

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

In Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

## ***“Analisi Sismica della Basilica di San Nicola a Tolentino”***



**Relatori:**

prof. Donato SABIA

prof.ssa Antonia Teresa SPANO'

**Candidata:**

Adriana Pascale

Dicembre 2017



## **Ringraziamenti**

*Ringrazio il professor Donato Sabia e la professoressa Antonia Spanò per la loro disponibilità, dedizione e per la possibilità di partecipare a questa interessante ricerca, offrendomi strumenti innovativi e la loro magistrale esperienza.*

*Ringraziamento particolare va al Dottor Antonino Quattrone, sempre presente e paziente, per tutto il supporto professionale ed umano offertomi durante questo percorso.*

*Ringrazio tutti i miei amici per aver reso questi due anni molto di più di un semplice percorso di studi.*

*Ringrazio la mia amica di sempre Fiorella, per la pazienza e per la sua immancabile allegria.*

*Infine ringrazio la mia mamma, da sempre per me fonte di sostegno e di grande ispirazione.*



<b><u>INTRODUZIONE</u></b>	<b>9</b>
<b><u>IL MATERIALE MURATURA</u></b>	<b>11</b>
<i>CARATTERISTICHE DELLE MURATURE</i>	13
<i>CARATTERISTICHE DELLE MALTE LEGANTI</i>	16
<i>CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE MURATURE</i>	16
<i>RESISTENZA CARATTERISTICA A COMPRESSIONE DELLE MURATURE</i>	16
<i>CARATTERISTICHE ELASTICHE DELLE MURATURE</i>	17
<b><u>ANALISI STRUTTURALE</u></b>	<b>19</b>
<i>ANALISI STATICA LINEARE</i>	20
<i>ANALISI DINAMICA MODALE</i>	21
<i>ANALISI STATICA NON LINEARE</i>	22
<i>ANALISI DINAMICA NON LINEARE</i>	24
<b><u>IL PROBLEMA DELLE COSTRUZIONI ESISTENTI</u></b>	<b>25</b>
<i>LIVELLI DI CONOSCENZA E PARAMETRI MECCANICI</i>	27
<b><u>POSSIBILI MECCANISMI DI DISSESTO PER LE CHIESE</u></b>	<b>39</b>
<b><u>L'IMPORTANZA DEL MONITORAGGIO PER LA CONOSCENZA E LA CONSERVAZIONE</u></b>	<b>60</b>
<i>IL MONITORAGGIO "STORICO"</i>	62

<i>DALLA REALTÀ AL MODELLO ATTRAVERSO I MONITORAGGI DINAMICI</i>	63
<b><u>IL CASO STUDIO: “LA BASILICA DI SAN NICOLA DA TOLENTINO”</u></b>	<b>65</b>
<i>UN PO’ DI STORIA</i>	65
<i>ARCHITETTURA DEL COMPLESSO MONUMENTALE</i>	69
<i>LA FACCIATA DELLA BASILICA</i>	77
<i>LA BASILICA</i>	82
<i>CAPPELLE LATERALI</i>	93
<i>CAPPELLA MAGGIORE</i>	95
<i>IL CAPPELLONE</i>	95
<b><u>IL SISTEMA DI MONITORAGGIO</u></b>	<b>96</b>
<i>CARATTERISTICHE DEGLI ACCELEROMETRI E LORO POSIZIONAMENTO</i>	97
<b><u>DAL RILIEVO ALLA MODELLAZIONE</u></b>	<b>103</b>
<i>LA GEOMATICA</i>	105
<i>L’ESPERIENZA DI RILIEVO METRICO DELLA BASILICA DI SAN NICOLA SVOLTA DAL</i>	
<i>TEAM DIRECT</i>	109
<i>ATTIVITÀ DEL TEAM DIRECT</i>	111
<i>METODOLOGIE E TECNICHE UTILIZZATE</i>	114
<i>IL SISTEMA GPS/GNSS</i>	115
<i>RILIEVO RTK</i>	121
<i>FOTOGRAMMETRIA</i>	122

<i>LA FOTOGRAMMETRIA UAV</i>	133
<i>LASER SCANNER</i>	137
<b><u>RILIEVO 3D DEL CASO STUDIO: S. NICOLA A TOLENTINO</u></b>	<b>146</b>
<i>CALCOLO DELLA RETE</i>	147
<i>FOTOGRAMMETRIA UAV</i>	149
<i>LIDAR</i>	158
<i>VOLI INDOOR LA BASILICA DI SAN NICOLA</i>	171
<i>RILIEVO LASER SCANNING DEL SOTTOTETTO E DEL CASSETTONATO</i>	173
<i>ANALISI DELLA CUPOLA DEL SS. SACRAMENTO</i>	176
<i>ANALISI DEFORMAZIONI MURO</i>	178
<b><u>LA MODELLAZIONE</u></b>	<b>180</b>
<i>COSTRUZIONE DEL MODELLO GEOMETRICO</i>	180
<i>DAL MODELLO GEOMETRICO AL MODELLO F.E.M.</i>	209
<i>I MATERIALI</i>	210
<i>LA MESH</i>	215
<i>IMPORTAZIONE IN "MIDAS GEN" E FASI PRE-ANALISI: CARICHI E VINCOLI</i>	220
<b><u>ANALISI DINAMICA MODALE</u></b>	<b>223</b>
<b><u>ANALISI STATICA NON LINEARE</u></b>	<b>228</b>
<b><u>ANALISI TIME HISTORY</u></b>	<b>244</b>

***CONCLUSIONI*** **253**

---

***ALLEGATI*** **255**

---

***BIBLIOGRAFIA*** **256**

---

## ***Introduzione***

Oggetto del mio studio è stato il comportamento strutturale della Basilica di San Nicola, a Tolentino, esempio notevole di struttura in muratura storica. Questo studio, pensato in seguito agli avvenimenti sismici di agosto e ottobre 2016, è stato articolato in due fasi principali: la prima è stata la **MODELLAZIONE**, nella quale a partire dai rilievi fatti in situ ho creato un modello geometrico quanto più dettagliato possibile al fine di individuare gli elementi strutturali principali e il grado di vincolo sussistente tra di essi; la seconda fase è stata l'**ANALISI** della struttura attraverso il software agli elementi finiti "Midas", al fine di caratterizzare il comportamento della basilica.

La muratura è la tecnica costruttiva più antica e diffusa grazie alla relativa semplicità di posa in opera del materiale e del reperimento degli elementi principali, oggi però sostituito a causa della scarsa conoscenza del comportamento strutturale sotto sisma e della difficoltà riscontrata nella sua caratterizzazione al fine di definirne il legame costitutivo. E' per queste ragioni che lo studio di una struttura storica in muratura

risulta molto complesso rispetto alle strutture ordinarie in calcestruzzo armato.

Il materiale a disposizione, inerente la struttura, era scarso; per tale ragione, grazie alla collaborazione con il gruppo di Geomatica del dipartimento di Architettura e Design, del Politecnico di Torino, sono stati necessari numerosi rilievi con diverse tecniche, come il Lidar e le riprese aeree con drone, al fine di cercare di ricostruire un modello quanto più realistico possibile, in grado di cogliere anche eventuali anomalie della struttura o dissesti gravi presenti.

## *Il Materiale Muratura*

Questo materiale, aggregato di diversi componenti, risulta di difficile definizione meccanica; possiamo schematizzarlo in modo semplice attraverso le seguenti caratteristiche: resistenza a compressione e modulo elastico risultano molto vari, scarsissima duttilità e ancor più esigua e comunque non affidabile, resistenza a trazione. Questo è utile per mettere in evidenza, così come si riscontra dopo un terremoto, l'eterogeneità dei comportamenti strutturali degli edifici in muratura, anche formalmente simili, e giustificare gli estensori delle vecchie normative per le costruzioni in zone sismiche, che si limitavano a prescrivere condizioni progettuali e costruttive, non entrando mai in merito alle verifiche analitiche rigorose.

La difficile quantificazione delle caratteristiche meccaniche delle singole murature presenti anche nello stesso fabbricato, l'accumulo dei danni, per esempio conseguenti a precedenti terremoti, le discutibili alterazioni strutturali, provocate dalle varie esigenze degli utenti della costruzione, rendono molto problematica l'affidabilità delle verifiche di stabilità. Il giudizio sulle reali condizioni di salute di una costruzione in muratura,

specialmente, come in questo caso, se antica e irregolare, spesso è da recepire da una valutazione di sintesi, cui le verifiche analitiche danno un supporto tanto più affidabile quanto più queste sono recepite con spirito critico.

Le norme tecniche per le costruzioni che si sono susseguite negli anni, e in modo particolare il Decreto Ministeriale del 2008, hanno modificato fortemente la normativa sismica, colmando le precedenti scarse procedure di calcolo.

La muratura, come già detto, è un materiale molto eterogeneo e parlare delle sue caratteristiche meccaniche ha senso solo se si attribuiscono a queste un valore indicativo, medio, buono per schemi codificati di calcolo. La via sperimentale per definire le proprietà meccaniche ed elastiche della muratura è molto aleatoria per le vecchie costruzioni, per le quali le prove dirette (martinetti piatti, onde, ecc.) hanno solo valore circoscritto e comunque orientativo, inoltre trattandosi nella fattispecie, di una basilica dal notevole pregio architettonico eseguire prove è stato impossibile; ha assunto, invece, grande importanza la conoscenza storica della costruzione e la lettura del quadro

fessurativo, che bene evidenziano le patologie strutturali e possono suggerire le corrette strategie d'intervento, oltre che il livello di connessione reciproca tra i vari elementi al fine di una corretta modellazione.

E' molto meglio in generale, per le ragioni appena descritte, affidarsi a schemi di calcolo semplici, isostatici, a rottura, a soluzioni in forma chiusa, che molte volte non hanno bisogno della conoscenza dei legami costitutivi del materiale e seguono le leggi dei corpi rigidi della meccanica razionale.

Questo, però, non deve ridurre l'importanza del calcolo iperstatico ed in particolare di quello agli elementi finiti: il calcolo deve servire essenzialmente per avere l'ordine di grandezza del problema.

### *Caratteristiche delle murature*

Tutte le murature, ad eccezione di quelle a secco e in pietra da taglio a grossi blocchi, sono costituite dall'unione di due materiali, dei quali di solito uno molto resistente (pietre naturali, mattoni, blocchi artificiali) ed un secondo meno resistente (malta di calce, cemento).

La malta ha la funzione di riempire i vuoti tra gli elementi lapidei e di collegamento degli stessi, al fine di realizzare un sistema unico compatto e ridistribuire le tensioni trasmesse dall'elemento più resistente.

Per una buona muratura la malta dovrebbe avvolgere tutto l'elemento principale con giunti di 0.5-1.5 cm, mentre gli elementi lapidei naturali non dovrebbero essere friabili, non essere gelivi, ed avere buona adesività alle malte.

Le murature possono essere *a singolo paramento*, se la parete è senza cavità o giunti verticali continui nel suo piano, o a *paramento doppio*. In quest'ultimo caso, se non è possibile considerare un comportamento monolitico si devono prendere come riferimento norme di comprovata validità.

Le murature con elementi naturali si possono distinguere in:

- 1) muratura di pietra non squadrata;
- 2) muratura di pietra listata;
- 3) muratura di pietra squadrata.

La muratura in pietra non squadrata si presenta realizzata con materiale di cava lavorato grossolanamente, posto in opera in strati sufficientemente regolari. Agli incroci dei muri ed agli angoli vanno posti elementi lapidei più regolari e meglio squadrati.

La muratura listata è costituita da pietre grossolanamente squadrate, disposte con ricorsi orizzontali in calcestruzzo semplice o armato.

La muratura di pietra squadrata è ottenuta con elementi lapidei prismatici regolari posti in strati e concatenati sfalsando i giunti.

La resistenza caratteristica degli elementi naturali viene valutata con prove di laboratorio, secondo le indicazioni delle normative. A titolo di esempio si riportano i pesi specifici delle murature più diffuse.

Pietrame calcare	2200 [daN/m <sup>3</sup> ]
------------------	----------------------------

Pietrame listata	2100 [daN/m <sup>3</sup> ]
------------------	----------------------------

### *Caratteristiche delle malte leganti*

Secondo le NTC, dal punto di vista meccanico, la classe di una malta può essere definita dalla sua resistenza media a compressione espressa in  $\text{N/mm}^2$  o dalla sua composizione.

### *Caratteristiche meccaniche delle murature*

Le proprietà fondamentali in base alle quali si classifica una muratura sono la resistenza caratteristica a compressione, la resistenza caratteristica a taglio in assenza di azione assiale  $f_{vk0}$ , il modulo di elasticità normale secante  $E$ , il modulo di elasticità tangenziale secante  $G$ .

### *Resistenza caratteristica a compressione delle murature*

La resistenza caratteristica a compressione  $f_k$  di una muratura può essere valutata in modo sperimentale, ma può anche essere stimata dalle proprietà dei componenti.

Se siamo in presenza di murature costituite da elementi naturali di pietra squadrata, indicata con  $f_{bm}$  la resistenza media a compressione degli elementi, si assume convenzionalmente la resistenza caratteristica a compressione data dalla seguente espressione:

$$f_{bk} = 0.75 \cdot f_{bm}$$

### *Caratteristiche elastiche delle murature*

La valutazione delle caratteristiche elastiche delle murature (moduli E-G), viene affidata usualmente a prove sperimentali; in mancanza di tali prove dirette, si possono assumere per le verifiche i seguenti valori di calcolo:

Modulo elastico normale:  $E = 1000f_k$

Modulo elastico tangenziale:  $G = 0.40E$

con  $f_k$  resistenza caratteristica a compressione della muratura.

Le verifiche di sicurezza delle murature non vengono effettuate con i valori caratteristici delle resistenze, ma con i valori di calcolo (progetto), per cui subentrano i coefficienti di sicurezza parziali, legati alla natura del materiale ( $\gamma_m$ ), ed alla conoscenza della struttura (fattore di confidenza,  $\gamma_c$ ).

### *Coefficiente di Poisson*

Il rapporto tra deformazione trasversale e longitudinale cresce all'aumentare della sollecitazione di compressione, mediamente:

$\nu = 0.15 - 0.30$  per tensione di compressione  $0.30f_k \leq \sigma \leq 0.80f_k$ .

### Scorrimento viscoso

In mancanza di prove sperimentali si può ritenere che il rapporto tra la deformazione a tempo infinito e la deformazione elastica di una muratura sia di valore unitario. La deformazione finale sarà due volte quella elastica calcolata con il modulo elastico normale  $E$ .

### Dilatazione termica

Mediamente si può ritenere:  $\alpha_T = 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

## ***Analisi strutturale***

La risposta strutturale può essere calcolata usando:

- analisi semplificate;
- analisi lineari, assumendo i valori secanti dei moduli di elasticità;
- analisi non lineari.

Per la valutazione di effetti locali è consentito l'impiego di modelli di calcolo relativi a parti isolate della struttura.

Per gli edifici esistenti in muratura, sia per l'analisi dei meccanismi locali che globali, è possibile ricorrere a diversi metodi, in funzione del modello con il quale vengono descritte la struttura e il suo comportamento sismico. In particolare è possibile fare riferimento alle seguenti analisi:

- analisi statica lineare;
- analisi dinamica modale;
- analisi statica non lineare;
- analisi dinamica non lineare.

## *Analisi statica lineare*

L'azione sismica di riferimento al suolo, viene in questo caso ridotta attraverso il fattore di struttura, per consentire una verifica in campo elastico; così si tiene implicitamente conto delle ulteriori capacità di spostamento, una volta raggiunta la resistenza limite, prima che la struttura arrivi allo stato limite ultimo. L'applicazione di questo metodo negli edifici storici, però, è assai problematica a causa della difficoltà di definire appropriati fattori di struttura, con possibili conseguenze sulla definizione degli interventi.

Qualora questo tipo di analisi possa essere considerato significativo, può essere condotto con riferimento ad un sistema di forze orizzontali la cui entità e distribuzione è definita in ragione delle masse e delle quote. Il periodo del modo principale di vibrazione potrà essere stimato con la formula indicata dalle NTC solo in alcuni casi, per le altre strutture dovrà essere stimato con formule opportune o ricavato a partire dalla forma modale principale, adottando per i materiali, i valori dei moduli elastici corrispondenti ai materiali fessurati.

Inoltre, va detto che con un'analisi elastica lineare si riscontrano, generalmente, tensioni di trazione, non compatibili con le caratteristiche meccaniche della muratura, o elevate tensioni di compressione negli spigoli degli elementi, molto influenzate dalla discretizzazione adottata nel modello.

### ***Analisi Dinamica Modale***

L'analisi dinamica modale viene condotta attraverso un modello elastico lineare e, quindi, la sua attendibilità nella valutazione del comportamento, in condizioni limite di resistenza, di antichi manufatti architettonici in muratura, è spesso limitata. Infatti, nel caso di strutture complesse, le analisi lineari possono essere utilmente applicate solo quando, dal confronto tra domanda e capacità, emerge che l'escursione in campo non lineare è modesta.

Può essere utilizzata per valutare il modo principale di vibrazione in ciascuna direzione (quello cui corrisponde il massimo valore del coefficiente di partecipazione) e determinare quindi un'attendibile distribuzione di forze da

adottare nell'analisi statica lineare. Discutibile è, invece, considerare il contributo dei modi superiori, che hanno ben poco significato per una struttura caratterizzata da un comportamento non lineare a livello di materiali già per valori modesti dell'azione orizzontale.

L'analisi dinamica modale può essere utilizzata con maggiore confidenza in presenza di strutture flessibili e strutturalmente ben modellabili come le torri, i campanili o strutture a prevalente sviluppo verticale. In questi casi possono risultare importanti i contributi dei modi superiori. Restano, però, le difficoltà nel determinare opportuni fattori di struttura e fare riferimento a verifiche puntuali dello stato di sollecitazione.

### ***Analisi statica non lineare***

Questa analisi consiste nella valutazione del comportamento sismico della struttura ed in particolare della capacità di spostamento allo stato limite ultimo, da confrontarsi con lo spostamento richiesto dal terremoto, valutato in termini spettrali. Tale analisi può essere eseguita con un modello

che rappresenti il comportamento globale della costruzione o attraverso modelli di sottostrutture, operando verifiche locali.

Nel caso dell'analisi statica non lineare, la curva di capacità della struttura può essere derivata dal legame forza-spostamento generalizzato, ottenuto attraverso un'analisi incrementale, utilizzando legami costitutivi non lineari, e, se necessario, considerando la non linearità geometrica.

In presenza di costruzioni fortemente irregolari, la distribuzione di forze inizialmente adottata potrebbe non essere più significativa per la struttura danneggiata; in questi casi è possibile fare ricorso ad analisi di tipo adattivo, aggiornando progressivamente la distribuzione di forze.

Per quanto riguarda l'individuazione della capacità di spostamento ultimo, esso sarà definito in corrispondenza di una riduzione della reazione massima orizzontale pari al 20%; nel caso invece siano utilizzati un legame elastico perfettamente plastico, l'analisi sarà portata avanti fino a spostamenti significativi, senza la necessità di definire uno spostamento limite ultimo. In entrambe le situazioni, al

crescere dello spostamento del nodo di controllo dovrà essere valutata la compatibilità a livello locale in termini di fenomeni di crisi locale.

### ***Analisi dinamica non lineare***

L'analisi dinamica non lineare prevede che la risposta sismica della struttura sia calcolata attraverso l'integrazione diretta delle equazioni del moto, utilizzando accelerogrammi.

L'analisi dinamica non lineare può essere utilizzata con modelli non lineari ad elementi finiti, purché i legami costitutivi siano in grado di simulare non solo il degrado di rigidità e resistenza a livello puntuale, ma anche le caratteristiche dissipative associate al comportamento ciclico isteretico. Questo metodo di analisi non può prescindere dall'esecuzione, con lo stesso modello strutturale, di un'analisi statica non lineare, al fine di determinare la capacità di spostamento ultimo della struttura, eventualmente attraverso una limitazione della duttilità.

## ***Il Problema delle costruzioni esistenti***

Le costruzioni esistenti sono quelle edificate in epoche più o meno passate, per le quali esiste già una struttura, che riflette le conoscenze e le tecniche costruttive del tempo.

Gli interventi su queste costruzioni coinvolgono spesso più ambiti, infatti non è possibile progettare lavori statici prescindendo totalmente dalle conoscenze storiche e che non coinvolgano anche i problemi di restauro. E' necessario che gli interventi siano reversibili, compatibili in termini di materiali e poco invasivi.

La conoscenza di una vecchia costruzione, della sua geometria, ma soprattutto dei materiali e delle regole costruttive utilizzate ha un ruolo fondamentale. A prescindere, il grado di incertezza con il quale si andrà ad operare sarà maggiore di quello relativo ad una nuova costruzione. Per tali ragioni vengono introdotti i "Livelli di Conoscenza, LC", ai quali sono legati i "fattori di confidenza, FC", riduttivi della resistenza meccanica dei materiali.

Per edifici o strutture di interesse culturale, come quella trattata in questa tesi, ai sensi dell'art. 29 del D. Lgs. 22/01/2004 n.42 "Codice dei beni culturali e del paesaggio", è consentito per ovvi motivi, limitarsi ad interventi di miglioramento, per i quali comunque va valutata la sicurezza (per esempio confrontando l'accelerazione del terreno che porta l'edificio al suo stato limite prima e dopo l'intervento).

Per tale tipologia di edifici si possono distinguere: interventi finalizzati al ripristino della sicurezza, interventi volti all'aumento della sicurezza, interventi per l'adeguamento a nuove esigenze di carichi e sollecitazioni.

La valutazione della resistenza degli edifici esistenti è molto difficile e legata alla scarsa conoscenza dell'organismo strutturale e dei materiali; la scelta del modello e delle ipotesi di calcolo sono affidate al buon senso del modellatore.

In ogni caso, prima di qualsiasi operazione progettuale bisogna prevedere:

- rilievi plano-altimetrici, strutturali (comprese le fondazioni), stato fessurativo e deformativo della struttura (se

necessario)(il rilievo deve tener presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costruttivi, devono essere rilevati i dissesti, i quadri fessurativi e i meccanismi di danno);

- analisi storico- costruttiva dell'opera;
- studio geologico e geotecnico dell'area interessata;
- studio sulle fondazioni;
- indagini sui materiali e il loro stato di conservazione;
- indagini su eventuali dissesti;
- valutazione della sicurezza dello stato di fatto.

### ***Livelli di conoscenza e parametri meccanici***

La sicurezza degli edifici esistenti viene valutata (scopo di questo lavoro) con l'analisi sismica globale. Le capacità resistenti degli elementi e dei materiali, come su preannunciato, possono venire desunti da prove in sito, da prove in laboratorio e da informazioni aggiuntive, in relazione ai livelli di conoscenza acquisiti.

Di particolare importanza è l'attenta analisi dei possibili "meccanismi di collasso locale" delle strutture, oltre alla quantificazione del "fattore di confidenza, FC.

La conoscenza di un edificio in muratura prevede in genere diversi livelli di approfondimento, in base all'accuratezza del rilievo, delle ricerche storiche e delle prove sperimentali. Le caratteristiche meccaniche di calcolo dei materiali dipendono da tali livelli, secondo quanto desumibile dalle tabelle.

LIVELLO DI CONOSCENZA	GEOMETRIA	DETTAGLI COSTRUTTIVI	PROPRIETA' DEI MATERIALI	METODO DI ANALISI	FC
LC1	Rilievo murature, volte, solai. Definizione carichi su ogni parete. Individuazione tipologia fondazioni. Rilievo eventuale quadro fessurativo e deformativo.	Limitate Verifiche in sito	Limitate Indagini in sito.	Tutti i metodi di analisi	1,35
LC2		Estese ed esaustive verifiche in sito	Estese indagini in sito	Tutti i metodi di analisi	1,20
LC3		Estese ed esaustive verifiche in sito	Esaustive indagini in sito	Tutti i metodi di analisi	1,00

**Tab. 1** Livelli di conoscenza e Fattori di Confidenza (Rif. "Progetto e verifica delle costruzioni in muratura in zona sismica" di Franco Iacobelli, EPC Libri)

LC1 – Conoscenza limitata	<i>Resistenza</i> = Valore minimo della Tab.11.3 <i>Modulo elastico</i> = Valore medio dell'intervallo della Tab.11.3
LC2 – Conoscenza adeguata	<i>Resistenza</i> = Valore medio della Tab.11.3 <i>Modulo elastico</i> = Media delle prove o valore e medio dell'intervallo di Tab.11.3
LC3 – Conoscenza accurata	Se disponibili almeno 3 prove sperimentali: <i>Resistenza</i> = Media delle prove <i>Modulo elastico</i> = Media delle prove o valore medio dell'intervallo di Tab.11.3
	Se disponibili 2 valori sperimentali: - Se valore medio sperimentale compreso nell'intervallo di Tab.11.3: <i>Resistenza</i> = Valore medio dell'intervallo della Tab.11.3; - Se valore medio sperimentale maggiore dell'estremo superiore dell'intervallo di Tab.11.3: <i>Resistenza</i> = Valore estremo sup. dell'intervallo di Tab.11.3; - Se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo di Tab.11.3: <i>Resistenza</i> = Valore medio sperimentale. In ogni caso: <i>Modulo elastico</i> = Media delle prove o valore medio dell'intervallo di Tab.11.3
	Se disponibile 1 solo valore sperimentale: Se valore sperimentale compreso nell'intervallo di Tab.11.3 oppure superiore: <i>Resistenza</i> = Valore medio dell'intervallo della Tab.11.3; Se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo di Tab.11.3: <i>Resistenza</i> = Valore sperimentale. In ogni caso: <i>Modulo elastico</i> = Media delle prove o valore medio dell'intervallo di Tab.11.3

**Tab. 2, Livelli di conoscenza e caratteristiche meccaniche (Rif. “Progetto e verifica delle costruzioni in muratura in zona sismica” di Franco Iacobelli, EPC Libri)**

Tipologia di muratura	$f_m$	$\tau_0$	E	G	w (kN/m <sup>3</sup> )
	(N/cm <sup>2</sup> )	(N/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadrati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura $\leq 40\%$ )	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

**Tab. 3, Tipologie e parametri meccanici delle murature (Rif. "Progetto e verifica delle costruzioni in muratura in zona sismica" di Franco Iacobelli, EPC Libri)**

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (<10 mm)	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato *
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	-	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbozzati, con parametro di limitato spessore e	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	-	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	1,5	-	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	1,2	-	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,5	-	1,3	0,7	1,5	1,5

**Tab. 4, Coefficienti correttivi dei parametri meccanici delle murature**

(Rif. "Ordine degli Ingegneri Pistoia, Analisi ed Interventi Strutturali su Edifici in Muratura secondo le NTC2008" di Maurizio Orlando)

E' importante sottolineare che la conoscenza della geometria strutturale deriva dal rilievo di tutti gli elementi murari che costituiscono l'edificio, comprese le cavità, volte, coperture, scale, fondazioni. Il rilievo, come precedentemente accennato, viene sempre completato con il quadro fessurativo e deformativo di tutti gli elementi strutturali.

La conoscenza dei dettagli costruttivi discende dallo studio della:

- qualità dei collegamenti tra pareti verticali;

- qualità dei collegamenti tra coperture e pareti ed esistenza di eventuali cordoli;
- esistenza di architravi con adeguata capacità portante;
- esistenza di elementi spingenti e di eventuali elementi di eliminazione della spinta;
- presenza di elementi di elevata vulnerabilità;
- tipologia delle murature.

La conoscenza dei materiali è legata a quella delle malte, alla tessitura e dimensioni degli elementi lapidei ed allo sfalsamento dei giunti, alla presenza di collegamenti trasversali.

Per le indagini sui materiali si distinguono:

- *Indagini limitate in situ*: sono informazioni che completano quelle reperibili nella letteratura tecnica o dalle regole vigenti all'epoca della costruzione; esse vanno ad individuare le tipologie di cui alla tabella 11.3(pag 177). Tali verifiche si eseguono visivamente dopo la rimozione di eventuali intonaci, su di un'area di almeno 1mx1m (preferibilmente in corrispondenza di angoli per

controllare anche il tipo di ammorsamento). E' necessario valutare, anche se in modo approssimativo, la compattezza della malta alla profondità di 5-6 cm dal paramento murario.

- *Indagini estese in situ*: tali indagini si aggiungono a quelle sopra esposte, si richiede una prova di resistenza su ogni tipo di muratura presente; per le prove si può far uso di martinetto doppio piatto. Non sono ammessi metodi di prova non distruttiva, se non in combinazione a quello anzidetto; in casi di comprovata corrispondenza della muratura in esame con quella di altro fabbricato presente in zona, è possibile fare riferimento ai valori meccanici trovati per esso.
- *Indagini esaustive in situ*: sono prove sperimentali che si aggiungono alle verifiche limitate ed estese, al fine di valutare le caratteristiche meccaniche della muratura. Le prove sperimentali di compressione e taglio possono essere eseguite in sito o in laboratorio (su campioni indisturbati); i risultati di esse possono essere usati ad integrazione o definizione.

Nelle costruzioni esistenti in muratura soggette ad azioni sismiche, si possono manifestare meccanismi locali e meccanismi d'insieme. I meccanismi locali interessano singoli pannelli murari o più ampie porzioni della costruzione, e sono favoriti dall'assenza o scarsa efficacia dei collegamenti tra le pareti e gli orizzontamenti e negli incroci murari. I meccanismi globali sono quelli che interessano l'intera costruzione e impegnano i pannelli murari prevalentemente nel loro piano.

La sicurezza della costruzione deve essere valutata nei confronti di entrambi i tipi di meccanismo.

Per l'analisi sismica dei meccanismi locali si può far ricorso ai metodi dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie, tenendo conto, anche se in forma approssimata, della resistenza a compressione, della tessitura muraria, della qualità della connessione tra le pareti murarie, della presenza di catene e tiranti. Con tali metodi è possibile valutare la capacità sismica in termini di resistenza (applicando un opportuno fattore di struttura) o di

spostamento (determinando l'andamento dell'azione orizzontale che la struttura è progressivamente in grado di sopportare all'evolversi del meccanismo).

L'analisi sismica globale deve considerare, per quanto possibile, l'assetto strutturale reale della costruzione, con particolare attenzione all'efficacia dei collegamenti degli elementi strutturali.

Nell'analisi di un edificio facente parte di un aggregato edilizio occorre tener conto delle possibili interazioni derivanti dalla contiguità strutturale con gli edifici adiacenti. A tal fine dovrà essere individuata l'unità strutturale (US) oggetto di studio, evidenziando le azioni che su di essa possono derivare dalle unità strutturali contigue.

L'US dovrà avere continuità da cielo a terra per quanto riguarda il flusso dei carichi verticali e, di norma, sarà delimitata o da spazi aperti, o da giunti strutturali, o da edifici contigui strutturalmente ma, almeno tipologicamente, diversi. Dovranno, inoltre, essere valutati gli effetti di: spinte non contrastate causate da orizzontamenti sfalsati di quota sulle

pareti in comune con le US adiacenti, meccanismi locali derivanti da prospetti non allineati, US adiacenti di differente altezza.

La normativa impone particolare attenzione ai possibili meccanismi di collasso locale delle strutture murarie, legati quasi sempre alla carenza di collegamenti tra le varie parti. Si possono avere così situazioni di instabilità: fuori piano di interi pannelli murari, instabilità di sistemi ad arco per azioni nel piano, fino a condizioni cinematiche di intere zone.

In questi casi estremi, la verifica sismica può essere molto complicata, per questo si fa ricorso all'analisi limite dell'equilibrio dei corpi rigidi non reagenti a trazione.

E' possibile individuare, come precedentemente accennato, uno o più meccanismi di collasso locale, anche suggeriti dal quadro fessurativo, per i quali l'applicazione del principio dei lavori virtuali può portare al calcolo dell'azione orizzontale capace di attivare il cinematismo.

E' noto che una struttura si trova in equilibrio quando il lavoro virtuale di tutte le forze interne e di quelle esterne per

un qualunque spostamento virtuale (compatibile con i vincoli)  
è nullo; si può allora scrivere sinteticamente:

$$\Sigma P_i \delta_i - \Sigma F_h \delta_h = \Sigma L_j$$

dove:

$\delta_i, \delta_h$  = spostamenti virtuali dei punti di applicazione delle forze

$\Sigma P_i \delta_i$  = lavoro virtuale di tutti i pesi della struttura

$\Sigma F_h \delta_h$  = lavoro virtuale di tutte le forze esterne applicate  
(spinte di volte, forze sismiche, ecc.)

$\Sigma L_j$  = lavoro di eventuali forze interne.

Per una corretta analisi di collasso locale, è opportuno:

- ipotizzare assenza di resistenza a trazione della muratura;
- individuare il possibile meccanismo di rottura locale;
- calcolare il lavoro virtuale in funzione di un coefficiente sismico  $\lambda$  che determina la crisi del sistema murario ( $\lambda = a_0^* / g$ );

- verificare che allo SLU il collasso con analisi cinematica lineare, il valore  $a_0^* = \lambda^*g$  soddisfi la disequazione:

$$a_0^* \geq (a_g S/q) * (1 + 1.5z/H)$$

dove:

z altezza rispetto alla fondazione del baricentro delle masse che generano forze orizzontali sul cinematisimo, in quanto non trasmesse ad altre strutture dell'edificio;

H altezza della struttura rispetto alla fondazione;

q fattore di struttura (q=2).

## ***Possibili meccanismi di dissesto per le chiese***

La struttura di una chiesa, solitamente, è definita da pannelli murari di grande estensione, sia longitudinalmente che in altezza, generalmente caratterizzati da una carenza di collegamenti trasversali, che sono rappresentati solo dalla parete di facciata, dalla parete di fondo e, se presente, dall'arco trionfale (tutti elementi posti ad una distanza reciproca tale da rendere praticamente ininfluenza la loro azione di trattenimento).

In sintesi, l'elemento distintivo di questa tipologia rispetto all'edilizia ordinaria è proprio la scarsa presenza di elementi di collegamento, che la fa somigliare poco alla "scatola" ideale, il cui comportamento è più idoneo nei confronti dell'azione sismica.

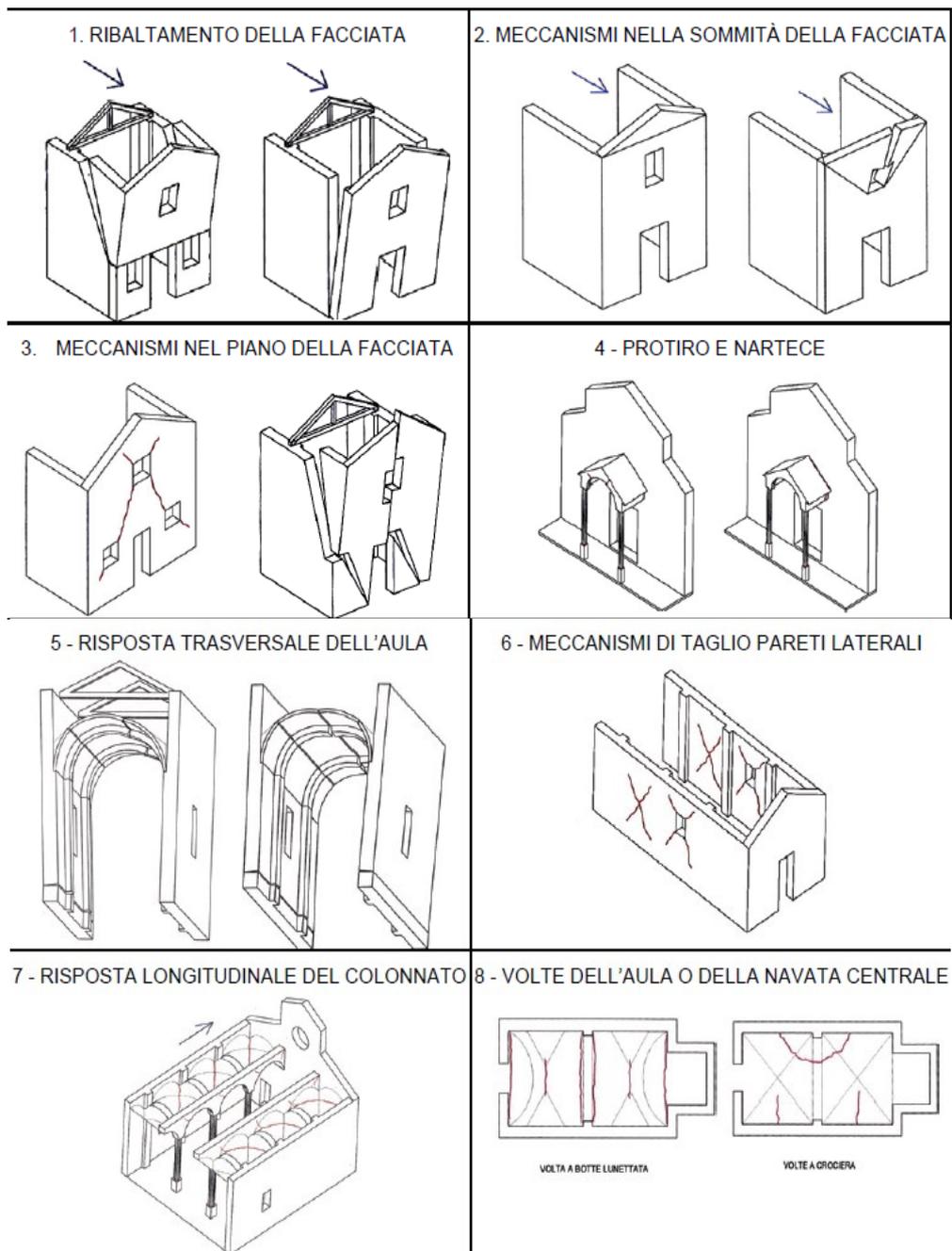
L'assenza di solai e di collegamenti intermedi, unita alla configurazione delle pareti (alte e snelle), e la presenza di elementi spingenti (volte, cupole, tetti spingenti), rende questa tipologia molto lontana dal comportamento scatolare.

Per questa ragione la Normativa chiarisce subito che per le chiese il danno più probabile è quello per “collasso locale derivato da meccanismi di primo modo”. Nel caso delle chiese, infatti, è evidente il modo di comportarsi a livello sismico, tanto che la Direttiva propone un metodo speditivo (una somma algebrica di elementi che possono attivare il collasso e sistemi di presidio esistenti nell’edificio) che nemmeno considera criteri di resistenza che sarebbero tipici di un, ben poco realistico, comportamento globale. Per cui l’analisi dei meccanismi locali risulta di fondamentale importanza e in nessun caso l’analisi globale può sostituire questa.

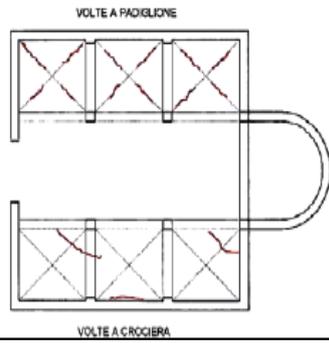
L’osservazione del danno su questa tipologia di edifici ha evidenziato comportamenti ricorrenti, legati a danni locali e meccanismi di collasso tipici per le diverse parti architettoniche, definite come “macro-elementi” (facciata, navata, archi, ecc.), ovvero parti che si comportano in modo dinamicamente indipendente; tutti questi meccanismi possono essere ricondotti alla perdita di equilibrio di porzioni strutturali, sottoposte a slittamento o rotazione, piuttosto che

al raggiungimento di valori limite di resistenza dei materiali. Il vantaggio è che non sono necessarie dispendiose indagini sui materiali per comprenderne i valori limite di resistenza, né elaborati modelli numerici di grande onere computazionale.

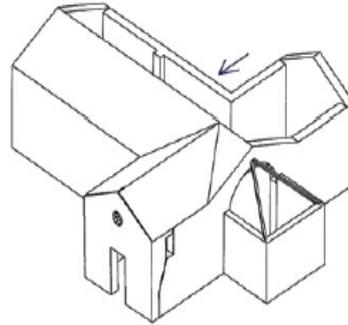
Come già detto, l'assenza di solai intermedi e di solai di copertura rigidi nel loro piano e ben collegati alle murature verticali determina la tendenza ad un comportamento "per parti" (o meglio per macro-elementi). Possiamo dire, allora, che i singoli elementi costruttivi e architettonici delle chiese (facciata, timpano, absidi, cappelle, pareti laterali) non sono solo fondamentali elementi compositivi dal punto di vista architettonico, ma costituiscono altrettante porzioni dinamicamente indipendenti. Il problema è l'identificazione del macro-elemento e del meccanismo che più probabilmente può coinvolgerlo e il riferimento sono abachi, più o meno approfonditi, costruiti in passato, basandosi proprio sull'esperienza e sull'osservazione del danno.



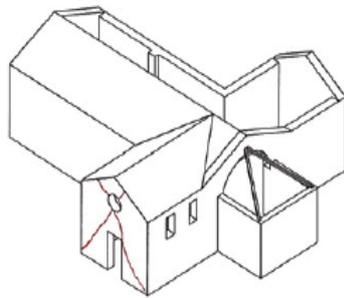
9 - VOLTE DELLE NAVATE LATERALI



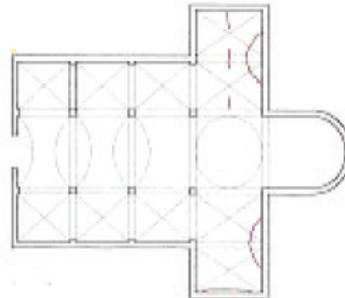
10 - RIBALTAMENTO PARETI DEL TRANSETTO



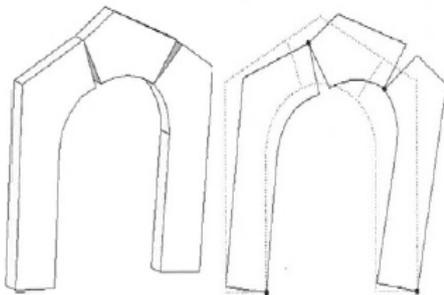
11 - MECCANISMI DI TAGLIO DEL TRANSETTO



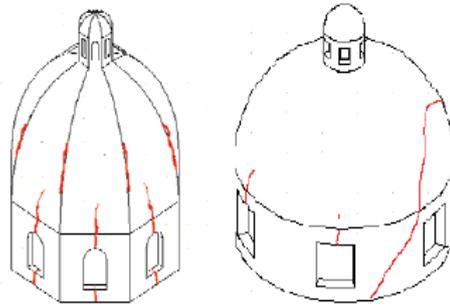
12 - VOLTE DEL TRANSETTO

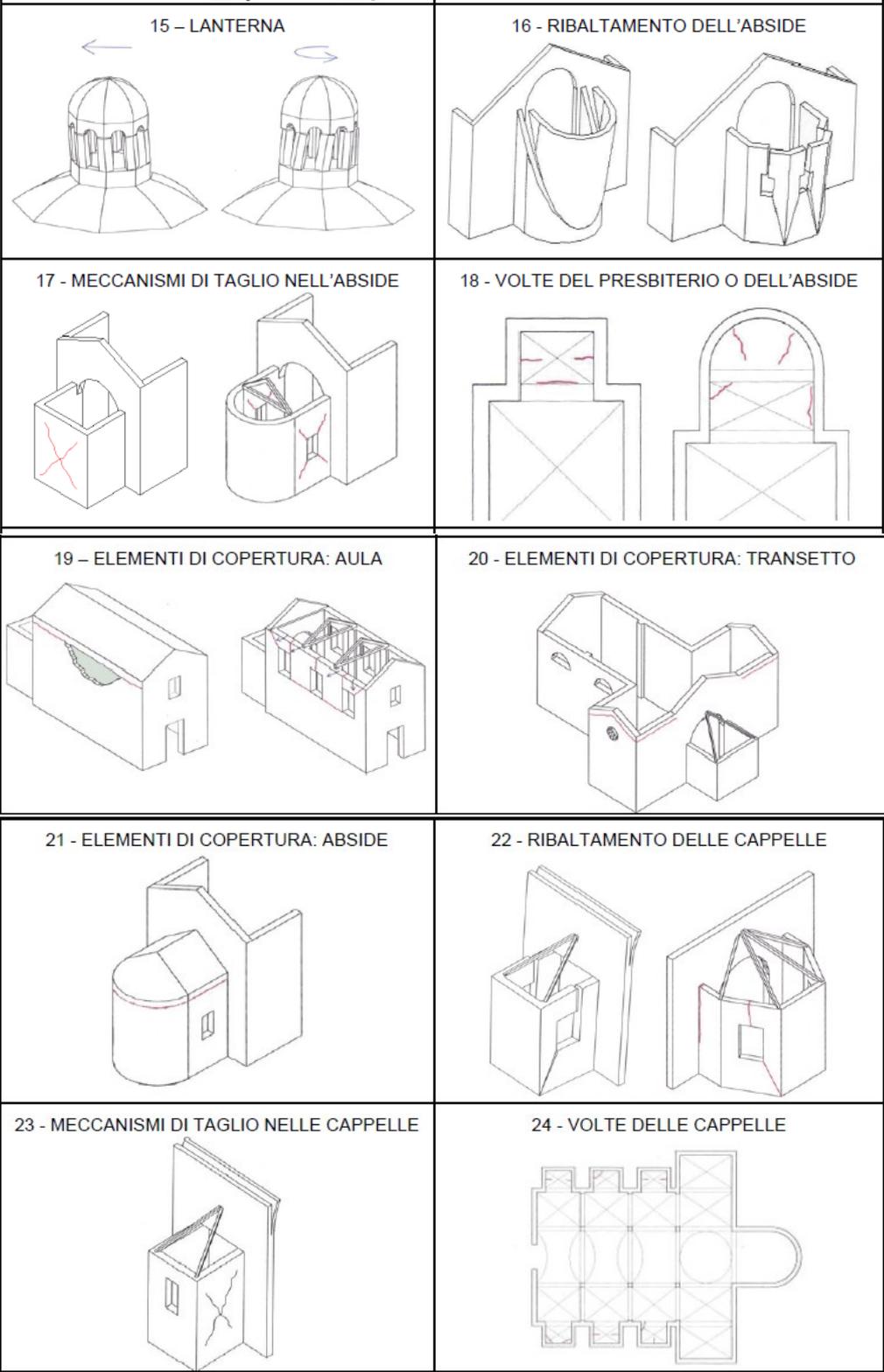


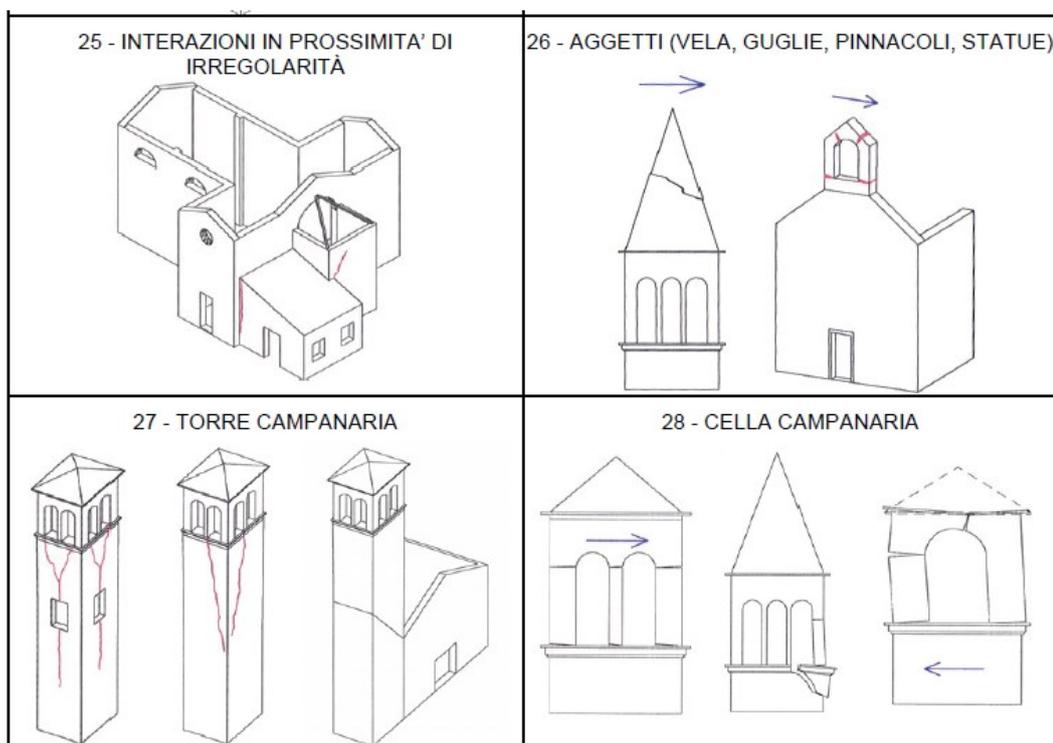
13 - ARCHI TRIONFALI



14 - CUPOLA E TAMBURO / TIBURIO







**Fig.** Abaco dei possibili meccanismi di collasso delle chiese (Rif. Manuale a supporto della compilazione modello A – DC; SCHEDA PER IL RILIEVO DEL DANNO – CHIESE)

Per costruirli, e per aggiornarli, l'aspetto fondamentale è il rilievo critico delle lesioni e l'analisi del danneggiamento. Ogni danno presente, costituisce un allontanamento dalla sua completa efficienza strutturale, introducendo altre vulnerabilità.

Lesioni e deformazioni esistenti aiutano l'identificazione delle parti a rischio. Le prime rappresentano altrettante perdite di

continuità della struttura muraria, separazioni tra le singole parti, la cui entità e direzione, oltre che verso di spostamento relativo dei due cigli in diversi punti del loro sviluppo, costituiscono parametri essenziali nella comprensione del meccanismo che potrebbe innescarsi.

