

# Le tecniche di indagine NDT nel processo di restauro e consolidamento di edifici soggetti a tutela

Antonio COSTANZO<sup>1</sup>, Antonio MONTUORI<sup>1</sup>, Giacinto PORCO<sup>2</sup>, Giuseppe CASULA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Centro Nazionale Terremoti (CNT), Italy;  
e-mail: {antonio.costanzo; giuseppe.casula; antonio.montuori;}@ingv.it

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile & SISMILAB s.r.l., Università della Calabria (UniCal), Cosenza, Italy;  
e-mail: a.porco@sismilab.it

## Sommario

Le attività di restauro e consolidamento di edifici soggetti a tutela sono fortemente ancorate alla conoscenza del bene, alla consistenza geometrico-strutturale e a quella materica, nonché all'analisi del degrado del manufatto e del suo stato di conservazione in tutti i suoi elementi. Altri aspetti tecnici da portare in conto sono ovviamente quelli legati al monitoraggio da attuare eventualmente in fase di diagnosi e obbligatoriamente in fase di esercizio, al fine di disporre di una robusta mole di dati per governare l'attività manutentiva. Un valido supporto all'insieme di queste problematiche è offerto oggi dalle tecniche non distruttive (NDT), le quali si inseriscono sia nel processo di screening conoscitivo del manufatto che nel processo di progettazione, di realizzazione degli interventi e di vita utile del bene. In questo contesto, la presente nota illustra una panoramica di alcune delle moderne tecniche di indagine NDT impiegate nelle attività di rilievo, di valutazione dello stato dei materiali e nelle attività di monitoraggio sia propedeutiche alla redazione del progetto, sia nel corso dell'esercizio. In riferimento a quest'ultimo aspetto, le tecniche illustrate mirano ad essere parte integrante di una metodologia di controllo "routinaria" da esercitare in continuo e con la possibilità di essere interrogabile anche in tempo reale. Alcuni esempi applicativi qui riportati, seppur in forma sintetica, consentiranno di apprezzare i benefici derivanti dall'utilizzo di tecniche NDT, il cui punto di forza risiede soprattutto nel loro essere non invasive e autodiagnosticanti.

**Keywords:** Prove non distruttive; telerilevamento prossimale; laser scanner terrestre, termografia ad infrarossi, stato di conservazione di edifici.

## 1. Introduzione

Il restauro ed il consolidamento di strutture appartenenti al patrimonio culturale costituiscono da sempre delle attività particolarmente impegnative per gli operatori del settore. Le problematiche che si incontrano sono generalmente plurisettoriali e interessano sia campi prettamente ingegneristici e architettonici, sia di tipo materico e geologico-geofisico. Infatti, le opere presenti sul territorio nazionale risentono non solo della loro connotazione storica ma anche del contesto territoriale su cui insistono, esposto ad eventi calamitosi quali terremoti e dissesti idrogeologici. Pertanto, le attività di recupero e restauro, volte alla tutela dei beni culturali, dipendono non solo dalla conoscenza approfondita sui materiali e dagli schemi strutturali dei beni in esame, ma anche dalla vulnerabilità a essi associati, ovvero la potenzialità di subire danni, ad esempio a seguito di eventi sismici (1). A tal proposito, le tecniche non distruttive (NDT) giocano un ruolo fondamentale per l'analisi ed il monitoraggio di un bene culturale, sia esso un bene a valenza storica, civile, architettonica o ingegneristica (2). Infatti, l'insieme di tecniche NDT (classiche ed emergenti) è in grado non solo di fornire una descrizione accurata sullo stato di conservazione di un manufatto col rilievo delle sue principali morfologie di collasso (geometriche e strutturali), ma rappresenta anche un utile strumento per il monitoraggio strutturale di un bene in risposta a sollecitazioni esterne, naturali o antropogeniche (3). Le attuali norme tecniche, in accordo con le circolari ministeriali sul tema dei beni culturali (NTC'08), definiscono i principi e le linee guida per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, al fine di protendere al miglioramento o

all'adeguamento sismico delle strutture e indirizzare così gli eventuali interventi da eseguire a tutela del patrimonio edilizio. I citati riferimenti normativi indicano il percorso da seguire per il rilievo, il controllo sui materiali ed il monitoraggio strutturale di un bene culturale, ma non prevedono alcuna metodologia che tenga conto della variabilità temporale dello stato di conservazione dei beni stessi, sia in risposta a sollecitazioni esterne o eventi naturali, sia per programmare utili interventi di manutenzione aggiornati al reale stato di conservazione. Appare evidente che la disponibilità di tecniche di monitoraggio e controllo, finalizzate alla verifica durante l'esercizio o a valle di eventi specifici di dissesto, sia estremamente importante e auspicato da coloro che operano nella gestione dei beni culturali.

