

## **Metodologia di elaborazione di dati laser scanner per la generazione di modelli utili al calcolo strutturale**

G. Caroti, A. Franconi, A. Piemonte

Laboratorio A.S.T.R.O., Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Pisa,  
Largo Lucio Lazzarino 1, 56123 PISA, Tel. 050 221 7770, Fax 050 221 7779, e-mail g.caroti@ing.unipi.it

### **Riassunto**

Il lavoro si inquadra in una ricerca che ha come obiettivo l'individuazione di metodologie e procedure di rilievo utili a produrre dati metrici per la verifica e la mitigazione del rischio a cui sono sottoposte le strutture in concomitanza di eventi calamitosi (Prin2008). In particolare viene studiata la potenzialità dei dati LIDAR per produrre modelli tridimensionali utili all'analisi e verifica strutturale degli edifici. Nell'ottica di questa ricerca si è utilizzato come *software* di calcolo strutturale il SAP2000 v.14, prodotto commerciale e molto utilizzato dai progettisti, per analizzare quali fossero le problematiche e le potenzialità dell'utilizzo del dato laser per questo tipo di applicazione in campo tecnico. A partire dalla nuvola di punti acquisita durante il rilievo *laser scanner* terrestre del fabbricato principale dello storico stabilimento balneare lo "Scoglio della Regina" sul lungomare di Livorno sono stati prodotti diversi modelli poligonali a densità delle maglie variabile e sono stati generati gli input necessari per creare un modello *shell* computabile dal *software* di calcolo strutturale. La formazione di questi modelli non può seguire una procedura completamente automatica e deve rispettare determinate specifiche imposte da questo *software*. Nel lavoro sono descritte le procedure utilizzate, le problematiche incontrate e i risultati raggiunti.

### **Abstract**

The work is part of a research aimed to identify surveying methods and procedures relevant to the output of data for monitoring and mitigation of risk to which structures are exposed in the event of disasters (Prin2008). Focus is set in particular on the potential of LIDAR data to produce 3-D models useful for analysis and structural testing of buildings. In view of this research SAP2000 v.14, possibly the most used by designers among commercial structural calculation software, was used to analyze incoming problems and the potential of the use of laser data for this type of application. From the point cloud acquired during the terrestrial laser scanning survey of the main building of the historic bathhouse "Scoglio del Regina" on the waterfront of Livorno, different models with variable- density polygonal mesh were generated, along with the input needed to create a shell model calculation compatible with structural software. The formation of these models cannot be completely automated and must meet definite specifications imposed by this software. The work describes in detail the procedures used, the problems encountered and the results achieved.

### **Introduzione**

Il dato *laser scanner* è ad oggi ormai utilizzato in molti settori grazie alle caratteristiche della metodologia che permette di differenziarsi sia in termini di precisioni richieste sia per la rapidità ed efficienza nell'acquisire informazioni metriche anche di grande dettaglio in breve tempo.

Gli innumerevoli vantaggi della metodologia sono ben documentati in letteratura ed in particolar modo sono messe in evidenza le possibili applicazioni e tecniche per acquisire nel modo corretto dati per produrre elaborati bi e tridimensionali necessari per una documentazione e analisi interpretativa di tipo architettonico e qualitativo nonché per produrre prodotti utili all'*Information*

*Technology* (come ad esempio tour virtuali basati su dati rilevati e georeferenziati consultabili a varie scale di definizione e dettaglio tramite *web*) ed ancora per il *reverse engineering*, il *Building Information Modeling*, l'archeologia, la documentazione del patrimonio culturale, i GIS, etc...

Uno degli ambiti non ancora del tutto investigato è quello dell'utilizzo del dato *laser* per l'analisi e le verifiche strutturali. In bibliografia sono riportati alcuni degli studi condotti su questo argomento negli ultimi quattro anni.

L'analisi e la verifica strutturale richiede come punto di partenza che della struttura e dei suoi elementi costituenti siano note le caratteristiche geometriche tridimensionali. La tecnologia del *laser scanner* terrestre offre appunto l'opportunità di acquisire, mediante la strumentazione, nuvole dense di punti che rappresentano le coordinate tridimensionali della geometria della superficie dell'oggetto, forniscono la posizione e la forma della struttura e dei suoi elementi in un unico sistema di riferimento e da queste può essere creato un modello sia dell'intera struttura sia del singolo elemento che la costituisce, inoltre l'elevata densità di informazioni metriche della nuvola permette di leggere e misurare le fessurazioni, i dissesti, etc...

