

# METODOLOGIE GEOMATICHE PER IL RILIEVO INTEGRATO FINALIZZATO ALLA MODELLAZIONE STRUTTURALE

Vladimiro ACHILLI (\*), Denis BRAGAGNOLO (\*), Massimo FABRIS (\*\*\*),  
Andrea MENIN (\*), Giuseppe SALEMI (\*)

(\*) Laboratorio di Rilevamento e Geomatica – DAUR – Dipartimento di Architettura, Urbanistica e Rilevamento  
Università di Padova, Via Marzolo, 9 – 35131 Padova, Tel: 049-8275579, e-mail: [giuseppe.salemi@unipd.it](mailto:giuseppe.salemi@unipd.it)

(\*\*) Dipartimento di Fisica – Settore Geofisica  
Università di Bologna, Viale Bertini Pichat, 8 – 40127 Bologna

## Riassunto

L'integrazione di tecniche di rilievo classiche, satellitari ed a scansione laser e l'applicazione di metodologie geomatiche consente di finalizzare il rilievo di strutture architettoniche anche complesse non solo a scopo documentario ed informativo, ma anche per fornire l'informazione metrica necessaria ad un'analisi strutturale.

## Abstract

The integration of classic, satellite and laser scanner techniques and the application of geomatic methodologies represent the good approach to document complex architectonic structures and furnish also the metric information for the structural analysis.

## Introduzione

Da alcuni anni si assiste ad un crescente impiego del rilievo laser a scansione per applicazioni in campo ingegneristico ed architettonico; spesso, il rilievo per la restituzione di modelli tridimensionali è integrato da altre metodologie, quali la fotogrammetria architettonica, per fornire modelli di forte impatto fotorealistico. Attualmente, in alcuni specifici settori, si è delineata l'esigenza di rilievi finalizzati all'analisi strutturale di opere architettoniche di notevole interesse storico ed artistico. In questi casi, il rilievo fornisce in *output* l'informazione metrica a scopo documentario ed informativo, ma è la stessa informazione metrica che diventa *input* per successive tipologie di analisi.

Nel presente lavoro gli autori propongono due esperienze condotte presso l'Arsenale Vecchio di Verona (edificio di età napoleonica) e sulle mura antiche di Cittadella (in provincia di Padova).

L'applicazione di metodologie geomatiche, ormai consolidate, ha permesso di progettare il rilievo integrando tecniche classiche, satellitari ed a scansione laser.

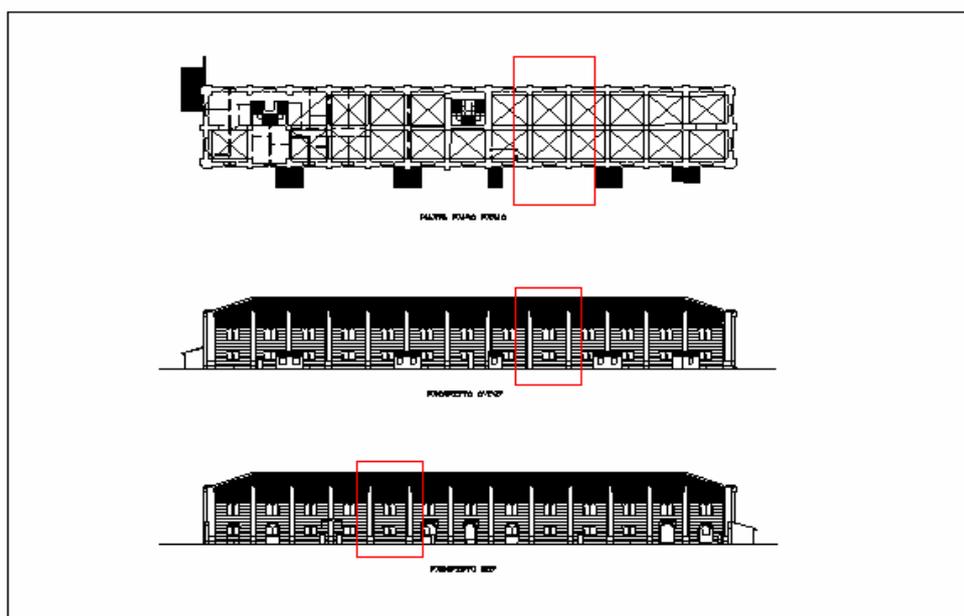
Nel primo caso, è stato analizzato un modulo di uno degli edifici che costituiscono tutto l'impianto dell'Arsenale. Il rilievo integrato è stato condotto sia all'interno sia all'esterno del modulo stesso integrando i diversi dataset. L'acquisizione è avvenuta su griglie regolari di 25x25 mm e ciascuna scanworld ha fornito mediamente 250.000 punti. Effettuata la registrazione si è passati alla fase di modellazione allo scopo di ottenere un modello 3D CAD da importare poi in Straus 7 (programma per l'analisi agli elementi finiti). In questo ambiente è stato possibile eseguire un'analisi elastica lineare che ha fornito, sul modello, la rappresentazione tridimensionale della compressione verticale, della deformata e dello spostamento verticale con e senza carico della copertura.

Nel secondo caso, dai piani di sezione sono state estratte delle sezioni verticali e analogamente, con lo stesso codice di calcolo agli elementi finiti, sono state calcolate le tensioni massime di compressione e di trazione, che hanno permesso di evidenziare spostamenti alla sommità superiori al centimetro.

