

# Strutture architettoniche monumentali

## Metodologie innovative di rilievo e di indagine non distruttiva

di Giuseppe Giunta

Il presente articolo illustra alcune metodologie innovative che utilizzano tecniche di rilievo fotogrammetrico e tecniche d'indagine non invasiva (georadar, termografia, spettrometria di fluorescenza di raggi X portatile) e che trovano applicazione nel restauro conservativo e nella manutenzione di una struttura monumentale. Queste metodologie sono state applicate da EniTecnologie su grandi strutture architettoniche come la Facciata della Basilica di San Pietro ed il Duomo di Milano; alcuni risultati salienti vengono qui presentati. Vengono sottolineate le notevoli ricadute che possono derivare dall'applicazione di queste metodologie, a livello d'interventi di restauro o di manutenzione programmata, a livello documentale ed a livello di fruizione del bene culturale.

**A** livello diagnostico, un progetto di restauro conservativo di una struttura monumentale può utilmente avvalersi di tecniche di rilievo architettonico e di tecniche d'indagine non invasiva per acquisire informazioni sullo stato di conservazione del monumento.

Tra le tecniche di rilievo architettonico, quelle fotogrammetriche digitali forniscono un sostanziale apporto alla progettazione delle attività diagnostiche ed all'intervento *in situ* [1, 2]. Negli anni recenti queste tecniche hanno visto importanti sviluppi, con l'introduzione della fotogrammetria digitale speditiva Cyclop [3] e della tecnica di laser scanning [4].

Per quanto riguarda le tecniche d'indagine non invasiva, il georadar presenta maggiore versatilità ed efficacia rispetto alla tomografia sonica, soprattutto alla presenza di un paramento di pietra o di un accesso difficoltoso alla struttura in esame [5, 6]. La termografia può fornire informazioni sullo stato superficiale del materiale lapideo [7], complementari a quelle di profondità, ottenibili dall'indagine georadar.

Nel progetto di restauro della Facciata della Basilica di S. Pietro, in cui EniTecnologie ha operato quale partner tecnico-scientifico della Fabbrica di San Pietro, tutte le tecniche sopra citate hanno trovato estesa applicazione [8, 9]. Per quanto riguarda il georadar, è stata sviluppata una procedura che consente la restituzione dei dati nel modello fotogrammetrico tridimensionale in ambiente Cad [10].

G. Giunta, EniTecnologie SpA - Dipartimento di Chimica Fisica - Via Maritano, 26 - 20097 San Donato Milanese (MI).  
ggiunta@enitecnologie.eni.it

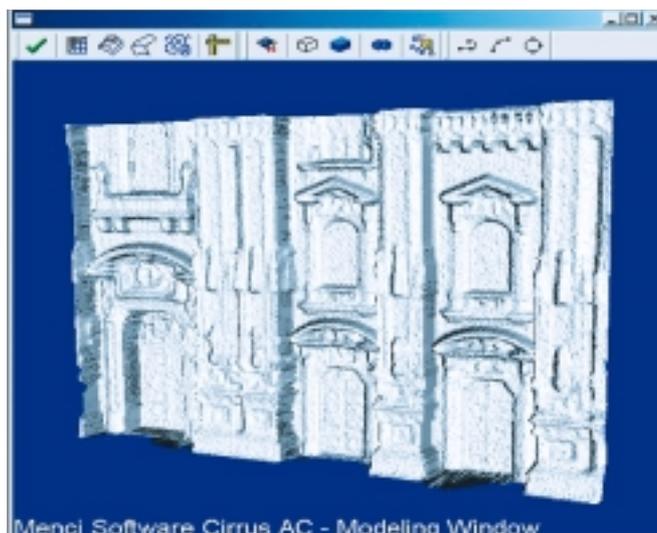


Figura 1 - Immagine del modello vettoriale di una porzione inferiore della facciata del Duomo di Milano, ottenuta mediante rilievo laser scanning

Anche la spettrometria di fluorescenza di raggi X (Xrf) portatile presenta potenzialità interessanti nel campo dei beni culturali, come testimoniano alcune sperimentazioni mirate allo studio di fenomeni di degrado della pietra, delle caratteristiche di reperti archeologici, di superfici affrescate e di decorazioni pregiate su statue in pietra [11, 12].