Le deformazioni poi, spesso meno evidenti rispetto alle lesioni e più difficili da rilevare in modo esatto, sottolineano le modifiche alla geometria originaria dell'edificio.

E' per lo più il sisma a mostrare questi elementi e ad identificare le singole parti in cui scomporre il manufatto per poterne interpretare il comportamento come somma di diversi comportamenti indipendenti, proprio a partire dal disegno delle lesioni sulle murature. In questo ambito, anche i meccanismi di danno di "secondo modo", che pure possono innescarsi, sono tanto più pericolosi perché le lesioni che ne derivano costituiscono vie privilegiate per l'innescamento di successivi meccanismi di ribaltamento.

Ne deriva la particolare debolezza nei confronti delle azioni sismiche fuori dal piano dei singoli elementi, che porta a

ribaltamenti, più o meno complessi, in ogni declinazione. Da premettere sempre, a qualsiasi valutazione, deve essere la verifica della qualità costruttiva della muratura e, ancor prima, dei materiali che la compongono: se non fossero di qualità sufficiente infatti si rischierebbe l'innescò di un preliminare "modo zero" di danno dell'edificio, la cui condizione iniziale di monoliticità degli elementi murari non può verificarsi.

L'analisi limite che ne deriva può servirsi di pochi fattori geometrici e di valutazioni qualitative sulle connessioni per definire la configurazione strutturale critica per ogni macro-elemento, evidenziando quei punti di debolezza che fanno allontanare il comportamento reale da quello scatolare.

Una disposizione planimetrica regolare aiuta un comportamento scatolare dell'edificio e, ancora una volta, questa condizione non è comunemente riscontrabile nelle chiese, dove spesso molte parti sono state aggiunte all'impianto originario nel corso dei secoli, per semplice giustapposizione e senza l'adeguato ammorsamento. Tali

corpi aggiuntivi portano, in caso di sisma, ad amplificazioni degli effetti torsionali che peggiorano la situazione e la sicurezza dell'aula originaria, dopo averne già compromesso la conservazione.

L'identificazione delle diverse fasi costruttive potrebbe porre in evidenza le irregolarità costruttive (differenti materiali e tecnologie) che interrompono la continuità strutturale così come le aperture aggiunte o la chiusura di aperture precedenti, il cui tamponamento spesso avviene semplicemente accostando la nuova muratura alla preesistente: il pannello aggiunto, in questo caso, sottoposto a sisma, si deforma nel piano, causando lo scorrimento della muratura non ammorsata, che quindi si distacca. Sono, quindi, le superfici di interfaccia tra murature di diverse caratteristiche e senza adeguato ammorsamento a rappresentare, come le lesioni, linee preferenziali, da ricercare, per la separazione in macro-elementi.

Nelle chiese poi, anche la distribuzione in altezza è fortemente disomogenea, comportando una vulnerabilità

elevata per le parti dell'edificio più alte rispetto alle altre: elementi svettanti, cupole, campanili e vele campanarie, sottoposti ad azione sismica, oscillano in maniera libera e indipendente rispetto al corpo principale determinando fessurazioni ingenti nelle zone di attacco tra le parti. Questa diversa distribuzione di masse ed altezze comporta poi un trasferimento fortemente disomogeneo del peso sulle fondazioni, che può portare a cedimenti fondali differenziati, più o meno evidenti a seconda del tipo di suolo.

Le coperture, spesso spingenti e congiunte a volte di grandi dimensioni, peggiorano la situazione delle pareti alte, non solo non efficacemente trattenute, essendo scarsi i collegamenti tra muro ed elementi di copertura, ma anche sottoposte all'azione orizzontale di questi elementi in sommità, che va ad aggiungersi a quella sismica.

Gli unici elementi in grado di contrastare tale effetto amplificatore sono le connessioni tra muri ortogonali (il cui grado di efficacia è strettamente legato alla storia dell'edificio) e tra la struttura del tetto e le murature d'ambito.

Se queste connessioni non sono realizzate in maniera efficace, le travi di copertura producono spinte localizzate che tendono ad allontanare le murature, con sfilamento delle travi dagli appoggi e conseguenti crolli; le pareti snelle, generalmente prive di murature di controvento e di solai intermedi, una volta perso il legame con la copertura, risultano libere di oscillare fuori dal proprio piano. Il tutto risulta essere aggravato dal degrado dei singoli elementi, in particolare quelli lignei della copertura. Potrebbe accadere, che le strutture lignee delle capriate in corrispondenza dell'appoggio siano compromesse per il naturale invecchiamento (cui si aggiungono attacchi biotici, presenza d'acqua, la mancata manutenzione) risultando già al limite delle proprie capacità di resistenza quando vengono investite dal sisma, non potendo più quindi esercitare la loro funzione di solidarizzazione tra le diverse murature. Anche la deformazione della trave di colmo può indurre spinte localizzate sulla muratura d'ambito, condizionando il comportamento dell'intera "mancata-scatola" in caso di sisma.

In realtà, forse non con la stessa chiarezza, già i costruttori di tali edifici dovevano aver intuito il possibile rischio di ribaltamento di singole parti, insito nella stessa modalità costruttiva e articolazione spaziale delle grandi aule e per questo molte chiese in zona sismica presentano elementi di presidio, già inglobati al momento della costruzione o aggiunti comunque nel corso della loro vita.

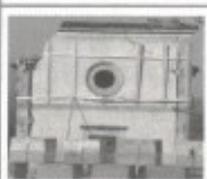
Questi elementi, se ben posizionati e opportunamente dimensionati, sono efficaci nei confronti delle azioni sismiche: i tiranti, in particolare, svolgono la duplice funzione di solidarizzazione tra le parti e stabilizzazione reciproca tra i diversi macro-elementi, mentre i contrafforti si oppongono alla rotazione fuori dal piano delle murature a cui sono direttamente addossati, funzionando come massa stabilizzante.

Se mal eseguiti, d'altro canto, gli stessi presidi possono rivelarsi dannosi: tiranti metallici con caratteristiche o dimensioni carenti, o inefficaci per mancato tensionamento, possono rappresentare inneschi del danno, più che un

benefico effetto di contrasto. La questione diventa più complessa in presenza di opere di consolidamento realizzate in un passato più recente, spesso non considerando adeguatamente i principi della regola dell'arte.

L'inserimento di pesanti e massivi cordoli in calcestruzzo armato sulla sommità delle murature, spesso determina una discontinuità tra cordolo e muratura sottostante che, a fessurazione avvenuta, permette la traslazione relativa delle due parti. Inoltre, il peso e la rigidità del cordolo inducono sollecitazioni tali nella muratura da porre gravi lesioni a taglio, che poi possono servire da innesco per un successivo meccanismo di ribaltamento.

Chiarito il comportamento, l'obiettivo di un'analisi di vulnerabilità è quindi quello di ricercare le particolari condizioni di debolezza locale che possono influenzare o favorire un processo di danno, individuando i caratteri propri di ogni manufatto che costituiscano altrettanti campanelli di allarme per un danno codificato dall'esperienza.

Scheda VI - ROTAZIONE E DISTACCO DELLA FACCIATA		1° MODO
<p><b>DESCRIZIONE</b> Il distacco e ribaltamento della facciata, il macro-elemento più facilmente identificabile e più vulnerabile delle Chiese, è dovuto ad oscillazioni della parete, spesso snella e male ammorsata, fuori dal proprio piano. A seconda delle varie configurazioni si possono determinare:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• rotazione con cerniera cilindrica alla base (a);</li> <li>• rotazione con cerniera nella fascia bassa (b), in caso di alta percentuale di aperture in questa zona.</li> </ul> <p><b>VULNERABILITÀ</b> Per valutare la vulnerabilità si deve considerare il grado di connessione con pareti laterali, copertura e volte dell'aula, oltre che la presenza, dimensione e disposizione delle aperture (finestre, rosoni) (d), spinte delle coperture non controventate e delle volte (c), e fenomeni di interazione dinamica con altri macro-elementi (come i campanili adiacenti alla facciata). Il meccanismo si attiva per carenza di vincoli al contorno: collegamenti mancanti tra parete e copertura ma anche per differenti rigidità tra facciata e pareti laterali (spesso meno consistenti).</p> <p><b>SINTOMI</b> Si possono osservare:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• lesioni verticali o inclinate a cuneo sulle murature nella fascia di sovrapposizione con le pareti laterali (a1, c1);</li> <li>• lesioni sullo spigolo verticale per un ammorsamento inefficace o discontinuità fra le parti.</li> </ul> <p>Conseguenza e insieme campanello d'allarme per tale meccanismo può essere il collasso parziale di impalcati delle volte d'ambito (c). In alcuni casi, la trave di colmo del tetto è collassata, o può essere sfilata, martellando la parete.</p> <p><b>INTERVENTI</b> La presenza di un collegamento efficace tra gli arcarecci delle coperture e le facciate è stata in genere sufficiente ad impedire il ribaltamento, così come un semplice capochiave a paletto, deformandosi notevolmente e dissipando energia, ha probabilmente salvato la facciata della cattedrale di Mirandola (d1) da un completo ribaltamento. Altri presidi, come le catene longitudinali, contrastano i meccanismi che coinvolgono le fasce di sovrapposizione come nel caso di ribaltamento con lesioni nella parte laterale. In generale, si deve predisporre il miglioramento delle connessioni con i muri trasversali e con la copertura (trave di colmo), ad esempio con l'inserimento di catene e tiranti.</p>	 <p><b>a</b> Distacco e ribaltamento del macro-elemento facciata, con cerniera cilindrica alla base<sup>24</sup>.</p>	 <p><b>a1</b> Lesioni inclinate a cuneo sulle murature laterali, nella fascia di sovrapposizione. Chiesa di Sant'Agostino (Ferrara) dopo il sisma emiliano del maggio 2012.</p>
	 <p><b>b</b> Distacco e ribaltamento del macro-elemento facciata, con cerniera cilindrica nella fascia bassa.</p>	 <p><b>b1</b> Ribaltamento della facciata con cerniera nella fascia bassa. Chiesa di Villafranca (Modena) dopo il sisma emiliano del maggio 2012.</p>
	 <p><b>c</b> Possibile meccanismo di collasso contemporaneo degli arconi o delle volte di testa delle campate.</p>	 <p><b>c1</b> Lesioni inclinate a cuneo sulle murature laterali, nella fascia alta. Chiesa di Mirandola (Modena) dopo il sisma emiliano del maggio 2012.</p>
	 <p><b>d</b> La presenza e la disposizione di rosoni ed aperture può influenzare il meccanismo.</p>	 <p><b>d1</b> L'inserimento di modesti tiranti ha evitato il ribaltamento completo della facciata della Chiesa di Mirandola (Modena), dopo il sisma emiliano del maggio 2012.</p>

**Fig. Schede di danno dettagliate (Rif. "Architettura storica e terremoti. Protocolli operativi per la conoscenza e la tutela" di Carlo Blasi)**

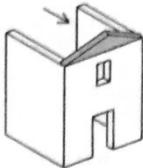
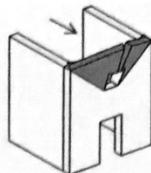
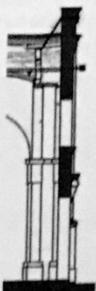
Scheda VII - RIBALTAMENTO DEL TIMPANO		1° MODO
<p><b>DESCRIZIONE</b></p> <p>Il ribaltamento riguarda in questo caso la parte sommitale della facciata, coinvolgendone la parte (o macro-elemento) che, snello e particolarmente svettante, se non adeguatamente ancorato al corpo principale, in caso di sisma può sviluppare una libera oscillazione fuori dal proprio piano (a).</p> <p>È uno dei meccanismi più frequenti riscontrati post-sisma. Si possono osservare, in alcuni casi di timpano inserito nella copertura, meccanismi di ribaltamento con cerniere oblique nella fascia alta (b), in particolare in presenza di aperture (fori o rosoni), e conseguente crollo di porzioni di muratura delimitate da profili obliqui (b7).</p> <p><b>VULNERABILITÀ</b></p> <p>Le scarse o deboli connessioni possono determinare l'attivazione del meccanismo, insieme all'eccessiva snellezza dell'elemento "timpano", che spesso ha frontoni e cornici in aggetto, altrettanti carichi eccentrici che ne diminuiscono la capacità resistente.</p> <p>Il meccanismo è favorito dalla frequente totale assenza di ancoraggi alle coperture retrostanti, il più delle volte delegati ai semplici appoggi degli arcarecci e della trave di colmo (senza adeguate connessioni).</p> <p><b>SINTOMI</b></p> <p>Si riscontrano in genere:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• lesioni orizzontali (c) in corrispondenza dell'attacco tra timpano e facciata (cerniera);</li> <li>• assenza di collegamento con la copertura retrostante (c1).</li> </ul> <p>Conseguenza o campanello d'allarme per tale meccanismo è spesso il collasso parziale delle coperture e lo sfilamento degli arcarecci e della trave di colmo collegate al timpano, che si devono rilevare con particolare attenzione.</p> <p><b>INTERVENTI</b></p> <p>L'esperienza ha dimostrato come semplici tirantini di ancoraggio (d), nel caso di timpani svettanti, e adeguate connessioni alle teste delle travi e tetti rigidi, in caso di timpani inglobati nelle coperture (d1), siano spesso sufficienti ad evitarne il ribaltamento: massima dimostrazione di come interventi di messa in sicurezza puntuali ed economici, oltre ad essere non invasivi, si possano predisporre facilmente a partire dall'osservazione del danno.</p>		
	<p><b>a</b> Distacco e ribaltamento del macro-elemento timpano, con cerniera orizzontale<sup>35</sup>.</p>	<p><b>a1</b> Ribaltamento del timpano della Chiesa di Mirandola (Modena) dopo il sisma emiliano del maggio 2012.</p>
		
	<p><b>b</b> Distacco e ribaltamento del timpano, con cerniere oblique.</p>	<p><b>b1</b> Lesioni inclinate e creazione di cerniere oblique con ribaltamento della fascia alta, ad arco.</p>
		
	<p><b>c</b> Lesioni orizzontali alla base del timpano, Chiesa di Sant'Agostino, a Sant'Agostino (Ferrara).</p>	<p><b>c1</b> Ribaltamento del timpano, inglobato nella copertura. Chiesa di San Giacomo Roncole, Mirandola (Modena) dopo il sisma emiliano del maggio 2012.</p>
		
	<p><b>d</b> Tirantini di aggancio alla copertura impediscono il ribaltamento di timpani svettanti.</p>	<p><b>d1</b> Schema di consolidamento con: tirantini di aggancio alla copertura e tiranti (o elementi di collegamento con le travi) per la parte inglobata nella copertura stessa.</p>

Fig. Schede di danno dettagliate (Rif. "Architettura storica e terremoti.

Protocolli operativi per la conoscenza e la tutela" di Carlo Blasi)

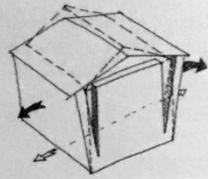
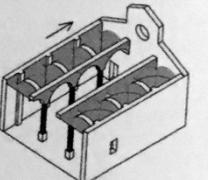
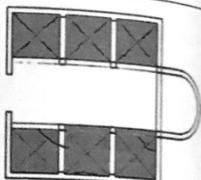
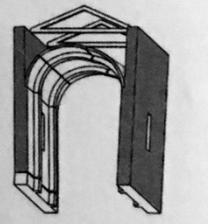
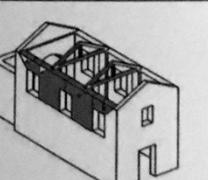
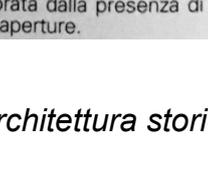
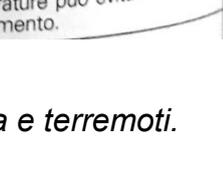
Scheda VIII - RIBALTAMENTO DELLE PARETI LATERALI		1° MODO	
<p><b>DESCRIZIONE</b></p> <p>Il meccanismo è del tutto simile a quello precedente di ribaltamento di facciata, al quale si aggiunge l'interazione con le coperture. L'orditura principale trasferisce i carichi sulle pareti laterali, oltre a considerevoli spinte orizzontali concentrate (a) che si sommano a quelle sismiche, determinandone l'instabilità. Spesso alle spinte del tetto si sommano quelle delle volte delle navate (b, c).</p> <p>In moltissimi casi, si ha anche il distacco dalle pareti degli arcatecci di estremità e il crollo di porzioni di copertura adiacenti (d).</p> <p><b>VULNERABILITÀ</b></p> <p>Le scarse o deboli connessioni possono attivare il meccanismo, insieme a discontinuità nella muratura per addizioni o trasformazioni successive. Quando le connessioni con la facciata e la parete di fondo siano buone, può verificarsi la creazione di cerniere cilindriche oblique convergenti ai bordi e di una cerniera orizzontale nella zona centrale (d). Tale meccanismo è favorito dalla presenza di numerose aperture sulla parete laterale, che indeboliscono la fascia alta sottoposta alle spinte del tetto e di eventuali volte (c).</p> <p><b>SINTOMI</b></p> <p>Si riscontrano in genere:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• lesioni verticali tra la parete e i muri ortogonali;</li> <li>• lesioni longitudinali sugli arconi trasversali d'ambito (c) o lesioni incrociate sulle volte delle navate (b, b1).</li> </ul> <p>Conseguenza o campanello d'allarme per tale meccanismo è spesso il collasso parziale delle volte e volte (c1), che si devono rilevare con particolare attenzione. In alcuni casi, le travi di copertura sono collassate, o possono essere sfilate, determinando il martellamento della parete.</p> <p><b>INTERVENTI</b></p> <p>La capacità strutturale dell'edificio è aumentata dall'introduzione di catene o cerchiature che fanno in modo che anche le murature ortogonali partecipino al meccanismo, con la funzione di masse stabilizzanti. In generale, si deve predisporre il miglioramento delle connessioni con le coperture e con le murature trasversali (d1).</p> <p>L'introduzione di catene che contrastino le spinte delle volte e degli arconi trasversali stabilizza le murature e ne contrasta il ribaltamento.</p>			
	<p><b>a</b></p> <p>Ribaltamento delle pareti laterali.</p>		<p><b>a1</b></p> <p>Ribaltamento delle pareti laterali e delle volte. Chiesa di Villafranca (Modena) dopo il sisma emiliano del maggio 2012.</p> 
	<p><b>b</b></p> <p>Spesso alle spinte del tetto si sommano quelle delle volte delle navate.</p>		<p><b>b1</b></p> <p>Quadro fessurativo facilmente riscontrabile sulle volte delle navate laterali.</p> 
	<p><b>c</b></p> <p>Spesso alle spinte del tetto si sommano quelle delle volte delle navate.</p>		<p><b>c1</b></p> <p>Quadro fessurativo facilmente riscontrabile sugli arconi trasversali, che contribuiscono alla spinta sulle pareti.</p> 
<p><b>d</b></p> <p>Spesso alle spinte del tetto si sommano quelle delle volte delle navate. Situazione peggiorata dalla presenza di molte aperture.</p>		<p><b>d1</b></p> <p>Una efficace chiodatura degli elementi lignei di copertura ed un collegamento alle murature può evitarne il ribaltamento.</p> 	

Fig. Schede di danno dettagliate (Rif. "Architettura storica e terremoti.

Protocolli operativi per la conoscenza e la tutela" di Carlo Blasi)

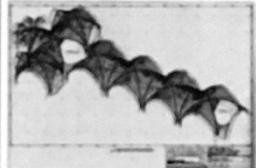
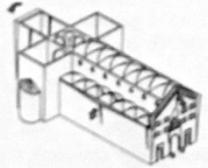
Scheda IX - CROLLO DI VOLTE E ARCONI TRASVERSALI		1° MODO
<p><b>DESCRIZIONE</b></p> <p>Danni alle volte si sviluppano per lo più a seguito di danni indotti dalle strutture sottostanti, come il ribaltamento delle pareti. Alcuni meccanismi sono specifici delle sole volte, specie se sottili e di grandi luci, dovuti a carichi eccessivi o rinfianchi pesanti. Le <i>volte sottili</i> rappresentano uno degli elementi strutturali più vulnerabili, che raggiungono il collasso anche per bassi livelli di accelerazione sismica e di questi elementi si deve studiare dettagliatamente l'interazione con le altre strutture.</p> <p>Per gli archi trasversali e l'arco trionfale, collegati alle pareti laterali e spesso con funzione di sostegno per la copertura, sono pericolosi i meccanismi nel piano poiché i piedritti sono vincolati alle pareti trasversali. Le spalle, spesso snelle, possono subire delle rotazioni alla base.</p> <p><b>VULNERABILITÀ</b></p> <p>In alcuni casi, la stabilità delle volte e degli arconi viene compromessa dall'appoggio diretto della copertura su di essi: organizzazione strutturale sicuramente da evitare (anche se non sempre è risultato chiaro se le volte sono crollate per eccessiva spinta sui muri perimetrali o se per vera e propria instabilità locale).</p> <p>Il crollo delle volte della prima campata, estremamente frequente, è strettamente connesso alle oscillazioni della facciata, determinando un collasso per mancanza di appoggi.</p> <p><b>SINTOMI</b></p> <p>Si osservano:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• lesioni sulle volte, a segnalare le cerniere del cinematisimo associato;</li> <li>• lesioni di distacco tra l'imposta e i muri laterali, a seguito della loro rotazione.</li> </ul> <p>Lo spostamento reciproco degli appoggi, sottopone le volte a sforzi di trazione e compressione lungo le diagonali e questo produce lesioni parallele alla diagonale compressa.</p> <p><b>INTERVENTI</b></p> <p>L'inserimento di tiranti (d), meglio se in corrispondenza della massima spinta degli archi trasversali e longitudinali, a contenimento delle spinte delle volte, rappresenta la soluzione migliore per contenere le spinte orizzontali ma anche per solidarizzare le murature d'ambito, evitando il ribaltamento.</p> <p>Nel caso di volte sottili, si può procedere al loro irrigidimento nel piano (d1).</p>		
	<p><b>a</b></p> <p>Parziale crollo delle volte in aderenza a pareti laterali collassate.</p>	<p><b>a1</b></p> <p>Crollo di volte sottili a grande luce, concomitante crollo del tetto, Chiesa di San Francesco a Mirabello (Modena) dopo il sisma emiliano del maggio 2012.</p>
		
	<p><b>b</b></p> <p>Crollo delle volte della prima campata, accostata alla facciata. Rilievo del crollo di Assisi, Basilica di San Francesco, dopo il terremoto dell'Umbria, 2005.</p>	<p><b>b1</b></p> <p>Le oscillazioni della facciata possono provocare il crollo della volta per mancanza di appoggio.</p>
		
	<p><b>c</b></p> <p>Ricostruzione del meccanismo di dissesto del Duomo di Parma a seguito del terremoto del 1113, che ha coinvolto le pareti laterali, anche per la spinta delle volte (ricostruzione a cura di E. Coisson)<sup>28</sup>.</p>	<p><b>c1</b></p> <p>Quadro fessurativo riscontrabile sulla navata centrale.</p>
		
	<p><b>d</b></p> <p>L'inserimento di tiranti in corrispondenza degli arconi trasversali, spesso si è rivelato sufficiente ad evitare il crollo delle volte, anche lesionate.</p>	<p><b>d1</b></p> <p>Irrigidimento nel piano (fasce FRP) e cerchiatura per una volta sottile a padiglione.</p>

Fig. Schede di danno dettagliate (Rif. "Architettura storica e terremoti.

Protocolli operativi per la conoscenza e la tutela" di Carlo Blasi)

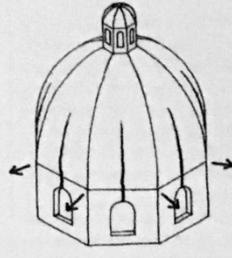
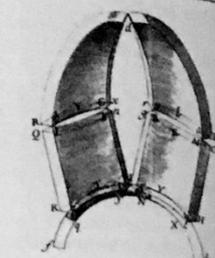
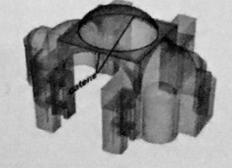
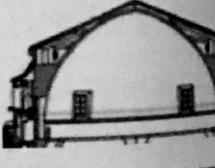
Scheda X - CUPOLE	1° MODO	
<p><b>DESCRIZIONE</b></p> <p>Le cupole, specie se estradossate, costituiscono masse oscillanti – anche significative – poste ad altezze elevate, che scaricano il loro peso su elementi più snelli con scarsa resistenza alle azioni orizzontali.</p> <p>In generale, tutte le cupole in muratura sono destinate a fratturarsi <i>lungo i meridiani</i>, dall'imposta fino alla quota (variabile in funzione di geometria e materiali) in cui le forze di trazione risultano superiori alle resistenze che le malte utilizzate possono esercitare (a).</p> <p>Le fratture possono variare per numero ed ampiezza e trasformano l'organismo da compatto, ad una sequenza di archi a sezione variabile, che si contrastano mutuamente nelle zone in cui siano presenti le azioni di compressione nei paralleli (a1).</p> <p>Esercitano tutte spinte laterali che vanno a sommarsi alle spinte sismiche, determinando meccanismi di rotazione delle strutture sottostanti.</p>		
<p><b>VULNERABILITÀ</b></p> <p>Particolare attenzione deve essere posta alla diversa distribuzione di rigidità degli elementi di supporto della cupola, che possono determinare differenti quadri fessurativi con concentrazione delle lesioni nelle zone meno rigide (vele sugli arconi, anziché vele sui pilastri in Santa Maria del Fiore a Firenze, b).</p> <p>A questo si aggiunge, spesso, l'insufficiente resistenza della sommità dei muri e la carenza di collegamenti con le coperture (mancanza di cordoli di irrigidimento della sommità dei muri).</p> <p>In molti edifici, la copertura appoggia direttamente sull'estradosso della cupola sottostante, aumentando il carico e rappresentando zone puntuali di debolezza. Tale organizzazione strutturale è sicuramente da evitare (c).</p>		
<p><b>SINTOMI</b></p> <p>Si riscontrano in genere nelle cupole:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>lesioni in mezzeria delle singole vele (b1)</i> e in corrispondenza degli angoli, convergenti alla sommità e di ampiezza maggiore alla base, che suddividono la cupola in altrettanti spicchi-archi (a1);</li> <li>• <i>lesioni radiali di schiacciamento e lesioni ad andamento ellittico (a seguire i giunti)</i> nelle cupole sferiche;</li> <li>• <i>perdita di circolarità della cupola con abbassamento del colmo.</i></li> </ul> <p>Le lesioni al centro delle vele sono peggiorate dalla presenza di finestre e aperture. Lesioni sugli spigoli si riscontrano per mancanza di congruenza nelle deformazioni.</p>		
<p><b>INTERVENTI</b></p> <p>Per le cupole, la cerchiatura rappresenta il rimedio tradizionale più efficace oltre che più conservativo (d).</p> <p>Spesso cerchiature, anche lignee, sono già presenti, direttamente inserite nella muratura e l'osservazione dopo eventi sismici recenti (c1) ha dimostrato come la semplice sostituzione e rinforzo di tali elementi cerchiati avrebbe evitato danni a molte strutture.</p>		
<p><b>d</b></p> <p>Cerchiatura della cupola di Hagia Sophia, eseguita da Sinan nel XVI secolo.</p>	<p><b>d1</b></p> <p>Schema di posizionamento di una cerchiatura esterna in corrispondenza della spinta maggiore della cupola. Santa Maria del Quartiere in Parma.</p>	<p><b>c1</b></p> <p>Spesso cerchiature lignee, sono già presenti, direttamente inserite nella muratura. La loro manutenzione e rinforzo sarebbe stato sufficiente a scongiurare il crollo della cupola.</p>

Fig. Schede di danno dettagliate (Rif. "Architettura storica e terremoti.

Protocolli operativi per la conoscenza e la tutela" di Carlo Blasi)

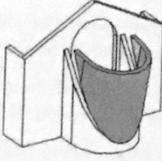
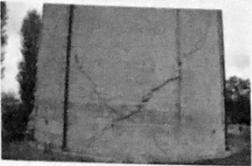
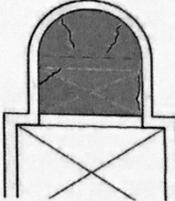
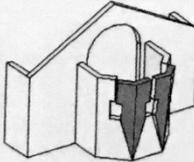
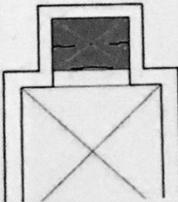
Scheda XI - ABSIDI E CAPPELLE LATERALI		1° - 2° MODO	
<p><b>DESCRIZIONE</b> Corpi <i>sporgenti</i> rispetto al manufatto principale, come absidi e cappelle laterali, in caso di sisma tendono a sviluppare meccanismi di rotazione verso l'esterno, in modi e configurazioni diverse a seconda della loro geometria (parete curva, <i>a</i> o poligonale, <i>c</i>) e della configurazione strutturale della copertura, generalmente costituita da puntoni che esercitano spinte verso l'esterno (lungo il perimetro o in corrispondenza delle angolate), aumentando il rischio di ribaltamento. In alcuni casi si assiste ad un fenomeno di scorrimento relativo tra copertura e muratura sottostante.</p> <p><b>VULNERABILITÀ</b> Il meccanismo implica la mancanza di connessioni al colmo del pannello e la scarsa efficacia di collegamento tra muri trasversali, o anche, nel caso di edifici rinforzati, la disposizione irregolare di eventuali catene. La presenza delle aperture vicine alle intersezioni del muro indebolisce il pannello murario, influenzando geometria e forma dell'area danneggiata. La presenza di volte o semi-cupole non contrastate può aumentare la spinta sulle pareti determinando un sistema complesso di ribaltamento che coinvolge spesso gli angoli (muri ortogonali), specie se precedentemente danneggiati da azioni nel piano.</p> <p><b>SINTOMI</b> Si riscontrano in genere:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>lesioni inclinate a chiudere verso il basso (a)</i> o in corrispondenza delle <i>fasce di sovrapposizione laterale</i>, con andamento inclinato o verticale in caso di discontinuità (aperture) (<i>c</i>);</li> <li>• <i>presenza di travi spingenti sugli angoli (c1)</i>;</li> <li>• <i>lesioni sulle volte e semicupole (b, b1, d1)</i>.</li> </ul> <p>I tetti a padiglione producono spesso lesioni sugli spigoli dove si appoggiano e spingono le travi diagonali. A questo si aggiunge spesso l'insufficiente resistenza della sommità dei muri e la carenza di collegamenti con le coperture (mancanza di cordoli di irrigidimento della sommità dei muri). Contemporanei danni a taglio delle pareti perpendicolari – muri di contenimento – possono innescare il meccanismo durante il terremoto.</p> <p><b>INTERVENTI</b> Le coperture dovrebbero svolgere un'azione di contenimento delle murature se dotate di resistenza nel proprio piano – ad esempio avere tutti gli elementi chiodati tra loro e controventati – e se efficacemente collegate alle murature. Un'efficace chiodatura è spesso sufficiente ad eliminare il rischio di un simile dissesto. Una cerchiatura dell'abside può garantire il contenimento delle spinte e scongiurare il ribaltamento.</p>			
	<p><b>a</b> Meccanismo di rotazione a seguito di fessurazione a taglio. Abside a parete curva.</p>	<p><b>a1</b> Fessurazione a taglio in abside a parete curva, che può innescare un futuro ribaltamento.</p>	
			
	<p><b>b</b> La presenza di volte o semi-cupole non contrastate aumenta la spinta sulle pareti, leggibile da un preciso quadro fessurativo.</p>	<p><b>b1</b> Lesioni sulle volte e in corrispondenza delle murature d'ambito. Chiesa di Gemona, dopo il terremoto del Friuli, 1976.</p>	
			
	<p><b>c</b> Meccanismo di rotazione a seguito di fessurazione a taglio. Abside poligonale.</p>	<p><b>c1</b> La presenza di coperture spingenti, mista alla carenza di collegamenti adeguati e alla mancanza di cordoli di irrigidimento provoca lesioni in sommità.</p>	
			
<p><b>d</b> La presenza di volte o semi-cupole non contrastate aumenta la spinta sulle pareti, leggibile da un preciso quadro fessurativo.</p>	<p><b>d1</b> Lesioni sulle volte e semicupole.</p>		

Fig. Schede di danno dettagliate (Rif. "Architettura storica e terremoti.

Protocolli operativi per la conoscenza e la tutela" di Carlo Blasi)

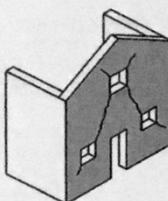
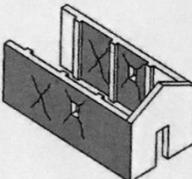
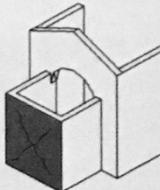
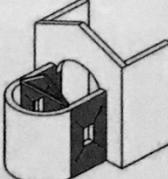
Scheda XII - TAGLIO NELLE PARETI ESTERNE ED INTERNE	2° MODO	
<p><b>DESCRIZIONE</b>            Nel caso in cui la presenza di presidi (tiranti, cordoli, cerchiature, connessioni efficaci tra gli elementi) faccia assolvere all'edificio la sua funzione scatolare, le pareti possono sviluppare un meccanismo "di secondo modo", rispondendo in effetti in maniera "globale" all'azione sismica.            Generalmente, <i>in facciata</i>, la rottura a taglio è innescata dalla presenza di un'apertura nella parte alta (a); le azioni sismiche vengono quindi scaricate sulle fasce verticali che si fessurano.            Analoghi meccanismi di rottura a taglio possono poi riguardare le <i>pareti laterali</i>, che può anche provocare scorrimenti lungo superfici di discontinuità (b).            Il meccanismo a taglio è prevalente nelle absidi rettangolari (c) e nelle cappelle laterali (d), con azioni torsionali sul macroelemento.</p> <p><b>VULNERABILITÀ</b>            La presenza di grandi volumi vuoti perimetrati da pareti di modesto spessore e notevole snellezza è fonte di notevoli rischi, soprattutto quando gli elementi di copertura non siano in grado di contrastare le oscillazioni delle murature per assenza di collegamenti efficaci.            In questo fenomeno, le aperture costituiscono una via preferenziale di sviluppo delle lesioni inclinate.</p> <p><b>SINTOMI</b>            Generalmente si osservano lesioni diagonali sviluppate al centro del muro, che si propagano verso gli spigoli, simmetricamente rispetto all'asse della facciata. Tali lesioni passano prevalentemente attraverso i giunti (assumendo l'aspetto di una lesione "a scalinata").</p> <p><b>INTERVENTI</b>            Il rinforzo globale dell'edificio per aumentare la resistenza a taglio delle pareti può risultare in generale molto invasivo.            Considerata la limitata pericolosità del tipo di meccanismo, che non porta direttamente al collasso, conviene quindi limitare gli interventi a zone e lesioni particolarmente pericolose perché possono trasformarsi in possibile innesco di un successivo ribaltamento della struttura.            È importante assicurare, considerando anche la qualità della muratura, una buona distribuzione delle forze di ancoraggio tra copertura e murature.            Una certa resistenza e rigidità del solaio di copertura evita poi la rottura dei muri ortogonali a seguito di movimenti eccessivi.</p>		
<p><b>a</b>            Fessurazioni a taglio in facciata.</p>	<p><b>a1</b>            La rottura a taglio in facciata, come spesso succede, è innescata dalla presenza di un'apertura nella parte alta.</p>	
		
<p><b>b</b>            Meccanismi di rottura a taglio nelle pareti laterali.</p>	<p><b>b1</b>            Meccanismi di rottura a taglio nelle pareti laterali.</p>	
		
<p><b>c</b>            Meccanismo a taglio nelle absidi. Prevalente in quelle a base poligonale.</p>	<p><b>c1</b>            Abside danneggiata a taglio. Rovereto di Novi (Modena), dopo il sisma emiliano del maggio 2012. Le aperture hanno costituito una via preferenziale di sviluppo.</p>	
		
<p><b>d</b>            Meccanismo a taglio nelle absidi.</p>	<p><b>d1</b>            Meccanismo di rottura a taglio abside curva, chiesa di Villafranca (Modena). La resistenza a taglio è inficiata dal crollo della copertura e della volta di coronamento.</p>	

Fig. Schede di danno dettagliate (Rif. "Architettura storica e terremoti.

Protocolli operativi per la conoscenza e la tutela" di Carlo Blasi)

## ***L'importanza del monitoraggio per la conoscenza e la conservazione***

L'approccio empirico è recuperato dalla normativa, che come abbiamo visto propone un percorso di conoscenza che, partendo dall'osservazione e dall'esperienza, conduce ad identificare i meccanismi di danno più probabili per la tipologia strutturale in esame.

La conoscenza della costruzione è fondamentale non solo ai fini di un intervento di conservazione, ma anche per la valutazione della sicurezza sismica e per la definizione degli eventuali interventi di miglioramento.

In questa filosofia il monitoraggio strutturale costituisce il passo finale di questo percorso, da intendersi non solo come strumento per controllare il danno ma anche come mezzo di conoscenza del comportamento strutturale sismico del fabbricato e la sua evoluzione nel tempo.

Nella normativa il controllo periodico è definito come una pratica auspicabile poiché rappresenta il principale strumento per la conservazione delle strutture e in alcuni

casi, quando l'eventuale dissesto è ben compreso e possono essere definiti livelli di sicurezza, il monitoraggio può costituire un'alternativa e una validazione dell'intervento.

Una metodologia d'indagine sperimentale di tipo "lento" è indicata in modo particolare per gli edifici storici, in quanto ci consente di calibrare un modello affidabile della struttura, che è in grado di coglierne il comportamento al meglio e di simulare le risposte alle varie sollecitazioni.

Questa procedura consente una valutazione continua nel tempo del quadro fessurativo e la possibilità di eseguire previsioni a breve e lungo termine e simularne il comportamento.

Va da se che il monitoraggio deve essere mirato, ragion per cui assume fondamentale importanza il progetto del controllo, infatti questo richiede una preliminare interpretazione del meccanismo di dissesto che permetta di individuare una serie di punti notevoli che è opportuno controllare.

## *Il monitoraggio “storico”*

Il monitoraggio eseguito attraverso l'ausilio di strumenti elettronici copre, per ovvie ragioni, solo una finestra temporale breve e recente rispetto all'intera storia della struttura, che in realtà potrebbe essere coinvolta in fenomeni di lunga durata come cedimenti o effetti viscosi, di cui sarebbe bene valutare l'evoluzione. Il monitoraggio storico permette di ampliare la finestra temporale, attraverso la conoscenza di eventi passati i cui segni sono stati registrati da documenti e sull'edificio.

Lo studio del comportamento statico della struttura è un potente mezzo di indagine; le informazioni che tale analisi può fornire sono molte: dalle fasi costruttive alle modifiche subite, la conoscenza del comportamento pregresso della struttura. Questo consente lo studio dell'evoluzione dei dissesti della fabbrica nel tempo, a partire dalla costruzione, sulla base di un'attenta ricerca documentale-archivistica e sull'osservazione della struttura storica.

In quest'ottica, la deformazione di un elemento decorativo, la misura di una lesione sul rappezzo di un affresco, le pendenze di una pavimentazione o i fuori piombo di una parete diventano testimonianze storiche del percorso seguito dalle strutture a partire dalla fase di costruzione in poi, in grado di guidare ad un primo giudizio sulla stabilità.

Questo processo diventa fondamentale, come in questo caso studio, per la convalida del modello e degli strumenti di calcolo scelti per lo studio di una struttura antica.

### ***Dalla realtà al modello attraverso i monitoraggi dinamici***

Per le strutture storiche il problema è tarare al meglio il modello per interpretare in modo affidabile la realtà e quindi fare previsioni realistiche in merito al comportamento della struttura.

Al fine di calibrare il modello per comprenderne e simularne il comportamento, risulta fondamentale la misurazione e definizione di alcuni parametri strutturali “registrati” dagli strumenti.

In generale, la definizione della risposta dinamica di una struttura è facile se si fa uso di un monitoraggio dinamico, attraverso le misure di accelerometri e GPS lungo la struttura, in modo da identificarne frequenze proprie, forme modali, damping, torsione, nonché l'interazione tra suolo e struttura; tali parametri possono essere poi affidabilmente relazionati al danno, e predirlo.

Risulta, quindi evidente, come il monitoraggio dinamico sia utilissimo al fine di determinare le caratteristiche dinamiche in situ, ottenere i parametri necessari alla calibrazione e al controllo dei metodi di analisi utilizzati, creando anche una mappa del danneggiamento strutturale e del collasso in tempo reale.

## ***II CASO STUDIO: “La basilica di San Nicola da Tolentino”***

### ***Un po' di storia***

*(Rif. “LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO – Guida all’arte e alla storia” a cura del Centro studi “Agostino Trapè”)*

E' stato confermato che gli agostiniani furono presenti a Tolentino fin dal 1256 e che quando nel 1275 i superiori del nuovo Ordine mendicante inviarono in questo luogo fra Nicola da Tolentino, il convento era già bene organizzato nella sua vita interna e possedeva le strutture essenziali: un edificio per l’abitazione di un certo numero di religiosi e un oratorio. La prova è data da un documento ufficiale del 1284, una donazione per la precisione, da cui risulta che esistevano a Tolentino una chiesa, un convento intitolati a Sant’Agostino.

Lo sviluppo successivo del complesso conventuale e chiesastico è dovuto unicamente a frate Nicola. A seguito della sua morte, avvenuta nel 1305, le folle cominciarono ad

accorrere al suo sepolcro, sistemato in un'arca lignea al centro della grande cappella.

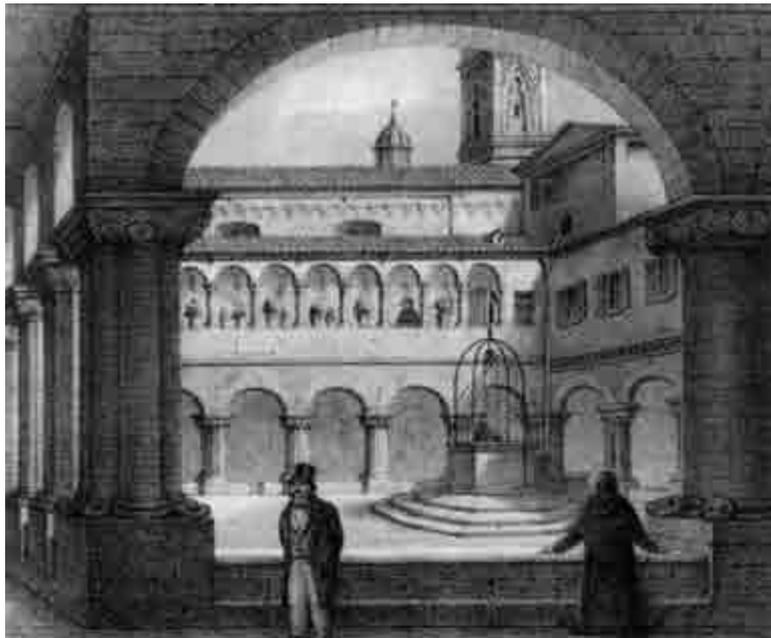
Nel maggio del 1325 si apre ufficialmente il Processo di canonizzazione, in previsione di tale proclamazione fu progettato il ciclo di affreschi nelle pareti della cappella che custodiva le spoglie del Santo.



**Fig.** *Facciata della basilica in un ex voto (ante 1628)* Museo del Santuario (Rif. "LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO, Guida all'arte e alla storia" a cura del Centro studi "Agostino Trapè")

Il decreto di canonizzazione arriverà più di un secolo dopo, nel 1446. Dal 1450 San Nicola è venerato come “martire” e viene proclamato, insieme a San Catervo, comprotettore di Tolentino. Nel 1459, proprio per rendere memorabile la canonizzazione di Fra Nicola, fu tenuto a Tolentino un Capitolo generale. I problemi logistici per ospitare e sfamare tanta gente dovettero essere notevoli; il 12 maggio fu eletto generale Alessandro Oliva da Sassoferrato, come risulta dall’iscrizione posta sotto l’affresco ora conservato nel Museo del Santuario. La posizione originaria di detto affresco mostra che l’aula dove si svolse il Capitolo era l’attuale sala San Giorgio. Qualche decennio prima il corpo di san Nicola, era stato interrato e nascosto. Nessuno sapeva dove, ma, come si tramandava, doveva essere all’interno del Cappellone. Quando nel 1474 fu commissionata l’arca marmorea dal Millini sul tipo di quella lignea preesistente, i frati non avevano più il corpo del santo da riporvi, e allora la sistemarono, si scoprirà dopo il ritrovamento, esattamente sopra il luogo dove era stato sepolto.

Nel gennaio del 1485 arrivò nel convento la Congregazione di Lombardia, che rimase fino alla soppressione del 1810. La loro permanenza fu molto feconda per l'ampliamento e l'abbellimento del complesso architettonico. Aiutati da abili artigiani di provenienza lombarda, nell'arco di un paio di secoli ristrutturarono e completarono il chiostro, ingrandirono la chiesa e l'adornarono con lo splendido soffitto in legno dorato, e rivestirono la faccia col travertino.



**Fig.** *Antico chiostro del convento di San Nicola in Tolentino (1859)* (Rif.

“LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO, Guida all’arte e alla storia” a cura del Centro studi “Agostino Trapè”)

E' storia recente la tenace opera di ricostruzione attuata dal padre Nicola Fusconi, il quale, dopo esser riuscito a raddoppiare il numero dei religiosi, riuscì a riprendere, un pezzo dopo l'altro, quasi tutto il convento. La sua tenacia gli permise nel 1926 di ritrovare il corpo di san Nicola, sotto l'arca del Milini, ridando così slancio al santuario e alla devozione al Santo. Per custodire degnamente il sacro cimelio, fece costruire, con notevole sforzo finanziario, la cripta, dove ora riposano le ossa di Nicola, ricongiunte alle braccia.

### ***Architettura del complesso monumentale***

L'insediamento in Tolentino degli eremiti di Sant'Agostino dovette sopravvivere di qualche anno l'inizio dei lavori del complesso conventuale in costruzione nel luglio del 1284. Il silenzio delle fonti documentarie, ridotte per i secoli XII e XIV a un numero esiguo di carte, data la perdita dell'archivio precedente il 1485, costituisce un grave impedimento al fine di ricostruire le fasi di accuartieramento della comunità mendicante che si presume si sia stabilita intorno al 1265, su

un terreno in forte pendio poi livellato dal cantiere religioso, forse a quel tempo ancora esterno alle mura di Tolentino.

Strutture di prima accoglienza dovevano comunque sorgere nell'area destinata all'insediamento; sebbene l'estensione della fabbrica agostiniana abbia modificato il primitivo contesto, si possono ancora rintracciare preesistenze monumentali nella sala semi-interrata del braccio meridionale del convento e nella camera che si affaccia sul vano di svincolo tra la chiesa, il Cappellone di San Nicola e la cappella delle Sante Braccia, tradizionalmente ritenuta luogo di acesi penitenziale di Nicola. La salvaguardia di tale ambiente avrebbe inoltre causato l'anomalia planimetrica della prima fabbrica, riscontrata nel mancato attacco alla chiesa dell'ala conventuale; questa infatti non si addossa, secondo la prassi comune dei complessi mendicanti, direttamente al coro, ma risulta ad esso collegata mediante un ambiente quadrato confinante sul lato orientale con la presunta cella del Santo, la cui parete di fondo non si allinea al muro esterno del convento.

La devozione verso Nicola, iniziata molto prima della sua morte, forse determinò l'intoccabilità del piccolo vano, rendendo quindi necessario l'allontanamento dei corpi di fabbrica della chiesa e del braccio comunitario; tuttavia l'unitarietà dell'impianto architettonico fa ritenere che la soluzione adottata fosse stata già predisposta ad avvio cantiere, in opera nel 1284. La mole in laterizio della chiesa chiude il fronte settentrionale del complesso agostiniano. La sua veste medievale è oggi parzialmente leggibile sotto gli interventi di riammodernamento promossi dalla Congregazione osservante di Lombardia, che comportarono nel 1510 l'allungamento del capocroce, con l'allestimento del soffitto a lacunari nel primo trentennio del XVII secolo e quasi contemporaneamente l'addizione di cappelle lungo le fiancate della navata; infine dopo la metà del Settecento si concludevano i lavori per il nuovo prospetto che conservava al centro il portale scolpito da Nanni di Bartolo tra il 1432 e il 1435.

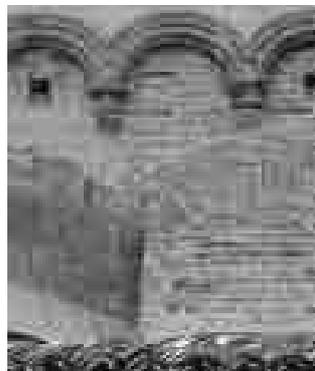


**Fig.** *Volta a crociera costolonata delle grotte sotto il convento* (Rif. “LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO, Guida all’arte e alla storia” a cura del Centro studi “Agostino Trapè”)

La semplicità iconografica dell’edificio di culto tardo-  
duecentesco, a navata unica mono-absidata a terminazione  
rettilinea, si sposa con il modello a “coro ridotto” talvolta  
adottato in fondazioni centroitaliane.