La nuvola di punti che registra e restituisce la geometria della struttura necessita di venire strutturata in modo da presentare tutte quelle caratteristiche necessarie per rappresentare il corretto dato di *input* per i *software* di verifica strutturale. Infatti, vari *software* di verifica strutturale si basano sul metodo di calcolo agli elementi finiti (FEM) che utilizza modelli numerici di simulazione per valutare la risposta della struttura ai differenti tipi di azioni.

Questo metodo richiede che la struttura venga opportunamente discretizzata in porzioni, dette "Elementi Finiti", in quanto tali in numero e dimensione. Tutte le informazioni necessarie per la descrizione di ciascuno di questi elementi, siano esse geometriche (ad es. la lunghezza dei singoli elementi strutturali, le caratteristiche delle loro sezioni, ...), topologiche (relative alla connessione dei nodi punti) o fisiche (ad es. carichi, le proprietà dei materiali, ...), vanno a costituire lo schema ad elementi finiti (*Shell*). Al contrario l'*output* del *laser scanner* è una nuvola di punti non strutturata. Ciò comporta che il dato geometrico acquisito dal *laser* debba venire articolato e predisposto per essere associato alle caratteristiche strutturali dei vari elementi e dei nodi componenti la struttura in modo da generare un modello a *shell* adatto al calcolo agli elementi finiti. E' evidente come sia importante, per un'indagine strutturale, conoscere la geometria sia interna sia esterna della struttura ed avere queste due informazioni in un unico sistema di riferimento tridimensionale così da poter usufruire della completa informazione geometrica come ad esempio gli spessori murari ai vari livelli, la posizione e lo spessore dei solai, etc... Esistono tuttavia casi in cui questo non è possibile, ad esempio quando l'edificio è già in condizioni così precarie da non permetterne né l'accesso né la permanenza all'interno in condizioni di sicurezza.

In questi casi la disponibilità di precedenti rilievi anche in CAD può essere di supporto per ricostruire la forma completa.

L'oggetto scelto per verificare la metodologia è stato il fabbricato principale dello "Scoglio della Regina" a Livorno. Per il rilievo è stata utilizzata la *Scan Station* Leica C10. La campagna di rilievo si è svolta in due giornate. Date le condizioni interne del fabbricato non è stato possibile effettuare il rilievo degli interni ma solo della parte esterna.

### **Produzione di elaborati tradizionali (piante, prospetti, sezioni)**

Per l'elaborazione dei dati acquisiti si è utilizzato il *software* Cyclone della Leica v7.1. Con il processo di registrazione sono state allineate tutte le singole scansioni acquisite con il *laser scanner* ed è stato quindi creato il modello digitale tridimensionale a nuvola di punti dell'oggetto rilevato (figura 1). La nuvola di punti, essendo un'entità perfettamente misurabile è stata utilizzata per la creazione delle piante, delle sezioni e dei prospetti dello stato attuale del fabbricato dello Scoglio della Regina.

Come detto precedentemente, è attualmente interdetto l'ingresso al fabbricato per problematiche strutturali e di sicurezza e quindi non è stato possibile rilevarne la geometria interna.

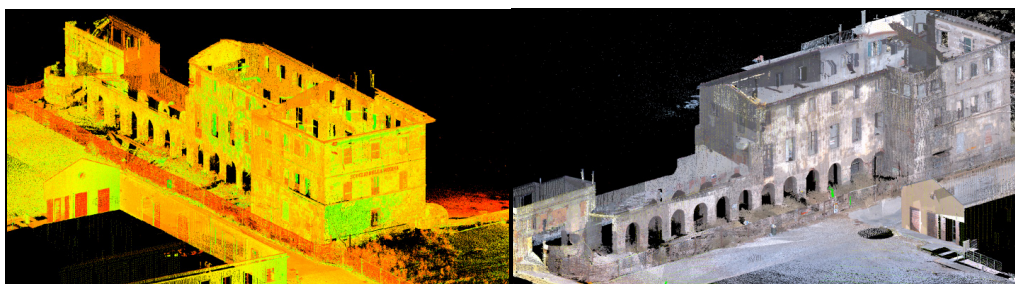


Figura 1. Nuvola di punti complessiva.

