

# TECNICHE NON INVASIVE DI SUPERFICIE E DI VOLUME PER IL MONITORAGGIO STRUTTURALE DELLE SCULTURE MARMOREE

M. F. Alberghina<sup>1</sup>, P. Capizzi<sup>2</sup>, S. Schiavone<sup>1</sup>

<sup>1</sup>S.T.Art-Test di S. Schiavone & C, via Stovigliai, 88 – 93015 Niscemi (CL) – Italy, info@start-test.it, www.start-test.it

<sup>2</sup>Dipartimento DiSTeM, Università degli Studi di Palermo, via Archirafi, 22 – 90126 Palermo, patrizia.capizzi@unipa.it

## Abstract

L'analisi delle proprietà strutturali di una scultura in marmo, attraverso l'impiego di tecniche di indagine non invasive da realizzare direttamente *in situ*, è di fondamentale importanza per la valutazione dello stato di conservazione e, conseguentemente, per il monitoraggio di eventuali fenomeni di degrado che possono compromettere l'integrità dell'opera d'arte.

Lo studio condotto sul bassorilievo raffigurante la Madonna con Bambino conservato presso la Cappella del Monastero delle Clarisse *Totus Tuus* di Gorizia ha permesso di verificare la complementarità delle informazioni restituite da tecniche di analisi della superficie (acquisizioni in fluorescenza ultravioletta) e tecniche di analisi del volume (tomografia ultrasonica).

Le indagini in fluorescenza ultravioletta consentono di individuare e differenziare i materiali (originali, di restauro o di degrado) presenti sulla superficie lapidea. La tomografia ultrasonica, attraverso la stima delle velocità ultrasoniche caratteristiche del materiale, permette di ottenere una caratterizzazione strutturale dell'intero volume dell'opera. Generalmente, tale indagine è associata a un rilievo pacometrico necessario per rilevare la presenza di perni metallici all'interno dell'opera o nel supporto di ancoraggio, anche per interpretare eventuali anomalie riscontrate.

Nel caso studio presentato, il modello tomografico ad ultrasuoni ha evidenziato la presenza di piccole zone ad alta velocità correlabili alla presenza di perni metallici e da una zona a maggiore degrado che si concentra nella parte inferiore dell'opera. Le indagini in fluorescenza ultravioletta hanno mostrato la reale estensione della frattura che coinvolge la porzione inferiore del bassorilievo, verificando il perimetro dell'area caratterizzata da un maggior degrado ed evidenziata dall'indagine ad ultrasuoni.

## Introduzione

Molte tecniche non invasive sono generalmente utilizzate per indagini su opere d'arte. Sicuramente la tomografia ultrasonica è una tecnica largamente utilizzata per indagini su oggetti di medie e piccole dimensioni, caratterizzati da superficie irregolare, fornendo buoni risultati (Blitz and Simpson, 1996; Capizzi et al., 2009; Capizzi et al., 2013; Cardarelli e De Nardis, 2001; Dynes and Lytle, 1979; Gambardella et al., 2008; Phillips and Fehler, 1991).

Anche le tecniche di diagnostica per immagini, tra cui le riprese in fluorescenza ultravioletta, possono restituire nel caso di opere scultoree informazioni preliminari per la conoscenza dei materiali organici o inorganici presenti in superficie, localizzando trattamenti, tracce di stesure pittoriche o eventuali interventi di restauro pregressi (de la Rié et al., 1982; Pelagotti et al., 2008).



Lo studio condotto sul bassorilievo raffigurante la *Madonna con Bambino* conservato presso la Cappella del Monastero *Totus Tuus* delle Clarisse di Gorizia (Fig. 1) ha consentito di evidenziare come un approccio analitico integrato, volto ad analizzare contestualmente la superficie e lo spessore, permetta di raggiungere una completa conoscenza materica dell'opera.