La chiesa tolentinate risulta progettualmente e  
strutturalmente unitaria, benché sia stata condotta a termine  
in tempi piuttosto lunghi anche per le considerevoli  
dimensioni del corpo di fabbrica il cui coro, quasi ultimato nel  
1309, era officiato nel 1317; tuttavia nel 1343 è documentato

un lascito testamentario che avvalorerebbe la tesi di un prolungamento dei lavori ancora a quella data. L'esplosione post-mortem del culto di Nicola, risultò determinanti nel dirigere l'impegno di cantiere a favore di un completamento dell'ala conventuale interessata dall'allestimento del cappellone. Il temporaneo rallentamento della fabbrica religiosa è comprovato dall'evidente stacco sul piano stilistico tra le monofore del dormitorio dei frati, scoperte di recente nel sottotetto del convento, e il cleristorio della navata interessato, come verosimilmente la facciata della chiesa, da quella fase di lavori procrastinatisi alla metà del XIV secolo; anche la base della torre campanaria, addossata posteriormente tra l'abside centrale e la parete settentrionale del coro, appartiene al cantiere trecentesco.



**Fig.** *Finestra trecentesca della basilica* (Rif. “LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO, Guida all’arte e alla storia” a cura del Centro studi “Agostino Trapè”)

Le vicende dell’ala conventuale ruotavano nella prima metà del Trecento intorno alla fabbrica del Cappellone di San Nicola, che determinò a lavori compiuti lo spostamento della sagrestia nel vano quadrato che lo divideva dalla chiesa, funzione persa nel 1424 al tempo dell’innalzamento della nuova sagrestia poi inglobata nella cappella delle Sante Braccia.

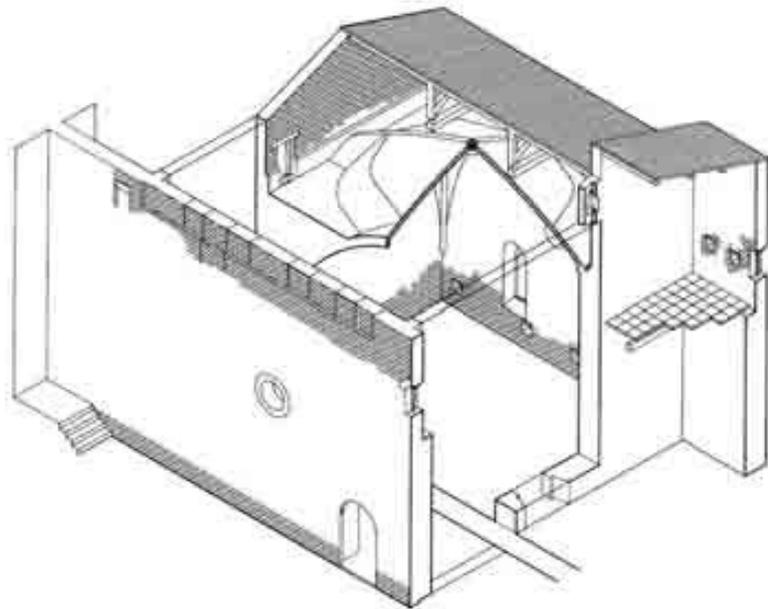
L’originaria destinazione del Cappellone a sagrestia con funzioni di oratorio si evince dalla posizione che occupava nel braccio orientale, dalla sua natura architettonica, modificata al momento della sua elevazione a cappella – memoriale dall’inserimento della volta ogivale quadripartita, praticata entro il terzo decennio del Trecento.



**Fig.** *Parete settentrionale del Cappellone* (Rif. “LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO, Guida all’arte e alla storia” a cura del Centro studi “Agostino Trapè”)



**Fig.** *Interno del Cappellone* (Rif. “LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO, Guida all’arte e alla storia” a cura del Centro studi “Agostino Trapè”)



**Fig.** *Spaccato assonometrico del Cappellone* (Rif. “LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO, Guida all’arte e alla storia” a cura del Centro studi “Agostino Trapè”)

Lo sviluppo del convento è da circoscrivere fino alla metà del trecento unicamente all’ala orientale, che continuava a soddisfare le esigenze di una comunità in crescita. A questa fase fecero seguito gli ingenti lavori promossi dalla Congregazione di Lombardia che spostarono il centro della vita comunitaria nel nuovo chiostro rinascimentale eretto dal 1490 alle spalle del primitivo braccio orientale. Tale chiostro diviene fulcro centrale di tutto il complesso, adagiato lungo il

fianco destro della chiesa, la quale ne chiude il lato occidentale, vero snodo di distribuzione e di incontro fra le varie attività e funzioni della vita monastica.

### ***La facciata della Basilica***

Non è nota oggi la composizione architettonica del primitivo prospetto della chiesa medievale dedicata a Sant'Agostino.

Possediamo un repertorio iconografico molto sommario, costituito da un ex voto del XVII secolo, nel quale esso ci appare prima del suo completamento seicentesco ma dopo l'aggiunta del portale quattrocentesco, mostrandoci una semplicissima facciata capannata con un piccolo oculo sotto la cuspide.

Il portale in stile gotico fiorito che campeggia nel prospetto fu eretto in pietra d'Istria dallo scultore Nanni di Bartolo detto il Rosso, fra il 1432 ed il 1435. Il portale quattrocentesco rimase a campeggiare nella nuda facciata laterizia per circa due secoli, mentre nel 1519 fu ammattonata la piazza antistante la basilica, fino a che non ripresero i lavori di completamento. Il 5 febbraio del 1630 venne stipulato il

contratto con lo scalpellino Florindo Orlandi, il quale inquadrò il portale del Rosso in un plastico prospetto tardomanierista in travertino, conducendolo sino al cornicione del primo ordine. La parte inferiore risulta spartita in cinque campate da paraste tuscaniche, su alto piedistallo, che sorreggono il fregio recante l'intitolazione della chiesa ed un cornicione dal pronunciato aggetto; mentre la campata centrale ospita il preesistente portale, quelle laterali sono occupate dalle due porte secondarie, sormontate da un timpano spezzato. Sopra di esse due alti finestroni, con timpano centinato su mensole, che denunciano il secolo del barocco soltanto per due timide coppie di orecchioni laterali appena pronunciati. Le due campatelle terminali sono occupate da nicchie emisferiche e da targhe con gli stemmi.

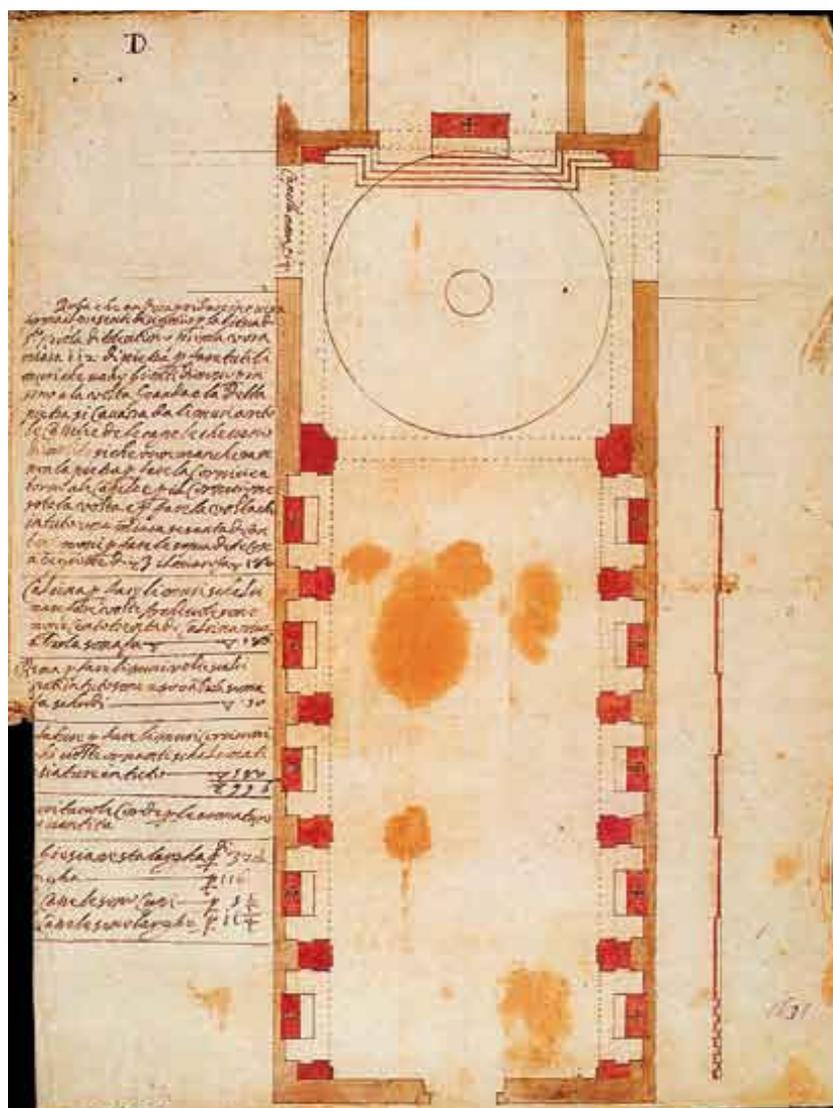
Nell'agosto del 1721 è documentata la costruzione di una gradinata, posta a rispetto davanti alla nuova facciata.

Per il completamento della facciata bisogna attendere, però, il 1757, anno in cui fu completato l'ordine superiore incompiuto.



**Fig. Facciata** (Rif. “LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO, Guida all’arte e alla storia” a cura del Centro studi “Agostino Trapè”)

I primi lavori proseguirono con qualche intervallo fino al 1759, poi vi fu un fermo fino al 1765. Nel settembre dello stesso anno si demolì il muro del vecchio timpano medievale che ancora sovrastava la facciata, se ne eresse uno nuovo e si iniziò il completamento. Questo fu portato a termine nel settembre del 1767 con una spartizione a tre campate, affiancate e strette da volute esterne, con cornicione e paraste in opera ionica "bastarda" che dividono le due grandi nicchie laterali dal gran rosone centrale, formato da un sole raggiante. Il coronamento retto dell'attico con una balaustra si conclude con quattro candelabri marmorei ed un trimonte sormontato dalla croce.



**Fig. Progetto seicentesco della Basilica** (Rif. “LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO, Guida all’arte e alla storia” a cura del Centro studi “Agostino Trapè”)

Agli inizi del Novecento la facciata si presentava in pessime condizioni di degrado e pericolante in alcune parti, ragion per cui fu eseguito un restauro globale.

## *La basilica*

Quasi nulla è certo sull'oratorio dedicato a San Giorgio preesistente alla chiesa. Più chiara risulta invece la tipologia della chiesa tardo-duecentesca, ancora dedicata a Sant'Agostino (in costruzione almeno dal 1284): a navata unica con capriate lignee a vista, presbiterio rettangolo voltato a crociera, abside piatta. La chiesa mantenne a lungo il cantiere aperto, almeno ben oltre la metà del XIV secolo, stanti i numerosi documenti dell'Archivio. Di questo edificio medievale rimangono visibili soltanto parte del muro del cleristorio del fronte meridionale, con eleganti archetti pensili a ghiera concentriche riscontrabili anche nei resti della parete nord del vecchio presbiterio, e scarsi resti murari nel basamento della torre campanaria.

Nel maggio 1459 il generale agostiniano Alessandro Oliva firmava un contratto per la costruzione degli stalli del coro. La chiesa antica, finalmente completata, venne consacrata il 31 ottobre del 1465 con titolo di San Nicola.

Un nuovo impulso ai lavori viene con l'insediamento della Congregazione di Lombardia. Nel 1485 si parla del disegno preventivo di spese per la nuova chiesa, nel 1503 è terminata la costruzione della navata centrale se, dal 30 luglio al 29 settembre, si realizzano le nuove cappelle laterali e le sepolture lungo il fianco sinistro (Nord). Si tratta di un rinnovamento complessivo dell'assetto parietale della navata poiché nella chiesa esistevano già altre cappelle delle quali si ha notizia certa, come ad esempio quella della Madonna del Parto, quella di Sant'Ambrogio e quella dell'Annunziata.

Interessante è un atto del 1510 nel quale il priore stipula un contratto per la costruzione della cappella maggiore sia nei muri che nelle volte: si tratta della ricostruzione dell'abside. La descrizione del lavoro non lascia dubbi che si tratti del prolungamento del complesso absidale, poligonale a sette facce e archeggiato a tutto sesto, tutt'ora visibile, seppur parzialmente, per il progressivo avanzamento della cappella delle Sante Braccia, e che originariamente giungeva esattamente alla radice della sagrestia quattrocentesca

voltata a crociera, dove effettivamente allora terminava la fabbrica.



**Fig.** *Capocroce della basilica (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)*

Al fianco settentrionale dell'antico presbiterio si incastonava il campanile dalle chiare forme tardogotiche, leggibili nelle finestre ogivali trilobate della cella. Nel 1433 esso risultava in costruzione, mentre un documento nel 1492 ce lo dà come esistente. Nel 1519 ne fu ricostruito il pinnacolo, danneggiato dal fulmine. L'ultimo ordine oltre il cornicione e

la copertura a cuspidale mistilinea con la sfera ci dicono invece che il suo attuale coronamento è opera del XVIII secolo.

Non conosciamo il sistema di copertura della chiesa ristrutturata dalla Congregazione di Lombardia, ma è probabile vi fosse mantenuta, per ragioni di praticità statica, la struttura a capriate lignee sulla navata unica, d'altronde consona allo stile dell'Ordine, mentre nel presbiterio si mantenne sino al XIX secolo il voltone a crociera. Per quanto riguarda invece la zona del transetto, una ipotesi di una copertura a cupola viene sollecitata da un disegno del 1631 relativo al progetto di ristrutturazione delle cappelle laterali della navata, nel quale compare evidente il segno di proiezione di una cupola emisferica con lanternino; ma, dato l'ingente impegno tecnico e finanziario che una tale opera avrebbe comportato per i frati nel tempo, parrebbe impossibile non trovarne traccia nei documenti di archivio.

Intanto nel 1510 si appaltò la costruzione di una cantoria in legno per l'alloggiamento di un organo, installato nel 1514.

Seguono lungo tutto il XVII secolo vari lavori di abbellimento e decorazione del tempio. A partire dall'aprile 1608, si iniziò la costruzione di una nuova ricca ed ampia cappella sul lato nord del transetto rinascimentale con l'intenzione iniziale di collocarvi le Sante Braccia di san Nicola, ma che fu poi dedicata al Santissimo Sacramento quando si preferì collocare le reliquie sull'altro lato della chiesa ampliando la sagrestia quattrocentesca.

Si iniziò abbattendo 4 cappelle e 28 sepolture a cornuevangelii. I lavori alla cappella, realizzata poi con cupola sferica e lanternino su tiburio ottagonale, furono interrotti, quindi ripresi nel 1642 per poi dilungarsi nel tempo. Venne infine ristrutturata e decorata nelle odierne forme dall'architetto Carducci nel 1858.

Nel 1631 si iniziò la nuova sagrestia ristrutturando la stanza a pianta quadrata nel braccio monastico, già destinata a sala capitolare medievale, ed allargandone la porta di comunicazione verso la chiesa, che avveniva traversando il confinante Cappellone di San Nicola.

La sagrestia quattrocentesca, posta sul lato destro del presbiterio, era stata sin dalla canonizzazione di San Nicola (1446) destinata a contenere le reliquie delle Sante Braccia e convertita in cappella. L'afflusso crescente dei devoti pellegrini suggerì, nel XVI secolo, l'apertura verso oriente di un nuovo vano a pianta quadrata, voltato a cupola su pennacchi sferici e separato dal precedente da una elegante serliana su colonne in marmo con ricca trabeazione corinzia. Ricche decorazioni, pitture, affreschi, stucchi ed incrostazioni marmoree pregiate, arricchirono ripetutamente nel tempo questa cappella. Nel XVII secolo, abbandonata definitivamente l'idea di trasferire la cappella delle Sante Braccia nella nuova cappella, si preferì ingrandire ulteriormente verso Est il santuario creando un terzo ed ultimo vano a pianta ottagonale con volta ribassata, dotandolo di un nuovo altare contenente il forziere delle reliquie, completato con un abside a decori marmorei terminata nel 1697. L'effetto finale di spazio espanso a cannocchiale, filtrato dalle trasparenze della serliana e ridondante di rimandi cromatici dai ricchissimi e variati

decori, rende la cappella delle Sante Braccia uno degli spazi più suggestivi del complesso basilicale agostiniano.

Abbandonato il progetto del 1631 che pretendeva di ricavare le nuove cappelle sui lati interni della chiesa, restringendo di molto la luce della navata, dal 1632 al 1634, gli agostiniani decidono invece di estradossarle allargando il fianco destro della chiesa a scapito del portico settentrionale del chiostro antico, che venne così ridotto di una campata, come già sopra descritto.

Elemento definitivamente qualificante dell'intero spazio della navata della chiesa è costituito dal ricchissimo soffitto ligneo a lacunari cassettonati, il cui caldo riflesso aureo rende unica la suggestione luministica del tempio. Fu realizzato tra il 1605 e il 1628; questo capolavoro di ebanisteria barocca, si sviluppa per una lunghezza di più di 38 metri spartito in ventuno cassettoni su file di tre e perimetrato da una ricca trabeazione ad ovali e dentelli sorretta da mensole con modiglioni a gola dritta, alternatamente intercalate da piccoli rosoni e da biscioni viscontei, emblema che compare anche

nei riquadri che collegano i singoli lacunari lateralmente fra loro. Nel fondo dei lacunari, alcuni scorniciati ad ottagono, su di un tappeto a scacchiera rosso e bianco, risaltano alternativamente lo stemma vescovile e le diciotto statue dei santi, a grandezza più che naturale, oltre a quella centrale del Cristo Redentore e della Madonna.

L'odierna immagine architettonica dell'interno della chiesa è frutto dei significativi interventi di restauro e di riforma condotti dal 1856 al 1859 dall'architetto Carducci. Sulla base di disegni elaborati già dal 1855, il suo intervento consistette nella demolizione della antica volta a crociera del presbiterio e la sua sostituzione con una nuova cupola a vela, sopraelevata di circa 6 metri; nella chiusura delle due finestre a targa rettangolari ai lati del presbiterio e la riapertura nel muro della sopraelevazione di tre nuovi finestroni a tutto sesto; nel ridisegno della spartizione architettonica dei fornicelli della navata in sette nuovi archi per lato, sobriamente unificati con le loro nuove centine, pilastri crociati, specchiature e piedistalli, il che comportò la riduzione delle cappelle laterali da dieci a otto; nel

riallineamento del fregio corrente dell'aula con quello del presbiterio e dell'abside; nell'apertura di 14 finestroni centinati nel cleristorio per fornire adeguata ed omogenea illuminazione allo splendido lacunare del soffitto. Infine, nel 1858 venne affidato al Carducci anche l'incarico della ristrutturazione architettonica e decorativa della cappella del Sacramento, quindi di progettare due targhe artistiche con bassorilievi commemorativi.

Il ritrovamento nel 1926 del corpo di san Nicola, permise il completamento dello schema tipologico di un tempio dedicatorio al santo, con la creazione della cripta sotterranea. Questa, il cui accesso avviene attraverso un'ampia scala a doppia rampa direttamente dalla sagrestia quattrocentesca, venne edificata nel 1932, esattamente sotto il pavimento del Cappellone, dove insiste l'arca quattrocentesca, e nel luogo dove effettivamente venne ritrovato il sacro corpo.



**Fig.** *Interno della basilica verso la controfacciata (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)*



**Fig.** *Interno della basilica* (Rif. “LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO, Guida all’arte e alla storia” a cura del Centro studi “Agostino Trapè”)



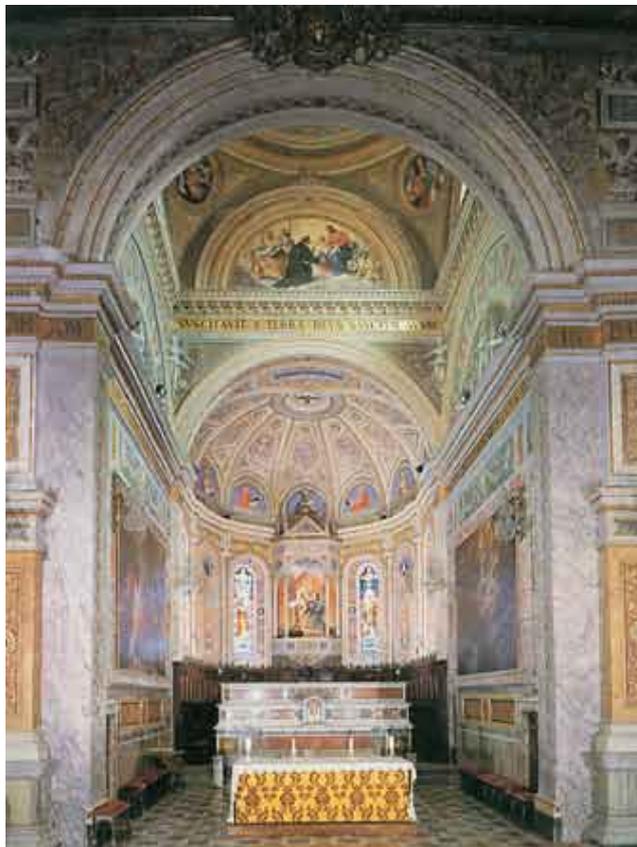
**Fig.** *Il campanile (Rif. “LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO, Guida all’arte e alla storia” a cura del Centro studi “Agostino Trapè”)*

### ***Cappelle laterali***

La basilica attuale presenta quattro cappelle per lato.

1. Cappella di Sant’Anna
2. Cappella del Sacro Cuore

3. Cappella della Vergine del Buon Consiglio
4. Cappella della Vergine della Pace
5. Cappella della Madonna dei Miracoli
6. Cappella di Santa Rita
7. Cappella della Madonna della Consolazione
8. Cappella di San Tommaso da Villanova.



**Fig.** *Cappella maggiore della basilica (Rif. "LA BASILICA DI SAN NICOLA A TOLENTINO, Guida all'arte e alla storia" a cura del Centro studi "Agostino Trapè")*

## ***Cappella Maggiore***

La decorazione del presbiterio e del coro si svolse a più riprese nel corso dei secoli. Il coro ligneo in noce massiccia venne eseguito nel corso del XVII secolo. L'altare maggiore, ornato di marmi, venne eseguito nel 1905. La cupola venne eretta nel 1859. Due porticine laterali in legno, scolpite, immettono alla cella campanaria e alla cantoria della cappella delle Sante Braccia.

## ***Il Cappellone***

Il Cappellone costituisce il primo grande ambiente dell'ala più antica del convento agostiniano, inserendosi tra il coro della chiesa e la sagrestia secentesca, in origine sala del Capitolo. Le indagini sulle strutture hanno evidenziato per il Cappellone due distinti momenti costruttivi, di cui il secondo, volto a sostituire un tetto a capriate con una copertura a crociera, sarebbe da mettere in relazione con il suo cambio di destinazione da sagrestia in cappella – memoriale e la sua quasi contestuale affrescatura, avvenuta probabilmente dopo l'apertura del processo di canonizzazione del santo nell'estate del 1325.

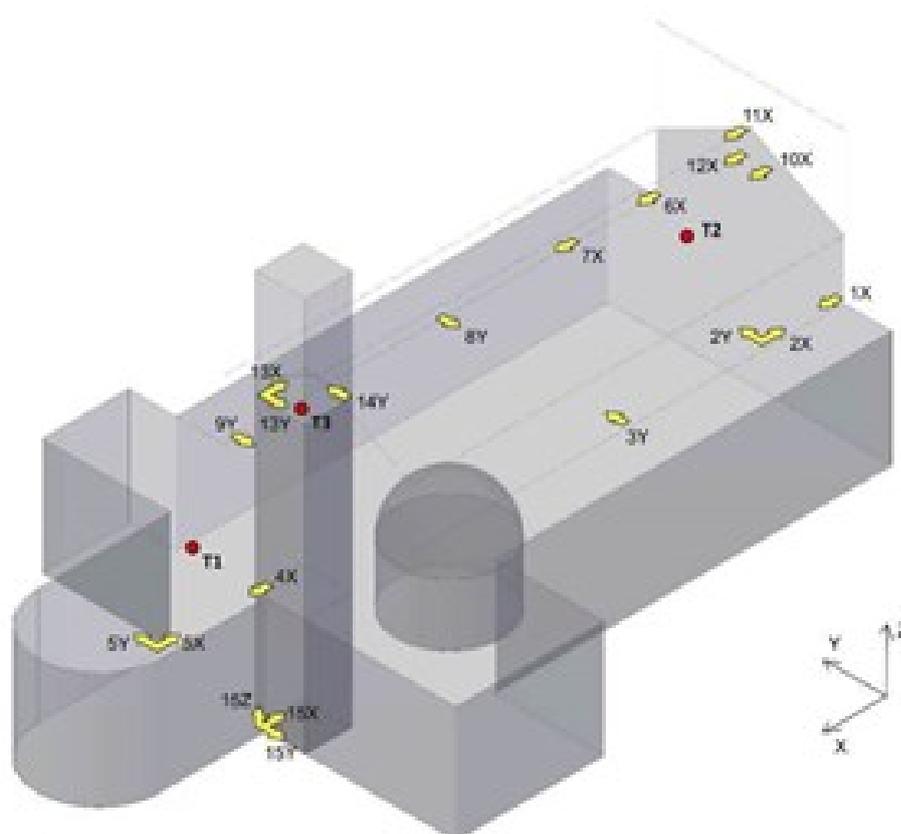
## ***Il sistema di Monitoraggio***

Come già anticipato nell'introduzione, a seguito degli eventi sismici che hanno colpito l'Italia centrale tra agosto e ottobre del 2016 è stato predisposto dal Politecnico di Torino, in collaborazione con l'Università di Nagoya City il monitoraggio dinamico della Basilica di San Nicola da Tolentino. Il monitoraggio dinamico, come ribadito precedentemente, è uno degli strumenti più efficaci nello studio delle strutture, soprattutto se trattasi, come in questo caso, di strutture murarie complesse, poiché consente di individuarne il comportamento e, a lungo termine, di evidenziare le modifiche eventuali del comportamento, causate da lesioni indotte da eventi sismici, decadimento delle proprietà dell'apparato murario e dall'evoluzione di preesistenti punti critici.

La caratteristica principale del sistema di monitoraggio che è stato installato, è la non invasività dello stesso, sia nei riguardi della struttura che dell'apparato decorativo, aspetto fondamentale trattandosi di un bene tutelato; per tale ragione risulta assolutamente reversibile.

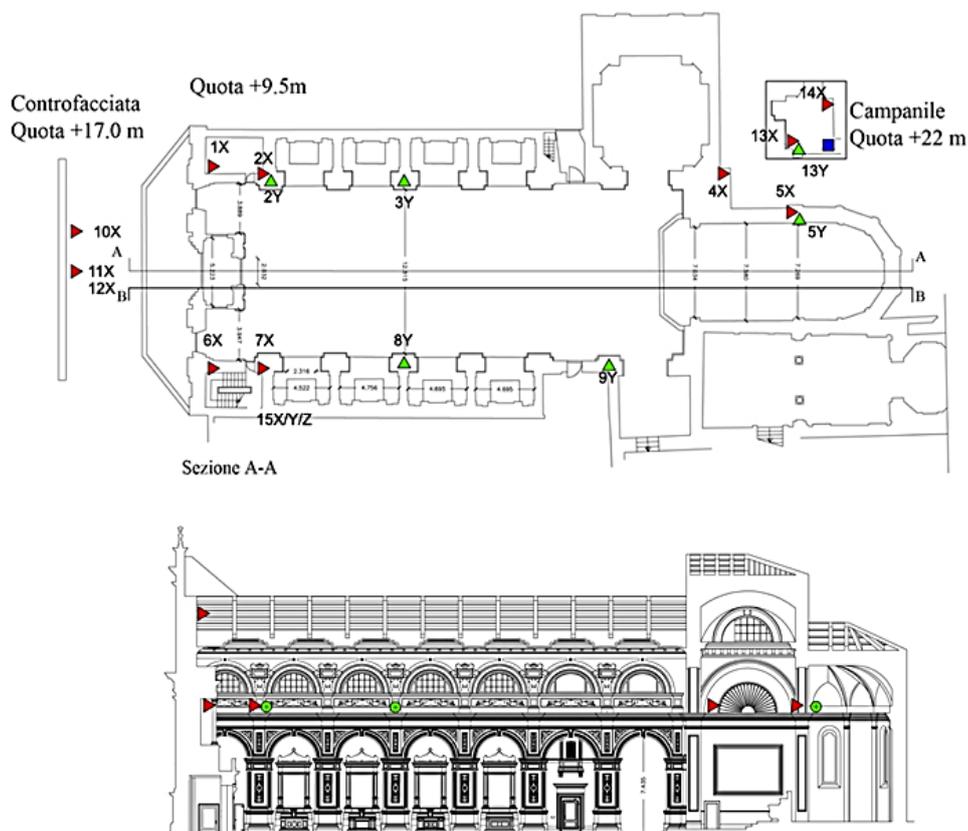
### **Caratteristiche degli accelerometri e loro posizionamento**

Il monitoraggio è stato effettuato per mezzo di 20 accelerometri monoassiali capacitivi, di cui 17 installati sulle strutture portanti lungo gli assi principali della Basilica e 3 alla base della torre campanaria, assunti come terna accelerometrica di riferimento al suolo.



**Fig.** Posizione dei sensori accelerometrici (in giallo) e delle termocoppie (in rosso) (Rif. "Post-earthquake dynamic monitoring of Basilica of St. Nicholas of Tolentino")

di Donato Sabia, Takayoshi Aoki, Daniele Costanzo, Renato  
Lancellotta, Antonino Quattrone)



**Fig.** Posizioni dei sensori accelerometrici e delle termocoppie (Rif. Presentazione "Monitoraggio sismico di strutture storiche" a cura del prof. Sabia)

Il sistema è completato da 3 termocoppie per la misura delle temperature interne, nella navata e nel sottotetto, ed esterna.

I sensori sono collegati ad un sistema di acquisizione a 24 bit e i dati registrati in continuo con frequenza di campionamento di 100 Hz per gli accelerometri e di 1 Hz per le temperature. I dati sono quindi salvati in locale e accessibili in remoto.

Nello specifico la strumentazione installata è costituita da:

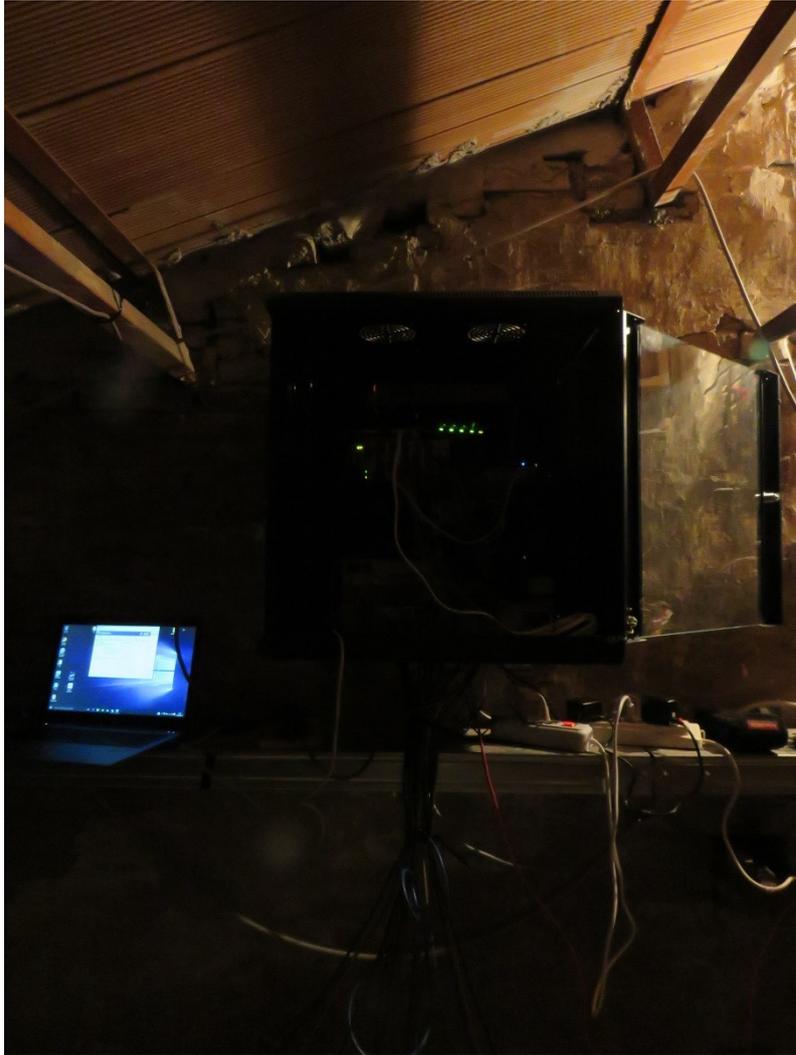
- 20 accelerometri uniassiali capacitivi,
- 3 termocoppie,
- 1 box di alimentazione degli accelerometri,
- 1 alimentatore UPS con batterie per garantire la continuità di alimentazione,
- 1 sistema di acquisizione "Compact Rio" della National Instruments, con frequenza di campionamento a 100 Hz,
- 1 Hard Disk da 2 TB,
- Collegamento alla rete internet per la trasmissione in remoto dei dati.

Per quanto riguarda l'ubicazione degli accelerometri:

- Una terna accelerometrica è stata posizionata al piano pavimento della Basilica, nel vano di accesso all'organo;

- 11 accelerometri mono-assiali sono stati posizionati sulla cornice della navata centrale, ad una quota di circa 9.5 m dal piano del pavimento;
- 3 accelerometri mono-assiali sono stati installati sulla controfacciata, al di sopra del piano del soffitto a cassettoni;
- 3 accelerometri sono stati posizionati sulla torre campanaria, ad una quota di 22 metri dal piano pavimento.

Le componenti di alimentazione e registrazione sono collocate in un "Box Case" posizionato nel sottotetto della navata e collegate ai sensori tramite cavi elettrici schermati di diametro 8mm.



*Fig. Box Case nel sottotetto (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)*

La posizione degli accelerometri sulla struttura è stata decisa sulla base del rilievo del danno della basilica. Lo scopo è quello di acquisire il comportamento dinamico globale e dei macro-elementi principali costituenti il corpo centrale della Basilica (la facciata, la navata, l'abside e la torre

campanaria), danneggiati durante la sequenza sismica, in modo da valutare l'attivazione o l'evoluzione dei meccanismi di danno individuati.

Per esempio il posizionamento delle due coppie di accelerometri sulla facciata e sui muri longitudinali della Basilica (nelle posizioni 1X e 2X, 6X e 7X) serve per controllare l'efficacia del collegamento, valutare l'effetto di eventi sismici e, seguendone l'evoluzione nel tempo, prevenire il meccanismo di ribaltamento.

Analogamente è affidata alla coppia 4X e 5X, collocata a cavallo della lesione sull'abside.

## ***Dal Rilievo alla Modellazione***

In questa parte del lavoro vediamo come sono stati impiegati i metodi della Geomatica al fine dell'analisi strutturale della Basilica, che è un edificio esistente in muratura storica non facilmente modellabile.

Le forme geometriche complesse e non regolari dell'interno della basilica in stile barocco, così come le murature storiche e in particolare gli edifici di grande complessità come le chiese, sono da sempre una sfida per la modellazione agli elementi finiti, che è il metodo individuato per l'analisi strutturale. Risulta infatti molto difficile riprodurre tali strutture con software di modellazione 3D o, in alternativa, direttamente all'interno degli stessi programmi di analisi FEM.

In una struttura storica, con irregolarità e asimmetrie costruttive, il modello ad elementi finiti che si utilizza semplifica fortemente la struttura, con la conseguente necessità di adottare idonei coefficienti di sicurezza che tengano in conto l'incertezza conoscitiva della geometria, oltre che la schematizzazione delle caratteristiche meccaniche, di vincolo e di carico applicate.

Quando si ha a che fare con strutture storiche, inoltre, queste possono presentare disomogeneità nell'uso dei materiali nelle murature, forti irregolarità dovute anche a deformazioni non elastiche dovute a interventi di manutenzione avvenuti nel corso degli anni e difficilmente individuabili o quantificabili. In questi casi la possibilità di importare un modello tridimensionale realizzato a partire da una nuvola di punti ricavata con metodi fotogrammetrici o con scansione laser può permettere di ottenere risultati più precisi in tempi più brevi.

## *La Geomatica*

“La Geomatica è la disciplina che si occupa del rilevamento e della gestione automatizzata dell’informazione relativa al territorio. I metodi della Geomatica rispondono all’esigenza di trattare in modo interdisciplinare e interoperabile grandi quantità di dati ed informazioni da questi derivate, di natura e caratteristiche diverse, rilevati con una crescente molteplicità di procedure e utilizzati in tempi brevi per una corretta rappresentazione ed una buona conoscenza della situazione territoriale.

Sono molte le discipline e le tecniche che vengono annoverate nel termine Geomatica:

- L’informatica, intesa come scienza della rappresentazione e dell’elaborazione dell’informazione applicabile attraverso lo sviluppo di strumenti tecnologici (hardware) e di metodi, modelli, algoritmi e sistemi (software);
- La cartografia, in quanto descrizione della forma e delle dimensioni della Terra e dei suoi particolari, naturali e artificiali, mediante la rappresentazione grafica o numerica di

zone più o meno ampie della superficie terrestre secondo regole prefissate;

- la geodesia, come scienza che studia la forma e le dimensioni della Terra per definire la superficie nella sua forma completa (geoide) e nella sua forma semplificata (ellissoide), e il suo campo gravitazionale esterno in funzione del tempo;
- la topografia, nata con la geodesia e in essa inserita, che consiste nell'insieme delle procedure del rilievo diretto del territorio;
- la fotogrammetria, come scienza che determina la posizione e le forme degli oggetti a partire da misure eseguite su immagini fotografiche degli oggetti stessi;
- il telerilevamento, in quanto acquisizione a distanza di dati riguardanti il territorio e l'ambiente, nonché insieme di metodi e di tecniche per la loro successiva elaborazione e interpretazione;
- la scansione laser, per l'individuazione di oggetti e la misurazione della loro distanza mediante l'uso di radiazione

luminosa coerente in un intervallo di lunghezze d'onda ottiche dello spettro elettromagnetico (0.3-15  $\mu\text{m}$ );

- il posizionamento satellitare, che consente la determinazione della posizione tridimensionale di oggetti anche in movimento nello spazio e nel tempo su tutto il globo terrestre, in qualsiasi condizione meteorologica e in modo continuo;
- i sistemi informativi territoriali (SIT) o Geographic information systems (GIS), potenti insiemi di strumenti in grado di accogliere, memorizzare, richiamare, trasformare, rappresentare ed elaborare dati georiferiti; ad essi si associano i sistemi di supporto alle decisioni (DSS, Decision support systems), costituiti da sistemi informativi molto sofisticati, in grado di creare un certo numero di scenari evolutivi attraverso la modellazione della realtà e di offrire quindi a chi deve prendere decisioni la possibilità di scelta tra varie soluzioni possibili; i sistemi esperti, strumenti in grado di imitare i processi cognitivi compiuti dagli esperti e la loro abilità a gestire la complessità di una situazione reale mediante processi interdipendenti di astrazione,

generalizzazione e approssimazione; i web GIS, sistemi in rete per la divulgazione di dati geografici immagazzinati su macchine dedicate alla memorizzazione delle banche di dati, secondo architetture di rete anche molto complesse; l'ontologia, o specificazione di una concettualità, cioè la descrizione di concetti e relazioni che possono esistere per un elemento o tra elementi di un gruppo, o entità, o classe, dove la concettualizzazione è un'astratta visione semplificata del mondo che si desidera rappresentare per un certo scopo." (Rif.<http://geomatics.unipv.it/Home/cos-e-la-geomatica>)

In questo capitolo verranno presentate le diverse metodologie e tecniche utilizzate per il rilievo metrico 3D della basilica oggetto di studio, sia per la raccolta dei dati sul campo che per l'elaborazione di essi, in sito e in laboratorio. Oltre alle metodologie e tecniche utilizzate saranno presentati gli strumenti con cui le informazioni sono state rilevate, con la descrizione delle loro caratteristiche tecniche. Infine saranno presentati in modo breve i software utilizzati.

## *L'esperienza di rilievo metrico della basilica di San Nicola svolta dal team DIRECT*

A seguito del terremoto che ha colpito il centro Italia provocando ingenti danni al patrimonio edilizio, storico ed architettonico, è stato necessario un lavoro che coinvolgesse diverse figure e competenze professionali nell'ottica di ripensare e progettare la ricostruzione, ma soprattutto per preservare e tutelare il patrimonio architettonico religioso del territorio, come la basilica oggetto del mio studio.

L'architettura religiosa, nel processo di prevenzione, recupero e ricostruzione a seguito di eventi disastrosi come questo, non può essere trascurata.

Il Politecnico di Torino, nell'ottica della partecipazione a questo processo, ha portato supporto concreto creando un team di esperti multidisciplinare al fine di dare un contributo tecnico al processo di prevenzione e ricostruzione. Si è trattato di una Task force del Politecnico di Torino, che ha compreso al proprio interno specialisti di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, di Geofisica e di Geomatica.

Il gruppo di Geomatica ha a sua volta coinvolto il team studentesco DIRECT, la cui vocazione è proprio quella di collaborare nella fase di rilievo ed elaborazione dei dati in situazioni post emergenza.

## *Attività del TEAM DIRECT*



Direct è l'acronimo di Disaster REcovery Team e nasce nel 2011, per iniziativa dei Docenti del Politecnico di Torino e studenti, interessati all'approfondimento degli aspetti della geomatica legati alle tecniche avanzate di rilievo e, nello specifico, al rilievo per la gestione delle emergenze.

Il progetto ha come obiettivo quello di andare a costituire un gruppo di studenti e di formarli attraverso lezioni presso l'ateneo, tenute dai docenti/tutors che fanno parte del Team, e spedizioni, nei diversi luoghi colpiti da un evento catastrofico, nel campo del rilievo metrico 3D, del telerilevamento, nella predisposizione cartografica e nel WebGIS. La formazione avviene nelle diverse fasi del disaster management (DM), nell'analisi delle diverse vulnerabilità ambientali, nella risposta immediata alle emergenze, nel rilievo post disastro, passando attraverso la fase di Capacity Building (CB), ossia della formazione degli operatori all'intervento diretto. L'acquisizione e

l'elaborazione di tutti questi dati relativi al patrimonio costruito e non, sono volte in occasione delle emergenze ambientali (dovute sia a fenomeni naturali catastrofici, da eventi di natura antropica, che a crisi umanitarie), ad eventi naturali catastrofici, oppure a beni soggetti a emergenze anche ordinarie continue (Beni architettonici, archeologici, paesaggistici). Il Team ha anche come obiettivo, quello di contribuire alla tutela del territorio, del patrimonio edilizio e dei beni ambientali, architettonici e archeologici. Le attività proposte sono tutte svolte in forma volontaria da parte degli studenti che hanno un'occasione per cimentarsi in attività legate alla geomatica per il disastro ambientale, di prendere conoscenza di strumenti, software e operazioni non comuni nel mondo del lavoro odierno. Inoltre si ha la diffusione del valore etico-culturale della consapevolezza del patrimonio ambientale costruito, da salvaguardare e valorizzare.

La costruzione di un nucleo di "crisis mappers", ha sviluppato elevate competenze nelle situazioni di simulazione dell'emergenza, che può essere indirizzata verso le attività in contesti di reale emergenza, in cui il ruolo di docenti e studenti

volontari altamente specializzati, costituisce un valore aggiunto ancora non presente sul territorio nazionale.

### *Metodologie e Tecniche utilizzate*

I dati a disposizione per le elaborazioni successive derivano da una campagna di rilievo realizzata attraverso sistemi quali:

- Fotogrammetria digitale;
- Laser scanning;
- Posizionamento satellitare;
- Rilievo 3D con tecnologia SLAM;
- Voli indoor nella basilica di San Nicola.

La rete di inquadramento con sistema GPS/GNSS ha permesso di ottenere modelli geo-referenziati delle successive acquisizioni aerofotogrammetriche e laser scanner terrestri.

I metodi utilizzati sono stati in grado di garantire un'acquisizione completa della struttura, grazie anche all'elevato grado di integrazione tra di essi.

## *Il sistema GPS/GNSS*

Tale sistema si basa su un sistema di posizionamento satellitare, che è parte importante della Geomatica. Per sistema di posizionamento satellitare si intende:

“Il posizionamento tridimensionale di oggetti anche in movimento nello spazio e nel tempo, su tutto il globo terrestre, con qualsiasi condizione meteorologica e in modo continuo.” (A. Cina, dal GPS al GNSS per la Geomatica, Celid 2014)

Sono basati sulla ricezione di segnali in banda radio emessi da satelliti artificiali per le telecomunicazioni. Per poter effettuare la misura, l'operatore a terra deve essere munito di uno strumento dotato di antenna e ricevitore, accurato al punto da determinare le coordinate geometriche dei punti sulla superficie terrestre.

La posizione dei satelliti è nota a priori, le orbite sono riferite al sistema geometrico di riferimento WGS84, al ricevitore che fornisce un posizionamento tridimensionale. La posizione del punto viene determinata calcolando la distanza tra un certo numero di satelliti e il ricevitore.

I sistemi di satelliti presenti in orbita sono:

- Il sistema USA chiamato NAVSTAR GPS, NAVigation Satellite Timing And Rining Global Position System.
- Il sistema Russo, lanciato dall'ex URSS GLONASS, GLObal NAVigation System.
- Il sistema Cinese BeiDou o BDS.
- Il sistema Giapponese QZSS, Quasi- Zenith Satellite System.
- In ultimo vi è il sistema GALILEO che è Europeo. Esso a differenza dei precedenti è ancora sperimentale e quindi si è ancora un passo indietro rispetto alle altre potenze. Solo nel 2013 è stato lanciato un ultimo satellite che ha per la prima volta reso la costellazione già presente non più sperimentale ma effettiva avvicinandosi molto alle altre nazioni.

Vi sono inoltre dei satelliti dedicati all'Augmentation System e al Ground System.

La misura che deve essere rilevata è il tempo intercorso nel periodo che il segnale percorre la distanza fra il satellite e il ricevitore a terra. Essa avviene per via indiretta attraverso

misure ausiliarie connesse con le dinamiche di trasmissione del segnale da parte del satellite e di ricezione da parte del ricevitore. Il segnale viene quindi recepito dai ricevitori che lo replicano al loro interno. L'operazione avviene una volta acceso il ricevitore che immediatamente crea una replica, con il proprio oscillatore, simile al segnale appena ricevuto. Esso avrà un ritardo nella propagazione chiamato sfasamento di tempo, che è il tempo con cui raggiunge l'antenna. Il segnale GPS potrà essere utilizzato nelle due seguenti maniere:

- Misure di pseudo-distanza o di codice che consentono di ricavare la posizione in tempo reale.
- Misure di fase, o di sfasamento, sulle portanti L1 e L2 che necessitano di post elaborazione dei dati.

In tutte e due le misure, la grandezza critica è il segnale fra satellite e ricevitore. La precisione con cui si determina l'intervallo temporale è quella che condiziona l'accuratezza di posizionamento.

Esse possono essere determinate secondo una semplice relazione:

$$\delta S = t \cdot c$$

dove:

$\delta S$ : è la distanza ricevitore-satellite

t: tempo di propagazione (circa 0.07 sec)

c: velocità della luce nel vuoto

Inoltre vi è un errore fra l'orologio del satellite e quello del ricevitore che non coincidono. Vi sono errori di sincronismo rispetto ad una scala fondamentale di riferimento ben diverso.

Il sistema GPS viene impiegato in diversi settori, nel nostro caso, in ambito geodetico-topografico e in ambito terrestre, aereo e marittimo. Le coordinate di un punto possono essere misurate con i seguenti tipi di posizionamento:

- Assoluto: le coordinate sono determinate in un sistema di riferimento globale
- Relativo: in cui si determinano le componenti del vettore che unisce due punti. In questo modo si eliminano gli errori sistematici nelle due stazioni di rilevamento.

- Differenziale: si correggono le misure satellite-ricevitore ad una stazione di riferimento di cui si hanno le coordinate note.

I modi per rilevare il segnale si definiscono:

- Statica: si staziona su un punto per un certo periodo di tempo;
- Cinematica: se il ricevitore è in movimento.

Le modalità di misura della distanza fra satellite e ricevitore possono essere:

- di CODICE: sulla componente impulsiva del segnale;
- di FASE: sulla portante del segnale.

I posizionamenti quindi possono essere combinazione di questi tre gruppi di elementi:

- Assoluto con misure di codice: viene utilizzata la componente impulsiva C/A o P del segnale. La misura viene effettuata rilevando l'intervallo di tempo che intercorre tra la trasmissione del segnale da parte del satellite e la ricezione del ricevitore.

- Assoluto con misure di fase: la misura della distanza ricevitore- satellite viene in questo caso effettuata utilizzando le portanti sinusoidali L1 e L2 con diverse modalità;
- Statico relativo: è necessario operare in contemporanea con almeno due ricevitori fissi per tutto il tempo delle misure. Lo scopo è di misurare le componenti del vettore congiungente due punti A-B, o linea di base AB, su ciascuno dei quali è posizionato un ricevitore.
- Cinematico relativo: in alternativa al posizionamento statico, quello cinematico si effettua stazionando con un ricevitore in un punto e muovendo il secondo sul percorso di interesse rilevando i dati di misura ad ogni posizionamento.
- Differenziale GPS(DGPS): si usano almeno due ricevitori di cui uno è fisso (base) in una stazione base con coordinate note e il secondo posizionamento sul punto e il secondo posizionamento sul punto da rilevare (rover).

## *Rilievo RTK*

Una rete RTK (Real Time Kinematic) è una rete di stazioni GPS e/o GNSS permanenti i cui dati sono utilizzati per generare delle correzioni per un rover. Oggi le reti RTK operano in diversi Paesi, come Germania, Spagna, Inghilterra, Italia, Hong Kong, in alcune zone degli Stati Uniti e dell'Australia, ecc.