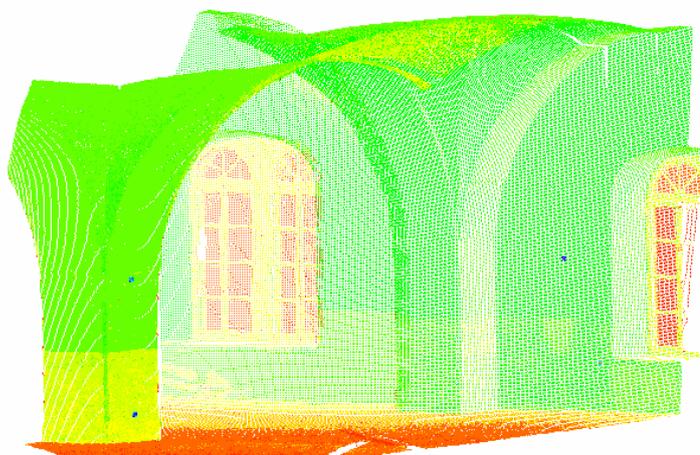
### **Arsenale Vecchio di Verona: dalla nuvola di punti al modello in AutoCAD.**

Per il rilievo dell'edificio oggetto di studio (Fig. 1) è stato utilizzato il laser scanner Leica HDS 2500 (ex Cyrax 2500) e la stazione totale Leica TCA 2003.

Per le scansioni interne ed esterne si è proceduto con la medesima metodologia: scelta di punti di presa convenienti e che presentassero il minor numero di occlusioni possibili, esecuzione di una prima scansione corrispondente ad una maglia di punti distanti tra loro 2 cm, esecuzione di successivi raffittimenti secondo maglie di 25 mm per i target e per l'interno del salone al primo piano e di 8 mm per il particolare della merlatura e della catena sulla facciata ovest. Il laser scanner è stato posizionato in 6 stazioni di presa, eseguendo circa una ventina di scansioni (Fig. 2); il rilievo topografico a supporto dell'insieme di scansioni ha richiesto la georeferenziazione di 22 punti.



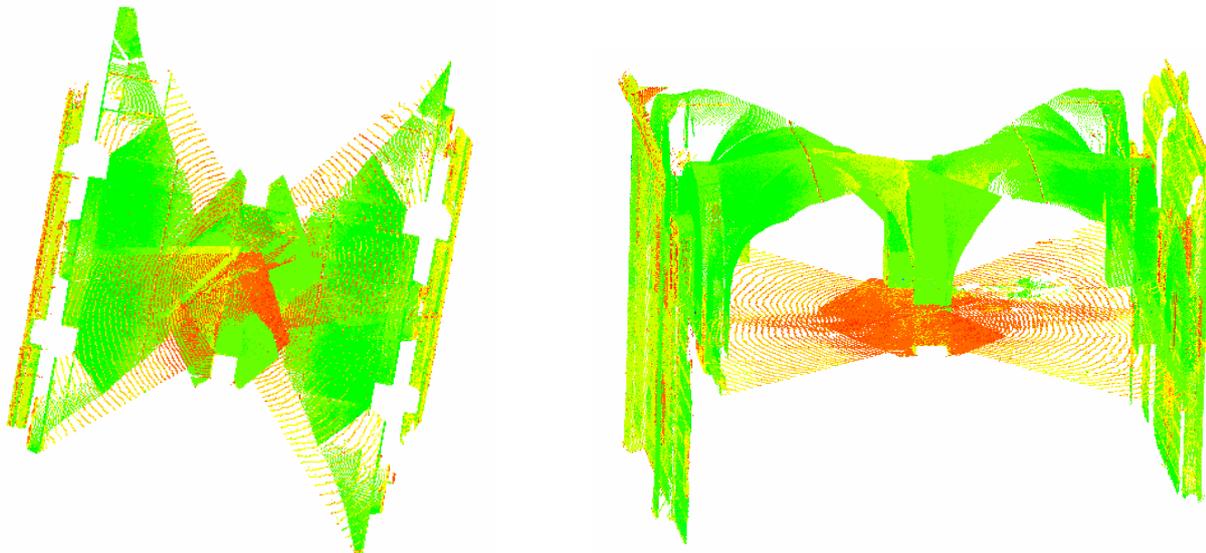
*Fig. 1 – Descrizione del rilievo: il singolo modulo in pianta e le due rispettive facciate.*



*Fig. 2 – Scansione 3: fotografia di parte del salone voltato al primo piano con in evidenza i target e relativa nuvola di punti della parte sud-ovest con risoluzione di 25 x 25 mm.*

