

## Un approccio integrato allo studio geometrico con tecniche geomatiche di strutture storiche in muratura a prevalente sviluppo verticale

Giulia Fiorini<sup>1</sup>[0000-0002-1475-1556], Maria Alessandra Tini<sup>1</sup>[0000-0001-7745-640X], Valentina Alena Girelli<sup>1</sup>[0000-0001-9257-9803], Luca Vittuari<sup>1</sup>[0000-0002-9815-1004] e Gabriele Bitelli<sup>1</sup>[0000-0002-6118-6000]

<sup>1</sup> Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM),  
(giulia.fiorini12, mariaalessandra.tini, valentina.girelli, luca.vittuari, gabriele.bitelli)@unibo.it

**Abstract.** Le strutture a prevalente sviluppo verticale costituiscono una tipologia costruttiva particolarmente delicata per la quale si rendono necessarie attività di monitoraggio nel tempo, volte sia all’analisi strutturale che geometrica. Tra queste, lo studio della verticalità riveste un ruolo di primaria importanza, sia al fine di verificare eventuali criticità che per analizzarne lo stato tensionale a supporto di opportuni interventi. Le tecniche geomatiche, attraverso un monitoraggio geometrico, forniscono infatti un supporto metrico conoscitivo dello stato deformativo e quindi tensionale, per tutte le figure coinvolte nella gestione della struttura e nella progettazione degli eventuali interventi.

Il laboratorio di Geomatica del DICAM ha condotto una serie di esperienze di monitoraggio di strutture storiche in muratura a sviluppo prevalentemente verticale, che ha permesso di sperimentare l’utilizzo di diverse strumentazioni e procedure operative anche con l’integrazione di varie tecniche geomatiche.

In questo tipo di applicazione è di primaria importanza la definizione di un sistema di riferimento locale permanente nel tempo. Nel caso di contesti urbani storici, data la difficoltà di istituire punti di stazione a centramento forzato su pilastro, si ricorre in genere ad una determinazione indiretta dei punti di stazione attraverso materializzazione di riferimenti (es. prismi) di coordinate note, in genere infissi negli edifici adiacenti. Ove possibile può essere utile l’integrazione tra misure terrestri e GNSS in modo da inserire il sistema di riferimento anche in un contesto globale.

Comunemente le tecniche di monitoraggio si basano sull’analisi multi-temporale di un numero limitato di punti, in genere rilevati con strumenti e tecniche topografiche tradizionali (stazione totale, livelli, livelli zenitali) [1]. Per descrivere lo stato deformativo della struttura nel suo complesso, risulta invece più efficace l’integrazione con le tecniche di rilevamento tridimensionale delle superfici, quali il laser scanning, per poter ricostruire con grande fedeltà e precisione interno ed esterno dell’edificio [2].

Nei casi di studio esaminati si fa riferimento all’integrazione tra stazione totale di alta precisione e laser scanner terrestre per il rilievo di strutture di notevole altezza, che possono essere caratterizzate anche da una evidente pendenza. In quest’ultimo caso, come per tutte le strutture a prevalente sviluppo verticale, soprattutto qualora sia necessario valutarne la pendenza, è strettamente necessario che il sistema di riferimento sia fedelmente riferito alla verticale locale. A tale scopo si è utilizzata una stazione totale dotata di un compensatore a 0.5” (Leica TS30), adottata come riferimento per la verticalizzazione della strumentazione di scansione e del sistema di riferimento locale.

Per la ricostruzione del modello tridimensionale dell'edificio è stato invece utilizzato il sistema Leica RTC360. Questo strumento è dotato di un compensatore interno a 3" ma, grazie alla funzione chiamata *High Tilt Accuracy* [3], può raggiungere autonomamente una precisione nella verticalizzazione di 18". Nel tentativo di ottenere una verticalizzazione più precisa delle nuvole acquisite, in alcuni punti di stazione lo scanner è stato alloggiato in basette topografiche preventivamente messe in stazione con precisione avvalendosi del compensatore della stazione totale. Tutte le scansioni sono state allineate alle scansioni verticalizzate con la stazione totale, applicando algoritmi di ICP (*Iterative Closest Point*) in modo da mantenere inalterata la giacitura dell'asse verticale. Le scansioni sono poi state georeferenziate nel sistema di riferimento locale grazie alle coordinate di target ottenute per via topografica, con la medesima precisione nella verticalizzazione.

L'efficacia dell'uso combinato della stazione totale e del laser scanner è stata verificata utilizzando una serie di punti rilevati sugli spigoli dell'edificio con la medesima stazione totale, dimostrando l'efficacia della metodologia adottata per l'integrazione delle due tecniche. E' stato inoltre impiegato un livello zenitale, che ha consentito di ricavare la proiezione a terra degli spigoli aggettanti dell'edificio. I punti di proiezione sono stati rilevati durante la campagna di misure topografiche con la stazione totale TS30 ed eventualmente potranno essere monitorati nel tempo.

Il modello complessivo dell'edificio, correttamente orientato rispetto alla verticale, permette sia l'estrazione di dati relativi alla pendenza che l'analisi della forma delle pareti per evidenziare fenomeni più complessi.

L'esperienza condotta ha evidenziato alcune criticità legate da una parte all'identificazione di un sistema di riferimento univoco al quale ricondurre tutte le indagini delle varie figure professionali coinvolte, e dall'altra ad una definizione inequivocabile e condivisa dei parametri geometrici utilizzati per quantificare pendenza e fuori piombo. Aspetti importanti, soprattutto se si tratta di analisi inserite in un prolungato percorso di monitoraggio nel tempo.

È in corso di studio l'utilizzo di una stazione totale robotica con sistema di scansione integrato. Questa categoria di strumenti presenta una precisione del compensatore di 1", quindi leggermente inferiore rispetto alle stazioni totali di alta precisione. Tuttavia, essa può risultare molto interessante per la possibilità di scansionare direttamente delle porzioni di edificio, consentendo l'intersezione tra i vantaggi di un sistema di monitoraggio tradizionale e quelli tipici del rilievo con laser scanner.

## Riferimenti bibliografici

1. Monti C., Vassena G.: Le operazioni geodetiche di misura delle deformazioni altimetriche e delle variazioni di pendenza della Torre di Pisa. *Rivista del Dipartimento del territorio* (1), 81-112 (1995).
2. Bertacchini E., Capra A., Castagnetti C, Dubbini M., Rivola R., Toschi I.: Utilizzo del laser scanner per i beni culturali: analisi dell'assetto geometrico strutturale e di specifiche anomalie geometriche. In: *Atti 15a Conferenza Nazionale ASITA*, Reggio di Colorno (2011).
3. Leica RTC360 enhancements to increase your efficiency, <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360/leica-rtc360-enhancements-to-increase-your-efficiency>, ultimo accesso 2024/10/16.