In questo lavoro, verranno illustrate alcune tecniche NDT utilizzate principalmente nella fase conoscitiva di un edificio, congiuntamente a tecniche di monitoraggio, basate su sistemi residenti, che possano svolgere una azione guida sia per la gestione del bene che per il controllo a valle di eventi puntuali. Il lavoro è stato organizzato come segue: nella sezione 2 sono illustrati i principi teorici delle tecniche classiche NDT, delle tecniche di telerilevamento prossimale e di monitoraggio; nella sezione 3, sono riportati alcuni esempi applicativi restituendo i risultati sperimentali utili ad effettuare alcune considerazioni conclusive.

## **2. Le tecniche NDT a supporto del Restauro e del Consolidamento**

Gli interventi di recupero e di restauro sono preceduti da una efficace azione conoscitiva del manufatto. In queste attività ritroviamo il rilievo, lo studio dei materiali costituenti gli elementi portanti, e la valutazione dello stato di conservazione delle parti resistenti. Sovente, le strutture sulle quali si opera sono soggette ad evidenti quadri fessurativi, per cui risulta indispensabile anche monitorare l'evoluzione del dissesto al fine di prevenire crolli parziali o totali dell'opera. In questo contesto, notevole è il supporto oggi dato dalle tecniche NDT, per le quali viene di seguito presentata una breve panoramica con riferimento alle tecniche maggiormente diffuse, alle singole peculiarità e ai vantaggi perseguibili con il loro impiego.

### **2.1 Rilievo NDT geometrico-strutturale**

Il rilievo geometrico-strutturale di un edificio può essere realizzato integrando indagini classiche di misure NDT (visive, geometriche e strutturali) con misure di telerilevamento prossimale basate sulla tecnologia laser a scansione terrestre (TLS).

Le indagini classiche NDT forniscono (i) una panoramica generale del bene osservato con la riproduzione dettagliata delle sue caratteristiche geometrico-strutturali nonché di possibili degradazioni superficiali e/o morfologie di collasso; (ii) le planimetria, le sezioni e le prospettive della struttura, con la riproduzione in scala dei suoi elementi costruttivi principali, (iii) la descrizione delle strutture portanti e degli elementi in calcestruzzo o in muratura (4).

Le indagini di telerilevamento prossimale TLS costituiscono un potente strumento d'indagine NDT, in termini di risoluzione e tempo di acquisizione, per (i) la modellazione 3-D di un edificio; (ii) l'analisi delle sue caratteristiche radiometriche; (iii) il rilievo di possibili dissesti e morfologie di deformazione (5).

### **2.2 Indagini NDT sui materiali**

Il controllo sullo stato di salute e di dissesto dei materiali di un edificio può essere realizzato mediante l'integrazione di varie indagini NDT: indagini soniche, ultrasoniche, ai martinetti piatti e termografiche ad infrarosso.

L'indagine sonica è una tecnica NDT, basata sull'utilizzo di impulsi meccanici a frequenze sonore (20-20000 Hz), utile per individuare ed analizzare le proprietà ed i cambiamenti delle caratteristiche fisiche della muratura a seguito di interventi di consolidamento (6).

L'indagine ultrasonica, basata sullo studio delle anomalie della velocità di propagazione delle onde acustiche a frequenze comprese nell'intervallo 35-50 kHz, è un importante tecnica NDT

per determinare le caratteristiche meccaniche ed elastiche di strutture in legno, calcestruzzo e materiali lapidei (5), rilevandone i “difetti” (cipollature, nodi, composizione delle malte, vuoti, zone di scarsa consistenza del materiale, ecc.) ed i possibili spessori degli strati attaccati da parassiti (6).

Le indagini ai martinetti piatti permettono di valutare, sperimentalmente e direttamente, lo stato tensionale di esercizio e di rottura della muratura, nonché il modulo elastico del complesso malta-elementi lapidei (6).