Di seguito si riporta una breve descrizione delle tecniche di rilievo architettonico e di indagine non invasiva sopra menzionate, corredata da alcuni esempi di applicazione particolarmente significativi. Nella parte finale vengono discusse brevemente le prospettive a livello applicativo per queste stesse tecniche, soprattutto nell'ottica di un loro utilizzo integrato.

### Tecniche di rilievo architettonico

#### Laser scanning

Le strumentazioni laser scanner ad alta risoluzione, sia di tipo bidimensionale sia tridimensionale, operano sulla base del tempo di volo, cioè il tempo che il raggio laser impiega a percorrere la distanza tra il soggetto bersaglio e la postazione di misura. La notevole quantità di dati acquisibili consente di ottenere elevate precisioni spaziali riguardo alla superficie della struttura architettonica in esame. La rapida evoluzione tecnologica di strumentazioni di questo tipo ha stimolato non poco lo studio delle problematiche inerenti al rilievo e la rappresentazione di modelli tridimensionali [4].

In particolare sono stati sviluppati algoritmi per una rapida visualizzazione ed eventuale modifica dei dati sperimentali. Anche in presenza di una certa carenza di dati sperimentali, che

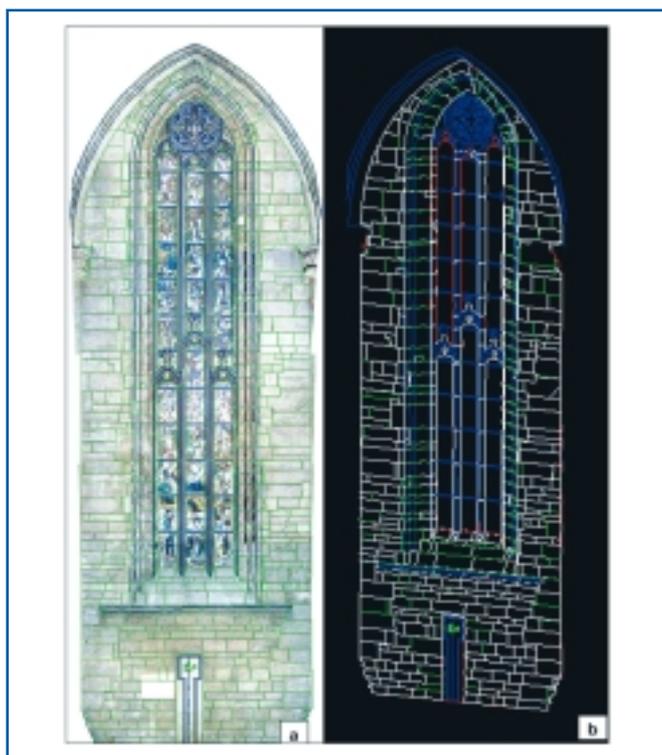


Figura 2 - Ortofotopiano di una parete interna del Duomo di Milano, con sovrapposizione della restituzione fotogrammetrica digitale (a) e corrispondente modello fotogrammetrico 3D in ambiente Cad con tematizzazione riguardante i materiali costituenti (scala 1:20) (b)

talvolta si verifica per particolari geometrici quali spigoli, fratture, decorazioni ed altro, opportuni procedimenti di interpolazione consentono di raggiungere comunque una precisione spaziale adeguata (5-25 mm). Per il rilievo di grandi strutture architettoniche, ricche di aggetti e sculture, è necessario prevedere punti di presa opportunamente distanziati, compatibilmente con gli spazi disponibili, con la densità di punti sperimentali e la precisione richieste.

Il prodotto del rilievo laser scanning è un insieme di punti vettoriali relativi alla superficie della struttura indagata, dal quale viene generato un ortofotopiano generale. Esempio tipico è quello di pareti interne od esterne di un edificio architettonico (Figura 1). Un rilievo laser scanning assume particolare validità nella fase iniziale di un progetto di restauro o di manutenzione programmata.

