

ASPETTI NON CONVENZIONALI NELLA PROGETTAZIONE DI SISTEMI STRUTTURALI LEGGERI: ALCUNE ESPERIENZE APPLICATIVE

UNCONVENTIONAL ASPECTS IN LIGHTWEIGHT STRUCTURAL DESIGN : SOME PERSONAL EXPERIENCES

Massimo Majowiecki
Università IUAV di Venezia
Docente di Tecnica delle Costruzioni
Bologna, Italia
massimo.majowiecki@majowiecki.com

ABSTRACT

The paper is addressed to illustrate some aspects of unconventional uncertainties in reliability assessment due to the "scale effect" and the "Free Form Design" in the field of lightweight structures.

SOMMARIO

Il presente articolo illustra alcuni aspetti non convenzionali relativi alle incertezze nella valutazione di affidabilità dovute all'"effetto scala" ed al libero formalismo morfologico nella progettazione di sistemi strutturali leggeri.

1 INTRODUZIONE

1.1 Incertezze non convenzionali nel costruire: l'effetto scala ed il FFD (free form design)

Con la attuale disponibilità di materiali metallici quali gli acciai ad alta resistenza neri o inox, le leghe di alluminio ed il titanio, di materiali ceramici, di laminati, di compositi di alta tecnologia a matrice metallica (MMC), epossidica e polimerica (FRP) quali le fibre aramidiche ed al carbonio, fino agli avanzatissimi smart materials (recentissimi ritrovati che modificano le loro caratteristiche fisico-meccaniche se sottoposti a sollecitazioni elettromagnetiche e termodinamiche), è stato possibile sviluppare una nuova tradizione costruttiva: le "strutture leggere".

Dall'ultima rivoluzione industriale, per merito principale dell'acciaio, il processo tecnologico è stato rapidissimo nell'industria delle costruzioni : nel campo degli edifici alti si è giunti a costruire fin oltre gli ottocento metri di altezza e nel campo dei ponti metallici è stato realizzato un ponte di circa duemila metri in Giappone e si progettano ponti a campata unica di tremila metri per lo Stretto di Messina e a multi campata di 5000m. per lo Stretto di Gibilterra.

Ai limiti costitutivi di resistenza dei materiali di costruzioni la moda del "mega", ora non sufficientemente distintivo, integrata dal nuovo "challenge architettonico" rappresentato dal FFD producono, nel campo dell'ingegneria strutturale, incertezze fenomenologiche non convenzionali nel naturale sviluppo dello "stato dell'arte" con conseguenti insuccessi progettuali e costruttivi.

1.2 Incertezze di processo nella valutazione dell'affidabilità

L'analisi separata delle variabili progettuali porta alla mancata correlazione concettuale del progetto, a maturazioni temporalmente differite e di norma ad una qualità globale inferiore. Alcuni errori progettuali, nati dalla mancata interazione architettonico-strutturale o dal mancato rispetto dell'etica della responsabilità (sostenibilità), sono stati e sono causa di insuccessi progettuali, contenziosi giuridici, danni, ed in alcuni casi disfunzioni e collassi strutturali di nuove costruzioni (aumentati notevolmente negli ultimi tempi). Questi casi di insuccesso progettuale rappresentano delle vere e proprie lezioni sull'argomento, volte a individuare le incertezze progettuali e costruttive nella valutazione dell'affidabilità.

I principali fattori che determinano "la propensione verso incertezze di processo" sono:

- materiali nuovi o insoliti;
- metodi di costruzione nuovi o insoliti;
- nuovi o insoliti tipi di struttura per dimensioni e morfologia;
- esperienza e organizzazione delle squadre di progettazione e costruzione;
- background di ricerca e sviluppo;
- situazione economica;
- situazione industriale;
- situazione politica.

Tutti questi fattori si possono applicare molto bene a progetti che spesso presentano qualcosa di "non convenzionale" e hanno chiaramente delle ripercussioni sull'interazione umana (Human intervention and human errors). Osservando la Tabella 1 si può notare che a parte l'ignoranza e la negligenza la sottovalutazione delle influenze e le insufficienti conoscenze sono i fattori più probabili nei casi di insuccesso osservati (Tabella 1-2).

Tabella 1: Principali cause di insuccesso e fattori di errore in casi osservati

Causa	%	Fattore	%
Errata valutazione delle condizioni di carico o del comportamento strutturale	43	Ignoranza, disattenzione, negligenza	35
Errori nei disegni o nei calcoli	7	Dimenticanza, errori, sbagli	9
Insufficienti informazioni nei documenti contrattuali o nelle istruzioni	4	Affidamento ad altri senza sufficiente controllo	6
Contravvenzione alle condizioni dei documenti contrattuali o alle istruzioni	9	Sottovalutazione delle influenze	13
Errata esecuzione della procedura di edificazione	13	Insufficienti conoscenze	25
Uso errato, abuso e/o sabotaggio, catastrofe, deterioramento imprevedibili (in parte "inimmaginabili"?)	7	Situazioni oggettivamente sconosciute (inimmaginabili?)	4

Molti nuovi progetti provano ad ampliare lo "stato dell'arte" e attraverso nuove forme di costruzione e tecniche di progettazione, adottate nell'ambito dell'attuale metodologia di progettazione concettuale, generano incertezze fenomenologiche su qualsiasi aspetto del possibile comportamento della struttura in fase di costruzione, in servizio o soggetta a condizioni estreme.