La termografia ad infrarossi (IRT) è una potente metodologia di indagine NDT, basata sulla misura dell'energia termica emessa naturalmente o riflessa da una superficie osservata, per analizzare lo stato di conservazione di un manufatto. Essa può essere adoperata per varie applicazioni, quali il rilievo di dispersioni termiche ed energetiche, l'individuazione di distacchi di intonaco, infiltrazioni d'acqua, ponti termici, carenze e difetti di isolamento, la scoperta di elementi architettonici nascosti ed il riconoscimento degli elementi portanti (7).

### **2.3 Monitoraggio strutturale**

Il monitoraggio strutturale di un bene culturale può essere realizzato attraverso l'integrazione di tecniche classiche NDT per l'analisi dei quadri fessurativi, tecniche di telerilevamento prossimale basate sull'interferometria radar ed indagini di vibrazione sismica ambientale.

Il monitoraggio dei quadri fessurativi rappresenta un'importante metodologia di indagine per valutare eventuali situazioni di dissesto presenti su un edificio in muratura e stabilire se il complesso strutturale si sposta verso nuove e vicine condizioni di equilibrio o verso condizioni di potenziale collasso (6). In questo contesto, è possibile adoperare tecniche di controllo differenti, manuali ed automatiche (quali ad esempio deformometri, trasduttori induttivi e inclinometri), in base alla complessità del fenomeno da monitorare, alla apparente situazione di pericolo ed alla specifica grandezza che si vuole misurare.

L'interferometria radar è una potente metodologia d'indagine NDT in grado di misurare deformazioni superficiali di strutture vibranti con ampiezza inferiore alle centinaia di micron ed una risoluzione variabile in base alle specifiche del sensore (8).

Le indagini per la valutazione della vibrazione sismica ambientale sono condotte per valutare le proprietà dinamiche di una struttura in opera, individuandone gli elementi strutturali più vulnerabili rispetto all'azione di una sollecitazione sismica (9).

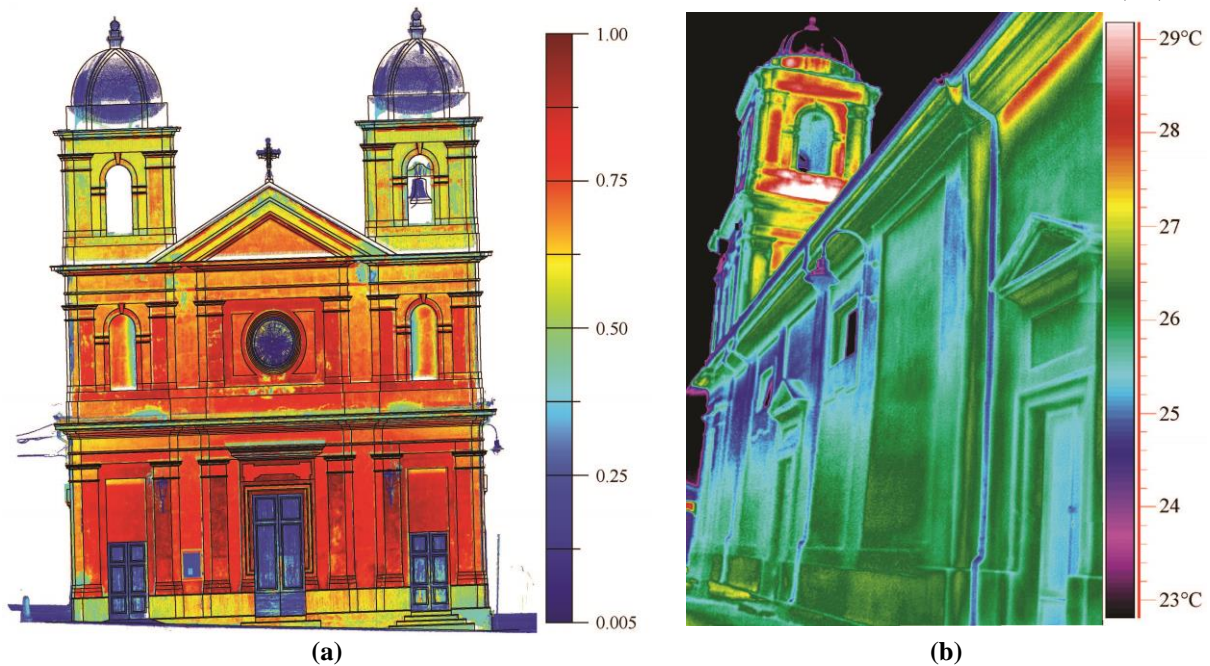
## **3. Alcune Applicazioni**

In questa sezione vengono riportati alcune applicazioni relative all'integrazione di tecniche classiche di misura NDT e sensori di telerilevamento prossimale, per il controllo ed il monitoraggio di beni culturali in area sismica.