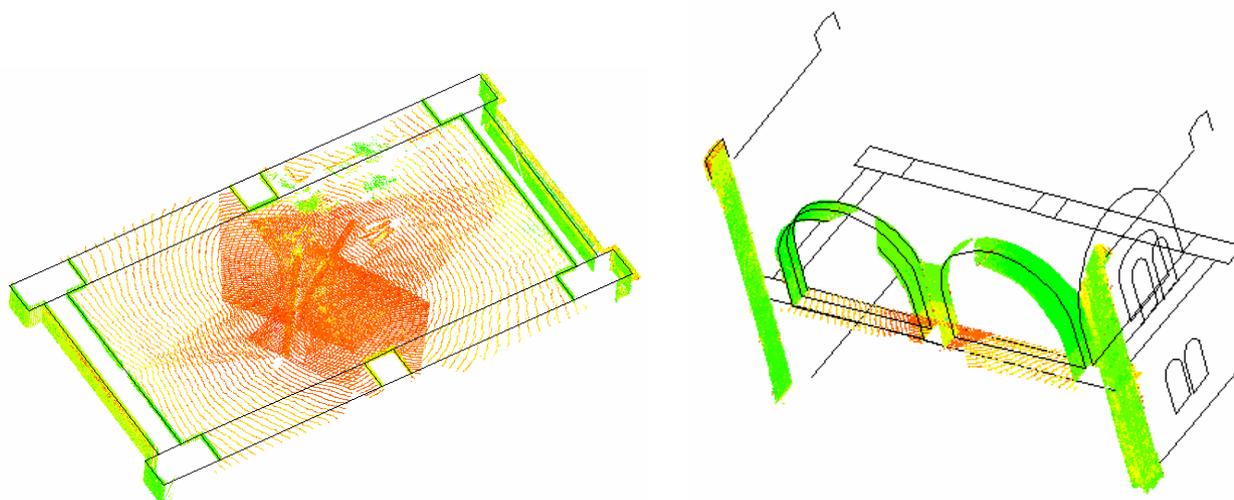
Per poter poi mosaicare correttamente l'interno con l'esterno, le posizioni della stazione totale e del prisma sono state invertite rispetto alle scansioni precedenti; ovvero il prisma è stato posizionato a terra, mentre la stazione totale al primo piano affacciata alla finestra.. Tale operazione ha così consentito di avere un comune sistema di riferimento per le diverse scansioni.

Di seguito sono riportate alcune viste relative ad operazioni di *registration* tra interno ed esterno (Fig. 3), dove si può notare il parallelismo tra le facciate esterne e l'interno del salone voltato.



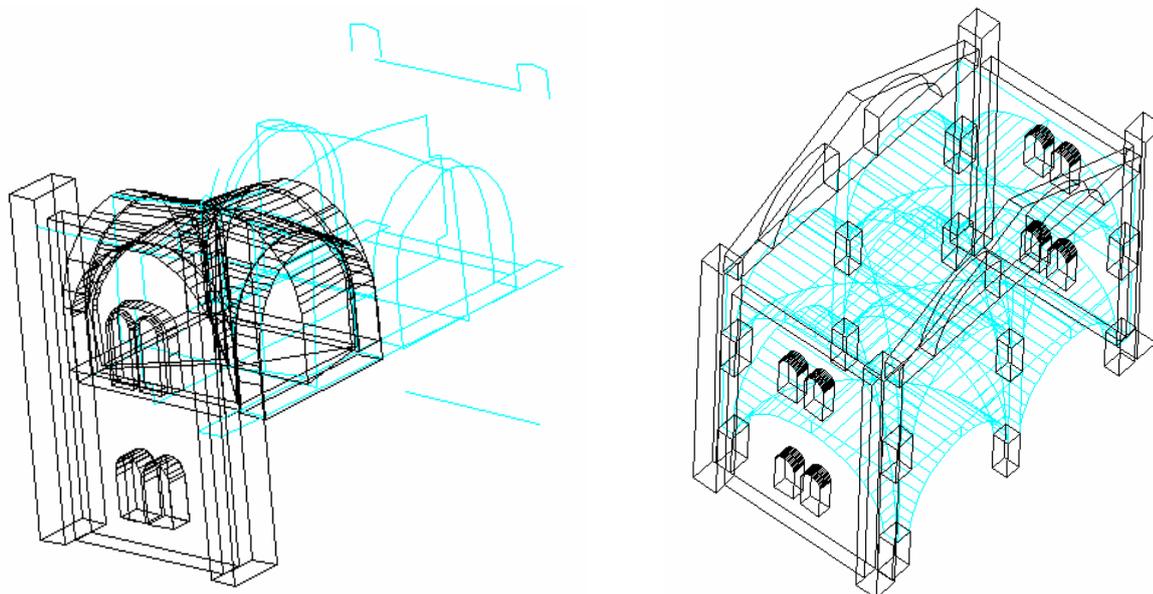
*Fig. 3 – Operazioni di Registration: vista dall'alto (a sinistra);  
vista laterale dell'unione interno ed esterno (a destra).*

Ottenuta una corretta *registration* si può passare alla fase di modellazione allo scopo di ottenere un modello 3D CAD da importare poi in un ambiente per l'analisi agli elementi finiti (in questo caso si è scelto Straus 7). Tramite Cloudworx, in ambiente Cyclone (applicativo Leica), è possibile "caricare" una enorme quantità di punti scansioni in ambiente AutoCAD; aprendo un normale disegno in AutoCAD e caricando un *modelspace*, risulta agevole lavorare sulla nuvola di punti ottenendo molto velocemente un disegno in 2D o 3D (Fig. 4). Dopo aver scelto le sezioni opportune, è possibile, tramite il comando *polilinea*, tracciare i contorni evidenziati dalle sezioni. Allo scopo, occorre "spostare" il sistema di riferimento nella posizione più consona, poiché la polilinea lavora su un piano con z costante.



*Fig. 4 – Sezione della registration dove creare la pianta disegnata in AutoCAD (a sinistra) e  
sezione della registration sulla quale mosaicare gli archi delle volte (a destra).*

Successivamente, il modello tridimensionale (Fig. 5), eseguito in AutoCAD sulla base della *registration*, creerà il collegamento tra la parte di rilievo eseguita con il laser a scansione e l'analisi agli elementi finiti che verrà eseguita con Straus 7.



