

Il rilievo della Basilica del Santo Sepolcro a Gerusalemme

Grazia Tucci, Valentina Bonora

Geomatics and Conservation Lab., DiCR, Università degli Studi di Firenze, via Micheli 8, 50125 Firenze
Tel. 055.2756587 – grazia.tucci@unifi.it, valentina.bonora@archimetro.it

Riassunto

La Basilica del Santo Sepolcro, nella Città Vecchia di Gerusalemme, è un complesso architettonico costituito da ambienti realizzati principalmente dal I secolo al periodo crociato. Un importante evento sismico e un incendio negli ultimi due secoli, e i restauri intrapresi di conseguenza, definiscono lo stato attuale dell'edificio che ospita diverse comunità religiose ed è meta di numerosi pellegrini. La necessità di valutare gli effetti prodotti da un'eventuale ulteriore azione sismica ha costituito per il CABeC (Centro di Ateneo per i Beni Culturali, direttore Prof. P.G. Malesani) dell'Università degli Studi di Firenze, l'occasione per avviare un importante progetto finalizzato alla conoscenza e alla salvaguardia della Basilica. Il presente contributo relaziona unicamente in merito alla fase di acquisizione dei dati, realizzata in tre campagne di rilievo, tra il 2007 ed il 2008. Prossime pubblicazioni illustreranno le elaborazioni effettuate successivamente e gli elaborati prodotti.

Abstract

The Basilica of the Holy Sepulchre in Jerusalem's Old City is an architectural complex consisting of several different structures mainly built between the first Century and the Crusader's age. In the past two centuries a fire and an earthquake damaged the Church. These events and the restoration work consequently undertaken define the current state of the building. In the Basilica, visited by large numbers of pilgrims, various religious communities still coexist. For the CABeC (University Centre for Cultural Heritage, Director Prof. P.G. Malesani) of the University of Florence the need to assess the effects of further seismic action has been an opportunity to undertake a major project aimed to understand and preserve the Basilica. This paper focuses only on the data acquisition, carried out in three main campaigns between 2007 and 2008. Forthcoming publications will illustrate further elaborations, 2D and 3D graphical products.

Presentazione del progetto

Il lavoro illustrato è stato motivato dalla richiesta delle comunità religiose preposte alla Custodia della Basilica del Santo Sepolcro di valutare il rischio sismico cui è esposto questo straordinario complesso architettonico. L'iniziativa attesta anche la volontà delle Comunità Greca-Ortodossa, Francescana e Armena di aderire ad un progetto comune per la conoscenza e la salvaguardia del monumento. E' con questa duplice finalità - di *analisi strutturale* da un lato e di *documentazione* per lo studio e la salvaguardia dall'altra - che è stato condotto il presente rilievo tridimensionale dell'intero complesso. In particolare, nell'analisi della vulnerabilità sismica degli edifici monumentali, la descrizione morfometrica rappresenta un elemento preliminare ineludibile per una corretta interpretazione del comportamento strutturale.

Il presupposto indispensabile per un efficace sviluppo delle indagini è la *affidabilità* e la *completezza* dei dati inerenti la geometria del monumento ed è questa una delle ragioni per cui sono state utilizzate le più innovative metodologie e strumentazioni topografiche per documentare

metricamente lo stato di fatto: l'uso congiunto di gps, stazioni totali, scansioni tridimensionali e fotogrammetria in un vero e proprio “*rilievo metrico integrato*”.