Osservando i risultati statistici del comportamento in servizio, le tipologie e morfologie insolite, i nuovi materiali e soprattutto "l'effetto scala" delle grandi dimensioni, emergono livelli di incertezza non convenzionali nella valutazione dell'affidabilità. Queste incertezze sono schematizzate in Fig. 1:

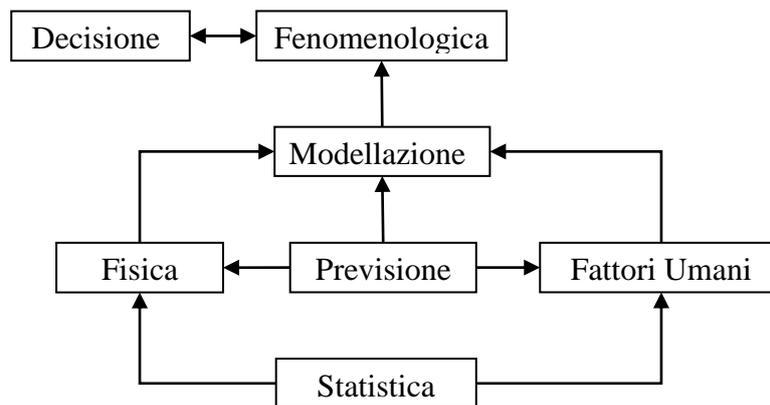


Fig. 1: Incertezze nella valutazione dell'affidabilità secondo Melchers (1987)

2 VALUTAZIONE DELL'AFFIDABILITA'

Una volta limitata l'incertezza fenomenologica (facendo piccoli passi nell'ampliamento naturale dello stato dell'arte e limitando il coinvolgimento "free form" nell'impostazione concettuale architettonica delle strutture principali), le incertezze statistiche, nell'ambito della progettazione e verifica non convenzionale di sistemi strutturali leggeri, possono essere ridotte adottando un sistema di Advanced numerical analysis.

Nel campo delle strutture leggere è sovente trovare una ridotta informazione normativa. In molti casi è necessario accedere a livelli superiori di verifica oltre a quello semiprobabilistico agli stati limite. In particolare, nel campo delle coperture di grande luce le incertezze dovute ai carichi possono essere ridotte considerando:

- Il supporto delle prove sperimentali alla progettazione. Le prove in galleria del vento su modelli in scala ed il monitoraggio delle strutture esistenti hanno un ruolo importante in situazioni progettuali tipiche delle coperture di grande luce come ad esempio:
 - ✓ la distribuzione e l'accumulo della neve su grandi aree di copertura in funzione delle direzione e intensità del vento statisticamente correlate;
 - ✓ la distribuzione della pressione del vento su grandi aree di copertura considerando i valori teorici e sperimentali delle densità di potenza spettrale o l'andamento delle storie di carico.

Inoltre, in particolari situazioni, sono da considerare,

- l'andamento nel tempo dell'effetto delle azioni coattive come la pretensione, i cedimenti viscosi a breve e lungo termine e la temperatura;
- i fattori di affidabilità e sicurezza delle leggi costitutive dei nuovi materiali compositi hi-tech;
- l'esperienza nella progettazione dei dettagli costruttivi strutturali. Questa attività ha un ruolo importante nel ridurre le incertezze fisiche e di modellazione e nel prevenire collassi progressivi per le strutture di grande luce;

