preventivamente studiata l’esposizione del rosone all’irraggiamento solare. Le prospezioni sono state eseguite in continuo a partire dall’assenza di irraggiamento solare, nel tardo pomeriggio, fino alle prime ore serali.

Le immagini rilevate sono state poi elaborate in diversi *range* di temperature e confrontate, selezionando per ciascun soggetto ripreso, quelle che presentavano la maggiore quantità di rilascio di calore e quindi i più elevati gradienti di temperature, al fine di ottimizzare la risoluzione delle immagini.

## Risultati

### *Cordolo*

La tav. XLIX,1a rappresenta il risultato finale dell’acquisizione eseguita con il GPR lungo tutto il cordolo dalla parte esterna. Per la parte del cordolo da 0 a 6m è stata eseguita una sovrapposizione tra il radargramma (migrato) relativo alla parte esterna (scala di grigi) e quello della parte interna (scala di colori). La sovrapposizione dei radargrammi interni ed esterni ha permesso di osservare le principali discontinuità orizzontali e verticali, e di analizzare la risposta EM in corrispondenza dei diversi litotipi. Ciò ha consentito di ricostruire la geometria e le caratteristiche della struttura del cordolo che è costituito da una sorta di sacco di 66 cm delimitato da due filari circolari di conci squadrate (spessore 18-22 cm), distanziati in maniera da avere un nucleo riempito parzialmente di pietrame e malta, entro il quale sono alloggiati gli elementi ad archi intrecciati.

Ciò suggerisce un’evoluzione costruttiva del rosone secondo cui i cordoli e gli elementi ad archi incrociati sarebbero stati posati in opera per “cantieri” in maniera che i primi svolgessero una immediata funzione di vincolo per i secondi. Pertanto le fasi esecutive (fig. 3) sono state le seguenti: I.1) realizzazione dell’arco inferiore del cordolo costituito da due file di conci squadrate distanziati a formare un intercapedine parzialmente riempita di pietrame; I.2) inserimento nell’intercapedine degli elementi ad archi incrociati dell’arco inferiore;

I.3) realizzazione dell'arco superiore del cordolo e degli elementi ad archi incrociati.

#### *Archi incrociati*

L'indagine effettuata sugli archi incrociati è stata finalizzata a individuare disomogeneità riferibili a integrazioni eseguite in restauri pregressi ed elementi metallici di collegamento con i capitelli e i conci del cordolo. A tal fine sono stati integrati il GPR e la termografia, sia a causa delle difficoltà logistiche nell'utilizzo del georadar in alcuni punti del rosone, sia per l'esigenza di avere una visualizzazione termica d'insieme che consentisse di verificare l'esistenza di anomalie termiche laddove le onde EM avessero registrato la presenza di diffrazioni. In questo modo si è avuta conferma della presenza di distacchi e discontinuità. Ad esempio lungo l'arco incrociato posto tra le colonnine n. 9 e n. 7 (v. radargramma nella tav. XLIX,1b, ascisse 1.84-2.56 m) si osserva un forte riflettore a circa 3 ns (circa 0.15 m in profondità per una velocità stimata di 0.104 m/ns). Tale riflettore indicherebbe la presenza di un distacco longitudinale o, più probabilmente, di un blocco di materiale posto in opera durante un precedente restauro. Quanto detto appare confermato dalla ripresa termografica che nello stesso punto interessato dal riflettore ha messo in evidenza un'anomalia termica. Tale situazione si è registrata in altre parti del rosone interessate da interventi di restauro.

Nello stesso radargramma si osserva, inoltre, la presenza di un diffrattore associato probabilmente alla presenza di un oggetto metallico di ancoraggio con il cordolo. Tali elementi metallici negli archi incrociati si trovano o in superficie o a qualche centimetro di profondità. Molti di essi, trovandosi in punti poco accessibili al GPR (capitelli), sono stati rilevati solo grazie alla termografia<sup>32</sup>.