**Fig. 1.** Bassorilievo lapideo presso il Monastero *Totus Tuus* delle Clarisse di Gorizia.

Allo scopo di condurre un'indagine diagnostica per lo studio strutturale dell'opera e del suo stato di conservazione, durante la fase di acquisizione *in situ*, sono state eseguite:

- analisi ad ultrasuoni (associata a rilievo pacometrico), per la caratterizzazione strutturale dell'opera, attraverso la stima delle velocità ultrasoniche caratteristiche del materiale analizzato, e per la determinazione, tramite confronto, della compatibilità del materiale con una determinata cava qualora venisse individuata o fossero presenti in letteratura valori di velocità ultrasonica di riferimento per la stessa. L'indagine ultrasonica è stata associata a un rilievo pacometrico al fine di rilevare e localizzare l'eventuale presenza di perni metallici non visibili presenti all'interno dell'opera o nel retro di essa (supporto di ancoraggio alla superficie muraria), anche per interpretare eventuali anomalie riscontrate dall'indagine ad ultrasuoni;
- indagini in fluorescenza ultravioletta (UV), per la documentazione della risposta di fluorescenza caratteristica del materiale lapideo costituente l'opera e per l'individuazione e la localizzazione di eventuali materiali originali, di restauri pregressi o di degrado, giustapposti sulla superficie lapidea, di tracce di materiali pittorici, non visibili ad occhio nudo, per indagare la possibile presenza di una policromia non più osservabile e fornire, eventualmente, informazioni sulla tecnica esecutiva.

### **Strumentazione e metodologia di indagine**

Per le misurazioni di tipo ultrasonico è stata utilizzata la strumentazione "HIGH PERFORMANCE" della MATEST modello C372N con una frequenza di campionamento massima di 1 MHz. L'apparecchiatura è corredata da sonde riceventi e trasmettenti con una frequenza centrale di 55 kHz.

I ricevitori accelerometrici di tipo piezoelettrico sono stati progettati per avere un'elevata sensibilità in un *range* di frequenza dei segnali ricevuti idoneo ad indagini su strutture costituite da materiali non particolarmente veloci (edifici storici, materiali rocciosi degradati e/o fratturati, legno ecc...) e una buona sensibilità lineare per *range* di frequenza da 10 kHz a 70 kHz, tipica per segnali ricevuti da campioni lapidei sia naturali che artificiali, sia per prove in sito che in laboratorio.

Il trasmettitore piezoelettrico di tipo “*sandwich*” con ceramiche precaricate permette di generare impulsi, con una elevata potenza di trasmissione dei segnali, con frequenza centrata sui 55 kHz.

Il software di acquisizione dei dati, oltre a consentire l'impostazione dei principali parametri di acquisizione, permette il controllo della qualità dei segnali e della stima dei tempi di volo tramite la visualizzazione in tempo reale delle forme d'onda.

Il controllo ad ultrasuoni, per il rilievo delle discontinuità interne ai materiali, viene eseguito fondamentalmente con due tecniche: tecnica per trasparenza e per riflessione. La tomografia ultrasonica per lo studio diagnostico sul bassorilievo lapideo è stata eseguita utilizzando la tecnica per trasparenza.

Nella tecnica per trasparenza con il metodo a trasmissione vengono impiegati due trasduttori, posizionati in genere uno di fronte all'altro sulle superfici opposte del mezzo da esaminare; uno dei due trasduttori funge da emettitore, l'altro da ricevitore (Fig. 2).



**Fig. 2** Posizionamento delle sonde per l'acquisizione dei segnali US sul bassorilievo.

La sonda trasmittente è stata mantenuta fissa in una determinata posizione, facendo variare la posizione di quella ricevente.

Le misure ultrasoniche sono state corredate da misure di tipo pacometrico. Il metodo pacometrico si avvale del principio della misurazione dell'assorbimento del campo magnetico, prodotto dalla stessa apparecchiatura ed evidenziato tramite sistema analogico o digitale. Lo strumento, il *Profoscope+* della *Proceq*, composto da un'unità di emissione e lettura del campo elettromagnetico, da una o più sonde emittenti - riceventi il campo magnetico, consente una ricostruzione affidabile degli elementi metallici. Il pacometro permette inoltre di determinare la posizione, la direzione ed il numero degli inserti, valutandone il diametro e il materiale di composizione, limitatamente al caso di geometrie regolari e superfici piane.

Dal punto di vista pratico, si procede all'individuazione degli inserti muovendo lentamente la sonda sulle zone sensibili per individuare i punti e le direzioni di massimo segnale.

