

IL CONSOLIDAMENTO DEL DUOMO DI CREMONA

Lorenzo Jurina

Politecnico di Milano - DIS

ABSTRACT

La chiesa Cattedrale di Cremona, originaria del XII secolo e simbolo della città Lombarda, era caratterizzata da un avanzato stato di degrado e da un preoccupante quadro fessurativo che ne hanno reso necessario l'intervento di consolidamento.

Le indagini diagnostiche, propedeutiche al progetto, hanno rivelato una insufficiente resistenza rispetto alle azioni orizzontali generate dalle numerose volte nonché la inadeguatezza nei confronti della recente normativa antisismica contenuta nelle NTC2008.

Le peculiari caratteristiche artistiche e storiche dell'oggetto edilizio hanno richiesto un approccio rispettoso e compatibile con l'esistente, ricercando soluzioni specifiche rispondenti alle esigenze statiche e tecnologiche.

I criteri di compatibilità, leggerezza e reversibilità sono stati tradotti nel progetto scegliendo come principali materiali strutturali l'acciaio inox e l'acciaio zincato: questi presentano ottime proprietà fisiche e meccaniche, sono adatti ad integrare i materiali "tradizionali" e offrono la possibilità di realizzare interventi di tipo "attivo" al fine di far collaborare sin da subito i nuovi presidi di rinforzo con l'esistente.

Il consolidamento delle coperture è stato eseguito sovrapponendo un nuovo assito ligneo a quello esistente, disposto a nervature ortogonali, e aggiungendo una maglia di cavi metallici che, collegando diversi punti della copertura, fornisce un notevole irrigidimento di piano, offrendo nuove risorse per la risposta alle sollecitazioni da sisma.

Il contrasto delle azioni spingenti della navata centrale è realizzato con tiranti diagonali costituiti da funi di acciaio, che senza l'ausilio di tradizionali "catene" aggiunte fornisce (operando dall'estradosso) un adeguato contrasto alle spinte orizzontali, non invadendo visivamente le superfici interne delle volte affrescate.

A livello dei matronei della navata centrale sono stati introdotti dei tralicci metallici tridimensionali, operanti all'estradosso delle volte, collegati tra loro e alle murature perimetrali. I tralicci reticolari formano due lunghe travi parallele alla navata centrale, apportando un notevole incremento di rigidezza e duttilità all'intero edificio.

Nei matronei dei transetti si è optato per una soluzione piana, sono state messe in opera delle tensostrutture composte da profili metallici perimetrali e cavi di controventatura, ottenendo un piano rigido in grado di trasferire i carichi tra le murature opposte contrastando le eventuali deformazioni locali per effetto di sollecitazioni orizzontali.

Per mitigare la vulnerabilità sismica del Duomo, l'insieme degli interventi di consolidamento adottati consente il mutuo collegamento di tutte le murature di elevazione mediante diaframmi rigidi, che migliorano la risposta ai carichi orizzontali così da ottenere uno schema strutturale di tipo scatolare.

Questo caso studio illustra come l'intervento di miglioramento antisismico di edifici storici e monumentali possa essere realizzato con soluzioni innovative, progettate "ad hoc", capaci di integrarsi con tutte le esigenze (strutturali e non) dell'edificio, compresa la realizzazione di percorsi non tradizionali per le visite alla scoperta del monumento.

Quando si progetta un intervento di consolidamento strutturale occorre tenere in considerazione la somma delle componenti storiche, tecnologiche, materiche e culturali che hanno caratterizzato l'edificio durante la sua vita.

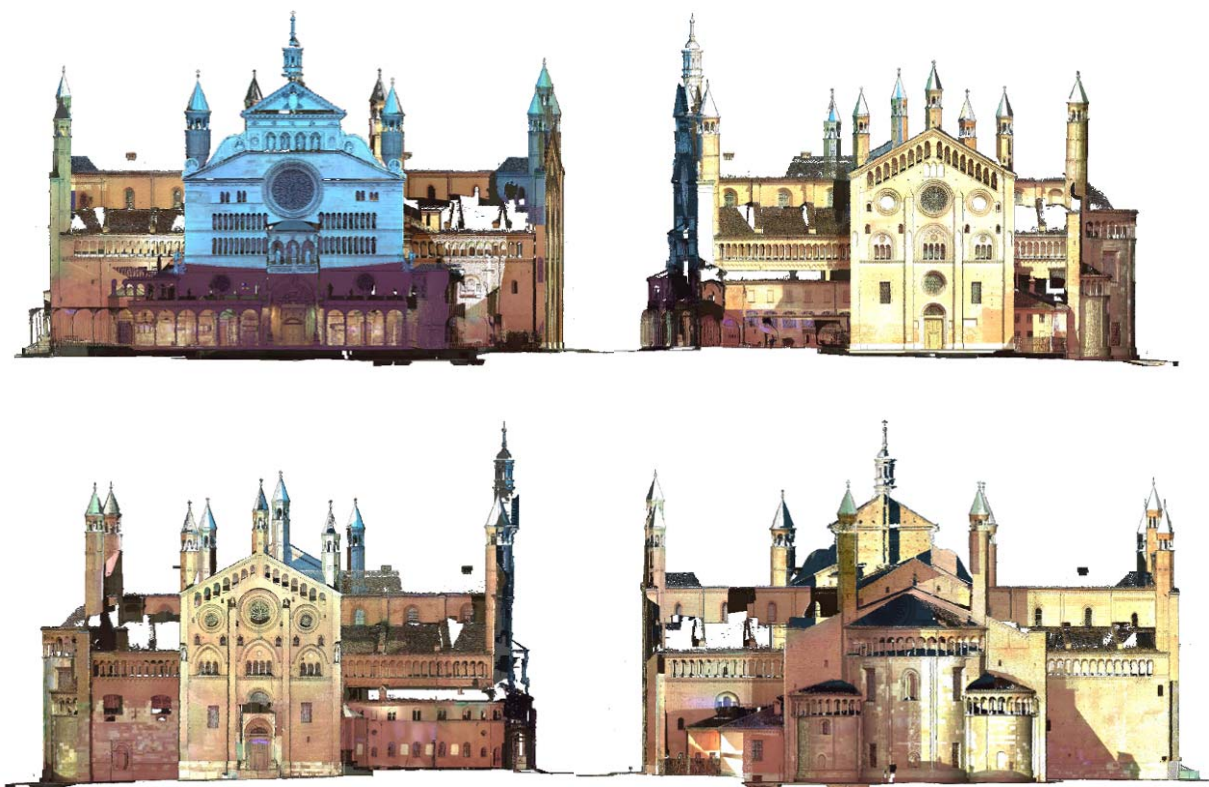
Tenere in conto l'unicità dell'oggetto architettonico conduce ad un intervento specifico e mirato, rivolto alla conservazione dell'esistente e capace di operare con modalità di accostamento collaborativo tra le strutture nuove e quelle antiche, così da apportare vantaggi statici a lungo termine oltre che benefici immediati.