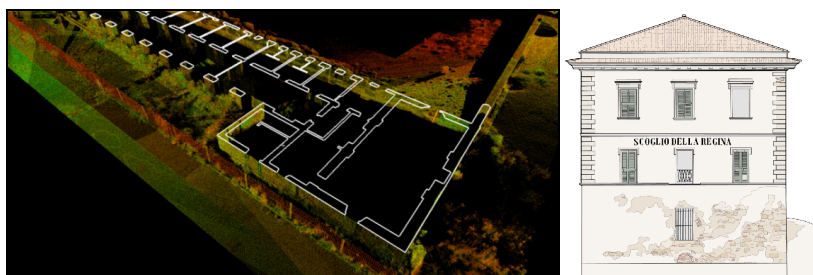


Figura 2. Pianta piano terra da nuvola di punti e prospetto della facciata principale.

Fortunatamente ci è stato messo a disposizione un rilievo geometrico complessivo del fabbricato realizzato nel 2002 con tecniche tradizionali comprensivo di piante, prospetti e sezioni in CAD (figura 2). Gli elaborati, dopo essere stati opportunamente orientati e allineati al rilievo *laser scanner* sono stati utilizzati per ricostruire la geometria interna che così ha integrato il rilievo laser fornendo un prodotto geometrico “ibrido” ma dal quale è stato possibile individuare i solai, gli spessori murari, i vani scale, le divisioni interne, etc..

Per restituire i prospetti sono state creati in Autocad piani complanari ai fronti principali, utilizzando per allineamento le sezioni orizzontali ottenute dalla nuvola ed esportate in precedenza. Una volta ottenuti questi piani sono stati nuovamente importati in Cyclone attraverso il formato di interscambio COE e utilizzati per allineare le viste ai prospetti. Sono stati così generate le immagini delle diverse viste dell’edificio (*screenshot*) e successivamente mosaicate utilizzando una griglia di riferimento opportunamente sovrapposta alle immagini stesse. Il prodotto finale è stato poi importato in Autocad per la restituzione al tratto.

### Creazione di un modello a poligoni

I modelli a nuvola di punti ottenuti dal rilievo con strumenti laser scanner ad alta precisione presentano particolari limitazioni dal punto di vista computazionale. Non è possibile infatti computare il comportamento fisico del modello a nuvola di punti attraverso un calcolatore.

Il passaggio da modello a nuvola di punti a modello a superficie poligonale è definibile a tutti gli effetti come una operazione di “*retopology*” ossia le informazioni quantitative e qualitative presenti nel modello a punti sono tradotte e adattate per ottenere una rappresentazione triangolare o quadrangolare che esplicita la superficie poligonale. Queste operazioni di conversione introducono variazioni geometriche nel modello, e attraverso il *software* è possibile valutare se la loro l’entità è coerente con la tolleranza ammessa e con le finalità del rilievo stesso. (Bini, 2011)

Ad oggi è ben noto come ricostruire in modo abbastanza speditivo la restituzione dello stato di fatto di un edificio partendo da dati *laser scanner* (vedi paragrafo precedente): partendo dalle viste in proiezione ortogonale della nuvola di punti, si realizzano sezioni e sezioni prospetto, sia orizzontali

che verticali nei piani di interesse. Queste vengono esportate in scala così come viste a video (*screenshot*) in programmi CAD mediante i quali anche un disegnatore che può non avere alcuna esperienza con il trattamento delle nuvole di punti è in grado di digitalizzarle e restituire il prodotto piano finale.

Questo tipo di procedura potrebbe essere utilizzata per generare in prima approssimazione un modello a *mesh* ma presenta significative limitazioni. Infatti ad esempio l'elaborazione si basa su geometrie prestabilite, regolari e piane, che possono non riflettere la geometria reale dell'edificio, la restituzione per linee rette e piani ha come conseguenza la correzione non intenzionale della situazione esistente della struttura, in termini di spostamento e/o distorsione.

Un altro metodo che potrebbe essere utilizzato è quello di lavorare direttamente sulla nuvola di punti e generare da questa una rappresentazione densa a curve di livello che estrapolano, dal modello analizzato in sezione, campioni di punti 3D su aree limitate: in questo caso il prodotto finale è tridimensionale, a differenza del precedente, e da questo è possibile indagare le dimensioni strutturali, i fuori piombo, l'orizzontalità, ma la discretizzazione introdotta da questo tipo di modellazione può alterare la realtà ad esempio falsando la corretta geometria degli elementi strutturali o la corretta posizione e dimensione delle loro connessioni.

Il nostro studio si è invece focalizzato sul passaggio dalla nuvola grezza di punti 3D prodotta dal sensore ad un reticolo di poligoni connessi fra loro, i cui vertici coincidano con i punti misurati (*mesh*): è quanto viene indicato con il termine "*meshing*". La nuvola di punti generata dal *laser scanner* Leica *Scan Station C10* è una nuvola di punti non strutturata costituita da punti non organizzati nello spazio.