*Fig. 5 – Creazione del modello: facciata disegnata in AutoCAD (a sinistra) e modello 3D in assonometria creato con AutoCAD a partire dalla registration.*

### **Analisi agli elementi finiti (FEM)**

L'analisi agli elementi finiti può essere considerata, oggi, il sistema di calcolo più appropriato per analisi di strutture, in quanto, rispetto alle analisi statiche tradizionali, consente di:

- modellare strutture geometricamente complesse in tre dimensioni
- gestire i parametri caratteristici dei materiali implementati nel modello
- effettuare, sulla stessa geometria, analisi diverse (lineari, non lineari, dinamiche, ecc.).

Generalmente, però, si preferisce integrare l'analisi di tipo FEM con approcci statici di tipo tradizionale: infatti, pur essendo possibile un'accurata modellazione di strutture complesse, viene fornito lo stato tensionale della struttura, ma non viene individuato il plausibile comportamento di elementi non resistenti a trazione.

Nell'analisi strutturale degli edifici storici, si incontrano, però, alcune difficoltà dovute al fatto che le proprietà dei materiali sono scarsamente definite (per il limitato accesso a prove distruttive) e che i risultati di tali analisi offrono, spesso, notevoli variazioni all'interno del medesimo corpo di fabbrica.

Il problema principale, quindi, non è costituito dal metodo di calcolo in se stesso, ma dalle ipotesi scelte per l'elaborazione del modello: in questo ambito, considerare il materiale come omogeneo, isotropo e continuo è poco coerente con la realtà.

Anche la geometria può comportare ulteriori approssimazioni; infatti, è necessario un rilievo estremamente preciso (fornito, quindi, dal rilievo laser scanner ad alta risoluzione), in quanto a piccole variazioni geometriche possono essere associati differenti stati tensionali. Infine, un ulteriore vantaggio nell'utilizzo del metodo agli elementi finiti deriva dal poter operare una calibrazione per fasi successive del modello su caratteristiche oggettive della struttura, quali fessurazioni, deformazioni e tutto ciò che possa essere riprodotto fedelmente nel modello stesso.

### Descrizione del modello agli elementi finiti

Dal rilievo ad alta risoluzione ottenuto dal laser a scansione, successivamente elaborato con Cyclone e quindi importato in AutoCAD, integrato con altri rilievi di tipo tradizionale, passando per una restituzione tridimensionale costruita anche su questi, si giunge alla modellazione della sezione di edificio prescelta.

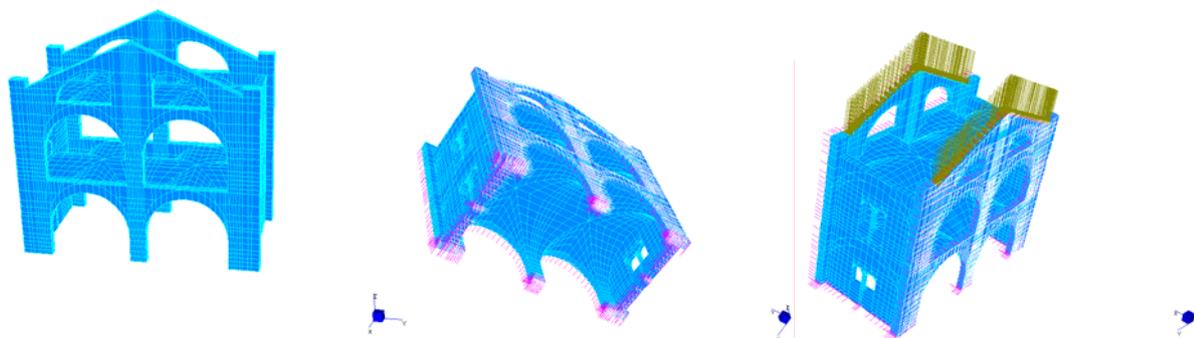


Fig. 6 - Analisi agli elementi finiti: vista frontale della mesh (a sinistra), vincoli di simmetria e alla base imposti al modello (in centro) e carico della copertura applicato al modello (a destra).

Poiché l'edificio analizzato presenta una geometria abbastanza semplice e ripetitiva, è ragionevole limitare l'analisi ad un singolo modulo (porzione d'edificio da un pilastro all'altro). Questo tipo di semplificazione, ovviamente, comporta la scelta di imporre, nelle zone di troncamento del modello, delle condizioni di simmetria trasversale, tali che impediscano le traslazioni lungo la direzione longitudinale (x) e le rotazioni che presentano componenti di spostamento in tale direzione (Fig. 6).

Per quanto riguarda la definizione dei carichi, si è tenuto conto del peso proprio della struttura, condizione di carico principale per un edificio massiccio in muratura, e dei carichi di copertura ripartiti sulle superfici d'incidenza.

Va notato che per quanto riguarda la muratura nel modello si è considerato un materiale unico, omogeneo, anisotropo, rappresentativo di tutta la muratura, con densità riscontrata generalmente negli edifici in laterizio di  $1800 \text{ kg/m}^3$ . Invece, per quel che riguarda il carico trasmesso dalla copertura (Fig. 6), si è valutato il calcolo del peso degli elementi che la compongono.