- l'analisi di ricerca dello "stato 0" per trovare la configurazione iniziale di strutture a cavi, membrana o pneumatiche;prestando particolare attenzione alla interazione elastica e non con le strutture di bordo;
- la necessità di evitare e cortocircuitare fenomeni di collasso progressivo del sistema strutturale dovuti al cedimento di un elemento strutturale secondario o di particolare costruttivo;
- la compatibilità fra i vincoli esterni ed interni ipotizzati nel modello di calcolo e la reale risposta strutturale;
- l'analisi non lineare materiale per fenomeni elastici, anelastici e plastici compresi i cedimenti viscosi di medio e lungo termine;
- l'analisi non lineare geometrica per condizioni statiche e dinamiche in regime di grandi spostamenti in regime "follower";
- l'analisi incrementale non lineare geometrica e materiale per identificare possibili fenomeni di instabilità locale e globale;
- l'analisi stocastica dinamica nel dominio delle frequenze per indagare la risposta strutturale all'azione di buffeting del vento considerando i contributi statici, quasi statici e risonanti. Questa analisi può essere supportata da un'identificazione sperimentale su modelli aeroelastici in scala con valori cross correlati di densità di potenza spettrale (PSD) della pressione interna ed esterna agenti sulle superfici della copertura;
- l'analisi stocastica dinamica nel dominio del tempo per il controllo della stabilità aerodinamica di sistemi strutturali leggeri e di grande luce soggetti all'azione del vento. Questa analisi deve essere supportata da un'identificazione sperimentale su modelli aeroelastici in scala con storie di carico cross-correlate considerando l'interazione fluido-struttura;
- l'applicazione delle tecniche di ottimizzazione al processo di progettazione strutturale;
- l'analisi stocastica di sensibilità e affidabilità parametrica del sistema strutturale includendo le tolleranze costruttive..

3 INCERTEZZE NON CONVENZIONALI DOVUTE ALL' "EFFETTO SCALA"

3.1 Stadio di Braga

La copertura dello stadio di Braga è stata realizzata con un sistema strutturale a grande luce semplicemente sospeso realizzato con cavi di acciaio che sorreggono lastre di calcestruzzo (Fig. 2-a). Il sistema di stabilizzazione è fornito dalla sola forza gravitazionale per cui si è resa necessaria un'analisi approfondita degli effetti generati sulla struttura delle varie condizioni di carico e dalle vibrazioni provocate dal vento. La componente risonante della risposta risulta preponderante (vedi Tab.2) rendendo necessaria un'analisi di affidabilità all'azione random del vento

Tabella 2: Comparazione fra i contributi medi, quasi statici e risonanti per gli spostamenti verticali e vento proveniente da un'angolazione di 270° nord

Node	\bar{R}	$g_{qs}^2 \sigma_{R,qs}^2$	$\bar{R} \pm \sqrt{g_{qs}^2 \sigma_{R,qs}^2}$	$g_{res}^2 \sigma_{R,res}^2$	$\bar{R} \pm \sqrt{g_{qs}^2 \sigma_{R,qs}^2 + g_{res}^2 \sigma_{R,res}^2}$
A	0,1550	0,0250	0,3131	0,3027	0,7275
B	-0,0837	0,0115	-0,1910	0,3076	-0,6486
C	-0,0441	0,0014	-0,0812	0,0433	-0,2555
D	0,0930	0,0052	0,1652	0,0419	0,3101
E	0,0621	0,0092	0,1582	0,2040	0,5238
F	-0,0198	0,0016	-0,0599	0,2018	-0,4709

L'analisi di affidabilità della copertura sospesa dello Stadio di Braga soggetta all'azione aleatoria del vento fornisce le seguenti indicazioni:

- a) la sensibilità della probabilità di crollo della copertura alla variazione random della distribuzione del vento;
- b) la direzione del vento che con maggiore probabilità può portare al collasso la struttura (considerando il vento agente con una distribuzione uniforme in tutte in ciascuna direzione);
- c) i punti della copertura in cui ci sono le maggiori probabilità di collasso;
- d) la distribuzione del carico del vento che ha le maggiori probabilità di portare al collasso della struttura.

Questa analisi ha evidenziato la particolare sensibilità della struttura rispetto alla deviazione standard della variazione ($\Delta\varepsilon$) di deformazione dei cavi. La probabilità di collasso rappresenta la probabilità che le variabili random ($\Delta\varepsilon$) appartengano a un definito dominio di rottura D e può essere espressa dal seguente integrale:

$$P_f = \int_{D_f} f_{\Delta\varepsilon}(\Delta\varepsilon) \cdot d\Delta\varepsilon \quad (1)$$

