

Progettazione delle strutture metalliche per il nuovo auditorium della scuola musicale di Pisa

Francesco Del Viva

La forma ha oggi un ruolo centrale nell'architettura, sempre più spesso infatti viene superata la tradizionale concezione di pareti e coperture lasciando il posto a superfici senza soluzione di continuità, dotate di semplice o doppia curvatura. Tale architettura ha portato alla rivoluzione progettuale che può essere condensata nel termine "skin in", infatti se il processo progettuale classico si muove dalla griglia strutturale verso l'esterno, il processo *skin in* fa l'opposto: dalla conformazione della pelle, e cioè della superficie esterna, si passa alle orditure secondarie e alla struttura per finire alla conformazione degli spazi interni. Il progetto delle superfici complesse richiede il supporto digitale, grazie al quale un qualsiasi punto appartenente alla superficie è individuabile in maniera univoca e precisa; il modello digitale rappresenta quindi l'anello intermedio tra il disegno e l'oggetto. Fondamentale è la pianificazione dei costi attraverso una traduzione degli elementi architettonici (pannellature, travi, colonne ecc) nella seguente gerarchia: dritto, piano, curvo, doppiamente curvo, e deformato, dove ciascuno rappresenta un costo più alto. La traduzione prosegue attraverso la seguente sintassi: modulare, simile, unico, dove ancora una volta ciascuno rappresenta un costo più alto di produzione e assemblaggio.

L'auditorium della scuola musicale di Pisa, generazione della superficie e modellazione FEM

La superficie esterna dell'auditorium è caratterizzata da una forma ellissoidica complessa derivata dall'accostamento di due diverse superfici di *loft* aventi continuità in tangenza sul piano di massima dimensione in pianta, con ingombro massimo $39,6\text{ m} \times 27,6\text{ m} \times 9,6\text{ m}$. L'involucro è sostenuto a $3,6\text{ m}$ di altezza dal suolo da 32 colonne *CHS 244,1x 8 mm* disposte a *V* a formare in pianta una sorta di raggiera attestata su un anello ellittico a sezione scatolare chiusa. Le travi dell'involucro presentano una linea d'asse assecondante la superficie esterna e sezione trasversale aperta, con altezza e larghezza delle ali variabile a seconda dell'impegno statico lungo lo sviluppo delle membrature stesse. Le travi d'impalcato sono anch'esse a sezione aperta composte saldate con anime forate ed intradosso curvo quasi a formare un calco positivo della parte inferiore dell'involucro.

La superficie così generata è caratterizzata da doppie curvature puntualmente variabili, fedelmente riproducibili solamente attraverso tecnologie *CAM (Computer Aided Manufacturing)*, con notevole aggravio dei costi. Pertanto il primo obiettivo è stato quello di discretizzare la superficie teorica in una nuova superficie non troppo "distante" da quella di partenza, che associasse la semplicità costruttiva dei pannelli a semplice curvatura, dei quali è possibile determinarne lo sviluppo, con la sinuosità della forma originaria.

In ambiente *CATIA*, sulla base di considerazioni geometriche, è stato possibile approssimare la superficie originale attraverso segmenti conici a base non circolare.

La complessità geometrica della struttura ha condizionato anche la modellazione agli elementi finiti, per la quale è stata scelta una modellazione completa per elementi *plates*, ad eccezione di pochi elementi *beams* per le colonne e l'orditura secondaria dell'involucro. La modellazione *FEM* è passata inizialmente attraverso un modello *CATIA* composto da sole superfici (fig.1), successivamente importate in *Straus7*. Attraverso l'*Automeshing* di *Straus7* è stato realizzato un modello *FEM* composto da circa 132.000 elementi *plates* lineari a 4 nodi, 140.000 nodi e 5.200 *beams* (fig. 1).

Una modellazione geometrica così accurata è stata accompagnata da un'altrettanto accurata modellazione delle azioni atmosferiche agenti sull'involucro.

