

Rilevamento laser scanning, modello della superficie (DSM) e modello per il metodo agli elementi finiti (FEM) di una struttura

Domenico VISINTINI (*), Anna SPANGHER (**)

(*) Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Udine,
via delle Scienze, 206 - 33100 UDINE, tel. 0432 558719, e-mail: domenico.visintini@uniud.it

(**) Unità Operativa Ufficio Tecnico del Traffico, Comune di Udine,
via Lionello, 1 - 33100 UDINE, tel. 0432 271424, e-mail: anna.spangher@comune.udine.it

Riassunto

Questo articolo tratta del contributo che le tecniche di scansione laser possono fornire alla miglior definizione del modello geometrico di base per analisi strutturali svolta mediante metodi agli elementi finiti (FEM). Dapprima viene presentata e commentata la normativa attuale, relativamente alla parte del “rilievo geometrico” nell’ambito del percorso di conoscenza della struttura. Sono messe in luce le richieste di precisione, accuratezza e dettaglio e come il rilievo influenza il “livello di conoscenza”, il conseguente “fattore di confidenza” e quindi, di fatto, l’intera analisi strutturale. Si illustrano poi i problemi del passaggio dal modello DSM ottenuto da scansioni laser al modello per il calcolo strutturale. Infine viene presentata una prima applicazione all’arco Bollani di Udine, opera attribuita al Palladio, scansionato e sottoposto ad un’analisi FEM statica semplificata.

Abstract

The paper describes the contribution that laser scanning techniques may provide to the best definition of a geometrical model as basis for structural analyses carried out by the finite element method (FEM). The current legislation is presented and remarked, focusing the "geometrical survey" in the knowledge path of the structure. The requirements of accuracy, correctness and detail are highlighted as well as the influence of the survey in the "level of knowledge", the resulting "confidence factor" and thus the whole structural analysis. The conversion problems from laser scanning DSM to the model for FEM are discussed. Finally, the laser scanning survey and the simplified static FEM analysis of the Bollani arc in Udine, attributed to Palladio, is shown.

1. Introduzione

Il settore amplissimo dell’*analisi strutturale*, uno delle macro-aree fondamentali dell’ingegneria civile, non può essere, né qui né ovunque, schematizzato neanche nei suoi temi principali. Già limitandosi allo specifico problema della *valutazione del rischio sismico* degli edifici storico-artistici costituenti *patrimonio culturale*, i diversi aspetti da trattare sono ben trentuno, stando a quanto stabilito dalla normativa attualmente vigente, cioè la Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011 “Linee guida per la Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008”. Tanto per ribadire la grande complessità dell’argomento, la stessa normativa regola cinque aspetti dei “Requisiti di sicurezza e conservazione”, due della “Azione sismica”, dieci della “Conoscenza del manufatto” e ben quattordici dei “Modelli per la valutazione della sicurezza sismica”. Considerando non di *interesse topografico* la *riduzione del rischio sismico* (i “Criteri per il miglioramento sismico e tecniche di intervento” regolamentati in altri 12 punti), il possibile contributo scientifico e metodologico del nostro settore scientifico-disciplinare è evidentemente riportato nell’articolo 4. “Conoscenza del manufatto”, punto 4.1 “Il percorso della conoscenza”, al paragrafo 4.1.4 “Rilievo geometrico”.

2. Il percorso della conoscenza (geometrica) della struttura

Dell'intero dispositivo normativo al § 4.1.4, di seguito si riportano (*in corsivo*) e si commentano (tra parentesi in carattere normale) le parti ritenute più significative: si tratta di argomentazioni ben note a chi si occupa di rilevamento topografico, fotogrammetrico e per scansione laser terrestre (TLS), ma che diventano interessanti poiché ridefinite per lo specifico fine *dell'analisi strutturale*.

La conoscenza della geometria strutturale di organismi esistenti in muratura deriva di regola da operazioni di rilievo (notare il “di regola”). Il rilievo dovrà essere riferito sia alla geometria complessiva dell'organismo che a quella degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con gli eventuali edifici in aderenza. La descrizione stereometrica (stereometria: “studio e misurazione descrizione dei solidi”, termine un po' troppo matematico per il contesto) della fabbrica comporta l'individuazione delle caratteristiche plano-altimetriche degli elementi costitutivi. Pertanto, ad ogni livello, andranno rilevate la geometria di tutti gli elementi in muratura, delle volte (spessore e profilo), dei solai e della copertura (tipologia e orditura), delle scale (tipologia strutturale), la localizzazione delle eventuali nicchie, cavità, aperture richiuse (con quali modalità), canne fumarie, elementi estranei inclusi e la tipologia delle fondazioni (quindi anche alcune parti non rilevabili con le tecniche “topografiche” intese in senso stretto).

