

# Applicazioni avanzate della fotogrammetria digitale: l'uso della stereofotocarta come supporto per la mappatura tridimensionale di strutture portanti del Duomo di Milano.

Luca MENCI(\*), Giuseppe GIUNTA(\*\*), Francesca CECCARONI(\*), Eleonora DI PAOLA(\*\*),  
Benigno MÖRLIN VISCONTI CASTIGLIONE(\*\*\*)

(\* ) MENCI SOFTWARE s.r.l.

Via Martiri di Civitella, 11 – 52100 AREZZO

Tel. 0575-300552 Fax 0575-355832

Email: [luca.menci@menci.com](mailto:luca.menci@menci.com); [francesca.ceccaroni@menci.com](mailto:francesca.ceccaroni@menci.com)

(\*\*) EniTecnologie S.p.A.

Via Maritano, 26 – San Donato M.se (MI)

Tel. 02-52046640 Fax. 02-52046640

Email: [ggiunta@enitecnologie.eni.it](mailto:ggiunta@enitecnologie.eni.it); [edipaola@enitecnologie.eni.it](mailto:edipaola@enitecnologie.eni.it)

(\*\*\*) VENERANDA FABBRICA DEL DUOMO

Via Arcivescovado, 1 – 20122 Milano

Tel. 02-72022656 Fax. 02-72022419

Email: [fabbrica@duomomilano.it](mailto:fabbrica@duomomilano.it)

## Riassunto

La documentazione delle sofisticate tecniche di indagine diagnostica non distruttiva può avvalersi di un supporto metrico tridimensionale costituito da numerosi modelli stereoscopici orientati e concatenati. La stereofotocarta infatti è un supporto cartografico in grado di fornire, tramite la visione stereoscopica, la navigazione attraverso più fotogrammi, la misura tridimensionale (posizioni, distanze, aree, volumi), il tracciamento di entità strutturali e la tematizzazione dei materiali. Questo lavoro presenta un'applicazione della tecnica Fotogrammetrica e di quella geofisica GPR (Ground Penetrating Radar) per la valutazione dello stato di conservazione delle strutture portanti interne del Duomo di Milano (finestroni e colonne), inserita all'interno di un Progetto di Manutenzione Preventiva e Programmata della Veneranda Fabbrica del Duomo. L'utilizzo di questi strumenti innovativi ha consentito di aumentare l'efficacia degli interventi di manutenzione sul monumento. Insieme al rilievo fotogrammetrico ed alla restituzione 3D di dettaglio dei blocchi in pietra, si presentano i rilievi strutturali mediante GPR, tecnica che sfrutta fenomeni di propagazione e riflessione d'impulsi radar all'interno di un solido. Tali indagini servono per ottenere informazioni strutturali di notevole importanza quali: lesioni, fratture, spessore dei blocchi e distacchi degli stessi dal corpo murario. I risultati della mappatura delle strutture portanti indirizzano la progettazione dell'intervento di manutenzione. La Fotogrammetria ed il GPR hanno accresciuto la documentazione sullo stato di conservazione del monumento, permettendo di comparare ed integrare i dati forniti dalla restituzione dell'indagine nel modello architettonico 3D - CAD. Tutti i dati confluiscono nella progettazione e realizzazione di una Banca Dati Integrata georeferenziata. Tale Banca Dati Integrata è specifica del monumento e consente di inserire consultare ed integrare i dati strutturali tematizzati con quelli relativi all'intervento di manutenzione preventiva e programmata.

## Abstract

The advanced non-destructive diagnostic surveying techniques can rely for their documentation on a three-dimensional metric support comprising numerous oriented and connected stereoscopic models. The *stereofotocarta*, in fact, is a cartographic support that makes it possible, through the stereoscopic vision, to navigate through many photograms, to measure dimensions (positions, distances, areas, volumes) and to draw structures and material thematic maps. This article introduces an application of the photogrammetric technique and of the geophysical GPR (Ground

Penetrating Radar) one to the evaluation of the load bearing inner structures state of preservation of the Duomo di Milano (in particular the walls with stained glass windows and columns), within the Veneranda Fabbrica del Duomo Plan of Preventive and Programmed Maintenance. The structural survey by GPR is presented together with this photogrammetric survey and detailed stone blocks 3D restitution. This technique is based on the propagation and reflection of radar impulses inside solids. These surveys are useful to obtain very important structural information such as: lesions, fractures, block thickness and their detachment from the masonry. The resulting load bearing structures' maps guide the planning of the maintenance operation. Photogrammetry and GPR increased the documentation about the state of preservation of the monument, making it possible to compare and to integrate the data from survey results into the 3D-CAD architectonic model. All these data join in the plan and in the realization of a georeferenced and integrated data base specific of the monument which allows to insert, consult and integrate thematic structural data with those related to the preventive and programmed maintenance operations.