I criteri progettuali alla base delle soluzioni elaborate per il Duomo di Cremona sono la necessità, la efficacia, la durabilità, la compatibilità e la reversibilità, con particolare attenzione agli aspetti della manutenzione programmata.

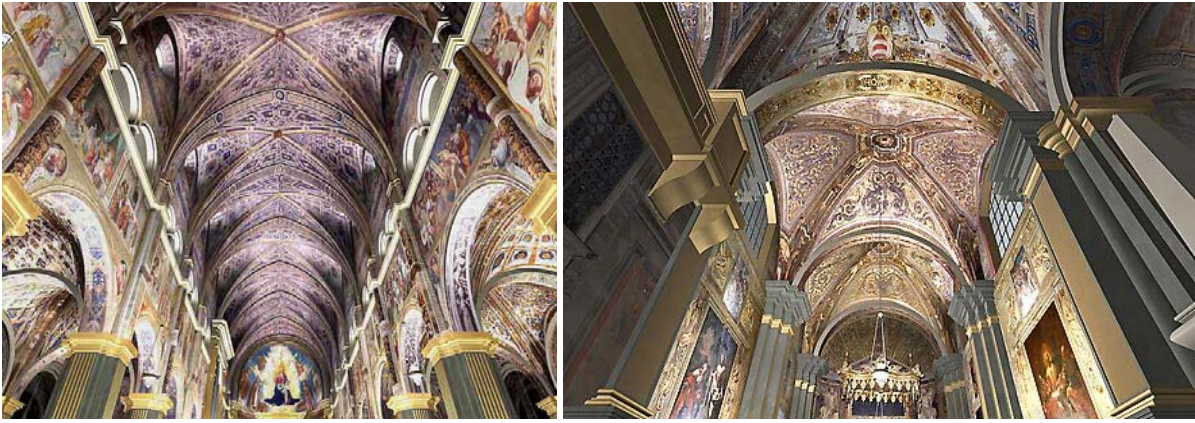
L'analisi del comportamento strutturale si è svolta in due fasi. Una prima fase, conoscitiva, con la ricostruzione della storia, della geometria e delle tecniche costruttive dell'edificio ed una seconda fase, diagnostica, con la determinazione delle caratteristiche del terreno di fondazione, dello stato tenso-deformativo dell'edificio, dello schema statico, delle leggi costitutive dei materiali e delle loro caratteristiche di resistenza e durabilità.

RILIEVI E DIAGNOSTICA

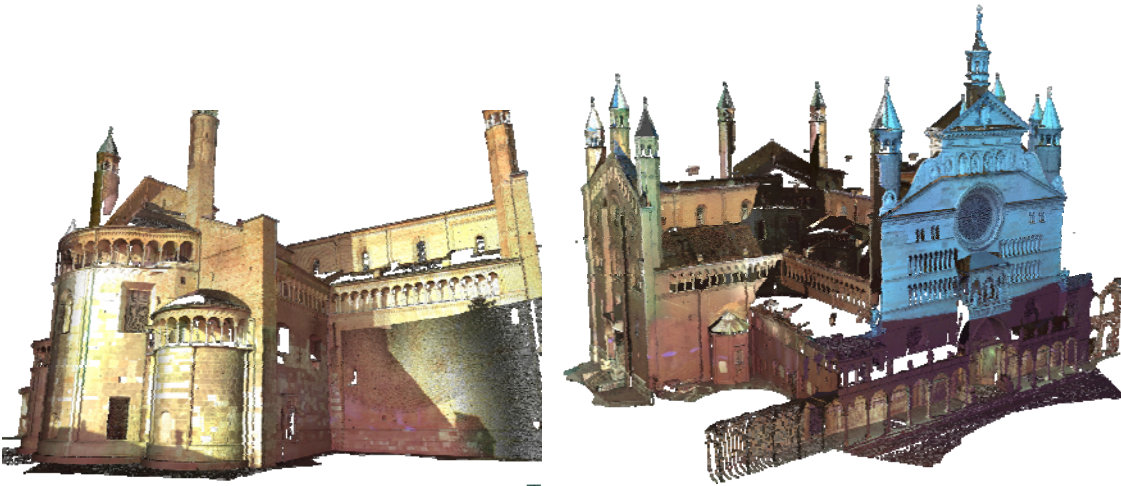
Per migliorare ulteriormente la conoscenza del Duomo si è effettuato un dettagliato rilievo geometrico condotto con la tecnica laser-scanner, resa necessaria dalla complessità del manufatto, e sono state condotte prove in sito necessarie alla caratterizzazione dei materiali costruttivi, tra cui i martinetti piatti per l'analisi delle murature.



