



## Gaëtan Genès & Valéry Calvi NOTRE-DAME DE PARIS

### GLI STUDI DI INGEGNERIA DELLA CARPENTERIA DELLA GUGLIA E DEL TRANSETTO

Gaëtan Genès, presidente di ECSB (Étude Charpente et Structure Bois) e Valéry Calvi dirigono due studi tecnici indipendenti, specializzati in strutture in legno: cui logo rappresenta un faro in Patagonia, su cui sono intervenuti i due studi di ingegneria.

Entrambi fanno parte, fin dalla sua creazione 20 anni fa, dell'associazione "Ingénierie Bois Construction" che riunisce gli studi specialisti del legno francesi (circa 250 ingegneri e tecnici), ed è oggi presieduta da Gaëtan Genès.

Hanno scelto di unire le forze lavorando insieme per il gruppo di imprese Le Bras Frères, mandatario (Meurthe-et-Moselle), Asselin (Deux-Sèvres), Cruard (Mayenne) e Métiers du Bois (Val-de-Marne), che ha vinto la gara d'appalto per la realizzazione delle carpenterie in rovere della guglia e del transetto della cattedrale di Notre-Dame. Così, dalla primavera del 2022, hanno progettato, insieme, la ricostruzione della guglia, associando le competenze di ECSB a quelle dello studio CALVI ETUDES STRUCTURES, incaricato dei calcoli complessi.

La forma molto allungata che caratterizza la struttura rende molto difficile comprendere a prima vista la sua complessità. Tuttavia, per la sua notevole snellezza che provoca importanti sforzi al vento, per l'altissimo numero degli elementi strutturali che rendono questa struttura iperstatica particolarmente complessa. Presentiamo di seguito alcune descrizioni dettagliate di questa carpenteria.

#### IL NOSTRO MANDATO:

- Stabilire gli schemi generali
- Calcolare la struttura
- Verificare le connessioni
- Proporre tutte le soluzioni possibili di verifica (considerando l'assenza di norme tecniche specifiche) e di miglioramento della struttura senza modificare né l'estetica né la concezione originaria

A partire dagli studi di fattibilità della committenza, venticinque tecnici e ingegneri, con l'uso di software di calcolo e di disegno automatico, hanno stabilito 350 schemi generici che rappresentano la struttura così com'era in origine. Ogni nodo è disegnato in 3D e accompagnato da viste in "esplosione". In tutto sono stati computati 1500 nodi tra le membrature lignee della guglia.

Il primo passo ha consistito, quindi, nel capire come la struttura funzionava all'epoca della sua costruzione e come è "invecchiata". Questo lavoro è stato realizzato studiando le tavole elaborate nel XIX secolo dell'architetto Eugène Viollet-Le-Duc, dell'impresa Bellu e del suo carpentiere Georges, i diversi modelli già costruiti, le scansioni 3D e le foto realizzate prima dell'incendio, le dime degli attuali carpentieri, i resti degli elementi in legno conservati dopo l'incendio, nonché, naturalmente, il lavoro di ricostruzione eseguito dalla Committenza.

Riproduciamo identico, ma migliorandolo puntualmente, quando è strettamente necessario. È davvero la nostra filosofia: non tradire lo spirito del monumento storico pur sfruttando "l'esperienza" della guglia scomparsa e i progressi offerti dall'ingegneria del legno e dalla tecnologia. Su alcuni assemblaggi, ad esempio, l'aspetto esterno non è modificato, ma la parte interna dell'assemblaggio – gli spessori dei tenoni, le larghezze delle mortase, gli assemblaggi legno-legno – è in alcuni casi modificata per migliorarne il funzionamento strutturale, sempre in accordo con gli architetti della sezione Monumenti Storici. All'epoca in cui Viollet-Le-Duc progettò la guglia, non aveva né le capacità di calcolo offerte dai nostri software, né le conoscenze che noi possediamo dei materiali e delle loro caratteristiche meccaniche. Il progetto funzionava in modo empirico.

In questa fase, una volta terminati gli schemi generici delle connessioni, dobbiamo proporre tutte queste possibilità di miglioramento alla committenza. Una volta validati questi schemi, i dati degli assemblaggi vengono forniti man mano ai carpentieri.

#### IL CALCOLO DELLE CARATTERISTICHE DELLE SOLLECITAZIONI

Il calcolo delle caratteristiche delle sollecitazioni è naturalmente la prima fase necessaria al dimensionamento della carpenteria, ottenuto poi con l'utilizzo di diversi modelli di calcolo (elementi finiti ad aste e nodi). Fortunatamente per la sua stabilità al vento, in assenza di ancoraggi, il peso proprio della carpenteria e della copertura è significativo: circa 400 tonnellate.