Il principio di funzionamento dell'RTK da singola stazione di riferimento si basa su due punti fondamentali:

- la stazione di riferimento è installata in un punto di coordinate note,
- le correzioni sono inviate al rover attraverso un mezzo di comunicazione (tipicamente un radio modem o una connessione GSM)

Nel collegamento fra la stazione e il rover vediamo come entrambi osservano gli stessi satelliti, i quali inviano la posizione e le osservazioni al ricevitore, il quale le elabora con le proprie per poter calcolare la posizione RTKN e aumenta quindi la precisione nel calcolo delle posizioni e viene quindi effettuato un lavoro migliore durante le elaborazioni.

## *Fotogrammetria*

Una delle definizioni di fotogrammetria è:

“La fotogrammetria è l’arte e la scienza per determinare la posizione e la forma degli oggetti a partire da immagini, con una procedura di restituzione. Le immagini possono essere di tipo analogico (stampa su carta) o digitali.” Dalle misure fotogrammetriche possiamo derivare:

1. coordinate numeriche di punti dell’oggetto in un sistema di riferimento tridimensionale;
2. cartografia plano-altimetrica, con punti quotati o curve di livello;
3. immagini metriche, ovvero fotografie “rettificate” (ortofotopiani) da cui derivare le “ortofotocarte”, ma anche immagini digitali.

La fotogrammetria attuale è definita “digitale” poiché si utilizzano immagini che vengono gestite tramite l’uso di computer. Le immagini da elaborare possono essere di tre tipi:

- diapositive, che sono opportunamente digitalizzate, mediante l'utilizzo di scanner fotogrammetrici;
- immagini di tipo matriciale (frame) con geometria prospettica centrale generata da camere digitali;
- sistemi digitali di scansione lineare (pushbroom) elettronici o ottico meccanici.

Nei primi due casi la gestione delle immagini avviene nel medesimo modo di quelle analogiche, anche se, per quello che riguarda l'orientamento dell'immagine, viene effettuato dal calcolatore.

Lo strumento di restituzione è il computer, che va a sostituire il restitutore fotogrammetrico analitico tradizionale. Se invece l'immagine risulta generata da sistemi digitali a scansione lineare, il problema della ricostruzione della geometria di presa passa attraverso l'adozione di tecniche proiettive dipendenti più complesse rispetto al caso della prospettiva centrale, unica per l'intera scena, la quale viene a mancare.

La strumentazione ottico-meccanica complessa (comparatore e stereoscopio) per l'orientamento dei

fotogrammi, nella fotografia analogica, viene raccolta in un calcolatore nella fotogrammetria digitale, che prende il nome di software di restituzione. Esso è in grado di individuare, o collimare, automaticamente marche fiduciali, punti pre-segnalizzati sull'immagine e punti omologhi, siano essi relativi a punti definiti dall'operatore o a punti individuati automaticamente dal programma in base a criteri di opportunità.

Il sistema fotogrammetrico può essere schematizzato in due fasi:

- unità di acquisizione: è il modulo operativo che si occupa dell'acquisizione dell'immagine e della sua rigorosa descrizione geometrica: ad ogni cella devono poter essere associate le coordinate del sistema fiduciale corrente, e gli errori sistematici. L'acquisizione risulta diretta se l'immagine risulta acquisita da una camera digitale; indiretta se l'immagine digitale deriva da una scansione di fotogrammi tradizionali.

- unità di restituzione: è il modulo operativo che si occupa dell'elaborazione fotogrammetrica del dato: orientamenti, triangolazione, restituzione, generazione DEM e ortoproiezioni.

Il fotogramma è una prospettiva centrale dell'oggetto; se il centro di presa, il punto oggetto e il punto immagine risultano allineati è possibile scrivere le equazioni di collinearità. Se vengono usate due prospettive centrali dello stesso punto oggetto è possibile ricostruire la posizione spaziale del punto stesso.

Tra il punto immagine e il centro di presa è necessario ricostruire sia la proiettività che l'assetto della presa; tali operazioni prendono il nome di orientamento interno ed esterno.

L'orientamento interno definisce la posizione del centro di proiezione rispetto al sistema fiduciale definito sul piano del fotogramma; è l'insieme dei parametri utili a definire la geometria interna della camera da presa, ovvero le

coordinate del punto principale nel sistema fiduciale e la distanza principale della camera.

L'orientamento esterno è l'insieme dei parametri utili alla definizione dell'assetto spaziale della camera (fotogramma e punto principale internamente orientati) rispetto ad un sistema di coordinate tridimensionale. Definisce la posizione spaziale di un corpo rigido (la camera) nello spazio; esso risulta definito da 6 parametri: tre traslazioni e tre rotazioni.

Note le coordinate dell'oggetto, definite come X Y Z, e noti i parametri orientamento interno ed esterno è possibile ricavare le coordinate immagine attraverso le equazioni di collinearità:

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$
$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Tali equazioni associano ad ogni punto oggetto X Y Z un punto immagine di coordinate  $\xi$   $\eta$ . A partire da queste

equazioni è possibile ricavare le inverse, per ricostruire le coordinate dell'oggetto attraverso le coordinate immagine e i parametri di orientamento:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

Ad ogni punto immagine possono corrispondere infiniti punti oggetto a meno di non “bloccare la Z”, ciò implica che a partire da un solo fotogramma non è possibile ricostruire l'oggetto tridimensionale.

Nella fotogrammetria digitale, invece, il dato è espresso in forma di immagine digitale, in cui il contenuto radiometrico è registrato con un numero. L'immagine viene divisa in elementi di dimensioni finite detti pixel, non ulteriormente divisibili e a ciascuno di essi viene associato un numero rappresentante la radiometria. Il pixel ha una posizione fissata a priori che non può variare nel tempo. Nelle

immagini a colori (RGB) ogni colore viene visto come somma di tre bande corrispondenti ai colori principali; ciascuna banda ha 256 tonalità.

Le dimensioni del pixel di un'immagine digitale sono di solito indicate come densità di campionamento (risoluzione), ovvero il numero di pixel contenuti in una opportuna lunghezza, di solito indicata come DPI. I pixel generalmente sono quadrati, quindi un'immagine ha la medesima risoluzione in entrambe le direzioni. (*Rif. dispense professor A. Cina*)

La rivoluzione degli ultimi anni è stata la possibilità di eseguire tutte le fasi di orientamento fotogrammetrico ed il calcolo automatico di un modello denso di punti tramite le cosiddette tecniche di **SFM** (*Structure From Motion*).

I software di fotogrammetria digitale integrano oggi algoritmi e processi derivanti da altre discipline, in particolare dalla computer vision, di cui sfrutta i sistemi di Structure-from-motion (Sfm) che permettono di stimare la posizione 3D di punti rappresentati in molteplici immagini, ricostruendo la

geometria dell'oggetto rappresentato (structure) e la posizione delle prese (motion) anche quando non si è in possesso di definiti parametri di calibrazione della camera (coordinate del centro di proiezione, distanza principale, curve di distorsione dell'obiettivo con la precisione di pochi micron).

Le tecniche SFM necessitano l'acquisizione di un elevato numero di immagini stereoscopiche e con ricoprimenti elevati (80-90%).

Una volta acquisite queste immagini, viene effettuato l'orientamento dei fotogrammi (sia interno che esterno); poi procede con la stima della possibilità di ricreare un modello di punti denso a partire dai fotogrammi orientati nello spazio. La fase finale di tale processo è il calcolo del modello di punti denso dell'oggetto ripreso.

Negli ultimi anni le procedure di intelligenza artificiale, per la simulazione di processi logici che prima erano svolti esclusivamente dall'operatore, hanno permesso l'automatizzazione di alcune fasi del processo

fotogrammetrico, per esempio la fase di orientamento e restituzione.

Eccone alcune:

- feature extraction e image matching: sono algoritmi di auto-correlazione che permettono di riconoscere nelle immagini digitali forme prestabilite tramite operazioni statistiche di confronto;
- operatori di interesse: questi consentono di identificare i punti dei quali sia facile trovarne l'omologo su un'immagine diversa da quella originaria.
- ricampionamento: consente di trasformare immagini digitali , questo algoritmo viene usato per produrre ortofoto e raddrizzamenti digitali.

Per estrarre punti di legame (tie-points), ovvero punti corrispondenti ricercati su più immagini, attraverso le tecniche di autocorrelazione, la corrispondenza automatica avviene tramite il confronto dei toni radiometrici dei pixel nell'intorno dei punti. Di solito vengono considerate aree quadrate, dette "finestre di correlazione".

La corrispondenza viene effettuata valutando il grado di similarità fra le finestre di correlazione, tenendo in conto che punti omologhi devono avere finestre di correlazione identiche per quanto riguarda i toni radiometrici.

Fatto il calcolo di correlazione vengono filtrati eventuali errori accidentali.

Nella fotogrammetria tradizionale, come già prima precisato, per la stima della posizione nello spazio di un punto visibile da almeno due fotogrammi attraverso la triangolazione fotogrammetrica, si adoperano le equazioni di collinearità; una volta noti i parametri di orientamento interno ed esterno delle immagini.

Nei processi SFM si usano le regole della geometria epipolare, che regola le relazioni fra i TP (tie points), i centri di presa e la posizione 3D del punto, per orientare le prese e stimarne gli orientamenti interni ed esterni. Vengono, in sostanza, usate svariate regole proiettive per ricostruire automaticamente migliaia di intersezioni nello spazio che danno origine al modello denso.

Con tale tecnica è possibile derivare modelli di superficie e ortofoto.

## *La fotogrammetria UAV*

Secondo la definizione di Van Blyenburgh del 1999 gli UAV sono “veicoli aerei motorizzati disabilitati e riutilizzabili”, ovvero veicoli che non hanno bisogno di un pilota, ma sono radiocomandati a terra e che possono essere usati più volte e per molteplici scopi. Questi veicoli sono controllati a distanza, semi autonomi, autonomi o entrambi.

La differenza è semplicemente la presenza fisica di un pilota a bordo o no, all'interno del veicolo aereo. Il termine UAV è comunemente usato in campo informatico, robotico e nell'intelligenza artificiale, dei campi della fotogrammetria e telerilevamento.

La piattaforma è dotata di un sistema di misurazione fotogrammetrica, di piccole o medie dimensioni, video o video camera, termica o sistemi di telecamere a raggi infrarossi, in volo sistemi LIDAR, o una loro combinazione. Attualmente gli UAV permettono la registrazione e l'inseguimento della posizione e l'orientamento dei sensori implementati in un sistema locale o globale di coordinate.

Quindi la fotogrammetria UAV può essere intesa come un nuovo strumento di misurazione fotogrammetrica, apre varie e nuove applicazioni, combinando fotogrammetria aerea e terrestre.

I principali vantaggi degli UAV, rispetto ai sistemi aeromobili con equipaggio, sono che essi possono essere utilizzati in situazioni di alto rischio, senza mettere in pericolo la vita umana e coprire aree inaccessibili, a bassa quota e in profili di volo vicino ad oggetti dove sistemi con equipaggio a bordo non riescono a raggiungere. Questi luoghi inaccessibili possono essere aree colpite da un disastro naturale, per esempio zone di montagna e vulcaniche, pianure alluvionali, desertiche e scene di incidenti. Nelle aree di difficile accesso in cui non sono disponibili aeromobili con equipaggio o addirittura non viene dato il permesso di volo, gli UAV sono l'unica alternativa possibile, quando la distanza dell'oggetto permette di volare sotto le nuvole. Un vantaggio fondamentale nell'utilizzare gli UAV è che su essi non gravano spese derivanti da un pilota al suo interno. Inoltre, i vantaggi supplementari sono la capacità e la possibilità di

acquisire i dati in modo rapido, di eseguire operazioni in tempo reale, come la trasmissione dei dati di immagine, video e di orientamento in tempo reale alla stazione di controllo a terra. Vantaggioso è anche il fattore legato al costo del mezzo, ma non solo, vi sono anche minori spese di gestione, come quelle legate ai ricambi e alla manutenzione. I costi inoltre possono variare a seconda delle nostre esigenze e a seconda dell'uso che intendiamo farne, succede però molto spesso, che il mezzo UAV sia utilizzato come alternativa nelle grosse missioni per il costo eccessivo dell'equipaggio. Così, gli UAV possono essere visti come supplemento o sostituzione alla fotogrammetria terrestre in una certa area di applicazioni. Nel caso della combinazione di fotogrammetria terrestre e UAV, è anche possibile utilizzare lo stesso sistema di camere aventi la stessa distanza dall'oggetto, che semplifica il trattamento combinato. Oltre a questi vantaggi, le immagini possono essere utilizzate anche per la mappatura ad alta risoluzione su DSM esistenti e modelli 3D, nonché per un'immagine rettificata. Mosaici di immagini, mappe e disegni, possono

essere utilizzati per l'interpretazione dell'immagine. L'implementazione dei sistemi GPS/INS nonché le unità di stabilizzazione e di navigazione consentono voli precisi, garantendo, da un lato, la copertura dell'immagine sufficiente per la sovrapposizione e dall'altro, permettendo all'utente di valutare la precisione del prodotto atteso.

L'UAV non può reagire come gli esseri umani in situazioni inattese, per esempio la comparsa di un ostacolo. I droni a basso costo non sono dotati di apparecchiature di comunicazione del traffico aereo e sistemi anticollisione, come aeromobili con equipaggio. L'autonomia di volo dei droni a basso costo è dettata dal tipo di batteria utilizzato e dalle sue dimensioni, questo sarà minore vista l'impossibilità di caricare elevati pesi su questi. L'autonomia della batteria determina quindi anche il piano di volo e la durata del progetto pianificato per l'acquisizione delle immagini.

## *Laser Scanner*

I sistemi a scansione laser rappresentano la nuova generazione di strumenti di misura, che consentono di acquisire in tempi brevi la posizione di un gran numero di punti.

E' una tecnica di "telerilevamento" che permette di determinare la distanza  $d$  da un oggetto con un impulso laser. Se le direzioni individuate tramite angoli orizzontali  $\theta$  e verticali  $\phi$  del fascio laser sono misurabili, le coordinate XYZ sono deducibili da quelle sferiche, in quanto è determinata anche la distanza per ogni punto:

$$X = d \cdot \sin\phi \cdot \cos\theta$$

$$Y = d \cdot \sin\phi \cdot \sin\theta$$

$$Z = d \cdot \cos\phi$$

Le coordinate  $x, y, z$ , sono riferite al sistema locale che ha origine nel centro della strumentazione. Per tale motivo, risulta indispensabile integrare la tecnica LIDAR con il rilievo topografico in modo da riferire i dati provenienti dal laser con il sistema di riferimento locale o globale.

Il rilievo lidar, a differenza di quello attraverso la stazione totale, è una procedura non intelligente, dove si fa in modo che tutto l'oggetto sia acquisito; infatti questa tecnologia opera un ribaltamento della sequenza logico – operativa solita. Nel rilievo topografico o fotogrammetrico, prima di procedere con la misura è necessario decidere i punti da rilevare. Con la strumentazione laser scanner, invece, si procede con l'acquisizione di una gran quantità d'informazioni metriche e solo dopo in fase di processamento dei dati si individua l'insieme significativo.

Il risultato prodotto è una nuvola di punti di coordinate XYZ, in un sistema di riferimento strumentale, senza operare alcuna scelta.

L'intelligenza di tale rilievo è a posteriori, per formare un rilievo metrico ed estrarre "primitive geometriche" per una modellazione solida.

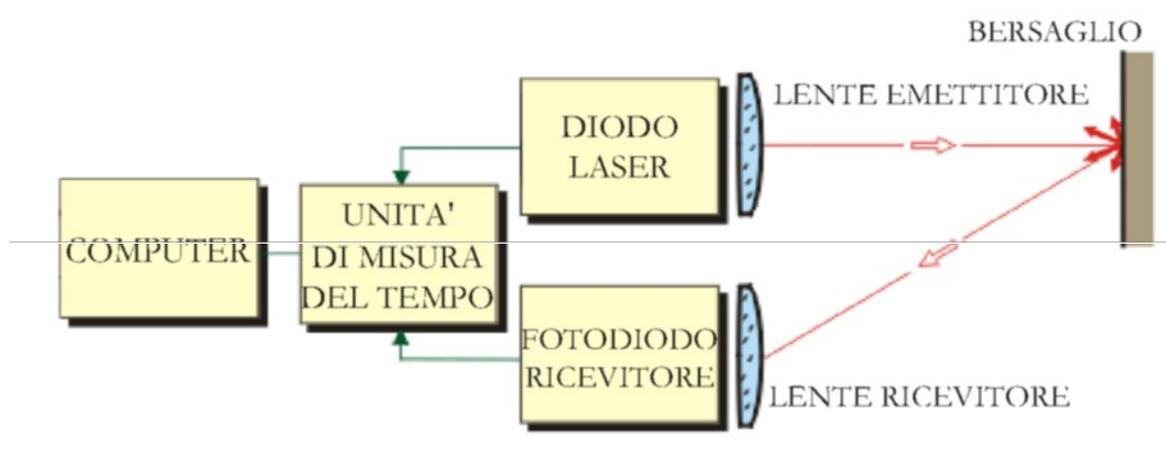
La tecnica laser scanning, detta anche LIDAR (light detection and ranging) ha campi d'applicazione molto ampi, dai rilievi a

scala architettonica ai rilievi territoriali fino all'acquisizione di elementi di ridotte dimensioni.

Nel Lidar si determina la distanza di un oggetto o di una superficie usando impulsi laser. Esso opera nel campo delle radio onde, la distanza di un oggetto è determinata misurando l'intervallo di tempo tra la trasmissione di un impulso e la ricezione del segnale riflesso.

Le lunghezze d'onda usate sono dell'ordine di grandezza del particolato in sospensione nell'atmosfera, questo crea sensibilità al vapor d'acqua, aerosol, polveri.

E' possibile scegliere una lunghezza d'onda adatta per le varie situazioni. In generale si ha che  $300\text{nm} < \lambda < 1600\text{ nm}$ .



**Fig.** Funzionamento del laser scanner (Rif. Dispense di A. Cina)

Nello specifico, il principio su cui si basa questa tecnologia è il tempo di volo (TOF time of flight) di un impulso laser monocromatico. L'impulso elettrico prodotto dal generatore, collimato da un diodo laser trasmittente, crea un raggio di luce infrarossa; il segnale degli eco riflessi dall'oggetto colpito (di differente intensità in base alla riflettanza di quest'ultimo) viene captato da un fotodiodo ricevitore che genera un segnale elettrico di ricezione. Il tempo di volo, ossia l'intervallo di tempo che intercorre tra l'impulso trasmesso e l'impulso ricevuto, calcolato tramite un orologio con una frequenza stabilizzata al quarzo, consente di individuare la distanza d'ogni singolo punto rilevato. Al calcolo del tempo di volo è associato anche una misurazione angolare di precisione data dalla rotazione di due specchi rotanti attorno agli assi y e z (l'asse y è associato alla distanza e la z è la verticale). La rotazione dello specchio, in funzione della risoluzione angolare impostata dall'operatore per la scansione, crea la spaziatura tra i differenti punti rilevati sul target e genera la nuvola di punti rilevando l'oggetto indagato.

La precisione della misura della distanza dipende dal rapporto segnale rumore S/N, a sua volta dipendente dall'energia riflessa e dai disturbi:

$$\sigma_d = 1/\sqrt{(S/N)}$$

- Distanza massima 1000 - 6000 m.
- Precisione della misura 1 - 6 cm.

Questo strumento è in grado di acquisire nuvole di milioni di punti, automaticamente, pre-impostando i limiti della scansione; in tempo reale e con elevata densità.

Alcuni laser sono dotati di software per la registrazione delle scansioni mediante riconoscimento automatico di segnali ad alta riflettività o di forma nota.

Inoltre i laser scanner possono essere dotati di un sensore RGB interno che associa ad ogni punto acquisito, la radiometria rilevata sull'area di impatto del raggio di misura.

### *Progetto del rilievo con Lidar*

Il maggior problema è la copertura dell'oggetto e la possibilità di riferire le scansioni ad un unico sistema di riferimento. Occorre

tener conto delle tecniche di rototraslazione delle singole scansioni in un unico sistema di riferimento, processo definito “registrazione”.

Per fare ciò è opportuno prevedere ricoprimenti di circa il 30% per ritrovare punti comuni a 2 scansioni. Questi punti comuni sono utili per il calcolo dei parametri di rototraslazione al fine di allineare le scansioni. Importante è non solo la presenza di tali punti, ma anche la qualità della loro geometria, che migliora quanto più essi non risultano allineati.

Le scansioni laser sono affette da rumore e da errori di acquisizione (outliers e gross errors) che è necessario eliminare attraverso un apposito filtro. La presenza di rumore è principalmente legata alla divergenza del raggio laser.

Oggetti complessi, come quello oggetto di studio, possono richiedere varie scansioni parziali da terra, spostando lo strumento.

Il sistema di riferimento strumentale è fisso e il cambiamento della stazione implica che le nuvole di punti siano riferite a sistemi diversi ed indipendenti da quelli precedenti. La

registrazione consiste nel determinare i parametri d'orientamento delle singole scansioni per esprimerle in un sistema unico.

Individuando un numero sufficiente di punti comuni a due scansioni adiacenti è possibile determinare i parametri della rototraslazione spaziale che trasforma i punti della seconda scansione nel sistema di riferimento della prima.

La registrazione tra due scansioni presuppone che siano stati identificati un certo numero di punti corrispondenti o “omologhi”; questa corrispondenza può avvenire con procedimento:

- manuale: da ricercare in base alla forma locale della superficie,
- automatico: presuppone che i punti siano segnalati con dei marker ( o target) posizionati appositamente sull'oggetto.

La dimensione dei marker deve essere calcolata in funzione della risoluzione angolare imposta per la scansione, della distanza che intercorre tra l'oggetto ed il sensore laser e della divergenza del raggio laser.

La posizione relativa e la distribuzione dei marker deve essere tale da non incorrere in situazioni singolari (ovvero devono essere sufficientemente distanziati tra loro in modo da non essere allineati).

Da due scansioni adiacenti devono essere visibili almeno 3 punti in comune, condizione necessaria e sufficiente affinché sia possibile stimare i parametri di registrazione di una scansione secondo il sistema di riferimento dell'altra.

Il rilievo automatico dei marker avviene tramite le seguenti fasi:

- dal file originale vengono selezionati tutti i punti che presentano un valore di riflettività elevato. Tali punti vengono "clusterizzati" in modo da individuare i soli marker;
- le coordinate spaziali del marker vengono calcolate mediante la media pesata in funzione della riflettività dei valori delle tre coordinate di tutti i punti selezionati ed individuati come appartenenti ad un unico marker;
- alcuni marker possono essere realizzati come oggetti 3D.

Come già detto, la registrazione di due scansioni adiacenti avviene mediante una rototraslazione spaziale; occorre dunque stimare i sei parametri (tre traslazioni  $T_x$   $T_y$  e  $T_z$  e tre rotazioni  $\omega$   $\phi$  e  $K$ ) che consentono di trasformare le coordinate dei punti della seconda scansione nel sistema di riferimento della prima.

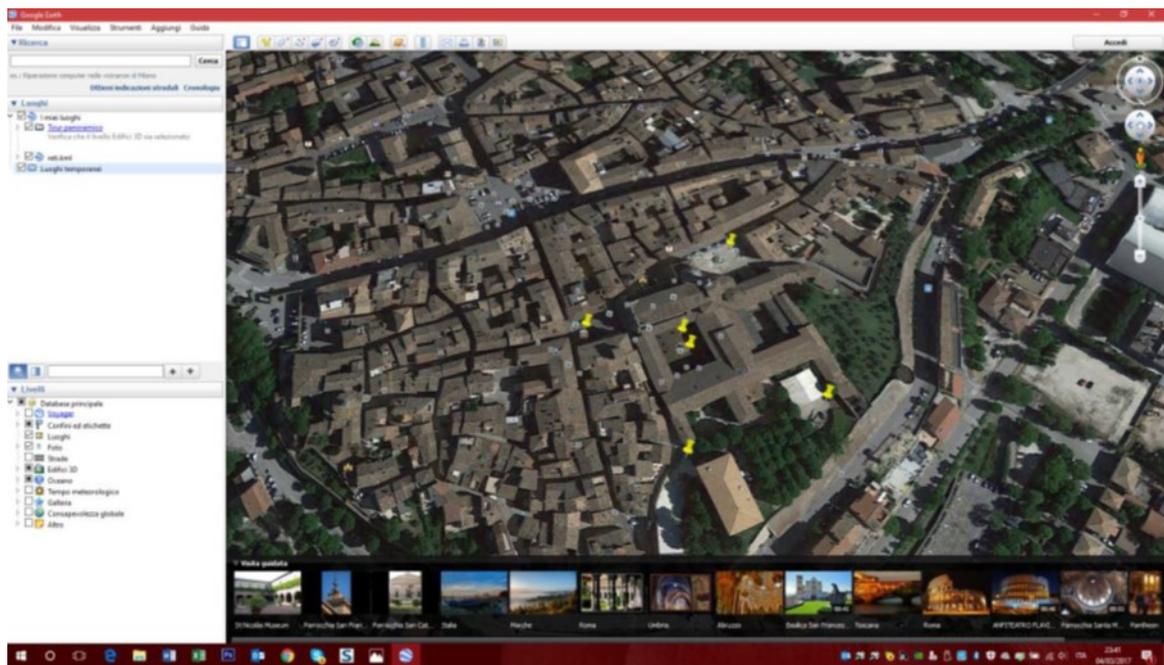
$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} + R(\omega, \phi, K) \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}$$

*(Rif. Dispense di A. Cina)*

### ***Rilievo 3D del caso studio: S. Nicola a Tolentino***

Il primo aspetto affrontato è stato la realizzazione della rete topografica di inquadramento. L'obiettivo è avere una documentazione completa tra interno ed esterno per consentire il riferimento reciproco di tutte le acquisizioni del rilievo 3D e per georeferenziare tutti i prodotti derivati. E' stato seguito un approccio misto che ha previsto la realizzazione di una rete d'inquadramento con tecnica GPS/GNSS nella parte esterna al complesso, mentre nella parte interna è stato eseguito un raffittimento topografico con vertici misurati tramite tecnica classica (Stazione Totale). *(Rif. Rilievo 3D e monitoraggio strutturale per l'analisi post-sisma del complesso di S. Nicola a Tolentino (MC) di Daniele Costanzo, Filiberto Chiabrando, Renato Lancellotta, Andrea Lingua, Donato Sabia, Antonia Spanò)*

Sono stati utilizzati 6 vertici collocati attorno alla basilica ed al complesso del convento e del chiostro.



*Fig. Visualizzazione dei vertici della rete attraverso Google earth*

## **Calcolo della rete**

*Coordinate nel sistema UTM/WGS84:*

*est          nord          quota*

T100: 360706,778 4785343,578 225,402

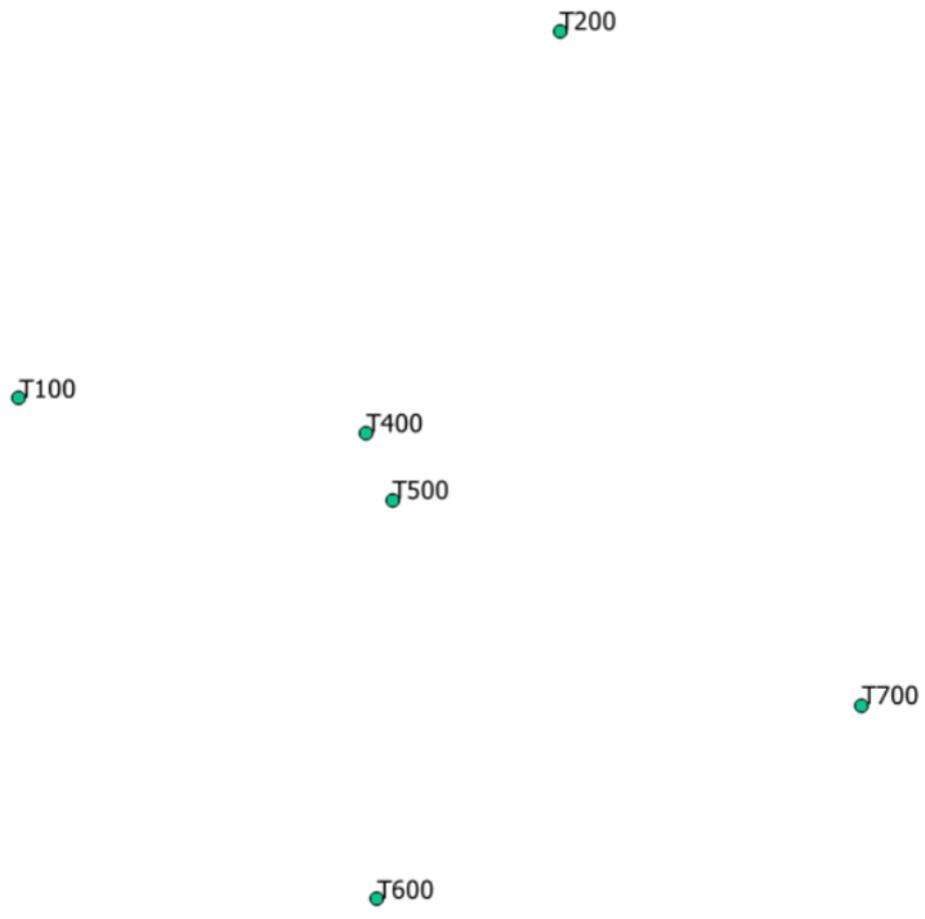
T200: 360780,803 4785394,313 225,480

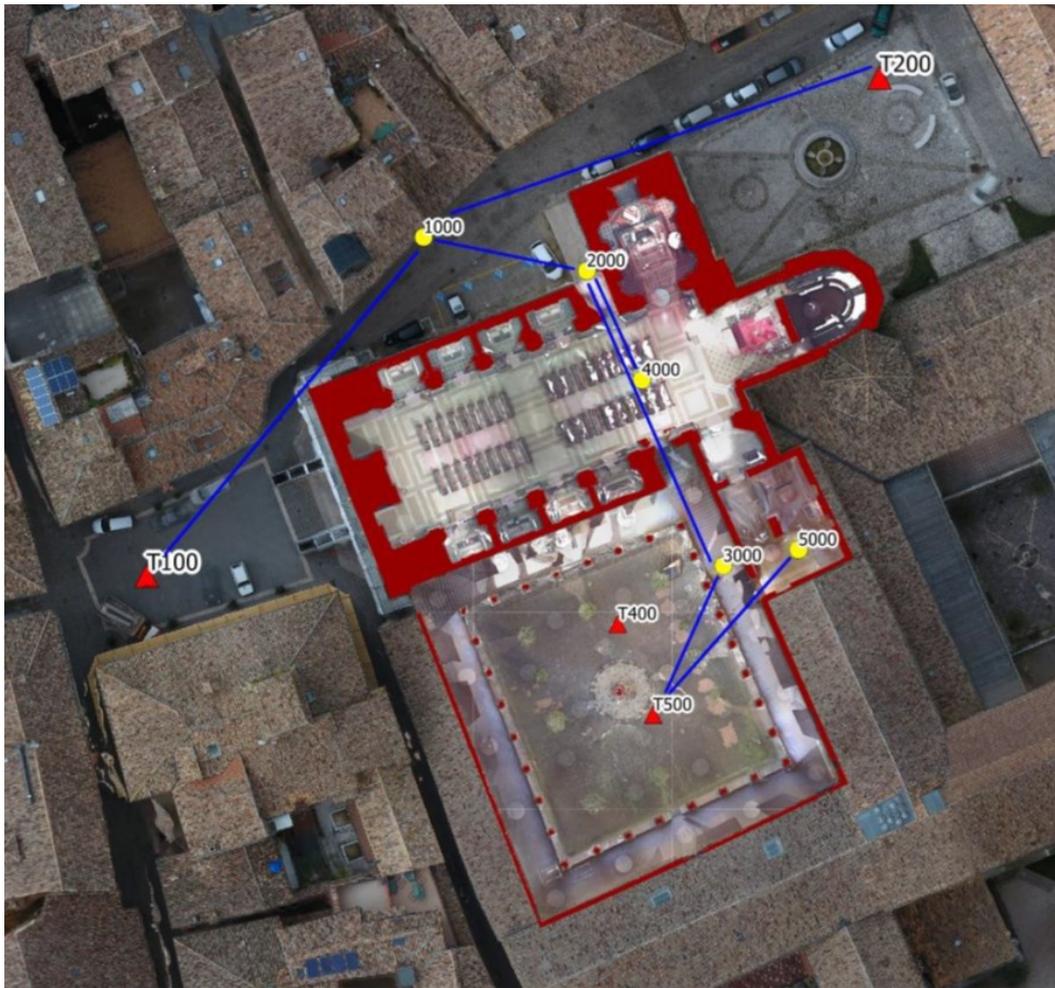
T400: 360754,327 4785338,833 225,310

T500: 360757,888 4785329,610 225,265

T600: 360755,830 4785274,476 221,976

T700: 360822,241 4785301,297 223,427





**Fig.** Collegamento tra rete d'inquadratura esterna e rete di vertici interna al complesso. (Rif. Rilievo 3D e monitoraggio strutturale per l'analisi post-sisma del complesso di S. Nicola a Tolentino (MC) di Daniele Costanzo, Filiberto Chiabrando, Renato Lancellotta, Andrea Lingua , Donato Sabia, Antonia Spanò)

### **Fotogrammetria UAV**

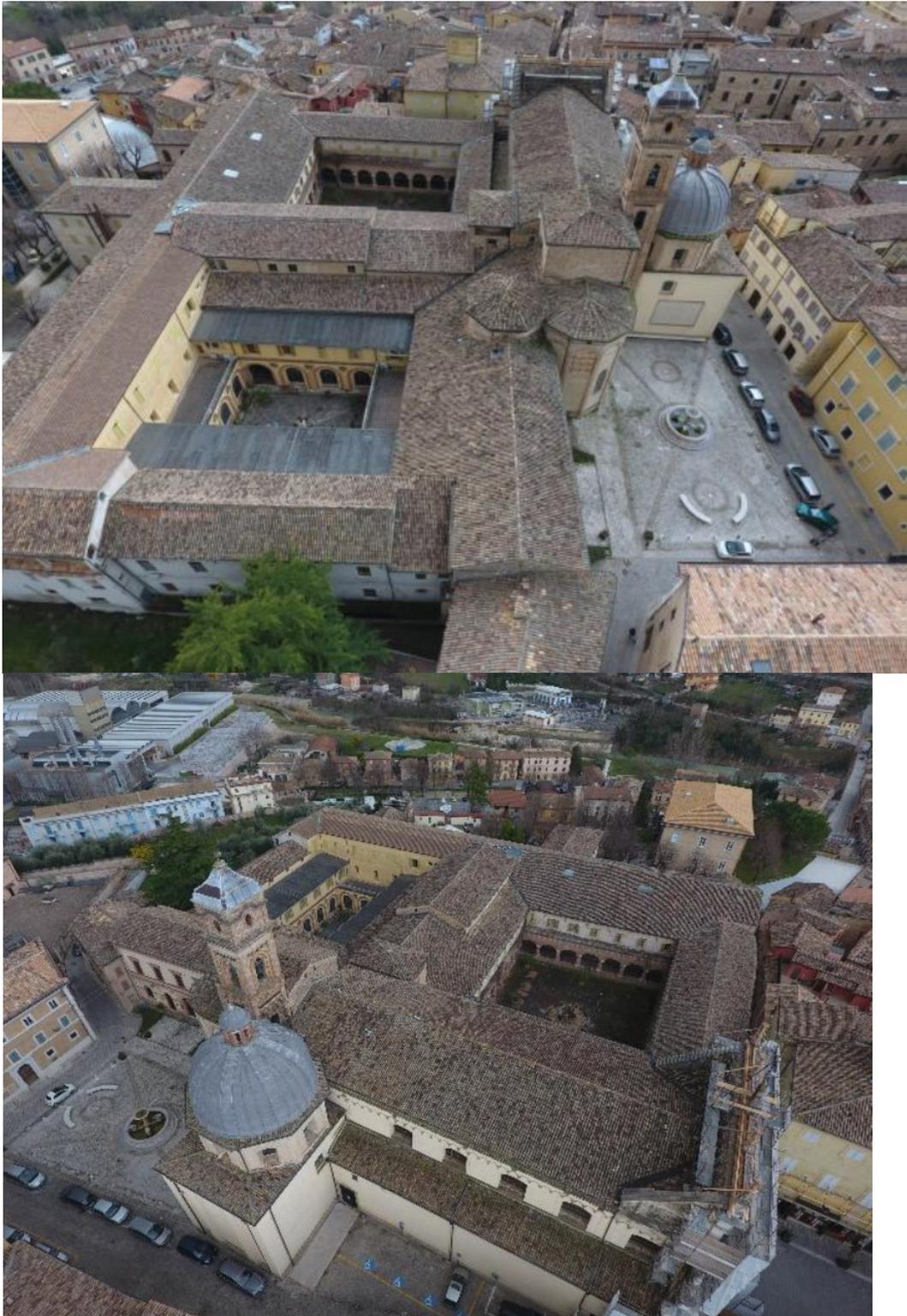
Tali sistemi sono stati adoperati per la prima fase di acquisizione di dati di dettaglio.

Per l'acquisizione dei dati all'esterno della basilica è stato usato un drone commerciale a basso costo, DJI Phantom 4PRO.

Gli schemi di volo utilizzati sono quelli riconosciuti come più efficaci in presenza di patrimonio costruito; prevedono oltre all'acquisizione di immagini nadirali (asse della camera perpendicolare al terreno) anche l'utilizzo di immagini acquisite con l'asse di presa inclinato a circa  $45^\circ$  rispetto al terreno. Tale scelta, di recente introduzione nel campo della fotogrammetria aerea, ha permesso di ottenere informazioni per la ricostruzione degli alzati dell'edificio. Sono state prodotte 440 immagini, di cui 256 nadirali e 184 inclinate.

I ricoprimenti longitudinali e trasversali progettati sono stati elevati (>70%) poiché dovevano risultare adeguati per l'impiego del processo SFM, discusso nel precedente capitolo, di comune utilizzo per elaborazioni fotogrammetriche. Tramite acquisizioni fotografiche effettuate per mezzo di UAV è stata possibile la ricostruzione del modello tridimensionale del corpo di fabbrica nel suo contesto, in scala.





*Fig. Alcune immagini del volo (Rif. Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)*



*Fig. Nuvola di punti ricavata grazie al processo fotogrammetrico dai dati acquisiti (Rif. Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)*

In sintesi ecco i passaggi principali di acquisizione ed elaborazione dei dati:

- Acquisizione scatti nadirali e inclinati;
- Allineamento delle prese;
- Inserimento delle coordinate note dei marker;
- Controllo risultati degli errori, del numero di fotogrammi allineati, verifica rispondenza del GSD a quanto stabilito in fase di pianificazione.

Le fotografie sono state opportunamente processate mediante algoritmi informatici. Questo processo può essere realizzato attraverso software differenti a seconda della finalità del lavoro. In questo studio sono stati utilizzati i software Pix4d e Agisoft Photoscan Professional.

La georeferenziazione degli scatti e il loro orientamento è avvenuta attraverso l'inserimento delle coordinate note dei markers precedentemente misurate e calcolate.

Per il calcolo delle coordinate dei markers si è creata una rete tramite i 6 vertici di coordinate note mediante acquisizione statica. Una volta disposti marker a terra (i marker sono stati posizionati in punti naturali facilmente riconoscibili), per ogni marker o vertice aereo della rete è stata realizzata l'opportuna monografia.

Le coordinate dei markers sono state acquisite tramite rilievo RTK in modo cinematico, per le aree esterne e tramite rilievo topografico (stazione totale) all'interno della chiesa. Le coordinate acquisite sono state corrette per mezzo dei dati acquisiti dalla rete di stazioni permanenti.

Gli elaborati ottenuti sono stati molteplici: sono state prodotte ortofoto, DTM e DSM ad elevato dettaglio oltre alla mesh tridimensionale texturizzata e alla nuvola di punti (DENSE CLOUD). Da tali dati è stato possibile ricavare sezioni territoriali e curve di livello del terreno.



**Fig.** Dense cloude di una porzione esterna della basilica (Rif. Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)



*Fig. Dense Cloude (Rif. book del Workshop “Fotogrammetria digitale e scansioni 3d per il rilievo di beni culturali”)*

*Alcuni dati tecnici*

Shooting date: 24/02/2017

Processed: 05/04/2017

Camera Model Name: FC330\_3.6\_4000x3000(RGB)

Sensor Dimensions: 6.317 [mm] x 4.738 [mm]

Area covered: 0.2589 km<sup>2</sup>/25.891ha

Dataset: 440 of 440 images calibrated

Georeferencing: yes, 33GCPs. mean RMS error = 0.036m

Average Ground Sampling Distance (GSD): 2.16cm/0.85in

Il GSD è la distanza tra il centro di due pixel consecutivi. Esiste una proporzionalità inversa tra il GSD e la definizione di un'immagine: quanto più grande è tanto minore è il livello di dettaglio. Dipende dalla quota di volo e dalle caratteristiche della fotocamera, dall'obiettivo e dal grado di dettaglio richiesto.

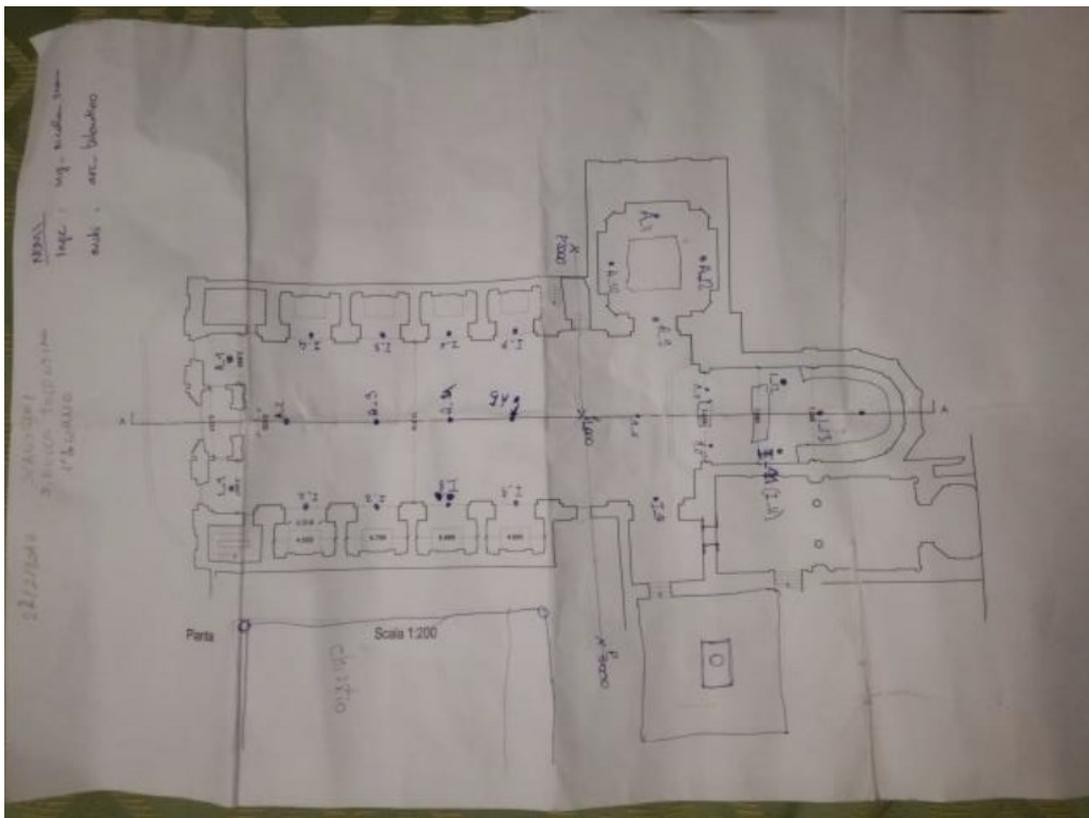
“Tale valore deve mantenersi costante per tutto il volo, quindi l'altezza di volo deve essere costante. Quando, come in questo caso, si hanno voli automatici, si possono avere GSD molto diversi tra loro, l'unione dei dati provenienti da fotogrammi zenitali e obliqui per settori a quota/distanza costante dall'oggetto consente di ottenere un GSD costante e un modello a scala uniforme.” (Rif. <http://www.ingegneri.info>)

Il parametro RMS è l'errore medio di collimazione di tutti i fotogrammi. Il valore ottenuto, circa 3,6 cm, è ottimo tenendo conto che si tratta di un modello in scala reale.

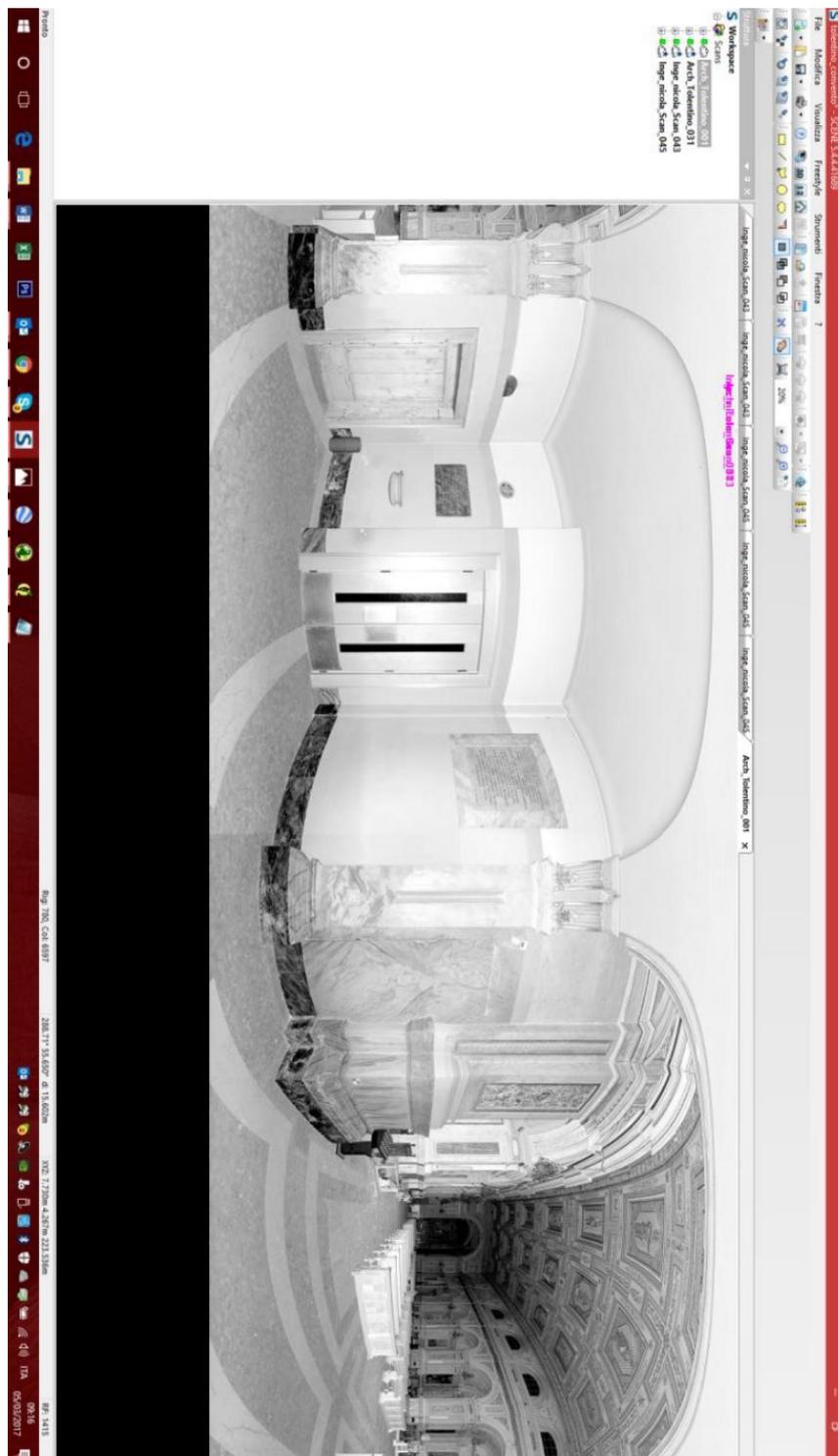
## LIDAR

Per quanto riguarda la fase successiva di acquisizione terrestre, dei dati all'interno della basilica è stato utilizzato il Laser Scanner *Focus 3D Faro*, ad elevata risoluzione.

Sono state eseguite 25 scansioni nell'interno della basilica, con appoggio topografico utile alla loro registrazione, per realizzare un modello tridimensionale denso e con texture controllate metricamente.



**Fig.** Posizioni di presa del laser (Rif. gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)



**Fig.** Esempio di Scansione in bianco e nero (Rif. gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)

Sono stati derivati elaborati 3D e 2D di elevato dettaglio e precisione, in scala 1:50 e superiore.

### *Elaborazione e gestione dei dati laser*

Le scansioni di rilievo lidar sono state trattate con il software Faro SCENE che ha permesso di registrare le osservazioni in un unico sistema di riferimento. Questo programma è in grado di elaborare e gestire le scansioni laser con efficienza e semplicità grazie alle funzionalità automatiche di riconoscimento degli oggetti, registrazione e posizionamento delle scansioni. Il software fornisce strumenti per il posizionamento automatico delle nuvole di punti, anche in assenza di target; è molto intuitivo e genera dati di alta qualità con elevata rapidità ed efficienza. Il primo passo è stato quello di importare all'interno del software tutte le scansioni per procedere poi alla fase di colorazione applicando le immagini acquisite dal laser scanner. Una volta acquisiti i dati di rilievo, si procede alla registrazione in laboratorio. La registrazione delle nuvole è un processo

fondamentale per poter allineare e georeferenziare quest'ultime secondo lo stesso sistema di riferimento.