La metodologia risulta molto affidabile per quanto riguarda la rilevazione della presenza di oggetti metallici e può essere utilizzata per la localizzazione di cordoli, architravi, travi e pilastri (immersi nelle murature), nervature di solai non visibili, perni metallici di ancoraggio in strutture lapidee ecc.

L'acquisizione della fluorescenza UV sull'intera superficie scolpita dell'opera in esame è stata condotta tramite Fotocamera scientifica digitale a CCD raffreddata (6 Mpixel effettivi per banda spettrale acquisita), serie CHROMA C4-DSP, modello C250ME della DTA srl, con sensore KAF8300ME, dotata di ruota interna porta filtri interferenziali ad 8 posizioni (8 bande spettrali).

La ripresa della fluorescenza ultravioletta è stata realizzata mediante due tubi di Wood (UV-A 365 nm) della potenza ciascuno di 18 W, posizionati secondo una geometria di ripresa tale da illuminare il più omogeneamente possibile la superficie di interesse.

Il sistema di acquisizione impiegato permette l'osservazione e l'acquisizione di immagini ad alta risoluzione della fluorescenza ottica stimolata da illuminazione ultravioletta, utili per l'individuazione in maniera non invasiva e immediata di materiali originali e di restauro costituenti la superficie artistica analizzata. L'analisi permette la localizzazione di integrazioni, rifacimenti ed interventi di restauro attraverso il riconoscimento dei colori di fluorescenza nel visibile indotti da sorgente ultravioletta, fornendo una mappatura della superficie. Solo in alcuni casi è possibile ottenere informazioni qualitative sulla possibile natura chimica dei materiali individuati. Al contrario, nei casi in cui l'identificazione non risulti certa, i dati ottenuti dalle acquisizioni in fluorescenza UV forniscono utili indicazioni per l'esecuzione di indagini chimico-fisiche mirate.

Tale indagine è largamente impiegata per la valutazione dello stato di conservazione ed invecchiamento di trattamenti protettivi, per il monitoraggio e la documentazione durante le fasi di restauro, per la verifica della rimozione degli strati di vernici protettive alterati.

Il fenomeno della fluorescenza riguarda prevalentemente i materiali organici e, in minor misura, quelli inorganici. Generalmente la fluorescenza dei materiali aumenta d'intensità con il procedere dell'invecchiamento delle sostanze stesse. Questa tecnica è largamente utilizzata per la differenziazione dei materiali sulla base dei loro colori caratteristici indotti da illuminazione UV: materiali diversi, anche se sono trasparenti o si presentano identici per colore e aspetto ad un'analisi ad occhio nudo, hanno generalmente caratteristiche chimiche diverse, ed emettono quindi per fluorescenza una luce diversa quando sottoposti ad irraggiamento con radiazione UV.

### **Risultati delle indagini condotte *in situ***

Le indagini pacometriche hanno consentito di localizzare la presenza di materiale metallico (perni e/o supporti) all'interno dello spessore del bassorilievo, la cui estensione e orientazione, tuttavia, non è determinabile in maniera assoluta tramite la tecnica adottata.

In figura 3 è riportata la posizione e la relativa documentazione fotografica dei quattro elementi metallici individuati, probabilmente correlabili ai perni utilizzati per l'ancoraggio dell'opera alla struttura muraria retrostante. La posizione degli elementi metallici riscontrati nei punti 3 e 4 non sovrappone con quella dagli elementi metallici visibili sulla base delle colonnine.

Si precisa che le profondità di indagine del metodo pacometrico sono relativamente ridotte (pochi centimetri) e quindi non permettono di individuare eventuali altri perni o supporti metallici all'interno delle parti dell'opera caratterizzate da spessori maggiori.



**Fig. 3.** Localizzazione dei quattro elementi metallici rilevati tramite rilievo pacometrico.

Il controllo con il metodo ad ultrasuoni (US) è stato eseguito sulla maggior parte del volume dell'opera, comunque in funzione delle porzioni direttamente raggiungibili dagli operatori e dalle sonde di misura. In particolare, sono stati acquisiti i segnali collocando le sonde sui bordi del bassorilievo su 17 punti di misura sul lato sinistro e 17 punti sul lato destro dell'opera (Fig. 4). Su entrambi i lati, i primi 14 punti sono collocati sulla porzione lapidea di colorazione bianca e comprendente la parte figurativa, i restanti (punti 15-17) sono stati posti sulla parte scolpita superiore costituita dalla conchiglia, più esterna e aggiunta in un secondo momento all'opera.