In Figura 1a, viene illustrata la mappa di riflettività laser 3D della facciata di un edificio in cemento armato a valenza storico-religiosa, opportunamente sovrapposta ad un rilievo geometrico-strutturale dell'edificio ottenuto da misure classiche NDT. A tal proposito, è stato adoperato uno Z+F IMAGER® 5010c, un TLS a differenza di fase con lunghezza d'onda della luce laser pari a 1.5µm e quindi conforme alla classe di pericolosità 1 (EN 60825-1).. I risultati sperimentali hanno dimostrato un buon accordo tra i rilievi TLS e quelli classici per la ricostruzione 3D del manufatto, delle degradazioni superficiali e morfologie di collasso (10).

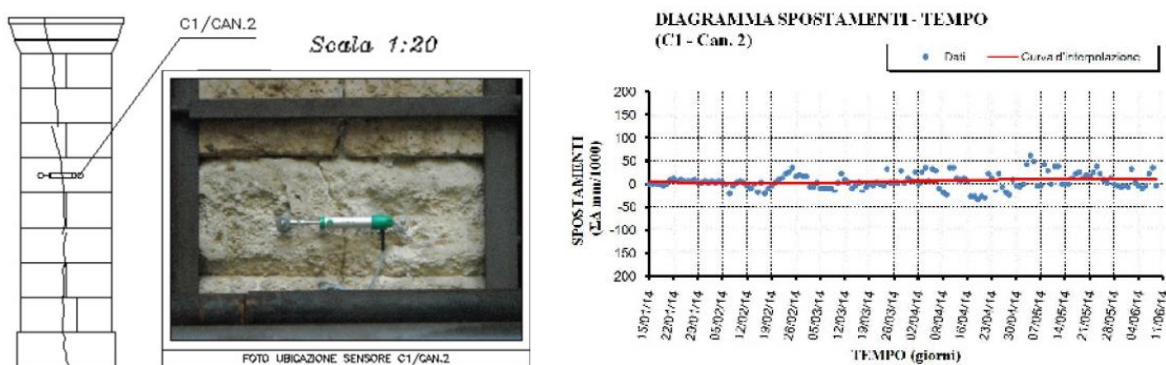
In Figura 1b, viene illustrata l'immagine termografica del prospetto laterale relativo allo stesso edificio in cemento armato. A tal proposito, è stata utilizzata una termo-camera ad immagini Avio InfReC R300SR-S, capace di misurare variazioni di temperatura tra -40°C e 120°C corrispondenti a lunghezze d'onda comprese tra i 7.4µm e 12.4µm, con una risoluzione di 0.03°C a temperatura ambiente di 30°C. Le indagini termografiche permettono di rilevare anomalie termiche tra la sommità e la base del colonnato dell'edificio, dovute a possibili fenomeni di degrado del materiale della struttura. Il confronto delle indagini termografiche

con prove dirette su campioni di materiali, ha permesso di ricollegare le anomalie termografiche alle discontinuità tra le superfici di base, il calcestruzzo di copriferro e gli intonaci, ascrivibili a fenomeni di carbonatazione del calcestruzzo e all'aerosol marino (10).



**Figura 1. Indagini NDT di rilievo geometrico-strutturale e controllo sui materiali per un edificio in cemento armato a valenza religiosa. (a) Mappa di riflettività laser 3D (in falsi colori RGB), sovrapposta ad un rilievo classico della facciata (in nero). (b) Immagine termografica del prospetto laterale del manufatto.**

In Figura 2, sono illustrati alcuni risultati significativi del monitoraggio dei quadri fessurativi per un edificio in muratura ordinaria a valenza storico-architettonica. Il sistema di monitoraggio automatico, utilizzato per monitorare il comportamento del colonnato dell'edificio, è formato da 3 centraline con 8 canali di acquisizione, per un totale di 18 sensori (18 punti di misura), di cui 14 trasduttori rettilinei e 4 inclinometri biassiali. Tale sistema ha permesso di effettuare letture in modo continuo degli spostamenti delle fessure principali e le variazioni angolari fra gli assi ortogonali della struttura indagata ad intervalli di 2 h.