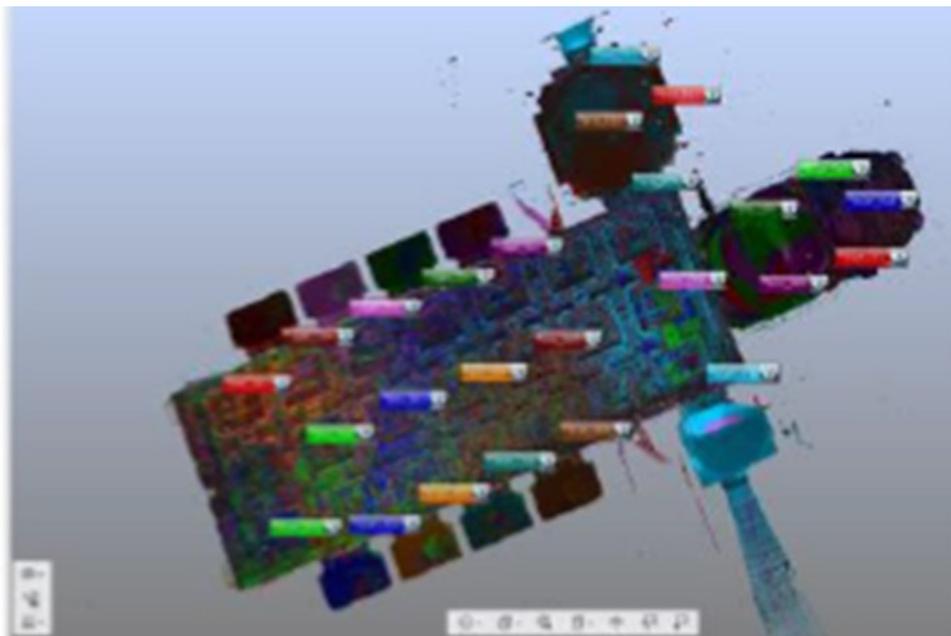
Il programma è in grado di allineare le scansioni attraverso diverse modalità:

- tramite algoritmi di surface matching: in particolare viene adottato l'algoritmo Iterative Closest Point in grado di allineare automaticamente le parti comuni di scansioni adiacenti attraverso la minimizzazione delle distanze tra esse (allineamento per forma);
- tramite l'acquisizione di determinati punti di controllo, denominati target, che rappresentano i riferimenti spaziali utili all'allineamento delle scansioni (allineamento per target).

Nel nostro caso la registrazione è stata eseguita in prima battuta per forma, poi attraverso l'ausilio di punti target, isolati, di cui erano note le coordinate poiché erano stati precedentemente misurati mediante stazione totale e raccolti in un file Excel. Sono stati necessari almeno 3 punti doppi per ciascuna scansione, affinché il programma riuscisse ad individuare i punti comuni tra le diverse scansioni, potendole

così allineare nello stesso sistema di riferimento. Per procedere, all'interno di SCENE alla collimazione dei target, è stato usato il comando Mark Checkerboard Target: operazione che prevede l'individuazione dei target assegnando a ciascuno una precisa nomenclatura.

In seguito, la registrazione delle scansioni viene ultimata attraverso il comando colloca scansioni automaticamente, sviluppando una nuvola di punti allineata e georiferita.

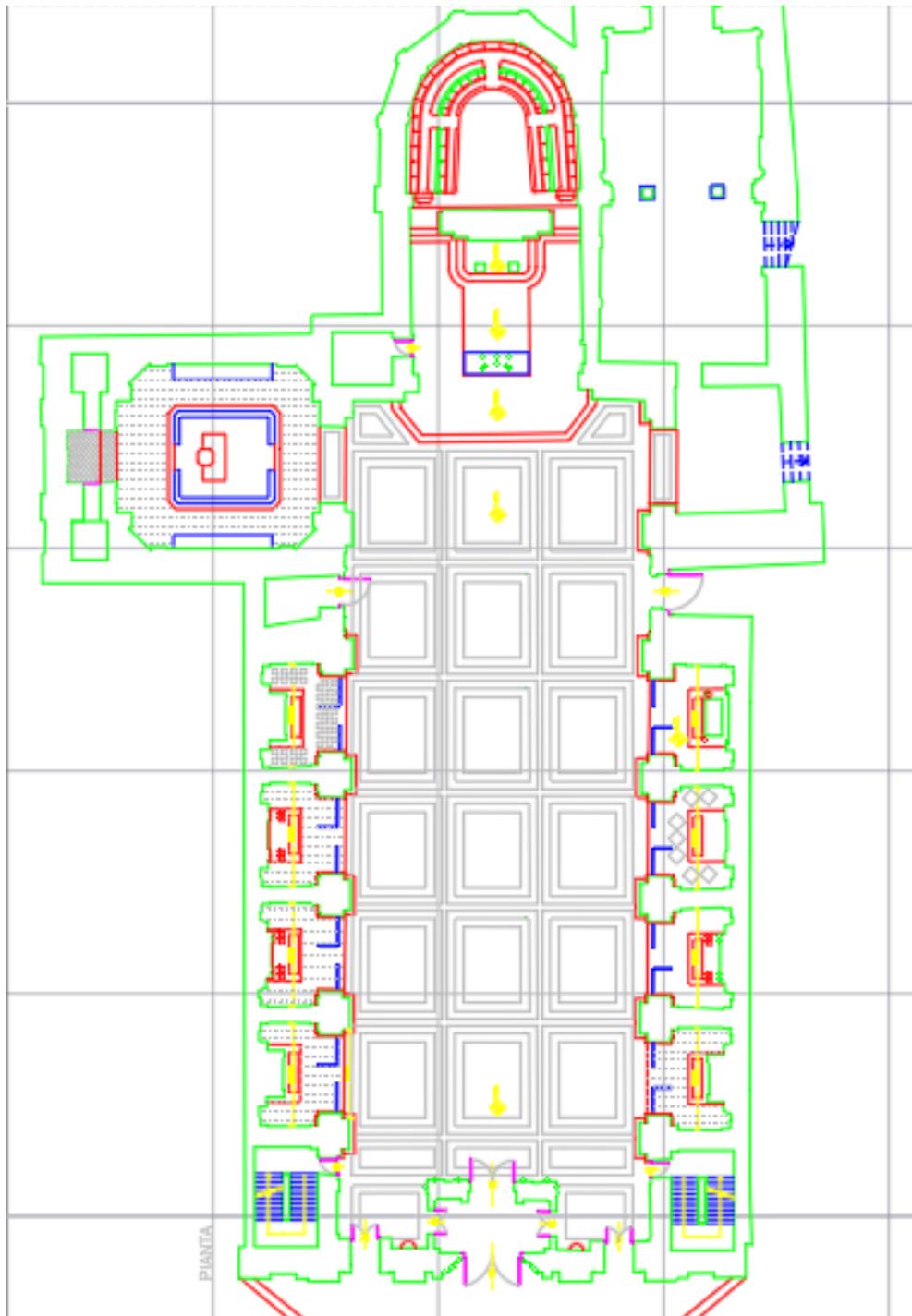


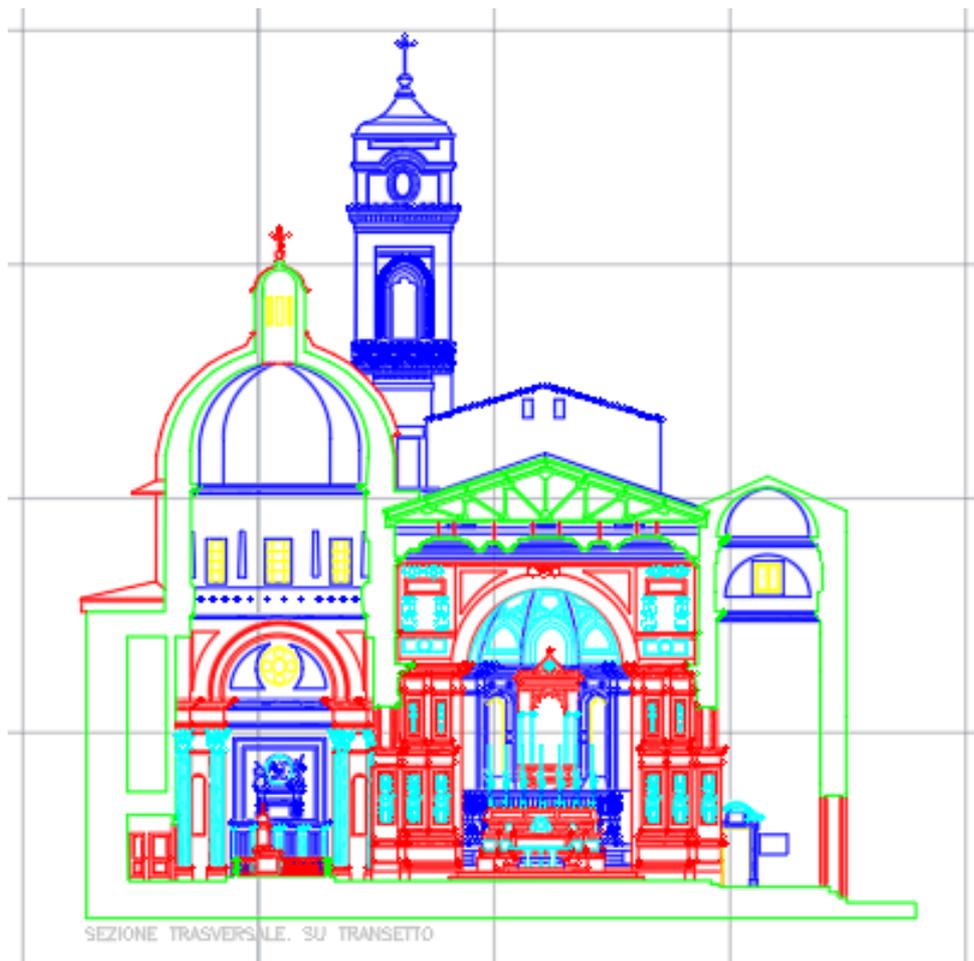
**Fig.** Nuvole di punti laser scanning acquisite e registrate per il rilievo della parte interna (Rif. Rilievo 3D e monitoraggio strutturale per l'analisi post-sisma del complesso di S. Nicola a Tolentino (MC))

Dopo aver valutato la presenza di errori di allineamento, si passa all'importazione della nuvola, in formato .ply, in 3DReshaper, programma specializzato nell'elaborazione e nella successiva ricostruzione 3D, sulla base delle scansioni laser. Inoltre, la nuvola di punti, è stata esportata anche sotto forma di file E57 nel software "PointCab", utilissimo per l'estrazione di piante, sezioni longitudinali e trasversali sotto forma di file .dwg a partire dal rilievo.

Il file formato .dwg prodotto da PointCab restituisce un ortomosaico costituito da un insieme di ortofoto. Successivamente si passa alla "vettorializzazione" sulla base del precedente ortomosaico. Questo passaggio è fondamentale perché il software restituisce un'immagine in cui ogni elemento si trova sullo stesso piano di taglio, non crea la differenza di profondità esistente tra i vari elementi; quindi è compito di chi esegue la vettorializzazione assegnare una gerarchia di profondità ai vari elementi (sezione, proiezione, etc...).

Sono stati ricavati così gli elaborati architettonici di piante e sezioni.

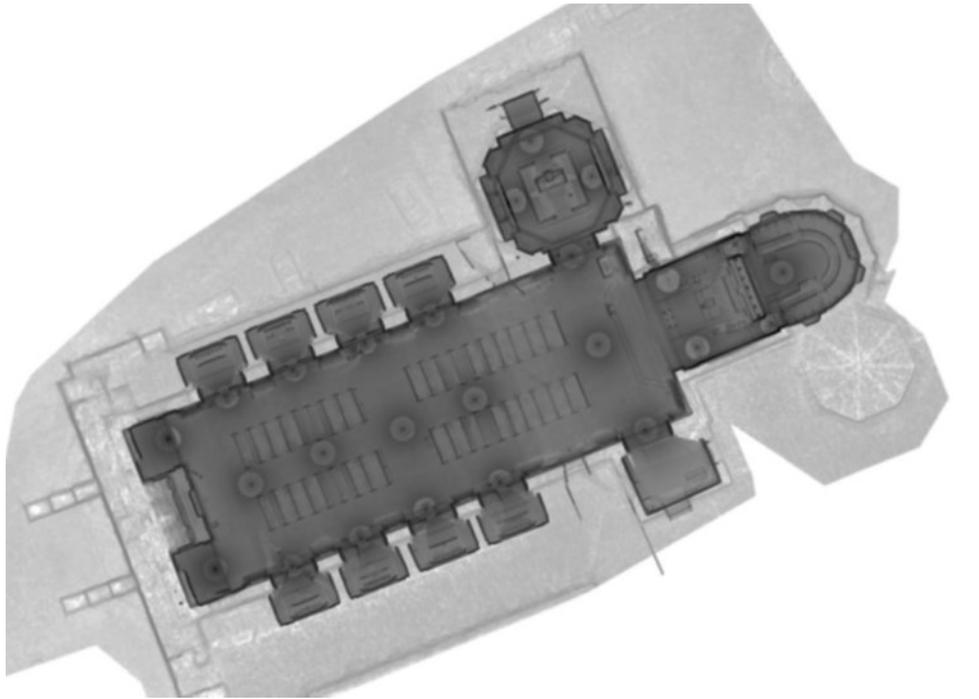




*Fig. Pianta e sezione trasversale (Rif. "From a point cloud-based model to a VR visualization for Cultural Heritage at risk: S. Nicola Church in Tolentino" Tesi di Carla Borriello, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura)*

Al fine di ottenere una modellazione precisa, chiara e organizzata, è utile segmentare l'oggetto di studio secondo un preciso sistema gerarchico, che segue le funzioni strutturali dei vari elementi costituenti la fabbrica.

In questo modo il lavoro è stato svolto su una nuvola di ridotte dimensioni, rendendo così più agevole la fase di pulitura e riduzione del rumore.



**Fig.** Gruppo di scansioni acquisite interne ed esterne (Rif. Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)

Le scansioni acquisite hanno una risoluzione pari a 1pt/6mm a 10 metri.

Il processo di raccolta dei dati tramite scansione laser ha permesso, dopo la fase di registrazione e georeferenziazione delle scansioni, l'integrazione dei dati con quelli ricavati tramite Structure from Motion; la nuvola di

punti di derivazione laser è stata trattata con il software Scene.

L'errore medio di registrazione è pari a 4.57mm.

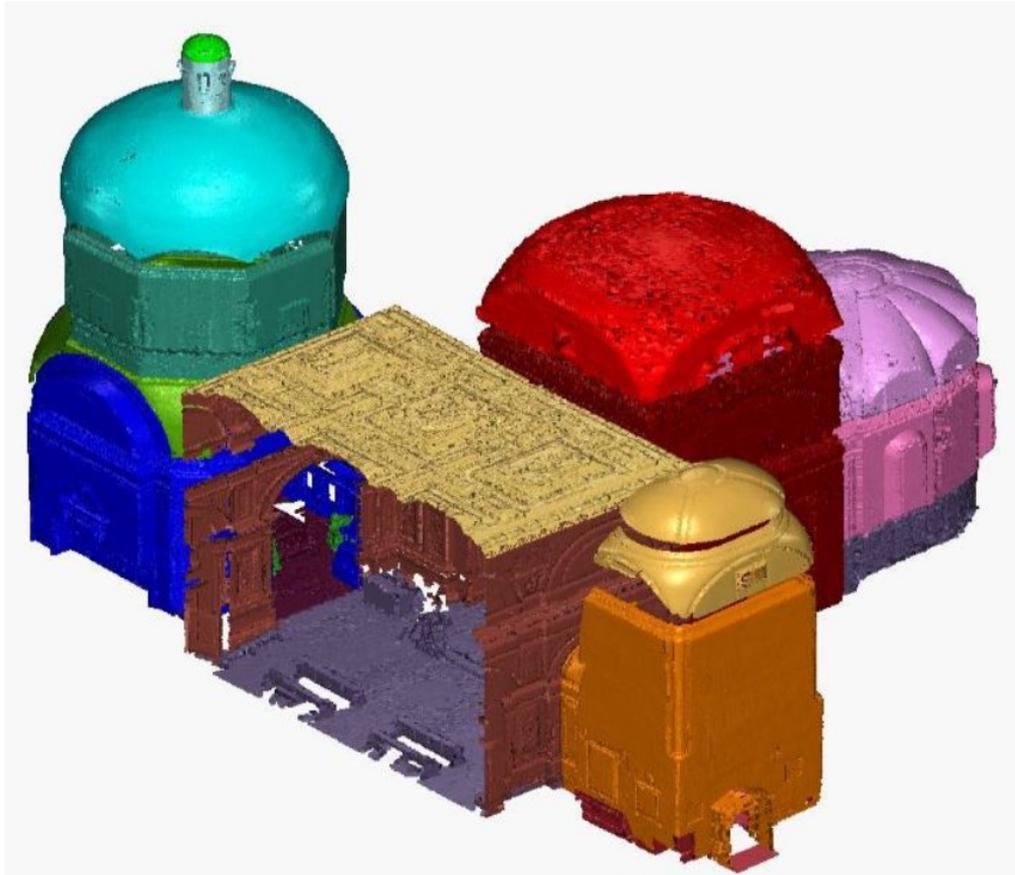
Le fasi del processo sono state le seguenti:

- Acquisizioni scansioni laser;
- Registrazione scansioni per forma;
- Allineamento scansioni tramite coordinate marker;
- Controllo degli errori di registrazione sui punti noti.

Terminate le elaborazioni, è possibile l'esportazione delle NUVOLE DI PUNTI in formati compatibili con i principali software di gestione delle nuvole.

L'elevata densità delle nuvole di punti ottenute è stato un problema, poiché, pur avendo reso disponibile un elevatissima quantità di informazioni, la scelta di quelle effettivamente utili e fruibili è stata assai difficoltosa.

La mesh creata a partire dalla nuvola di punti derivata dai laser scanner, è stata generata tramite il software 3DReshaper.



*Fig. Mesh generata con 3d Reshaper della basilica (Rif. Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)*

Il modello presentava diversi problemi, come ad esempio lacune e aree rumorose che avrebbero potuto influenzare il calcolo. Pertanto, si è deciso di intervenire in modo non invasivo su tali aree per ricostruire le porzioni che avrebbero ostacolato l'analisi tramite una correzione della geometria effettuata tramite Autodesk Meshmixer. Si sottolinea la

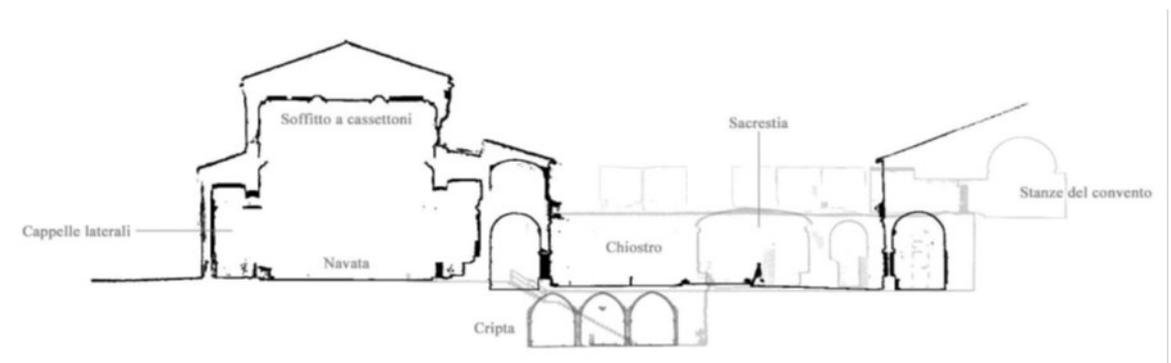
buona interoperabilità dei file di modello tra i software di calcolo.





*Fig. Nuvole di punti relative alle principali sezioni della basilica (Rif. Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)*

I processi descritti hanno permesso di generare elaborati fondamentali per l'analisi; sono state prodotte analisi specifiche circa la deformazione delle pareti, l'analisi della volta e della sua discrepanza dal modello geometrico.



*Fig. Integrazione di Nuvola UAV, Nuvole lidar/fotogrammetriche e nuvole mapping mobile (ZEN-Revo) (Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)*

### ***Voli indoor la basilica di San Nicola***

Sono stati, inoltre, sperimentati molti voli indoor all'interno della basilica, attraverso l'utilizzo di diverse tipologie di droni

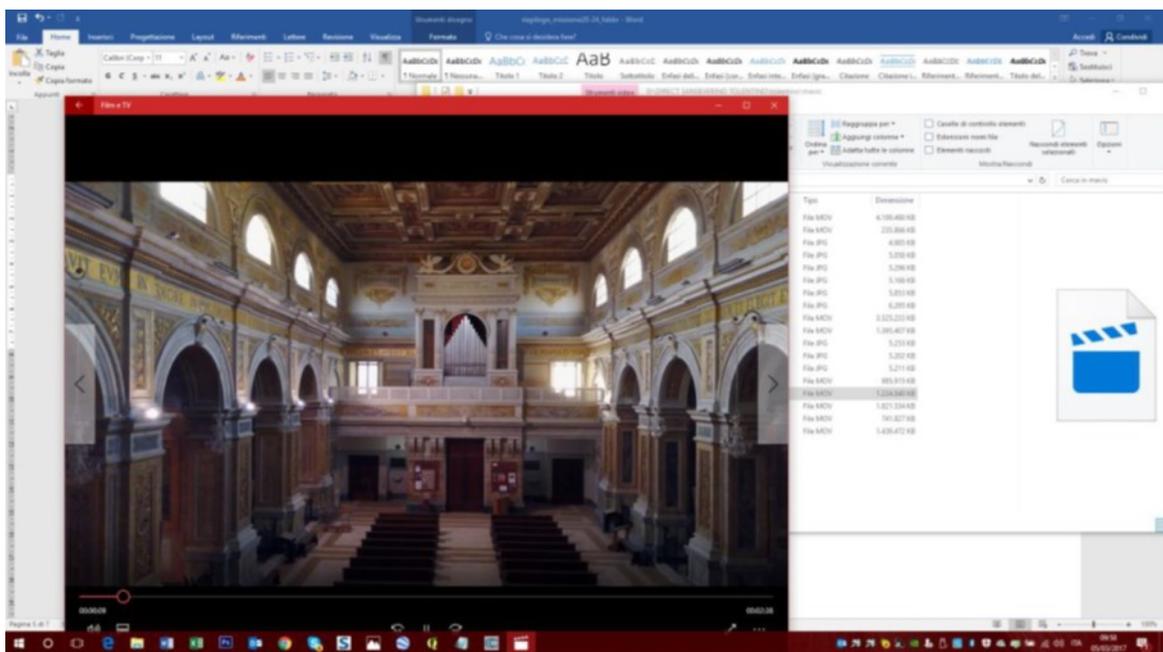
- Drone multirottore DJI MAVIC
- Drone Bebop Parrot

Sono state realizzate anche alcune

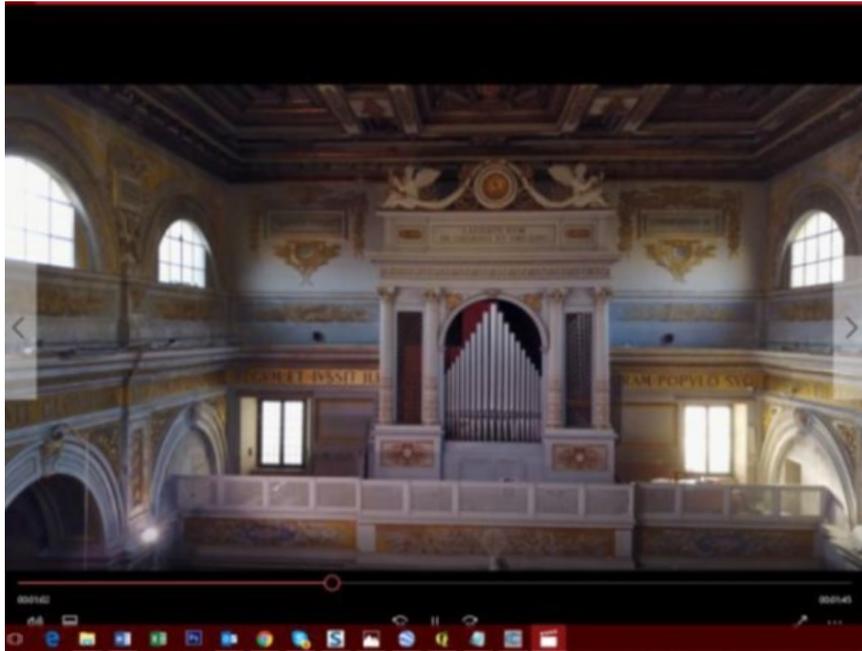


riprese con il sistema DJI OSMO, una camera per riprese video in movimento ad elevata stabilizzazione. (*Rif. Seminario di Geomatica per il terremoto” Maggio 2017*)

Queste si sono rivelate utili al fine della modellazione successiva perché hanno permesso di indagare meglio le relazioni sussistenti tra i vari elementi, che dalle sezioni non erano così evidenti.



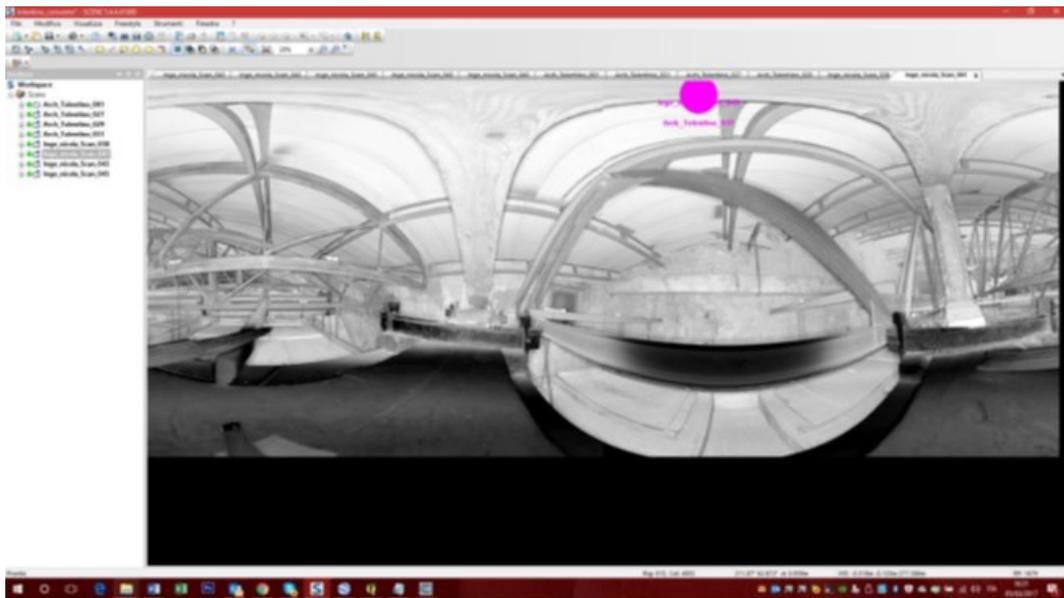
*Fig. Alcune immagini prese dai voli (Rif. Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)*



*Fig. Alcune immagini prese dai voli (Rif. Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)*

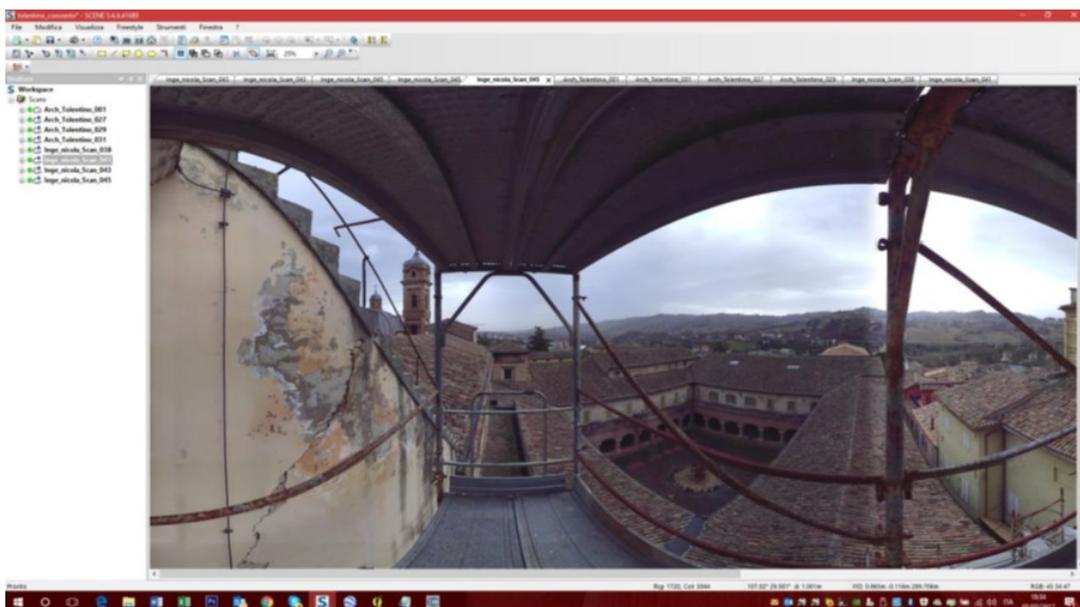
### *Rilievo laser scanning del sottotetto e del cassettonato*

Sono state eseguite due scansioni con scanner focus3D anche nel sottotetto, in prossimità del muro di controfacciata, per la documentazione dell'ampia frattura passante visibile nella muratura d'ambito a sud della basilica.



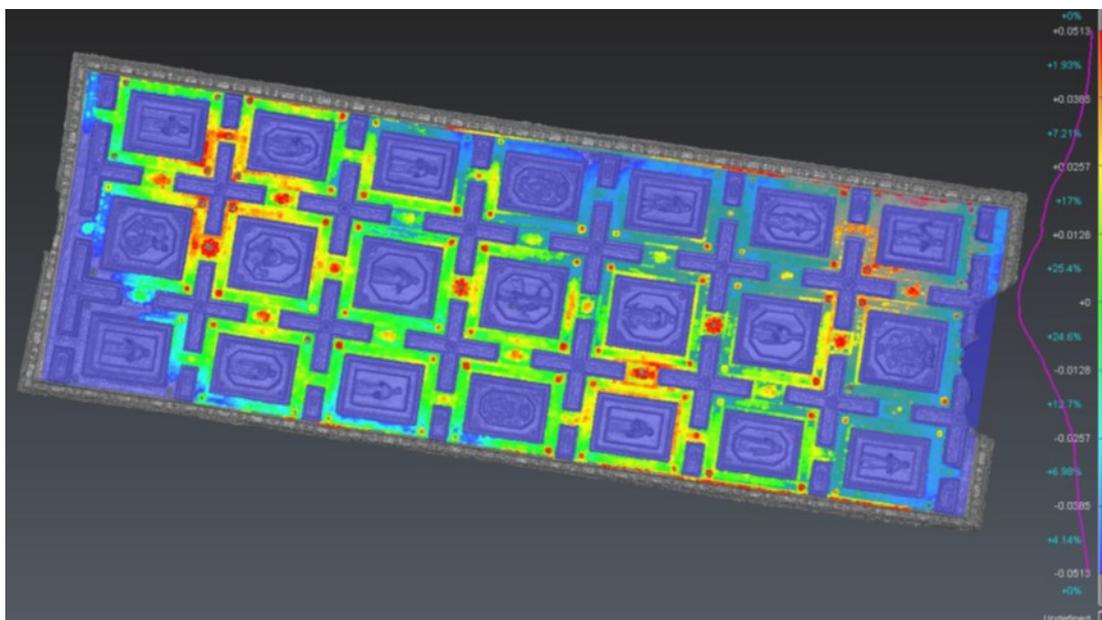
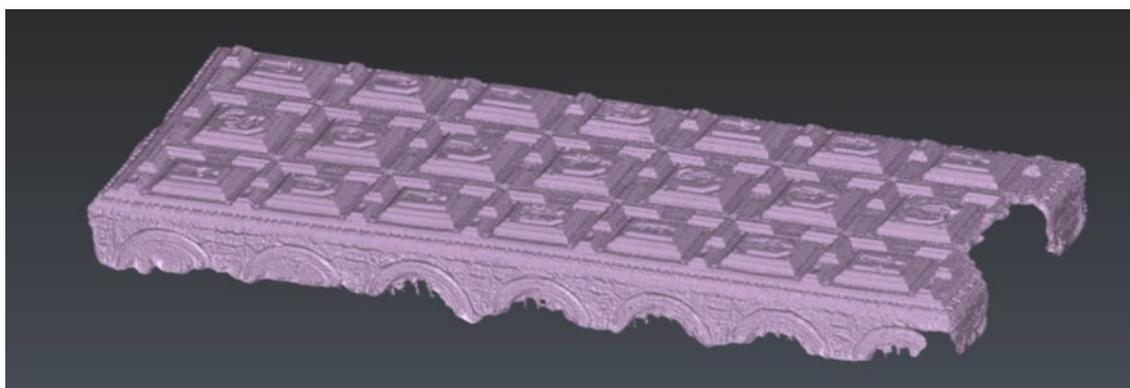
*Fig. Scansione del sottotetto (Rif. Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)*

Il rilievo laser scanning della lesione prima citata è stato effettuato anche dall'esterno, attraverso il ponteggio presente.



**Fig. Rilievo laser scanning da ponteggio della lesione (Rif. Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)**

Del cassettonato è stato svolto anche lo studio delle anomalie, ovvero la presenza di deformazioni per scostamenti da piani teorici.

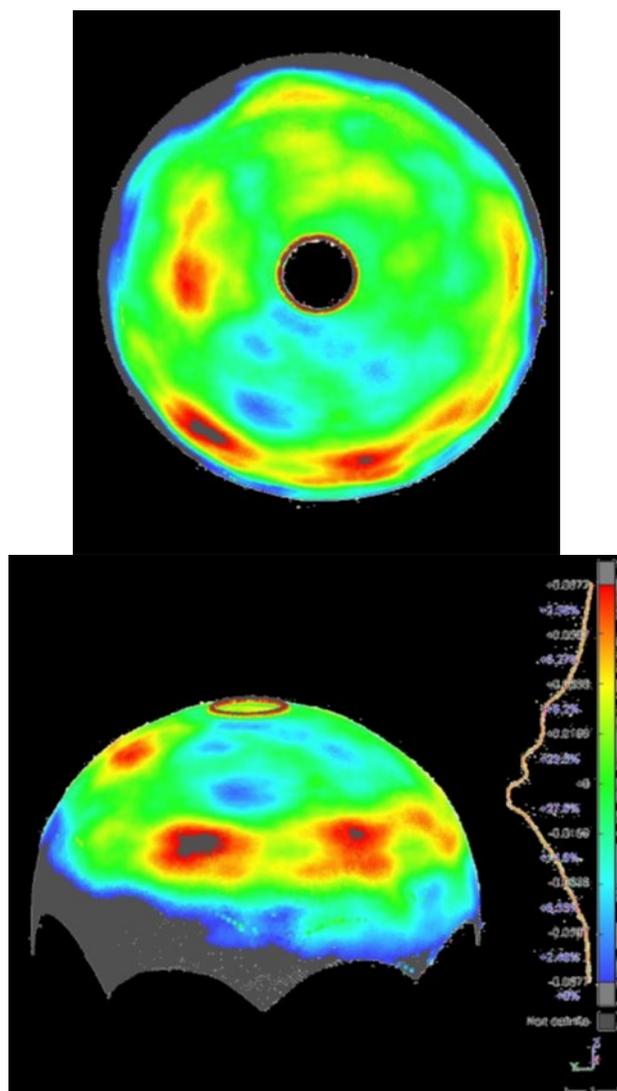


**Fig. Anomalie del cassettonato (Rif. Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino)**

### *Analisi della Cupola del SS. Sacramento*

Al fine di comprendere meglio la fisionomia della struttura per identificarne il comportamento, è stata svolta anche un'analisi di approfondimento sulla Cappella del SS. Sacramento all'interno della basilica. L'analisi è partita da una scomposizione delle geometrie degli elementi architettonici. E' stata effettuata una comparazione tra la superficie esistente e quella "ideale" rappresentata da una semisfera. Per via analitica è stata calcolata la geometria pura che riducesse le deviazioni al minimo.

E' stata poi condotta un'analisi più specifica sulla cupola semisferica della Cappella; tale analisi è una comparazione tra la superficie esistente e quella "ideale" rappresentata da una semisfera. Per via analitica è stata calcolata la geometria "pura" che riducesse le deviazioni al minimo. I volumi sono stati successivamente comparati.



**Fig.** *Mappa degli scostamenti dalla forma geometrica ideale ( Rif. book del workshop “Fotogrammetria digitale e scansioni 3d per il rilievo di beni culturali”)*

La semicupola è stata analizzata attraverso i dati di rilievo laser dai quali, a partire dalla nuvola di punti, è stata estratta la mesh e sono state ricavate le curve di livello a passo costante pari a 1m. La geometria della semicupola, dopo essere stata isolata dagli altri elementi è stata poi disegnata in proiezioni ortogonali,

dalle quali appaiono chiaramente identificabili le aree in cui la superficie ideale si discosta dal modello reale.

Dalle analisi effettuate appare evidente che la cupola in questione presenta scostamenti minimi dalla geometria ideale riconducibili a leggere difformità costruttive o cedimenti materici di entità limitata, per tale ragione in fase di modellazione potrà essere disegnata come semisfera senza alcun particolare accorgimento.

### ***Analisi deformazioni muro***

A seguito del fenomeno sismico si è identificata come zona di particolare debolezza strutturale la porzione di muratura laterale del presbiterio all'innesto con il transetto. Le analisi sono state svolte sulla mesh ricavata dalla nuvola di punti acquisita, come precedentemente esplicito, tramite laser scanner.

La mesh è stata ottenuta tramite una triangolazione a due passi in modo tale da ottenere un punto con aree più dettagliate.

Quest'analisi ha come obiettivo l'indagine della deformazione del setto murario al fine di individuare possibili aree su cui potrebbe dover essere necessario intervenire.

Al fine di determinare la deformazione di parete è stato necessario individuare il piano di riferimento per l'analisi, tramite il quale individuare le aree che maggiormente si discostano da esso. La determinazione di questo piano è risultata un'operazione abbastanza complessa e la stessa analisi è stata svolta tramite software differenti come Pointcab e 3DReshaper. Nel primo caso, partendo dalla nuvola di punti e nel secondo dalla mesh. Le analisi presentano risultati in parte differenti, a causa delle diverse scelte relative al piano, dal momento che la grande presenza di cornici e decorazioni rendeva difficile individuarne uno univoco.

Da tale analisi si è visto che i dati riportati in questo studio andrebbero ulteriormente approfonditi, ma dalla sezione trasversale si evince che l'angolo tra il muro ed il terreno risulta inferiore al grado, pertanto la muratura non risulta fuori piombo. Le analisi della superficie interna presentano nella parte più alta un'inclinazione dell'ordine di 5-6 cm le cui cause dovrebbero essere meglio indagate con analisi specifiche in sito.

## ***LA MODELLAZIONE***

### ***Costruzione del Modello Geometrico***

La modellazione della basilica oggetto di studio in questa tesi, sotto forma di elementi bidimensionali di tipo “plate”, è partita dall’individuazione del piano medio longitudinale di ciascun elemento costituente l’oggetto, per poi passare alla fase di meshatura e attribuzione delle caratteristiche meccaniche del materiale costituente, nonché il riconoscimento delle connessioni reciproche tra i vari elementi, e rispetto ad elementi contigui non facenti parte dell’unità strutturale studiata.

Grazie agli elaborati estratti attraverso il software PointCab, si avevano a disposizione una serie di sezioni in formato “.dxf” (Allegati 1, 2 e 3), utili per il riconoscimento degli elementi costituenti la basilica e quindi per iniziare a ragionare in modo più dettagliato sull’impostazione delle superfici.

A partire dalla planimetria è stata pensata una suddivisione degli elementi che tenesse in conto i meccanismi locali che si è soliti osservare in questo tipo di strutture (ampiamente discussi

in precedenza) e dello stato fessurativo e deformativo riscontrato in loco durante il primo sopralluogo.

Gli eventi sismici avvenuti a partire dall'Agosto 2016 hanno causato rilevanti danni distribuiti sulla struttura della Basilica. Di notevole importanza ai fini di una corretta modellazione sono state le lesioni presenti in corrispondenza dei contrafforti della facciata a livello della copertura. L'entità di tali lesioni ha fatto propendere per l'installazione di un sistema provvisorio in acciaio al fine di proteggere i passanti dalla caduta di elementi murari e decorativi distaccati. Il movimento di distacco della facciata, quindi, appare evidente non solo da tali lesioni, ma anche dalle fessure presenti nella parte inferiore della stessa, in corrispondenza della cornice decorativa interna su entrambi i lati della navata.



**Fig.** Vista laterale della facciata. (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)



**Fig.** Lesione della cornice decorativa, lato destro (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)



*Fig. Lesione della cornice decorativa, lato sinistro (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)*

Altre lesioni sono state individuate in corrispondenza dell'abside, a ridosso dell'altare; queste indicano un probabile meccanismo di distacco dal corpo centrale.





*Fig. Dettaglio lesioni sull'abside (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)*

Fessurazioni diffuse sono visibili anche sugli archi laterali della navata, della cappella confessionale e del Cappellone



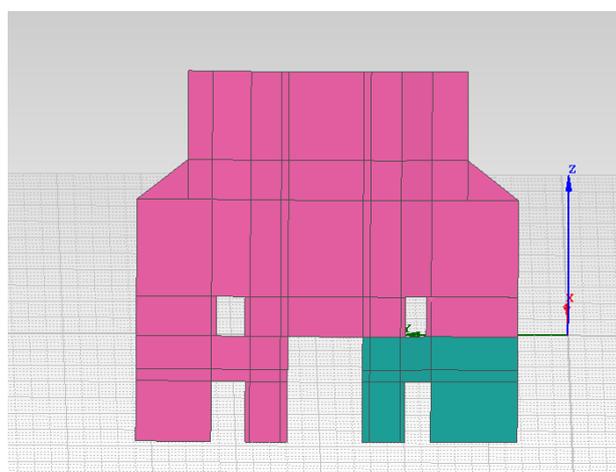
*Fig. Dettaglio lesioni sull'arco del Cappellone (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)*



**Fig.** Dettaglio lesioni sull'arco del Cappellone (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)

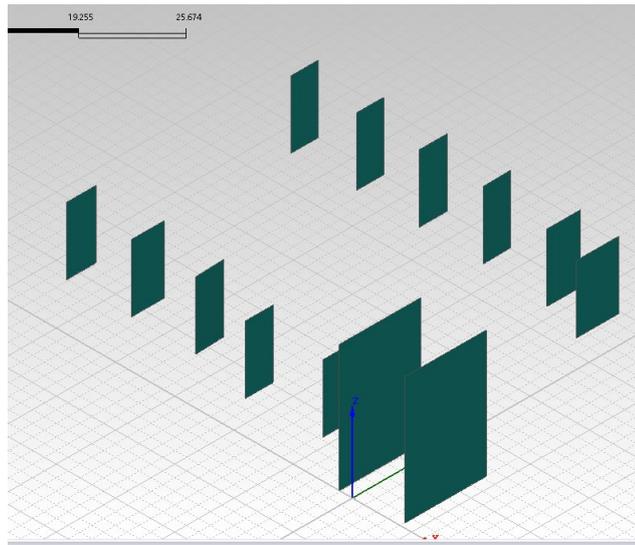
In virtù di questo ragionamento, la basilica è stata suddivisa nelle seguenti parti:

- una superficie piana contenente l'intera facciata;



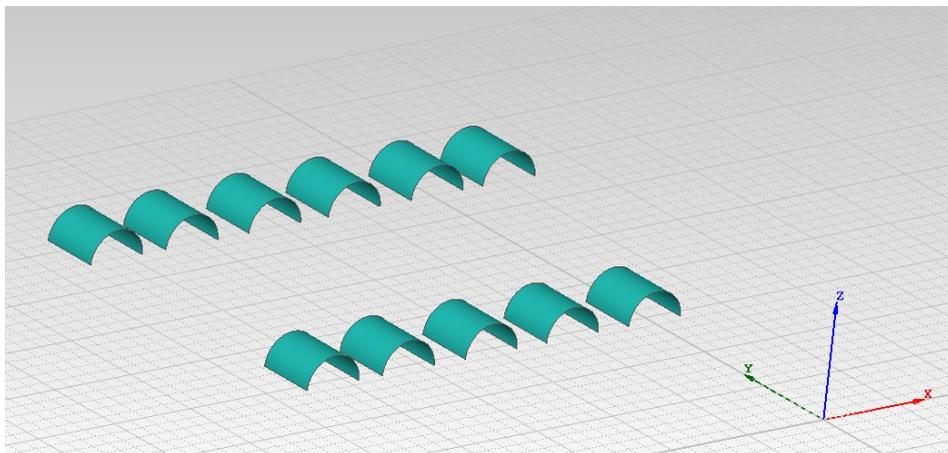
**Fig.** Superficie rappresentativa della facciata (Rif. Modello da me creato)

- una serie di superfici piane rappresentative i setti che dividono le cappelle disposte lungo i due lati della navata;



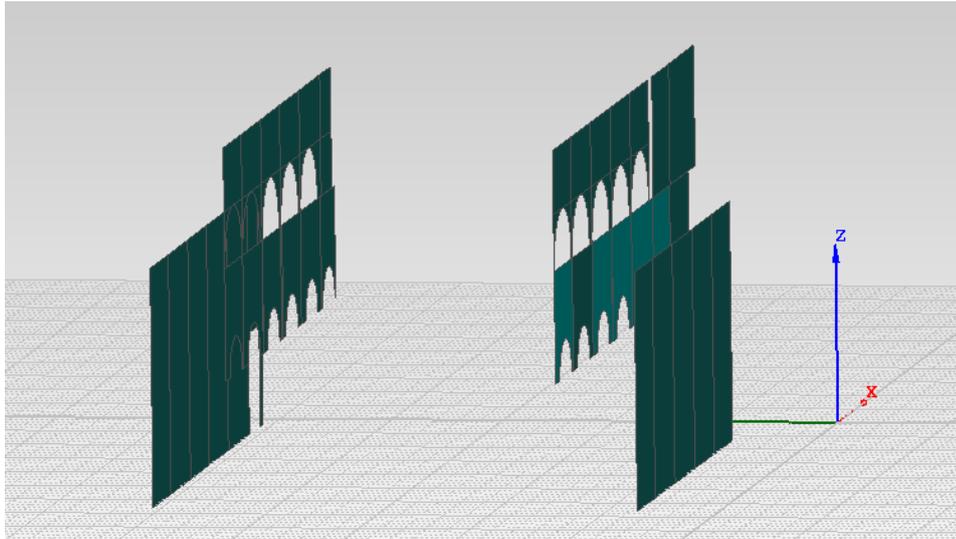
**Fig.** Setti lungo la navata (Rif. Modello da me creato)

- superfici semicilindriche per le volte a botte delle cappelle laterali;



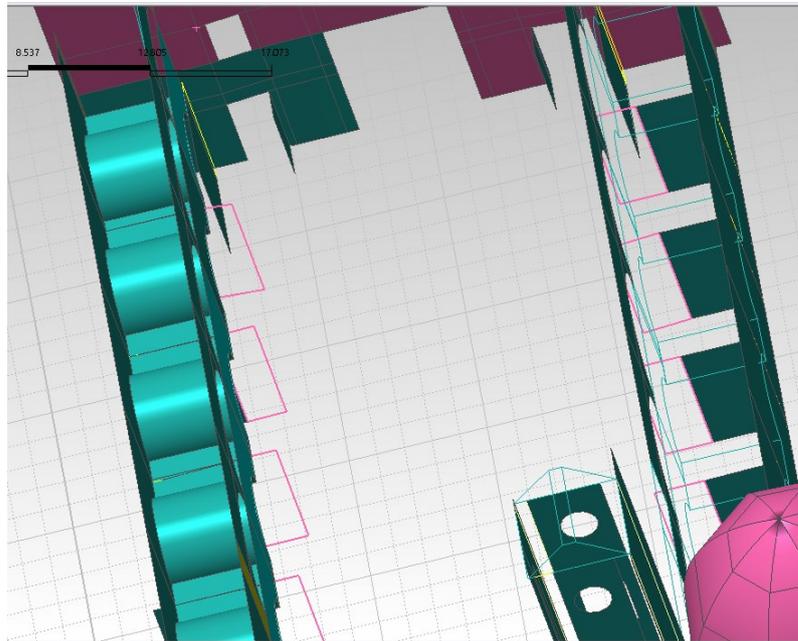
**Fig.** Volte a botte (Rif. Modello da me creato)

- superfici piane per le pareti longitudinali, divise in base all'altezza e tenendo in conto della rastremazione in altezza che subisce l'intera navata in corrispondenza delle aperture a semi-luna;



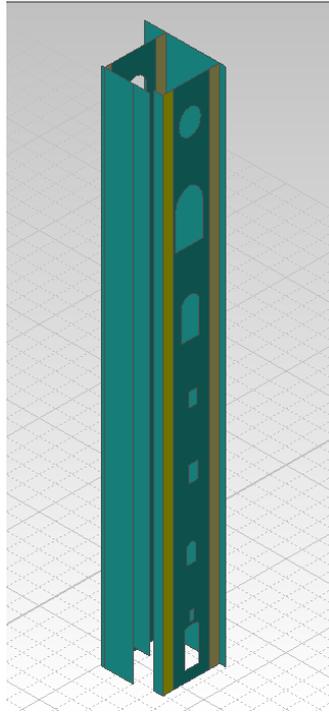
**Fig. Pareti laterali (Rif. Modello da me creato)**