### Fotogrammetria digitale

La fotogrammetria è una tecnica basata su processi di trasformazione di prese fotografiche prospettiche, fondamentali nella realizzazione del rilievo topografico e nella documentazione di una struttura architettonica. Essa consente la ricostruzione tridimensionale degli oggetti e la loro rappresentazione grafica in scala, senza richiedere un contatto fisico con gli oggetti stessi. Un rilievo fotogrammetrico si traduce in dati numerici, disegni, immagini, tecnicamente definite coordinate, carte od ortofoto-proiezioni [1, 2]. L'elaborazione di un'immagine digitale, richiede che sia stabilita una corrispondenza univoca tra i punti dell'oggetto rappresentato e quelli dell'immagine stessa (processo di georeferenziazione). Tipicamente, il raddrizzamento differenziale dei vari fotogrammi prodotti porta ai cosiddetti or-

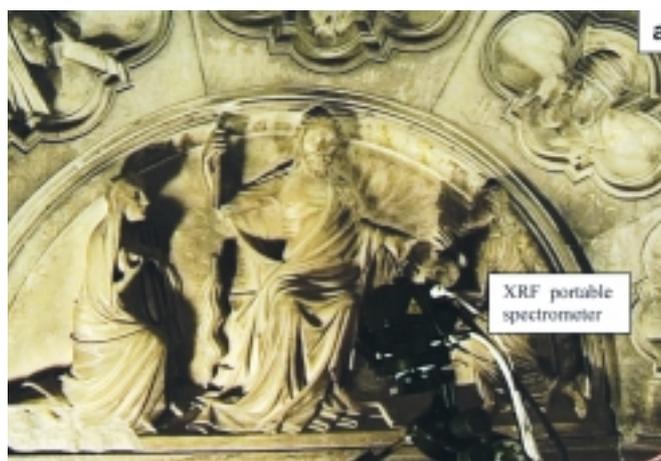


Figura 3a - Immagine fotografica della scultura in marmo di candoglia situata nel Duomo di Milano, Portale della Sacrestia, contenente lo spettrometro Xrf utilizzato per l'analisi chimica delle decorazioni

tofotopiani (Figura 2a) od ortofotocarte. L'ortofotografia assicura una vastità d'informazioni e di dettagli topografici, che non potrebbero mai essere ottenuti attraverso una cartografia tradizionale.

La restituzione tridimensionale dei tematismi strutturali è ottenuta mediante un processo altamente critico e la rappresentazione dell'oggetto dipende non solo dalla sua geometria ma anche da una lettura interpretativa (Figura 2b). La risoluzione geometrica e la calibrazione delle immagini sono fattori decisivi per la definizione della precisione del sistema. Il risultato del rilievo fotogrammetrico (ortofotopiani e modello tridimensionale) può essere integrato in ambiente Cad, con quello prodotto dal laser scanning.

### Fotogrammetria speditiva - Cyclop

Cyclop è un sistema di rilievo fotogrammetrico "monocamera", che trasferisce a livello digitale la maggior parte dei vantaggi di un sistema "bicamera" [3]. Esso è costituito da una camera di ripresa, montata su una barra di supporto, che viene tralasciata rigidamente lungo la base. Le prese stereoscopiche che si realizzano sono prive di parallassi d'altezza. Il sistema consente di utilizzare qualsiasi tipo di camera digitale, purché sia noto l'orientamento interno.

Il sistema Cyclop è dotato di un software per il trattamento delle immagini digitali, la misura e la restituzione vettoriale tridimensionale del soggetto selezionato. La semplicità d'uso e la limitata necessità di risorse computazionali richieste, lo rendono fruibile anche su Pc portatile, consentendo il controllo 3D delle prese direttamente *in situ*.

L'utilizzo delle moderne tecniche di fotogrammetria digitale apre al sistema Cyclop un ampio spettro di possibili applicazioni nel rilevamento di edifici, statue, reperti archeologici e oggetti museali. In Figura 3 viene mostrata una ripresa fotogrammetrica digitale, con la restituzione del corrispondente modello tridimensionale di un bassorilievo di marmo situato nel Duomo di Milano. A partire dal modello fotogrammetrico Cad di questa stessa scultura, è stata studiata la composizione chimica superficiale, soprattutto in corrispondenza di zone colorate e decorate, utilizzando uno spettrometro Xrf ed un colorimetro portatili [11].