*Figure 1 e 2 –
La facciata della
Basilica e
l'edicola del
Santo Sepolcro al
suo interno
durante i rilievi.*

Anche prescindendo dalle raffigurazioni compendiarie e pressoché simboliche prodotte dai pellegrini fin dal IV - V secolo non è certo questo il primo rilievo che viene effettuato sull'intero complesso. Basti ricordare a questo proposito, partendo da quello di Bernardino D'Amico, corredato di misure e iconograficamente a suo modo efficace, il paziente lavoro di analisi e interpretazione di Padre Corbo, l'accurato rilievo fotogrammetrico di Martin Biddle per l'edicola nonché l'ammirevole restituzione di tutta la struttura effettuata in anni più recenti da un team di colleghi greci. Il nostro gruppo ha dovuto quindi raccogliere una sfida difficile: quale ulteriore contributo si poteva fornire con l'ausilio delle nuove tecnologie oggi a disposizione? Nell'ultimo decennio il laser scanner si è rivelato un potentissimo strumento di rilievo metrico tridimensionale che ha ampliato notevolmente le possibilità di conoscenza del patrimonio monumentale. La terza dimensione, così difficile da dominare e che ci permette di rappresentare le nostre idee, i nostri progetti, di verificare le nostre ipotesi e di descrivere e comunicare lo stato di fatto del costruito, quella terza dimensione che ha ispirato da sempre i modellini delle principali strutture della Terra Santa, oggi è finalmente un dato affidabile a portata di mano dello studioso. Applicando quindi questi sistemi di rilievo digitale e tridimensionale è stata archiviata una documentazione quanto più possibile completa dello stato attuale dell'intera fabbrica, dalle fondazioni che poggiano su roccia, alle strutture di copertura, che costituiscono un punto di vista privilegiato per comprendere le relazioni tra gli spazi della Basilica e quelli degli edifici che la circondano e con i quali si intersecano. La tridimensionalità dei dati costituisce un valore aggiunto per la rappresentazione e offre interessanti prospettive sia come supporto alla comunicazione verso pellegrini e visitatori, che come elemento di interazione con coloro che effettuano studi e analisi per la conoscenza e la conservazione dell'edificio.

Dimensioni dell'isolato:	circa 140 m (da Christian Road a Khan ez-Zelt) x 110 m (da St. Helen Road a Via Dolorosa)
Dimensioni del corpo principale della Basilica:	circa 120 m x 70 metri
Massimo dislivello tra gli ambienti della Basilica:	circa 51 m (dal fondo delle cave di S. Elena alla croce sulla cupola della rotonda)
Area rilevata del livello principale della Basilica:	circa 4.500 mq
Area rilevata delle coperture:	circa 6.800 mq

Campagne di rilievo

La rapidità di acquisizione che caratterizza la strumentazione impiegata ha consentito di contenere i tempi di lavoro in situ a poche settimane, organizzate in tre successive campagne, tra il 2007 e la fine del 2008: la prima campagna dal 16 al 30 aprile 2007, la seconda dal 24 gennaio all'8 febbraio 2008, la terza dal 19 novembre al 12 dicembre 2008. A completamento della fase di acquisizione metrica sono state realizzate prese fotogrammetriche ed una esaustiva documentazione fotografica. Una verifica delle elaborazioni prodotte, a completamento del lavoro, è stata svolta dal 10 al 16 marzo 2009.

La strumentazione utilizzata ed i dati raccolti sono riassunti nella tabella seguente.

	<i>I campagna</i>	<i>II campagna</i>	<i>III campagna</i>
Periodo:	Aprile 2007	Gennaio/Febbraio 2008	Novembre/Dicembre 2008
Strumenti:	1 scanner <i>time of flight</i> 1 stazione totale 1 camera analogica semi-metrica 1 camera digitale calibrata	1 scanner <i>phase-shift</i> 2 stazioni totali 1 camera digitale calibrata	1 scanner <i>phase-shift</i> 1 stazione totale 1 camera digitale
Operatori:	4 operatori, in 2 squadre	4 operatori, in 2 squadre	5 operatori, in 2 squadre
Giorni dedicati alle scansioni:	10 giorni	10 giorni	14 giorni
Num. scansioni:	37 scansioni	93 scansioni	120 scansioni degli interni 39 scansioni dei tetti
Punti rilevati:	circa 235 milioni	circa 1 miliardo	circa 2.5 miliardi
Dimensione database .IMP:	5 GB	22 GB	31 GB per gli interni 21 GB per i tetti
Num. vertici topografici:	6 vertici	34 vertici	40 vertici
Num. target per referenziazione scansioni:	83 target	58 target	154 per gli interni 57 per i tetti

Scansioni 3D

I sistemi a scansione laser consentono di raccogliere in tempi rapidi ed in maniera automatica grandi quantità di dati. E' così possibile contenere i tempi di acquisizione pur producendo una descrizione completa e dettagliata dell'oggetto indagato.