### Introduzione

La Veneranda Fabbrica del Duomo istituzionalmente investita della conservazione del Duomo, ha da sempre mantenuto attivi i cantieri della cattedrale milanese, programmando gli interventi di restauro in funzione delle priorità strutturali e di sicurezza del monumento, del livello di eventuale degrado dei marmi e degli ornati, tenendo conto delle esigenze di utilizzo del Tempio. In questi ultimi cento anni, che maggiormente sono stati caratterizzati da un costante impegno di restauri, la Veneranda Fabbrica ha affrontato importanti lavori cercando risorse sia economiche sia di personale qualificato e sia di marmo, armonizzando l'attività dei suoi cantieri di Milano e di Candoglia. Per poter individuare con sufficiente sicurezza le priorità sopra indicate, la Veneranda Fabbrica attua un articolato sistema di controllo e di monitoraggio del monumento. Da molti anni, controlli di verticalità dei contrafforti, misure di livellazione di precisione, controlli di vibrazioni indotte da traffico e da sistematiche verifiche sulla falda, fanno parte dell'attività tecnica della Fabbrica e i dati da essi desunti hanno consentito di affrontare imponenti lavori. Per meglio approfondire lo stato delle conoscenze delle strutture dell'edificio, è stato affidato alla ENI Tecnologie il controllo delle pareti del paramento e dei contrafforti, iniziando dal lato Nord con un approfondito rilievo tridimensionale digitalizzato di tutti i conci di marmo e con l'esplorazione della muratura con indagini non distruttive con georadar. Il lavoro presentato in questo articolo si inserisce nell'ambito della complessa e critica problematica della conservazione di una struttura architettonica monumentale [1], frutto di un approccio multidisciplinare e altamente professionale che è divenuto

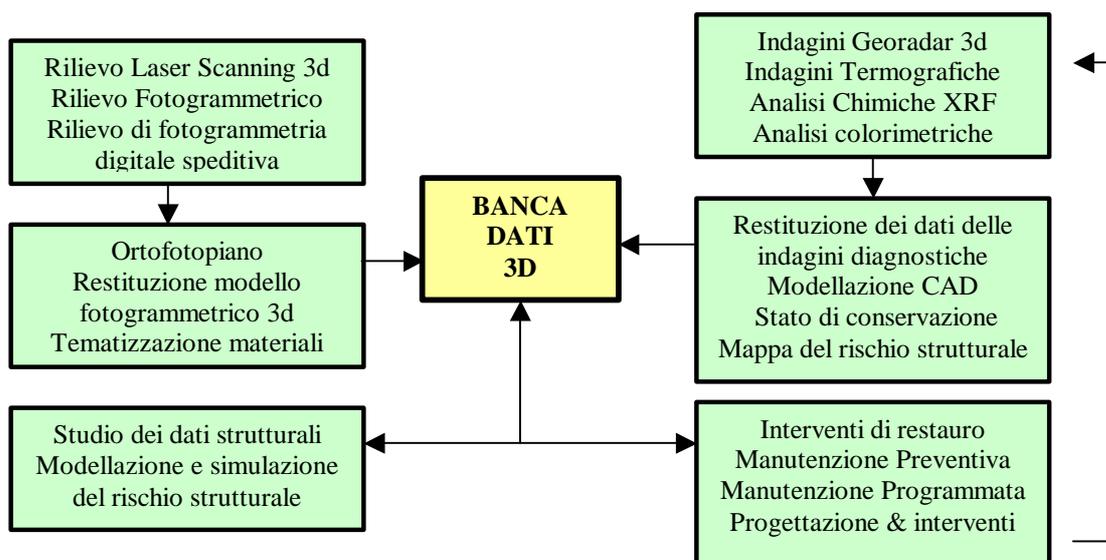


Fig. 1 - Schema a blocchi della metodologia sperimentale che prevede l'utilizzo integrato di tecniche di rilievo architettonico e di tecniche diagnostiche all'interno di un progetto di restauro, o di manutenzione programmata, di una struttura architettonica monumentale.