La rappresentazione dei risultati del rilievo verrà effettuata attraverso piante, alzati e sezioni (come sempre fatto) oltre che con particolari costruttivi di dettaglio. Completata questa operazione, si procederà, all'interno del rilievo geometrico complessivo, alla identificazione dello schema strutturale resistente (si tratta del passaggio chiave, che richiede competenze “non topografiche”). Poiché il rilievo geometrico serve a definire la geometria del modello da utilizzare nell'analisi sismica, i suoi vincoli ed i carichi agenti, è opportuno verificare che tutte le informazioni necessarie siano state rilevate. In particolare dovranno essere individuati i punti significativi per un modello di calcolo, quali imposte degli orizzontamenti e dei sistemi archi voltati, entità dell'appoggio degli stessi sulle murature d'ambito. Inoltre dovranno essere compiutamente determinabili le masse degli elementi e i carichi gravanti su ogni elemento di parete (le varie motivazioni verso il raggiungimento del massimo livello di dettaglio e di precisione nel rilievo).

Le difficoltà del rilievo geometrico sono legate all'accessibilità di alcuni spazi, quali sottotetti, volumi tra false volte o controsoffitti e coperture, oppure all'eccessiva altezza degli elementi, come nel caso di campanili, torri, volte in una navata (situazioni molto ben note); tuttavia, sono disponibili strumenti (laser scanner in primis) che consentono un rapido rilievo e una restituzione accurata anche nel caso di elementi complessi, e tecniche di indagine diretta (endoscopia) o indiretta (termografia, georadar, ecc.) per gli spazi non accessibili (tecniche “non topografiche”).

La restituzione tridimensionale dell'organismo può essere complessa, ma è certamente utile ai fini della modellazione (...meno male che è utile...). Il rilievo di stucchi, decorazioni ed elementi non strutturali, utile ai fini dell'individuazione delle caratteristiche dei beni artistici, non deve ostacolare la precisa conoscenza della geometria degli elementi architettonico-strutturali.

Dovrà essere rilevato e rappresentato l'eventuale quadro fessurativo, in modo tale da consentire l'individuazione delle cause e delle possibili evoluzioni delle problematiche strutturali dell'organismo (esecuzione di rilievo ed elaborazioni di dettaglio a grandissima scala). Le lesioni saranno classificate secondo la loro geometria (estensione, ampiezza) ed il loro cinematismo (distacco, rotazione, scorrimento, spostamento fuori dal piano) (parametri geometrici individuabili soltanto con una restituzione assai precisa ed accurata).

In maniera simile le deformazioni andranno classificate secondo la loro natura (evidenti fuori piombo, abbassamenti, rigonfiamenti, spanciamenti, depressioni nelle volte, ecc.) (idem come sopra) ed associate, se possibile, ai rispettivi meccanismi di danno.

Il § 4.1.6 “Il rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione” contiene altre interessanti specificazioni, alcune già riportate al § 4.1.4, che raccomandano *l'acquisizione di informazioni spesso nascoste (sotto intonaco, dietro a controsoffitti, ecc.), che può essere eseguita grazie a tecniche di indagine non distruttive di tipo indiretto (termografia, georadar, tomografia sonica, ecc.) o ispezioni dirette debolmente distruttive (endoscopie, scrostamento di intonaci, saggi, piccoli*

scassi, ecc.). Nello stesso paragrafo è ribadita l'importanza dei dati acquisibili con il rilevamento: *le caratteristiche geometriche e materiche dei singoli componenti, oltre che le modalità di assemblaggio oppure la forma, tipologia e dimensione degli elementi trasversali (denominati diatoni) di collegamento tra i paramenti murari.* Infine si richiede una modellazione geometrica e una restituzione grafica di estremo dettaglio, se non la strutturazione delle informazioni in un vero e proprio database o in un *Building Information Model (BIM)*, poiché è necessario conoscere:

- *la natura delle malte ed il loro stato di conservazione,*
- *la tipologia della muratura (in mattoni, in pietra - squadrata, sbazzata, a spacco, ciottoli - o mista; a paramento unico, a due o più paramenti) e le caratteristiche costruttive (tessitura regolare o irregolare; con o senza collegamenti trasversali, ...),*
- *la qualità del collegamento tra pareti verticali (ammorsamento nei cantonali e nei martelli, ...),*
- *la qualità del collegamento tra orizzontamenti (solai, volte e coperture) e pareti, con rilievo dell'eventuale presenza di cordoli di piano o di altri dispositivi di collegamento (catene, ecc.), gli elementi di discontinuità determinati da cavedi, canne fumarie,*
- *la tipologia degli orizzontamenti (solai, volte, coperture), con particolare riferimento alla loro rigidità nel piano, la tipologia ed efficienza degli architravi al di sopra delle aperture,*
- *gli elementi strutturalmente efficienti atti ad equilibrare le spinte eventualmente presenti,*
- *gli elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità.*