Ci è sembrato interessante presentarvi di seguito una semplificazione dei percorsi delle sollecitazioni in alcune parti al fine di comprendere meglio la struttura e di apprezzare meglio sia la sua complessità che le sue criticità.

Innanzitutto, una vista dall'alto permette di distinguere:

- le strutture comprese nei piani passanti per le diagonali della carpenteria, che poggiano direttamente sui 4 punti di appoggio. Si parla delle "capriate diagonali".
- le strutture orientate secondo gli assi dei colmi: Est-Ovest (Coro-Navata) e Nord-Sud (Transetto): si parla dei "colmi a graticcio".

Osserviamo innanzitutto le "capriate diagonali", in cui i carichi scendono dalla guglia sia attraverso gli elementi diagonali sia attraverso il monaco, prima di biforcarsi al livello della catena per dirigersi verso i 4 appoggi. Per quanto riguarda gli elementi diagonali, questa biforcazione avviene a livello del nodo X che abbiamo appena visto in precedenza.

Globalmente, le sollecitazioni si dividono in due percorsi:

- uno, passando per il grande saettone 24, raggiunge quasi direttamente l'appoggio;
- l'altro, attraverso il saettone 33 e il grande puntone secondario 37, raggiunge l'appoggio attraverso le travi diagonali impilate che misurano più di un metro di altezza. Durante il ritiro per essiccazione del legno, queste travi diagonali perdono 5 cm di altezza, e immaginiamo quindi che avverrà necessariamente una redistribuzione degli sforzi!

Un dettaglio interessante: conformemente alla concezione originaria del XIX secolo, l'appoggio diretto dei puntoni-spigoli o del monaco sulle travi diagonali risulta scarico. La lunghezza dei tenoni è stata calcolata con precisione per evitare qualsiasi disconnessione o appoggio indesiderato.

La struttura dei "colmi a graticcio" è forse ancora più interessante! Tutto inizia anche con i puntoni-spigoli della guglia. Ma a livello dell'ingresso nella catena, si opera una biforcazione in 3 dimensioni per andare a raggiungere i 4 appoggi attraverso gli elementi diagonali delle "contrefiches grand-gousset 9" e dai puntoni diagonali di rinforzo "Jambe de force Pentagonales 7". La struttura portante è in questo modo costituita da una piramide tronca, molto resistente... ma instabile! La sua stabilità è infatti garantita solo dalla presenza delle travi diagonali.

Un dettaglio della concezione ci sembra importante riportare: l'assemblaggio tra gli elementi diagonali delle "contrefiches grand-gousset 9" e i punti di rinforzo pentagonali 17 risultava molto insufficiente. È stato quindi attraverso la lettura del trattato di Eugène Viollet-le-Duc, che descrive la sua corretta comprensione del percorso delle sollecitazioni, che, insieme con gli Architetti della sezione Monumenti Storici, abbiamo, infine, trovato una concezione dell'assemblaggio che soddisfacesse tutti i criteri immaginati dalle maestranze del XIX secolo. Il risultato sembra semplice ma è in realtà il frutto di un'ottimizzazione della resistenza tenendo conto delle superfici di contatto, dell'orientazione delle fibre degli elementi lignei, del rischio di scorrimento e delle capacità di montaggio dell'assemblaggio. Abbiamo dovuto rifare i piani e ricalcolare 17 volte per raggiungere il risultato!

## LEGNO « FRESCO »

L'insieme della carpenteria, salvo alcune eccezioni, è realizzato in "legno fresco". Quando insegniamo il calcolo delle carpenterie tradizionali, diciamo sempre ai nostri studenti "che bisogna calcolarle 2 volte":

- una volta durante la loro messa in opera, quando i contatti degli assemblaggi sono perfetti
- una volta dopo 10 anni quando i legni si saranno essiccati e si saranno creati dei "giochi" (spazi vuoti).

Ebbene, qui due volte sono ancora insufficienti. Abbiamo sezioni molto grandi di quercia. Un'essiccazione parziale su 20-30 mm avverrà abbastanza rapidamente mentre l'essiccazione della parte centrale avviene molto lentamente.

Cosa succede nel tempo durante l'essiccazione? Abbiamo grossolanamente 3 scenari teorici:

- Un primo stadio LEGNO FRESCO. "Legno fresco" = molta acqua, quindi molto pesante: 300 kg in più rispetto a quando sarà secco. In questa fase, con il know-how delle maestranze che l'hanno tagliato, tutti gli assemblaggi sono in contatto perfetto; le caratteristiche meccaniche del legno fresco sono inferiori a quelle del legno secco, definite dall'analisi della letteratura e verificate da prove;
- Successivamente i legni si essicheranno, LENTAMENTE, prima per perdita di acqua libera fino al punto di saturazione delle fibre (circa il 31%), il che comporta essenzialmente una perdita di peso proprio ma dà anche il tempo ai fenomeni di scorrimento di manifestarsi.
- Poi la perdita di acqua comporterà il ritiro, diverso nel senso radiale, tangenziale e longitudinale, considerato qui dell'ordine del 17%. La perdita di sezione si avvicinerà allora al 5%, cioè circa 5 cm di diminuzione per le travi diagonali. Oltre alle deformazioni locali assiali e alle fessurazioni, questo ritiro comporterà molto rapidamente perdite di contatto localizzate nei nodi, con i momenti di flessione associati, ma anche spostamenti più globali con le ridistribuzioni di sforzi indotti. Per eliminare una parte degli effetti di questo ritiro progressivo, abbiamo installato delle "Rondelle Belleville" autobloccanti, il cui numero e il posizionamento sono calcolati in funzione del serraggio iniziale, del ritiro totale atteso, della possibilità o meno di un successivo serraggio e, ovviamente, di una massima riduzione del loro impatto visivo.

Per rendere conto di questo lungo processo, abbiamo quindi modellato la struttura in 4 stadi successivi:

- un primo stadio iniziale del "legno fresco";
- un secondo stadio, a 10 anni, con la comparsa dei momenti dovuti alla modifica dei piani di contatto nei nodi, associata a una diminuzione dell'acqua libera (perdita di peso + aumento delle caratteristiche meccaniche);
- un terzo stato, a 50 anni;
- un quarto stato, a 100 anni

La modellizzazione "complessa" tiene conto, quindi:

- dei momenti indotti dalle perdite di contatto localizzate;
- del ritiro longitudinale;
- del ritiro trasversale;

Ogni modello di calcolo, corrispondente ai 4 stadi, presenta circa 20.000 nodi, è stato risolto in 450 passi di calcolo, dovendo risolvere 2200 combinazioni di carico, per un totale di 120 ore di elaborazione.

Anche se le strutture sono essenzialmente reticolari, i fenomeni viscosi sono ugualmente importanti:

- particolarmente accelerati dal tenore di umidità del legno;
- aumenteranno molto fortemente la deformazione ( $\times 3,5$ )
- agiranno come una diminuzione della non linearità della struttura (diminuzione dell'influenza dei giochi);
- si avrà grande difficoltà di calcolo della sollecitazione risultante, su modello non lineare, da uno schema di carichi che comporta deformazioni viscosi (per i carichi permanenti) e assenza di tali fenomeni (per le sollecitazioni del vento).

I modelli e i calcoli realizzati dalle squadre riunite intorno a Gaëtan Genès integrano una moltitudine di dati tra cui i risultati dei test di resistenza al vento (cfr. articolo "La guglia alla prova dei venti", pubblicato in La Fabrique de Notre-Dame numero 3), i carichi permanenti dovuti alla copertura, le caratteristiche meccaniche (resistenza agli sforzi di compressione, di flessibilità), senza dimenticare naturalmente le singolarità del legno stesso, molto eterogeneo. "Il legno, lo si impiega, non lo si fabbrica, ricorda l'esperto. Oltre a un importante lavoro iniziale di selezione riguardante in particolare il tasso di umidità, le fessure dei legni e la posizione dei nodi, è necessaria la ricognizione di ogni pezzo, le cui caratteristiche fisiche intervengono negli studi."

## LA VERIFICA DELLA STRUTTURA

Affronteremo 2 punti molto specifici durante questa conferenza: la verifica dell'instabilità e degli assemblaggi.

Per verificare la stabilità di una struttura, i codici di calcolo propongono regole precise adatte a travi appoggiate-appoggiate, a inerzia costante e con uno scorrimento "classico" (non considerato in modo esplicito): tutto il contrario di ciò che troviamo realmente nella carpenteria analizzata.

Per necessità, siamo arrivati, quindi, a considerare anche la rigidità del tavolato nel suo piano per aiutare le capriate diagonali fortemente compresse.

Gli assemblaggi "tradizionali" non sono, nella loro grande maggioranza, trattati dai codici di calcolo moderni, e tanto meno quando sono in "legni freschi" o si considerano perdite di contatto localizzate. I numerosissimi assemblaggi di forme diverse presenti in questa opera ci hanno portato a scrivere circa 1000 pagine di formulazioni riguardanti la loro geometria, la loro resistenza e la loro rigidità. Queste formulazioni sono state trasformate in algoritmi e poi in fogli di calcolo informatizzati che permettono la giustificazione esaustiva dell'insieme degli assemblaggi sotto la totalità delle combinazioni di carico considerate.

## E IN SEGUITO ?

Abbiamo già avuto mandato per realizzare le scansioni 3D complete della carpenteria in legno per definire e fissare lo stato di fatto della struttura: un lavoro eccezionale che totalizza 1800 stazioni di acquisizione da ricombinare. E naturalmente, non mancheremo di continuare a monitorare, nel tempo, questo capolavoro.