



INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO ANTISISMICO DEL DUOMO DI CREMONA, CON ADOZIONE DI TECNICHE INNOVATIVE

L.Jurina

Politecnico di Milano, Dipartimento Ingegneria Strutturale

SOMMARIO

La chiesa Cattedrale di Cremona, originaria del XII secolo e simbolo della città Lombarda, era caratterizzata da un forte stato di degrado e da un preoccupante quadro fessurativo che ne hanno reso necessario l'intervento di consolidamento. Le indagini diagnostiche, propeudetiche al progetto, hanno rivelato la insufficienza dei contrasti alle azioni orizzontali generate dalle numerose volte nonché la inadeguatezza alla recente normativa antisismica contenuta nelle NTC2008.

Le peculiari caratteristiche artistiche e storiche dell'oggetto edilizio hanno richiesto un approccio rispettoso e compatibile all'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.

Il consolidamento delle coperture è stato eseguito sovrapponendo un nuovo assito ligneo a quello esistente, con nervature ortogonali, e aggiungendo una nuova orditura di cavi metallici che, collegando diversi punti della copertura, fornisce un notevole irrigidimento di piano.

Il contrasto delle azioni spingenti della navata centrale è realizzato con tiranti diagonali costituiti da funi di acciaio, che senza l'ausilio di "catene" interne, da inserire nella navata centrale, fornisce (operando dall'esterno) un adeguato contrasto alle spinte orizzontali, con il vantaggio di non invadere visivamente le superfici affrescate dei soffitti.

I matronei sono stati consolidati introducendo tralici metallici estradossali collegati tra loro e alle murature perimetrali, realizzando due lunghe travi reticolari, parallele alla navata centrale, che apportano un notevole incremento di rigidità e duttilità all'intero edificio.

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 alle sollecitazioni 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 altre esigenze dell'edificio, compresa la realizzazione di percorsi non tradizionali per le visite del monumento.

1. PREMESSA

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 nei suoi vari periodi storici e sociali

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.

2. LA FASE CONOSCITIVA PRELIMINARE ALL'INTERVENTO E LA MODELLAZIONE NUMERICA

L'analisi del comportamento strutturale si è svolta in due fasi. Una prima fase, conoscitiva, con 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 tensio-deformativo dell'edificio, dello schema statico, delle leggi costitutive dei materiali e delle loro caratteristiche di resistenza e durabilità.

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 si sono condotte prove in sito, tra cui i martinetti piatti, necessarie alla caratterizzazione dei materiali costruttivi.

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.

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 alcuni carichi eccezionali, previsti in normativa, rappresentati tipicamente dal vento e dal sisma.

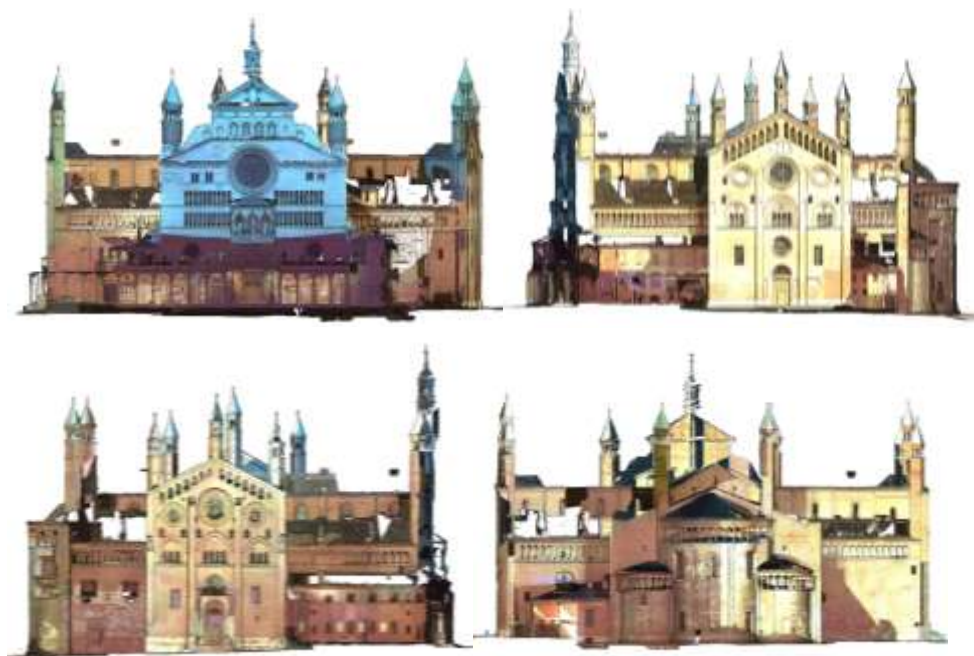


Figura 1. Restituzione dei prospetti con rilievo laser-scanner.