#### *Colonnine*

I risultati più interessanti delle prospezioni GPR sono stati ottenuti sulle colonnine. La tav. XLIX,1c mostra il radargramma prima e dopo la migrazione effettuata con la velocità dell'onda EM stimata di una colonnina esterna (n. 10) pari a 0.11 m/ns. Dal radargramma emerge la presenza di tre riflettori a 2.2, 3.4 e 5.4 ns corrispondenti rispettivamente a 12, 18 e 29.5 cm. Il primo dei tre valori coincide con lo spessore della colonnina esterna (12 cm). Il secondo rappresenta

<sup>32</sup> Per avere un accoppiamento ottimale delle antenne col mezzo da investigare e limitare l'insorgenza di segnali EM spuri, il GPR ha bisogno di superfici di contatto piane. Pertanto sui capitelli e su altri elementi scultorei non è stato possibile utilizzare il Georadar.

l'interfaccia tra la transenna e la colonnina interna. Infine, dal terzo si ottiene lo spessore della colonnina interna che è pari a 11.5 cm.

Nella parte iniziale (a 0.04 m) del radargramma si osserva inoltre una iperbole di diffrazione associata alla presenza di un oggetto metallico di ancoraggio con il capitello. Ben evidente sono delle riflessioni tra 0.3 e 0.6 m ad una profondità di 13-16 cm, probabilmente da attribuire alla presenza di materiale eterogeneo di inzeppatura tra le due colonnine ed i settori traforati del rosone.

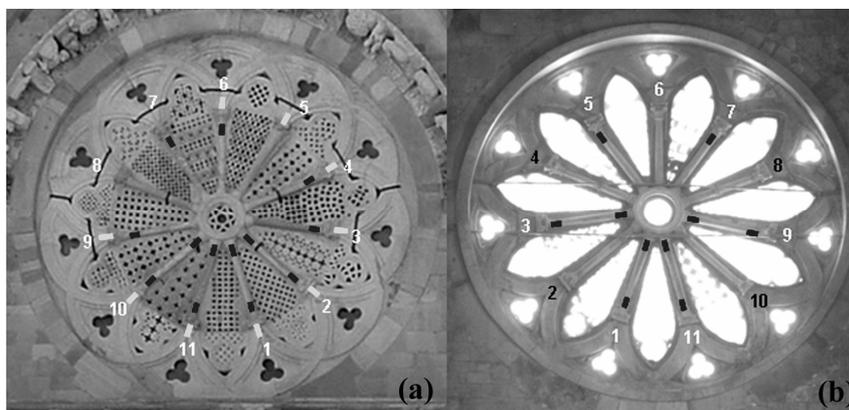


Fig. 2 - (a) Elementi metallici di collegamento individuati mediante indagini GPR: sul lato esterno (in rosso gli elementi metallici nei giunti colonnine-capitelli, in verde nei giunti capitelli-archi incrociati); (b) e sul lato interno.

L'impiego del GPR ha consentito di individuare gli elementi metallici di connessione tra gli elementi che compongono il rosone. In particolare come si evince dalla fig. 2, le colonnine inferiori sono collegate sia all'oculo che ai capitelli mediante dei perni metallici. Al contrario le colonnine superiori presentano elementi metallici di collegamento solo con i capitelli e non in corrispondenza dei "bicchieri" dell'oculo. Ciò non è casuale.

Si tratta probabilmente di un accorgimento costruttivo, atto a garantire la tolleranza sufficiente a compensare eventuali errori di geometria nella realizzazione e nella posa in opera degli elementi costruttivi e nella collocazione dell'oculo al centro del rosone.

La disposizione dei perni di ferro suggerisce la seguente sequenza di assemblaggio (fig. 3) delle colonnine e dei pannelli traforati: II.1) posa in opera dell'oculo, vincolato al resto del rosone tramite quattro colonnine binate (10, 11, 1 e 2) sulla parte inferiore e <sup>33</sup> una colonnina superiore (6); II.2) inserimento dei tre pannelli traforati negli spazi delimitati dalle colonnine binate inferiori; II.3) posa in opera delle altre colonni-

<sup>33</sup> Il collegamento tra le colonnine e gli altri elementi costruttivi è costituito da perni di ferro e piombo fuso.

ne, con sequenza dal basso verso l'alto, collegati con elementi metallici solo in corrispondenza dei capitelli.