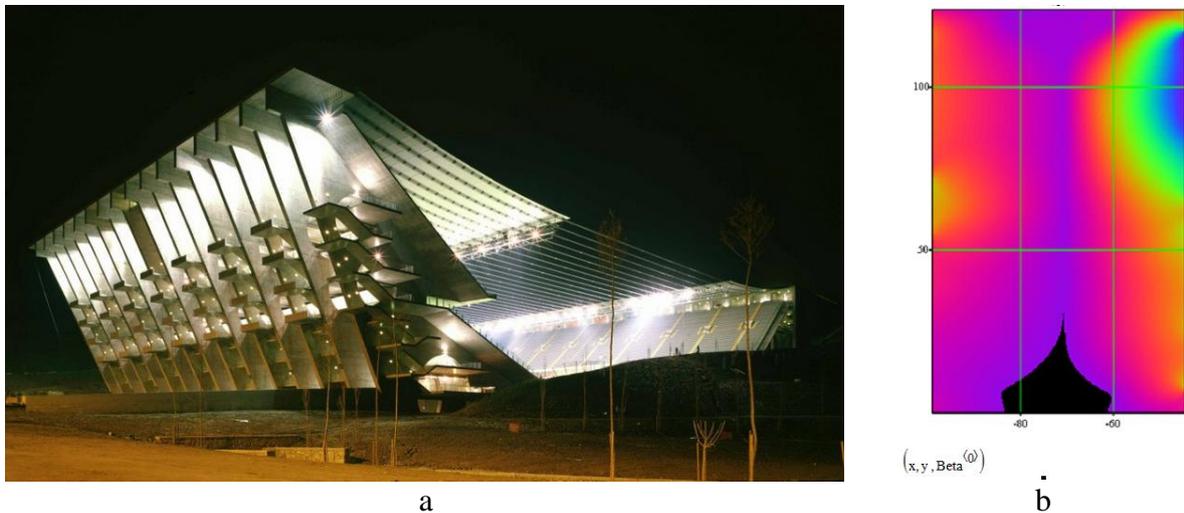


Fig. 2: a) Copertura sospesa dello stadio di Braga, b) Distribuzione del fattore di sicurezza β che evidenzia la maggior sensibilità nella regione nera ($\beta=3.798$)

Come si può osservare in Fig. 2-b il meccanismo di collasso più probabile potrebbe riguardare la zona di bordo della copertura. Grazie all'analisi di sensibilità parametrica è stato possibile rinforzare localmente alcune parti della struttura in modo da ridurre le possibilità di un collasso progressivo.

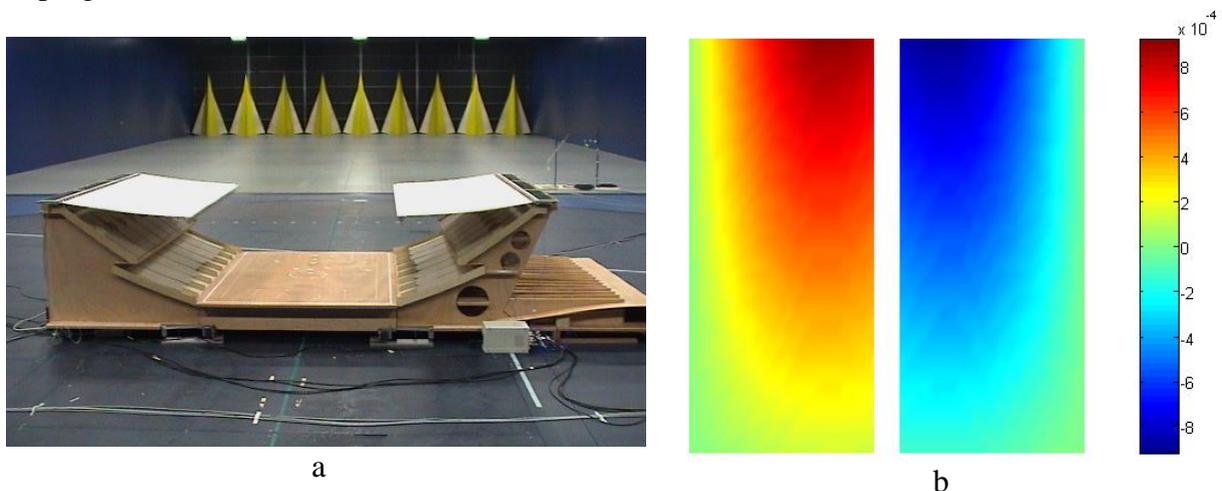


Fig. 3: a) Modello aeroelastico in galleria del vento, b) parte immaginaria dell'autovalore del primo modo complesso $f_1=0,28$ Hz - $\xi_1=3,7\%$

Sono stati identificati sperimentalmente differenti modi di vibrare della struttura comparandoli con i risultati del modello matematico: dal confronto si osserva che il modello matematico rappresenta molto bene i modi antisimmetrici ma si discosta di più da quelli simmetrici dato che coinvolgono l'effettiva rigidezza dei cavi e il sistema di vincolo.

Lo smorzamento strutturale misurato sperimentalmente è di circa il 3‰ per i modi che sono stati eccitati. I parametri sperimentali di smorzamento e frequenza misurati sono serviti ad aumentare il livello di confidenza dei risultati progettuali basati sui modelli matematici.

E' stato studiato anche un sistema di smorzatori viscosi posizionato nei vertici interni della copertura. I risultati dell'analisi mostrano come possa essere ottenuto uno smorzamento addizionale che va dal 4 al 10 % per i primi tre modi complessi e una significativa riduzione delle oscillazioni per il primo modo complesso mediante l'impiego di un coefficiente di smorzamento pari a $C=150$ kN s/m (Fig. 3).

Il processo di analisi è stato studiato in modo da poter essere validato sia da prove in galleria del vento su modelli in scala ridotta che da un sistema di monitoraggio sulla struttura reale.