Senza entrare nel dettaglio degli innumerevoli aspetti trattati dalla normativa, nell'ambito del percorso di conoscenza e in parallelo alla caratterizzazione geometrica, deve essere soddisfatto quanto richiesto dai § 4.1.5 "Analisi storica degli eventi e degli interventi subiti", § 4.1.7 "La caratterizzazione meccanica dei materiali" e § 4.1.8 "Aspetti geotecnici", ben intese le conseguenze esiziali su tutta la valutazione di eventuali errori nella caratterizzazione dei materiali.

A questo punto, la normativa tratta al § 4.1.9 il "Monitoraggio", una procedura ben nota nel settore topografico, da compiere essenzialmente dopo l'intervento migliorativo di conservazione per verificarne l'efficacia nel tempo. Si riportano qui comunque alcune interessanti prescrizioni.

Il controllo geometrico della costruzione può essere eseguito mediante procedure di rilievo topografico, fotogrammetrico, o utilizzando tecniche innovative, come la nuvola di punti generata dal laser scanner (ovviamente tale metodologia non risulta esclusiva e deve essere attentamente valutata la precisione fornita in relazione alle soglie di movimento ritenute significative). Qui sono evidenziati due aspetti importanti: il monitoraggio per scansione laser è molto più veloce, praticamente automatico, ma non è detto che sia più preciso ed accurato solo per questo motivo; se gli spostamenti sono minimi si deve ricorrere a tecniche meccaniche (estensimetri) o utilizzare speciali apparecchiature fotogrammetriche (telecamere a luce bianca).

Il progetto di monitoraggio richiede una preliminare interpretazione del meccanismo di dissesto, che può spesso essere eseguita grazie alla meccanica dell'equilibrio delle murature considerate come corpo rigido; ciò permette di individuare una serie di punti notevoli da controllare. Risulta allora strategico il progetto della posizione dei punti di monitorare e delle "stazioni" di misura.

In alcuni casi, quando l'eventuale dissesto è ben compreso e possono essere definite soglie di sicurezza, il monitoraggio può rappresentare un'alternativa all'intervento, a vantaggio della conservazione. Considerazione che avvalorava ancora l'importanza delle tecniche di rilevamento: se sono affidabili, esse possono garantire la "non necessità" dell'intervento sull'edificio bene culturale.

3. Il livello di conoscenza della struttura

Concluso il percorso di conoscenza, la normativa introduce al punto 4.2 l'importante aspetto dei "Livelli di conoscenza e fattori di confidenza": *Identificata la costruzione, in relazione all'approfondimento del rilievo geometrico e delle indagini materico-costruttiva, meccanica e sul terreno e le fondazioni, viene assunto dal progettista un fattore di confidenza F_C , compreso tra 1 e 1.35, che consente di graduare l'attendibilità del modello di analisi strutturale e tenerne conto nella valutazione dell'indice di sicurezza sismica (o della vita nominale).*

Successivamente si dividono i modelli di valutazione della sicurezza sismica in due classi:

- *quelli che considerano la deformabilità e la resistenza dei materiali e degli elementi strutturali;*
- *quelli che considerano l'equilibrio limite dei diversi elementi della costruzione, pensando il materiale muratura come rigido e non resistente a trazione.*

Per ognuna di queste classi si seguirà una particolare strategia di assegnazione dei F_C , regolamentata dalla Circolare n° 617 2.2.2009 del C.S.LL.PP.. *In entrambi i casi, la definizione del fattore di confidenza andrà riferita al materiale/tipologia che maggiormente penalizza lo specifico meccanismo di danno/collasso in esame.* Il § 4.2. fornisce la seguente formula per calcolare F_C :

$$F_C = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{Ck}$$

sulla base dei coefficienti numerici riportati in Tabella 1 a sinistra, i cui valori sono associati alle quattro categorie di indagine ed al livello di conoscenza in esse raggiunto.