La strumentazione utilizzata per questo rilievo acquisisce mediamente 50.000 punti al secondo. Il tempo necessario per una scansione dipende dal passo di scansione e varia da 3 a 10 minuti. Una singola scansione produce quindi da 11 milioni a 30 milioni punti. Le impostazioni adottate permettono una descrizione delle superfici rilevate con risoluzione superiore ad un punto al centimetro quadrato.

Durante tutte le campagne è stato redatto un "diario di rilievo" per conservare traccia di tutte le operazioni compiute sul campo: tra queste, per esempio, la redazione di eidotipi che rappresentino la configurazione schematica della zona in analisi, le varie localizzazioni dello scanner, l'estensione delle singole acquisizioni sull'oggetto, la posizione, il tipo e il nome dei target.

Per quanto riguarda la fase di scansione vera e propria, inoltre, sono state annotate informazioni quali il nome di ogni scansione, la sua risoluzione e durata, oltre al numero e al nome dei target ripresi (dati utili nella successiva fase di registrazione).

In sintesi, nel realizzare la progettazione delle scansioni della Basilica del Santo Sepolcro si è tenuto conto di:

- minimizzare il numero delle riprese per ridurre i costi e i tempi;
- cercare di acquisire in modo completo l'intera superficie dell'oggetto per produrre un modello digitale finale privo di zone non campionate (cosiddetti buchi);
- per necessità intrinseche delle successive fasi di elaborazioni, prevedere un sufficiente grado di sovrapposizione tra ogni ripresa e le altre che coprono aree limitrofe;
- date le caratteristiche degli scanner, per garantire massima accuratezza del processo di misura, inquadrare la superficie ripresa da una direzione il più possibile ortogonale.

Il sistema di riferimento adottato e la referenziazione dei dati

La definizione del sistema di riferimento è avvenuta, nelle prime fasi di rilievo, attraverso la misura di una rete di inquadramento estesa su tutto il complesso architettonico, materializzata in maniera stabile. Diventa così possibile collegare in un unico modello tutti i dati raccolti (interno ed esterno, ambienti non direttamente collegati) e valutare in maniera metricamente corretta relazioni plano-altimetriche tra spazi differenti.

Il calcolo e la compensazione delle coordinate dei vertici della rete principale sono stati eseguiti con metodi rigorosi utilizzando il principio dei minimi quadrati.

Tramite misure celerimetriche è stato eseguito sia il rilievo di appoggio per la referenziazione delle range map acquisite con un sistema a scansione che il rilievo di appoggio per i fotogrammi acquisiti con camera semimetrica.

Per la registrazione delle range map relative al rilievo della Basilica si è utilizzato il software Cyclone (Leica Geosystems). Questo sistema permette di considerare contemporaneamente più tipi di vincolo:

- punti di coordinate note, costituiti da target acquisiti ad alta risoluzione e misurati con metodi topografici,
- legami tra range map con porzioni di superficie in comune.

Il primo tipo di vincolo è stato impiegato sia per l'allineamento tra scansioni che per la loro referenziazione nel sistema di riferimento topografico.

Il secondo tipo di vincolo, basato sulla superficie comune alla coppia di range map, si è dimostrato particolarmente efficace per il collegamento di scansioni relative a zone molto articolate. I risultati del calcolo (che ricorre ad un algoritmo tipo ICP) sono infatti pesantemente condizionati dalla morfologia della zona di ricoprimento: superfici all'incirca piane necessitano di ricoprimenti maggiori e/o di considerare nel calcolo una percentuale importante dei punti delle nuvole, mentre è sufficiente una zona in comune minore se la stessa è caratterizzata da geometrie più complesse. La registrazione si basa infatti, in questo caso, sulla forma dell'oggetto: se è ricca di irregolarità asimmetriche, le range map tendono ad "incastrarsi" correttamente, se invece i riferimenti tridimensionali sono carenti, l'algoritmo di allineamento non è in grado di definire una soluzione univoca. Ovviamente la possibilità di contenere il ricoprimento tra scansioni adiacenti si scontra con l'esigenza di documentare anche le zone di sottosquadro.