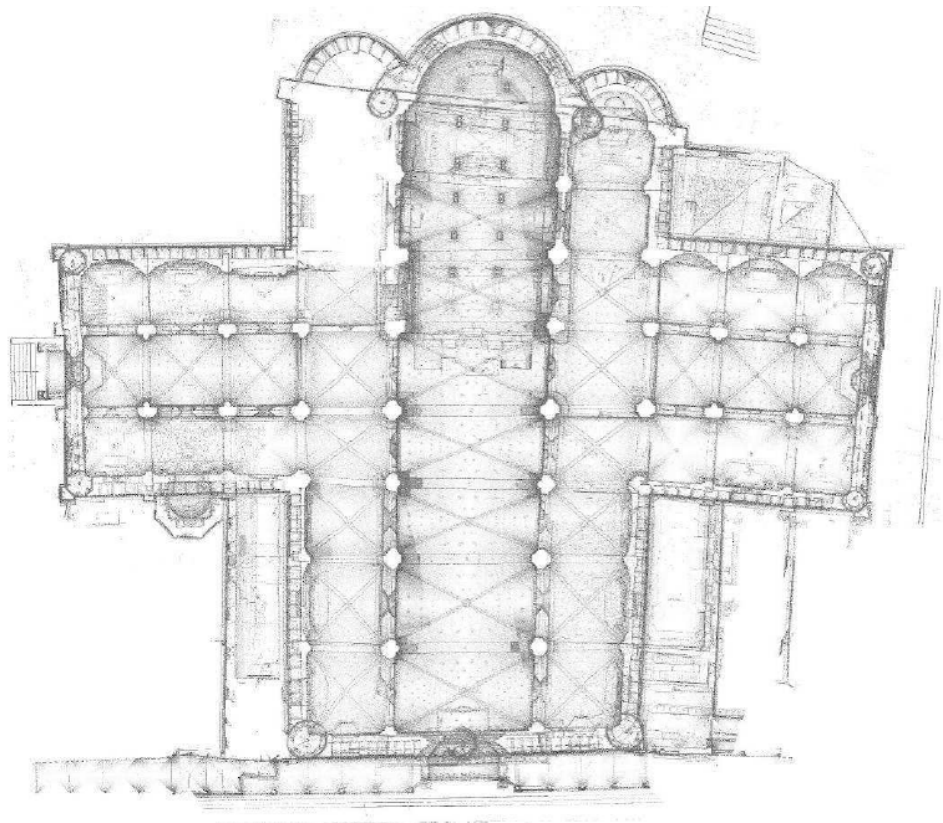
Restituzione dei prospetti con rilievo laser-scanner.



Restituzione degli interni del Duomo con rilievo laser-scanner.



Restituzione di alcune viste tridimensionali con rilievo laser-scanner.



Restituzione della pianta del Duomo con rilievo laser-scanner.

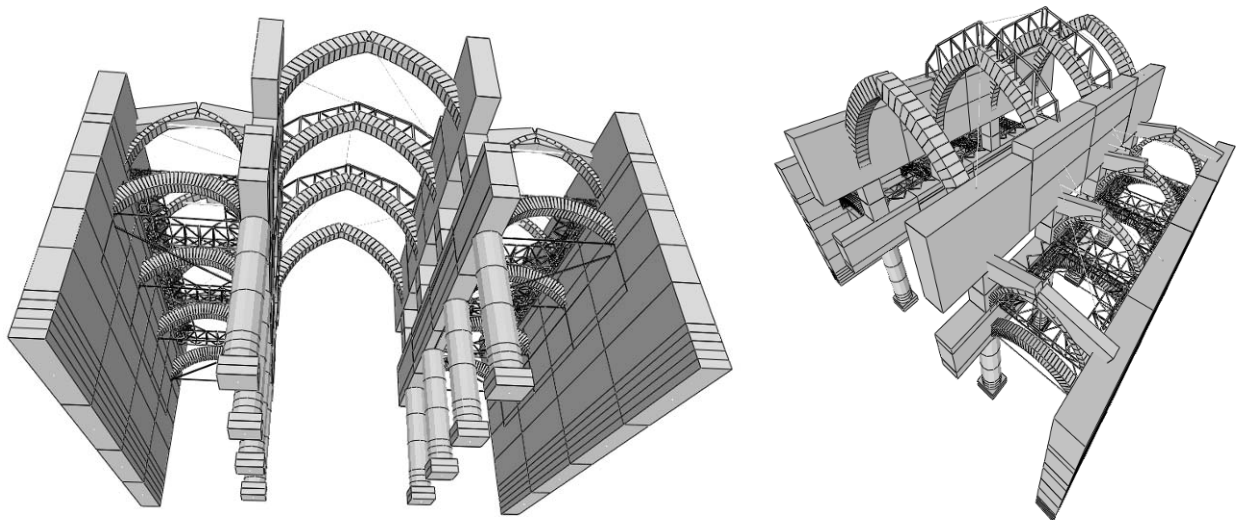


Esecuzione della prova con martinetto piatto singolo nei matronei.

Si è inoltre installato un sistema di monitoraggio delle fessurazioni principali da cui poter risalire alla conoscenza dei cinematismi in atto e poter controllare i movimenti del Duomo in relazione al tempo e alle temperature.