Si è utilizzato il *software* Geomagic Studio, attraverso il quale sono stati corretti gli errori della nuvola dovuti al rumore in fase di acquisizione, ridotti uniformemente il numero di punti su una superficie piana. È stato inoltre ridotto il numero dei punti ad una densità specifica su una superficie curva nonché convertito l'oggetto punto in oggetto vertice di *mesh* poligonale, passando in questo modo da una nuvola di punti a un modello *mesh*.

Si è ottenuto un modello a superficie poligonale (successivamente detto modello *High poly*) con una rappresentazione che consente di descrivere il modello stesso mediante le relazioni presenti tra vertici: le informazione geometriche (coordinate x,y,z), gli spigoli e le facce (figura 3).

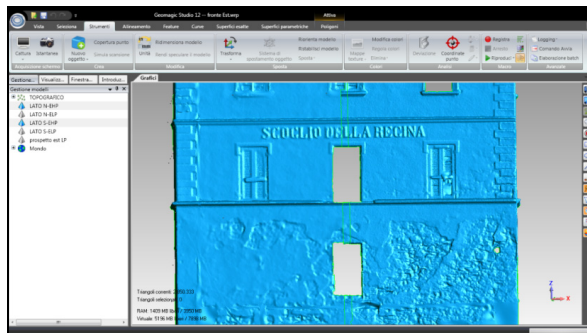


Figura 3. Modello High Poly.

Fra questi elementi non sono possibili relazioni ambigue, per questo i *software* utilizzano strumenti di correzione degli errori topologici per ottimizzare il modello che per essere "valido" deve sussistere un collegamento vertice-vertice fra *mesh* contigue.

Dopo aver effettuato la fusione delle varie porzioni del fabbricato, per creare un unico reticolo poligonale, sono stati corretti gli errori presenti nel modello (errori topologici, lacune e superficie rumorosa). Le particolari esigenze hanno portato alla creazione di due modelli diversi.

Intervenendo proprio sul numero di poligoni, sono stati creati: un modello ad alta densità di poligoni (*High poly*) da utilizzare in campo architettonico e un modello a bassa densità di poligoni (*Low poly*) caratterizzato da una densità delle maglia più bassa pur mantenendo le caratteristiche formali e geometriche, adatto per le applicazioni termografiche e per l'elaborazione con il programma di analisi strutturale Sap2000.

### **Passaggio dal modello a mesh al modello a shell per il calcolo strutturale**

Il modello ad alta densità di poligoni, *High poly*, è stato creato cercando di mantenere il maggior numero di poligoni per far sì che venissero conservate le caratteristiche di rugosità dei materiali della superficie esterna e per evidenziare le fessurazioni, le scrostature dell'intonaco e le diverse *texture* presenti sulle facciate pur essendo un modello computabile. Nel modello sono state conservate tutte le componenti che non sono strutturali come bozze, soglie e cornici, in modo da avere il maggior grado di dettaglio possibile.

Il modello a bassa densità di punti, "*Low poly*" è stato creato da quello "*High poly*" apportandovi varie modifiche per essere compatibile (computabile) con il SAP2000.

Alcune delle principali modifiche sono nate dalle seguenti necessità:

- Ottenere un modello decisamente più snello che potesse essere analizzato dal programma strutturale: per questo è stata effettuata una decimazione del numero di poligoni imponendo *mesh* triangolari con lunghezza dei lati inferiore a cinquanta centimetri, impostando il numero minimo di triangoli, mantenendo un numero maggiore di elementi nelle zone a minor raggio di curvatura. Sono stati creati modelli con diverso numero di poligoni: siamo passati da 80.000 del modello ad alta densità, a 45.000 per la prima prova, che risultavano essere sempre troppi per riuscire a gestire il file. Dopo un terzo tentativo a 40.000, risultato sempre troppo pesante, siamo riusciti ad ottenere un modello computabile semplificando a 35.000 poligoni, riuscendo in questo modo a mediare tra la semplicità computazionale e la coerenza strutturale, senza cioè semplificare troppo il modello ottenuto con il rilievo *laser scanner* ad alta risoluzione.
- Togliere tutti gli elementi non strutturali come soglie, infissi, cornici e bozze sicuramente utili per la completezza architettonica ma superflui per un approccio strutturale.
- Individuare la superficie media tra quella esterna, ottenuta dalla nuvola di punti, e quella interna, ricavata dal rilievo geometrico tradizionale, per far sì che questa possa essere rappresentata come *mesh* poligonali caratterizzate dall'attributo "spessore della parete".
- Per ottenere la superficie media del paramento murario è stato utilizzato il modello 3D dell'esterno derivato dalle scansioni laser mentre per l'interno si è creato un modello a *mesh* triangolari dal rilievo geometrico eseguito nel 2002. I due modelli sono poi stati importati in un unico file e con il programma Geomagic Studio è stata creata la superficie media.
- Tagliare la superficie all'altezza dei solai per inserire i carichi strutturali mantenendo l'allineamento, sia verticale che orizzontale dei vertici delle *mesh* poligonali sulle superfici contigue: una volta ottenuta la superficie media del fabbricato sono state calcolate le altezze di tutti i solai di piano e delle coperture per creare dei piani di taglio per suddividere il modello in fasce ed è stato sezionato il modello alle varie altezze mantenendo la corrispondenza verticale e orizzontale dei vertici delle *mesh* poligonali sulle superfici contigue.
- Individuare le diverse fasi di realizzazione, le modificazioni succedutesi nel tempo e le tipologie costruttive utilizzate ponendo particolare attenzione ad evidenziare le parti realizzate in aggiunta alla costruzione originaria, nuove aperture, spessori murari diversi, superfetazioni, connessioni con altri organismi edilizi. E' stato necessario individuare la presenza o meno di ammorsamenti in quanto: murature ben ammorsate sono state schematizzate come *mesh* contigue. Per ottenere infatti una continuità strutturale i vertici di queste *mesh* sono stati uniti tramite dei link, ossia vincoli lineari che non impongono un comportamento rigido al modello, simulando perfettamente il comportamento reale. Pareti non ammorsate sono invece state rappresentate con *mesh* separate fra loro. Per questo problema sono state di supporto le immagini termografiche orientate sulla nuvola (Caroti G. et al. 2011).

- Schematizzare la presenza delle partizioni orizzontali e dei collegamenti verticali non disponendo del rilievo *laser scanner* dell'interno dell'edificio e della copertura. Anziché inserire fisicamente i solai interpiano e di copertura, interpretandoli come elementi *shell*, sono stati ricavati i carichi trasmessi dagli stessi ai paramenti murari e sono stati applicati alle quote opportune. Per far questo è stato necessario effettuare dei tagli della superficie media in corrispondenza della quota di imposta di ogni solaio e della copertura e applicare a quel livello i rispettivi carichi.

- Allineare i vertici delle *mesh* contigue, sia di quelle verticali per gli spigoli del fabbricato, sia di quelle orizzontali in corrispondenza dei tagli effettuati per l'inserimento dei carichi trasmessi dai solai ai paramenti murari. Per far sì che le *mesh* contigue fossero vincolate fra loro e quindi analizzabili, sono stati inseriti dei vincoli *link* rigidi. In caso contrario la presenza di vertici non allineati avrebbe causato la creazione di *link* inclinati che avrebbero variato in modo non quantificabile il comportamento e la risposta strutturale del modello. Sempre per non variare il comportamento del modello, rendendo troppo rigide le zone vincolate, non sono stati inseriti i "bodies", in quanto un vincolo *body* provoca un movimento simultaneo di tutti i nodi vincolati fra loro che si comportano quindi come un corpo rigido tridimensionale. Questo può portare ad un comportamento del modello troppo lontano dalla realtà.

Il risultato di questa procedura è stato un modello computabile con il programma di calcolo. Il modello, così creato, è stato esportato in formato \*.*dxf* per essere importato nel programma di calcolo strutturale Sap2000.

### Modellazione e analisi strutturale

Il modello "Low poly", una volta esportato in *dxf* è stato importato nel programma Sap2000 v.14 per l'analisi strutturale, come modello a elementi *shell*. Tutti gli elementi generati come facce 3D in Autocad sono stati associati a elementi *shell* in Sap2000. Dopo aver impostato il materiale muratura sono state create quattro "sezioni area" diverse in base al numero dei differenti spessori della muratura, più in particolare: 30 cm (arancione); 40 cm (blu); 50 cm (magenta); 60 cm (verde) (figura 4 sinistra).

Per connettere le fasce orizzontali e verticali di spessore diverso sono stati utilizzati ancora dei *link* rigidi che uniscono i vertici degli *shell* contigui.