Dopo la definizione, coppia per coppia di range map, di tutti i vincoli che si ritengono necessari (punti omologhi, punti di coordinate note, legami tra superfici in comune, ma anche corrispondenza tra superfici piane o forme tridimensionali) è stata realizzata un'ottimizzazione complessiva degli allineamenti.

L'organizzazione del lavoro sul campo con almeno due squadre di operatori ha consentito di realizzare in loco buona parte degli allineamenti tra scansioni, e di conseguenza di verificare immediatamente l'adeguata documentazione degli spazi da rilevare.

Quantificazione dei dati acquisiti

Le scansioni negli ambienti interni sono state realizzate secondo un campo visivo di 360° in orizzontale e di 155° in verticale (escludendo pertanto solo il cono d'ombra definito dal treppiede).

La risoluzione di scansione è stata adattata alla distanza media delle superfici da rilevare.

A titolo esemplificativo, si considerano nel seguito le caratteristiche tecniche del laser scanner HDS6000, utilizzato nelle ultime due campagne di misura.

Per l'acquisizione degli spazi interni si è generalmente operato a distanze di 10-25 m dalle superfici interessate; si è pertanto impostata una risoluzione "Medium", corrispondente a punti acquisiti secondo intervalli angolari di 1.26 mrad – ovvero 1 punto/12 mm alla distanza di 10 m, 1 punto/3 cm alla distanza di 25 m. Alla risoluzione "Medium" corrisponde, in ambienti interni (all'esterno una quota significativa di punti non è acquisita perché direzionata verso il cielo o relativa ad oggetti fuori dalla portata di misura) un'acquisizione composta da 5000 x 2150 punti, cioè 10.75 milioni di punti.



Figura 3 e 4 – L'edicola del Santo Sepolcro al centro della Rotonda (a sinistra) – Il rilievo delle coperture è esteso all'intero isolato (a destra). Viste del modello di punti.

Le scansioni interne dell'ultima missione, realizzate quasi sempre con risoluzione Medium, costituiscono un database complessivo di oltre 1 miliardo di punti, quelle esterne di oltre 1.5 miliardi di punti.

Organizzazione dei dati

La grande quantità di dati acquisiti nel corso delle tre campagne (complessivamente oltre 3 miliardi di punti) non rende possibile la visualizzazione e soprattutto la gestione contemporanea dell'intero modello. Si è reso necessario pertanto strutturare il database secondo sottoprogetti di dimensioni contenute. Tale suddivisione, impostata fin dalla fase di acquisizione, è stata effettuata considerando l'articolazione spaziale delle strutture indagate per agevolare le analisi successive su porzioni architettonicamente coerenti.

La comune referenziazione dei vari sottoprogetti ne ha permesso dapprima il parziale riassetto in quattro macroprogetti e quindi la visualizzazione unitaria di tutti i dati acquisiti all'interno e all'esterno della Basilica.

Archiviazione e conservazione dei dati

In fase di acquisizione le impostazioni dello strumento (risoluzione di scansione, area di acquisizione, denominazione dei file, ecc.) sono state controllate da PC tramite web browser. I dati sono stati memorizzati su un hard disk interno allo scanner e successivamente importati nel software dedicato alla loro gestione (Cyclone, Leica Geosystems).

Il formato di memorizzazione è ZFS; una volta importati in Cyclone i dati sono stati memorizzati in database IMP. Entrambi tali formati sono proprietari e non documentati e consentono pertanto

l'utilizzo dei dati esclusivamente tramite software specifici, limitando le possibilità di interscambio tra formati differenti.