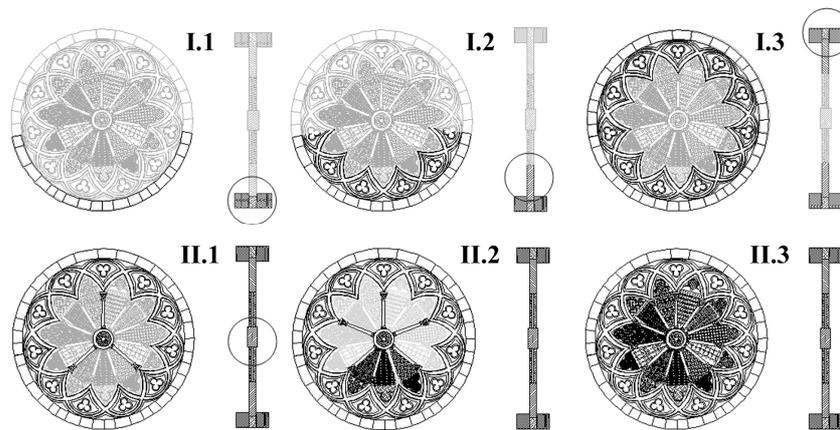


Fig. 3 - Ricostruzione delle fasi di assemblaggio degli elementi costruttivi del rosone.

Le colonnine sono state oggetto anche di prove ultrasoniche che hanno evidenziato una significativa influenza di talune patologie di degrado e dissesto sulle velocità rilevate (tav. XLIX, 2a), come, ad esempio, nel caso della colonnina interna n. 2 (tab. 2). Si tratta di arenaria grigia soggetta a degrado di esfoliazione, il cui valore medio di velocità è pari a circa 1340 m/s mentre quello massimo è di 2640 m/s. Laddove il deterioramento è più grave la velocità scende al di sotto di 500 m/s. Significativo è anche l'assorbimento del segnale delle onde ultrasoniche e quindi la diminuzione della velocità causato da fratture. La colonnina interna n. 1 di marmo presenta delle tipiche fessure da schiacciamento alle estremità, nei pressi dell'oculo e del capitello (tab. 2).

Il valore medio è pari a circa a 3116 m/s, quello massimo è di 4082 m/s. Nei due giunti fessurati i valori di velocità scendono a 2280 e 2173 m/s. Altre colonnine (la n. 1 esterna e la n. 3 interna) sono interessate da fessure nei giunti (lato oculo) la cui natura è sicuramente passante a giudicare dall'elevato decremento di circa il 50% della velocità rispetto alla media (tav. XLIX, 2a; tabb. 1-2).

Altri valori bassi delle velocità ultrasoniche si registrano nelle colonnine interne (tab. 2), il cui stato di degrado non è rilevabile con una semplice ispezione visuale, a causa della presenza di rivestimenti a base di scialbature o intonaco sottile.