3 NUOVO STADIO DELLA JUVENTUS A TORINO: incertezze in fase transitoria

Il sistema strutturale della copertura del nuovo stadio della Juventus a Torino è stato progettato cercando di adottare tutti gli accorgimenti che consentissero di velocizzare e rendere più agevoli le operazioni di montaggio.

I pennoni e le travi principali sono stati assemblati a terra e nello stesso tempo si è provveduto al montaggio di torre provvisoria in mezzo al campo di gioco mediante l'ausilio di una gru telescopica e una piattaforma aerea. I pennoni sono stati sollevati grazie all'azione di martinetti idraulici collegati alla torre provvisoria (Fig. 4-a e Fig. 5) e successivamente sono stati inclinati verso la superficie del campo e collegati mediante funi metalliche alla struttura di copertura posizionata a terra. La rotazione dei pennoni è stata resa possibile grazie a un apposito particolare costruttivo presente all'estremità che fungeva da cerniera piana nella fase transitoria di montaggio e da cerniera sferica durante la fase di esercizio della struttura.

In fase di progettazione è stato analizzato il comportamento della struttura durante la sequenza di montaggio grazie alla messa a punto di un modello non lineare geometrico che permettesse, anche in situazioni di slackening, di cogliere i reali sforzi presenti negli elementi strutturali.



Fig. 4: Fotografie delle fasi di montaggio della copertura

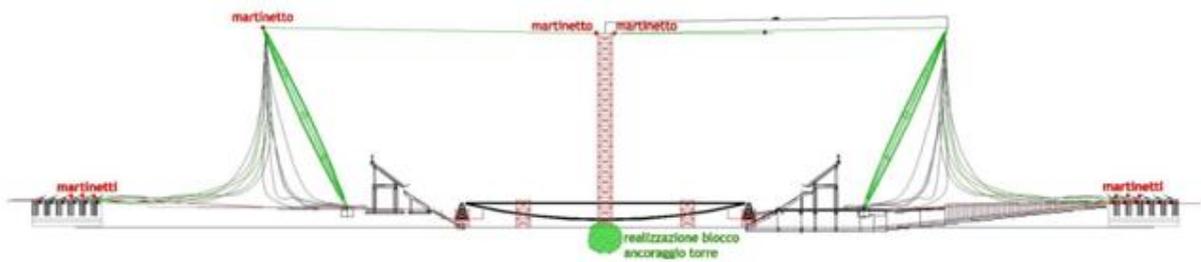


Fig. 5: Sollevamento dei pennoni per mutuo contrasto



Fig. 6: Collegamento stralli esterni, rotazione interna e sollevamento strutture di copertura

L'utilizzo di un modello di calcolo non lineare geometrico si è reso necessario data i grandi spostamenti cui la struttura è stata soggetta durante le operazioni di montaggio ed è servito a verificare la resistenza dei vari componenti strutturali e a confermare che le operazioni di montaggio programmate fossero compatibili con le forze di attrito presenti e le tipologie di connessioni cinematiche.

4 INCERTEZZE NON CONVENZIONALI DOVUTE ALLA MORFOLOGIA STRUTTURALE FFD

Attualmente si assiste ad una libera espressività formale che origina “oggetti architettonici” la cui forma, nella maggior parte dei casi, non ha nessun nesso con principi di tipo strutturale. Nel processo di progettazione concettuale architettonica la componente tecnologica informatica mediante l'impiego progettuale di algoritmi geometrici per la generazione di superfici e solidi e sistemi software nati in ambito di design industriale diventa dominante: la “forma architettonica” può essere “decostruita” con “libertà formali” e compositive prima inimmaginabili.

Molti contemporanei guardano alle leggi imposte dalle nuove tendenze progettuali come:

- la prevalenza dell'estetica sulla razionalità statica;
- l'assidua ricerca dell'efficienza strutturale per risolvere una questione più complessa della realtà al fine di ottenere una soluzione originale;
- la retorica categorica delle azioni strutturali che si traducono in linguaggi progettuali;
- la struttura come scultura;
- impressionismo meccanicistico;
- la trasposizione metaforica, nell'architettura, della Natura e di altri elementi estranei;
- la ripetizione ritmica e monotona di un motivo architettonico;
- la rappresentazione enfatica dei dettagli tipici di un elemento per individuare la scala generale;
- l'introduzione di risorse ausiliarie di informatica (IT).