Tale porzione si inserisce sulla parte sommitale dell'opera che preliminari verifiche strumentali hanno verificato essere costituita dallo stesso materiale costituente la porzione figurata, più diffusamente indagata.

I punti sono stati posizionati ad una interdistanza compresa tra i 5÷6 cm.

Il riposizionamento dei punti di misura e le relative coordinate spaziali sul modello tomografico analizzato, necessario per la localizzazione dei percorsi e la successiva ricostruzione dei segnali US acquisiti, è stato condotto tramite le informazioni ricavate dalle misure delle distanze tra i punti selezionati rilevate *in situ* durante la fase di acquisizione.

Come mezzo di accoppiamento tra la sonda e la superficie da esaminare si è scelto di utilizzare il gel ecografico, caratterizzato da una buona trasparenza agli ultrasuoni e che ha permesso di minimizzare le rugosità delle superfici interessate dal controllo, in modo tale da permettere un buon accoppiamento del trasduttore. Si tratta di un gel a base acquosa totalmente innocuo per la superficie analizzata. Nella fase preliminare dell'indagine è stata eseguita la taratura della strumentazione con gli stessi trasduttori da utilizzare durante il controllo tramite cilindro di taratura certificato. La taratura, successivamente, è stata verificata ogni qualvolta che si è spento e riacceso lo strumento.



**Fig. 4.** Posizionamento dei 34 punti di misura per l'acquisizione dei segnali US.

Per la tomografia ultrasonica dei 290 segnali acquisiti, sono stati elaborati 228 segnali utili, sui quali sono stati misurati i tempi di volo delle onde elastiche tramite procedure di *picking*. Alcuni percorsi analizzati, passanti nelle zone in cui è stata accertata tramite il pacometro la presenza dei perni metallici (percorsi 1-17, 2-17, 3-17....), non sono stati utilizzati per la procedura di *picking* poiché, provocando segnali di disturbo, genererebbero artefatti nella ricostruzione tomografica dei segnali US restituendo false anomalie. Per tale motivo al fine di realizzare un'elaborazione tomografica i dati sono stati filtrati, eliminando i valori di *outliers* (Fig. 5).

L'inversione dei dati ha mostrato zone caratterizzate da valori di velocità differenti: le aree a velocità medio - alta, caratterizzate da velocità superiori a 6500 m/s, tipiche del marmo di buona qualità (riportate in rosso e giallo in Fig. 6), che rappresentano la quasi totalità della parte figurativa del bassorilievo, e zone caratterizzate da una più bassa velocità (inferiore a 5800 m/s), che individuano, principalmente, l'area superiore della composizione dalla forma a conchiglia di materiale differente a minore densità (in blu - verde, in Fig. 6).

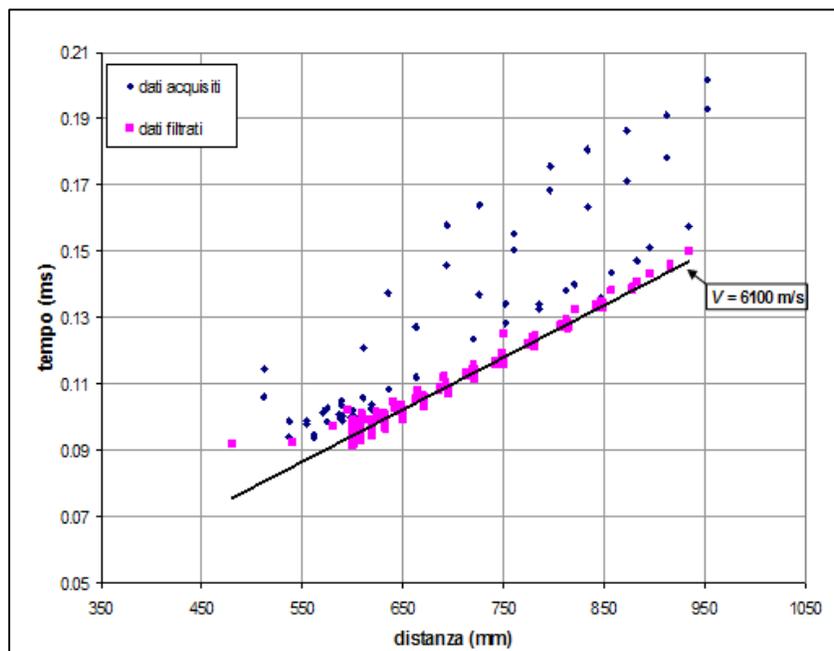
Il modello tomografico ha evidenziato, per quanto riguarda l'area figurativa, la presenza di piccole zone ad alta velocità correlabili alla probabile presenza di perni metallici e da una zona a maggiore degrado che si concentra nella parte inferiore dell'opera. Le indagini in fluorescenza ultravioletta, di seguito esposte, hanno mostrato la reale estensione di una frattura che coinvolge parte della figura del Bambino, del manto della Madonna e la porzione bassa della colonnina tortile a destra.