| Colonnina | Velocità nei punti di misura 1-6 (m/s) |      |   |      |      |   | V <sub>min</sub> | V <sub>max</sub> | V <sub>media</sub> | Dev. standard |
|-----------|--|------|---|------|------|---|------------------|------------------|--------------------|---------------|
|           | V1                                     | V2   | V3  | V4   | V5   | V6  |                  |                  |                    |               |
|           | Materiale                              |      | Degrado   |      |      | Note  |                  |                  |                    |               |
| 1         | 2280                                   | 3400 | 3610  | 3155 | 4082 | 2173  | 2173,0           | 4082,0           | 3116,7             | 754,7         |
|           | Marmo Proconnesio                      |      | schiacciamento giunto colonnina-capitello                                       |      |      | valore basso al giunto colonnina-capitello  |                  |                  |                    |               |
| 2         | 1350                                   | 2625 | 477   | 491  | 1721 | 1380  | 477,0            | 2625,0           | 1340,7             | 807,9         |
|           | Pietra calcarea grigio-verde           |      | esfoliazione al centro della colonnina  |      |      | valori mediamente bassi, molto bassi al centro della colonnina  |                  |                  |                    |               |
| 3         | 1585                                   | 4219 | 4082  | 3831 | 4367 | 3077  | 1585,0           | 4367,0           | 3526,8             | 1054,4        |
|           | Pietra calcarea                        |      | frattura nei pressi dell'oculo  |      |      | valore moto basso nei pressi dell'oculo   |                  |                  |                    |               |
| 4         | 2740                                   | 3155 | 3831  | 3953 | 2801 | 3077  | 2740,0           | 3953,0           | 3259,5             | 516,1         |
|           | Pietra calcarea                        |      | cinematismo nel giunto colonnina-capitello; fratturazione nei pressi dell'oculo |      |      | valori mediamente alti per una pietra calcarea; il valore più basso si registra nei pressi dell'oculo               |                  |                  |                    |               |
| 5         | 3226                                   | 3831 | 3155  | 3509 | 3610 | 3155  | 3155,0           | 3831,0           | 3414,3             | 279,6         |
|           | Marmo Proconnesio                      |      | nessuna fessura e manifestazione di degrado materico                            |      |      | valori mediamente soddisfacenti per un marmo; la deviazione standard evidenzia uno stato di conservazione omogeneo. |                  |                  |                    |               |
| 6         | 1335                                   | 2169 | 1905  | 1443 | 1530 | 596   | 596,0            | 2169,0           | 1496,3             | 540,4         |
|           | Mattoni                                |      |   |      |      | valori molto bassi  |                  |                  |                    |               |
| 7         | 2865                                   | 2933 | 3077  | 2801 | 2571 | 1291  | 1291,0           | 3077,0           | 2589,7             | 657,7         |
|           | Pietra calcarea                        |      |   |      |      | valore basso al giunto colonnina-capitello  |                  |                  |                    |               |
| 8         | 2028                                   | 1307 | 2740  | 1698 | 2288 | 2740  | 1307,0           | 2740,0           | 2133,5             | 573,3         |
|           | Pietra calcarea                        |      | cinematismo giunto colonnina-capitello  |      |      | valore basso nel punto 2 a 40 cm dall'oculo   |                  |                  |                    |               |
| 9         | 2571                                   | 4219 | 4082  | 4219 | 1770 | 3077  | 1770,0           | 4219,0           | 3323,0             | 1021,7        |
|           | Marmo Proconnesio                      |      | cinematismo giunto colonnina-capitello  |      |      |   |                  |                  |                    |               |
| 10        | 2570                                   | 3717 | 3953  | 3717 | 4219 | 2054  | 2054,0           | 4219,0           | 3371,7             | 857,1         |
|           | Pietra calcarea                        |      | frattura a metà colonnina   |      |      |   |                  |                  |                    |               |
| 11        | 2862                                   | 3717 | 3077  | 3413 | 3831 | 3610  | 2862,0           | 3831,0           | 3418,3             | 380,1         |
|           | Marmo di Carrara                       |      | cinematismo giunto colonnina-capitello  |      |      |   |                  |                  |                    |               |

Tab. 1 - Colonnine lato esterno: materiali, degrado e risultati delle prove ultrasoniche.