- superfici piane rappresentanti i “pilastri” lungo la navata, che sorreggono l’ordine di archi soprastante;



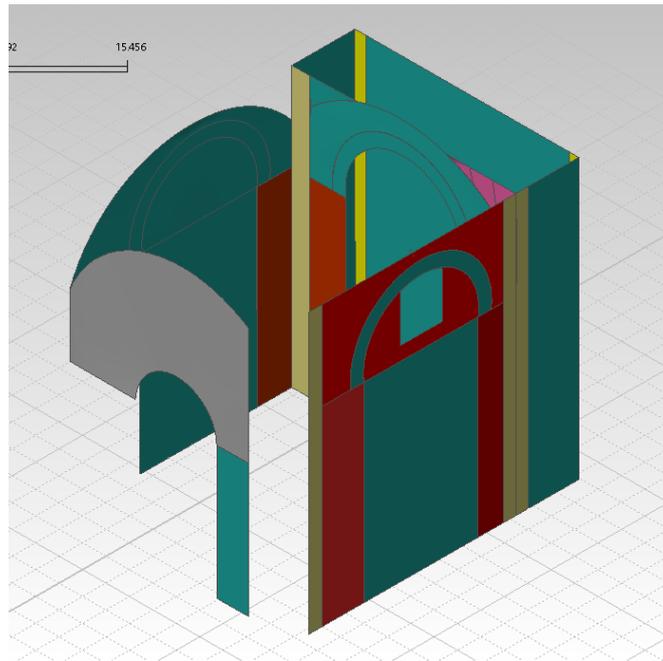
**Fig. Pilastri evidenziati in viola (Rif. Modello da me creato)**

- superfici piane per le mura della torre campanaria, forate in corrispondenza delle aperture;



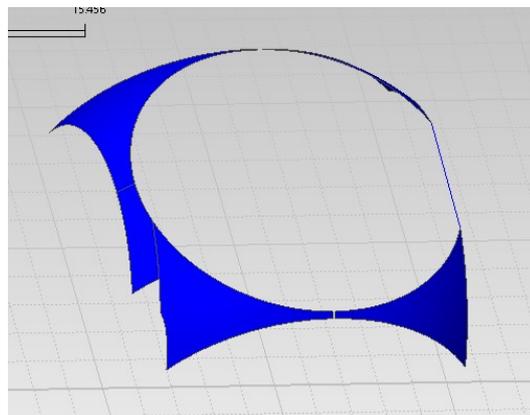
*Fig. Torre (Rif. Modello da me creato)*

- superfici piane per la schematizzazione delle pareti che circondano la cappella del Santissimo, divise secondo i vari elementi strutturali che sono stati individuati all'interno (pilastri, pareti di riempimento, archi);



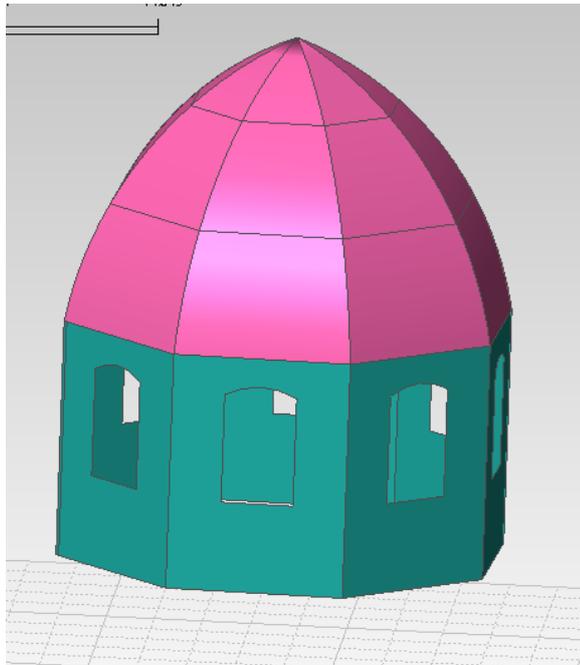
**Fig. Elementi piani costituenti la Cappella del Santissimo (Rif. Modello da me creato)**

- una cupola opportunamente sezionata per rappresentare la volta della cappella del Santissimo, su cui si va ad innestare il tamburo e che lo collega al sistema di archi posti sui 4 lati della cappella;



**Fig. Superficie di raccordo (Rif. Modello da me creato)**

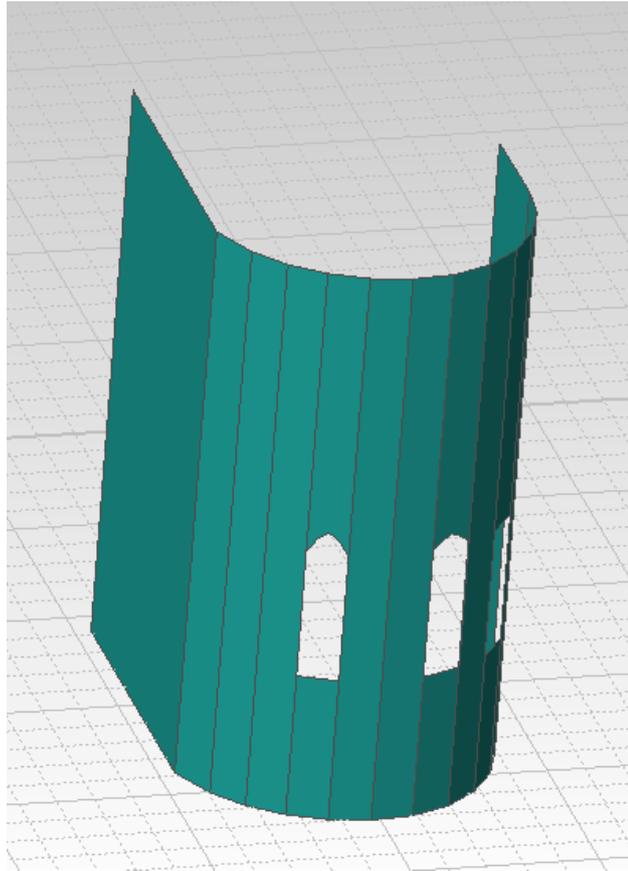
- 8 superfici piane forate rappresentative le pareti del tamburo, sul quale si vanno ad innestare altrettante superfici a vela per la copertura;



**Fig.** Tamburo e copertura della cappella del Santissimo (Rif.

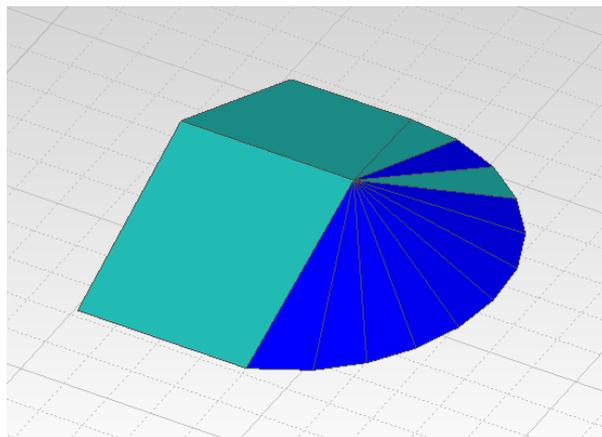
*Modello da me creato)*

- una superficie piana per la copertura del vano retrostante il tamburo;
- una serie di superfici forate e non, per la parte absidale, che in realtà ha una forma cilindrica, ma è stata rappresentata suddividendo questa in una serie di superfici piane;



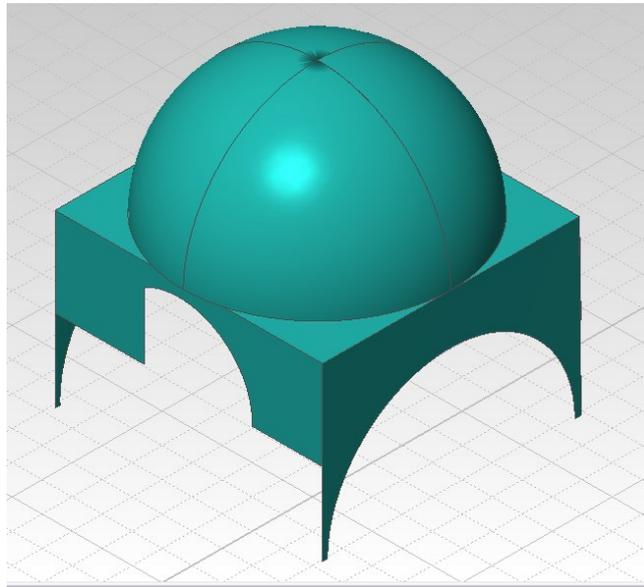
**Fig. Pareti dell'abside (Rif. Modello da me creato)**

- superfici a spicchi più 2 rettangolari per la copertura dell'abside;



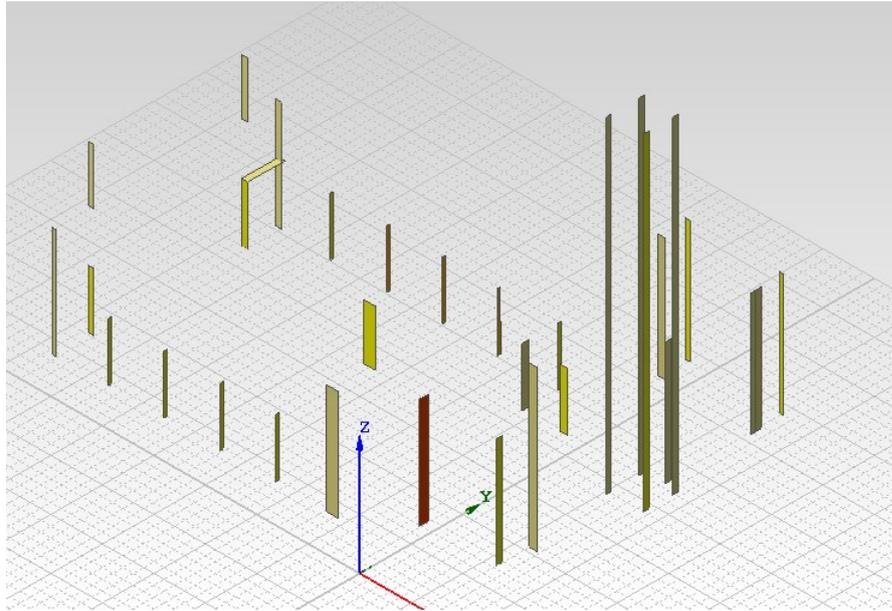
**Fig. Copertura dell'abside (Rif. Modello da me creato)**

- in corrispondenza dell'altare è presente una volta semisferica che si innesta su una superficie piana (opportunamente sagomata), due archi verticali per collegarla alle pareti laterali e due superfici laterali con foratura;



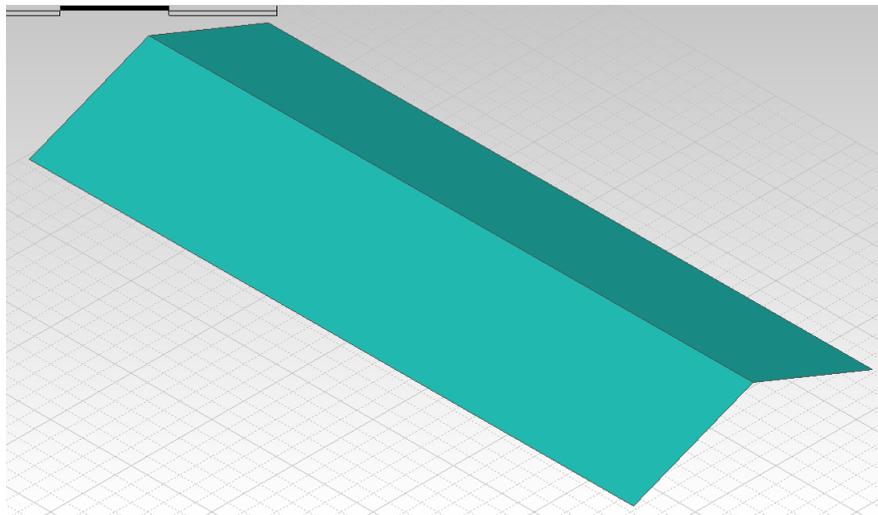
*Fig. Parte sopra l'altare (Rif. Modello da me creato)*

- superfici rappresentative dei link, ovvero elementi posti in corrispondenza dei collegamenti tra due o più elementi in modo da poter rappresentare al meglio il grado di connessione (modellando opportunamente la loro rigidità) tra questi e senza avere un surplus di massa che il collegamento diretto avrebbe causato;



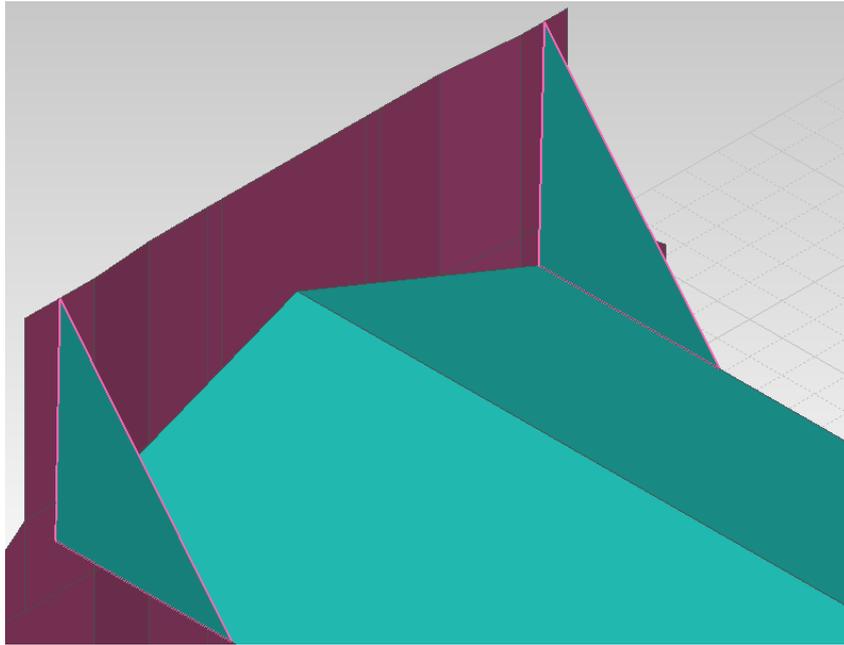
**Fig. Link tra i vari elementi (Rif. Modello da me creato)**

- due superfici rettangolari inclinate rappresentative della copertura a doppia falda dell'aula della Basilica;



**Fig. Copertura aula (Rif. Modello da me creato)**

- due superfici triangolari per rappresentare i due contrafforti della facciata.



**Fig.** *Contrafforti della facciata (Rif. Modello da me creato)*

Importante è notare come la scelta dell'orientamento della linea media degli elementi di collegamento sia stata dettata da considerazioni in merito ai meccanismi di rottura ipotizzabili osservando l'impianto strutturale. Per esempio la facciata risulta collegata alle pareti laterali attraverso link orientati secondo le pareti, poiché come prima evidenziato, si è osservato un meccanismo di ribaltamento della facciata.

In questa rappresentazione secondo superfici, manca il cassettonato ligneo visibile dall'interno in corrispondenza della navata, scelta dettata dal fatto che tale copertura è di fatto appesa ad una serie di capriate metalliche, che quindi

era inutile rappresentare attraverso superfici, poiché non ha alcuna funzione strutturale.



**Fig.** Collegamento del cassettonato alla capriata metallica (Rif.

*Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)*

Unico elemento non trascurabile di tale cassettonato è la sua massa, ragion per cui questa è stata calcolata e spalmata come carico uniformemente distribuito lungo le capriate a cui è appeso.

calcolo peso cassettonato ligneo				
peso unitario		il peso complessivo è distribuito sulle 6 caprite metalliche	peso	
6	KN/m <sup>3</sup>		380	[KN]
spessore medio [m]			carico per capriata	
0.1			63	[KN]
lunghezza capriata			4.22	[KN/m]
15	[m]			

**Tab.** Calcolo del peso del cassettonato ligneo (Rif. Tabella da me elaborata)

A seguito del sopralluogo è stato osservato che sono presenti, nel sottotetto lungo la navata, tre ordini di capriate, di cui due metalliche e uno ligneo. L'ordine ligneo, composto da 6 capriate, è presumibile pensare fosse il sistema strutturale originario, in epoca imprecisata disattivato, come evidente dal taglio presente in corrispondenza del colmo.

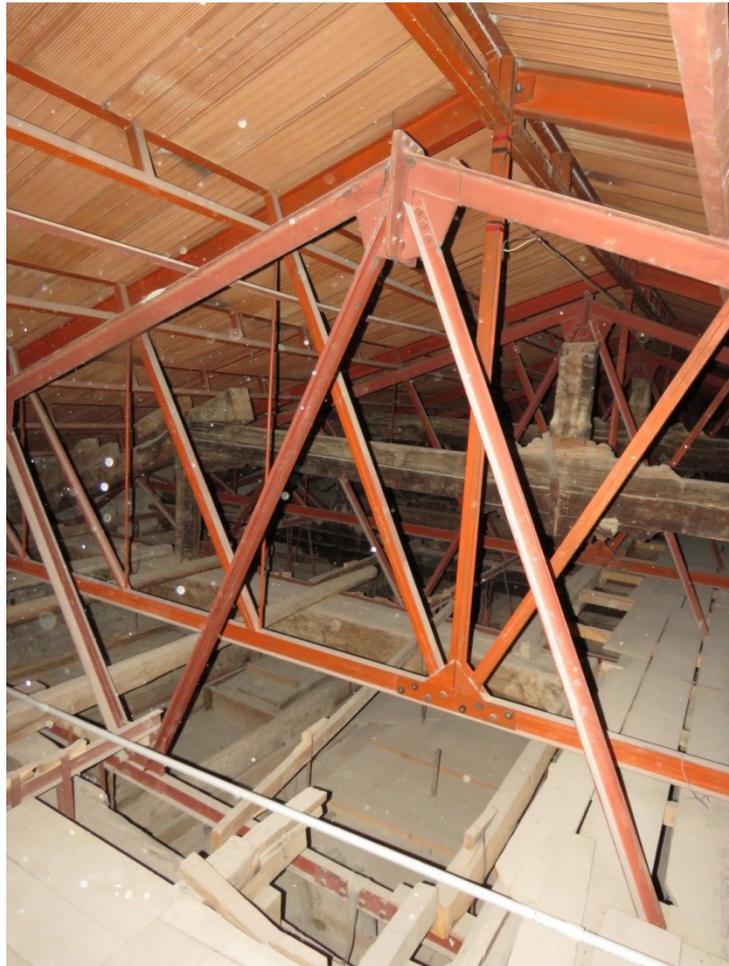


*Fig. Capriata lignea disattivata (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)*

Per quanto riguarda il doppio ordine di capriate metalliche presenti, sicuramente di installazione recente, ma imprecisata, è stato osservato che ciascuno di essi è composto da 6 capriate ed i due ordini differiscono per disposizione, funzione e geometria dei profilati.

Il primo ordine metallico ha la funzione di sorreggere il cassettonato ligneo sottostante, ed è composto da una reticolare così fatta:

- 10 elementi diagonali con profilo ad L, 50x50 e spessore di 3mm;
- due correnti superiori e uno inferiore con profilo a T 10, con spessore di 10.



**Fig.** Ordine di capriate metalliche che sorregge il cassettonato (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)

E' evidente lo scopo di tale ordine di capriate, oltre che dai collegamenti tra questo e il cassettonato, non presenti negli altri ordini, anche dal fatto che il colmo della reticolare non è ammorsato in corrispondenza del profilato metallico presente nel colmo della tettoia, ma esclusivamente nelle pareti laterali. L'altezza misurata in corrispondenza del colmo della reticolare è di 2.65 m.

Il secondo ordine di capriate metalliche è, invece, quello che ha la funzione di sorregge il tetto a falde, ed è composto da:

- due correnti superiori con profilo standard IPE160;
- un corrente inferiore con profilo standard IPE120;
- gli elementi diagonali con profilo a doppia C, PN60, accoppiati.



**Fig.** Secondo ordine di capriate metallico (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)

L'altezza al colmo di tale ordine è pari a 2.85 m.

Il passo misurato tra le capriate metalliche è pari a circa 0.75m.

Al fine della modellazione, le capriate sono viste, in modo decisamente semplificato, ma mirato all'obiettivo dell'analisi, come aste appoggiate alle pareti laterali, in quanto si è visto

che il grado di ammorsamento di quest'ultime non può ritenersi un incastro.

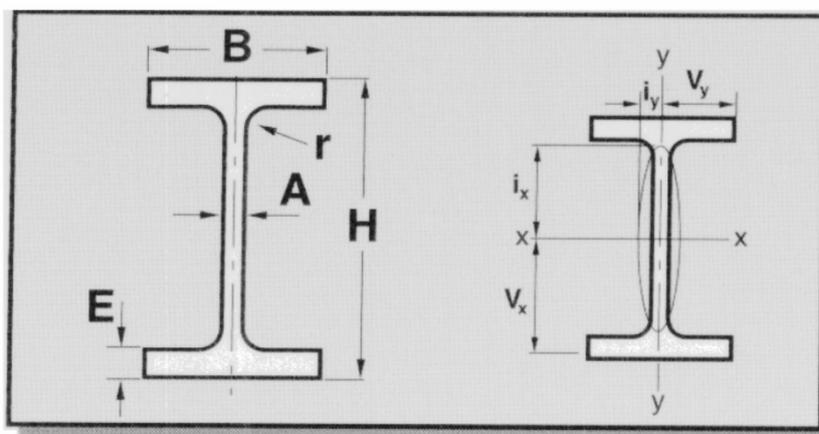


*Fig. Dettaglio dell'ammorsamento reticolare-parete (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)*

Tutte le capriate metalliche, quindi, in prima battuta, sono state modellate attraverso 12 elementi “truss” metallici, con la sezione classica di una IPE120 con le seguenti caratteristiche:

Peso[Kg/m]	Sezione [cm <sup>2</sup> ]	H[mm]
10.4	13.2	120

B[mm]	A[mm]	E[mm]	R[mm]
64	4.4	6.3	7



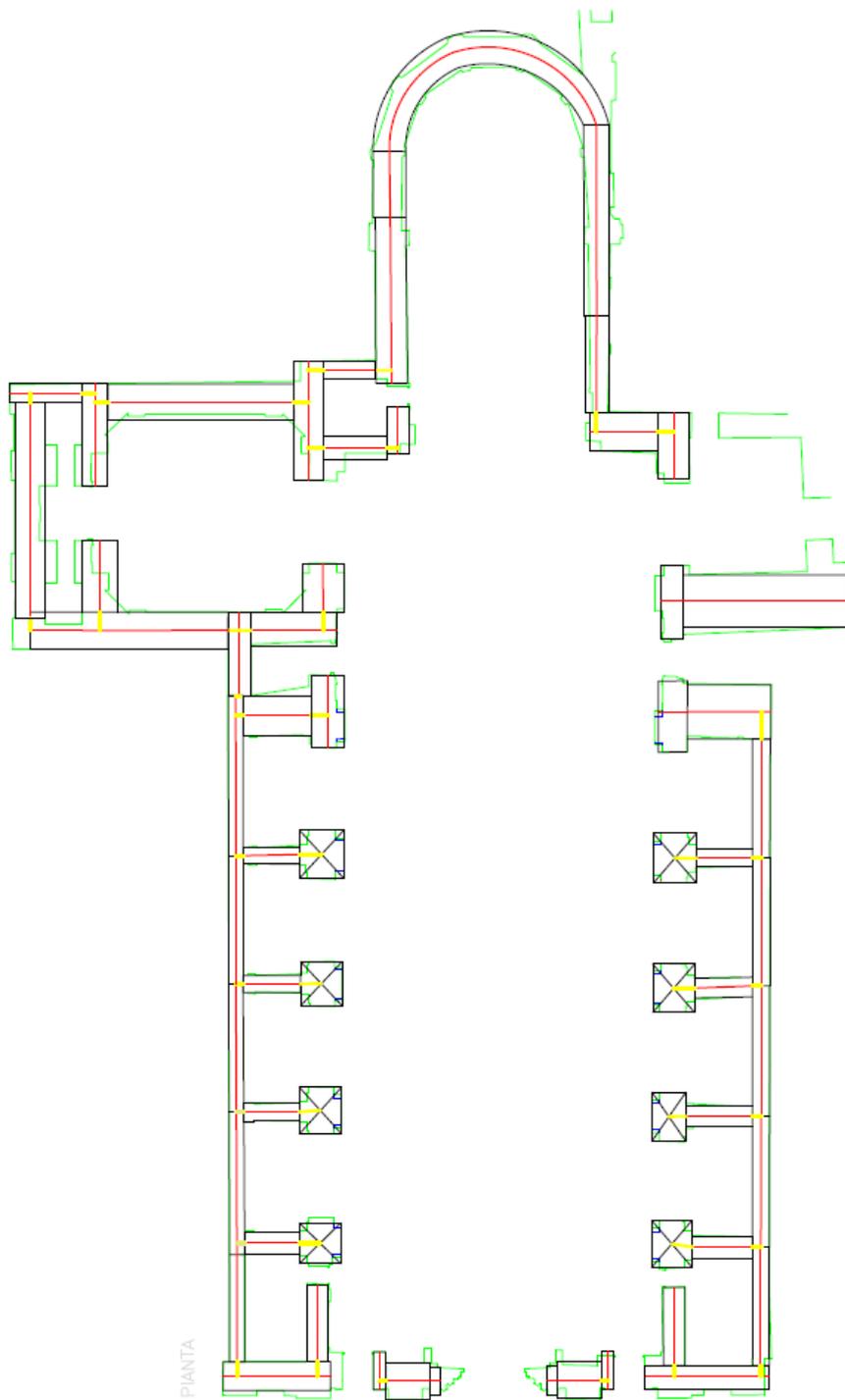
$J_x$ [cm <sup>4</sup> ]	$J_x/V_x$ [cm <sup>3</sup> ]	$i_x$ [cm]
318	53	4.9

$J_y$ [cm <sup>4</sup> ]	$J_y/V_y$ [cm <sup>3</sup> ]	$i_y$ [cm]
27.7	8.65	1.45

**Tab. e Fig.** Caratteristiche IPE120 (Rif. TRAVI IPE UNI 5398/ UNI EN

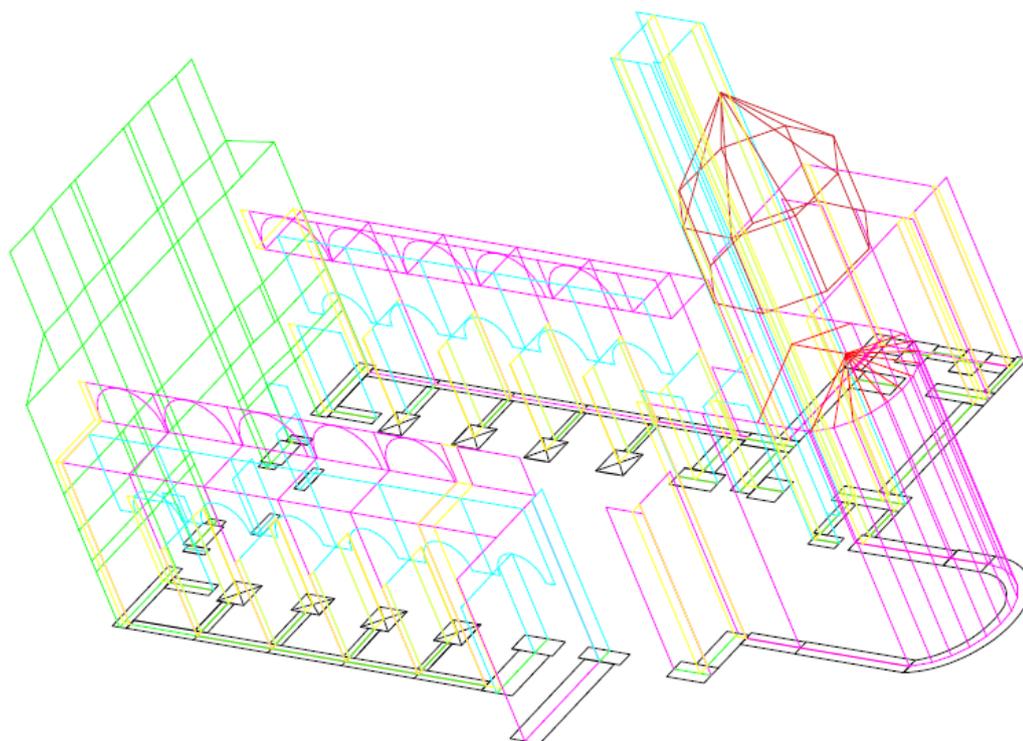
10034)

Fatto questo ragionamento, è stata tracciata sulla planimetria in “Autocad”, all’interno di ciascun elemento, la linea media, in modo da individuare agevolmente anche gli spessori da attribuire a ciascuna superficie.



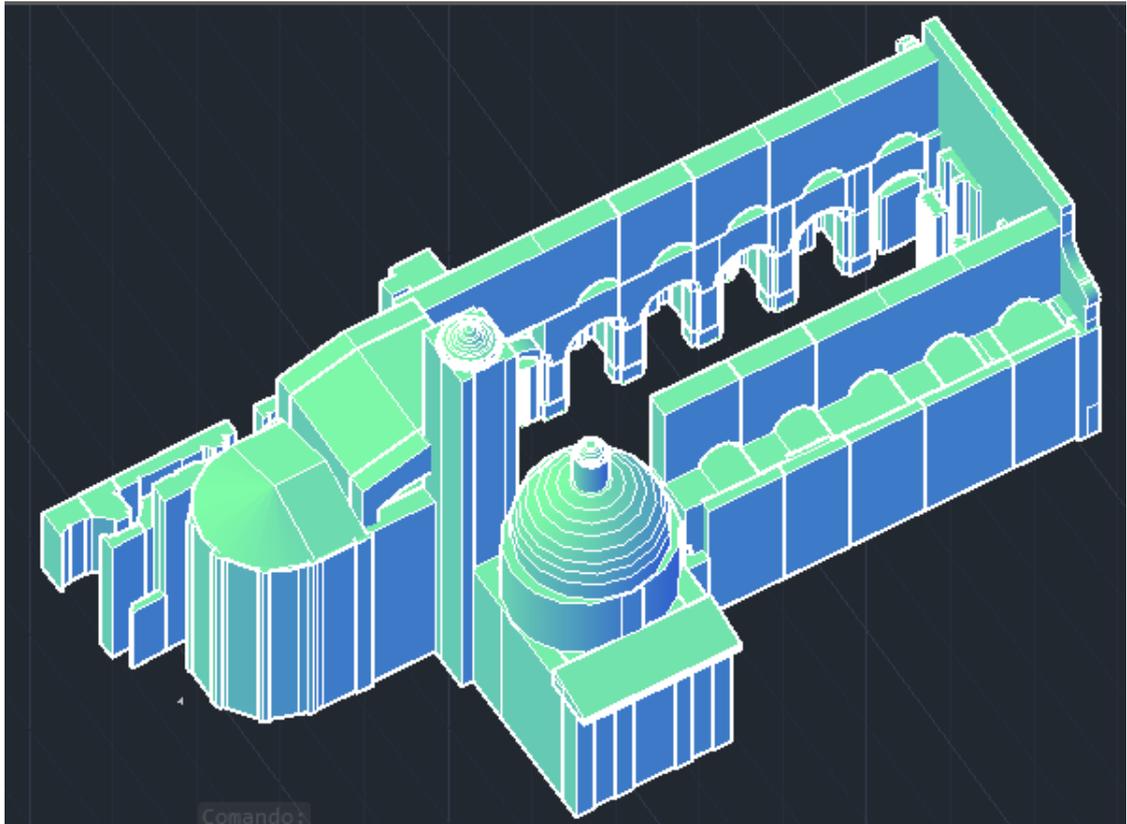
**Fig.** Tracciato delle linee medie costituenti il modello (Rif. File da me creato)

Identificate le linee rappresentative delle superfici medie, si è passati alla costruzione in 3D vera e propria di tali superfici, sempre attraverso il software “Autocad”, in modalità “modellazione 3D” e attraverso l’uso di soli elementi “linea”, unici riconosciuti dagli altri programmi utilizzati in seguito. Questo per ottenere lo scheletro geometrico della struttura, suddivisa in superfici, da poter importare nel software agli elementi finiti. Le altezze dei vari elementi sono state ricavate attraverso uno svariato numero di sezioni precedentemente estratte da “Pointcab” in diversi punti della Basilica, per ottenere il maggior numero di informazioni possibili, trattandosi di una geometria fortemente irregolare.



*Fig. Modello geometrico complessivo per superfici disegnato in  
Autocad (Rif. Modello creato da me)*

Per agevolare la comprensione della struttura e per completezza, è stato eseguito anche un modello volumetrico, indicativo, sempre in “Autocad”, costruito attraverso l’estrusione delle superfici, ragionamento molto diverso rispetto a quello che era stato necessario per la costruzione del modello a superfici medie.



*Fig. Modello geometrico 3D (Rif. Modello creato da me)*

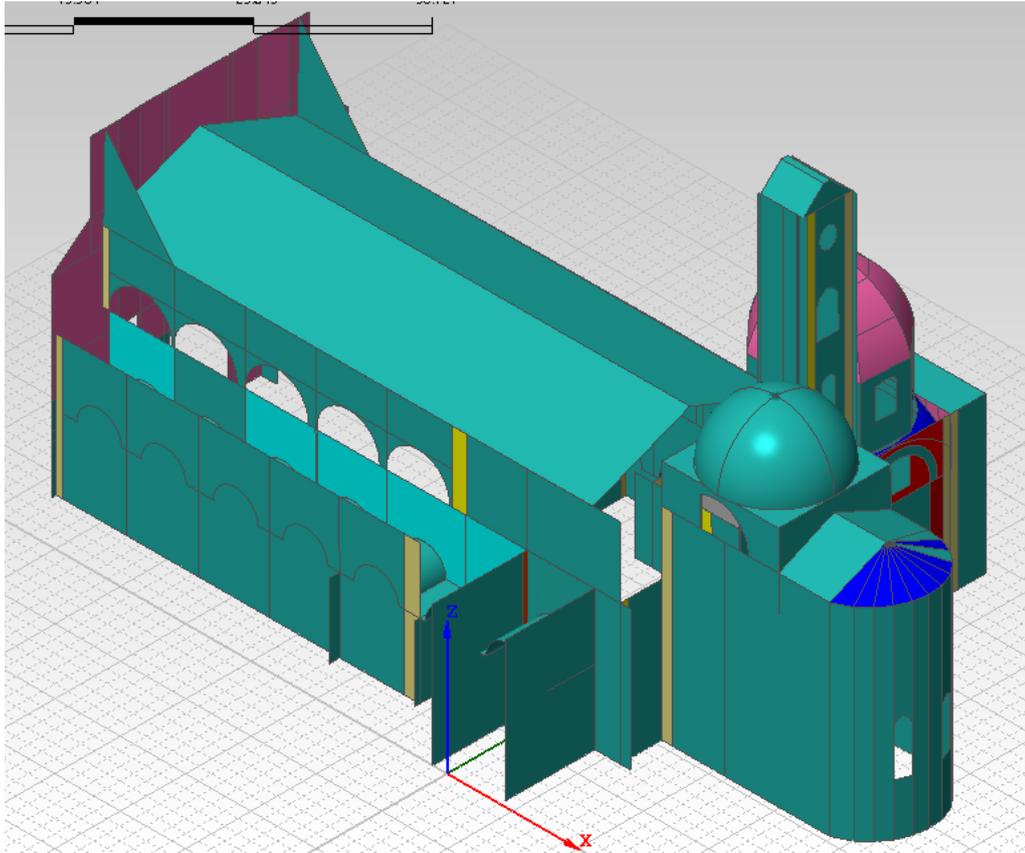
Ultimato il modello geometrico è stato possibile esportarlo nel software agli elementi finiti.

### ***Dal Modello Geometrico al Modello F.E.M.***

Si è scelto di utilizzare il pacchetto “*Midas*”, composto da due software: *Midas FX* per il pre-processamento, ovvero per la correzione della geometria e la creazione della mesh e “*Midas Gen*” per l’analisi vera e propria.

Una volta importato il modello in “*Midas FX*”, abbiamo un insieme di linee che non riconosce come superfici, quindi passaggio fondamentale è stato la creazione delle superfici. Tale programma prevede la possibilità di creare più tipi di superfici a seconda delle esigenze, funzionalità molto utile poiché in questo modello sono presenti anche superfici particolari, come quelle a vela della copertura del tamburo o la superficie di raccordo tra le mura della cappella del Santissimo ed il tamburo.

Per la costruzione di tutto il modello sono state impiegate complessivamente 270 superfici.



*Fig. Modello finale in "Midas FX" (Rif. Modello creato da me)*

Definita in questo modo la geometria del modello nel pre-processore, si è passati alla creazione della mesh.

### ***I Materiali***

La fase di creazione della mesh prevede anche l'attribuzione delle caratteristiche elastiche e di densità del materiale. Per tale modellazione si è scelto di assegnare, in prima battuta, a tutti gli elementi, ad esclusione ovviamente delle aste metalliche e del tetto a falde, lo stesso tipo di muratura. La

valutazione delle caratteristiche della muratura è stata svolta tenendo in conto che non è stata fatta alcuna prova di sorta, ragion per cui, in accordo con la normativa, si ricade nel livello di conoscenza LC 1 a cui corrisponde un fattore di confidenza FC pari a 1,35, il valore minimo per la resistenza nell'intervallo dato dalla tabella della norma relativamente a "muratura in mattoni pieni e malta di calce" e il valore medio per quanto riguarda il modulo elastico.



**Fig.** Parte della controfacciata in cui è visibile il materiale (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)

Quindi a partire da queste considerazioni, dalle tabelle di letteratura, riportate in precedenza, sono stati desunti i valori per questo tipo di muratura:

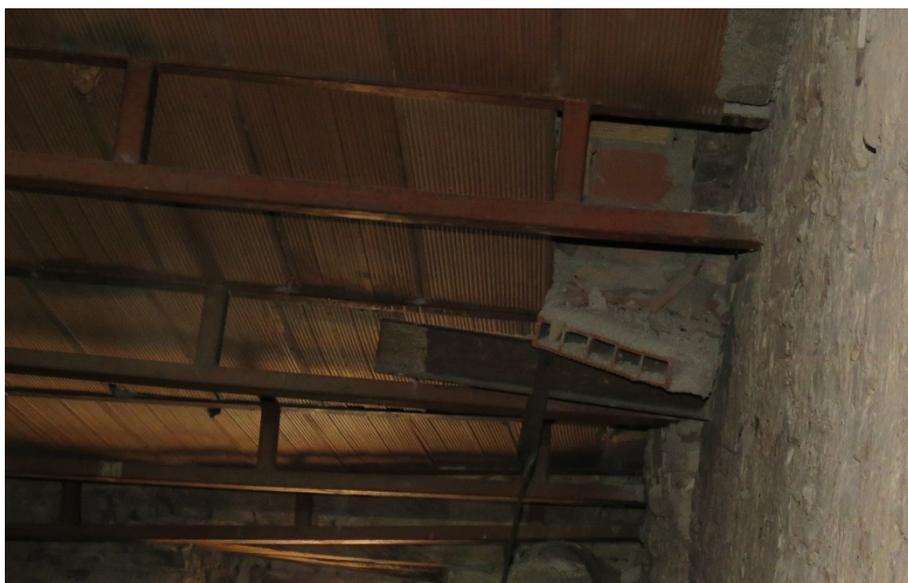
$$E = 1.47 \cdot 10^6 \text{ KN/m}^2$$

$$G = 0.588 \cdot 10^6 \text{ KN/m}^2$$

$$\nu = 0.25$$

$$\rho = 17.65 \text{ KN/m}^3$$

Per quanto riguarda la copertura a falde, tramite le immagini esterne prese dai voli dei droni, ed interne scattate durante il sopralluogo, si è visto essere fatta nella parte più esterna da tegole, nella parte interna da sotto-tegole di tabelloni forati.



*Fig. Tetto visto dall'interno (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)*

Per questa ragione è stata modellata con il suo peso stimato e con una rigidezza molto elevata, al solo fine di simularne l'influenza sul resto della struttura come irrigidimento e come carico.

$$E = 2 \cdot 10^8 \text{ KN/m}^2$$

$$\rho = 9,5 \text{ KN/m}^3$$

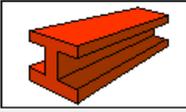
Per quanto riguarda le aste, ovviamente sono state lasciate le caratteristiche del materiale dei profilati IPE120 presenti nel database del programma.

Material Data ✕

**General**

Material ID:  Name:

**Elasticity Data**

Type of Design:  

Steel

Standard:  DB:

Concrete

Standard:  Code:  DB:

Type of Material

Isotropic  Orthotropic

**Steel**

Modulus of Elasticity :  kN/m<sup>2</sup>

Poisson's Ratio :

Thermal Coefficient :  1/[C]

Weight Density :  kN/m<sup>3</sup>

Use Mass Density:  kN/m<sup>3</sup>/g

**Concrete**

Modulus of Elasticity :  kN/m<sup>2</sup>

Poisson's Ratio :

Thermal Coefficient :  1/[C]

Weight Density :  kN/m<sup>3</sup>

Use Mass Density:  kN/m<sup>3</sup>/g

**Plasticity Data**

Plastic Material Name:

**Thermal Transfer**

Specific Heat :  J/kN\*[C]

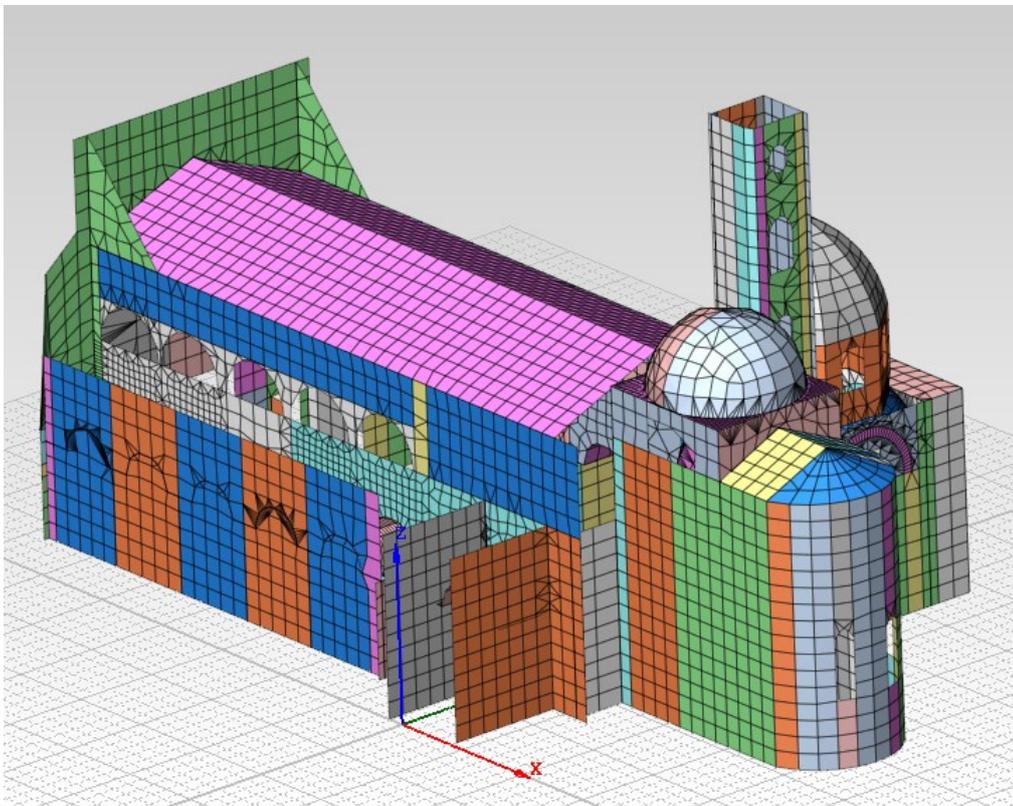
Heat Conduction :  J/m\*hr\*[C]

Damping Ratio :

**Fig. Caratteristiche meccaniche profilati metallici (Rif. Modello Midas da me creato)**

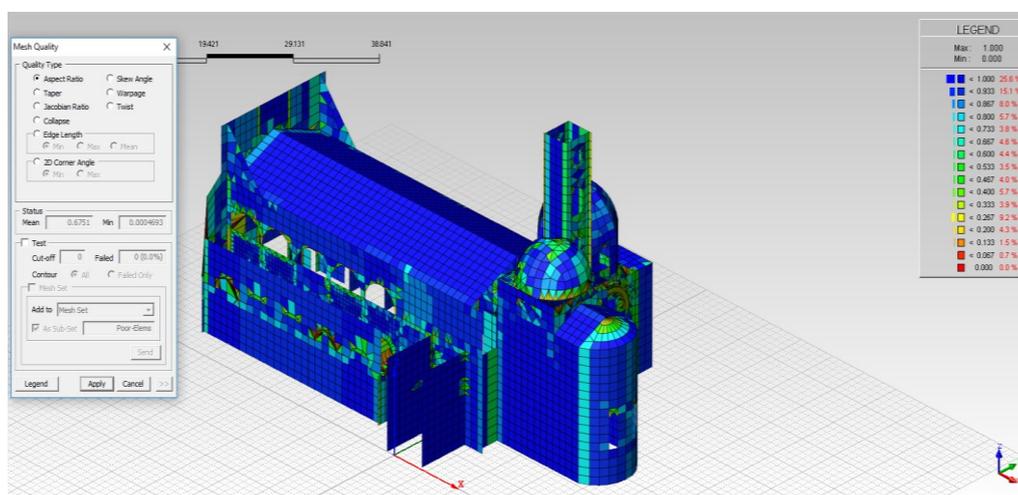
## *La Mesh*

Assegnato il materiale, è stata creata la mesh elemento per elemento, usando elementi a 3 e 4 nodi di dimensione, mediamente, 1mx1m. Alla fine del processo si è giunti ad un numero di elementi bidimensionali pari a circa 10.000. La dimensione della mesh riportata è quella usata per la maggior parte del modello; è chiaro che nelle zone di raccordo tra superfici con geometrie diverse è stato necessario un infittimento manuale al fine di rendere collegati tutti i nodi di tutti gli elementi.

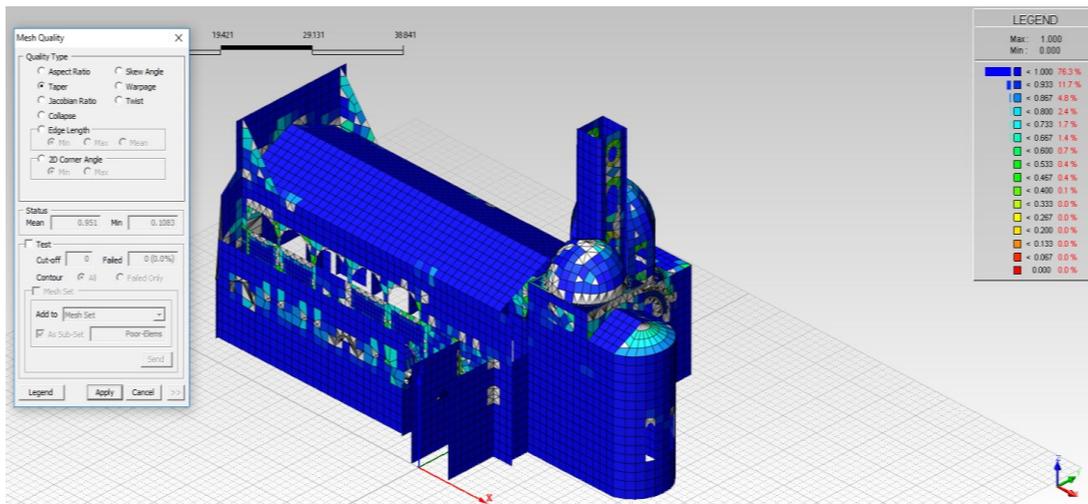


**Fig. Mesh dell'intero modello (Rif. Modello in Midas FX creato da me)**

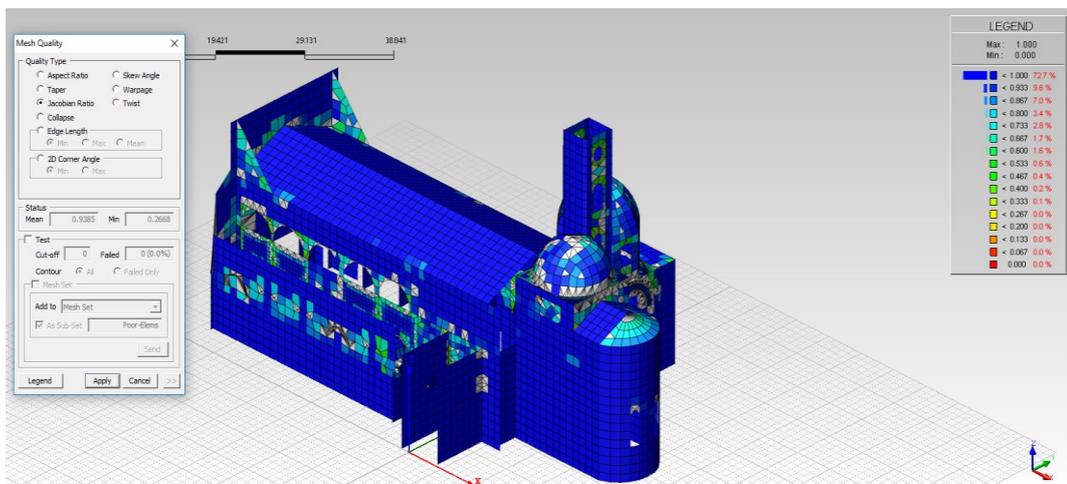
Una volta creata la mesh per ciascun elemento, è stato necessario fare un merge manuale dei nodi tra elementi adiacenti affinché non risultassero entità distinte. Alla fine di tutto il processo è stata fatta una verifica qualitativa della mesh, attraverso il comando “Mesh quality” che ha permesso di verificare la bontà della mesh ottenuta in termini di Aspect Ratio, Taper, Jacobian Ratio, Collapse, Skew Angle, Warpage e Twist.