un caposaldo nell'esperienza pluriennale di EniTecnologie nel settore, già dal progetto di Restauro della Facciata della Basilica di S. Pietro [2,3]. La complessità del lavoro di manutenzione [4] e l'importanza di un monumento come il Duomo di Milano ha spinto verso una soluzione articolata, schematizzata in Figura 1, che EniTecnologie sta realizzando con il supporto di Menci Software. L'elemento più qualificante e innovativo di questo lavoro è proprio l'integrazione dei dati diagnostici, rigorosamente ottenuti con tecniche non distruttive di cui si parlerà in un successivo paragrafo, con quelli del rilievo strutturale, che verranno invece descritti più approfonditamente nel paragrafo seguente.

### **Tecniche di rilievo architettonico:Fotogrammetria digitale**

Negli anni recenti le tecniche di rilievo architettonico hanno visto importanti sviluppi con il diffondersi delle tecnologie fotogrammetriche digitali, l'introduzione del concetto di stereofotocarta, della fotogrammetria digitale speditiva di Cyclop e della tecnica di laser scanning [1,5]. Nel caso delle strutture interne del Duomo di Milano, per la mappatura strutturale, si è scelta la fotogrammetria digitale tradizionale in quanto le superfici da analizzare sono molto grandi, con molti spigoli aggettanti e soprattutto con delle colonne e decorazioni scultoree; si è riservato, invece, l'uso del sistema Cyclop per porzioni più contenute e per riprese più ravvicinate [3] e l'uso del laser scanning per produrre una nuvola di punti meno precisa di inquadramento delle aree. La fotogrammetria, basata su processi di trasformazione di prese fotografiche prospettiche, 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 ortofotoproiezioni. 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 ortofotopiani 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. Il risultato del rilievo fotogrammetrico (ortofotopiani e modello tridimensionale) è ottenuto in ambiente CAD e ha una precisione spaziale dell'ordine del millimetro; sono stati utilizzati i moduli di StereoView della MenciSoftware in tutte le fasi del processo fotogrammetrico. Nel caso applicativo del Duomo di Milano è stato generato un grande

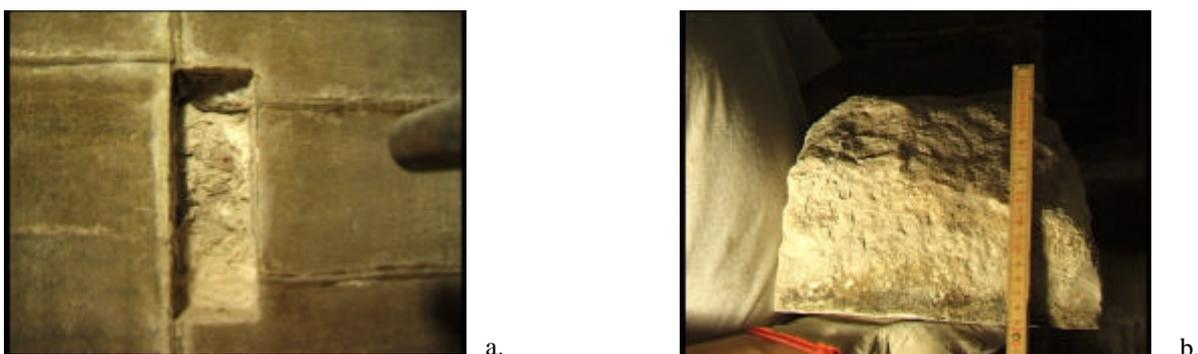


*Fig. 2 Modello fotogrammetrico 3D in ambiente CAD delle strutture indagate nella prima campagna sperimentale con tematizzazione degli elementi costituenti (scala 1:20).*

modello stereoscopico tridimensionale di fotogrammi che rappresenta la stereofotocarta (Fig. 2)[6]. Questa è un supporto metrico-digitale in grado di fornire qualsiasi dato dimensionale direttamente sul modello tridimensionale; in particolare durante il processo di restituzione i singoli blocchi (detti conci) sono stati disegnati come entità separate a cui si possono attribuire caratteristiche specifiche durante le rielaborazioni tematiche. La stereofotocarta è stata poi utilizzata come elemento geometrico di sostegno e di raccordo dei dati scientifici provenienti dalle indagini non distruttive.