| Colonna | Velocità nei punti di misura 1-6 (m/s)  |      |  |      |      |      | V <sub>min</sub>   | V <sub>max</sub> | V <sub>media</sub> | Dev. st |
|---------|---|------|--|------|------|------|--|------------------|--------------------|---------|
|         | V1  | V2   | V3   | V4   | V5   | V6   |  |                  |                    |         |
|         | Materiale   |      | Degrado  |      |      |      |  |                  |                    |         |
| 1       | 1443  | 3155 | 3509   | 3413 | 3322 | 3003 | 1443   | 3509             | 2974,1             | 771,7   |
|         | Marmo <i>Pario</i>  |      | frattura nei pressi dell'oculo                                   |      |      |      | valore basso al giunto colonnina-oculo                               |                  |                    |         |
| 2       | 3155  | /    | 4367   | 4525 | 4695 | 1552 | 1552   | 4695             | 3658,8             | 1324,6  |
|         | Marmo <i>Proconnesio</i>  |      | cinematismo e fessure nel giunto colonnina-capitello             |      |      |      | valore basso nel giunto colonnina-capitello                          |                  |                    |         |
| 3       | 2519  | 4878 | 4878   | 4367 | 4878 | 4367 | 2519   | 4878             | 4314,5             | 914,5   |
|         | Calcarenite grigio-verde  |      | buono stato di conservazione                                     |      |      |      | valori abbastanza alti con valore basso nei pressi dell'oculo        |                  |                    |         |
| 4       | 4367  | 4525 | 4525   | 4082 | 4878 | /    | 4082   | 4878             | 4475,4             | 288,8   |
|         | Marmo <i>Proconnesio</i>  |      | frattura e scorrimento nei pressi del giunto colonnina-capitello |      |      |      | nessuna misura nel giunto colonnina-capitello                        |                  |                    |         |
| 5/6/7   | Colonnine non investigate per problemi logistici<br>5: Calcarenite; 6: Marmo <i>Pavonazzetto</i> ; 7: Breccia corallina |      |  |      |      |      |  |                  |                    |         |
| 8       | 4082  | 3953 | 2865   | 4219 | 4525 | 4367 | 2865   | 4525             | 4001,8             | 592,5   |
|         | Calcarenite   |      | buono stato di conservazione                                     |      |      |      | valori eccellenti di velocità coerenti con lo stato di conservazione |                  |                    |         |
| 9       | 2571  | 4082 | 4082   | 3821 | 2132 | /    | 2132   | 4082             | 3337,6             | 919,7   |
|         | Marmo <i>Proconnesio</i>  |      | frattura nei pressi dell'oculo                                   |      |      |      | valore basso nei pressi dell'oculo                                   |                  |                    |         |
| 10      | 3236  | 4878 | 4525   | 4367 | 4878 | 4878 | 3236   | 4878             | 4460,3             | 638,0   |
|         | Marmo <i>Pavonazzetto</i>   |      | buono stato di conservazione                                     |      |      |      | buon valore della velocità con basso valore di dev. standard         |                  |                    |         |
| 11      | 3831  | 3616 | 3953   | 4082 | 4367 | 4367 | 3616   | 4367             | 4036,0             | 298,8   |
|         | Pietra brecciata grigia   |      | buono stato di conservazione                                     |      |      |      | buon valore della velocità con basso valore di deviazione standard   |                  |                    |         |

Tab. 2 - Colonnine lato interno: materiali, degrado e risultati delle prove ultrasoniche. All'epoca delle prove ultrasoniche le colonnine erano rivestite da un sottile strato di intonaco.

### Conclusioni

Il caso di studio appena descritto ha messo in evidenza l'importanza di integrare il GPR, la termografia e le prove ultrasoniche, al fine di migliorare la qualità delle informazioni riguardanti gli aspetti e le problematiche connesse con la conservazione e la caratterizzazione fisica e costruttiva del rosone. I risultati più significativi di questa integrazione sono stati la ricostruzione delle fasi di assemblaggio delle componenti del

rosone, la conoscenza delle modalità di collegamento tra le stesse<sup>34</sup>, la qualificazione del degrado e il rilievo dei materiali di integrazione (tab. 3).

|                           | <b>GPR</b>  | <b>Termografia</b>  | <b>Test ultrasonici</b>   |                           |
|---------------------------|---|---|---|---------------------------|
| <b>Risultati ottenuti</b> | Caratterizzazione qualitativa e dimensionale della struttura interna del cordolo                                |   |   | <b>Cordolo</b>            |
|                           | Individuazione di alcune fratture nelle colonnine e negli elementi ad archi incrociati.                         | Individuazione di alcune lesioni e verifica della natura passante delle stesse nelle colonnine e in alcuni elementi ad 'archi incrociati' | 1) Riscontro sulla presenza di fratture già rilevate con il GPR e la termografia. 2) individuazione di parti di colonne deteriorate e soggette a fenomeni di schiacciamento, non rilevate dal GPR e dalla termografia | <b>Degrado</b>            |
|                           | Individuazione degli elementi metallici di collegamento tra colonnine e capitelli e colonnine ed oculo centrale | Individuazione di elementi metallici superficiali di collegamento non rilevabili per motivi di natura logistica con il GPR.               | Riscontro su alcune colonne della presenza di elementi metallici, già individuati con il GPR.   | <b>Elementi metallici</b> |
|                           | Verifica delle aree oggetto di restauro e integrazione, già rilevate mediante termografia.                      | Mappa delle aree oggetto di restauro e di integrazione con materiali diversi rispetto a quelli originari.                                 | Individuazione di disomogeneità riferibili a restauri pregressi.  | <b>Restauri pregressi</b> |
|                           |   |   | Calcolo del modulo dinamico di elasticità   | <b>Al tr</b>              |

Tab. 3 - Risultati ottenuti dall'integrazione di GPR, prove ultrasoniche e termografia per la caratterizzazione costruttiva, l'analisi del degrado e l'individuazione dei materiali relativi a restauri pregressi.