Sulle capriate in muratura, di spessore 60 cm, poggiano delle travi in legno di sezione quadrata (32x32 cm) con interasse di circa un metro; su di esse poggiano dei travetti di sezione 2x5 cm con interasse di circa 30 cm. Su di essi sono disposte delle tavole che sostengono il manto esterno e quindi i coppi in laterizio. Si sono considerati i seguenti valori: *Carico manto* =  $70 \text{ kg/m}^2$  e *Densità legno* =  $600 \text{ kg/m}^3$ . Nel calcolo che segue si è considerato una superficie di incidenza con dimensioni date da una falda (8,92 m) nella direzione trasversale e dalla distanza tra due interassi (7,76 m) in quella longitudinale (Tab. 1).

$$\text{Peso delle travi} = 600 \text{ kg/m}^3 \cdot 9 \cdot 0,32 \text{ m} \cdot 0,32 \text{ m} \cdot 7,76 \text{ m} = 4291 \text{ kg}$$

$$\text{Peso dei travetti} = 600 \text{ kg/m}^3 \cdot 25 \cdot 0,02 \text{ m} \cdot 0,05 \text{ m} \cdot 8,92 \text{ m} = 134 \text{ kg}$$

$$\text{Peso delle tavole} = 1800 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,03 \text{ m} \cdot 8,92 \text{ m} \cdot 7,76 \text{ m} = 3738 \text{ kg}$$

$$\text{Peso dei coppi} = 70 \text{ kg} \cdot 8,92 \text{ m} \cdot 7,76 \text{ m} = 4845 \text{ kg}$$

$$\text{Carico totale} = N = 13008 \text{ kg}$$

$$\text{Carico applicato} = \frac{N}{A} = \frac{N}{8,92 \text{ m} \cdot 0,60 \text{ m}} = 2432 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

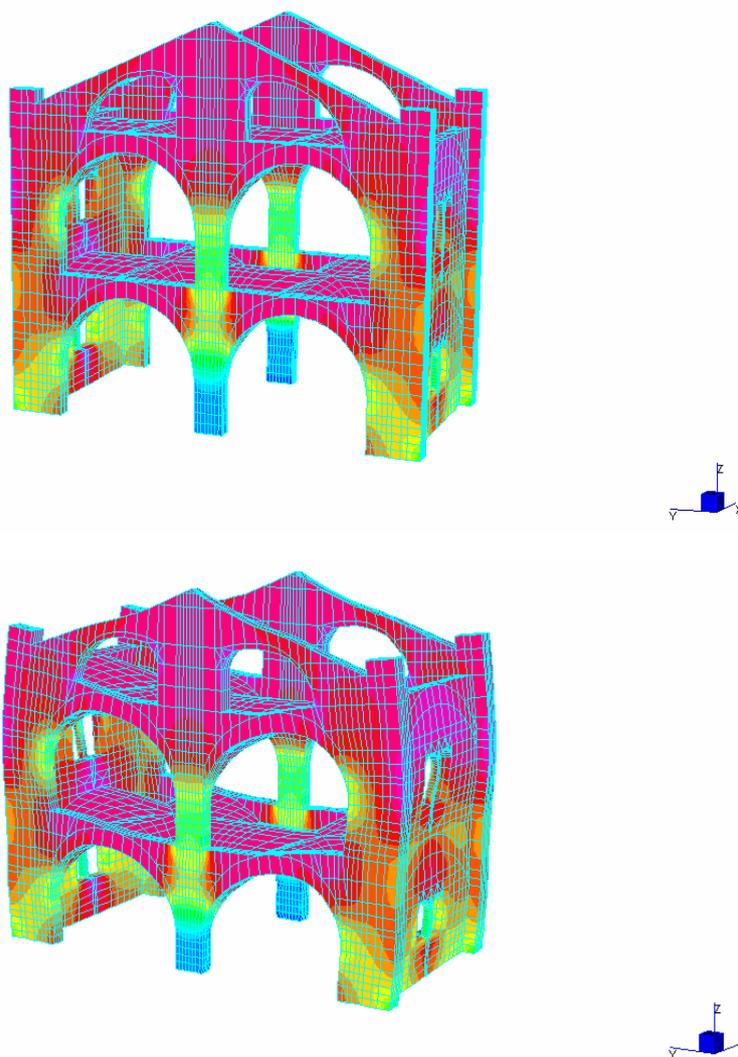
Tab. 1 – Esempio di calcolo del carico applicato al modulo strutturale di Fig. 6

### Analisi elastica lineare

Il modello descritto precedentemente è stato implementato tramite il software Straus, versione 7, che consente l'immissione di dati geometrici in forma grafica e la definizione dei parametri delle entità geometriche.

Nell'analisi elastica lineare sono stati assegnati i valori di alcuni parametri significativi delle caratteristiche dei materiali. Tali parametri sono la densità del materiale, il modulo di elasticità di Young  $E$  ed il coefficiente di Poisson  $\nu$ . Per la muratura sono stati assunti rispettivamente i valori di  $1800 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ,  $3300 \text{ [Mpa]}$  e  $0,2$ .

Si analizza il comportamento del modello in direzione verticale. In questo modo si indagano le modalità di discesa a terra del peso, consentendo un'interpretazione immediata, intuitiva del comportamento ed, allo stesso tempo, fornendo una prima verifica della correttezza del modello. Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dal modello con il solo peso proprio senza il carico del tetto per l'analisi della compressione verticale.



*Fig. 7 – Analisi della compressione verticale per un singolo modulo dell'edificio*

Come si può notare, la quasi totalità della struttura è sottoposta a compressione in direzione  $z$ . Il colore magenta indica debole compressione ( $0,1 \text{ Mpa}$ ) e si localizza nella parte superiore dell'edificio; scendendo verso terra l'intensità della compressione aumenta sino a raggiungere valori compresi tra i  $0,1$  e i  $0,5 \text{ Mpa}$  lungo la muratura perimetrale. Da notare, anche, alcuni picchi di compressione ( $1,2 \text{ Mpa}$ ) presenti alla base dei pilastri centrali.