Anche il modello vettoriale tridimensionale ottenibile attraverso

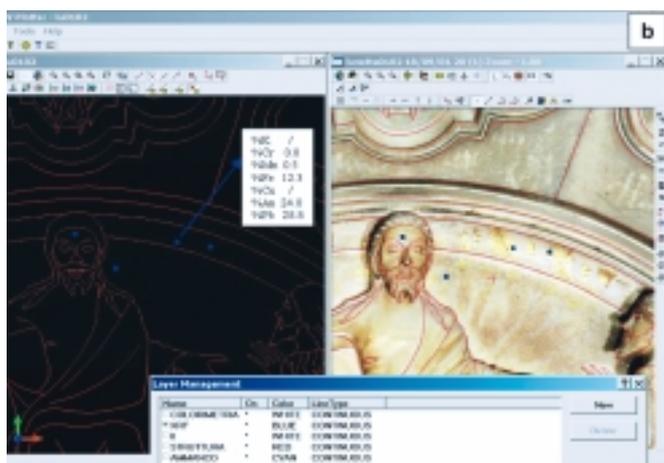


Figura 3b - Ripresa fotografica digitale mediante Cyclop, con il corrispondente modello tridimensionale Cad in scala 1:10. La stessa figura mostra le posizioni geometriche dei punti d'analisi Xrf (punti blu, lato destro) e la relativa composizione chimica (lato sinistro)

questo tipo di rilievo può essere integrato in quello più generale, prodotto dal rilievo fotogrammetrico digitale, con opportuna traslazione del sistema di riferimento.

## Tecniche di indagine non invasiva

### Georadar

L'imaging georadar, indicato anche come Gpr (Ground penetrating radar), è una tecnica che utilizza onde elettromagnetiche inviate sulla superficie dell'oggetto in esame da un'antenna, che viene movimentata sulla superficie stessa in modo controllato. L'antenna stessa riceve il segnale riflesso (eco) [5, 6]. La tecnica Gpr è particolarmente efficace nell'indagine su materiali non conduttori, e per rivelare la presenza d'oggetti metallici all'interno dei materiali stessi. I tempi d'indagine sono relativamente contenuti, il che consente l'ispezione di strutture architettoniche di notevoli dimensioni. Il segnale riflesso contiene una serie d'informazioni sulla natura e sullo stato fisico interno dell'oggetto (ad esempio, presenza di fratture, cavità, componenti di natura chimica o fisica diversa, umidità ecc.). Il risultato di un rilievo è una radargrafia, in pratica una sezione dell'oggetto, dove una delle dimensioni rappresenta la linea di scansione dell'antenna e l'altra definisce un intervallo temporale (tempo di volo dell'onda), che, nota la velocità di propagazione dell'onda radar all'interno del materiale, si trasforma in una dimensione spaziale (profondità). Tipicamente la profondità investigata è compresa tra 0,5 e 10 metri, secondo le condizioni sperimentali prescelte.

Le strumentazioni utilizzate da EniTecnologie sono la Sir 10B della Gssi e la Spr Scan 3D della Era Technology, con antenne la cui frequenza di lavoro va da 200 MHz fino a 2 GHz. L'analisi dei dati viene effettuata mediante programmi dedicati come Radan o Reflexw 3D, che lavorano sotto piattaforma Windows. Il primo passo nell'analisi dei dati sperimentali prevede l'identificazione dell'origine temporale delle strutture radar (orizzonte della superficie esterna), perché da ciò dipende la misura delle profondità. Il processo d'elaborazione e d'interpretazione dei dati fornisce delle sezioni bidimensionali stratigrafiche che descrivono le caratteristiche strutturali del campione. Il modello fotogrammetrico in ambiente Cad, rivisto nelle parti interessate dai rilievi radar, viene utilizzato per predi-

