



## Museo Geologico Giovanni Capellini

via Zamboni 63, Bologna

**Sabato 4 Dicembre 2010, ore 16.30**

*Dopo il successo della conferenza sui restauri di Santo Stefano l'appuntamento del 4 Dicembre 2010, oltre alla visita al Museo alle ore 15.15, propone alle 16.30 un altro tema di interesse e attualità per la città: **CIVIS, le Due Torri e i terremoti a Bologna**, introdotto da Enzo Boschi, presidente dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*

Bologna è una città d'arte il cui tessuto medievale e quello urbanistico sono perfettamente integrati all'interno della cerchia delle antiche mura. Le Due Torri sono state costruite nel XII secolo e rappresentano indiscutibilmente uno dei maggiori simboli della città. Attualmente, la Torre degli Asinelli e la Garisenda sono al centro di un acceso dibattito il cui punto principale è lo stato di salute di questi antichi monumenti e gli effetti di dissesto eventualmente indotti dalle sollecitazioni e vibrazioni causate dal traffico intenso. Ad oggi infatti, il passaggio di autobus e mezzi pesanti sotto le Due Torri avviene ad alta frequenza per tutta la giornata. I mezzi passano a pochi metri dalle Torri e la presenza delle fermate e dei semafori rende il loro moto discontinuo con una alternanza di accelerazioni e rallentamenti che forzatamente amplificano l'effetto della sola vibrazione dovuta ad un passaggio a velocità regolare. Ciò è vero, in particolare, per mezzi di massa rilevante come il progettato Civis. Inoltre, la deformazione della pavimentazione stradale indotta dalla marcia a velocità irregolare aumenta l'irregolarità di marcia stessa e dà quindi luogo ad un ulteriore aumento delle vibrazioni.

Uno studio completo dell'attuale stato di salute delle Due Torri non può che essere effettuato mediante una diagnostica basata sull'applicazione e l'integrazione di una vasta gamma di tecniche di rilievo, distruttive e non, mirate all'analisi delle strutture, allo studio dei terreni di fondazione e del suolo, senza tralasciare la valutazione degli effetti ambientali agenti sull'intera area urbana. Il laser a scansione terrestre (TLS) è uno strumento di rilievo non distruttivo che permette di misurare una grande quantità di punti (milioni) distribuiti sulle superfici fisiche osservate. Per ogni punto si ottengono le coordinate geometriche cartesiane  $x$ ,  $y$  e  $z$  ed un valore di intensità  $I$ , generalmente fornito nell'intervallo  $[0, 255]$ , cioè nella scala di grigi. L'intensità è una variabile strettamente correlata alla rugosità dei materiali e alle condizioni di umidità al momento del rilievo e, in certi casi, fornisce indicazioni sullo stato di alterazione delle superfici. Il risultato di una singola scansione, cioè la nuvola di punti, è quindi composto dall'insieme delle coordinate e delle intensità  $(x, y, z, I)$  di tutti i punti misurati in un sistema di riferimento locale. Le singole scansioni, eseguite da punti di vista diversi al fine di acquisire completamente il sistema osservato, sono poi registrate, ossia allineate, in un sistema di riferimento comune a dare una nuvola di punti completa. Algoritmi iterativi di "surface matching" permettono una registrazione molto precisa delle scansioni parziali, con errori millimetrici. Gli strumenti long-range, la cui portata è sensibilmente superiore ai 100 m, hanno generalmente



precisioni variabili tra alcuni millimetri ed un centimetro. Se una superficie è osservata in incidenza normale dalla distanza di 100 m, può essere raggiunta una precisione dell'ordine di 6-7 mm nell'acquisizione del singolo punto. Tuttavia, la risoluzione finale di un rilievo dipende sia dalla precisione sulla misura dei singoli punti sia dalla densità della nuvola di punti (l'acquisizione di molti punti permette di migliorare nettamente la precisione rispetto al caso del singolo punto) e varia a seconda delle caratteristiche strumentali.

Nel Settembre 2010 l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha eseguito il rilievo delle Due Torri utilizzando lo strumento Optech ILRIS3D. Per ottenere la massima copertura sono state effettuate 19 scansioni da 6 punti di stazione distribuiti nelle vicinanze delle Torri. Le nuvole di punti sono state allineate con una precisione di 1-2 mm assicurando il risultato finale, cioè la ricostruzione delle Due Torri, da distorsioni indotte da errori procedurali. La ricostruzione di dettaglio ha permesso di effettuare una analisi mirata e minuziosa delle strutture mettendo in evidenza non solo le accentuate inclinazioni dei prospetti e le variazioni delle stesse a vari livelli



verticali ma anche uno stato deformativo probabilmente correlato agli eventi sismici verificatisi dai tempi antichi ad oggi. In particolare, la mappa di deformazione ottenuta mostra una alterazione interessante del corpo delle Torri, più accentuata nei prospetti su via Rizzoli e via Zamboni, formata da una alternanza rientranze e sporgenze con valori fino a  $\pm 10$  cm. E' indubbiamente interessante confrontare i risultati osservativi TLS con quelli relativi all'analisi sismica della Torre degli Asinelli. I modelli agli elementi finiti (FEM) mostrano che i punti sottoposti alle massime sollecitazioni in compressione (relativamente sopportabili da una struttura in muratura) e in trazione (molto più critici per una tale struttura) si trovano proprio sul lato di via Zamboni alle quote di 35 m, 65 m e 75 m. Le osservazioni eseguite con TLS hanno mostrato importanti variazioni dell'inclinazione della torre alle quote di 45 m, 60 m e 75 m, dunque a quote molto vicine alle precedenti, ad evidenziare una molto verosimile correlazione tra il pattern di inclinazione osservato e gli effetti di eventi sismici. L'alta risoluzione della misura TLS e la completezza

del dato acquisito ha reso possibile anche per la Torre Garisenda l'identificazione di numerose anomalie, evidenziando bombature e rigonfiamenti presenti sia alla base della stessa, nella parte in cui la parete in mattoni si congiunge al basamento in blocchi di selenite, sia nelle zone soprastanti, in particolare oltre la terza cinghia metallica e nella parte ancora più elevata a circa 35 m di altezza.

Alla luce dei risultati raggiunti pare spontaneo correlare le deviazioni osservate rispetto all'inclinazione media delle Torri ad effetti legati alle vibrazioni degli edifici, fatto che indubbiamente consiglia prudenza nel caso in cui si preveda di sottoporla ad importanti sollecitazioni di origine artificiale. Contestualizzare lo stato "deformato" delle Due Torri in un quadro più generale di dissesto dell'intera area urbana è fondamentale. In particolare il fenomeno della subsidenza, che fin dagli anni '50 affligge il territorio causando sprofondamenti fino a 6 cm all'anno, è caratterizzato da un alto gradiente spaziale, con una notevole variazione nell'abbassamento da zona a zona. Ciò induce cambi di carico sulle strutture nella vecchia maglia medievale i cui effetti sono ben visibili al pari delle numerose opere di restauro effettuate.

L'INGV, oggi, sta monitorando le Due Torri mediante la ripetizione di rilievi con tecnica laser a scansione terrestre e sta operando misurazioni GPS (Global Positioning System) sia in modalità statica sia mediante stazioni permanenti al fine di valutare i movimenti del suolo che possono essere causa di ulteriore instabilità per le Torri ed i monumenti storici, patrimonio inestimabile della città e del Paese.