Figura 2. Restituzione degli interni del Duomo con rilievo laser-scanner.



Figura 3. Restituzione di una vista tridimensionale con rilievo laser-scanner.

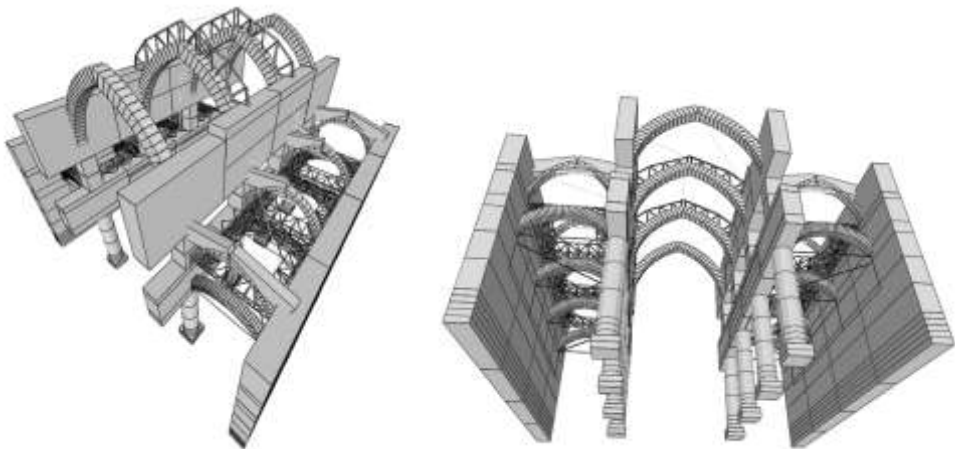


Figura 4. Immagini del modello 3D ad elementi finiti.

3. GLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO

Una prima causa, importante, del degrado statico del Duomo è data dal forte carico 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 percolazioni ormai secolari.

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

Una causa terza di degrado del Duomo, grave e preoccupante ancorchè solo potenziale, è data dalle sollecitazioni di tipo sismico, rispetto alle quali la struttura non si presentava adeguata.

Gli interventi di consolidamento progettati e successivamente realizzati hanno teso a riportare il Duomo al rispetto di quei criteri di sicurezza che la normativa e il buon senso impongono.

Rispetto alla vulnerabilità del Duomo 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".

3.1. Il consolidamento della navata centrale

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

Queste "travi a boomerang", accoppiate sui due lati degli arconi presenti nel sottotetto, hanno anche la funzione di collaborare con le strutture portanti lignee del tetto, parzialmente degradate. Le travi metalliche hanno i correnti estradossali paralleli alle falde del tetto ed i correnti intradossali paralleli al profilo curvo delle volte. Le travi vengono collegate tra loro da robuste barre longitudinali, post-tesate, così da realizzare una struttura reticolare, capace di resistere ai carichi orizzontali, che si estende in direzione dell'asse della navata.

Il rinforzo delle falde di copertura, in cui si è introdotto un doppio assito ligneo armato sotto ai coppi, ha offerto ulteriori risorse di resistenza a taglio a tale trave longitudinale.

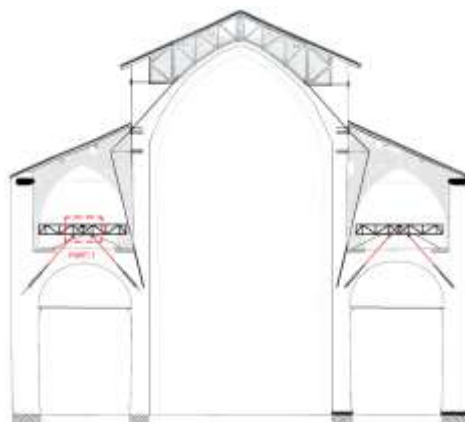


Figura 5. Sezione di progetto degli interventi di consolidamento



Figura 6. Immagini delle “travi boomerang”

Per garantire, con ancora maggiore efficienza, il contrasto laterale alle spinte della navata centrale si è introdotto un sistema innovativo che consente di rimpiazzare le tradizionali catene di contrasto, (elementi che usualmente vengono aggiunti “a vista” all’interno della navata) mediante un sistema di cavi posti esternamente alla navata , e quindi otticamente 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 cavi estradossali.