### Mura Antiche di Cittadella (Padova)

La stessa filosofia di progetto è stata applicata al rilievo della cinta muraria di Cittadella, borgo medievale dell'alta padovana, la cui struttura architettonica è caratterizzata da una forma di tipo ellittico irregolare.

In questo caso, al carattere di non regolarità, si aggiunge l'incertezza geometrica data dal fenomeno del degrado diffuso, come la presenza di fessure o di elementi strutturali collassati, che hanno reso le operazioni di rilevamento quanto mai delicate e di difficile esecuzione (Fig. 8).

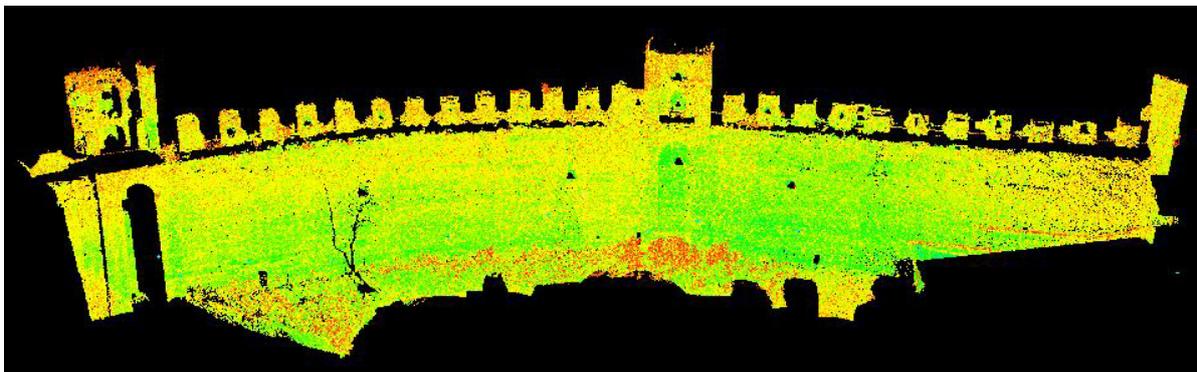


Fig. 8 – Allineamento delle scansioni interne e zona d'ombra generata da arbusti

Il progetto di rilievo del tratto delle Mura compreso tra porta Padova e porta Treviso ha previsto, anche in questo caso, l'utilizzo integrato di diverse metodologie di rilievo. E' stata, quindi, realizzata una rete principale di inquadramento (Fig. 9) che ha costituito l'ossatura di tutto il rilievo in quanto ha consentito di definire il sistema di riferimento locale.

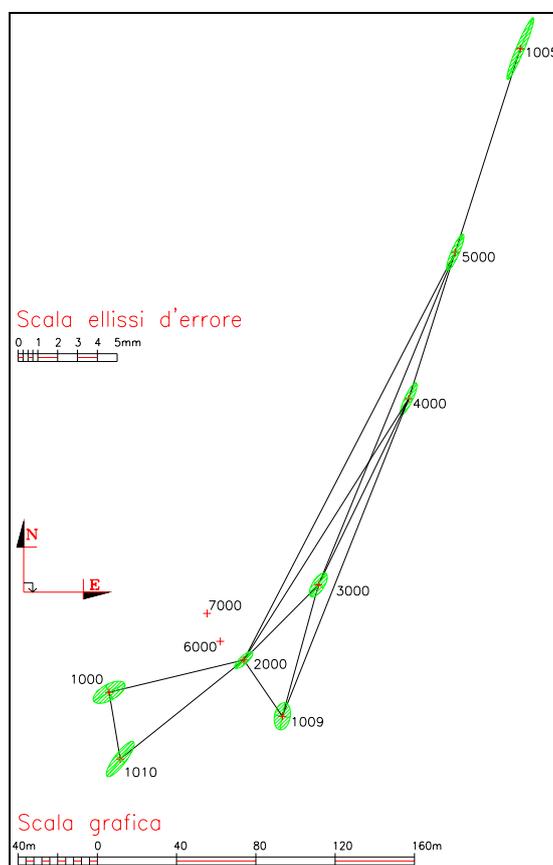


Fig. 9 – Schema della rete, collegamenti eseguiti, ellissi standard d'errore

Per quanto riguarda le acquisizioni delle nuvole di punti, si è scelto di far stazionare lo scanner lungo la sommità della scarpata arginale interna del fossato parallelo alla cinta muraria: così, la distanza media tra tutti i punti di stazione e la cinta muraria si è attestata fra i 20 e i 30 metri con una precisione finale, sul singolo punto acquisito, che rientra nel valore massimo garantito dalla casa costruttrice del laser scanner (4mm fino a 50 metri di distanza). Inoltre, l'ampiezza del fascio di scansione ha permesso, a questa distanza, di acquisire il tratto di cinta muraria in tutta la sua altezza senza dover modificare la posizione dello scanner.

Il progetto di scansione, con 18 scansioni esterne e 26 interne, ha previsto delle acquisizioni *generali* secondo una maglia di 3x3 cm per ricoprire, come detto, l'intera altezza della cinta muraria e con un adeguato grado di sovrapposizione, in senso longitudinale, per garantire un adeguato allineamento in fase di elaborazione (Fig. 10).

