

Premessa

La forma ha oggi un ruolo centrale nell'architettura, sempre più spesso infatti è superata la tradizionale concezione di pareti e coperture lasciando il posto a superfici senza soluzione di continuità, a semplice o doppia curvatura. Tale architettura ha portato alla rivoluzione progettuale condensabile 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", 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; 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 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.

Generazione della superficie e modellazione FEM

La superficie esterna dell'Auditorium è caratterizzata da una forma ellissoidica 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 m di altezza dal suolo da 32 colonne *CHS 244,1 x 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 con la sinuosità della forma originaria. In ambiente *CATIA*, sulla base di considerazioni geometriche, la superficie originale è stata approssimata 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

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

Francesco Del Viva

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 (figura 1), successivamente importate in *Straus7*. Attraverso l'*Automeshing* di *Straus7* è stato realizzato un modello composto da circa 132.000 elementi plates lineari a 4 nodi, e 5.200 beams (figura 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*. La superficie non è immediatamente riconducibile ad una delle trattazioni presenti

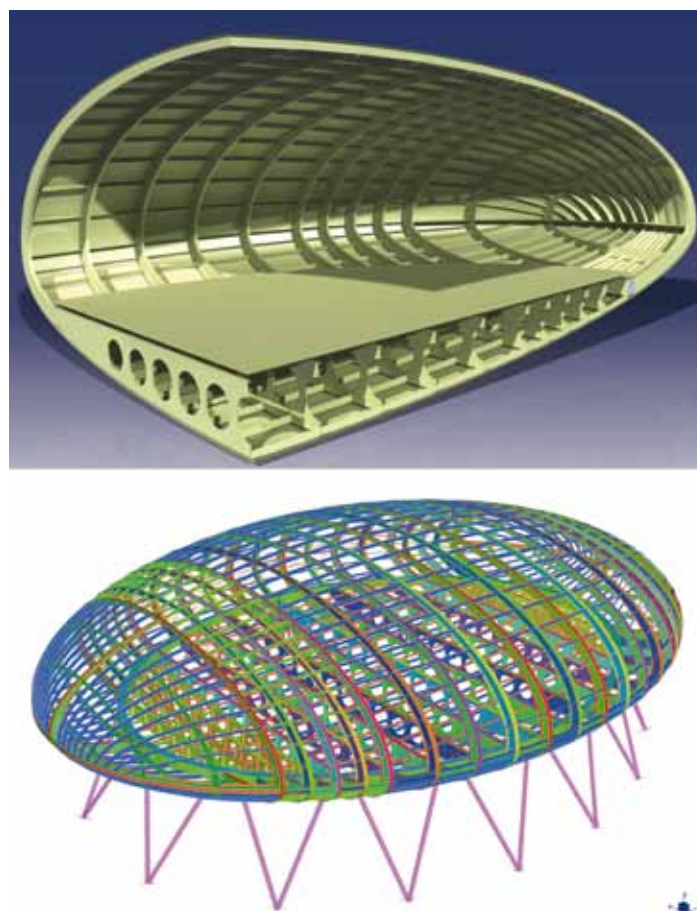


Fig. 1 - Modello per la verifica di stabilità globale della trave centrale d'impalcato mediante analisi statica non lineare

nel documento *CNR*, pertanto l'idea è stata le seguente: siano x e y gli assi principali in pianta, sezionando la superficie con fasci di piani aventi per sostegno rispettivamente gli assi x e y , otteniamo una serie di curve approssimabili con 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 inverta. L'azione della neve (*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 sforzo 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 (figura 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. 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 (figura 3).

Conclusioni

Il presente lavoro ha affrontato 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.

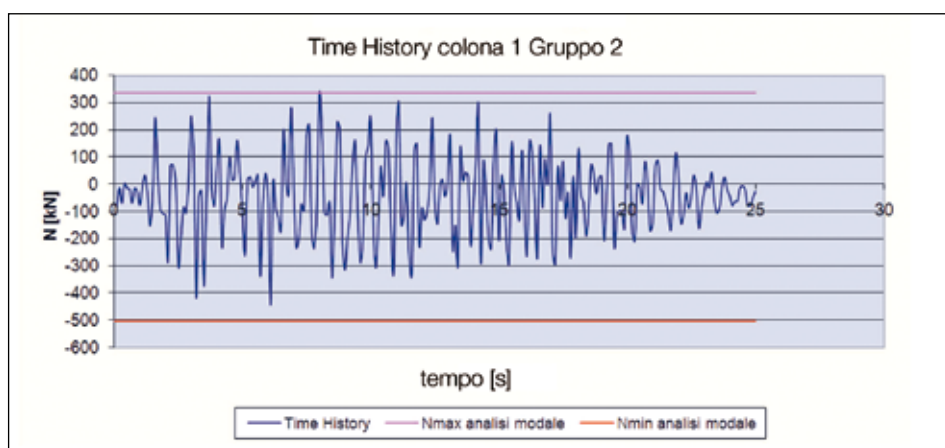


Fig. 2 - Confronto analisi modale a spettro di risposta – time history in termini di sforzo normale in una colonna

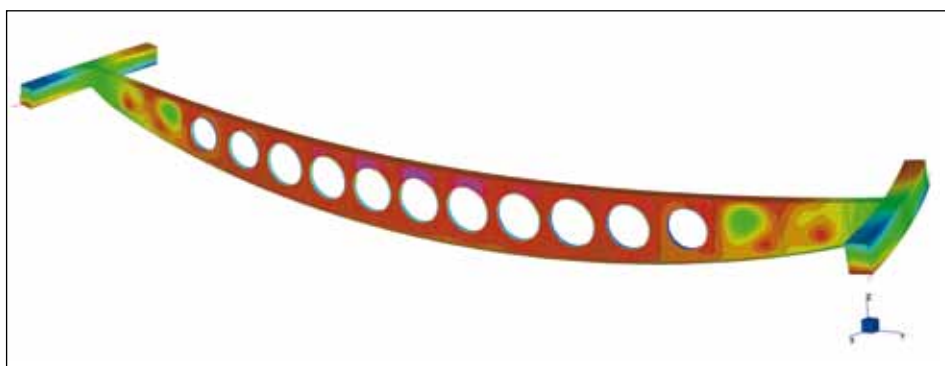


Fig. 3 - Modello per la verifica di stabilità globale della trave centrale d'impalcato mediante analisi statica non lineare

Dr. ing. Francesco Del Viva

francescodelviva@tiscali.it

Università degli Studi di Pisa -Tesi di Laurea in
Ingegneria delle Costruzioni Civili

www.smstrutture.it

Tesi premiata nell'ambito del concorso "Premi per tesi di laurea 10/11" promosso da: ACAI (Associazione fra i Costruttori in Acciaio Italiani)/ Rivista "Costruzioni Metalliche", Collegio degli Ingegneri di Padova, C.T.A. (Collegio dei Tecnici dell'Acciaio), Fondazione Promozione Acciaio.

Relatori:

Prof. dr. ing. Maurizio Froli

Dr. ing. Gerardo Masiello

Dr. arch. Roberto Pasqualetti