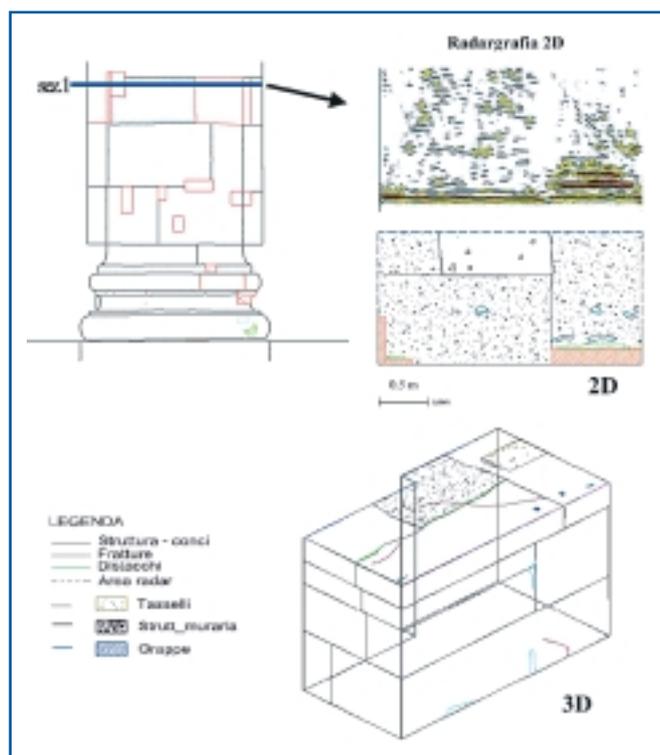


Figura 4 - Schema della procedura d'interpretazione strutturale dei dati georadar acquisiti su una lesena della Facciata di San Pietro. Integrazione vettoriale del modello fotogrammetrico in ambiente Cad e modellazione strutturale 3D di una porzione di lesena

sporre l'inserimento sia delle radargrafie (immagini bitmap) sia delle sezioni strutturali interpretate (layer vettoriale). Questa tecnica è stata utilizzata in maniera estesa nell'ambito del progetto di restauro della Facciata della Basilica di San Pietro in Vaticano. In pratica sono stati sottoposti ad indagine tutti gli elementi strutturali più importanti (grandi lesene, grandi colonne, zone interessate da grandi lesioni). In Figura 4 è mostrata la modellazione strutturale tridimensionale di una grande lesena, ottenuta integrando i risultati ottenuti dai rilievi georadar con dati geometrici e tematici. Le sezioni georadar, interpretate in termini tematici (travertino, struttura muraria, cavità, distacchi, fratture, tasselli, grappe metalliche), definiscono le geometrie dei domini corrispondenti ai materiali presenti, fino alla profondità d'indagine considerata. Sono state ottenute buone informazioni sullo spessore e sulle geometrie di costruzione dei blocchi di pietra (spessori variabili tra 40 e 100 cm), sui tasselli di travertino e sulla muratura che si trova a ridosso dei blocchi. Confrontando i risultati ottenuti dall'analisi fotogrammetrica con i dati georadar, si è ottenuta una buona corrispondenza fra numero, posizione delle fratture e dei tasselli, ed entità dei movimenti strutturali. Dal modello Cad tridimensionale dell'intera lesena, ed applicando ad ogni elemento strutturale un materiale rappresentativo, è stato realizzato un modello sintetico del solido che evidenzia le geometrie interne.

### Termografia

La tecnica fornisce una mappa termica della superficie di un materiale, rilevando la radiazione infrarossa emessa dal materiale stesso. L'informazione proviene da una profondità di qualche centimetro e permette di rivelare situazioni critiche

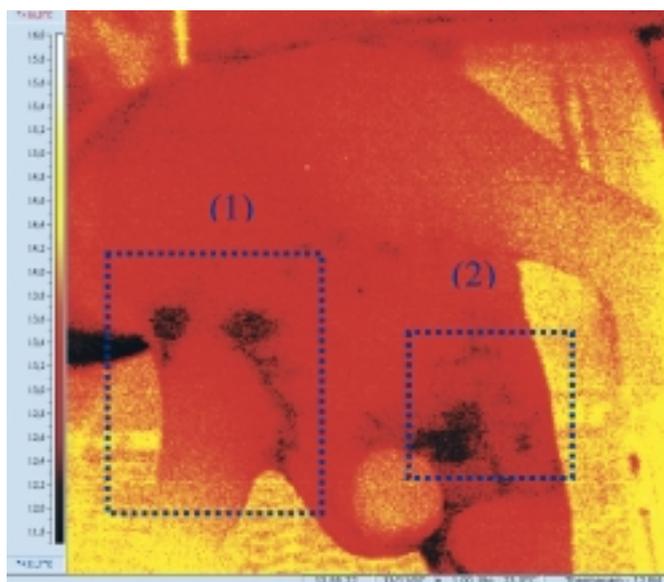


Figura 5 - Mappa termografica acquisita sulla mano di una statua in travertino, che si trova sulla parte alta della Facciata della Basilica di San Pietro: lesione e distacco della stuccatura (1), stuccatura staccata ed biofouling (2)

che, in un intervento di restauro architettonico, possono riguardare la presenza d'elementi strutturali nascosti, lesioni, distacco d'intonaco, elementi metallici, ristagno d'umidità. Queste situazioni particolari sono identificate all'interno della mappa termica da regioni più fredde o più calde, secondo i casi, rispetto al fondo termico della porzione di oggetto investigata.