### **Tecniche di indagini non invasive: Georadar**

Le tecniche d'indagine non invasiva più utilizzate sono il georadar (indagini in profondità), la termografia (indagini superficiali), la spettrometria di fluorescenza di Raggi X portatile (indagini di composizione chimica) e la colorimetria (indagini sulle alterazioni dei colori) [3], metodi che possono rivelarsi molto efficaci, non solo a scopo diagnostico ma anche per verifiche sulla qualità degli interventi effettuati. Nel caso del Duomo di Milano l'interesse primario è di valutare lo stato di conservazione delle strutture portanti interne, per cui si è privilegiata la tecnica georadar [7] che è in grado di fornire informazioni sullo spessore dei singoli blocchi nonché sulla presenza di eventuali lesioni, fratture o distacchi (Figure 3a e b). Questa tecnica, infatti, sfrutta i fenomeni di propagazione e riflessione all'interno di un solido di impulsi radar emessi da una antenna che viene spostata sulla superficie stessa. La riflessione avviene se si incontrano all'interno della struttura delle superfici riflettenti, che sono associate a fratture, cavità, materiali di natura diversa da quella della matrice, zone con diversi contenuti di umidità ecc. Il segnale radar è traducibile in una sezione spazio-tempo (radargrafia) ortogonale alla superficie. In pratica, il risultato di un rilievo è 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). Le radargrafie sono rappresentate in falsi colori e permettono di rilevare le discontinuità e gli orizzonti di riflessione degli impulsi elettromagnetici (Figura 4a). I tempi d'indagine sono relativamente contenuti e questo consente l'ispezione di strutture architettoniche di notevoli dimensioni. Tipicamente la profondità investigata è compresa tra 0.5 e 10 metri, secondo le condizioni sperimentali prescelte. Le strumentazioni utilizzate 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



*Fig 3. Operazioni di rimozione di un blocco di marmo, identificato dal rilievo georadar come distaccato dal substrato di parete (a). Lo spessore dei blocchi di pietra misurato dopo la rimozione è poi risultato in buon accordo con quello derivato dall'indagine radar(b).*

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 dei profili strutturali tematici che descrivono le caratteristiche strutturali del campione (Figura 4b).

## L'integrazione: ETRadar

L'obiettivo successivo è stato l'integrazione dei dati ottenuti con la tecnica georadar con quelli del rilievo strutturale all'interno del modello georeferenziato in ambiente CAD descritto precedentemente. ETRadar è un applicativo di AUTOCAD 2002 realizzato da MenciSoftware per EniTecnologie per predisporre l'inserimento nel modello fotogrammetrico digitale, ovvero nella stereofotocarta sia delle radargrafie (immagini bitmap) che delle sezioni strutturali interpretate (layer vettoriale); il posizionamento del dato avviene in maniera rapida ed estremamente precisa (Figura 5). Ciascun radargramma acquisisce la posizione nello spazio 3D e fornisce alla banca dati ETRadar informazioni sullo stato di conservazione dei blocchi indagati. Le sezioni georadar, interpretate in termini tematici (marmo, struttura muraria, cavità, distacchi, fratture, tasselli, grappe

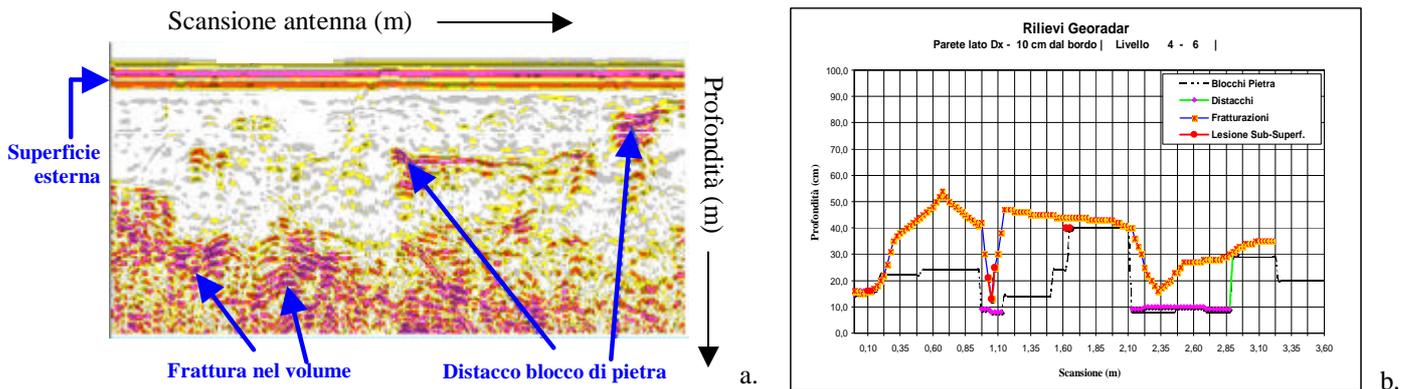


Fig4. Esempio di radargrafia con antenna a 900 MHz (SIR 10B GSSI) e indicazione delle anomalie (a). Esempio di profilo strutturale tematico relativo ad un area (b).