MODELLAZIONE AD ELEMENTI FINITI.

Una volta in possesso delle informazioni sulle geometrie e sui materiali, si è elaborato un modello numerico a elementi finiti, che ha permesso di stimare il comportamento della fabbrica soggetta ai carichi esistenti e ha consentito di prevedere il suo comportamento nei confronti di quei carichi eccezionali, ma previsti in normativa, rappresentati tipicamente dal vento e dal sisma.



Immagini del modello 3D ad elementi finiti.

I rilievi e le analisi condotte sullo stato di fatto hanno portato ad individuare una accentuata carenza strutturale riconducibile a tre cause principali.

La prima importante causa del degrado statico del Duomo è data dal forte sovraccarico esercitato dai coppi di copertura (che in alcuni casi arrivavano addirittura a *sei strati sovrapposti*) e dal degrado di una parte del legname sottostante, interessato da infiltrazioni ormai secolari.

La seconda causa del degrado statico, anch'essa rilevante, è stata identificata nella spinta laterale indotta dalle volte a botte unghiate della navata centrale, non sufficientemente contrastate dalle strutture laterali esistenti.

La terza causa, grave e preoccupante, è data dalla risposta numerica della modellazione ad elementi finiti soggetta alle sollecitazioni di tipo sismico, nei confronti delle quali la struttura si presentava inadeguata.

INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO.

Gli interventi di consolidamento delle strutture del Duomo, progettati e successivamente realizzati, hanno avuto lo scopo di riportare la fabbrica al rispetto di quei criteri di sicurezza che la normativa e il buon senso impongono. In particolare, riguardo agli aspetti di vulnerabilità nei confronti delle azioni sismiche, l'insieme degli interventi di consolidamento adottati garantisce il mutuo ed efficace collegamento di tutte le murature di elevazione mediante diaframmi rigidi che permettono di migliorare la risposta alle sollecitazioni orizzontali, creando uno schema statico di tipo "scatolare".

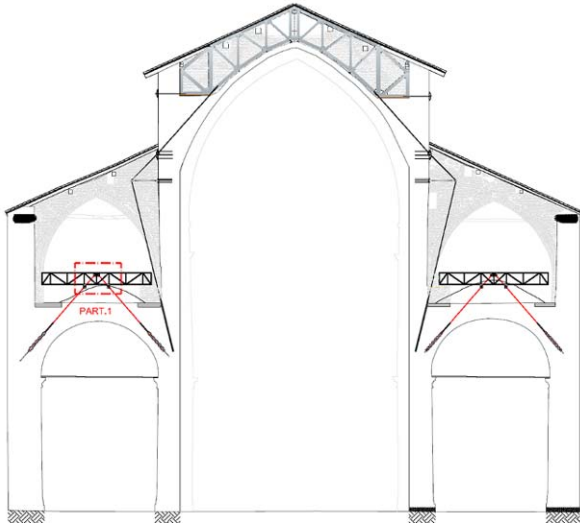
TRAVI A BOOMERANG.

Nella parte alta della Cattedrale, sette travi reticolari metalliche binate (con una forma "a boomerang") sono state ubicate nella zona del sottotetto della navata centrale, che agendo in parallelo al sistema delle volte murarie, sono in grado di offrire un parziale contrasto alle spinte laterali indotte dalle volte stesse.

Le "travi a boomerang", accoppiate sui due lati degli arconi presenti nel sottotetto hanno anche la funzione di collaborare con le strutture lignee portanti del tetto, parzialmente degradate. Le travi metalliche hanno i correnti estradossali paralleli alle falde del tetto ed i correnti intradossali paralleli al profilo delle volte. Le travi sono state collegate tra loro da robuste barre longitudinali ,

post-tesate, così da realizzare una struttura reticolare lungo lo sviluppo della navata, capace di resistere ai carichi orizzontali.

Il rinforzo delle falde di copertura, realizzato con la messa in opera di un doppio assito ligneo armato sotto ai coppi, ha offerto ulteriori risorse di resistenza alla nuova trave longitudinale, migliorandone il comportamento a taglio.



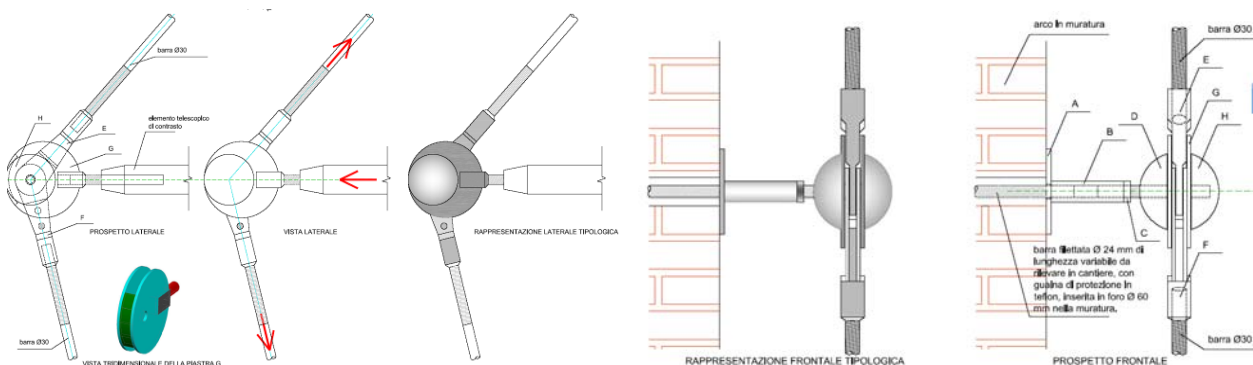
Sezione del Duomo con principali interventi e vista del matroneo.