L'interpretazione del risultato dell'indagine termografica necessita della conoscenza delle caratteristiche di emissione, riflessione ed assorbimento dell'energia termica per i materiali in esame. Il parametro di riferimento più utilizzato è il fattore di emissività, che, per materiali edili di comune utilizzo, presenta valori molto vicini tra loro (tra 0,85 e 0,95).

Così come il georadar, la termografia è stata utilizzata ampiamente nel progetto di restauro della Facciata della Basilica di San Pietro, sopra ricordato. La strumentazione impiegata è una termocamera digitale ThermaCAM SC1000 della Inframetrics FLIR, con risoluzione termica di 0,07 °C. Le applicazioni hanno riguardato il controllo dello stato di conservazione di elementi architettonici, quello delle caratteristiche di stuccature applicate e la verifica dell'efficacia del trattamento biocida effettuato sulla pietra dopo l'intervento di pulitura [8, 9].

A titolo di esempio si riporta una mappa termografica acquisita su un particolare di una statua in travertino, che si trova sulla parte alta della Facciata della Basilica di San Pietro (Figura 5). Le zone più fredde (contraddistinte da colorazione più scura nella mappa) si trovano in corrispondenza di lesioni ripristinate in passato con stuccature, che attualmente si trovano in una situazione di distacco dalla superficie della pietra, con conseguente ristagno di umidità all'interfaccia tra stucco e substrato lapideo. Le restanti zone fredde sono anch'esse ricche di umidità; in questo caso, tuttavia, la causa si deve far risalire alla presenza consistente di microrganismi (biofouling).

## Prospettive

Il problema della conservazione di un bene culturale necessita prima di tutto di una sufficiente comprensione dei fenomeni,

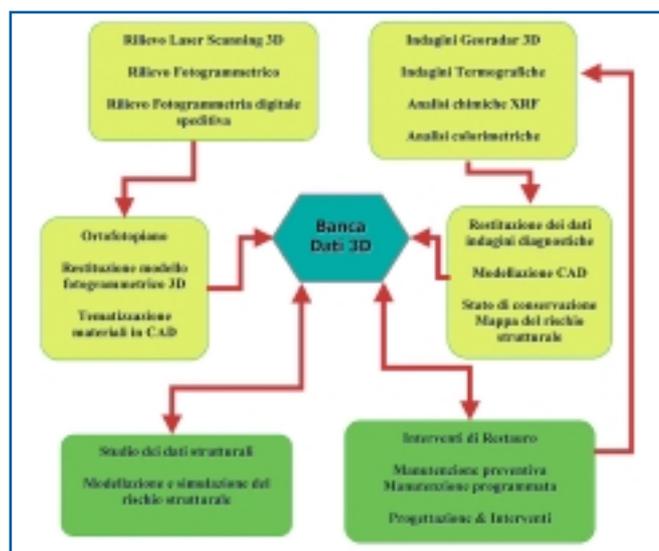


Figura 6 - Schema a blocchi della metodologia proposta che prevede l'utilizzo integrato di tecniche di rilievo architettonico e di tecniche diagnostiche all'interno di un progetto di restauro, o di manutenzione programmata, di una struttura architettonica monumentale

che sono alla base del degrado dei materiali costituenti, quindi di adeguati interventi che consentano il ripristino di una condizione adeguata per il bene stesso e che, possibilmente, siano in grado di rallentare il degrado futuro. Il tutto, però, nel rispetto della valenza storica culturale che il bene rappresenta.

Difficilmente una tematica di tale complessità e criticità, può essere affrontata in maniera efficace senza un approccio multidisciplinare e senza il coinvolgimento di professionalità adeguate. L'approccio sintetizzato in Figura 6, che rappresenta un'ulteriore evoluzione rispetto a quello utilizzato da EniTecnologie nel progetto di restauro della Facciata della Basilica di San Pietro, si configura come valida risposta al problema sopra menzionato. Secondo tale approccio, la fase di rilievo viene affrontata con una strategia che prevede l'utilizzo di tecniche di rilievo architettonico tra loro complementari (laser scanning, fotogrammetria digitale, fotogrammetria speditiva Cyclop) per ottenere un "modello virtuale" tridimensionale georeferenziato della struttura in esame, in ambiente Cad.