L'indagine tomografica, evidenzia che la zona in basso del bassorilievo ha subito un trauma più elevato, lasciando ipotizzare che la frattura possa essere più profonda.

Inoltre, l'analisi condotta ha permesso di verificare che la parte della composizione che rappresenta lo sfondo, e dunque la parte del blocco di marmo meno sollecitata, ha

caratteristiche meccaniche di poco superiori a quelle delle aree più riccamente scolpite, come ad esempio la figura della Madonna.

Tale evidenza sperimentale sembra suggerire una certa abilità tecnica e una grande attenzione dell'artista nello scolpire il materiale costituente l'opera.



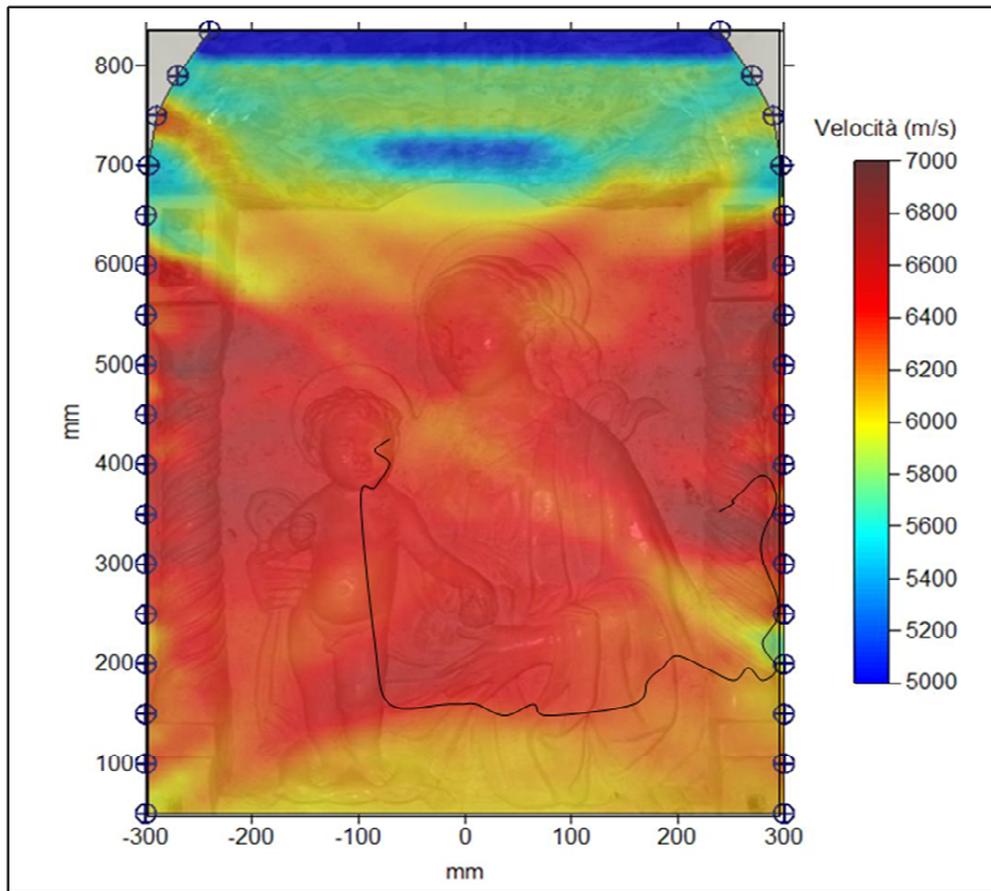
**Fig. 5.** Grafico tempi-distanze: dati filtrati (viola); dati esclusi dall'analisi (blu).