Molti di questi nuovi “oggetti architettonici” FFD ci hanno meravigliato e, nel nome della definizione stessa del termine architettura, quale attività tecnico-intellettuale volta a modificare l'ambiente fisico in relazione alle esigenze della vita associata, sono stati largamente apprezzati.

zati; non si può negare che alcune costruzioni raggiungono livelli di arte architettonico-scultorea e che il ruolo della struttura diventi unicamente quello di ente resistente dell'oggetto di "design architettonico". Queste nuove realtà architettoniche, basate essenzialmente su capacità artistiche individuali possono, d'altro canto, risultare didatticamente devianti inducendo ad elaborare imitazioni progettuali che, pur partendo da Aspera possono, senza arrivare ad Astra, fermarsi a Mediocritas e introdurre pericolosi "equilibrismi" in campo strutturale

4.1 Copertura reticolare spaziale "Cometa" fiera Portello Milano

La "Cometa" è il frutto di una lunga ricerca morfologica della Mario Bellini Architect(s) che ha concepito la copertura come un assieme di pannelli profilati in alluminio ultrasottile che si staccano ondeggiando da un nucleo più denso fino a formare una coda (Fig. 7-a). La struttura è stata realizzata con una reticolare spaziale a doppio strato realizzata con tubi e nodi sferici in acciaio in modo da cercare di rimanere il più aderenti possibile alla geometria free form richiesta dal progetto architettonico. I nodi e le parti terminali delle aste sono stati progettati con tecniche CAD/CAM e prodotti con lavorazione automatica a controllo numerico; lavorazione che permette di realizzare un elevato numero di elementi diversi fra loro mantenendo i costi contenuti (Fig. 8).

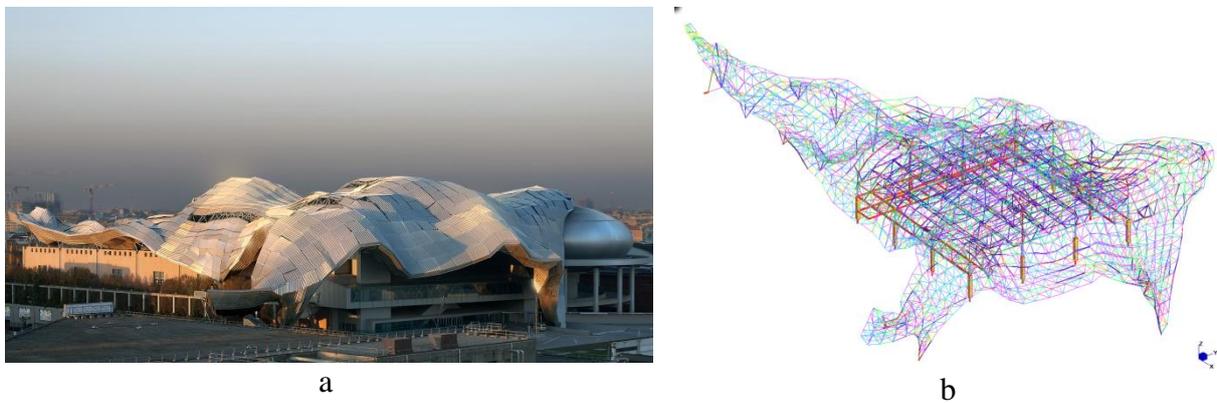


Fig. 7: a) Vista della copertura free form "Cometa", b) Vista del modello matematico della copertura



Fig. 8: Produzione con macchine utensili automatiche dei nodi della struttura reticolare spaziale

La particolare forma della struttura e le notevoli dimensioni hanno reso necessari alcuni importanti accorgimenti strutturali:

- Siccome la cometa è vincolata a diversi edifici (di cui alcuni esistenti e altri invece di nuova costruzione) in fase di progettazione è stato valutato con molta attenzione il sistema di vincolamento da adottare per la struttura: in alcuni punti sono stati infatti inseriti appoggi mobili che permettessero alla reticolare spaziale di risultare svincolata dai movi-

menti sismici degli edifici sottostanti. Nelle zone invece in cui gli appoggi dovevano essere fissi sono stati considerati gli spostamenti sismici differenziali imponendo dei cedimenti impressi alla struttura (Fig. 7-b).

- Data la complessa geometria strutturale la superficie della cometa è stata suddivisa in varie aree di carico in modo da poter applicare diversi coefficienti di pressione del vento e poter effettuare combinazioni di carico della neve a scacchiera in modo da impegnare al massimo le varie porzioni di struttura.
- Sono stati effettuati test in galleria del vento sia su un modello in scala ridotta della copertura per verificare i coefficienti globali di pressione del vento che su un modello in scala reale per verificare la resistenza a fatica del sistema di collegamento del rivestimento.

4.2 Struttura free form “Nuvola” al Centro Congressi EUR Roma

Costruito sul progetto architettonico dell’Arch. M. Fuksas il nuovo Centro Congressi EUR di Roma comprende la struttura denominata free form denominata “Nuvola” le cui dimensioni e complessità geometrica la rendono una struttura di rilevanza mondiale.