Tale modello costituisce la base geometrica di una "Banca Dati 3D", sulla quale vengono aggiunte ed integrate le informazioni provenienti dalle indagini sullo stato di conservazione dei materiali costituenti, sia a livello superficiale sia in profondità. L'integrazione dei dati diagnostici con quelli di rilievo strutturale rimane l'elemento qualificante dell'approccio proposto.

Tecniche d'indagine quali georadar, termografia, spettrometria di fluorescenza di raggi X portatile, colorimetria, possono rivelarsi strumenti molto efficaci, non solo a scopo diagnostico ma anche per verifiche sulla qualità degli interventi effettuati. La versatilità delle tecniche sopra citate e la continua evoluzione tecnologica della strumentazione impiegata fa intravedere ulteriori spazi innovativi a livello applicativo.

La validità dell'approccio trova ulteriori importanti conferme nel lavoro che EniTecnologie sta portando avanti sul Duomo di Milano. Un approccio di questo tipo è sicuramente estendibile ad altri settori, in primo luogo a quello dell'archeologia, nel qual caso è prospettabile un rilievo tridimensionale del sito archeologico mediante laser scanning e fotogrammetria di-

gitale speditiva, eventualmente ripetuto durante le fasi di scavo archeologico e successiva georeferenziazione nel modello Cad sia delle fasi stratigrafiche sia dei reperti ritrovati nello stesso sito. Una banca dati georeferenzata, quale quella che si crea attraverso un approccio di questo genere, costituisce anche una base per raccogliere tutte le informazioni relative ad eventuali interventi di restauro o di manutenzione che potranno essere richiesti in tempi successivi sul bene culturale in questione. Un tale prodotto informatico può aprire nuovi spazi anche a livello di fruizione. Il che potrebbe rivelarsi importante per richiamare più risorse finanziarie verso il settore dei beni culturali.

### Bibliografia

- [1] M. Fondelli, Trattato di fotogrammetria urbana e architettonica, Edizioni Laterza, 1992.
- [2] K. Kraus, Fotogrammetria (trad. S. Dequal), Levrotto & Bella, Torino, 1998.
- [3] L. Menci, F. Rinaudo, Cyclop: acquisizione e restituzione di prese stereoscopiche senza punti di appoggio, Atti del 4° Congresso ASITA 2001, Genova, 3-6 ottobre 2000, Vol. 2, 1087.
- [4] L. Menci, A. Cabrucci, Fotogrammetria digitale e scansione laser, similitudini e differenze: la nostra esperienza, Atti del 5° Congresso ASITA 2001, Rimini, 9-12 ottobre 2001, Vol. 2, 1043.
- [5] J.H. Bungey, S.G. Millard, *Proc. Instn. Civ. Engrs. Structs. & Bldgs.*, 1993, **99**(5), 173.
- [6] D.J. Daniels, *Journal of Electronics & Communication Engineering*, 1996, **8**, 165.
- [7] C. Romeo, La termografia ed il suo impiego nell'analisi del manufatto architettonico, Suppl. 13° Notiziario del Dipartimento Casa - Città, Politecnico di Torino, 1996.
- [8] G. Giunta, G. Calloni, Innovative applications of non-destructive techniques in the restoration of the St. Peter's Façade in Vatican, Atti del Inter. Conf. "Quarry-Laboratory-Monument", Pavia 2000, Pavia, 26-30 settembre 2000, Vol. 1, 333.
- [9] G. Perego, *Chimica e Industria*, 2001, **83**(1), 51.
- [10] G. Giunta, G. Calloni, Ground Penetrating Radar applications on the Façade of St. Peter's Basilica in Vatican, Atti del 15° World Conference on Non-Destructive Testing, Roma, 15-21 ottobre 2000, 172.
- [11] P. Leutenegger *et al.*, *Nucl. Instr. & Methods in Phys. Res. A*, 2000, **438**, 458.
- [12] G. Giunta *et al.*, An Innovative High-Resolution Survey Based on Integrated non Destructive Analyses Applied to Decorated Marble Sculptures, ART-2002, 7° Conf. Inter. Non-Destructive Testing and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage, 2-6 giugno 2002, Antwerp (Belgium), in corso di stampa.

---

**Ringraziamenti** - Un ringraziamento per la collaborazione tecnica va alla Veneranda Fabbrica del Duomo di Milano ed alla Menci Software di Arezzo. Inoltre un particolare ringraziamento va a Giovanni Perego per l'utile contributo alla discussione.