Rilievo geometrico	rilievo geometrico completo	$F_{C1} = 0.05$	Livello di Conoscenza	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	F_C
Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi	$F_{C1} = 0$	LC1	Rilievo muratura, volte, solai, scale. Individuazioni dei carichi gravanti su ogni elemento di parete. Individuazioni della tipologia delle fondazioni. Rilievo eventuale quadro fessurativo e deformativo.	verifiche in situ limitate	Indagini in situ limitate Resistenza: valore minimo di Tabella CSA.2.1 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella CSA.2.1	Tutti	1.35
	restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)	$F_{C2} = 0.12$						
	restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)	$F_{C2} = 0.06$	verifiche in situ estese ed esauritive		-caso a) (disponibili 3 o più valori sperimentali di resistenza) Resistenza: media dei risultati delle prove Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella CSA.2.1	1.20		
	restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su un esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, eventuali indagini diagnostiche)	$F_{C2} = 0$						-caso b) (disponibili 2 valori sperimentali di resistenza) Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella CSA.2.1, valore medio dell'intervallo di Tabella CSA.2.1; se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo; se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 - caso a).
Proprietà meccaniche dei materiali	parametri meccanici desunti da dati già disponibili	$F_{C3} = 0.12$	LC3			Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella CSA.2.1, valore medio dell'intervallo di Tabella CSA.2.1; se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo; se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 - caso a).	1.00	
	limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali	$F_{C3} = 0.06$						
	estese indagini sui parametri meccanici dei materiali	$F_{C3} = 0$						
Terreno e fondazioni	limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità d'informazioni sulle fondazioni	$F_{C4} = 0.06$				-caso a) (disponibile 1 valore sperimentale di resistenza) Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella CSA.2.1, oppure superiore, valore medio dell'intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 - caso a).		
	disponibilità di dati geotecnici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni	$F_{C4} = 0.03$						
	estese o esauritive indagini sul terreno e le fondazioni	$F_{C4} = 0$						

Tabella 1. Fattori di confidenza parziali (a sinistra); Livelli di conoscenza e fattori complessivi (a destra).

La successiva proposizione *Il rilievo geometrico (§ 4.1.4) dovrà essere sviluppato ad un livello di dettaglio coerente con le esigenze del modello geometrico adottato nelle valutazioni analitiche e/o delle necessarie considerazioni di tipo qualitativo* è di nuovo una richiesta implicita di precisione, accuratezza e dettaglio elevati del prodotto che il topografo deve mettere a disposizione.

In questi passaggi normativi si può soppesare il valore del rilievo geometrico (secondo il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici!) rispetto alle altre indagini conoscitive: se non si produce la *restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi*, il fattore di confidenza peggiora del 5%, grossomodo come se si eseguisse una *restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale* o soltanto *limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali*.

Una questione importante resta indefinita: se il rilievo geometrico "non è completo", cioè non è *coerente con le esigenze del modello geometrico adottato* (come dovrebbe), quanto peggiora quantitativamente il fattore di confidenza F_C ? Come è ovvio, in termini qualitativi, "tanto più quanto meno" è completo, ma non è semplice assegnare a F_C un valore numerico significativo.

Infine anche nel comma *Il rilievo materico e dei dettagli costruttivi (§ 4.1.6) dovrà tendere, compatibilmente con le esigenze di tutela del bene, ad accertare le diverse tipologie costruttive presenti, la loro localizzazione e ripetitività, con particolare attenzione a tutti gli aspetti che possono influenzare l'innescio di meccanismi di collasso locale*, i vocaboli *localizzazione e ripetitività* richiamano ancora alle tecniche topografiche in grado di misurarle in modo affidabile.

Riassumendo, l'incertezza nella conoscenza della struttura (geometria e dettagli costruttivi) e dei materiali che la costituiscono (calcestruzzo, acciaio, mattoni, malta) porta all'utilizzo di "coefficienti" F_C maggiori di uno che vanno in questo modo a ridurre cautelativamente i valori medi di resistenza dei materiali della struttura esistente; tali valori ridotti così adottati, potranno essere ulteriormente ridotti, quando previsto, con altri coefficienti parziali di sicurezza.

La Tabella 1 a destra riporta delle situazioni standard circa i valori di F_C e li pone in relazione con i corrispondenti valori del livello di conoscenza L_C ; secondo la normativa si hanno tre livelli:

- L_{C1} - LIMITATO: sono stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ limitate sui dettagli costruttivi ed indagini in situ limitate sulle proprietà dei materiali; il corrispondente F_C è 1.35;
- L_{C2} - ADEGUATO: sono stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi ed indagini in situ estese sulle proprietà dei materiali; il corrispondente F_C è 1.2;
- L_{C3} - ACCURATO: sono stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi, indagini in situ esaustive sulle proprietà dei materiali; il corrispondente F_C è 1.