Il complesso Nuvola é formato essenzialmente dalle seguenti sottostrutture:

- lo Scafo, formato da un reticolo ortogonale di travi reticolari piane rese collaboranti con la soletta in calcestruzzo mediante l’applicazione di pioli;
- l’Auditorium, costituito da una struttura reticolare spaziale doppio stato;
- gli impalcati intermedi;
- l’Involucro della Nuvola, realizzata da una struttura a guscio monostrato in acciaio, che in pianta presenta una maglia rettangolare. I profili che la compongono sono dei piatti semplici accoppiati che potendo essere sagomati mediante taglio al pantografo si adattano alle geometrie "libere" architettoniche (Fig. 9).

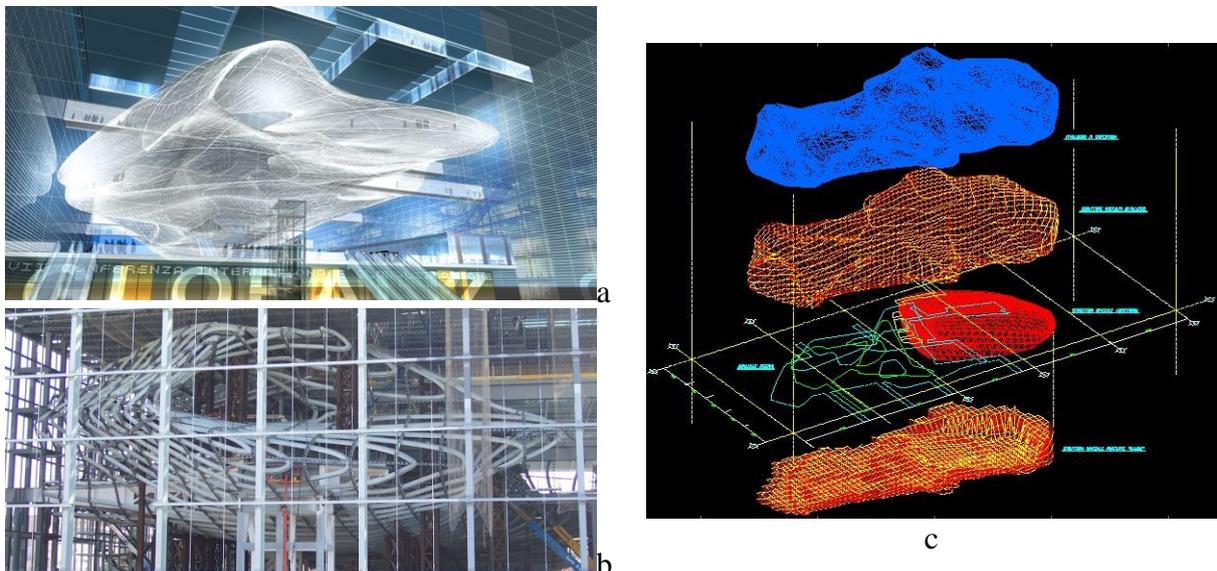


Fig. 9: a) Render dell’involucro della “Nuvola”, b) Struttura in acciaio, c) Modellazione matematica della struttura,

Valutando il comportamento che avrebbe una sì complessa struttura sotto le azioni sismiche, si è deciso di progettare tutto il sistema “Nuvola” secondo i criteri dell’ isolamento sismico; riducendo la vulnerabilità delle strutture attraverso la forte riduzione dei carichi sismici anziché aumentarne la resistenza strutturale. L’inserimento di speciali dispositivi (isolatori) consente di traslare la frequenza fondamentale del sistema isolato in un campo caratterizzato da basso contenuto energetico. Gli isolatori sono caratterizzati da un elevato valore di rigidità orizzontale per piccoli spostamenti e basso valore di rigidità per alti spostamenti. La rigi-

dezza verticale è invece sempre molto elevata, sia per sostenere l'edificio che per evitarne il rollio durante il sisma.

Siccome, in caso di evento sismico, tutto il sistema risulterà più deformabile rispetto a una struttura non isolata, particolare attenzione è stata posta nei confronti delle sottostrutture che presentano limiti di deformabilità e nella progettazione dei giunti strutturali.

5 ESEMPI DI PROGETTAZIONE INTEGRATA

5.1 Struttura reticolare spaziale “Vela” complesso Unipol a Bologna

La copertura reticolare spaziale doppio strato chiamata “Vela” è parte del più ampio progetto della torre UNIPOL e degli altri edifici ad essa connessi (albergo e edifici per vari servizi) costruiti nella zona nord est di Bologna vicino alla tangenziale.