In particolare il GPR ha fornito le informazioni più importanti, dal punto di vista qualitativo e quantitativo. Determinante è stato il suo apporto per la caratterizzazione fisica e dimensionale della struttura interna del cordolo e l'individuazione degli elementi metallici di collegamento tra colonnine e capitelli e tra colonnine ed oculo centrale. È stato, inoltre, complementare alle ultrasoniche, per quanto riguarda l'analisi del degrado delle colonnine, e alla termografia, per quanto concerne il rilievo delle integrazioni di restauro.

<sup>34</sup> Informazione fondamentale in caso di smontaggio e rimontaggio

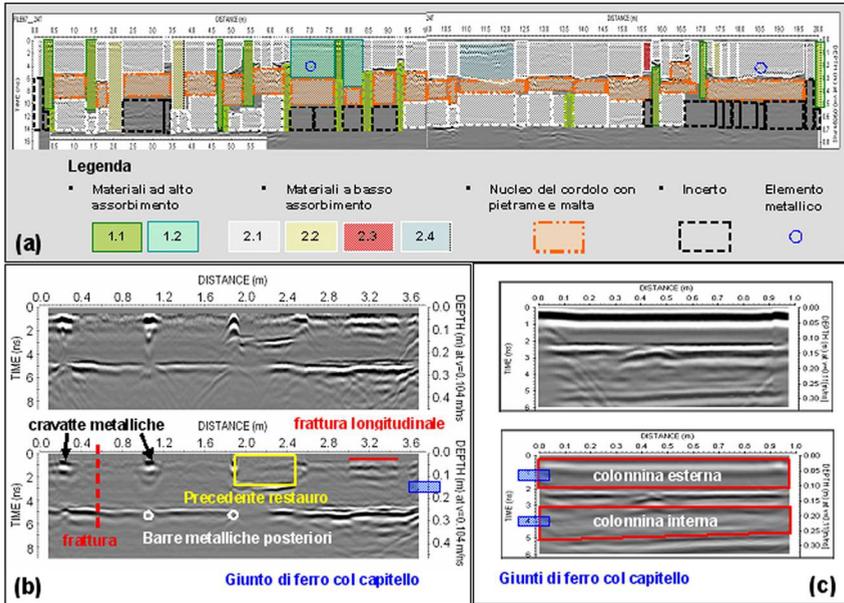
Le ultrasoniche sono state particolarmente efficaci nel valutare l'entità di talune patologie di degrado già rilevate con un'ispezione visuale e individuarne altre non facilmente rilevabili.

Infine, la termografia è stata decisiva nel rilievo delle integrazioni effettuate durante i restauri passati e ha integrato il GPR laddove alcune difficoltà logistiche impedivano il suo utilizzo.