4. Il rilevamento laser scanning e i modelli numerici ottenibili per il calcolo strutturale

Definito il contributo del rilievo geometrico al problema della verifica strutturale di edifici storico-artistici, è ben noto che con un sistema TLS integrato con camera fotogrammetrica (interna o esterna) si possa attuare un rilevamento caratterizzato da elevati valori di precisione, accuratezza e dettaglio di modellazione e restituzione e quindi trovarsi veramente nella classe L_{C3} e con $F_C = 1$.

Il risultato finale di ogni scansione laser è la definizione della geometria delle superfici scansionate dell'edificio e quindi, in nuce, la posizione, la forma e l'orientamento di ogni elemento costruttivo rispetto ad un unico sistema di riferimento, convenientemente assunto e di origini locali o globali. In generale la scansione dell'esterno di un edificio non presenta grossi problemi di registrazione (allineamento) delle varie nuvole di punti rispetto al sistema di riferimento prescelto; più difficoltosa è la registrazione delle scansioni interne, che forzatamente hanno parti comuni e target riflettenti soltanto nelle aperture fra i vani ed una limitato o assente sovrapposizione fra i diversi piani. È buona norma realizzare una rete topografica di inquadramento plano-altimetrica, tra l'altro con analoghe problematiche di interscambio fra le stazioni topografiche, misurando accuratamente la posizione dei target e vincolando la registrazione su di essi, così da limitare/annullare la propagazione degli errori di "orientamento relativo" fra le scansioni. Tutto si complica quando l'edificio non è rilevabile all'interno poiché si trova in condizioni precarie che non consentono un qualsiasi tipo di rilevamento in condizioni di sicurezza: sarà giocoforza necessario sfruttare tutta la documentazione cartacea disponibile (elaborati di progetto o rilievi precedenti) e, dopo la loro opportuna georeferenziazione degli stessi sulla base della posizione delle pareti esterne rilevate, procedere al loro "ridisegno" in ambiente CAD. La corretta registrazione fra tutte nuvole di punti, e quindi fra i modelli di superficie DSM (*Digital Surface Model*) da esse ottenute, è la prerogativa indispensabile per ricavare "per differenza" il corretto spessore delle pareti e dei solai, informazioni chiave per l'analisi strutturale.

Per quanto riguarda la morfologia tridimensionale dei diversi elementi strutturali, assumendo come esempio una singola parete e quindi considerando delle coordinate X,Y,Z, se la componente di spessore Z (costante o meno) è ricavata come detto sopra, il problema sta nella definizione dei valori di X,Y degli elementi costituenti la parete. Il DSM che si ottiene dal rilevamento TLS è un dato *continuum* costituito da migliaia (o più) di mesh (triangolari o quadrangolari) e si pone il problema della sua attendibile segmentazione automatica o quantomeno assistita. Si tratta di un problema non nuovo, ma ancora oggetto di ricerca: in tal senso è interessante l'approccio proposto da Nex e Rinaudo (2010) con la mutua integrazione fra dati TLS e immagini digitali acquisiti.

A prescindere dall'automatismo o meno del processo, è necessario passare all'individuazione dei "contorni" dei singoli elementi strutturali nel "piano X,Y" con un livello di suddivisione e di dettaglio congruenti al modello strutturale assunto. In definitiva si deve eseguire una suddivisione dell'intera superficie in un certo numero (finito) di elementi e di dimensioni adeguate: si ottengono così proprio quegli "elementi finiti", che è la denominazione del metodo di calcolo numerico (*Finite Element Method*, FEM) più largamente utilizzato per l'analisi strutturale. Questo processo può

essere eseguito secondo vari approcci, riducendo preliminarmente la numerosità della *mesh* (Caroti, Franconi e Piemonte, 2012) o addirittura sfruttando direttamente delle sezioni verticali e orizzontali del DSM, opportunamente spaziate fra loro (Cardaci, Mirabella Roberti e Versaci, 2011).

5. L'esempio dell'arco Bollani di Udine

L'arco Bollani, eretto certamente nel 1556 e attribuito all'opera di Andrea Palladio, è un arco celebrativo a tutto sesto, situato a lato della centralissima piazza della Libertà a Udine ai piedi della salita monumentale al castello. Eretto in onore del luogotenente veneto Domenico Bollani, come riporta l'epigrafe, non si sa se per riconoscimento della Comunità Udinese o se, con più probabilità, dallo stesso Bollani con intento auto-celebrativo, è stato presumibilmente costruito su disegno del Palladio. Ciò in considerazione delle analogie sulla metodologia costruttiva e sui materiali utilizzati in altre sue opere, quali il vicino Palazzo Antonini e l'arco di Porta Gemona a San Daniele del Friuli che, costruito una ventina d'anni dopo, è quasi una riproduzione dell'arco oggetto di studio.