ARCO ARMATO NELLA NAVATA CENTRALE.

Per migliorare e garantire l'efficienza dei contrasti laterali alle spinte della navata centrale si è introdotto un sistema innovativo che consente di rimpiazzare le tradizionali catene a vista (elementi che usualmente vengono aggiunti all'interno della navata, apportando un forte impatto visivo) con dei cavi posti esternamente alla navata, all'estradosso delle volte, visivamente meno invasivi.

Si tratta di una estensione del metodo dell'*arco armato* (Jurina 1999-2009) che consente di consolidare le volte, incrementando la compressione tra concio e concio degli archi o delle volte, mediante la tesatura di cavi posti all'estradosso.

Ciascuna trave boomerang è pertanto collegata, in corrispondenza degli appoggi di estremità, ad un sistema di contenimento posto nei matronei, costituito da due barre tonde in acciaio, a forma di V e da un "puntone telescopico", che appoggiandosi al vertice della V, garantisce un contrasto orizzontale concentrato all'imposta della volta, esercitando una spinta di circa 30 t sulla muratura.



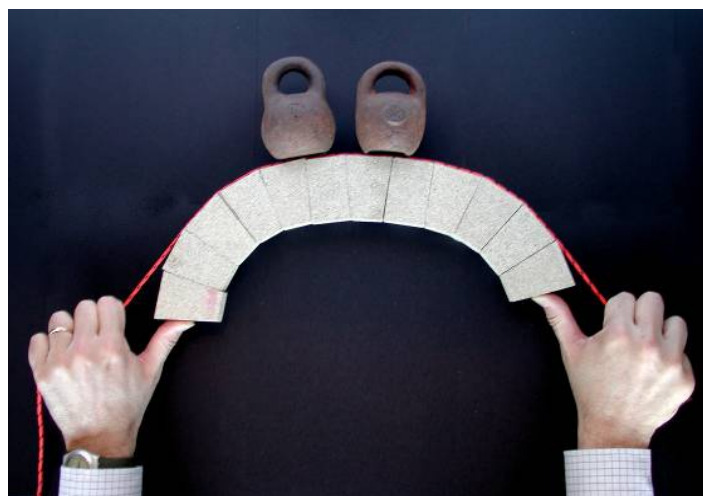
Nodo sferico a cui converge il puntone telescopico: schema grafico.



Nodo sferico a cui converge il puntone telescopico.

Sopra alla navata centrale è stato inoltre previsto l'utilizzo di tiranti estradossali curvi disposti in corrispondenza delle nervature principali delle volte a crociera. Tali tiranti, fissati con connettori inseriti nei rinfianchi alla base delle volte stesse, esercitano un'azione confinante sulle volte, migliorandone la risposta meccanica e contrastando le fessurazioni che portano alla formazione di cerniere plastiche ed al conseguente cinematismo di collasso. Tale sistema di rinforzo, denominato "arco armato" rende possibile un notevole incremento della portanza delle volte e non comporta alcun incremento sostanziale di massa, il che sarebbe oltremodo dannosa sotto carichi sismici, soprattutto in una zona tanto delicata per la fabbrica del Duomo quale la sommità della navata centrale.

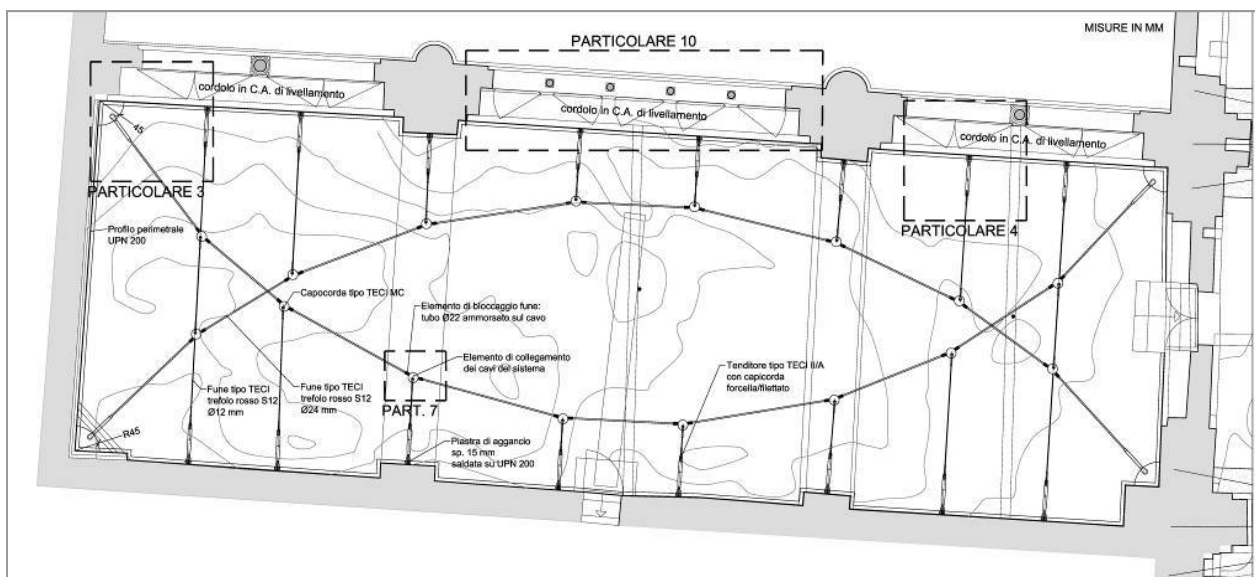
Il consolidamento mediante "arco armato" consiste nell'applicare parallelamente all'arco una fune, che deve essere successivamente tesata secondo una forza assegnata. La fune può essere applicata sia all'estradosso che all'intradosso dell'arco, ottenendo comunque la finalità attesa. Nel caso del Duomo è stata applicata all'estradosso senza alterare l'aspetto artistico delle volte, seguendo i sopracitati criteri di massimo rispetto dell'edificio. Il principio di funzionamento dell'arco armato consiste nell'applicazione di una pressione radiale di confinamento dell'arco, tale da ricentrare la curva delle pressioni all'interno della sezione muraria dell'arco, ottenendo l'incremento del coefficiente di sicurezza geometrico (Heyman, 1982).