Inoltre, si sono eseguite delle scansioni *particolari*, con griglia di acquisizione di 1 cm di lato, concentrate sulle torri e sulle zone molto deteriorate, per fornire un quadro fessurativo sufficientemente dettagliato in vista di un eventuale intervento di adeguamento strutturale.

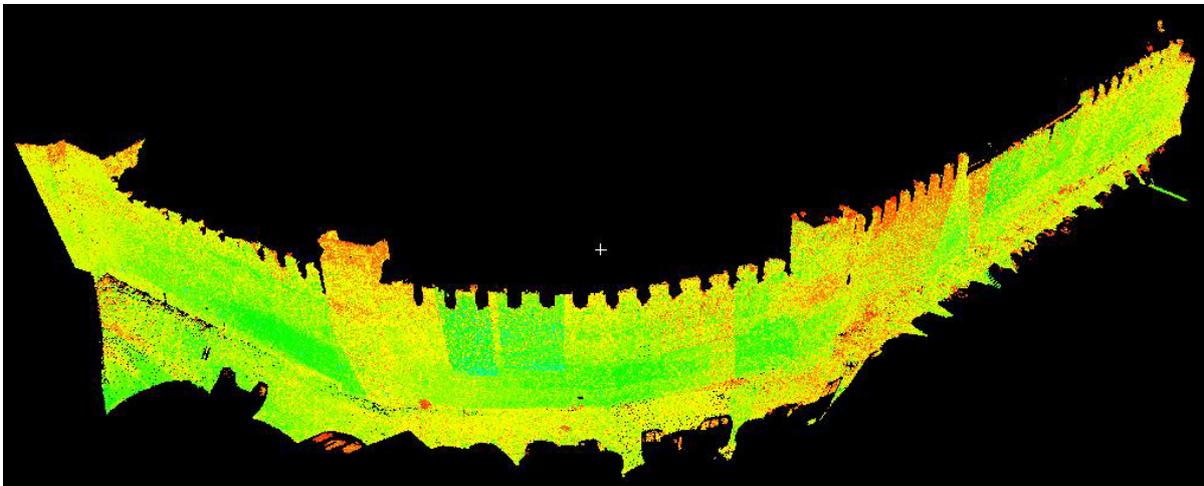


Fig. 10 – Allineamento delle scansioni esterne per la creazione del modello globale

Anche in questo caso, si è scelto l'utilizzo del plug-in Cloudworx per la gestione delle viste fondamentali (Fig. 11) in ambiente AutoCAD, visualizzando singole porzioni di nuvola e avendo a disposizione sezioni o piante per le quali ricavare, mediante polilinea, tavole tecniche.

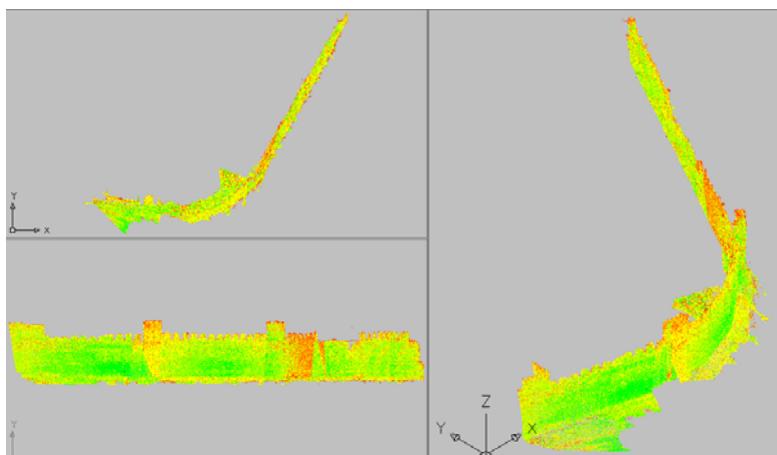
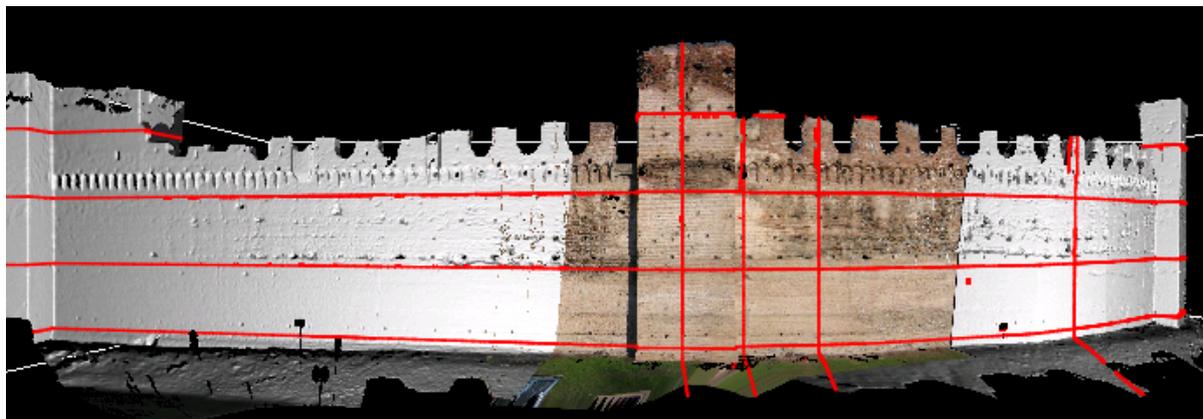