La struttura della copertura è stata realizzata con profili tubolari circolari collegati mediante nodi sferici all'intradosso e profili tubolari a sezione rettangolare collegati da nodi rigidamente flessionalmente all'estradosso. La maglia di estradosso della reticolare è di circa 4x4[m] e la copertura è realizzata con cuscini di membrana ETFE in pressione collegati direttamente ai profili di estradosso della copertura. La superficie della copertura è di 3'600 m² con una luce libera fra gli appoggi laterali di circa 50 m.



a



b

Fig. 10: a) Vista della copertura reticolare spaziale “Vela” e della torre Unipol b) Indagini sui vari tipi di sistemi di rivestimento

Sono state condotte indagini sul sistema di rivestimento, in stretta relazione con la geometria strutturale (Fig. 10-b). Tra le diverse alternative valutate si è optato per un sistema pneumatico di cuscini di ETFE, con un pattern stampato, orientato secondo la direzione Nord-Sud e differenziato su ciascun modulo per ottimizzarne l'effetto schermante (e conseguente ombreggiamento). In tale sistema, l'orientamento del pattern di ciascun modulo pneumatico di ETFE è stato studiato per bloccare la radiazione solare diretta e consentire invece il passaggio della luce naturale; e la modellazione parametrica è stata impiegata per esplorare variazioni

del sistema, minimizzandone il fattore solare (g-value) e massimizzandone la trasmissione della luce indiretta.

5.2 Copertura dei percorsi pedonali per l'EXPO di Milano 2015

L'immagini grafiche del Masterplan EXPO 2015 evidenziano per le coperture dei camminamenti una tipologia strutturale leggera e semplice: la tenda. Dopo una serie di consultazioni eseguite su simulazioni di computer grafica (rendering e filmati 3D) si è deciso di adottare la seguente soluzione strutturale (Fig. 11-a):

- Sistema strutturale orizzontale a tensostruttura in funi a curvature contrapposte e collegamenti di parete verticali;
- Membrana di copertura traslucida presollecitata e stabilizzata mediante stecche o tubi trasversali;
- Strutture verticali d'ancoraggio e supporto in struttura reticolare spaziale;
- Sistema fondazionale a plinti e fondazione d'ancoraggio a gravità.

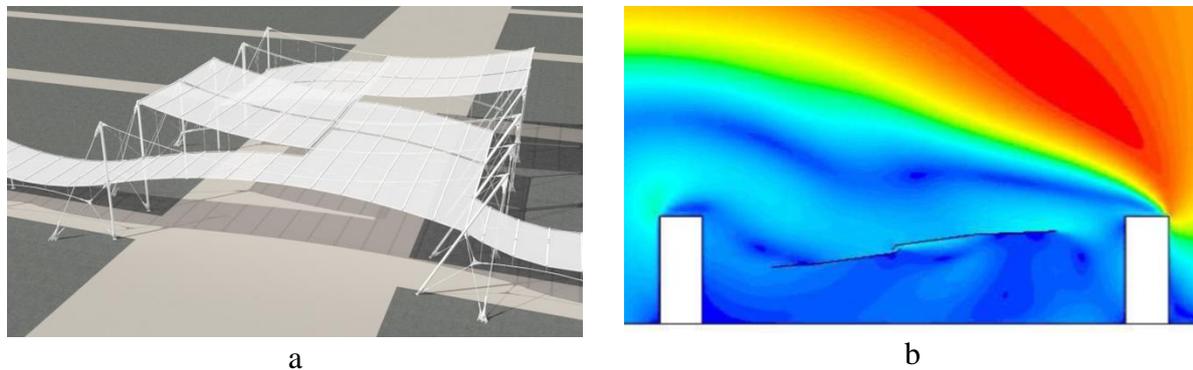


Fig. 11: a) Render della struttura di copertura per i percorsi pedonali b) Simulazione dell'andamento della temperatura sotto le tende tenendo conto dei moti convettivi e della presenza di ostruzioni laterali

La forma della copertura e la distribuzione delle membrane è stata studiata in modo da garantire un buon confort termico per le persone che si trovano nei percorsi pedonali sottostanti. Sono state eseguite modellazioni numeriche per simulare i moti convettivi dell'aria in presenza della struttura e degli edifici circostanti (Fig. 11-b) [1].

10 CONCLUSIONI

Considerando che la progettazione moderna è un processo complesso, olistico, trans-, multi- e interdisciplinare che deve raggiungere un necessario livello di affidabilità rispettando principi generali e regole di fattibilità, la progettazione integrata si presenta come una metodologia, una conoscenza riflessiva che porta ad approcci progettuali appropriati e conformi all'etica della responsabilità civile della tecnologia al fine di limitare le incertezze progettuali fenomenologiche.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Tiziana Poli, Politecnico di Milano, Dipartimento BEST, TISCo Group – PoliMi "Analisi del microclima lungo il grande Boulevard e i percorsi secondari simbolo dell'EXPO 2015. Valutazione preliminare". Edito per EXPO 2015 Spa Milano, 24 Giugno 2011

PAROLE CHIAVE

Free form design, ricerca della forma, tensostrutture, grandi coperture, reticolari spaziali, incertezze progettuali, progettazione integrata.