**Figura 2. Monitoraggio dei quadri fessurativi per un elemento strutturale di un edificio in muratura ordinaria a valenza storico-architettonica.**

#### 4. Conclusioni

In questo lavoro, vengono illustrate le potenzialità di alcune delle più moderne tecniche di indagine NDT, impiegate nelle attività di rilievo, di valutazione dello stato di conservazione e di monitoraggio dei beni culturali, a supporto ed integrazione delle attività di restauro e consolidamento di edifici soggetti a tutela. Gli esempi applicativi qui descritti mettono in evidenza i benefici di alcune tecniche di telerilevamento prossimale per il monitoraggio materico-strutturale di un bene, in termini di risoluzione, non invasività e tempo di

acquisizione. Inoltre, si mostra l'importanza di un sistema di monitoraggio NDT per (i) valutare lo stato di conservazione di un manufatto, (ii) definire un coefficiente di sicurezza di una struttura, (iii) creare una metodologia di indagine "routinaria" per un monitoraggio continuo nel tempo e interrogabile in tempo reale. La scelta di abbinare diversi sensori nasce dall'esigenza di monitorare l'eventuale dissesto di un edificio in tutte le sue manifestazioni.

### Ringraziamenti

Le applicazioni illustrate nel presente lavoro sono state ottenute nell'ambito dell'infrastruttura sviluppata all'interno del Progetto PON Massimo (Monitoraggio in Area Sismica di Sistemi Monumentali), inserito nel programma PON R&C 2007-2013, finanziato dal Ministero dell'Università, dell'Istruzione e della Ricerca (MIUR).

### References

1. F. Soldovieri, J. Dumoulin, N. Masini and E. Utsi, "Noninvasive Sensing Techniques and Geophysical Methods for Cultural Heritage and Civil Infrastructures Monitoring", *International Journal of Geophysics*, Vol. 2011, pp. 2, 2012.
2. D.M. McCann and M.C. Forde, "Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures", *NDT and E International*, Vol. 34, No. 2, pp. 71-84, 2001.
3. A. Montuori, I. Gaudiosi, A. Costanzo, A. Vecchio, A. Gervasi, E. Bonali, M. D'Amico, E. Russo, M. Minasi, D. Romano, S. Falcone, C. La Piana, M.F. Buongiorno, M. Musacchio, I. Guerra, G. Porco, S. Stramondo, G. Casula, M.M. Tiberti, A. Caserta, M. Chiappini, F. Speranza, F. Doumaz, M.G. Bianchi, G. Luzi, M.I. Pannaccione Apa, L. Compagnone, M. Cuomo, M. De Marco, "Una metodologia di indagine basata su tecniche NDT per la mitigazione del rischio sismico di beni storici soggetti a tutela", *Giornale delle Prove non Distruttive - Monitoraggio Diagnostica (PnD-MD)*, Settembre 2014, in press.
4. D.M. McCann and M.C. Forde, "Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures", *NDT and E International*, Vol. 34, No. 2, pp. 71-84, 2001.
5. G. Casula, S. Fais, and P. Ligas, "Experimental Application of 3-D Terrestrial Laser Scanner and Acoustic Techniques in assessing the quality of stones used in monumental structures", *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, Vol. 4, No. 1, pp. 45-56, 2009.
6. G. Porco, D. Romano, G. F. Valer Montero, "Le tecniche NDT per il controllo dei materiali e delle strutture in ingegneria civile", Convegno: il ruolo dei controlli NDT per le verifiche di affidabilità e per le attività di manutenzione, *MADEexpo 2012*.
7. X.P.V. Maldague, "Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing", *Wiley, New York*, 2001.
8. G. Luzi, O. Monserrat, and M. Crosetto, "Real Aperture Radar interferometry as a tool for buildings vibration monitoring: Limits and potentials from an experimental study", *10th International conference on vibration measurements by laser and noncontact techniques 2012, Ancona, Italy*, pp. 309-317, 27-29 June 2012.
9. Y. Nakamura, "Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications", *Proc. of 12th World Conference of Earthquake Engineering, New Zealand*, 2000.
10. A. Costanzo, M. Minasi, A. Montuori, G. Porco, M. Musacchio, G. Casula, M.F. Buongiorno, "Tecniche di indagine NDT per l'analisi dello stato di conservazione di edifici a valenza storico-artistica", *Giornale delle Prove non Distruttive - Monitoraggio Diagnostica (PnD-MD)*, Settembre, 2014, in press.