La struttura ad unico fornice è realizzata in pietra piacentina di Torreano di Cividale con piedritti costituiti da blocchi a bugne rustiche, con fregio e architrave in stile dorico, sormontata da un leone marciante alato. La struttura nel suo complesso è alta 8,39 m e larga 7,08 m e, per la conformazione dei conci, è presumibile che sia stata realizzata secondo le misure del piede udinese (0,3405 m).

Nel corso del 2012 l'arco è stato sottoposto ad un restauro a cura del FAI, grazie al quale è stata ripulita sia la struttura lapidea sia la sovrastante statua realizzata in pietra vicentina e pertanto più porosa e soggetta alla formazione di microflora. L'intervento non ha interessato la parte strutturale.

Il rilevamento laser scanning dell'arco è stato realizzato con il sistema TLS Riegl Z390i integrato con camera metrica Nikon D200 di proprietà del CIRMONT di Amaro (UD, www.cirmont.it). Sono state acquisite tre scansioni, due di fronte dell'arco ed una dal retro dello stesso, un po' scorciate perché l'arco si trova in una strada aperta al traffico. Le due scansioni a maggior risoluzione eseguite sul lato principale hanno un totale di circa 6 milioni di punti (densità media 120 punti/dmq). Per la registrazione delle tre scansioni sono stati sfruttati 14 target riflettenti cilindrici ($\varnothing \square 5$ cm), posti soprattutto sulla soglia dell'arco, e 10 punti naturali, questi ultimi scelti più che altro nelle zone non accessibili in alto: il residuo medio della registrazione è risultato pari a 0,8 cm.

In Figura 2.1 è rappresentato l'arco in forma di nuvola di punti colorati con i valori RGB delle immagini fotogrammetriche acquisite, mentre la Figura 2.2 presenta il modello della superficie DSM dell'arco, ottenuto con una interpolazione su griglia quadrata di passo 1 cm e costituito da circa 900.000 triangoli, 60.000 dei quali per la parte alta dove si trova il leone marciante.

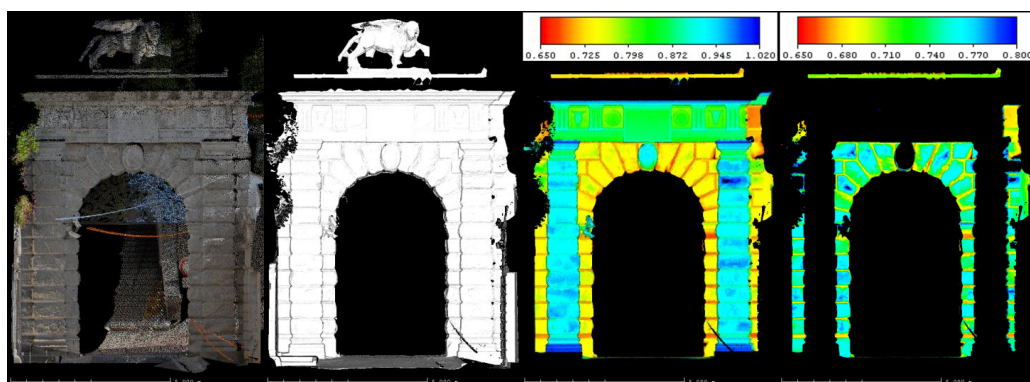


Figura 2. Il lato principale dell'arco Bollani di Udine: 1. Punti laser colorati RGB, 2. DSM dell'arco, 3. e 4. DSM colorato secondo la distanza dal piano centrale negli intervalli $[0,65 \pm 1,02 \text{ m}]$ e $[0,65 \pm 0,80 \text{ m}]$.

Il passaggio dal modello di superficie DSM ottenuto al “modello vettoriale” di base per un'analisi FEM è stato svolto in modo manuale, ridisegnando l'ortofoto ottenuta texturizzando il DSM con le immagini fotogrammetriche acquisite: il risultato è illustrato in Figura 3.1. In Figura 2.3 e 2.4 il DSM è invece colorato in funzione della distanza dal piano verticale centrale dell'arco, nei rispettivi

intervalli [0,65 m (rosso) ÷ 1,02 m (blu)] e [0,65 m (rosso) ÷ 0,80 m (blu)]. Nel primo caso sono ben evidenziabili le irregolarità della superficie dei conci, con alcune sporgenze asimmetriche delle quali potenzialmente tener conto nel modello di calcolo strutturale. Considerando un intervallo di “fuori piano” limitato a 15 cm, non sono rappresentate le due lesene ed il medaglione centrale (nonché la videocamera di sorveglianza!) e le parti colorate in giallo (distanza 0,69 m) coincidono di fatto con la bugnatura fra i conci e quindi possono guidare la loro identificazione automatica.