L'indagine in fluorescenza UV ha evidenziato lo stato di conservazione dell'opera in esame, localizzando le aree interessate da integrazioni presenti sulla superficie marmorea scolpita. Tali integrazioni risultano facilmente individuabili nell'immagine in fluorescenza UV (Fig. 7) come aree scure a causa della scarsa rivelabilità della loro fluorescenza caratteristica.

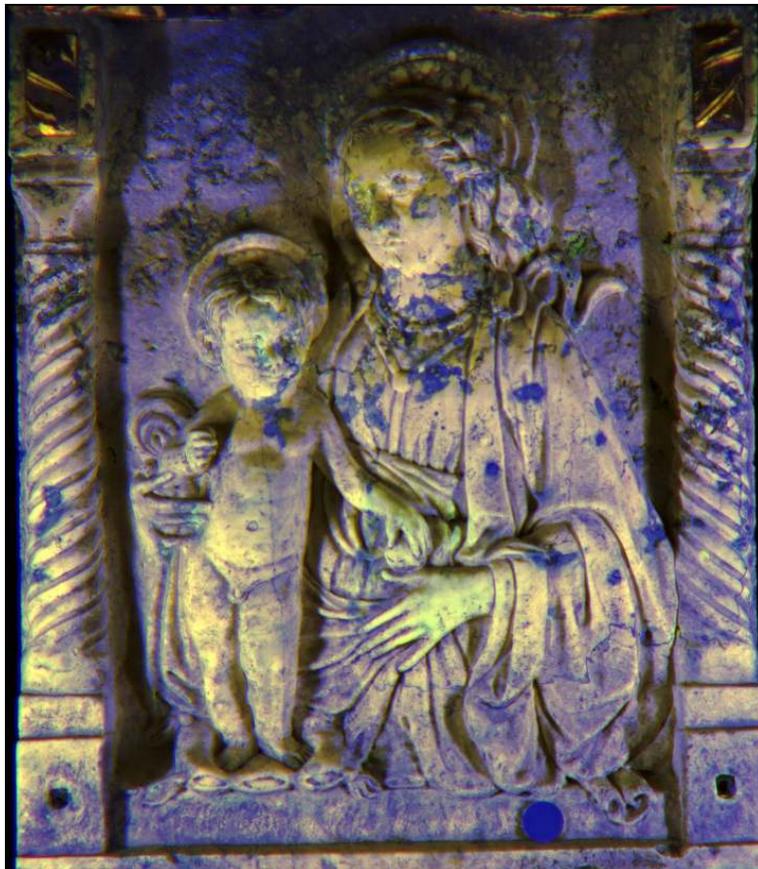
In particolare, le riprese effettuate con illuminazione UV hanno messo in evidenza una frattura, anch'essa coperta dalle integrazioni di restauro, che interessa la porzione inferiore del bassorilievo, dalla metà della colonnina sinistra fino al Bambino, correndo attraverso il panneggio della Madonna. Tale frattura delimita la zona che all'analisi ultrasonica è apparsa maggiormente degradata, così come riportato in figura 6.

L'impiego della fluorescenza UV ha consentito, inoltre, di individuare la presenza di materiale organico che potrebbero essere indicativo di antichi trattamenti protettivi o della presenza di materiali residui di uno strato di preparazione di una originaria o antecedente policromia, la cui presenza sarà verificata grazie all'analisi delle tracce di pigmento individuate tramite le osservazioni in UV e prelevate in corrispondenza del panneggio della Madonna.

La presenza diffusa di tale materiale organico sulla parte figurativa del bassorilievo è chiaramente individuabile per la tipica risposta di colorazione giallastra. La superficie dell'area centrale in corrispondenza delle mani della Madonna e del Bambino, come anche la mano destra della Madonna, mostrano un colore di fluorescenza di maggiore intensità, probabilmente dovuto alla presenza di materiali correlabili ad un ulteriore o un differente intervento su tali aree (Fig. 7).