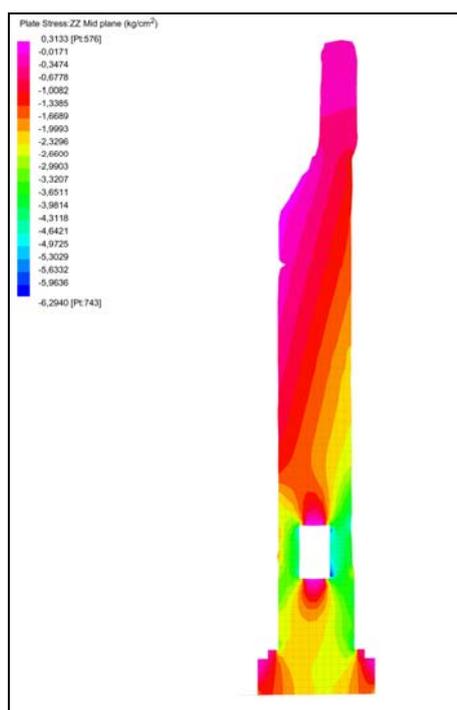
Fig. 11 – Visualizzazione della nuvola di punti mediante Cloudworx viste fondamentali (pianta, prospetto, assonometria)

Per una gestione più efficace delle sezioni multiple, ovvero sia orizzontali che verticali a varie quote, si è scelto di operare in ambiente Reconstructor, con il modulo Surveyor View (Fig. 12).



*Fig. 12 – Sezioni a varie quote per il controllo della regolarità di pianta.*

Anche per questa struttura, il rilievo era finalizzato all'analisi strutturale, condotta, analogamente al caso precedente, con il software Straus 7. In questo ambiente per l'analisi FEM sono state importate le sezioni ricavate dal rilievo laser ed adeguatamente editate in modo da evitare i problemi di malcondizionamento della geometria. Considerando una profondità unitaria, pari a un metro, il modello tridimensionale viene suddiviso in elementi "PLATE" a quattro nodi di lato pari a 20 cm. L'andamento naturale del terreno ed il livello di fondazione portano a considerare la sezione vincolata alla base trascurando gli effetti dovuti alla spinta dei terreni. La sezione può essere dunque vista come un muro a gravità con un proprio baricentro, soggetto al peso proprio, al vento e ad un momento generato non solo dalle forze orizzontali ma anche dal fuori piombo. Inoltre la presenza della cavità interna genera un andamento delle tensioni che può indurre trazione in alcune zone. L'analisi condotta è del tipo statico lineare; di seguito viene riportata l'analisi delle tensioni verticali dovute al peso proprio per una sezione attraversata da un cunicolo.



*Fig. 13 – Output delle tensioni verticali dovute al peso proprio.*

Come si può osservare nella valutazione del peso proprio (Fig. 13), la maggior parte della sezione risulta compressa. Le tensioni raggiungono valori di  $6,29 \text{ Kg/cm}^2$  per la compressione e di  $0,31 \text{ Kg/cm}^2$  per la trazione: quest'ultima risulta localizzata nella zona dell'intorno del cunicolo.

La rappresentazione cromatica non deve trarre in inganno in quanto, come è ovvio, la parte relativa alla merlatura e al camminamento di ronda non è tesa, bensì presenta una debole compressione dovuta al progressivo diffondersi dei carichi, che aumentano all'avvicinarsi della zona di fondazione ma che risentono della geometria complessiva della struttura.

## **Conclusioni**

In questo lavoro si sono analizzati approfonditamente i molteplici aspetti e le numerose problematiche incontrate nel progetto di rilevamento dell'Arsenale Vecchio di Verona e delle Mura Antiche di Cittadella, finalizzato all'analisi strutturale.

In particolare, si è riscontrato che, rilevare architetture a forte sviluppo tridimensionale, associato a caratteristiche di non linearità geometrica e complessità strutturale, può presentare alcune difficoltà:

- la realizzazione di geometrie gestibili all'interno di un codice di calcolo automatico può risultare uno dei limiti, superabile però facilmente con una manipolazione del dato finalizzata al mantenimento delle caratteristiche morfometriche generali e che permetta una simulazione numerica piana rappresentativa della realtà strutturale vigente;
- la realizzazione di piante, prospetti e sezioni risente dei parametri utilizzati durante la fase di elaborazione e il risultato deve essere sempre valutato con criticità ricercando il giusto compromesso tra corretta interpretazione e livello di dettaglio;

La corretta applicazione delle attuali metodologie di misura, adeguatamente progettate, ha permesso, comunque, il raggiungimento degli obiettivi proposti con la produzione di elaborati qualitativamente e quantitativamente dettagliati e tali da soddisfare le esigenze dei diversi settori disciplinari impegnati nel processo conservativo, dove le potenzialità del modello tridimensionale globale spaziano dalla visualizzazione 3D al calcolo di caratteristiche topologiche e metriche di superfici complesse.

In particolare, il rilievo ha fornito quelle informazioni metriche indispensabili per la conoscenza non solo delle parti superficiali visibili, ovvero quelle che forniscono l'immagine dell'opera, ma soprattutto di quelle non percepibili direttamente (ad esempio spessori di muri e di volte): una lettura ed una elaborazione ragionata dei dati numerici rilevati può portare, infatti, alla comprensione della struttura, del suo stato, delle trasformazioni eventualmente subite e delle tecniche costruttive utilizzate.