Ciascuna trave boomerang è pertanto collegata, in corrispondenza degli appoggi di estremità, ad un sistema di contenimento posto nel matroneo, costituito da due barre tonde in acciaio, sagomate a forma di V e da un “puntone telescopico” che , appoggiandosi al vertice della V, può offrire un contrasto orizzontale concentrato all’imposta della volta, esercitando una spinta di circa 30 t sulla muratura.

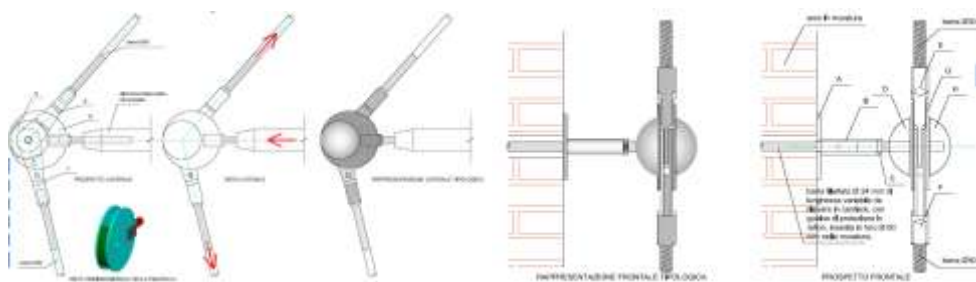


Figura 7. Nodo sferico a cui converge il puntone telescopico.

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, che, sotto carichi sismici, sarebbe oltremodo dannosa 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, successivamente tesata secondo una forza assegnata. Tale fune può essere applicata sia all'estradosso che all'intradosso dell'arco. Nel caso del Duomo è stata applicata all'estradosso. Il principio di funzionamento dell'arco armato consiste nell'applicazione di una pressione radiale di confinamento sull'arco sottostante, tale da ricentrare la curva delle pressioni all'interno dell'arco così da incrementarne il coefficiente di sicurezza geometrico (Heyman, 1982), vale a dire il rapporto tra lo spessore dell'arco esistente e lo spessore dell'arco minimo necessario.



Figura 8. Arco armato estradosale: schema concettuale.

3.2. Interventi a livello dei matronei e del transetto

Nelle zone dei matronei , a livello del piano di calpestio, sopra alle cupole delle navate laterali, è stata realizzata una robusta ma leggera trave reticolare spaziale, lunga tanto quanto l'intero sviluppo della navata, per distribuire i carichi orizzontali e migliorare la risposta alle sollecitazioni sismiche sulla struttura. La trave è stata realizzata utilizzando grandi elementi modulari assemblati (uno per campata).

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

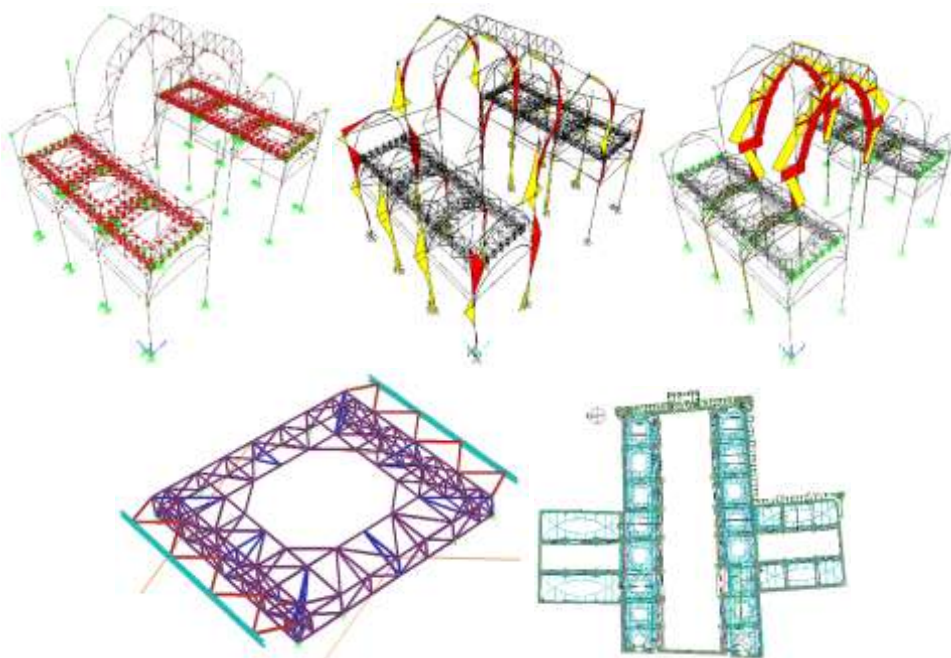


Figura 9. Modello FEM del Duomo e delle travi reticolari di consolidamento

Le nuove “travi 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 della grande trave.