Passando ora alla sperimentazione di analisi strutturale dell’arco, come già detto in precedenza, il metodo FEM applicato a strutture realizzate in blocchi di muratura, siano essi in pietra o in muratura, comporta alcune semplificazioni geometriche e sulle caratteristiche dei materiali.

È stato impiegato il software *open-source* LISA FEA (*Finite Element Analysis*) (Sonnenhof Holdings, 2013). Come già detto, la definizione dei singoli conci è stata eseguita in ambiente AutoCAD (Figura 3.1) mettendo in risalto, tra l’altro, interessanti rapporti fra le dimensioni dei conci e la loro geometria perfettamente radiale. Sempre in AutoCAD sono stati identificati i nodi principali della struttura (Figura 3.2), poi importati all’interno di LISA FEA (Figura 3.3).

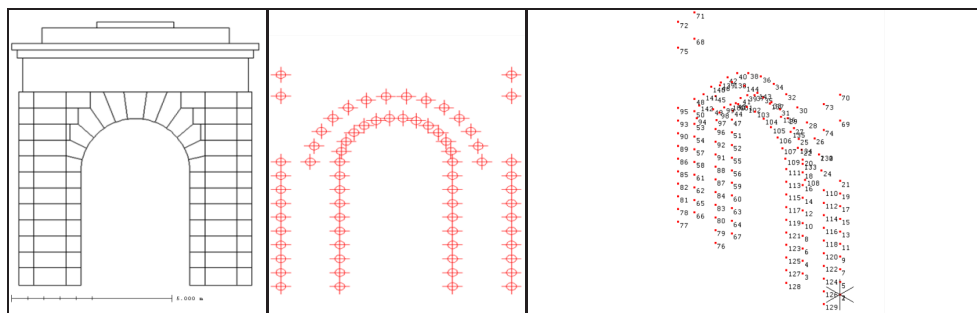


Figura 3. Verso l’analisi FEM: 1. Il contorno dei conci, 2. I nodi fra i conci, 3. I nodi in ambiente LISA FEA.

Successivamente la struttura è stata modellata con elementi che rappresentano i vari conci con solidi di tipo “wedge6” (6 vertici - a cuneo) e di tipo “hex8” (8 vertici - parallelepipedi), raffigurati in Figura 4.1 in modalità *wireframe* ed in Figura 4.2 con le facce dei vari solidi tra loro connessi: durante la definizione delle facce vanno rispettate le regole topologiche per le varie connessione.

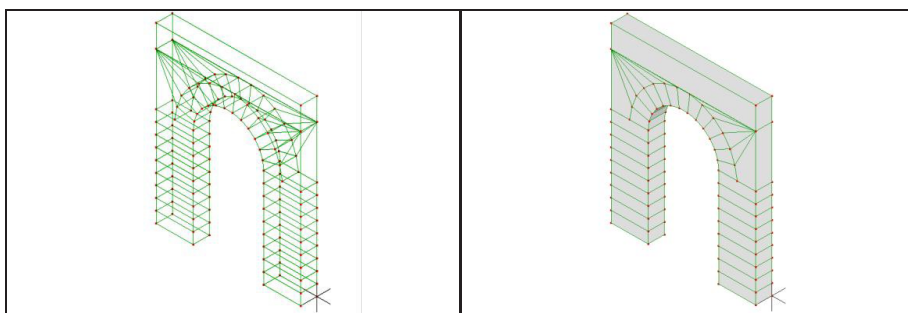


Figura 4. Il modello in ambiente LISA FEA: 1. Visualizzazione *wireframe*, 2. Visualizzazione solida.

Ottenuto così il modello tridimensionale solido complessivo, ad esso sono stati assegnati valori medi quali caratteristica costitutiva del materiale. Di solito si assume che la muratura abbia un comportamento ortotropo, ma ai fini dell’esperimento - che analizza il mero aspetto geometrico - e per semplificare la matrice di calcolo, si è assunto un comportamento isotropo con valori medi dei coefficienti di elasticità, di Poisson e di densità. Attraverso il comando “*constraints*”, la struttura è stata vincolata più rigidamente lungo l’asse verticale (Y), per simulare la maggiore resistenza a compressione offerta dal materiale lapideo. L’analisi statica della struttura che ha evidenziato le situazioni di stress sotto riportate (X direzione orizzontale, Y verticale, Z verso avanti).