Per l'azione del vento è stato considerato l'effetto che si ha là dove il flusso d'aria distacca dalla superficie dando luogo a zone a pressione positiva ed altre a pressione negativa. In particolare è stato fatto riferimento alla *CNR-DT 207/2008 "Istruzione per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni"*. La superficie effettiva non è immediatamente riconducibile ad una delle trattazioni presenti nel documento *CNR*, pertanto l'idea è stata la seguente: siano *x* e *y* gli assi principali in pianta, sezionando la superficie con fasci di piani aventi assi di sostegno rispettivamente *x* e *y*, otteniamo una serie di curve a

loro volta approssimabili mediante policentriche. Ogni arco di policentrica può essere visto come una copertura a volta cilindrica che in realtà ha solamente una parte del suo sviluppo coincidente con la superficie effettiva sezionata. Ripetuta la procedura per più piani di sezione, è stato individuato il luogo dei punti dove è presumibile che il flusso distacchi e la pressione si inverte.

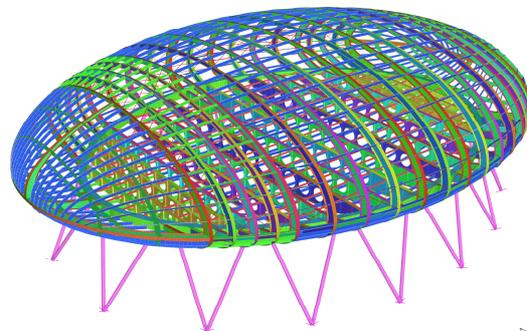
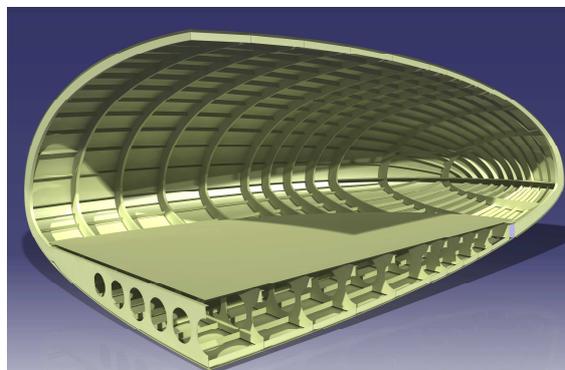


Fig. 1: in alto modello *CATIA*, in basso modello agli elementi finiti di *Straus7*

che il flusso distacchi e la pressione si inverte.

L'azione della neve (conforme alle *NTC 2008*) ha tenuto debitamente in conto la contemporanea presenza del vento nelle due direzioni in pianta che ne causa l'accumulo asimmetrico. Primariamente è stato individuato il luogo dei punti con piano tangente a 60° oltre il quale la neve scivola, successivamente si è proceduto al tracciamento delle creste di accumulo ed alla ricerca delle funzioni di distribuzione più prossime possibile ai dettati normativi.

Analisi strutturale

Verificata l'attendibilità del modello numerico sono state effettuate tutte le analisi statiche e dinamiche, lineari e non, necessarie a garantire la resistenza e la stabilità sia nei confronti degli stati limite non sismici che sismici. In particolare per l'analisi sismica si è preferito percorrere due strade indipendenti al fine di confrontare, e quindi validare, i risultati ottenuti. La prima strada percorsa è quella classica dell'analisi modale a spettro di risposta elastico, successivamente confrontata con un'analisi dinamica lineare *time history* con accelerogrammi artificiali spettro-compatibili. Dal confronto in termini di forze normale nelle colonne, emerge che i risultati dell'analisi *modale* a spettro di risposta inviluppano quelli dell'analisi *time history*, confermando l'ordine superiore di quest'ultima, molto più onerosa ma più accurata (*fig.2*).