**Fig. 6.** Tomografia US e linea di frattura evidenziata dall'indagine in fluorescenza UV.



**Fig. 7.** Fluorescenza UV tricromatica (450 nm, 540 nm, 600 nm) ricomposta RGB.

## Conclusioni

Le indagini condotte sul bassorilievo marmoreo, oggetto di approfondimenti scientifici e storico artistici per la datazione e l'attribuzione, ha fornito un esempio di quanto un approccio non distruttivo, che prevede tecniche integrate per lo studio contestuale delle superfici e dei volumi, sia notevolmente efficace. Allo scopo di condurre un preliminare studio delle proprietà strutturali e dello stato di conservazione dell'opera qui presentata, durante la fase di acquisizione *in situ*, sono state eseguite tecniche non distruttive, ovvero analisi ad ultrasuoni (associata al rilievo pacometrico) e indagini in fluorescenza UV.

Il rilievo pacometrico ha permesso di localizzare la presenza di quattro elementi metallici posizionati alle estremità del bassorilievo, probabilmente impiegati per l'ancoraggio alla struttura muraria retrostante; l'analisi ad ultrasuoni ha mostrato, sull'area figurativa, zone caratterizzate da valori di velocità medio-alta, superiori a 6500 m/s (tipiche del marmo di buona qualità e in buono stato di conservazione) e una zona inferiore del bassorilievo maggiormente degradata a seguito di un trauma (velocità ultrasonica media pari a 6000 m/s), la cui evidenza lascia ipotizzare che la frattura individuata anche dall'indagine UV possa interessare uno spessore dell'opera più elevato. Inoltre, sulla volta scolpita in forma a conchiglia l'analisi ad ultrasuoni ha mostrato zone caratterizzate da una più bassa velocità (inferiore a 5800 m/s), che individuano un materiale differente di minore densità. Inoltre, le riprese dell'emissione di fluorescenza indotta dall'illuminazione UV della superficie hanno messo in evidenza diversi aspetti della vita conservativa dell'opera, quali: 1) l'utilizzo di materiali impiegati durante i restauri effettuati in passato e non documentati; 2) la presenza di materiali che impregnano la superficie del marmo la cui risposta in fluorescenza appare presente in maniera intensa e diffusa su tutta la superficie figurata e non sulla superficie lapidea di sfondo, senza che queste mostrino alcuna differenza visibile ad occhio nudo; 3) la presenza di tracce di strati pittorici sulla superficie lapidea scolpita, in particolare conservatisi tra le pieghe del panneggio della Madonna.

## Bibliografia

- Blitz, J., Simpson, G., 1996. Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing. Series: Non Destructive Evaluation Springer.
- Capizzi, P., Cosentino, P.L., Martorana, R., Razo Amoroz, I., Riela, S., Rizzari, G., Schiavone, S., 2009. Indagini geofisiche a supporto dell'intervento di restauro di Palazzo Branciforte (Palermo). Lo Stato dell'Arte 7 - VII IGIIC, 7, pp. 121–128.
- Cardarelli, E., De Nardis, R., 2001. Sismic refraction, isotropic anisotropic seismic tomography on an ancient monument (Antonino e Faustina temple AD 141). Geophysical Prospecting 49, 228–240.
- Dynes, K.A., Lytle, R.J., 1979. Computerized geophysical tomography. Proceedings of the IEEE 67, 1065–1073.
- Gambardella, S., Danesi, A., Cosentino, P.L., Capizzi, P., Fiandaca, G., 2008. L'indagine sonica ed ultrasonica come prassi necessaria alla conoscenza di strutture complesse. Il rimontaggio di una statua di epoca romana da Locri: un caso esemplare. Lo Stato dell'Arte VII, 689–694.
- Phillips, W.S., Fehler, M.C., 1991. Traveltime tomography: a comparison of popular methods. Geophysics 56, 1639–1649.
- R. de la Rié, Fluorescence of paint and varnish layers (part I–II–III), Stud. Conserv. 1982, 27, 1-7, 65-69, 102-108.
- A. Pelagotti, A. Del Mastio, A. De Rosa, A. Piva, Multispectral imaging of paintings, IEEE Signal Process. Mag. 2008, 25, 27-36.