metalliche), definiscono le geometrie dei domini corrispondenti ai materiali presenti, fino alla profondità d'indagine considerata.

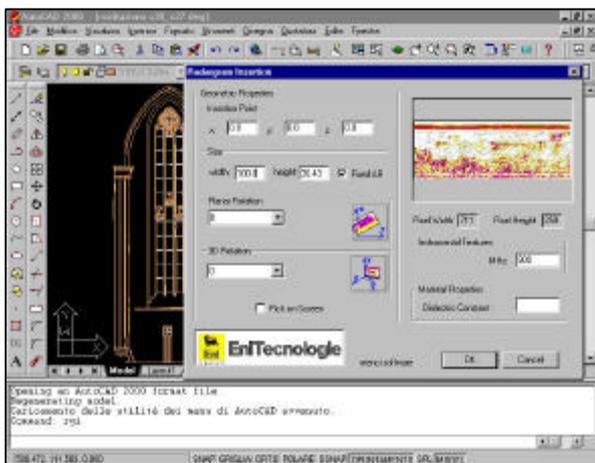


Fig. 5 Procedura d'inserimento georeferenziato dei dati GPR nel modello 3D - CAD con il programma ETRadar.

## Conclusioni

L'integrazione dei dati diagnostici, ottenuti sperimentalmente con sofisticate tecniche non invasive, con quelli del rilievo strutturale, eseguito con l'ausilio dei più avanzati software di fotogrammetria digitale, hanno consentito la creazione di un innovativo modello tridimensionale georeferenziato e tematizzato in ambiente CAD che costituisce la base geometrica per una Banca Dati Integrata 3D. Questa Banca Dati Integrata è specifica del monumento e diventa essenziale sia per guidare gli interventi di manutenzione preventiva e programmata sia per fornire una documentazione precisa e dettagliata dei lavori eseguiti, consultabile in futuro. Infatti consente di inserire, consultare ed

Inoltre, essendo ogni blocco una singola entità geometrica nel modello, con una particolare funzione software, chiamata estrusione, è possibile associare ad ognuno di essi un volume nello spazio ed una colorazione che ne indichi la criticità rispetto a valori prestabiliti (verde=spessore sufficiente; giallo=spessore intermedio; rosso=spessore insufficiente) (Fig. 6). Dal modello CAD tridimensionale, associando ad ogni elemento il proprio spessore ricavato dall'interpretazione delle radargrafie, è stato realizzato un modello sintetico del solido che evidenzia le geometrie interne e quindi le mappe tematiche delle zone critiche (Fig 7 a e b). Confrontando i risultati ottenuti finora dall'analisi fotogrammetrica con i dati georadar, si è ottenuta una buona corrispondenza fra numero e posizione delle fratture e dei distacchi.

integrare tutti i dati strutturali e tematizzati che siano d'interesse. 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.