Una parte importante del lavoro svolto è stata dedicata allo studio delle varie forme di instabilità a cui una struttura del genere, voluminosa e snella, può essere soggetta. In ambito lineare sono stati ricercati i moltiplicatori critici di *buckling* in corrispondenza dei quali si ha l'imbozzamento delle lamiere più snelle come le anime delle travi dell'involucro e quelle d'impalcato.

L'instabilità progressiva delle travi dell'involucro e l'instabilità globale delle travi principali d'impalcato, è stata indagata mediante analisi statiche non lineari che valutassero la convergenza della soluzione anche quando gli spostamenti non sono più trascurabili. In particolare per la trave centrale d'impalcato è stato adottato un modello dotato di un'imperfezione iniziale che ha per forma la prima forma instabile della trave priva di ritegni trasversali intermedi, e per ampiezza $1/1000$ della luce (*fig.3*).

In fine per le travi dell'involucro si è ritenuto di verificarne la stabilità progressiva sia nei confronti della condizione di carico neve asimmetrico per accumulo con vento trasversale, che per la condizione di carico neve asimmetrico, non prevista dalla normativa, derivata dalla condizione di carico precedente con solamente metà dell'involucro caricato dal massimo accumulo di neve in presenza di vento, questo al fine di estremizzare l'asimmetria trasversale di carico alla quale la stabilità degli archi risulta sensibile.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha voluto affrontare una delle sfide più interessanti della moderna ingegneria strutturale, cioè quella di avvalersi di approcci e tecniche informatiche finora specialistiche di altri ambiti ingegneristici, infatti lavorare a partire dal rivestimento è una procedura comune nell'industria automobilistica e aeronautica, nell'ambito delle quali sono state sviluppate ampie gamme di modelli digitali usati alla stregua di contenitori spaziali per lo sviluppo della struttura.

Dr. Ing. Francesco Del Viva

Università di Pisa

Tesi di Laurea in Ingegneria delle Costruzioni Civili

Relatori:

Prof. Dr. Ing. Maurizio Froli

Dr. Ing. Gerardo Masiello

Dr. Arch. Roberto Pasqualetti

Riferimenti:

francescodelviva@tiscali.it

www.smstrutture.it

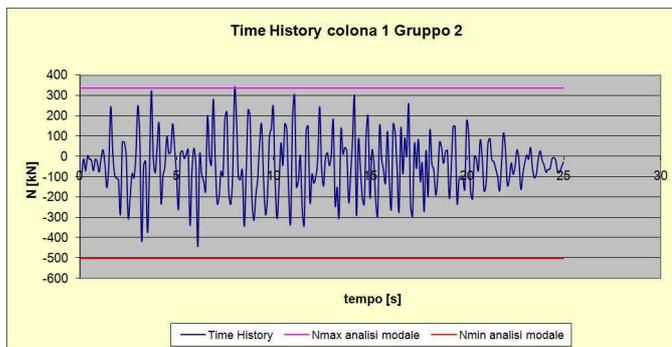


Fig. 2: confronto analisi modale a spettro di risposta – time history in termini di sforzo normale in una colonna.

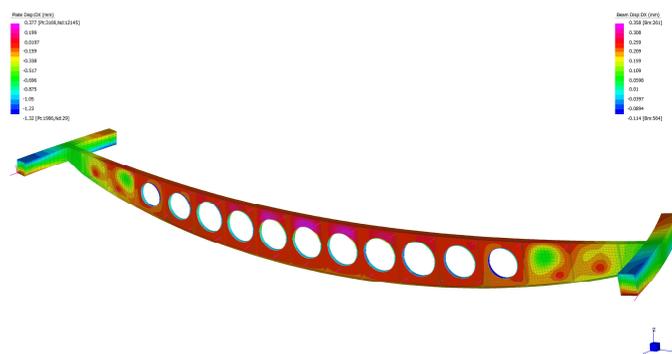


Fig. 3: modello per la verifica di stabilità globale della trave centrale d'impalcato mediante analisi statica non lineare