La memorizzazione ed archiviazione dei dati acquisiti tramite scansione si inserisce nella più ampia problematica della conservazione e accessibilità dell'informazione digitalizzata. La "Carta sulla conservazione del patrimonio digitale" indica che "la continuità del patrimonio digitale è fondamentale. Per conservarlo, bisognerà prendere misure adeguate per tutta la durata del ciclo vitale dell'informazione, dal momento in cui viene creata fino a quello in cui vi si può accedere. La conservazione a lungo termine del patrimonio digitale comincia con la concezione di procedure e sistemi affidabili che producono oggetti digitali autentici e stabili."

Problematiche specifiche dei dati da scansione sono determinate dalla loro numerosità: a titolo di esempio, considerando esclusivamente le informazioni geometriche, nel corso delle ultime due campagne sono stati acquisiti 10 GB - campagna gennaio/febbraio 2008 - e 15 GB - campagna novembre/dicembre 2008 (l'utilizzo di uno strumento con caratteristiche differenti nel corso della prima campagna non consente significativi paragoni).

Per quanto riguarda l'archiviazione dei dati, si è scelto di procedere ad una duplicazione controllata delle informazioni su hard disk. Per garantire la possibilità di accedere ai dati in modo indipendente dai software attualmente disponibili, sono stati esportati in formato PTS. E' un formato ASCII che, dopo un'intestazione contenente il numero di righe (punti) del file, memorizza una lista di coordinate e del valore di intensità ad esse corrispondente.

Nel presente contributo si è relazionato unicamente in merito alla fase di acquisizione dei dati, mentre le elaborazioni effettuate successivamente saranno oggetto di prossime pubblicazioni.

Ringraziamenti

Un ricordo particolare va a Padre Michele Piccirillo, che ha colto le potenzialità di questo nuovo modo di produrre documentazione e di intendere il "modello" e ha seguito con passione questo studio fino all'ultimo.

Il CABeC (Centro di Ateneo per i Beni Culturali) dell'Università degli Studi di Firenze è diretto dal Prof. P.G. Malesani, che ha coordinato la ricerca "Analisi di vulnerabilità sismica della Basilica del Santo Sepolcro in Gerusalemme", su incarico del Patriarcato Greco-Ortodosso, della Custodia Francescana di Terrasanta e del Patriarcato Armeno. Hanno partecipato alle diverse campagne di rilievo: L. Carosso, S. Nicolodi, A. Nobile, M. Pavan, M. Russo, R. Sabelli, F. Vezzosi. E' importante sottolineare come senza la disponibilità, la fiducia e la cooperazione di tutte le Comunità religiose della chiesa del Santo Sepolcro questo studio non sarebbe stato possibile.

Riferimenti bibliografici

- Amico B (1609), *Trattato delle piante et immagini de i sacri edificii di terrasanta*, Roma
- Corbo V.C. (1981), *Il Santo Sepolcro di Gerusalemme*, Franciscan Printing Press, Jerusalem
- Bitelli G. (2002), "Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei Beni Culturali". Atti della 6a Conferenza nazionale Asita, Perugia
- Carta sulla conservazione del patrimonio digitale*, traduzione non ufficiale a cura della Commissione Nazionale Italiana per l'UNESCO – aprile 2004 disponibile in http://www.unesco.it/_filesDOCUMENTAZIONI/patrimonio_digitale.pdf
- Crosilla F., Galetto R. (a cura di) (2003), *La tecnica del laser scanning. Teoria e applicazioni*, Udine
- Guarnieri A., Vettore A., El-Hakim S. and Gonzo L. (2004), "Digital photogrammetry and laser scanning in cultural heritage survey". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 35(5).
- Sgrenzaroli M., Vassena G. (2007), *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*, Starrylink Editrice, Brescia ISBN: 978-88-89720-73
- Sacerdote F, Tucci G. (a cura di) (2007), *Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio*, Alinea, Firenze ISBN 978-88-6055-119-1