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 si incrementa l’area di influenza dei cavi.

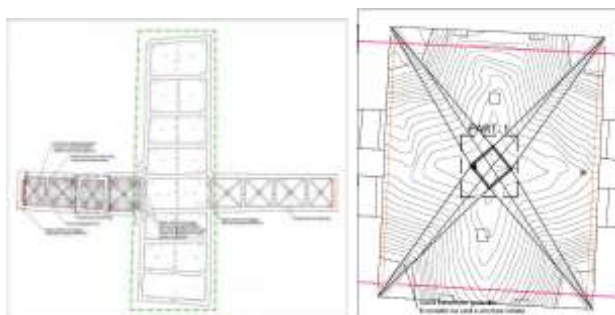




Figura 10. Arco armato realizzato con cavi incrociati “a stella” al di sopra delle cupole dei transetti.

3.3. Interventi di consolidamento delle coperture

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. Esse sono adeguatamente connesse alle sottostanti strutture metalliche di consolidamento della navata centrale (travi a boomerang).

Un intervento particolarmente interessante è stato realizzato per rinforzare il piano di falda delle navate laterali, al di sopra 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 meglio rispondere ai carichi verticali e contribuire a resistere alle sollecitazioni orizzontali. Questo assito armato, inclinato, è in grado di collegare mutuamente le murature della zona alta con le murature della zona bassa, all'appoggio delle falde

Il sistema è composto da un doppio assito ligneo collegato all'assito 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 (delimitati dagli originali muretti tagliafuoco esistenti). Le cornici, a loro volta, sono 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 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 inferiori e coppi antichi superiori, riducendo il numero di strati che si erano sovrapposti nel tempo e riducendo di conseguenza il pesante sovraccarico presente 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 alle barriere contro l'accesso dei volatili.



Figura 11. Interventi sulle coperture: copertura esistente con strati di tegole sovrapposti e guaina ondulata bitumata (a,b,c,d); orditura lignea esistente (e); nuovo doppio assito incrociato (f,g); controventi in acciaio con cornice perimetrale (h,i,l,m); nuova copertura composta da guaina impermeabilizzante, ondulina sottocoppo e coppi di recupero integrati e dotati di ganci ferma coppo (n,o,p,q).

4. CONCLUSIONI

Gli interventi di consolidamento realizzati nel Duomo di Cremona hanno migliorato la risposta della struttura alle sollecitazioni sismiche ed hanno contrastato le spinte orizzontali generate dalle volte, che la muratura non era più in grado sopportare.

Si è optato per l'utilizzo dell'acciaio con soluzioni tecnologiche innovative, che hanno portato ad interventi rispettosi dell'esistente e al tempo stesso strutturalmente efficaci.

Sono stati inoltre introdotti a livello dei matronei dei percorsi alternativi (si veda la foto 12) che rendono visitabili zone che normalmente rimangono inaccessibili.

Da ultimo, accanto all'aspetto tecnico ed a quello della innovazione scientifica, è doveroso ricordare che la collaborazione sincera tra ingegneri ed architetti in fase di progetto, assieme a quella tra direzione lavori ed impresa durante la realizzazione, accompagnata dalla presenza assidua e partecipe degli organi di tutela, della proprietà e di tutti quelli che avevano a cuore il Duomo, ha rappresentato una esperienza che è stata appassionante e gratificante sia a livello professionale che umano.



Figura 12. Il percorso di visita a livello dei matronei



BIBLIOGRAFIA

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

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

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, 2009

PROPRIETA': Curia Arcivescovile di Cremona;

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

IMPRESA ESECUTRICE: ATI Brancaccio Costruzioni – D. TECH

Si ringraziano per la collaborazione Mons.Achille Bonazzi, Arch. F. Zorloni, Arch. M.Mazzoleni.