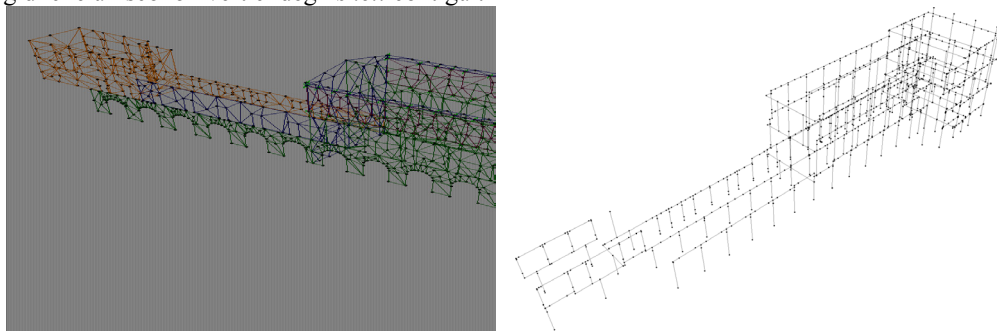


Figura 4. Modello a elementi *shell* (sinistra) e modello a telaio equivalente (destra).

Oltre al modello ottenuto da rilievo *laser scanner* è stato realizzato anche un modello semplificato a telaio equivalente dell'edificio (figura 4 destra). Lo scopo era quello di evidenziare le differenze fra una modellazione più particolareggiata e una *standard*.

Di entrambi i modelli è stata effettuata un'analisi dello spettro di risposta in linea con le normative vigenti, sia allo stato non fessurato che fessurato e valutando il diverso comportamento creando anche un modello nel quale sono stati inseriti al livello delle coperture dei diaframmi per simulare la presenza di una cordolatura che trasmettesse rigidità alla struttura (tabella 5).



Una volta analizzati i modelli separatamente con analisi dinamica lineare ed aver codificato ogni maschio murario con un univoco codice alfa numerico, sia nel modello a telaio equivalente che nel modello ad elementi *shell*, sono stati analizzati e confrontati i risultati del momento nel piano e fuori piano di ogni maschio murario nelle varie configurazioni per evidenziare sia la massima differenza sia le differenze percentuali che intercorrono tra una modellazione a elementi *shell* e una semplificata a telaio equivalente.