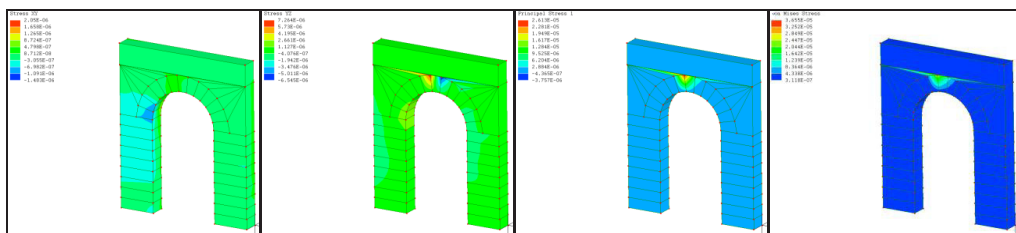


Figura 5. Distribuzione degli sforzi: 1. Nel piano XY, 2. Nel piano YZ. 3. Sforzi principali, 4. Sforzi di von Mises.

Dall'osservazione delle sollecitazioni calcolate si individuano agevolmente gli elementi dell'arco sottoposti a sforzi maggiori e si evidenzia anche una certa asimmetria delle sollecitazioni.

Mediante questa prima sperimentazione di verifica FEM dell'arco Bollani, svolta focalizzando l'attenzione alla geometria e semplificando notevolmente le condizioni di carico, i vincoli degli edifici adiacenti e le caratteristiche meccaniche dei materiali, è stata comunque percorsa l'intera filiera di elaborazioni dal rilevamento laser scanning alla verifica di stabilità sismica.

6. Conclusioni

In questo articolo è stata investigato il “valore aggiunto” fornito dalle tecniche di scansione laser terrestre nel campo della modellazione di edifici di carattere storico-artistico per definire il modello geometrico poi da analizzare dal punto di vista strutturale con metodi agli elementi finiti (FEM).

Limitando il campo di interesse alle strutture in muratura, la questione è regolata da una articolata normativa che richiede “tout court” un “rilievo geometrico” *sviluppato ad un livello di dettaglio coerente con le esigenze del modello geometrico adottato*. Sta al rilevatore capace fare in modo che tale esigenza sia adeguatamente soddisfatta. Una mancanza di informazioni geometriche può, di fatto, abbassare il “livello di conoscenza” da accurato, a adeguato a limitato, anche se la normativa considera tale casistica soltanto quando le verifiche in situ sono limitate o estese, ma non esaustive. Dall'altro lato, la scansione laser produce dei modelli DSM spesso troppo dettagliati e ridondanti per la gran parte dei software di analisi strutturali di tipo FEM: il passaggio dal DSM al modello per il calcolo strutturale è di difficile standardizzazione e richiede reciproca “buona volontà”.

L'esempio applicativo sull'arco Bollani di Udine qui presentato è un primo punto di partenza di un'attività di ricerca su questi argomenti che sarà sviluppata all'interno del Dottorato di ricerca in Ingegneria Civile Ambientale e Architettura presso l'Università degli Studi di Udine. Le sperimentazioni in programma dovranno verificare, per una data struttura, quanto la verifica strutturale sia sensibile alle variazioni geometriche del modello rilevato con metodologie diverse.

Bibliografia

- Cardaci A., Mirabella Roberti G., Versaci A. (2011), “From the continuous to the discrete model: a laser scanning application to conservation projects”, *Int.Arch.PRSSIS*, vol. XXXVIII-5/W16, Trento, 437-444.
- Caroti G., Franconi A., Piemonte A. (2012), “Metodologia di elaborazione di dati laser scanner per la generazione di modelli utili al calcolo strutturale”, *Atti 16a Conferenza Nazionale ASITA*.
- Nex F., Rinaudo F., (2010) “Photogrammetric and LiDAR integration for the Cultural Heritage metric surveys”, *Int.Arch.ofPRS&SIS*, vol. XXXVIII-5, Newcastle upon Tyne, UK, 490-495.
- Riegl (2009), “Operating&Processing Software RiSCAN PRO for Riegl 3D Laser Scanners - v1.5.0sp1”.
- Sonnenhof Holdings (2013), “Beginners’ Guide: Getting Started with LISA FEA - v8.0.0”.

Normativa

Circolare 2 febbraio 2009, n° 617, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, *Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008*.

Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 2011, *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*.

Norme tecniche per le costruzioni - D.M. 14 gennaio 2008, G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008, supplemento ordinario n° 30.