Arco armato estradossale: schema concettuale.

TRAVI A PESCE.

Alla quota dei matronei i trasetti laterali sono stati consolidati migliorando le capacità resistenti nei confronti delle azioni sismiche. L'intervento consiste nella realizzazione di un sistema tensostrutturale composto da un profilo a U perimetrale, continuo e solidarizzato con barre di inghisaggio alla muratura, e da un insieme di cavi ad esso collegato. Il sistema così composto, denominato "trave a pesce" per la sua caratteristica forma geometrica, è in grado di formare un piano di controvento che consente di impedire l'eccessivo spostamento dei pilastri intermedi, nelle due direzioni ortogonali, trasferendo i carichi orizzontali (tipicamente da sisma) alle pareti perimetrali, resistenti a taglio.



"Trave a pesce" per il consolidamento sismico dei trasetti.



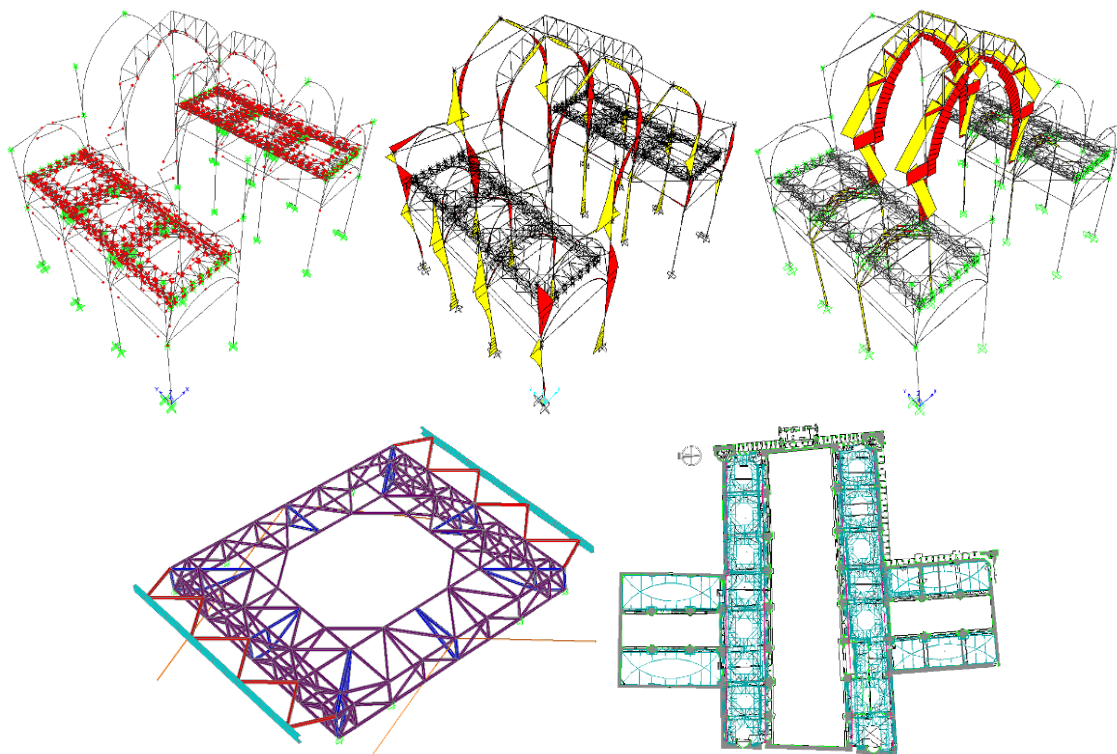
"Trave a pesce" per il consolidamento sismico dei trasetti: dettaglio di incrocio dei cavi.

TRAVI RETICOLARI NEI MATRONEI.

Nelle zone a livello del piano di calpestio dei matronei, sopra alle cupole delle navate laterali, è stata realizzata una robusta ma leggera trave reticolare spaziale, lunga tanto quanto l'intero sviluppo delle navate stesse, per distribuire i carichi orizzontali e migliorare la risposta alle

sollecitazioni sismiche sulla struttura. La trave è stata realizzata utilizzando grandi elementi modulari assemblati in opera (uno per campata).

Il diaframma rigido di piano così ottenuto riesce a collegare le murature di elevazione e a garantirne la reciproca collaborazione, portando la fabbrica verso l'auspicato *comportamento scatolare*.