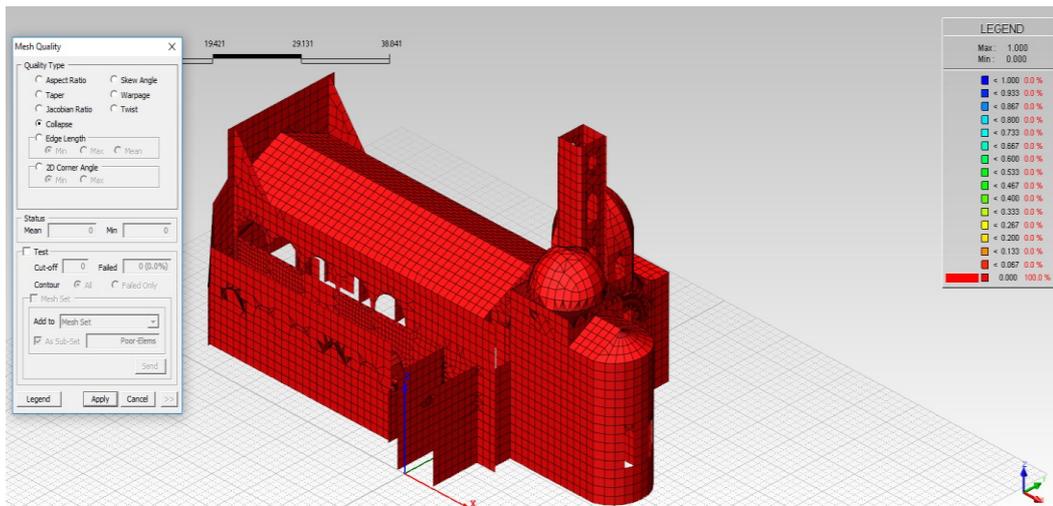
**Fig. Mesh quality: Aspect Ratio (Rif. Modello in Midas FX da me creato)**



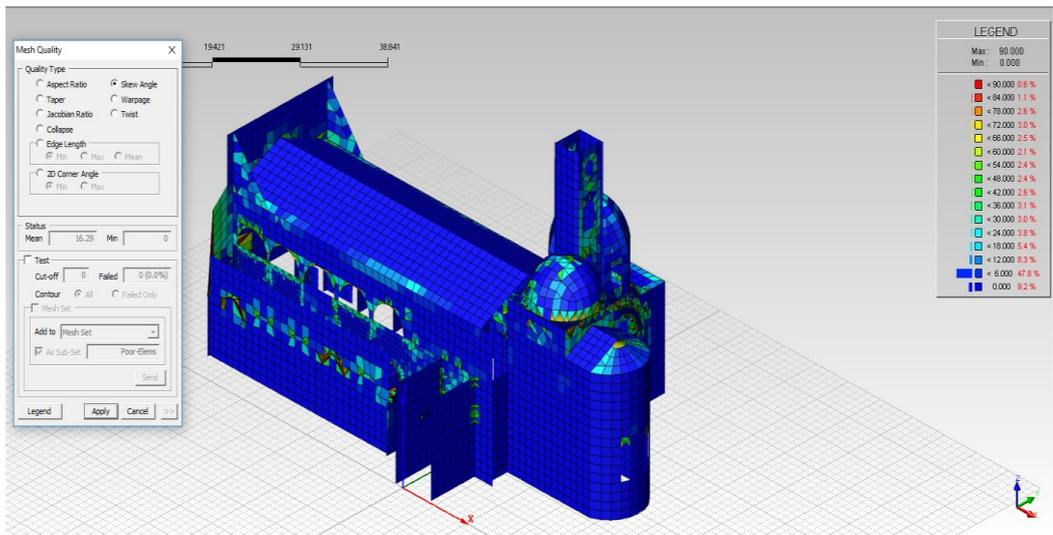
**Fig. Mesh quality: Taper (Rif. Modello in Midas FX da me creato)**



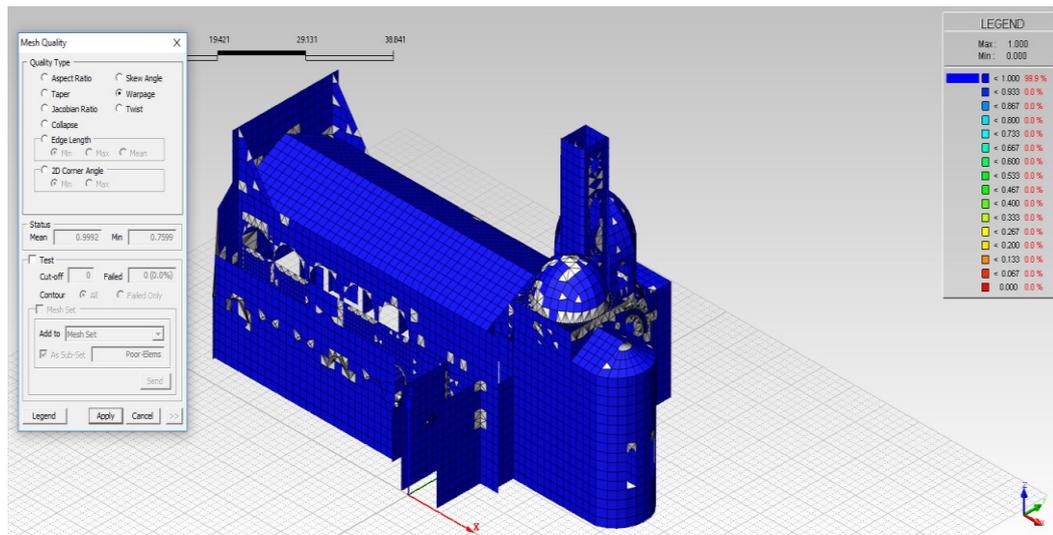
**Fig. Mesh quality: Jacobian Ratio (Rif. Modello in Midas FX da me creato)**



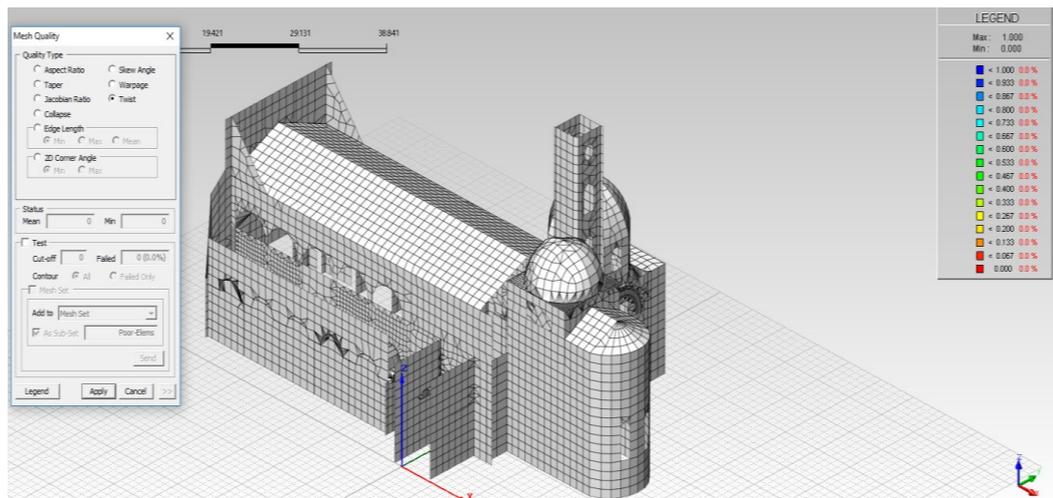
**Fig. Mesh quality: Collapse (Rif. Modello in Midas FX da me creato)**



**Fig. Mesh quality: Skew Angle (Rif. Modello in Midas FX da me creato)**



**Fig. Mesh quality: Warpage** (Rif. Modello in Midas FX da me creato)



**Fig. Mesh quality: Twist** (Rif. Modello in Midas FX da me creato)

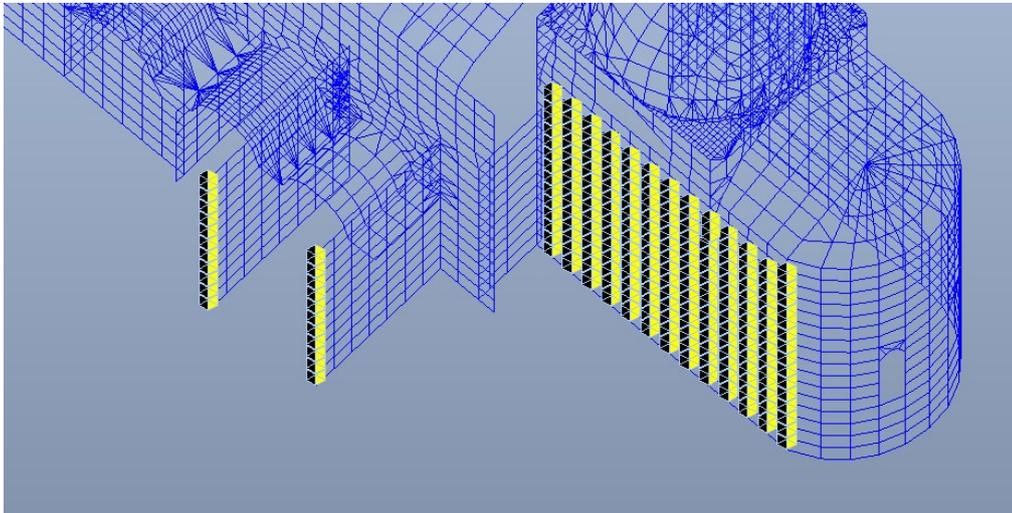
## *Importazione in “Midas Gen” e fasi pre-analisi: Carichi e Vincoli*

Completata la creazione della mesh, è stato possibile importare tale modello in “Midas Gen” per la fase di analisi.

Prima di avviare l'analisi, è bene ricordare che il cassettonato ligneo non è stato modellato, ma costituisce una massa di fatto “appesa” alle capriate. Per tale ragione in questa fase è stato inserito un carico lineare uniformemente distribuito, pari a 4,22 KN/m, sulle sei aste che di fatto portano tale carico.

L'ultimo passo è l'assegnazione dei vincoli. Per quanto riguarda questo aspetto, è stato necessario tenere in considerazione il fatto che la Basilica fa parte di un aggregato edilizio, poiché su di un lato è chiusa dal chiostro e da tutta l'ala conventuale, perciò andrebbero meglio esaminate le interazioni possibili derivanti dalla contiguità strutturale. In prima analisi lungo questa parete sono state disposte “molle”, a comportamento elastico lineare, con una rigidità comparabile a quella della parete, ipotizzando che

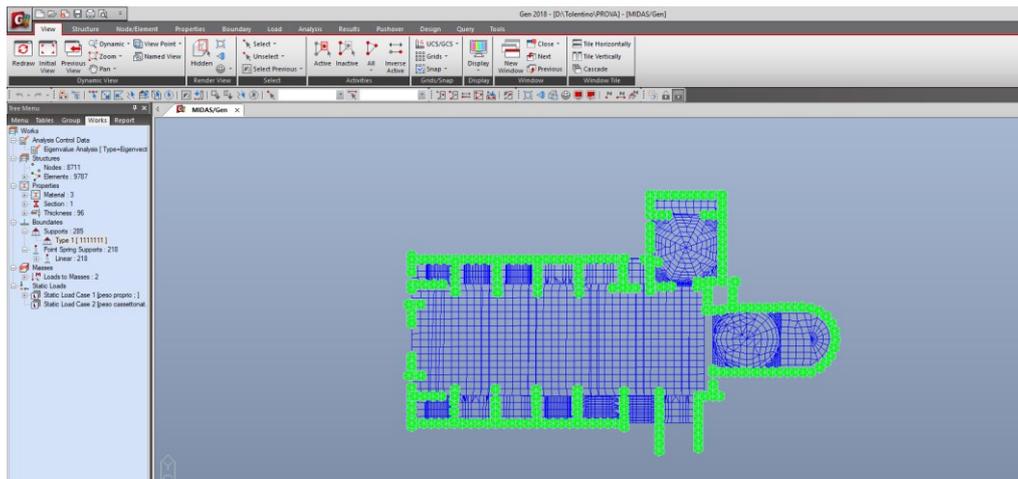
il collegamento con il chiostro e l'ala conventuale sia efficace.



**Fig.** *Vincoli elastici disposti lungo la parete comune al chiostro (Rif.*

*Modello in Midas Gen da me creato)*

Anche a tutti i nodi con  $z=0$  (piano campagna) per ipotesi è stato assegnato un vincolo di tipo incastro, non avendo nessuna informazione, al momento, riguardo il rapporto struttura-terreno.



**Fig. Vincoli alla base (Rif. Modello in Midas Gen da me creato)**

*Ora è stato definito tutto il necessario per procedere all'analisi.*

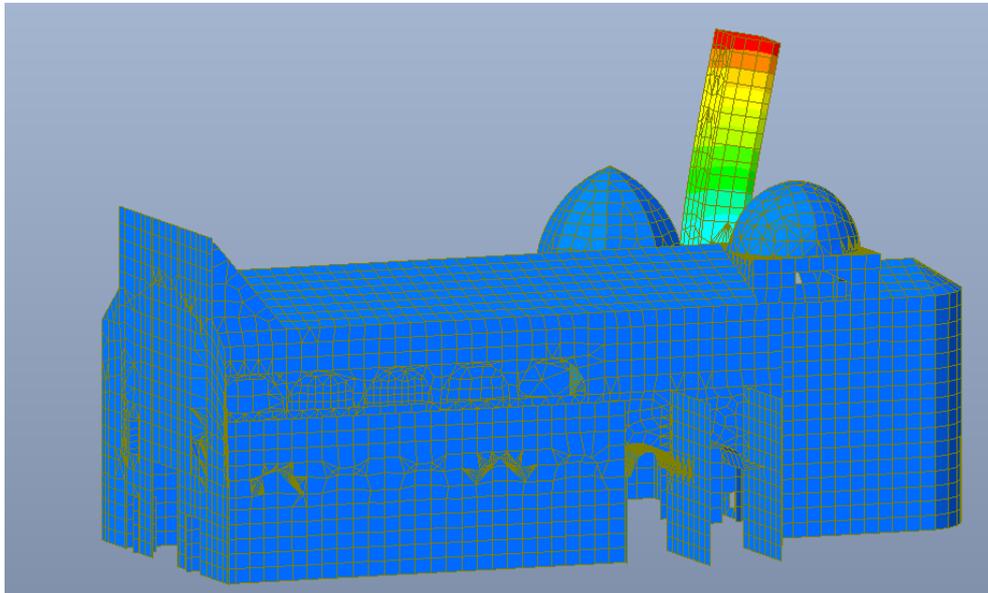
## ***Analisi Dinamica Modale***

Attraverso l'analisi dei dati raccolti dal sistema di monitoraggio dinamico, erano noti i primi modi di vibrare della Basilica, in termini di frequenze e forme modali. Questi dati si sono rivelati fondamentali, perché proprio dal confronto tra questi e i risultati dell'analisi dinamica modale è stato possibile capire se erano stati commessi errori di valutazione durante la modellazione, nonché l'effettiva valutazione dei meccanismi di collasso, prima solo ipotizzati a partire dalla tipologia di struttura e dal quadro fessurativo/deformativo presente.

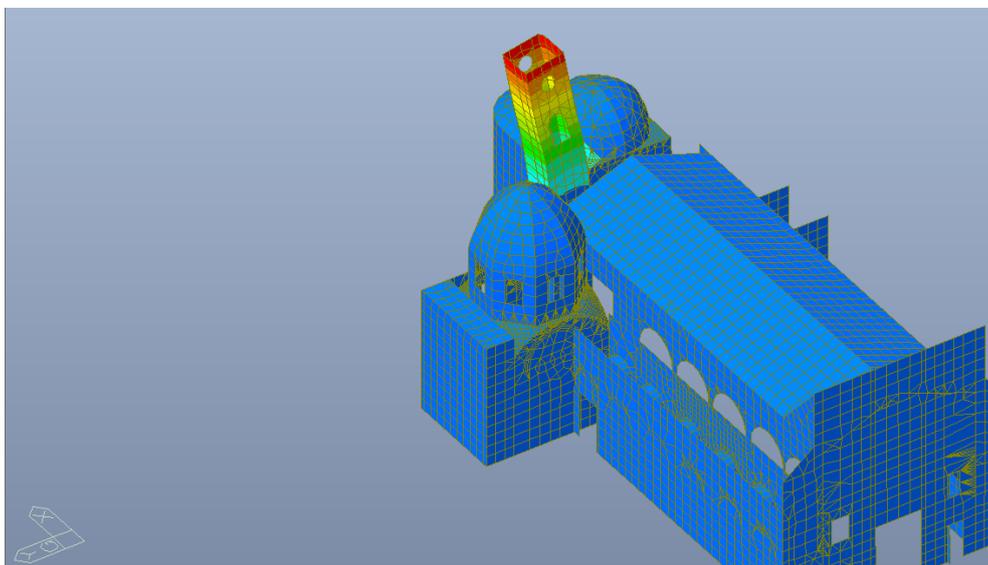
Dall'analisi modale si è visto che i primi due modi di vibrare sono quelli relativi alla torre. Nel primo modo si osserva una prevalente flessione lungo l'asse X, mentre nel secondo una prevalente flessione lungo l'asse Y. Questo risultato, anche in termini di frequenza è assolutamente congruente a quello registrato dal sistema di monitoraggio.

Il terzo e quarto modo di vibrare sono quelli che interessano per lo più l'aula nelle due direzioni orizzontali, il terzo lungo Y

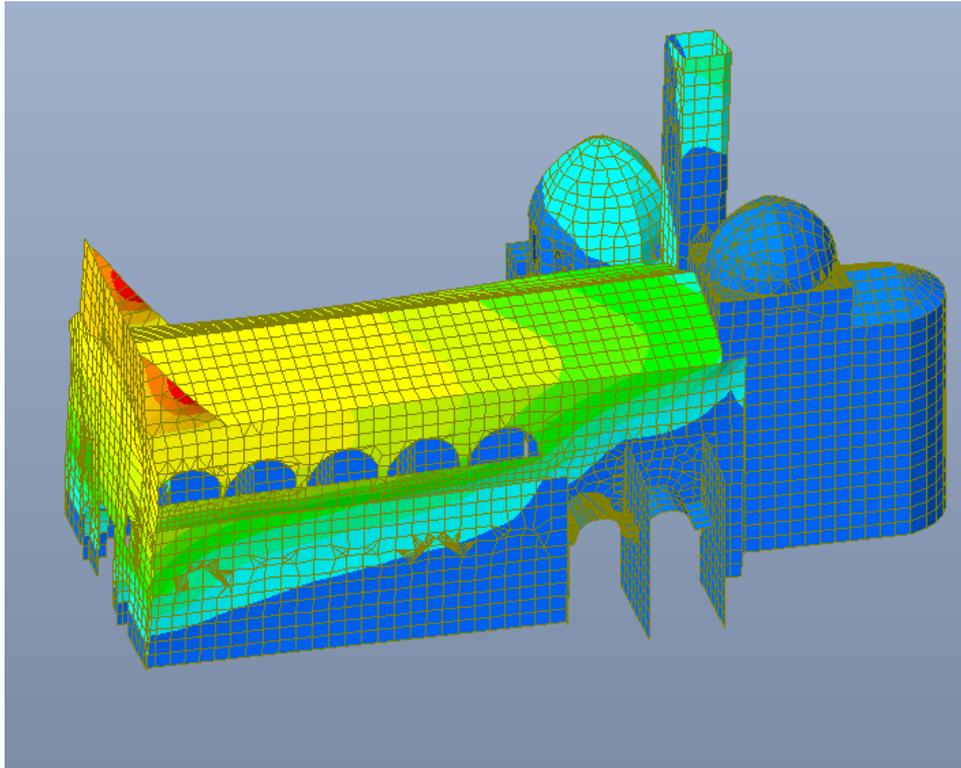
e il quarto lungo X. Anche questi dati sono sovrapponibili con quelli ottenuti dal monitoraggio.



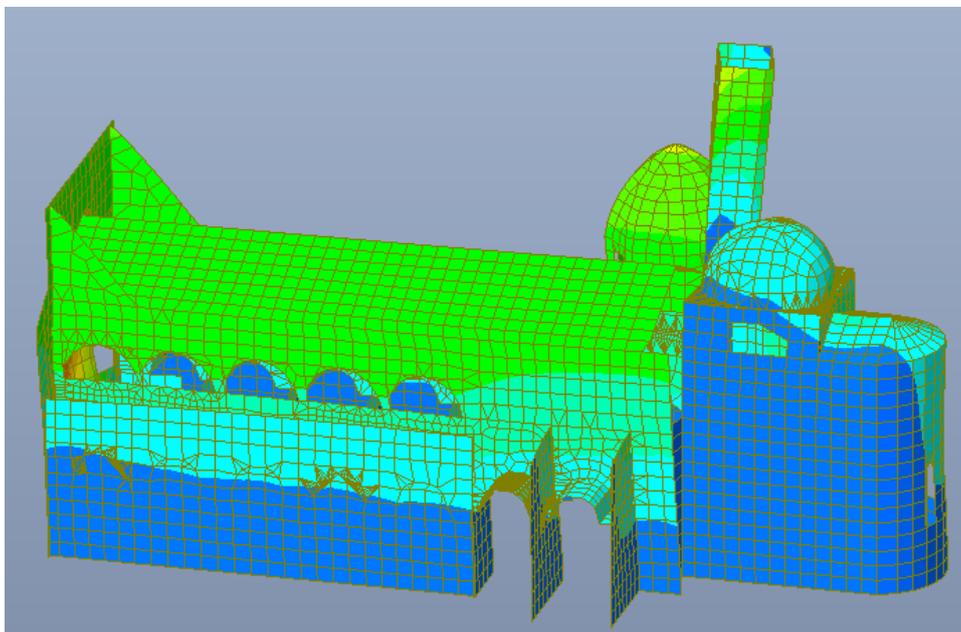
**Fig.** *Primo Modo, flessione lungo X (Rif. Modello da me creato)*



**Fig.** *Secondo Modo, flessione lungo Y (Rif. Modello da me creato)*



*Fig. Terzo Modo, modo dell'aula lungo Y (Rif. Modello da me creato)*



*Fig. Quarto Modo, modo dell'aula lungo X (Rif. Modello da me creato)*

MODE NO.	F R E Q U E N C Y [RAD/SEC]	[CYCLES/SEC]	PERIOD [SEC]
1	1.025646E+01	1.632367E+00	6.12607E-01
2	1.208326E+01	1.923110E+00	5.19991E-01
3	2.121030E+01	3.375725E+00	2.96233E-01
4	2.130927E+01	3.391475E+00	2.94857E-01

**Fig.** Output analisi dinamica (Rif. Modello da me creato)

Modo	Frequenza [Hz]	$\zeta$ [%]	Descrizione
1	1.581 (0.018)	1.16 (0.22)	Flex. X
2	1.849 (0.021)	1.39 (0.84)	Flex. Y
3	2.997 (0.046)	1.45 (0.29)	Aula Y
4	3.124 (0.026)	1.18 (0.20)	Aula X

**Fig.** Risultati monitoraggio dinamico (Rif. "Post-earthquake dynamic monitoring of Basilica of St. Nicholas of Tolentino di Donato Sabia, Takayoshi Aoki, Daniele Costanzo, Renato Lancellotta, Antonino Quattrone)

Dal confronto dei dati, in termini di frequenze, si vede come i dati relativi ai primi due modi siano estremamente simili, mentre quelli relativi al terzo e quarto modo differiscano di circa il 10%. Essendo gli ultimi due modi quelli legati all'aula, questa differenza potrebbe provenire dalla forze troppo elevata rigidità assunta per i vincoli elastici che simulano

l'effetto dell'ala conventuale adiacente, su cui però null'altro si può dire non avendo informazioni a riguardo.

## ***Analisi Statica Non Lineare***

Questo tipo di analisi non è di facile adozione per qualsiasi tipologia di struttura, ma è necessaria per valutare meglio il comportamento di una struttura storica complessa, come quella oggetto di studio, al fine di comprenderne il danneggiamento.

A seguito del sopralluogo, erano state rilevate una serie di lesioni, causate dal sisma, in corrispondenza dell'abside, dell'attacco della facciata e all'attacco della cupola in corrispondenza dell'altare.

Partendo dal modello "integro", ovvero senza un'opportuna modellazione delle lesioni, è stata svolta un'analisi statica non lineare al fine di valutare il processo di formazione di tali lesioni e le condizioni di carico che le hanno generate.

Data la tipologia di struttura, è stato impossibile definire un piano rigido, ragion per cui l'unica analisi possibile è stata quella in controllo di forze, che a differenza di quella in controllo di spostamenti, non permette di cogliere anche il ramo di "softening" della curva forza-spostamento.

Per quanto riguarda il legame costitutivo adottato, il programma prevede come unica possibilità per la modellazione della muratura, il legame di tipo “Strumas”. Tale legame costitutivo vede il materiale scomposto nelle sue componenti: blocco, malta orizzontale e malta verticale; anisotropo e con possibilità di rottura a trazione di tipo elasto-plastico, mentre è linearmente elastico a compressione.

Il metodo Strumas procede omogeneizzando i parametri meccanici a partire da quelli delle singole componenti e dalle dimensioni geometriche. In questo caso non si possedevano tutte queste informazioni, perciò sono state assegnate, a ciascuna componente, le stesse caratteristiche, che sono quelle compressive della muratura oggetto di studio.

In Midas questo legame prevede la rottura elasto-plastica solo a trazione, non è invece prevista la rottura a compressione. Per tale ragione è stato possibile definire solo la resistenza a trazione (pari a  $60 \text{ KN/m}^2$ ) e il coefficiente di Poisson.

In questo caso è stata considerata solo la non linearità del materiale, senza tenere in conto la non linearità geometrica.

E' stato inoltre possibile individuare, ad ogni step di carico, i punti di Gauss in cui è avvenuta la rottura a trazione, definiti come "Yield Point", in modo da valutare il modo in cui si sono formate le lesioni e lo stato tensionale corrispondente.

L'analisi dipende dalla sequenza di carico, per tale ragione è stato necessario applicare per primi i carichi gravitazionali (ovvero il peso proprio e il peso del cassettonato), e solo dopo le spinte orizzontali.

Per quanto riguarda l'applicazione dei carichi orizzontali, sono state distinte quattro condizioni:

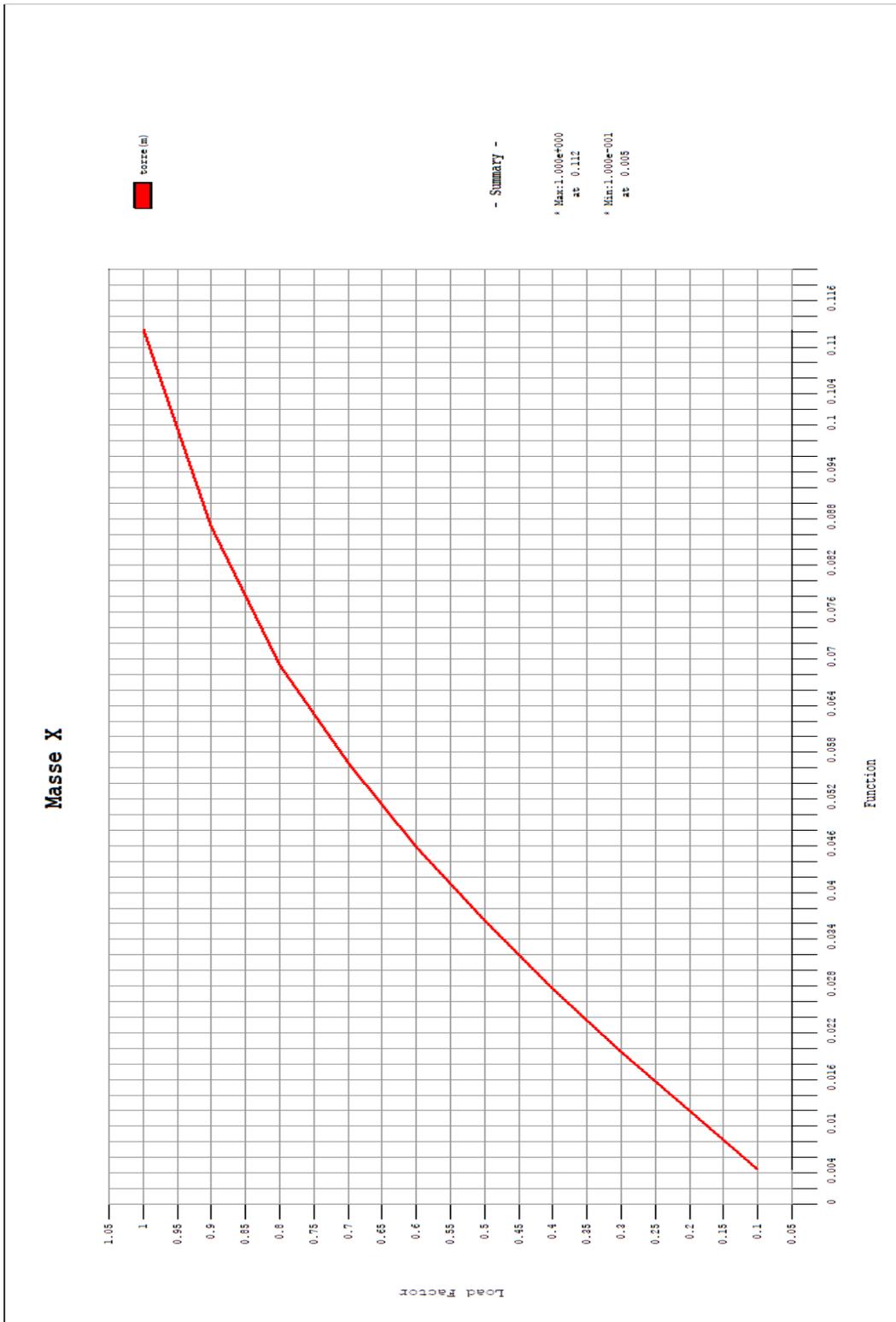
- distribuzione proporzionale alla massa in direzione X;
- distribuzione proporzionale alla massa in direzione  $-X$ ;
- distribuzione proporzionale alla massa in direzione Y;
- distribuzione proporzionale alla massa in direzione  $-Y$ .

Nei grafici di seguito sono mostrati i diagrammi spostamento-"load factor" in ciascuna delle condizioni, del punto di controllo.

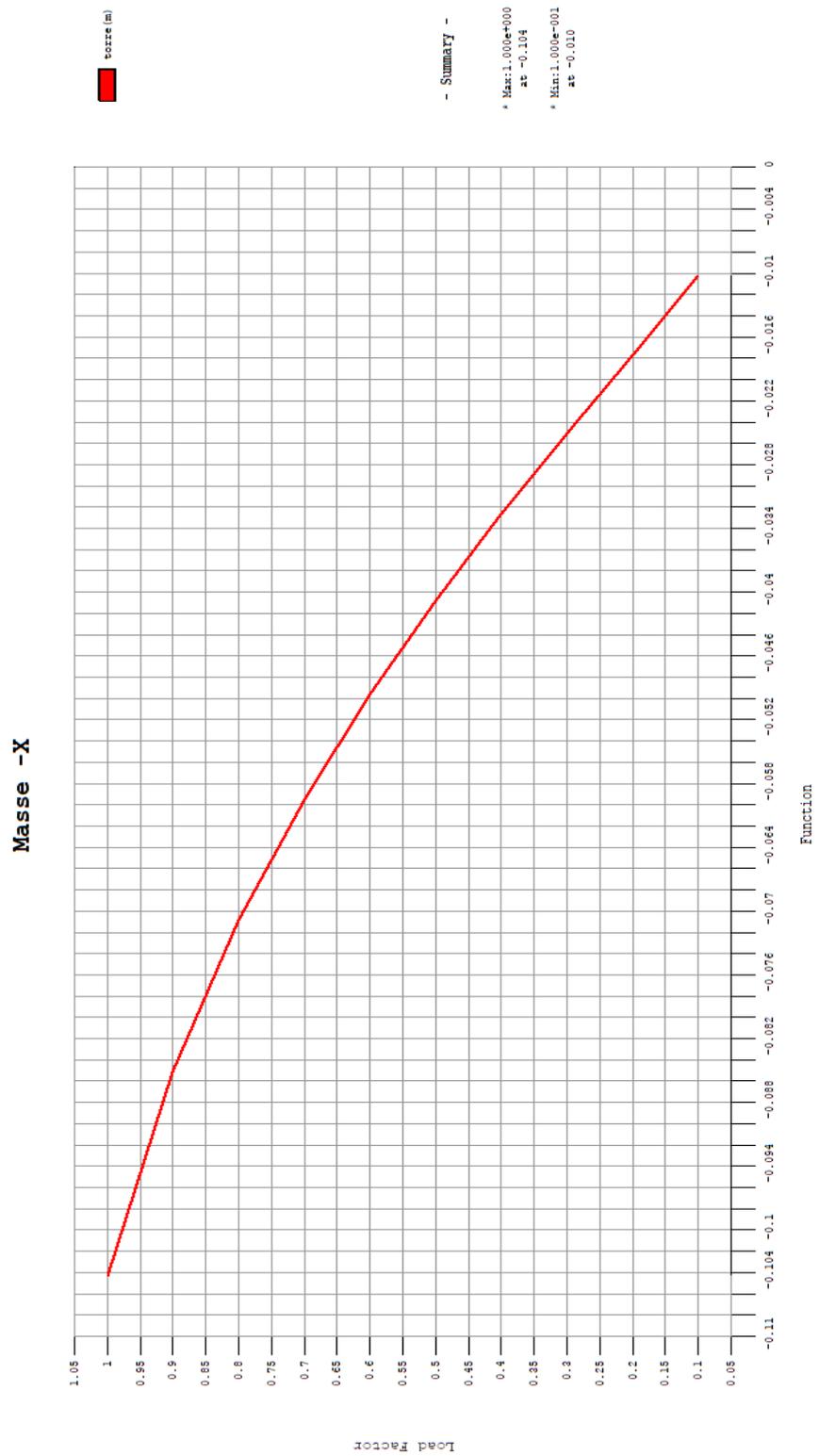
Il "load factor" è il coefficiente che va a moltiplicare la forza peso ad ogni passo di carico. In questo caso la condizione load

factor pari ad 1 corrisponde ad una spinta orizzontale pari a 0,6 volte la forza peso; questa scelta è stata dettata dal fatto che già per questo valore, in tutti i casi, si aveva un comportamento già ben oltre l'elasticità, per questo non aveva senso appesantire il calcolo con valori superiori.

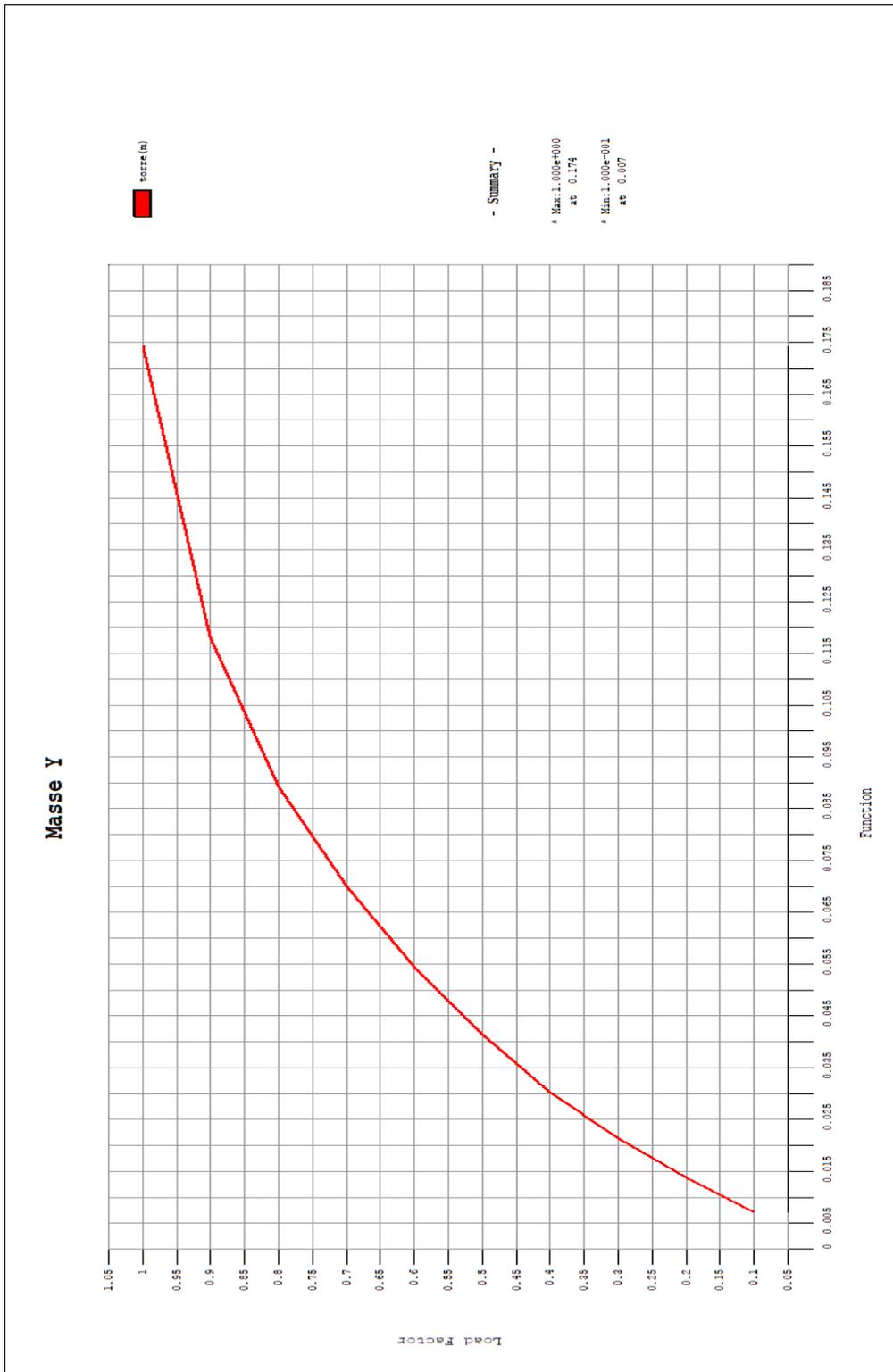
In questi grafici lo spostamento è espresso in metri.



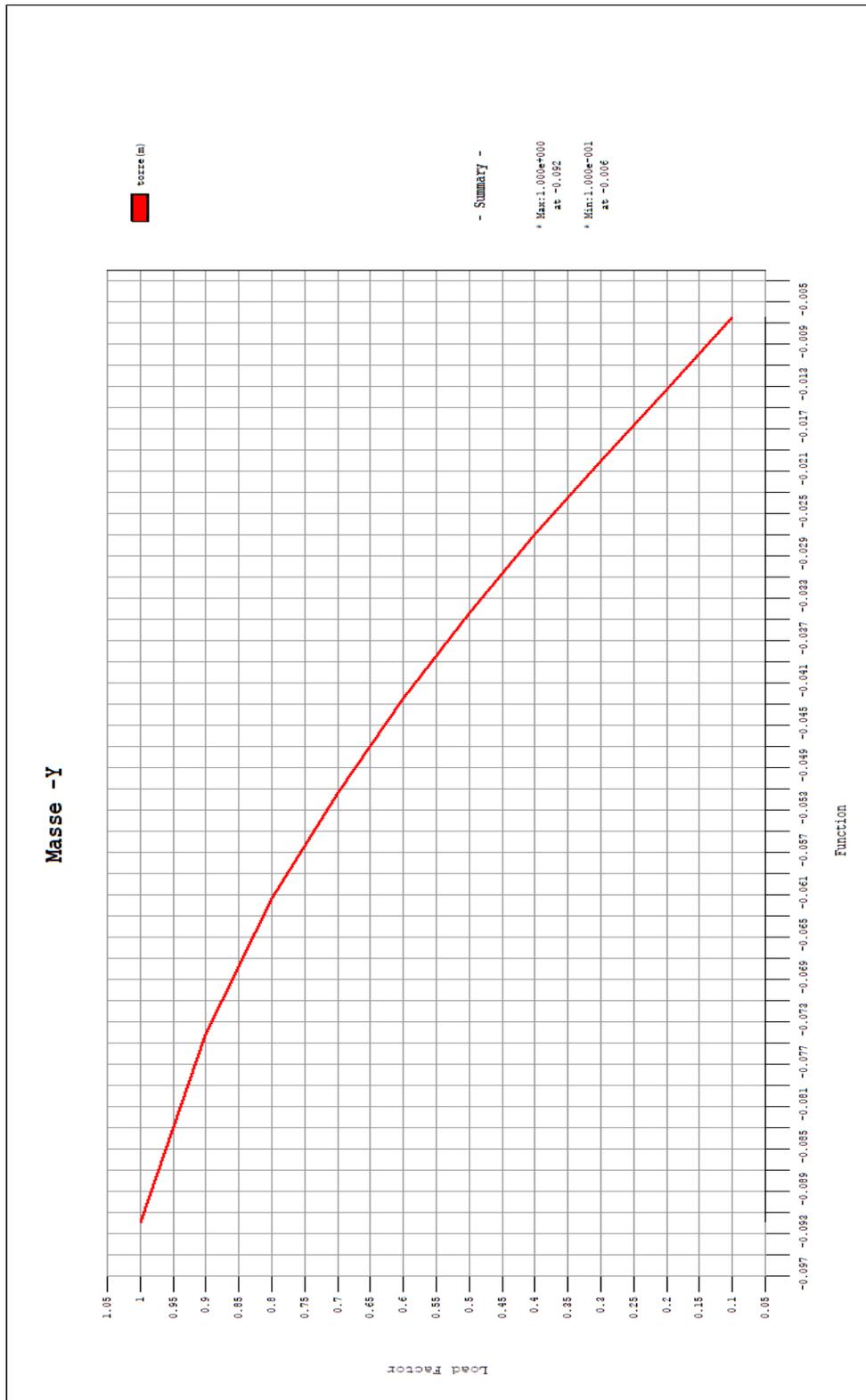
**Fig. Curva di risposta per la distribuzione Masse X**



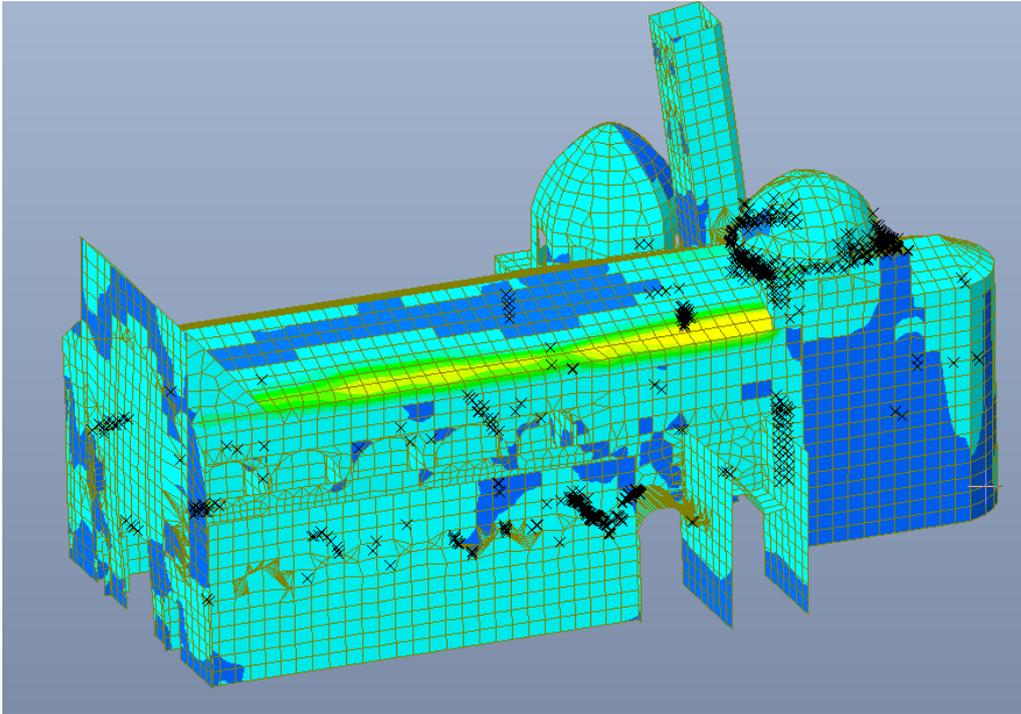
**Fig. Curva di risposta per la distribuzione Masse -X**



**Fig. Curva di risposta per la distribuzione Masse Y**



**Fig. Curva di risposta per la distribuzione Masse – Y**

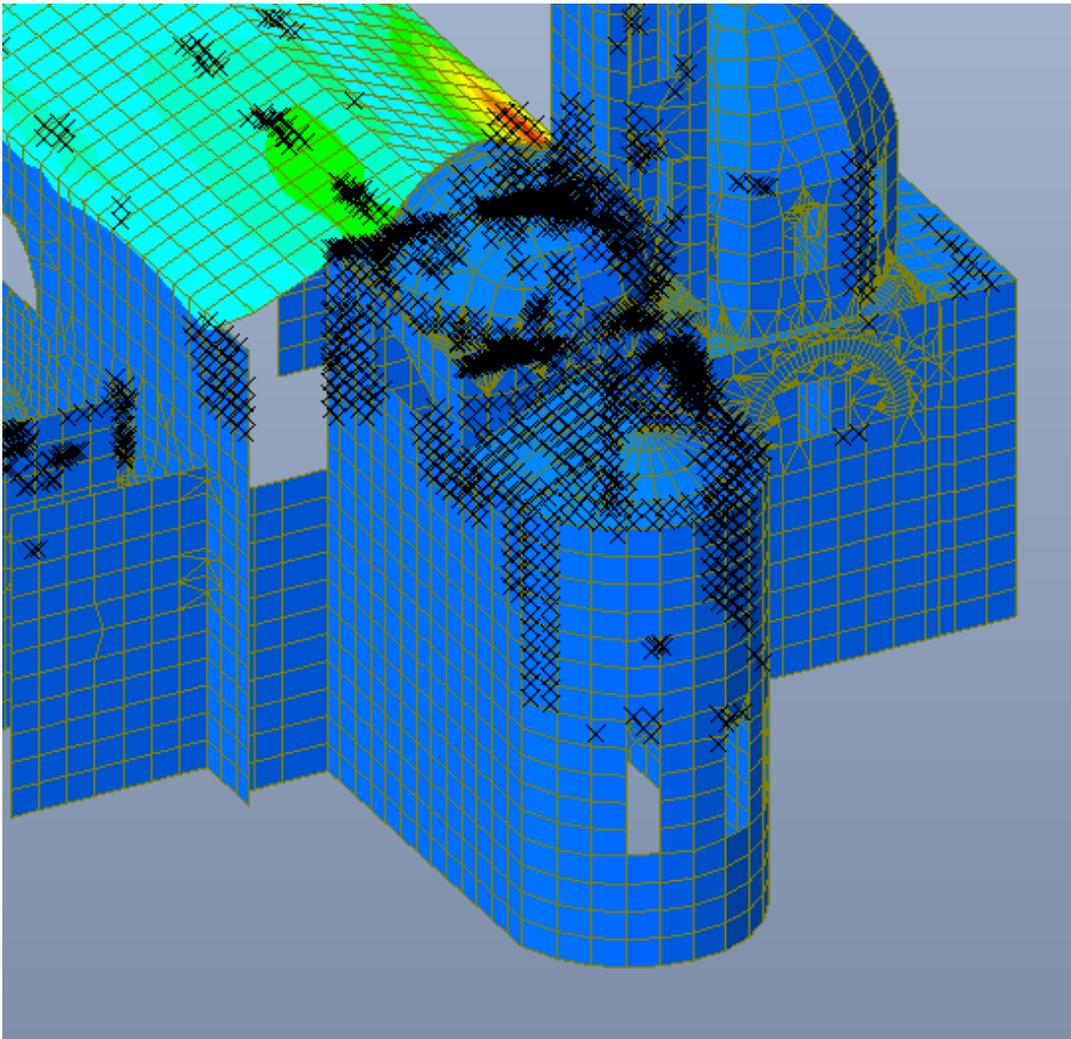


*Fig. Yield Point per la distribuzione Masse -X, step6 (Rif. Modello creato da me)*

Dalla rappresentazione dei punti di rottura per la distribuzione "Masse -X" è possibile avere riscontro delle lesioni riscontrate lungo l'attacco della facciata, nonché in corrispondenza dell'attacco della cupola in corrispondenza dell'altare. Inoltre è possibile osservare la formazione di lesioni in corrispondenza dell'ordine di aperture lungo la navata (nella cornice superiore), condizione effettivamente rilevata in loco.