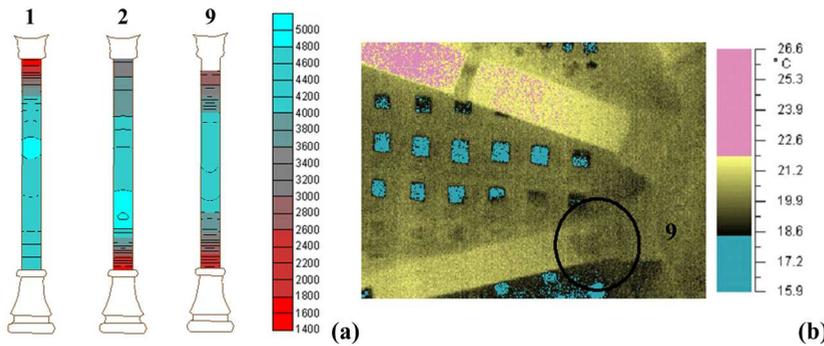
#### ABBREVIAZIONI BIBLIOGRAFICHE

- AVDELIDIS N. P., MOROPOLOU A. 2004, *Applications of infrared thermography for the investigation of historical structures*, in *Journal of Cultural Heritage*, 5, pp. 119-127.
- BELLI D'ELIA P. 1987, *L'Italia romanica. La Puglia*, Milano, p. 408.
- BINDA L., SAISI A., TIRABOSCHI C., VALLE S., COLLA C., FORDE M. 2003, *Application of sonic and radar tests on the piers and walls of the Cathedral of Noto*, in *Construction and Building Materials*, 17 (8) pp. 613-627.
- CAPRIUOLI A., DELLI SANTI M., GALIZIA A., MASINI N. 2006, *Prove ultrasoniche per la caratterizzazione meccanica e l'analisi dello stato di degrado dei marmi e delle pietre delle cattedrali di Troia ed Acerenza*, in *Atti del Convegno "Le risorse lapidee dall'antichità ad oggi in Area Mediterranea" (Canosa, 24-27/09/2006)*, Torino, pp. 267-272.
- DE SANTIS M. 1986, *La civitas troiana e la sua cattedrale*, Foggia.
- GRINZATO E., BISON P.G., MARINETTI S. 2002, *Monitoring of ancient buildings by the thermal method*, in *Journal of Cultural Heritage*, 3, pp. 21-29.
- LIBERATORE D., SPERA G., MUCCIARELLI M., MASINI N., CALIA A., CAPRIUOLI A., RACINA V., NUZZO L., RIZZO E., BINDA L., CANTINI L. 2006, *The façade and the rose-window of Troia Cathedral (Apulia, Italy)*, in LOURENÇO P.B., ROCA P., MODENA C., AGRAWAL S. (eds.), *Structural Analysis of Historical Constructions*, New Delhi, pp. 1997-2004.
- MALDAGUE X.P.V. 2001, *Theory and Practice of Infrared Technology for non Destructive Testing*, New York.
- MASINI N., NUZZO L., RIZZO E. 2007, *GPR investigations for the study and the restoration of the Rose Window of Troia Cathedral (Southern Italy)*, in *Near Surface Geophysics*, 5, 5, pp. 287-300.
- MASTRULLI R. 1985, *Elementi di Arte Barocca nella Cattedrale di Troia*, Foggia.
- MCCANN D.M., FORDE M. C. 2001, *Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures*, in *NDT&E International*, 34, pp. 71-84.
- NUZZO L., MASINI N., RIZZO E., LASAPONARA R. 2008, *Integrated and multiscale NDT for the study of architectural heritage*, in MICHEL U., CIVCO D.L., EHLERS M., KAUFMANN H.J. (eds.), *Proc. SPIE Vol. 7110, Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications and Geology VIII*, doi: 10.1117/12.801313, 711015.
- PICONE R. 2000, *Restauro e de-restauro. Il caso della Cattedrale di Troia in Puglia*, in A.A.VV., *Restauro dalla teoria alla prassi, a cura di Stella Casiello*, Napoli, pp. 76-102.

Tav. XLIX



Tav. XLIX, 1 - (a) Radargramma lungo il cordolo del rosone (i diversi colori rappresentano la diversa natura dei conci ed i numeri la loro posizione); (b) radargramma eseguito lungo l'arco incrociato tra le colonnine n. 4 e n. 2 (la sezione in basso è quella migrata con la velocità stimata delle onde EM di 0.104 m/ns); (c) radargramma eseguito lungo la colonnina n. 10 dal lato esterno (la sezione in basso è quella migrata con la velocità stimata delle onde EM di 0.11 m/ns).



Tav. XLIX, 2 - (a) Tomografia ultrasonica delle colonnine 1, 2 e 9 sul lato esterno del rosone: i valori più bassi di velocità trovano riscontro nelle problematiche di degrado note attraverso l'ispezione visuale; (b) termografia della colonnina esterna n. 9 che evidenzia la presenza di un materiale di integrazione nei pressi dell'oculo.