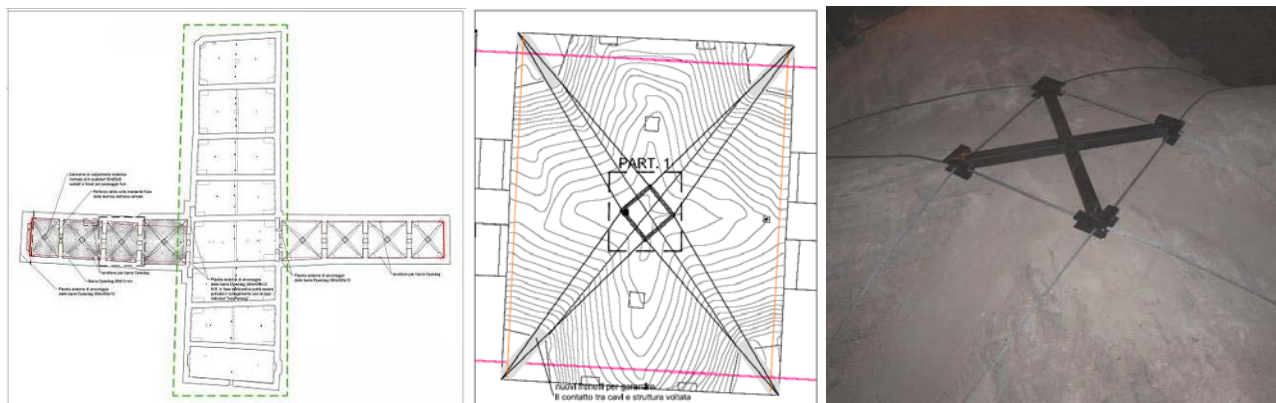


Modello FEM del Duomo e delle travi reticolari di consolidamento

Le nuove “travature reticolari” sono collegate in modo continuo alle pareti d’ambito dei matronei mediante elementi a biella, di lunghezza regolabile, che mettono in relazione la parte superiore dei moduli con un profilo UPN corrente solidarizzato alla muratura. Un sistema analogo, in grado di gestire le inevitabili irregolarità geometriche in pianta, consente di collegare tra loro, sia a flessione che a taglio, i vari moduli delle grandi travi.

ARCO ARMATO NEI TRANSETTI.

Nei transetti è stato messo in opera il consolidamento delle cupolette delle navate centrali mediante cavi incrociati disposti “a stella” al di sopra delle cupole medesime. Si tratta di una ulteriore applicazione dell’ arco armato, in cui viene incrementa l’area di influenza dei cavi.



Arco armato realizzato con cavi incrociati “a stella” al di sopra delle cupole dei transetti.

INTERVENTI IN FALDA SULLA NAVATA CENTRALE.

Gli interventi di consolidamento hanno interessato in modo particolare le falde di copertura. Nella navata centrale le falde sono state consolidate con doppio strato in tavole di legno, in modo da fungere da diaframma resistente alle azioni orizzontali. Nell'ottica di ottenere la massima collaborazione strutturale tra gli elementi, i nuovi diaframmi sono stati adeguatamente connessi alle sottostanti strutture metalliche di consolidamento della navata (travi a boomerang).

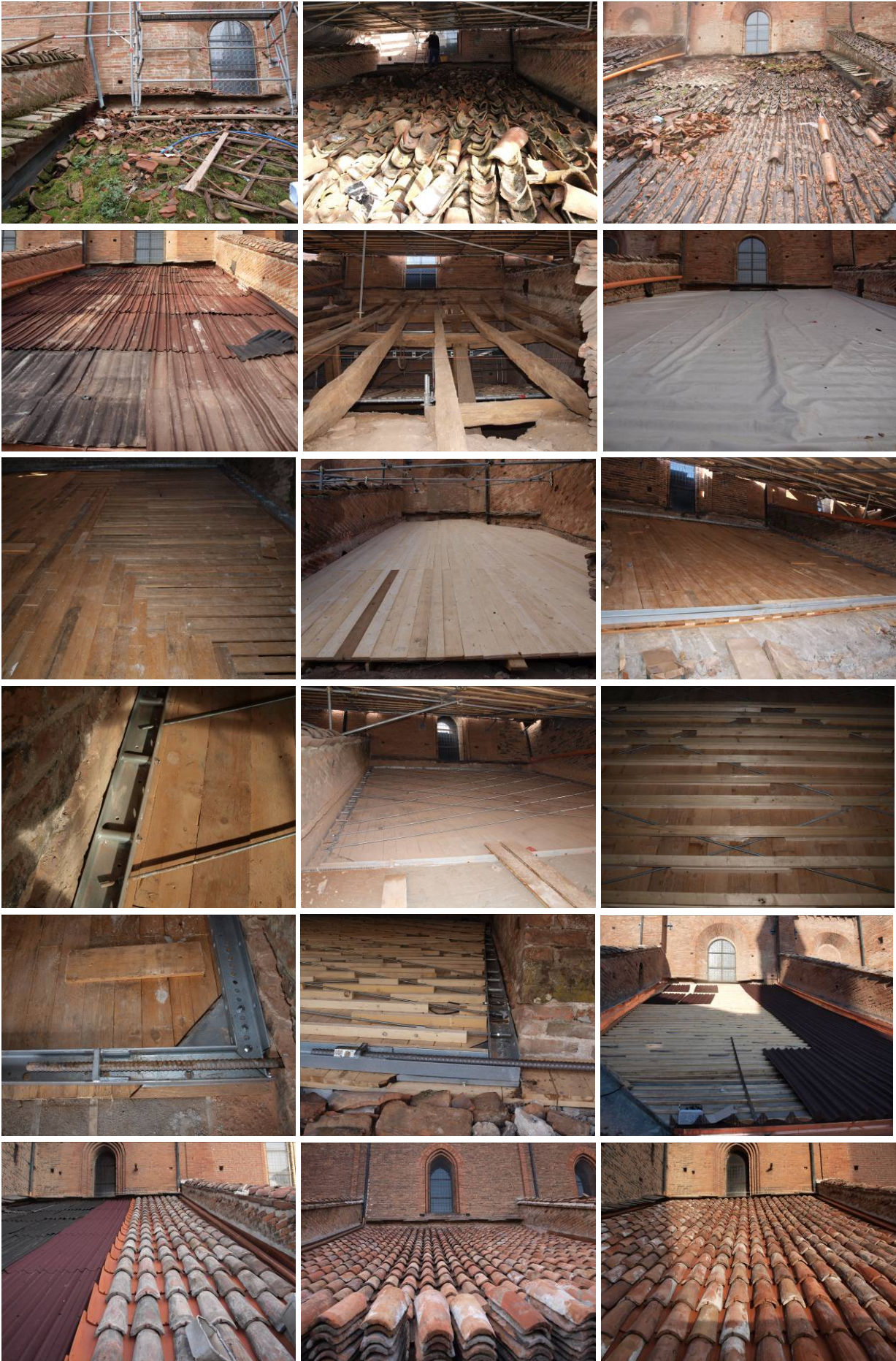
INTERVENTI IN FALDA SULLE NAVATE LATERALI.