MODELLI		Modelli non fessurati								MODELLI		Modelli fessurati									
Maschio	comb.	Step/Type	shell		telaio equivalente		Max differenza		differenza %		Maschio	comb.	Step/Type	shell		telaio equivalente		Max differenza		differenza %	
			fuori piano [KN-m]	nel piano [KN-m]	fuori piano [KN-m]	nel piano [KN-m]	fuori piano [KN-m]	nel piano [KN-m]	fuori piano %	nel piano %				fuori piano [KN-m]	nel piano [KN-m]	fuori piano [KN-m]	nel piano [KN-m]	fuori piano %	nel piano %		
M01	COMB1	Max	6.4914	1.17E-11	2.7058	11.1725	3.7856	11.1725	82	200	M01	COMB1	Max	-1.6346	8.58E-12	2.457	10.6702	0.8224	10.6702	40	200
M01	COMB1	Min	6.4914	-1.2E-11	-2.706	-13.8544	3.7854	13.8544	82	200	M01	COMB1	Min	-1.6346	-8.5E-12	-2.4559	-13.6742	0.8213	13.6742	40	200
M01	COMB2	Max	6.4914	1.84E-12	28.5191	0.7712	22.0277	0.7712	126	200	M01	COMB2	Max	-1.6346	1.37E-12	0.6718	-1.4574	0.9628	1.4574	83	200
M01	COMB2	Min	6.4914	-1.8E-12	-28.5193	3.8531	22.0279	3.8531	126	200	M01	COMB2	Min	-1.6346	-1.3E-12	-0.6707	-1.5465	0.9639	1.5465	84	200
M02	COMB1	Max	-0.3261	10.4583	1.0999	14.7192	0.7738	4.2609	109	34	M02	COMB1	Max	-0.6738	8.0986	0.9773	14.1828	0.3035	6.6842	37	55
M02	COMB1	Min	-4.8605	-10.4588	-1.0652	-11.3171	3.7953	0.8583	128	8	M02	COMB1	Min	-4.5128	-8.0991	-0.9382	-11.1136	3.5746	3.0145	131	31
M02	COMB2	Max	5.2706	1.8251	27.8617	3.932	22.5911	2.1069	136	73	M02	COMB2	Max	5.2757	1.4835	0.6694	1.5816	4.6063	0.9881	155	6
M02	COMB2	Min	-10.4572	-1.8256	-27.8271	-0.529	17.3699	1.2957	91	110	M02	COMB2	Min	-10.4623	-1.484	-0.6302	-1.4877	9.8321	0.0037	177	0
M03	COMB1	Max	-9.7753	19.3461	1.8555	14.5748	6.9198	4.7121	130	28	M03	COMB1	Max	-8.8416	13.9644	1.8025	13.9505	7.0391	0.0139	132	0
M03	COMB1	Min	-12.1496	-19.3459	-1.7883	-11.9768	10.3613	7.4722	149	48	M03	COMB1	Min	-12.0833	-13.9674	-1.7227	-11.6249	10.3666	2.3425	150	18
M03	COMB2	Max	-2.7193	3.1751	26.1134	3.7428	23.3941	0.5675	162	16	M03	COMB2	Max	-2.7133	2.3766	0.6488	1.2124	2.0645	1.1642	123	65
M03	COMB2	Min	-18.2056	-3.1781	-26.0462	-1.0446	7.8406	2.1335	35	101	M03	COMB2	Min	-18.2116	-2.3796	-0.569	1.1132	17.6426	1.2664	188	73
M04	COMB1	Max	-2.8701	-14.6464	-1.8149	-12.5373	1.0552	2.1091	45	16	M04	COMB1	Max	-0.6387	10.404	1.8812	14.407	1.0425	4.003	90	32
M04	COMB1	Min	-2.8701	-14.6464	-1.8149	-12.5373	1.0552	2.1091	45	16	M04	COMB1	Min	-2.6572	-10.4033	-1.4868	-12.2056	1.1704	1.8023	56	16
M04	COMB2	Max	2.2251	2.3463	21.5783	3.9967	19.3532	1.6504	163	52	M04	COMB2	Max	2.2237	1.7121	0.6035	1.1554	1.6202	0.5567	115	39
M04	COMB2	Min	-5.5211	-2.3457	-21.4179	-1.3734	15.8968	0.9723	118	52	M04	COMB2	Min	-5.5196	-1.7114	-0.4091	1.0459	5.1105	0.6655	172	48
M05	COMB1	Max	-1.1604	18.0132	1.8696	16.5451	0.7002	1.8671	46	8	M05	COMB1	Max	-1.3225	15.2771	1.7843	15.6697	0.4618	3.1426	30	22
M05	COMB1	Min	-3.6142	-18.0006	-1.8263	-13.5192	2.1879	4.4816	87	28	M05	COMB1	Min	-4.8521	-12.5147	-1.2728	-13.0892	2.1793	0.5745	92	4
M05	COMB2	Max	1.6891	2.8472	14.3843	4.8959	12.6952	1.8487	158	49	M05	COMB2	Max	1.6889	-2.018	0.5918	1.5353	1.0971	0.6545	96	39
M05	COMB2	Min	-6.4637	-2.8348	-13.95	-1.5691	7.4863	1.2657	73	57	M05	COMB2	Min	-6.4635	-2.0056	-0.0804	1.227	6.3831	0.7786	195	48

Tabella 5. Confronto dei momenti fuori piano e nel piano nelle configurazioni non fessurata (sinistra) e fessurata (destra).

Per ottenere una migliore sintesi dei risultati sono stati raccolti i dati relativi ad ogni prospetto del fabbricato principale dello Scoglio della Regina e una volta individuati i maschi murari, è stata applicata una scala cromatica che rappresenta la percentuale di differenza fra la modellazione a telaio equivalente e quella a *shell* nella configurazione fessurata e non fessurata del momento fuori piano e nel piano (figura 6).

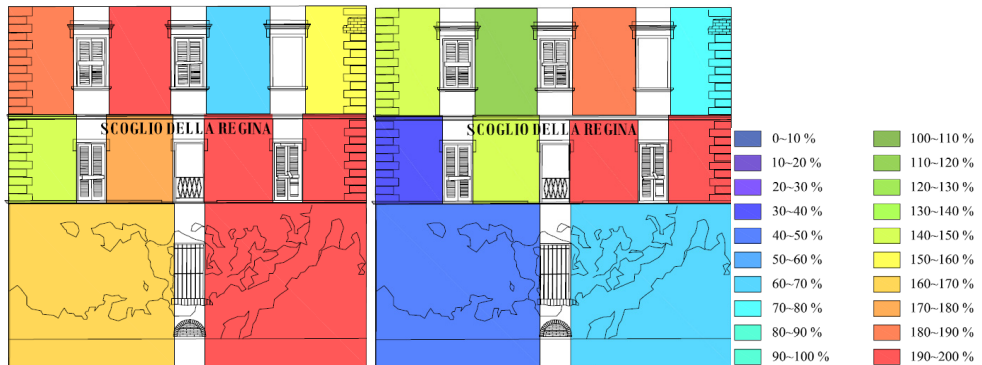


Figura 6. Percentuali di differenza, del momento fuori piano, fra la modellazione *shell* e quella a telaio equivalente nelle configurazioni fessurata (sinistra) e non fessurata (destra).