Osservazione importante è che le rotture presenti in corrispondenza della facciata non sono del tutto rispondenti al

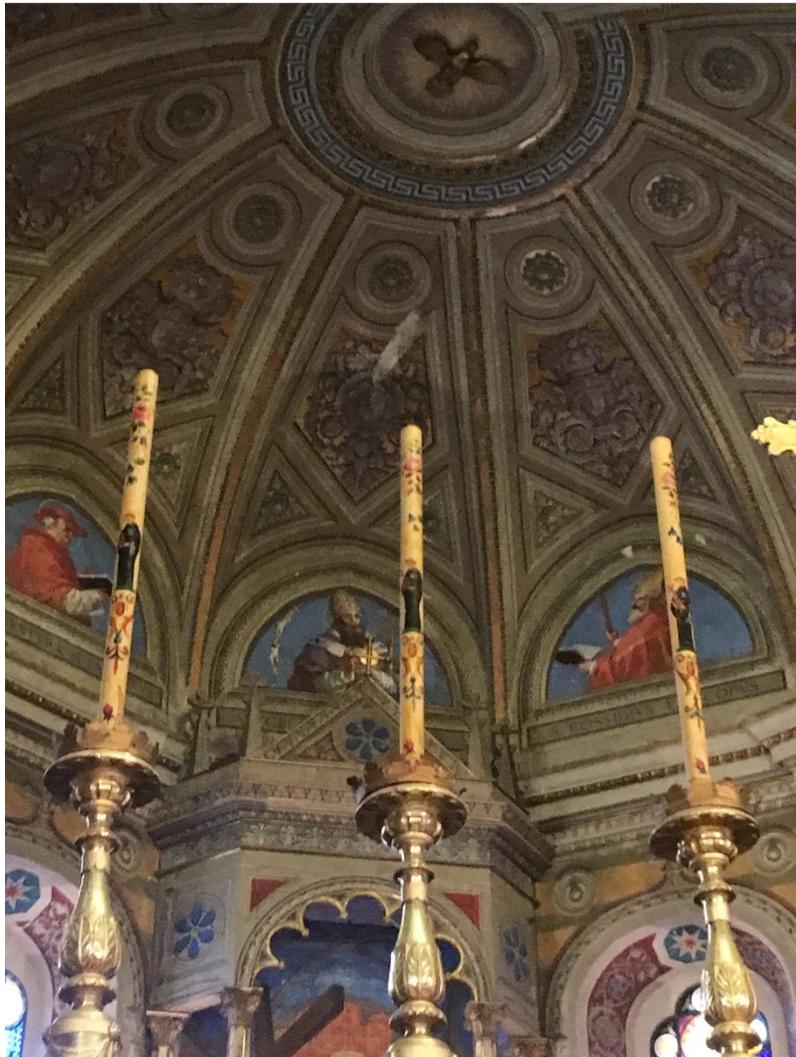
meccanismo di distacco della facciata, in prima istanza ipotizzato, essendo un meccanismo classico per questo tipo di struttura; ma potrebbero essere un incipit di tale meccanismo.



*Fig. Yield Point per la distribuzione Masse Y, step 5 (Rif. Modello creato da me)*

Per quanto riguarda i punti di rottura relativi alla distribuzione "Masse Y", li ritroviamo in corrispondenza dell'abside, fatto del

tutto coincidente con le lesioni realente riscontrate, così come riscontriamo lesioni nell'attacco della cupola.



*Fig. Lesione in corrispondenza dell'abside (Rif. Fotografie del sopralluogo a cura del Politecnico di Torino)*

E' importante osservare come i livelli di carico in corrispondenza dei quali si osserva la formazione delle lesioni effettivamente riscontrate in loco in entrambe le direzioni, siano

coerenti con l'evento sismico avvenuto il 30 Ottobre 2016. Infatti, guardando le mappe di squotimento relative a questo evento sismico, troviamo un valore di PGA circa pari all'11%(g). Se teniamo in conto il fatto che, analizzando i dati ottenuti dal sistema di monitoraggio, tale accelerazione viene amplificata di circa 4 volte in corrispondenza del campanile, della facciata e dell'aula, ritroviamo un valore circa pari al 44%(g), del tutto riconducibile al valore di forza che nei vari casi genera le lesioni (circa il 40% del peso complessivo).

TLN:		Agency: DPC, Dipartimento Protezione Civile			
Lat: 43.21590 Lon: 13.25838		Distance: 31.97 km from source			
Intensity: 7.3					
Station Comp	PGV (cm/s)	PGA (%g)	PSA: 0.3 sec (%g)	1.0 sec (%g)	3.0 sec (%g)
HGN	<b>9.0209</b>	8.6718	21.9119	5.3193	<b>1.5599</b>
HGE	8.2179	<b>11.3704</b>	<b>49.8753</b>	<b>8.2754</b>	1.3552
HGZ	3.7716	6.9012	18.5834	3.2799	0.7840

**Fig.** Dati del sisma del 30 Ottobre 2016 (Rif. Sito dell'INGV, archivio delle shakemap, <http://shakemap.rm.ingv.it/shake/archive/2016.html>)

Fatte queste osservazioni, a partire dalle curve di risposta, sono state ricavate le curve di capacità, ovvero a partire dalla struttura a più gradi di libertà si passa all'oscillatore semplice ad un solo grado di libertà.

Ciascun oscillatore semplice sarà caratterizzato da una massa  $m^*$  definita come:

$$m^* = \sum_1^n m_i \Phi_i$$

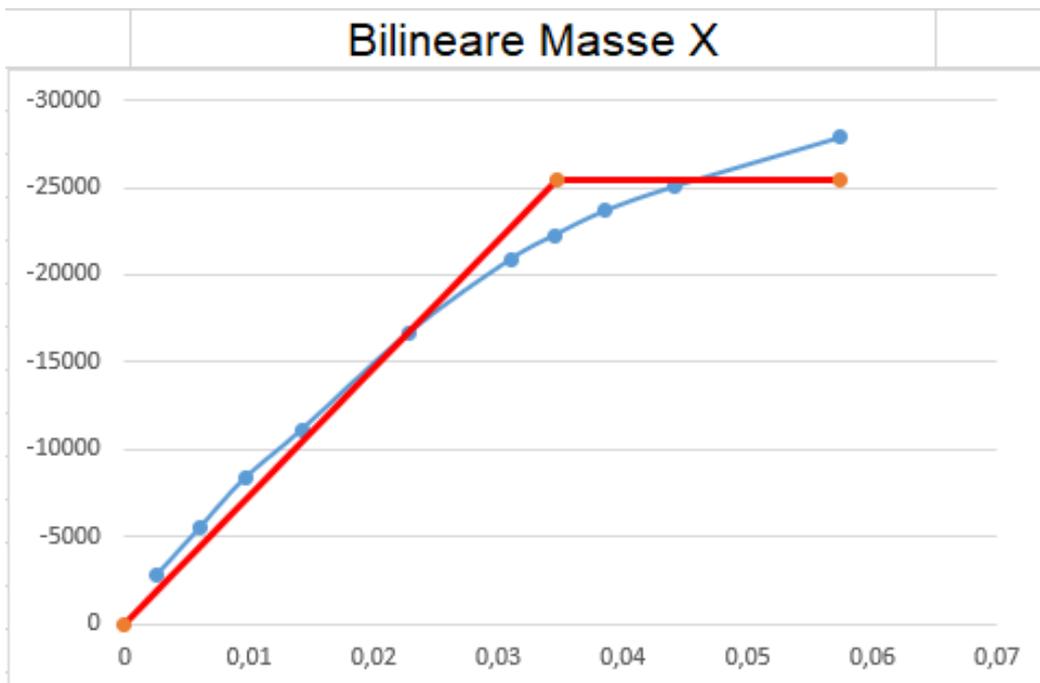
La forza  $F^*$  e lo spostamento  $d^*$  risultano rispettivamente pari a:

$$F^* = V/\Gamma$$

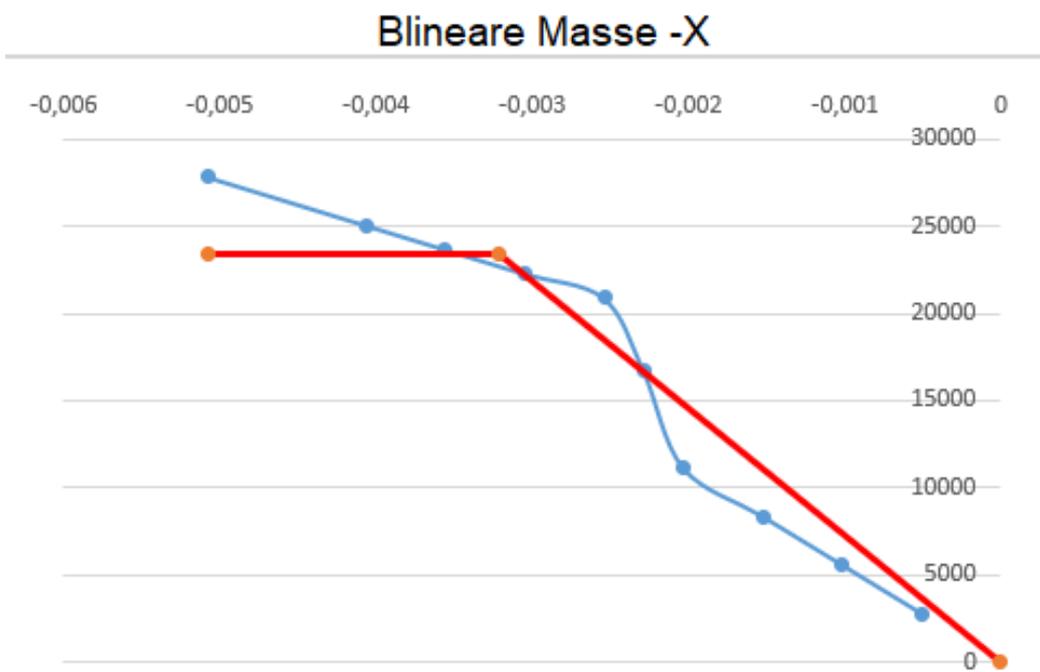
$$d^* = D/\Gamma$$

dove  $\Gamma$  è il coefficiente di partecipazione modale.

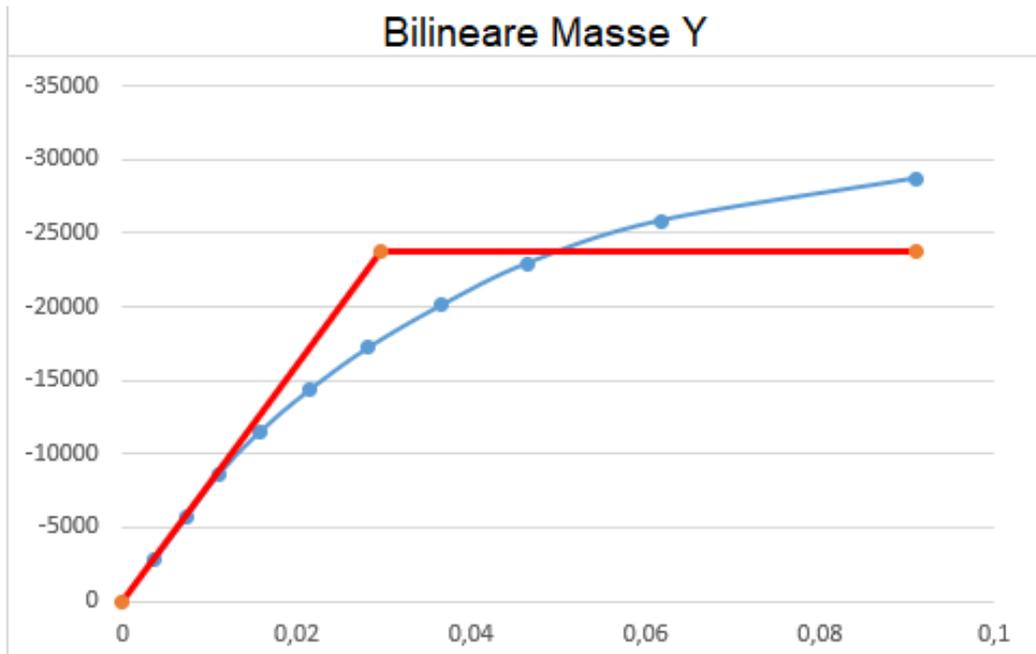
Le curve di capacità sono state poi trasformate nelle bilineari equivalenti; il primo ramo passa per l'origine e per il punto  $0,6F_{bu}^*$ , arrivando a  $F_y^*$ , il secondo ramo è orizzontale e arriva fino allo spostamento ultimo. Il punto  $(F_y^*, d_y^*)$  si ottiene dall'equivalenza energetica (ovvero uguagliando le aree sottese alla bilineare e alla curva iniziale).



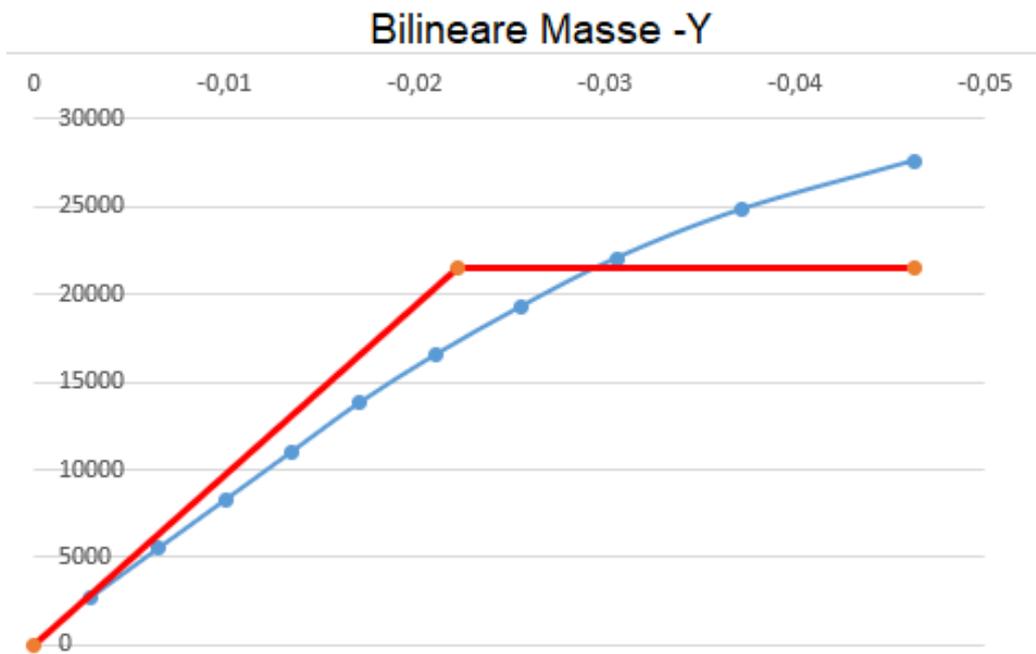
**Fig. Bilineare relativa al caso Masse X (Ascisse: spostamento [m],  
Ordinate: Forza [KN])**



**Fig. Bilineare relativa al caso Masse -X**



*Fig. Bilineare relativa al caso Masse Y*



*Fig. Bilineare relativa al caso Masse -Y*

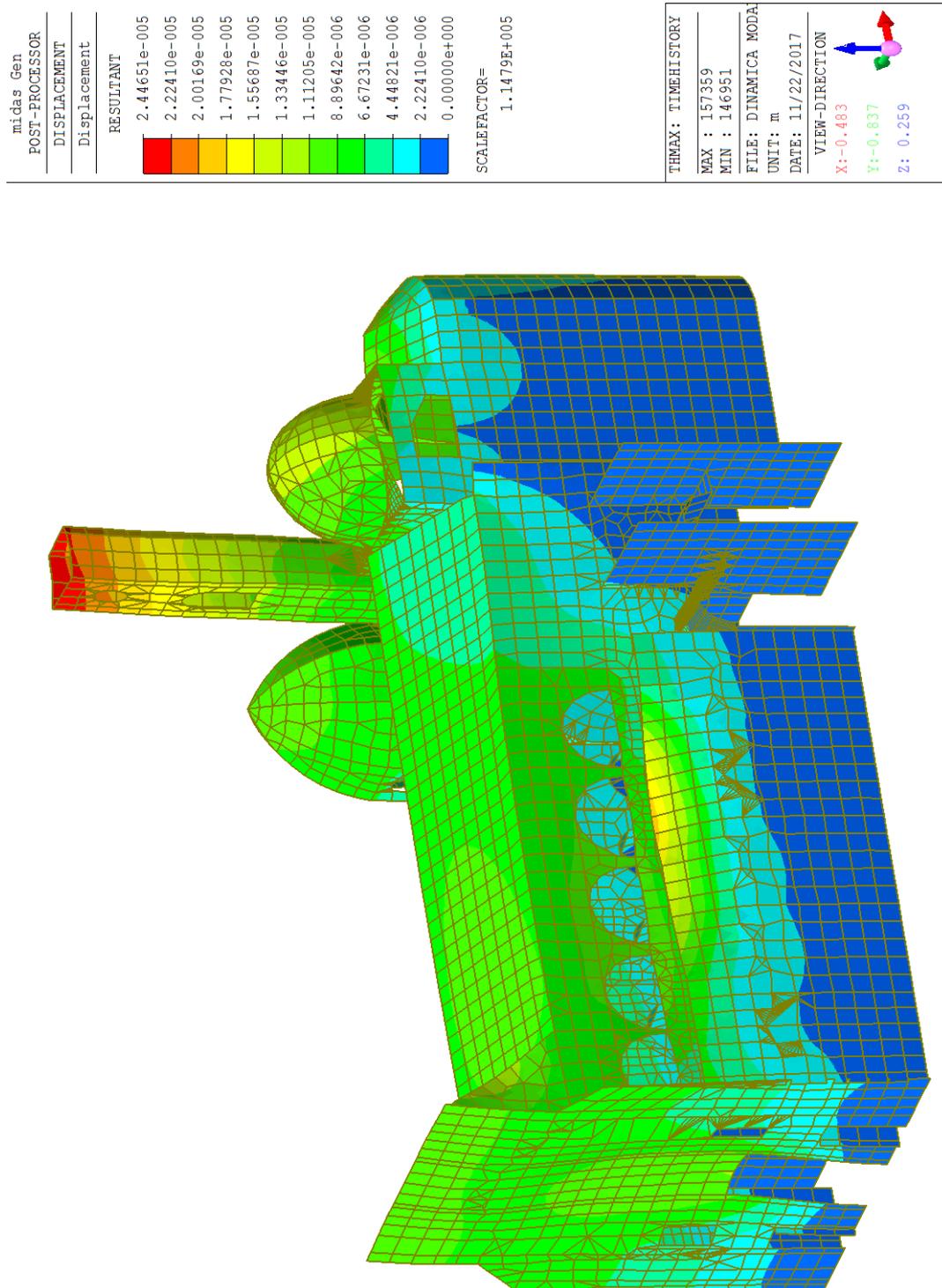
Ricavate le bilineari, per ciascuna è stata valutata la massima risposta del sistema ad un grado di libertà, valutando lo spostamento massimo. Dal confronto tra gli spostamenti massimi in ciascun caso e la capacità massima di spostamento, si è visto che in nessun caso è stata raggiunta la sua capacità ultima, pur avendo riportato lesioni. (Tabelle di calcolo negli Allegati 4,5,6 e 7)

## ***Analisi Time History***

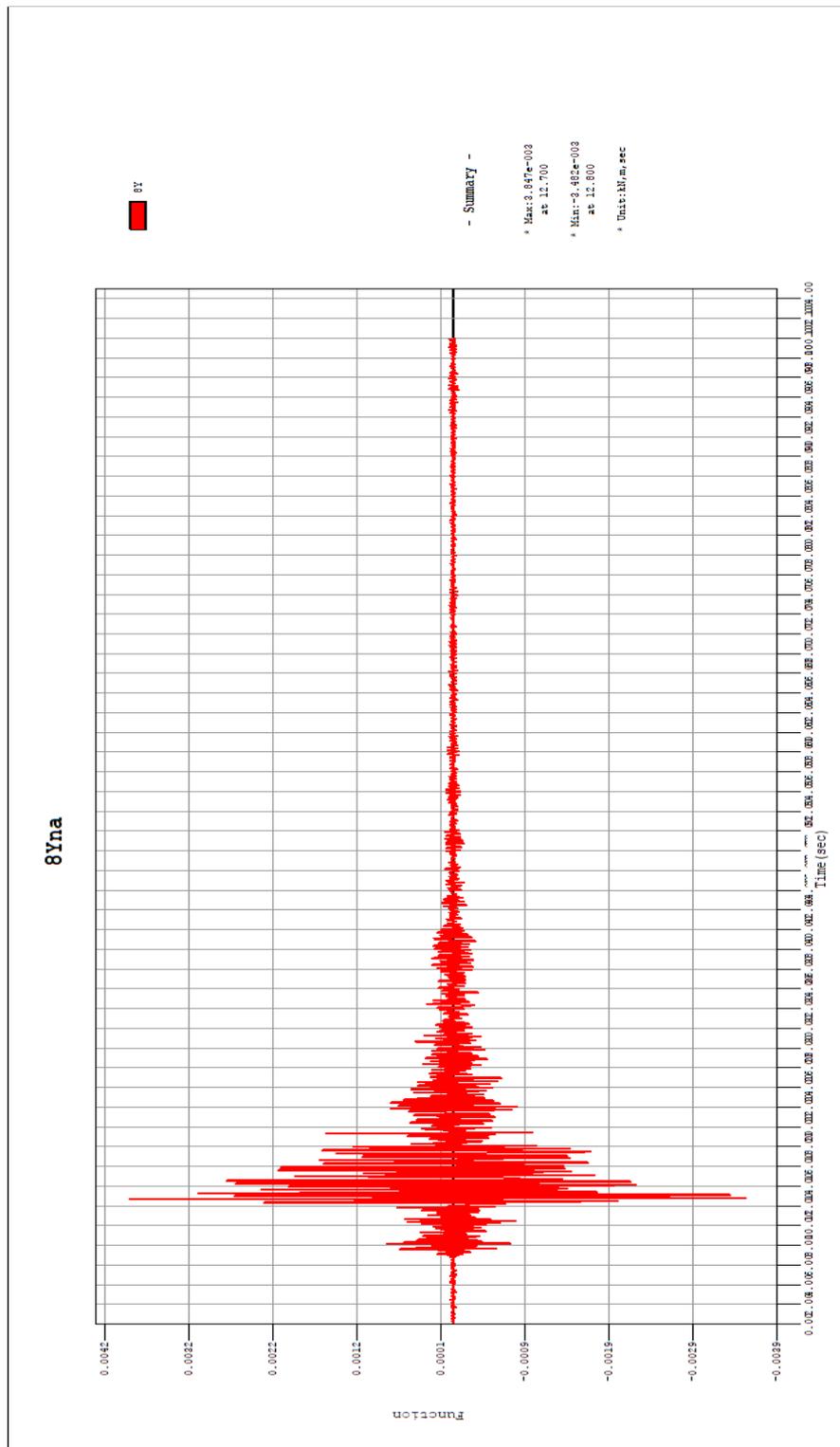
Questa tipologia di analisi, dinamica non lineare, permette di determinare la risposta della struttura tramite la diretta integrazione delle equazioni del moto, inserendo come forzante l'accelerogramma registrato dal sistema di monitoraggio. In questo modo si riesce meglio a cogliere la natura tridimensionale del problema, inoltre l'idea è quella di ricavare, a partire da questa analisi, le storie temporali in termini di accelerazione dei punti in cui sono stati collocati i sensori, in modo da poter confrontare tali risultati con quelli registrati.

Sono stati quindi inseriti gli accelerogrammi registrati del sisma avvenuto il 27 Aprile 2017, sisma più rilevante da quando è stato attivato il sistema di monitoraggio, relativi alle tre direzioni (X, Y, Z).

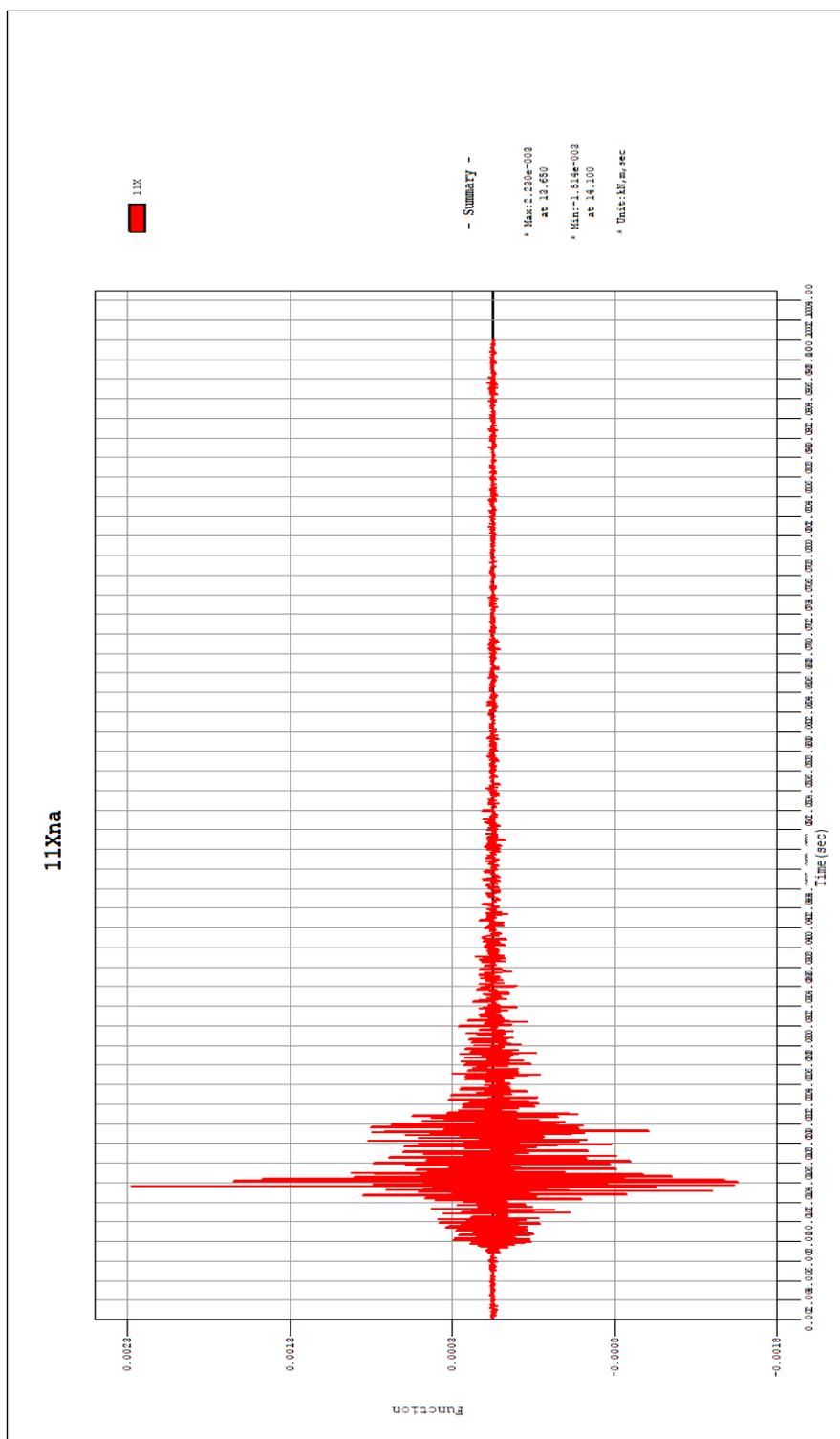
In questo tipo di analisi è stato necessario definire la matrice di smorzamento viscoso, attraverso il metodo di Rayleigh, che restituisce tale matrice come combinazione lineare della matrice delle masse e di quella di rigidezza.



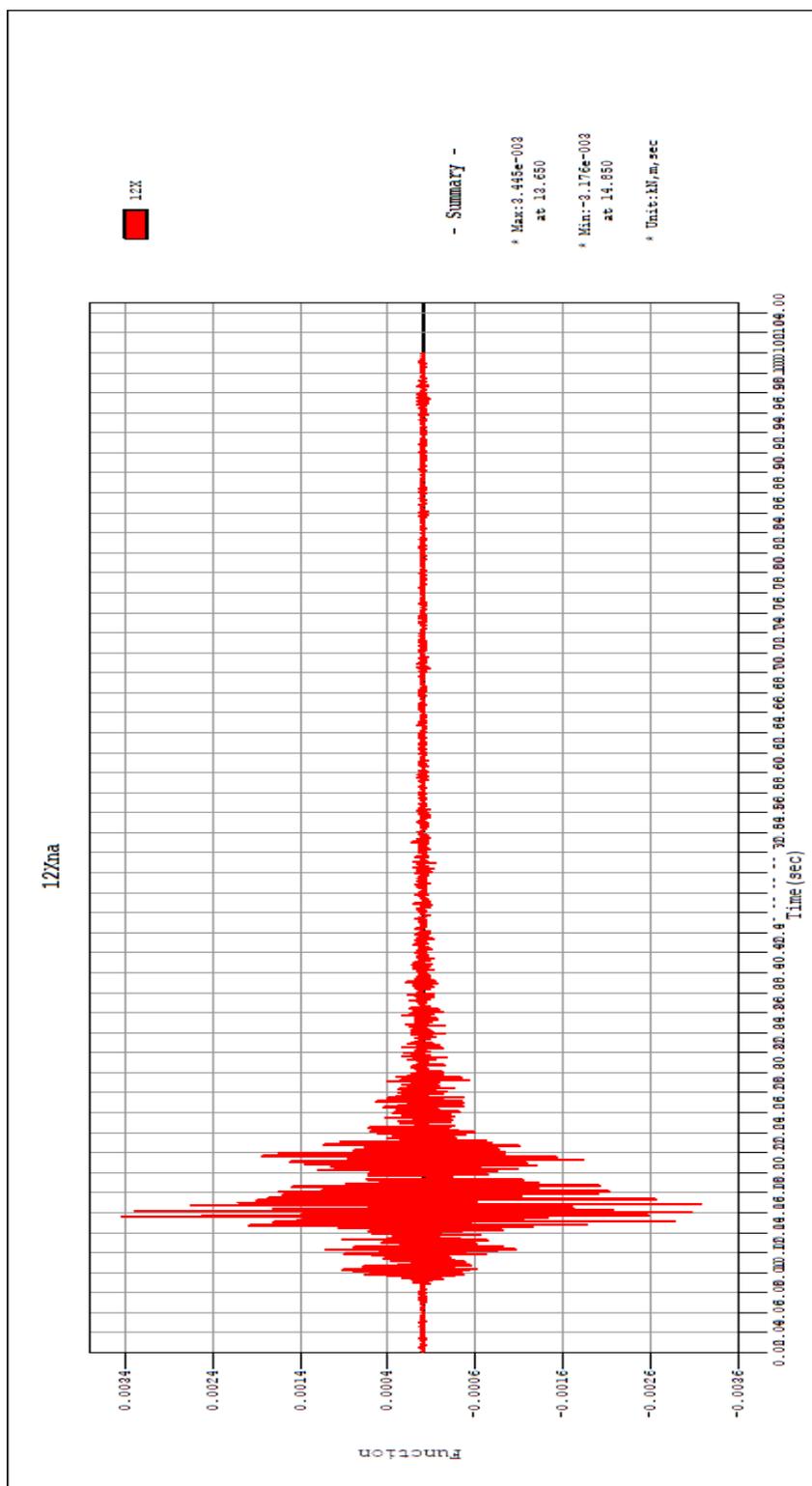
**Fig.** *Spostamenti massimi ottenuti dalla Time History (Rif. Modello da me creato)*



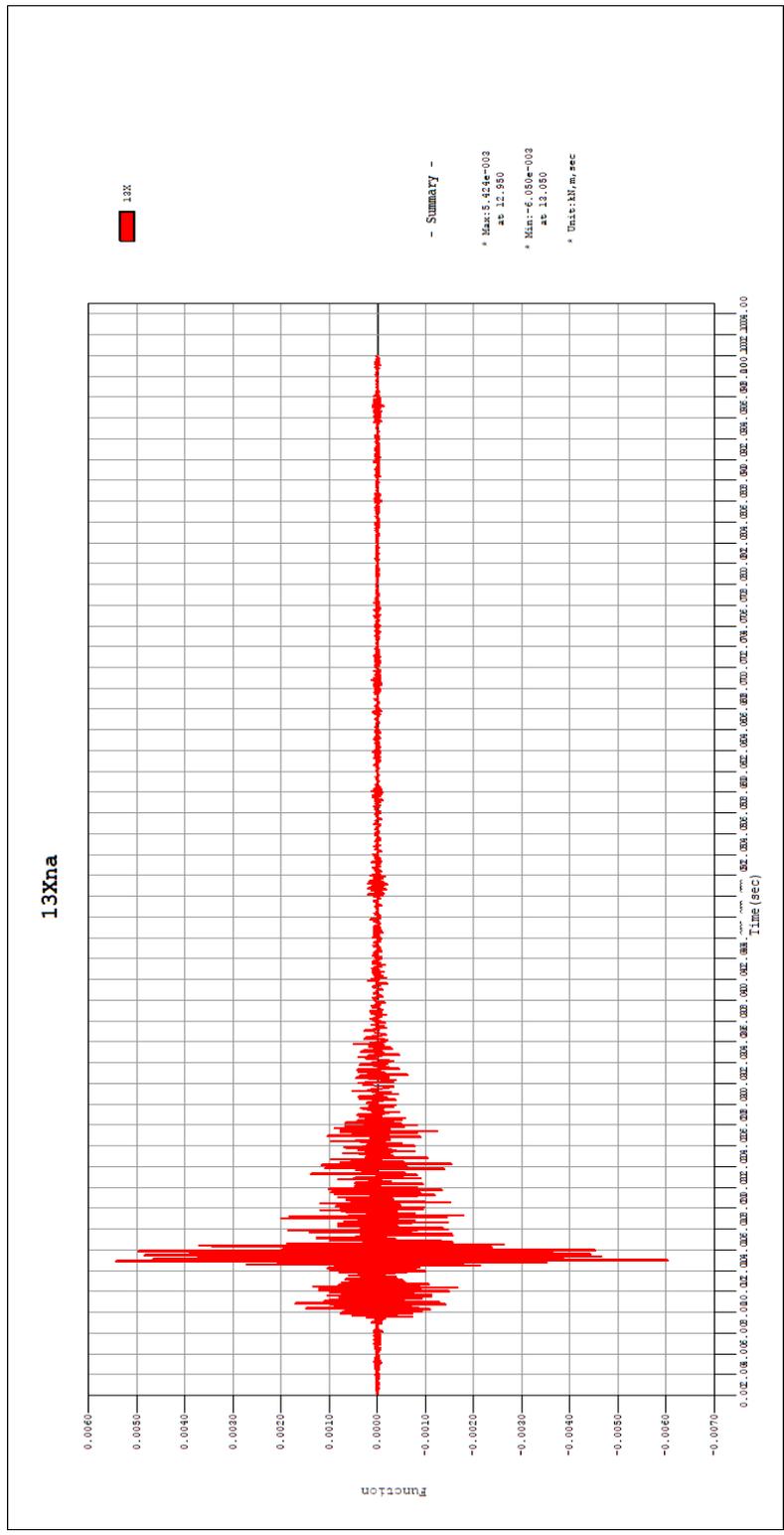
**Fig. Storia temporale in termini di accelerazione del punto in cui è posto il sensore 8Y**



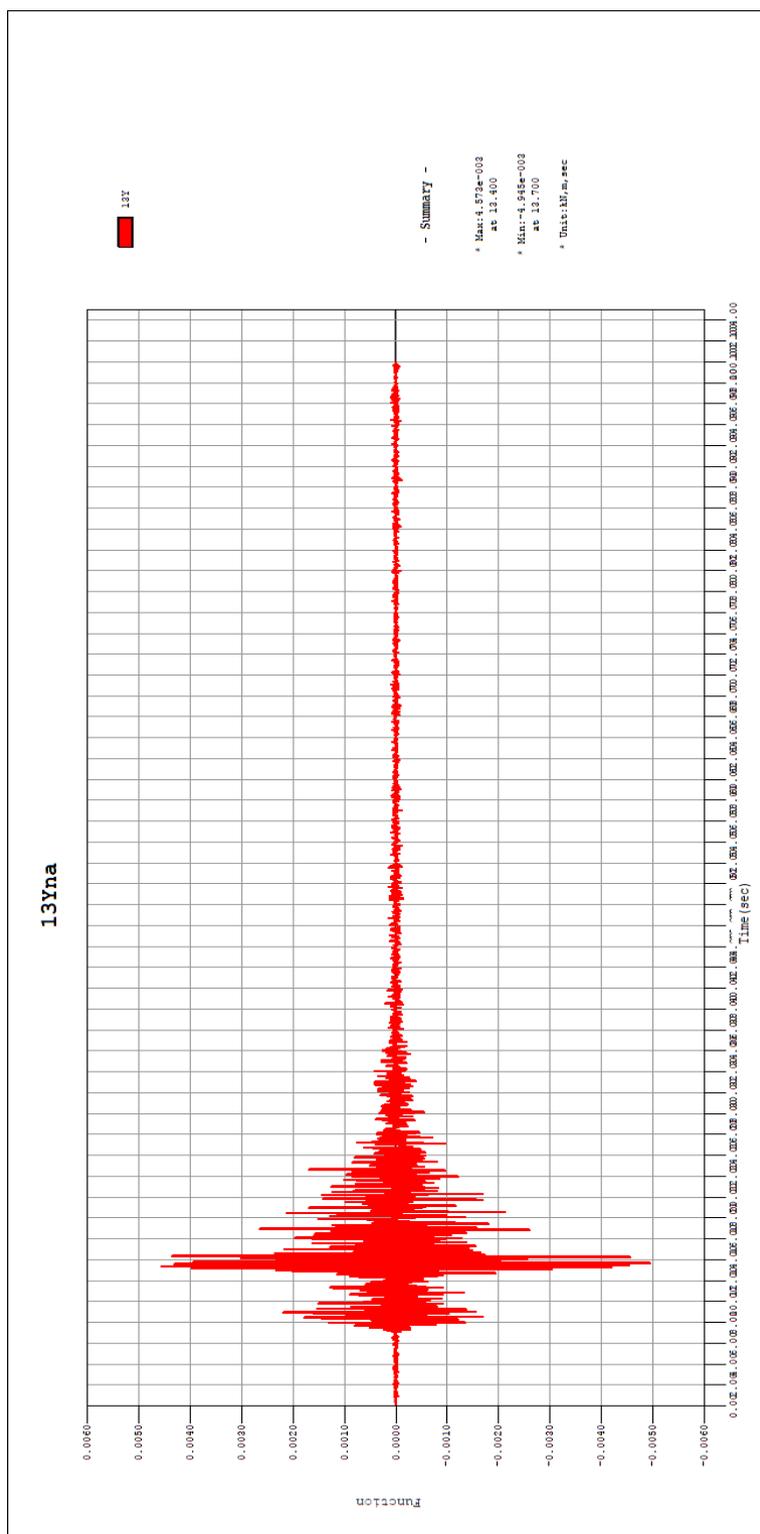
**Fig.** Storia temporale in termini di accelerazione del punto in cui è posto il sensore 11X



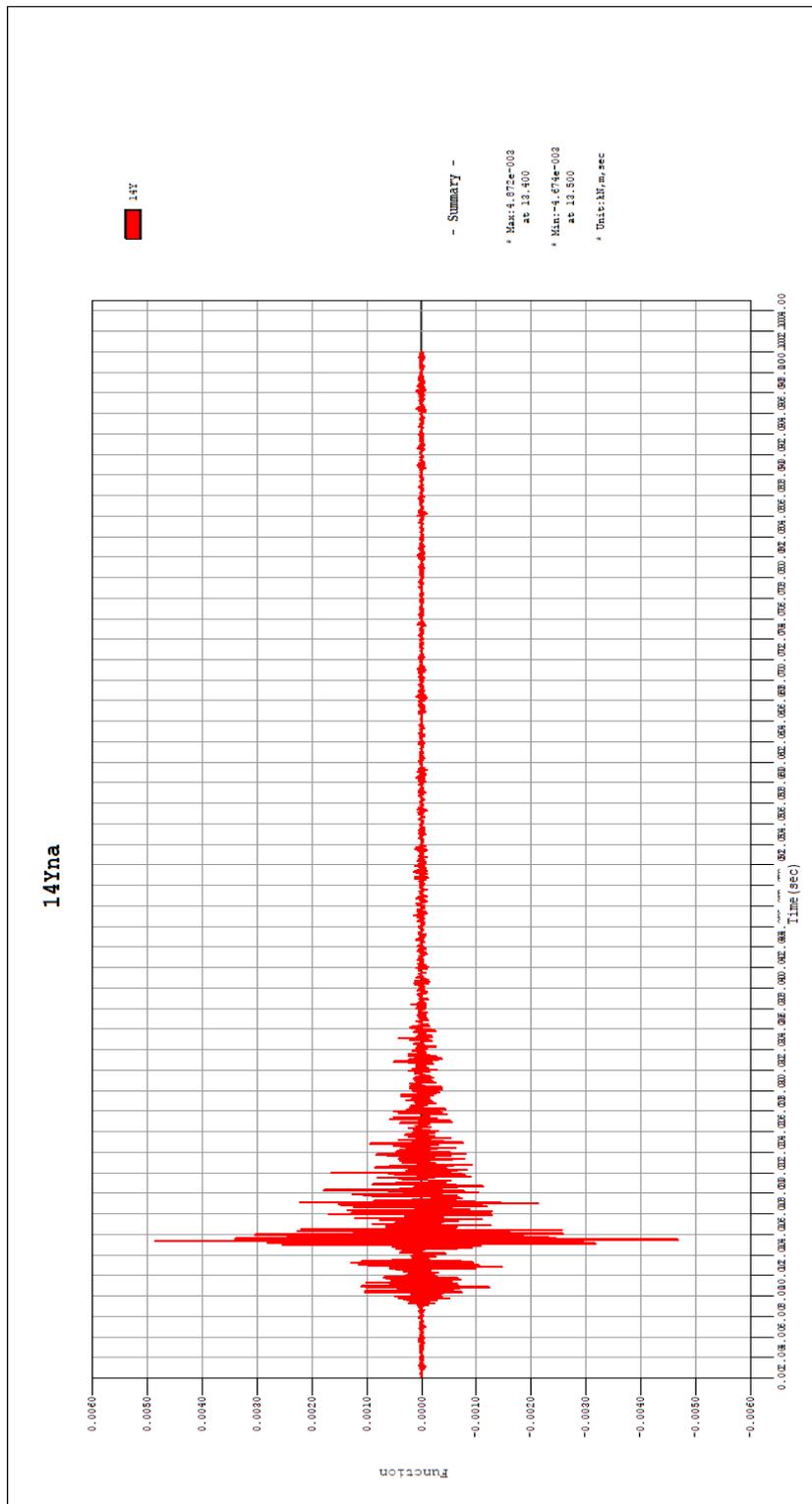
*Fig. Storia temporale in termini di accelerazione del punto in cui è posto il sensore 12X*



**Fig. Storia temporale in termini di accelerazione del punto in cui è posto il sensore 13X**



**Fig.** Storia temporale in termini di accelerazione del punto in cui è posto il sensore 13Y



**Fig. Storia temporale in termini di accelerazione del punto in cui è posto il sensore 14Y**

Ottenuti gli andamenti, in termini di accelerazione, dei punti nel modello in corrispondenza dei sensori di monitoraggio, sarebbe possibile confrontare tali valori con quelli registrati, per raffinare ulteriormente il modello, pur avendo ottenuto nel corso di questo lavoro un modello già abbastanza robusto e affidabile.

## ***Conclusioni***

Questo lavoro di tesi aveva l'obiettivo di realizzare un modello numerico della Basilica di San Nicola a Tolentino, tarato sulla base dei dati acquisiti dal sistema di monitoraggio installato dal Politecnico di Torino, capace di rivelare il comportamento reale della struttura e di valutarne il livello di danneggiamento.

Fondamentale, ai fini della creazione del modello, si è rivelata la collaborazione con il gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino. Una corretta e ragionata campagna di rilievo è stata, infatti, uno strumento necessario ai fini di una corretta modellazione, in modo da avere a disposizione il maggior numero di informazioni possibili sulla struttura, che essendo una costruzione storica in muratura era di difficile interpretazione e comprensione.

A partire dalle informazioni di natura geometrica, estrapolate dai rilievi, è stato possibile creare un modello agli elementi finiti.

Tale modello è stato raffinato eseguendo una serie di analisi e confrontando i risultati ottenuti con i dati registrati nei primi due mesi di monitoraggio.

La creazione di tale modello e il suo confronto con i dati registrati ha permesso di identificare i parametri principali (come i modi di vibrare) rappresentativi del comportamento della struttura nel tempo, base necessaria per lo sviluppo di una procedura automatica di controllo, al fine di evidenziare scostamenti rispetto al comportamento di riferimento.

Questo lavoro, preso atto, a seguito degli eventi sismici degli ultimi anni, della precarietà degli edifici storici di grande rilevanza artistica, tipici dell'Italia Centrale, ha voluto dimostrare l'importanza del monitoraggio dell'evoluzione nel tempo dei fenomeni di danneggiamento presenti su questo tipo di strutture e valutare come questi influiscano sul comportamento e sulla stabilità odierna della struttura.

## ***Allegati***

- 1- Planimetria della Basilica (*Rif. Gruppo di Geomatica, Politecnico di Torino*);
- 2- Sezione Longitudinale della Basilica(*Rif. Gruppo di Geomatica, Politecnico di Torino*);
- 3- Sezione Trasversale della Basilica(*Rif. Gruppo di Geomatica, Politecnico di Torino*);
- 4- Calcoli Masse X;
- 5- Calcoli Masse -X;
- 6- Calcoli Masse Y;
- 7- Calcoli Masse –Y.

## ***Bibliografia***

- “Architettura storica e terremoti. Protocolli operativi per la conoscenza e la tutela” di Carlo Blasi.
- “Progetto e verifica delle costruzioni in muratura in zona sismica” di Franco Iacobelli, EPC Libri.
- “Beni Monumentali e Terremoto; dall'emergenza alla ricostruzione” di Giandomenico Cifani, Alberto Lemme, Stefano Podestà; DEI Editore.
- <http://www.sigmundcarlo.net/CA/II/B13.pdf>
- <http://geomatics.unipv.it/Home/cos-e-la-geomatica>
- “Task Force del Politecnico per il terremoto in centro Italia. Missione del TEAM DIRECT – 20-24 Febbraio 2017” Report della missione a cura del gruppo di Geomatica del dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino.
- Slide del corso di Geomatica tenuto dal professor A. Cina, anno accademico 2015/2016.
- “Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili” a cura di Filiberto Chiabrando, Elisabetta Donadio, Antonia Spanò.

- “Rilievo 3D e monitoraggio strutturale per l’analisi post-sisma del complesso di S. Nicola a Tolentino (MC)” XXI Conferenza Nazionale ASITA, 21-23 novembre 2017, Salerno; a cura di Daniele Costanzo, Filiberto Chiabrando, Renato Lancellotta, Andrea Lingua, Donato Sabia, Antonia Spanò.
- “Fotogrammetria digitale e scansioni 3D” slide a cura della professoressa A. Spanò.
- Book del workshop “Fotogrammetria digitale e scansioni 3d per il rilievo di beni culturali” a cura di Curreli, Einaudi, Fontana, Piras.
- “Post-earthquake dynamic monitoring of Basilica of St. Nicholas of Tolentino” ANIDIS 2017, Pistoia, a cura di Donato Sabia, Takayoshi Aoki, Daniele Costanzo, Renato Lancellotta, Antonino Quattrone.
- “La ricerca dell’eccellenza, l’eccellenza della ricerca: Monitoraggio sismico di strutture storiche” presentazione per l’evento “il bello dell’Italia” del 6 maggio 2017, a cura del professor D. Sabia.

- “Un modello costitutivo per la muratura: formulazione ed implementazione per l’analisi di strutture complesse “Tesi di Dottorato di Chiara Calderini, Università di Genova, Maggio 2004.
- S. Lagomarsino, S. Podestà, Inventario e vulnerabilità del patrimonio monumentale dei parchi dell’Italia centro-meridionale e meridionale, Vol.III – Analisi di vulnerabilità e rischio degli edifici monumentali, INGV/GNDT- Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia/ Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, L’Aquila 2005.
- “ALLEGATO B, L’analisi strutturale delle costruzioni storiche in muratura”, 26/02/2011, Supplemento ordinario n.°54 alla GAZZETTA UFFICIALE, Serie Generale n.°47.
- “Parametric assessment and optimized design procedures for floors and vaults” a cura dell’Università di Padova, Febbraio 2012.
- “Manuale a supporto della compilazione modello A- DC, SCHEDA PER IL RILIEVO DEL DANNO – CHIESE” a cura del Gruppo di Lavoro per la salvaguardia e la prevenzione

dei beni culturali dai rischi naturali, Dipartimento della Protezione Civile.

- “Vulnerabilità sismica delle chiese in muratura: il meccanismo di collasso per risposta trasversale dell’aula; Metodologia di analisi e parametri che influenzano il fenomeno” Tesi di laurea di S. Cattaneo, anno 2013/2014.
- “Seismic Strengthening of timber roof structures: a case study” a cura di Maria Adelaide Parisi, Claudio Chesi, Chiara Tardini, Francesca Altamura; Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasienko (ed), 2012 DWE, Wroclaw, Poland.
- “Seismic vulnerability of traditional buildings: the effect of roof- masonry walls interaction” a cura di M.A. Parisi e C. Chiesi.
- Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alla Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008.
- “Dal GPS al GNSS per la Geomatica” di A. Cina, Celid 2014.