Un intervento particolarmente interessante è stato realizzato per rinforzare il piano di falda delle navate laterali, a copertura dei matronei. In questa zona è stato realizzato un "doppio assito armato", ossia un consolidamento di falda con lo scopo di irrigidire la struttura, per migliorare la resistenza nei confronti dei carichi verticali e contribuire alla risposta alle sollecitazioni orizzontali. Questo assito armato, inclinato, è in grado di collegare mutuamente le murature della zona di colmo delle navate laterali con le murature della zona di gronda, all'appoggio delle falde

Il sistema è composto da un doppio assito ligneo collegato a quello esistente, integrato da numerose barre diagonali incrociate con funzione di controventatura. Le barre diagonali sono collegate a profili a U perimetrali che "incorniciano" tutti i vari campi della copertura (scanditi dagli originali muretti tagliafuoco). Le cornici sono a loro volta ben solidarizzate alle murature con barre di inghisaggio, andando a definire così un modulo di copertura. Ogni modulo è collegato al precedente e al successivo mediante robusti spezzoni di barra in acciaio tipo Dywidag, garantendo la collaborazione reciproca per ottenere un sistema unico di "falda strutturale", che interessa tutta la copertura.

Da ultimo, il manto di copertura in coppi è stato riposizionato, utilizzando coppi nuovi nello strato inferiore e coppi antichi (gli originali recuperati dallo smontaggio) per lo strato superiore. Il numero di strati di coppi sovrapposti è stato ridotto rispetto alla situazione iniziale, quando si erano rilevati numerose sovrapposizioni probabilmente dovute ad interventi grossolani nel tempo, per tamponare le infiltrazioni di acqua, la nuova disposizione ha portato ad una notevole riduzione del pesante sovraccarico sulle coperture. Si è ulteriormente garantita la tenuta all'acqua mediante l'introduzione di una membrana ondulata di sicurezza posta come sottocoppo. Da ultimo, ogni singolo coppo è stato fissato al sottostante assito mediante "ferma coppi" di sicurezza.

Naturalmente tutte le operazioni di consolidamento strutturale delle coperture sono state precedute da interventi di restauro, protezione e parziale sostituzione degli elementi lignei che hanno previsto trattamenti disinfettanti, biocidi ed antiparassitari, oltre alla messa in opera di barriere contro l'intrusione di volatili.



Sequenza delle fasi di realizzazione del doppio assito armato.

CONCLUSIONE.

Oltre agli aspetti tecnici e di innovazione scientifica illustrati, è doveroso ricordare la collaborazione sincera tra ingegneri ed architetti che si è avuta in fase di progetto, assieme a quella tra direzione lavori ed impresa durante la realizzazione, che accompagnata dalla presenza assidua e partecipe degli organi di tutela, della proprietà e di tutti quelli che hanno a cuore il Duomo, ha rappresentato una esperienza appassionante e gratificante sia a livello professionale che umano.

Riferimenti bibliografici

1982: Heyman J., *The Stone Skeleton*, Cambridge University Press

1999: Jurina L., *Una tecnica di consolidamento attivo per archi e volte in muratura*, Int. Symp. on Seismic Performance of Built Heritage in Small Historic Centers, Assisi, Italia, 1999

2003: Jurina L., *Strutture in legno: soluzioni leggere per il consolidamento*, Recupero e conservazione, n.50/2003

2009: Jurina L., *Prove a collasso su archi in muratura consolidati con la tecnica dell'arco armato: risultati di una sperimentazione*. Atti di IF-CRASC'09 , IV convegno su Crolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento – Napoli

Ruoli, enti ed imprese

COMMITENZA: Curia Arcivescovile di Cremona;

FINANZIAMENTO: Ministero per i Beni e le Attività Culturali - Direzione Regionale Lombardia;

RUP: E. Rizzi;

PROGETTISTA: L. Jurina con M. Fasser;

DIRETTORE DEI LAVORI: L. Jurina;

UFFICIO D.L.: M. Fasser, M. Palazzo, F. Conte, M. Mazzoleni, F. Zorloni;

CSE: M. Mazzoleni;

DIAGNOSTICA: A. Pulcini; P&P; ARCH.ENCO, Tecniche e Perforazioni Speciali, Conservart;

IMPRESA ESECUTRICE: ATI Brancaccio Costruzioni – D. TECH con Bruni Costruzioni, Libelli-Valente ponteggi;

RESPONSABILE DEL CANTIERE: G. Minazio con B. e L. Campopiano;

DELEGATO VESCOVILE: A. Bonazzi;

COLLAUDATORI: L. Corrieri con G. Miccio, M. Mocellin, G. Ricciardi.