## Conclusioni

L'esperienza condotta ha dimostrato l'efficacia del rilievo tridimensionale laser scanner quale strumento innovativo di aiuto all'analisi architettonica e termografica ed alla modellazione finalizzata all'analisi strutturale. Questo tipo di rilievo permette infatti sia di ottenere misure rigorose direttamente dalla nuvola di punti, per poi ricostruire il modello in programmi specifici, sia di trasformare la nuvola di punti stessa in una superficie poligonale da poter essere inserita in programmi di analisi strutturale.

Il SAP2000 è un software in commercio da molti anni ed è adottato ad oggi da molti tecnici. Per generare un modello a *shell* computabile da tale software, a partire dalla nuvola di punti, sono state necessarie numerose elaborazioni e modifiche del dato grezzo originario.

Inoltre, dal confronto degli spettri di risposta di un modello dettagliato ad elementi *shell* con quelli di uno semplificato a telaio equivalente sono emerse differenze anche rilevanti.

Considerando l'aspetto puramente geometrico si potrebbe supporre che il modello a *shell*, derivando da un modello a *mesh* preciso e dettagliato, dovrebbe rappresentare meglio la struttura e, quindi, il suo comportamento nelle simulazioni agli elementi finiti.

E' di interesse l'approfondimento di tali tematiche e l'utilizzo di altri software di calcolo strutturale per validare i risultati ottenuti.

### **Bibliografia:**

- Bini M., (2011), Il paesaggio costruito della campagna Toscana, Alinea Editrice, Firenze
- Guidi G.; Russo M.; Beraldin J.,(2010),Acquisizione 3D e modellazione poligonale, McGraw-Hill Companies, Milano
- Camarda M., Guarnieri A., Milan N., Vettore A. (2010), "Health monitoring of complex structure using TLS and photogrammetry", Proceedings of the ISPRS Commission V Mid-Term Symposium on Close Range Image Measurement Techniques, Volume XXXVIII, Newcastle upon Tyne, UK, p.125-130.
- Callieri M., Corsini M., Girardi M., Padovani C., Pagni A., Pasquinelli G., Scopigno R. (2010), "The Rognosa tower in San Gimignano: digital acquisition and structural analysis", Civil-Comp Press, 2010 Proceedings of the Tenth International Conference on Computational Structures Technology, B.H.V. Topping, J.M. Adam, F.J. Pallarés, R. Bru and M.L. Romero, (Editors), Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland.
- Olsen M. I. J., ASCE M., Kuester F., Chang B. J., ASCE S.M., Hutchinson T. C., ASCE M. (2010), "Terrestrial Laser Scanning-based structural damage assessment", JOURNAL OF COMPUTING IN CIVIL ENGINEERING © ASCE / MAY/JUNE 2010.
- Caroti G., Piemonte A., (2011) "Ottimizzazione della rappresentazione di immagini termografiche per la valutazione delle strutture tramite rilievi laser scanner", Proceedings 15° Conferenza Nazionale ASITA. PARMA, p. 617-622, ISBN: 978-88-903132-6-4.
- Castagnetti C., Bertacchini E., Capra A., Dubbini M., (2012), "Terrestrial Laser Scanning for Preserving Cultural Heritage: Analysis of Geometric Anomalies for Ancient Structures", FIG Working Week 2012, Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage, Rome, Italy, 6-10 May 2012.
- H. M. Lee, H. S. Park, (2011), Gage-Free Stress Estimation of a Beam-like Structure Based on Terrestrial Laser Scanning, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 26 (2011) 647–658.

### **Ringraziamenti**

Si ringraziano il Prof. Sassu e l'Ing. Andreini della Sede di Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa per il supporto dato nell'utilizzo dei software di calcolo strutturale. Si ringraziano, inoltre, Leica Geosystem ed in particolare Carlo Capraro ed Eurotec Pisa s.r.l. per il supporto nella fase dei rilievi e per la strumentazione gentilmente concessa per la sperimentazione.