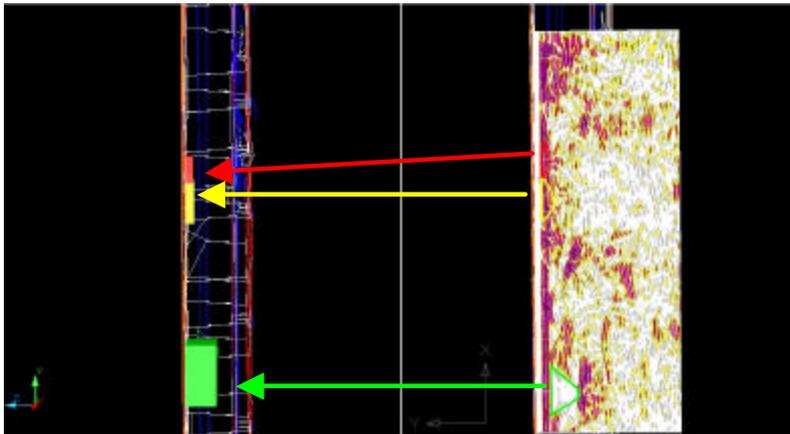
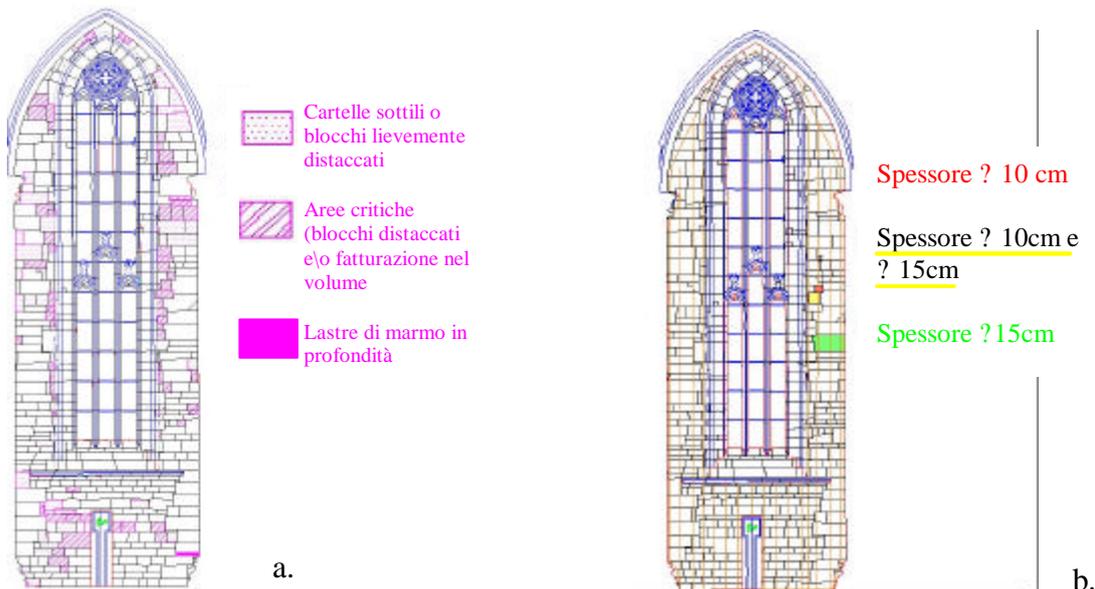


Fig. 6 Interpretazione della profondità dei blocchi nella radargrafia e assegnazione di un volume e di un colore tematico ad ognuno di essi nel modello 3D-CAD (verde=spessore sufficiente; giallo=spessore intermedio; rosso=spessore insufficiente).

Fig. 7 Modello 3D-CAD di un finestrone interno del Duomo di Milano con tematizzazione delle aree critiche (a) e delle estrusioni di volume dei singoli blocchi (b).



## Bibliografia

- [1] G. Giunta, "Strutture architettoniche monumentali. Metodologie innovative di rilievo e di indagine non distruttiva", La Chimica e l'Industria 84, Luglio\Agosto 2002, 61-65
- [2] G. Giunta, G. Calloni, "Innovative applications of non-destructive techniques in the restoration of the St. Peter's Facade in Vatican", Atti del Inter. Conf. "Quarry-Laboratory-Monument", PAVIA 2000, Pavia, 26-30 Settembre 2000, Vol. 1, 333-338.
- [3] G. Giunta, E. Di Paola, P.G. Corda, "An innovative high-resolution survey based on integrated non-destructive analyses applied to decorated marble sculpures", 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)
- [4] L.Rinaldi, B. Mörlin Visconti, "Manutenzione vs. conservazione? Il cantiere del Duomo di milano negli ultimi trent'anni", Atti del XV Congresso Scienza e Beni Culturali, Bressanone, 29 Giugno-2Luglio 1999.
- [5] L.Menci, A. Carucci, "Fotogrammetria digitale e scansione laser, similitudine e differenze: la nostra esperienza", Atti del 5° Congresso ASITA 2001, Rimini, Ottobre 2001
- [6] L. Menci, F. Rinaudo, "StereoFotoCarta: uno strumento per il futuro", Atti del 3° Congresso ASITA 1999, Napoli, Novembre 1999
- [7] J.H. Bungey and S.G. Millard, "Radar inspection of structures" Proc. Instn. Civ. Engrs Structs & Bldgs 99 (5), 1993, 173-186.